



Club Alpino Italiano
Commissione Centrale Speleologia e Torrentismo - Scuola Nazionale di Speleologia
Gruppo di Studio **MATERIALI E TECNICHE**



Francesco Salvatori

(INS CAI Sansepolcro - CENS)

CORDE E CORDINI SPELEO-ALPINISTICI

*Caratteristiche, decadimento,
degradazione e limiti di sicurezza*

Ricerca sperimentale e teorica

Testo esteso

221 figure

Prima edizione

© Copyright 2021 - CENS (PG)
ISBN 978-88-941344-3-8

Hanno collaborato alla sperimentazione e all'elaborazione del testo:

Domenico Bocchio (INS Sez. CAI Bolzaneto)

Sergio Celesti (ELTON - CENS)

Francesco Poderini (Sez. CAI Sansepolcro-CENS)

Luca Poderini (INS Sez. CAI Sansepolcro-CENS)

Roberto Silvestrini (CENS)

Michele Tommasi (INS Sez. CAI Bassano del G.)



Club Alpino Italiano
Commissione Centrale Speleologia e Torrentismo - Scuola Nazionale di Speleologia
Gruppo di Studio **MATERIALI E TECNICHE**



Francesco Salvatori

(INS Sezione CAI Sansepolcro – CENS)

Corde e cordini speleo-alpinistici

*Caratteristiche, decadimento,
degradazione e limiti di sicurezza*

Ricerca sperimentale e teorica

221 figure

© Copyright 2021 - CENS (PG)

ISBN 978-88-941344-3-8

Prima edizione

Hanno collaborato alla sperimentazione:

Domenico Bocchio (*INS Sez. CAI Bolzaneto*)

Francesco Poderini (CENS)

Roberto Silvestrini (CENS)

Sergio Celesti (*ELTON - CENS*)

Luca Poderini (*INS Sez. CAI Sansepolcro-CENS*)

Michele Tommasi (*INS Sez. CAI Bassano del G.*)

SOMMARIO

Prefazione	18
Guida alla lettura	19
PARTE I: test quasi-statici con dinamometro a trazione lenta; strumenti e metodologie d'analisi	20
I.01. Strumentazione, modi d'uso e metodi d'analisi	21
I.01.a. Dinamometro	21
I.01.b. Ancoraggi	21
I.01.b.a. Ancoraggi per barre, tondini, fili elementari (elementi isotropi)	22
I.01.b.a.1. Curva sforzo/deformazione fino alla rottura di un campione isotropo, Sforzo a snervamento e Sforzo alla rottura	23
I.01.b.a.2. Curve sforzo/deformazione di carico/scarico di un campione isotropo	27
I.01.b.b. Ancoraggi senza nodi per corde (elementi anisotropi), Carico di rottura senza nodi, Superficie efficace	28
I.01.b.b.1. Curve forza/allungamento fino alla rottura di una corda	30
I.01.b.b.2. Curve forza/allungamento di carico/scarico di una corda	31
I.01.b.b.3. Superficie di plasticità, test d'isteresi per le corde (e cordini) e Analisi Dinamico Meccanica non-lineare	33
I.01.c. Ancoraggi per corde con nodi e bloccanti	34
I.01.c.a. Ancoraggi per corde con nodi	34
I.01.c.b. Ancoraggi per corde con bloccanti	35
I.01.d. Conclusioni	37
PARTE II: test a caduta con trazione veloce su corde speleo-alpinistiche, Torre di Caduta CRASC, strumenti e metodologie d'analisi, Analisi Dinamico Meccanica (DMA)	38
II.01. Strumentazione, modi d'uso e metodi d'analisi	39
II.01.a. Premessa	39
II.01.b. Torre di Caduta CRASC	39
II.01.c. Test a caduta di una corda e Superficie efficace	41
II.01.d. Test a caduta su una corda, nodo d'aggancio alla cella di carico e al peso, lunghezza minima a riposo del campione	42
II.01.e. Test a caduta su una corda, acquisizione di dati sugli allungamenti, sulle forze e sui tempi	44
II.01.f. Test a caduta su una corda, deformazioni dovute alla visco-elasticità delle Poliammidi (Nylon) e analisi dei relativi dati sperimentali	47
II.01.g. Test a caduta su una corda, Modello Analogico Parallelo di Voigt e sua rappresentazione matematica	47

II.01.h.	Test a caduta su una corda, esempio d'elaborazione matematica dei dati di tempo, di forza e d'allungamento per la valutazione della Velocità di deformazione e della visco-elasticità del materiale polimerico e dell'energia in gioco	49
II.02.	Velocità di deformazione	52
II.02.a.	Premessa	52
II.02.b.	Relazione di definizione e campi d'attività	52
II.03.	Esempi emblematici d'analisi su test a caduta su corde e attrezzature speleo	54
II.03.a.	Altezza di caduta e velocità di deformazione crescente, curve di carico/scarico, modulo di elasticità, superfici sottese/energia, energia dissipata	54
II.03.b.	Successione di choc equivalenti sullo stesso campione di corda: variazione del Modulo d'elasticità, quantità decrescente d'energia dissipata per trasformazione viscosa, superficie compresa fra curva di carico e scarico	55
II.03.c.	Cordino Dyneema: variazione del carico di rottura con nodo in funzione della variazione della velocità di deformazione	56
II.03.d.	Moschettoni in lega (e d'acciaio): Carico di rottura/Velocità di deformazione	57
II.03.e.	Bloccante/corda statica: carico di rottura calza, forza massima, allungamento massimo, energia assorbita	58
II.03.f.	Confronto fra longe, bilonge (fettuccia confezionata) e trilonge: carichi di rottura e capacità d'assorbimento energia	59

PARTE III: corde, fili elementari, catene di macromolecole e monomeri; composizione atomico-molecolare e legami chimici; carichi e struttura semicristallina; idratazione e degradazione idrolitica; effetto calore

III.01.	Fili elementari di Nylon (poliammide), composizione chimica, produzione e struttura semi-cristallina	61
III.02.	Catene di macromolecole e loro disposizione nei fili elementari	62
III.03.	Settori cristallini dei fili elementari, legami idrogeno e rafforzamento delle proprietà meccaniche delle poliammidi	64
III.04.	Rapporto spaziale nel filo elementare fra settori cristallini e amorfi: influenza sul carico di rottura e sulla rigidità	65
III.04.a.	Effetto agitazione termica	65
III.04.b.	Costituzione di legami idrogeno intermolecolari	65
III.04.c.	Strutturazione cristallina/amorfa e legami intermolecolari	65
III.04.d.	Formazione dei fili elementari e rapporto cristallino/amorfo	66
III.05.	Correlazioni fra test a trazione lenta/veloce dei fili elementari di una corda ed evoluzione della loro struttura semi-cristallina	66
III.05.a.	Prima premessa: trazione lenta su una corda speleo-alpinistica	66
III.05.b.	Seconda premessa: trazione lenta su un filo elementare di poliammide e modifiche nella disposizione delle catene di macromolecole	67
III.05.c.	Il fattore di ritardo di tempo δ è il parametro che quantizza la differenza fra trazione lenta (quasi- statica) e a caduta (Torre)	69
III.05.d.	Test a caduta ripetuti su una corda con uguale velocità di trazione, modifiche sui fili elementari e nella disposizione delle catene di macromolecole	69

III.05.e.	Test a caduta ripetuti su una corda con velocità di trazione crescente, modifiche sui fili elementari e nella disposizione delle catene di macromolecole	70
III.06.	Acqua e Nylon: igroscopia, idrolisi e modifica caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche	70
III.06.a.	Premessa	70
III.06.b.	Assorbimento igroscopico dell'acqua nel Nylon	70
III.07.	Cristallinità dei fili elementari e assorbimento d'acqua	73
III.08.	Idrolisi dei legami idrogeno nel Nylon: variazioni delle caratteristiche meccaniche dei fili elementari	74
III.09.	Disidratazione, essiccazione e annullamento dell'effetto idrolisi	76
III.10.	Idrolisi nel Nylon e variazione delle caratteristiche meccaniche	76
III.10.a.	Contenuto d'umidità, idrolisi e sforzo a snervamento	76
III.10.b.	Contenuto d'umidità, raggio d'intaglio e resistenza all'urto	78
III.10.c.	Analisi Dinamica Meccanica, usura a fatica e tasso d'umidità	78
III.10.d.	Conclusioni	79
III.11.	Temperatura di transizione vetrosa del Nylon e umidità	79
III.11.a.	Premessa	79
III.11.b.	Calcolo sperimentale dell'influenza dell'umidità sulla temperatura di transizione vetrosa	79
III.12.	Polimerizzazione, depolimerizzazione e variazioni del peso molecolare medio delle macromolecole	80
III.12.a.	Premessa	80
III.12.b.	Polimerizzazione	80
III.12.c.	Depolimerizzazione	81
III.12.d.	Depolimerizzazione, diminuzione del peso molecolare medio e diminuzione dello sforzo a rottura	81
III.13.	Degradazione dei polimeri	82
III.13.a.	Degradazione idrolitica con perdita di massa (erosione)	82
III.13.b.	Degradazione idrolitica per diminuzione di peso e riduzione dello sforzo alla rottura σ_r dei fili elementari	84
III.13.c.	Degradazione idrolitica con diminuzione del peso molecolare numerico M_n dei polimeri	84
III.13.d.	Degradazione idrolitica per diminuzione di peso molecolare numerico M_n e riduzione dello sforzo alla rottura σ_r dei fili elementari	85
III.13.e.	Degradazione idrolitica: velocità e reversibilità	86
III.13.f.	Foto degradazione	86
III.13.g.	Degradazione per ozonolisi	86
III.13.h.	Degradazione per ossidazione	86
III.13.i.	Degradazione per pirolisi o decondensazione	86
III.13.l.	Degradazione a seguito di sollecitazioni statiche	87
III.13.m.	Considerazioni sintetiche sulla degradazione dei polimeri	88

III.14. Calore nelle corde: influenza sulle proprietà meccaniche e sulle caratteristiche chimico-fisiche dei fili elementari	90
III.14.a. Misurazione del calore prodotto sulla corda durante la progressione in grotta verticale su corda (e nell'arrampicata sportiva)	90
III.14.b. Rapporto cristallino/amorfo in funzione del calore prodotto o sottratto: temperatura di transizione vetrosa T_g	91
III.14.b.a. Temperatura/modulo d'elasticità e temperatura/sforzo a snervamento del Nylon 6.6	91
III.14.b.b. Diagrammi temperatura/modulo elasticità in funzione del grado di cristallinità del Nylon e polimeri diversi	93
III.14.c. Temperatura di transizione vetrosa e quantità d'acqua assorbita igroscopicamente dal Nylon 6.6	93
III.14.d. Rottura delle corde nel nodo: ruolo della temperatura di transizione vetrosa	95
III.14.e. Irreversibilità delle trasformazioni cristallino/amorfo dovute alle variazioni di temperatura: decadimento delle proprietà meccaniche dei fili elementari di Nylon	100
III.14.e.a. Processo di raffreddamento per la formazione di fili elementari	100
III.14.e.b. Formazione dei fili elementari, temperatura, tempo di raffreddamento e cristallinità	101
III.14.e.c. Cicli di riscaldamento/raffreddamento nella progressione in grotta (e arrampicata sportiva): trasformazioni irreversibili nei fili elementari di Nylon e decadimento delle proprietà meccaniche delle corde	101

PARTE IV: corde speleo-alpinistiche, effetto idrolisi/asciugatura, test quasi – statici (trazione lenta)

IV.01. Test quasi - statici a conferma della riduzione del carico di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} delle corde speleo - alpinistiche, nuove e usate, per l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari causata della presenza d'acqua igroscopica nei fili elementari	105
IV.01.a. Premessa	105
IV.01.b. Riassunto sintetico delle conoscenze teoriche e sperimentali	105
IV.01.b.a. La quantità d'acqua assorbita dipende dal grado di cristallinità dei fili elementari delle corde	105
IV.01.b.b. La diffusione igroscopica dell'acqua nei fili elementari segue la Legge di Fick	106
IV.01.b.c. La diffusione igroscopica dell'acqua nei fili elementari dipende dal loro diametro	106
IV.01.b.d. I legami idrogeno intermolecolari fra le catene di macromolecole del Nylon si realizzano quasi esclusivamente nei settori cristallini	106
IV.01.b.e. Il numero di legami idrogeno e l'estensione delle zone cristalline determinano le caratteristiche meccaniche delle fibre polimeriche	106
IV.01.b.f. Il rapporto fra l'estensione delle zone cristalline e l'estensione dei settori amorfi dei fili elementari dipende anche dalla "qualità" del polimero	106
IV.01.b.g. Qualità del polimero ed entità dell'effetto idrolisi	106
IV.01.b.h. L'effetto riduttivo della presenza di nodi d'aggancio alle estremità dei campioni di corda dipende anche dalla Temperatura di Transizione Vetrosa del polimero che costituisce i fili elementari	106

IV.01.b.i.	La Temperatura di Transizione Vetrosa è in funzione del tipo di polimero, del suo grado di cristallinità e dell'umidificazione	106
IV.01.b.j.	Asciugatura	107
IV.01.c.	Scopi della ricerca	107
IV.01.d.	Condizioni sperimentali	107
IV.01.e.	Risultati sperimentali	108
IV.01.e.a.	Idratazione-idrolisi	109
IV.01.e.a.1.	Corda Edelrid Static 10 mm Nuova	109
IV.01.e.a.1.1.	Prima considerazione: dopo l'immersione in acqua (U.R. 100 %) l'effetto riduttivo dell'idrolisi si manifesta completamente e rapidamente	109
IV.01.e.a.1.2.	Seconda considerazione: l'entità dell'effetto riduttivo per idrolisi si raddoppia in presenza di nodi; ruolo della Temperatura di Transizione Vetrosa	109
IV.01.e.a.1.3.	Terza considerazione: l'effetto per idrolisi combinato all'effetto nodo	110
IV.01.e.a.2.	Corda Edelrid Static 10 mm Usata	110
IV.01.e.a.2.1.	Prima considerazione: analogia nelle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ della corda nuova e usata	110
IV.01.e.a.2.2.	Seconda considerazione: effetto idrolisi ridotto	110
IV.01.e.a.3.	Corda Beal Antipodes Statica 10 mm Nuova	111
IV.01.e.a.3.1.	Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello della Edelrid Static precedentemente esaminata	111
IV.01.e.a.3.2.	Seconda considerazione: cambiano le percentuali dell'effetto idrolisi	111
IV.01.e.a.4.	Corda Beal Antipodes 10 mm Usata	112
IV.01.e.a.4.1.	Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello della stessa corda nuova	112
IV.01.e.a.4.2.	Seconda considerazione: si conferma il risultato sperimentale che l'effetto nodo nelle corde usate è minore	113
IV.01.e.a.4.3.	Terza considerazione: le percentuali dell'effetto idrolisi e dell'effetto nodo fanno discendere i carichi di rottura sotto il valore del LIR	113
IV.01.e.a.5.	Corda Cousin Testec 10 mm nuova	113
IV.01.e.a.5.1.	Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello delle due corde statiche precedentemente esaminate	113
IV.01.e.a.5.2.	Seconda considerazione: ridotto effetto idrolisi ma pari effetto complessivo – E' la corda che mostra la più bassa percentuale riduttiva per effetto idrolisi, fermandosi ad appena il 6 % e attestando, quindi, una qualità inferiore dei fili elementari	114

IV.01.e.a.6.	Corda Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm Nuova	114
IV.01.e.a.7.	Corda Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm Nuova e Usata	115
IV.01.e.a.8.	Tabella di sintesi per l'Effetto Idrolisi e Nodo	117
IV.01.e.a.8.1.	Prima considerazione: effetto idrolisi e qualità delle fibre utilizzate per il confezionamento delle corde	117
IV.01.e.a.8.2.	Seconda considerazione: effetto idrolisi come misura della cristallinità del Nylon nei fili elementari delle corde	117
IV.01.e.a.8.3.	Terza considerazione: effetto idrolisi e corde usate	118
IV.01.e.a.8.4.	Quarta considerazione: effetto nodo su corde nuove asciutte	118
IV.01.e.a.8.5.	Quinta considerazione: la condizione reale con effetto idrolisi sommato a effetto nodo	118
IV.01.e.b.	Asciugatura	119
IV.01.e.b.1.	Corda Edelrid Static 10 mm Nuova	119
IV.01.e.b.1.1.	Prima considerazione: evoluzione temporale dell'asciugatura di una corda nuova	119
IV.01.e.b.2.	Corda Edelrid Static 10 mm Usata	120
IV.01.e.b.3.	Per tutte le altre corde sottoposte ad asciugatura	120

PARTE V: test a trazione quasi-statica (lenta) su corde speleo-alpinistiche, valutazione decadimento irreversibile in funzione del tempo e del modo d'uso, degradazione idrolitica, effetto calore e choc ripetuti, immersione prolungata in acqua 121

V.01.	Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)	122
V.01.a.	Condizioni sperimentali iniziali	123
V.01.b.	Elenco dei campioni di corda (G. Grotte assegnatari) e relazioni sul loro uso	123
V.01.c.	Test a rottura della corda senza nodo F_r	124
V.01.d.	Test a rottura della corda con nodo F_{rn} (guida con frizione)	124
V.01.e.	Curve di carico/scarico con trazione fino a 1600 kgp	124
V.01.f.	Carico/scarico Corde 1 - 16 sintesi	134
V.01.g.	Riduzione diametro efficace	135
V.01.h.	Riduzione lunghezza campioni	137
V.01.i.	Carico di rottura senza nodi	138
V.01.j.	Effetto nodo	138
V.01.k.	Confronto analitico fra F_r e F_{rn}	139
V.01.l.	Conclusioni	140
V.02.	Corda speleo nuova non usata per 18 anni	140
V.03.	Corde con utilizzo intenso, ridotto e ridottissimo	140
V.03.a.	Modalità d'esecuzione delle prove sperimentali e risultati	141
V.03.b.	Conclusioni	143

V.04.	Test a conferma del decadimento delle corde per la degradazione idrolitica, la fotodegradazione, i gas ossidanti, le sollecitazioni ripetute e la trasmissione di calore	144
V.04.a.	Condizioni sperimentali	144
V.04.b.	Confronto sperimentale fra la Corda Beal Antipodes 10 mm statica Nylon 6, la Corda Beal Booster III 9,7 mm dinamica Nylon 6 e la Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm statica Nylon 6.6	147
V.04.b.a.	Corda Beal Antipodes	148
V.04.b.b.	Depolimerizzazione con agenti acidificanti	153
V.04.b.c.	Confronto fra test su corda usata in grotta e corda usata in arrampicata sportiva	154
V.04.b.d.	Confronto fra test su corda di Nylon 6 e corda Nylon6.6 e conseguenze per diversa Temperatura di fusione T_m	154
V.05.	Decadimento differenziato di una corda su armo speleo	155
V.05.a.	Premessa	155
V.05.b.	Conclusioni	156
V.05.b.a.	Decadimento complessivo	156
V.05.b.b.	Decadimento nei tratti con <i>attività dinamica</i> (discesa/risalita)	156
V.05.b.c.	Decadimento nei tratti <i>non dinamici</i> (pressione/compressione/collegamento)	156
V.05.b.d.	Decadimento nei tratti <i>non dinamici</i> (pressione/compressione)	156
V.05.b.e.	Decadimento della "Bambolina" (matassa) raccolta a fine corda	156
V.05.b.f.	Analogie nei risultati sperimentali in merito al decadimento irreversibile delle corde per contatto con l'acqua	157
V.06.	Decadimento differenziato di una corda usata, asciutta e bagnata su armo speleo fisso (6 anni): valutazione con i carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn}; altro esempio di valutazione dei tempi d'utilizzo in sicurezza di una corda nella progressione speleologica	157
V.06.a.	Premessa	157
V.06.b.	Condizioni sperimentali	159
V.06.c.	Prima considerazione: decadimento differenziato	159
V.06.d.	Seconda considerazione: decadimento per il solo effetto-idrolisi	160
V.06.e.	Terza considerazione: valutazione del decadimento irreversibile nel tratto di corda che ha subito solo l'esposizione all'ambiente – grotta	160
V.06.f.	Quarta considerazione: quantizzazione dei tempi d'usura e per il raggiungimento dei limiti di sicurezza e affidabilità	160
V.07.	Degradazione e recupero di corde nuove per 5 anni immerse in acqua e poi per 13 anni conservate in magazzino al buio e asciutte; le variazioni del Carico di rottura senza nodi F_r in condizioni asciutte e asciugate; costruzione delle curve di carico/scarico	161
V.07.a.	Condizioni sperimentali	161
V.07.b.	Grafici con curve di carico/scarico	163
V.07.c.	Grafici della diminuzione di F_r delle corde asciutte e asciugate in funzione del tempo trascorso in immersione in acqua	164
V.07.c.a.	Prima ipotesi di decadimento: degradazione idrolitica con perdita di peso	164

V.07.c.b.	Seconda ipotesi di decadimento: degradazione idrolitica con diminuzione di Peso molecolare numerico M_n	165
V.07.c.c.	Il meccanismo di cinetica chimica che guida la degradazione idrolitica nel suo complesso	166
V.07.d.	Raffronto fra le sperimentazioni su corde con immersione prolungata in acqua o esposizione nell'ambiente - grotta	166
V.07.d.a.	Matassa (bambolina) al fondo della corda nel Pozzo Pataton	167
V.07.d.b.	Tratto di corda finale inutilizzato nel Pozzo della Scala Celeste	167
V.07.d.c.	Corda nuova rimasta in immersione per 1781 giorni	167
V.07.d.d.	Compatibilità nei valori di degrado	167
V.07.d.e.	Valori decrescenti con diametro apparente decrescente	167
V.07.e.	Reversibilità degli effetti dovuti all'immersione in acqua, recupero del Carico di rottura F_r e del Modulo d'elasticità E	167
V.07.e.a.	Decadimento e recupero parziale del Carico di rottura F_r	169
V.07.e.a.1.	Prima osservazione: degradazione idrolitica per perdita di peso (irreversibile) e per diminuzione di peso molecolare numerico M_n (reversibile)	169
V.07.e.a.2.	Seconda osservazione: recupero parziale delle proprietà meccaniche per la reversibilità della degradazione idrolitica per variazione del Peso molecolare numerico	169
V.07.e.a.3.	Terza osservazione: rapporto fra i contributi della Degradazione idrolitica per perdita di peso e Degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare numerico	169
V.07.e.a.4.	Quarta osservazione: il recupero dell'effetto "Degradazione idrolitica per diminuzione di Peso molecolare numerico" avviene completamente e si mantiene nel tempo	169
V.07.e.a.5.	Quinta osservazione: indeterminazione del tempo minimo necessario per il recupero della Degradazione idrolitica (per Diminuzione del Peso molecolare numerico) e dell'andamento della curva	170
V.07.e.b.	Recupero parziale del Modulo d'elasticità E	170
V.07.e.c.	Conclusioni e contributo dell'immersione in acqua delle corde all'usura complessiva delle corde	171

PARTE VI: corde speleo-alpinistiche, test a caduta in funzione del n° degli choc e della velocità di deformazione V_d , l'energia in gioco, l'influenza della visco-elasticità e della Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC)

VI.01.	Test per valutare il decadimento delle corde speleo-alpinistiche per effetto di choc a caduta ripetuti in successione e con velocità di deformazione crescente	174
VI.01.a.	Condizioni sperimentali	175
VI.01.b.	Diagrammi ottenuti e raccolta, organizzazione e tabellazione dei risultati	176
VI.01.c.	I parametri ricavati con l'analisi sulla velocità di deformazione, sull'elasticità, sulle forme d'energia dissipanti o conservative e con l'Analisi Dinamica Meccanica sulla visco-elasticità	177

VI.01.d.	I diversi modi di dissipazione dell'energia nei campioni di corda sollecitati a caduta	178
VI.01.d.a.	Primo tipo di dissipazione dell'energia: compattazione della struttura complessa della corda (CSCC)	178
VI.01.d.b.	Secondo tipo di dissipazione dell'energia: reazione visco-elastica dei fili elementari	179
VI.01.d.c.	Terzo tipo di dissipazione dell'energia: lavoro alla rottura dei fili elementari	180
VI.01.d.d.	Quarto tipo di dissipazione dell'energia: attriti fra i componenti della struttura complessa di una corda	181
VI.01.e.	Variazioni del Tempo di ritardo $\tan \alpha$ in funzione del Numero di choc $n^\circ \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione V_d	181
VI.01.f.	Variazioni del Fattore di perdita δ_{tempo} in funzione del Numero di choc $n^\circ \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione V_d	182
VI.01.f.a.	Premessa	182
VI.01.f.b.	Dinamica della disgregazione della disposizione cristallina/amorfa dei fili elementari: le fasi di spacchettamento dell'organizzazione delle catene di macromolecole	183
VI.01.f.c.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm <u>nuova</u> (Nylon 6)	186
VI.01.f.c.1.	Premessa	186
VI.01.f.c.2.	Modalità di costruzione dei grafici	187
VI.01.f.c.3.	Indicazioni di base per l'analisi dei grafici	187
VI.01.f.c.4.	Prima considerazione: la disposizione univoca delle curve	187
VI.01.f.c.5.	Seconda considerazione: l'andamento similare delle curve	187
VI.01.f.c.6.	Terza considerazione: la variazione differenziata della decrescita della visco-elasticità	187
VI.01.f.c.7.	Quarta considerazione: amplificazione, al crescere dell'altezza di caduta del peso, degli effetti prodotti dalla successione degli choc	188
VI.01.f.c.8.	Quinta considerazione: valutazione del contributo del Modulo di viscosità E'' alle variazioni del Fattore di perdita $\tan \delta = E''/E'$	189
VI.01.f.d.	Confronto fra i dati della Corda statica Beal Antipodes 10 mm, <u>nuova e usata</u>	190
VI.01.f.d.1.	Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\tan \delta$ della serie di curve	191
VI.01.f.d.2.	Seconda considerazione: diminuzione della Sezione efficace nelle corde usate	192
VI.01.f.d.3.	Terza considerazione: valutazione dei contributi degradanti nella corda	192
VI.01.f.e.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Cavalieri Cave Explorer <u>nuova</u> (Nylon 6.6)	193
VI.01.f.e.1.	Premessa	193

VI.01.f.f.	Confronto fra i dati della Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nylon 6.6, <u>nuova e usata</u>	194
VI.01.f.f.1.	Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\text{tang } \delta$ dell'insieme di curve	194
VI.01.f.f.2.	Seconda considerazione: diminuzione della Superficie efficace S_e nella corda usata	195
VI.01.f.f.3.	Terza considerazione: valutazione dei singoli contributi degradanti nella corda	196
VI.01.f.g.	Confronto fra i dati della Corda statica Beal Antipodes 10 mm <u>Nylon 6</u> e la Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10, 6 mm <u>Nylon 6.6</u> , nuove e usate	197
VI.01.f.g.1.	Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\text{tang } \delta$ dell'insieme di curve	197
VI.01.f.g.2.	Seconda considerazione: valutazione e confronto dei valori di $\text{tang } \delta$ in funzione della Velocità di deformazione e del tipo di poliammide	198
VI.01.f.h.	Valutazione dei dati della Corda <u>dinamica</u> Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6 e confronti con la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm Nylon 6	202
VI.01.f.h.1.	Prima considerazione: valutazione delle differenze nel Fattore di perdita fra corda <u>dinamica</u> nuova e corda <u>statica</u> nuova, entrambe di Nylon 6	202
VI.01.f.i.	Valutazione e confronto dei dati della Corda <u>dinamica</u> Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6, nuova e usata	203
VI.01.g.	Valutazione del contributo dissipativo del calore % Calore prodotto dagli attriti negli allungamenti differenziati fra i componenti della struttura complessa della corda in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d	204
VI.01.g.a.	Premessa	204
VI.01.g.b.	Metodo di calcolo	205
VI.01.g.c.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm <u>nuova</u> (Nylon 6)	206
VI.01.g.c.1.	Prima considerazione: il contributo degli attriti alla dissipazione dell'energia in funzione del n° di choc subiti e dell'altezza di caduta del peso (V _d)	206
VI.01.g.d.	Confronto fra la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6), nuova e usata	207
VI.01.g.e.	Confronto fra Corda statica Beal Antipodes (Nylon 6) e Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm (Nylon 6.6), entrambe nuove	208
VI.01.g.f.	Confronto fra la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) e Corda <u>dinamica</u> Beal Booster 9,7 mm (Nylon 6), entrambe nuove	209
VI.01.h.	Valutazione della Percentuale d'energia dissipata % Dissipazione in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d	210
VI.01.h.a.	Premessa	210
VI.01.h.b.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) <u>nuova</u>	211
VI.01.h.b.1.	Prima considerazione: pendenze variabili delle curve	212

VI.01.h.b.2.	Seconda considerazione: cause che portano alla diminuzione di deformabilità percentuale % Dissipazione	213
VI.01.h.b.3.	Terza considerazione: contributo della CSCC all'assorbimento dell'energia della caduta del peso	215
VI.01.h.b.4.	Quarta considerazione: prime indicazioni sperimentali sulle modalità e quantità proprie della dissipazione d'energia dovuta alla CSCC	216
VI.01.h.c.	Confronto fra Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6), nuova e usata	216
VI.01.h.c.1.	Prima considerazione: punto d'origine comune	216
VI.01.h.c.2.	Seconda considerazione: aumento apparente	216
VI.01.h.c.3.	Terza considerazione: CSCC drasticamente ridotta	217
VI.01.h.c.4.	Quarta considerazione : diminuzione della capacità d'assorbire energia in aggiunta alla diminuzione della Superficie efficace	217
VI.01.h.d.	Valutazione per Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) del gradiente di progressione della % Dissipazione in funzione del n° di choc e della Velocità di deformazione V_d	217
VI.01.h.d.1.	Premessa	217
VI.01.h.d.2.	Prima considerazione: costanza dei valori di Allungamento massimo	218
VI.01.h.e.	Valutazione per Corda <u>statica</u> Cavalieri Cave Explorer nuova 10,6 mm (Nylon 6.6) del gradiente di progressione della % Dissipazione in funzione del n° di choc e della Velocità di deformazione V_d	219
VI.01.h.f.	Considerazioni in merito all'andamento e all'inversione delle dislocazioni delle curve nelle Corde statiche Cavalieri Cave Explorer Nylon 6.6 e Beal Antipodes Nylon 6	220
VI.01.h.g.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Cavalieri Cave Explorer (Nylon 6.6) <u>usata</u>	222
VI.01.h.h.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>dinamica</u> Beal Booster III (Nylon 6) <u>nuova</u>	222
VI.01.h.h.1.	Prima considerazione: andamento e dislocazioni analoghe con la corda statica Cave Explorer Nylon 6.6	223
VI.01.h.h.2.	Seconda considerazione: andamento e dislocazioni delle curve della corda dinamica Beal Booster III Nylon 6 usata	224
VI.01.h.h.3.	Terza considerazione: valutazione del contributo dissipativo della CSCC	224
VI.01.h.h.4.	Quarta considerazione: valutazione del contributo dissipativo della CSCC su corde usate	226
VI.01.i.	Valutazione delle variazioni del Modulo d'elasticità E in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d	227
VI.01.i.a.	Premessa	227
VI.01.i.b.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm, <u>nuova e usata</u> Nylon 6	230

VI.01.i.b.1.	Prima considerazione: progressivo aumento della rigidità con il succedersi del n° degli choc e con l'aumento dell'altezza di caduta del peso	230
VI.01.i.b.2.	Seconda considerazione: confronto con l'equivalente corda usata	231
VI.01.i.c.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>statica</u> Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm, <u>nuova e usata</u> Nylon 6.6	232
VI.01.i.c.1.	Prima considerazione: identità sostanziale con quanto registrato per la corda statica Antipodes Nylon 6	232
VI.01.i.c.2.	Seconda considerazione: confronto con l'equivalente corda usata	232
VI.01.i.d.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda <u>dinamica</u> Beal Booster III <u>nuova</u> Nylon 6 e confronto con la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes nuova Nylon 6	233
VI.01.i.d.1.	Prima considerazione: valutazione del contributo della CSCC nella dissipazione d'energia nella corda dinamica	234
VI.01.i.d.2.	Seconda considerazione: confronto con la corda statica usata Antipodes	234
VI.01.j.	Valutazione delle variazioni della Superficie efficace S_e in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d	235
VI.01.j.a.	Premessa	235
VI.01.j.b.	Condizioni sperimentali	236
VI.01.j.c.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm Nylon 6	236
VI.01.j.c.1.	Prima considerazione: variazione della Superficie efficace della corda nuova	237
VI.01.j.c.2.	Seconda considerazione: variazione della Superficie efficace della corda usata	237
VI.01.j.d.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda <u>statica</u> Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nylon 6.6 e confronto con la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm Nylon 6	237
VI.01.j.d.1.	Prima considerazione: il Nylon 6.6 è migliore del Nylon 6	237
VI.01.j.e.	Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda <u>dinamica</u> Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6 e confronto con la Corda <u>statica</u> Beal Antipodes 10 mm Nylon 6	238
VI.01.j.e.1.	Prima considerazione: proprietà peggiori per una Corda dinamica	239

PARTE VII: cordini speleo-alpinistiche, test a caduta in funzione del n° degli choc e della velocità di deformazione V_d , la visco-elasticità, le deformazioni reversibili e irreversibili, il decadimento delle fibre di Dyneema e Kevlar, l'analisi termografica della rottura sul nodo

VII.01.	Cordini di Dyneema, Kevlar o Nylon 6: caratteristiche strutturali e proprietà meccaniche, natura chimica delle fibre che li compongono	242
---------	--	-----

VII.01.a.	Proprietà meccaniche e termiche dei cordini	242
VII.01.b.	Struttura chimica delle macromolecole, organizzazione delle catene polimeriche nei fili elementari, cristallinità e resistenza agli allungamenti e alla rottura	244
VII.01.b.a.	Il Dyneema, fibra di polietilene	244
VII.01.b.a.	Il Kevlar, fibra aramidica	245
VII.02.	Cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6: analisi dei risultati sperimentali e confronto con la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova	247
VII.02.a.	Condizioni sperimentali	247
VII.02.b.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 8 mm nuovo	249
VII.02.b.a.	Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova	249
VII.02.b.a.1.	Premessa	249
VII.02.b.a.2.	Condizioni sperimentali	250
VII.02.b.a.3.	Prima considerazione: diversità nel valore del Modulo d'elasticità	251
VII.02.b.a.4.	Seconda considerazione: confronto fra la dislocazione delle curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ della Corda e del Cordino	251
VII.02.b.a.5.	Terza considerazione: valutazione dell'andamento delle curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del Cordino Dyneema 8 mm e della Corda Antipodes	252
VII.02.b.a.6.	Quarta considerazione: valutazione del rapporto fra le variazioni irreversibili di natura viscosa ed elastica	255
VII.02.c.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 5,5 mm nuovo	258
VII.02.c.a.	Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con il cordino Dyneema 8,0 mm e con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova	258
VII.02.c.a.1.	Premessa	258
VII.02.c.a.2.	Prima considerazione: ulteriore anomalo aumento del Modulo d'elasticità	258
VII.02.c.a.3.	Seconda considerazione: valutazione dell'andamento della curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del Cordino Dyneema 5,5 mm	259
VII.02.c.a.4.	Terza considerazione: valutazione del rapporto fra le variazioni irreversibili di natura viscosa ed elastica	260
VII.02.c.a.5.	Quarta considerazione: coincidenza dell'andamento e della dislocazione delle curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ e $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$	261
VII.02.d.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Courant Kevlar 5,5 mm nuovo e confronto fra fibre ad altissima tenacità	262
VII.02.d.a.	Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e il Cordino Dyneema 5,5 mm	262
VII.02.d.a.1.	Premessa	262
VII.02.d.a.2.	Prima considerazione: ulteriore aumento iniziale del Modulo d'elasticità del Cordino	262

VII.02.d.a.3.	Seconda considerazione: al contrario di quanto accade per i Cordini Dyneema la curva $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ del Cordino Kevlar è discendente	264
VII.02.d.a.4.	Terza considerazione: dislocazione uguale ma andamento opposto delle curve $E' = f(n^{\circ} \text{ choc})$ ed $E'' = f(n^{\circ} \text{ choc})$ rispetto ai Cordini Dyneema	265
VII.02.d.a.4.1.	Proprietà meccaniche delle fibre polimeriche e struttura delle catene di macromolecole	265
VII.02.d.a.4.2.	Dislocazione delle curve E' ed E'' , struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nella Corda Antipodes 10 mm	266
VII.02.d.a.4.3.	Dislocazione delle curve E' ed E'' , struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nei Cordini Dyneema 5,5 mm e 8 mm	267
VII.02.d.a.4.4.	Le deformazioni permanenti nei settori cristallini a seguito della successione degli choc e l'aumento dei Moduli elastici E'	267
VII.02.d.a.4.5.	Dislocazione delle curve E' e E'' , struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nel Cordino Kevlar 5,5 mm	268
VII.02.d.a.5.	Quarta considerazione: analisi delle curve del Fattore di perdita $\text{tang } \delta = f(n^{\circ} \text{ choc})$	270
VII.02.d.a.6.	Quinta considerazione: analisi delle curve della percentuale di dissipazione $\% \text{ Dissipazione} = f(n^{\circ} \text{ choc})$	270
VII.02.e.	Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Beal Nylon 6 5,5 mm nuovo	271
VII.02.e.a.	Prima considerazione: evidenza del ruolo dissipativo preponderante della CSCC	271
VII.03.	Cordini nuovi di Dyneema, kevlar e Nylon 6: valutazione della riduzione del Carico di rottura con nodi F_{rn} in funzione della Velocità di deformazione V_d	274
VII.03.a.	Condizioni sperimentali	274
VII.03.b.	Analisi dei grafici delle curve $F_{rn} = f(V_d)$ anche in confronto con quanto accade con la Corda Antipodes 10 mm	274
VII.03.b.a.	Prima considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r a trazione lenta ($V_d = 0$)	274
VII.03.b.b.	Seconda considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r in funzione della Velocità di deformazione V_d	275
VII.03.b.c.	Terza considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r in funzione della Velocità di deformazione V_d per Corde e Cordini in Nylon 6	276
VII.04.	Cordini nuovi di Dyneema e Kevlar: valutazione termografica delle temperature durante la trazione quasi-statica fino alla rottura nel nodo	276
VII.04.a.	Premessa	276
VII.04.b.	Condizioni sperimentali	276
VII.04.c.	Analisi dei risultati sperimentali per il cordino Dyneema 5,5 mm	277
VII.04.c.a.	Prima considerazione: fattori che determinano la rottura del Cordino sul nodo	277

VI.04.c.a.1.	Dimensioni ridotte della Superficie efficace	277
VI.04.c.a.2.	Sulla calza di Nylon 6.6 il superamento della Temperatura di transizione vetrosa modifica bruscamente le proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle fibre polimeriche	277
VI.04.c.a.3.	L'alta cristallinità del Dyneema con catene ripiegate disposte parallelamente all'asse longitudinale dei fili elementari	277
VII.04.d.	Analisi dei risultati sperimentali per il cordino Kevlar 5,5 mm	277
VII.04.d.a.	Prima considerazione: fattori che determinano la rottura del Cordino sul nodo con Effetto-nodo esorbitante	278
VI.04.d.a.1.	Dimensioni ridotte della Superficie efficace	279
VI.04.d.a.2.	Il contatto fra calza di Nylon 6.6 e l'anima di Kevlar è un punto di debolezza	279
VI.04.d.a.3.	Legami molecolari e intermolecolari e variazioni di cristallinità	279
VII.04.e.	Conclusioni e richiami per ulteriori ricerche	279

PARTE VIII: APPENDICI, proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle fibre polimeriche, tabelle di sintesi dei dati relativi ai test a trazione quasi-statica e a caduta, grafici dei processi d'asciugatura delle corde sottoposte ai test di valutazione dell'effetto idrolisi 280

VIII.01.	Tabelle proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei polimeri usati nel confezionamento delle corde e dei cordini speleo-alpinistiche	281
VIII.02.	Tabelle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle Corde e dei Cordini utilizzati nelle sperimentazioni a trazione quasi-statica e a caduta	282
VIII.03.	Tabelle di sintesi dei test a caduta delle Corde e Cordini	283
VIII.03.a.	Legenda	283
VIII.03.b.	Corda: Beal Antipodes 10 mm Nuova	287
VIII.03.c.	Corda: Beal Antipodes 10 mm Usata	289
VIII.03.d.	Corda: Beal Booster III 9,7 mm Nuova	291
VIII.03.e.	Corda: Beal Booster III 9,7 mm Usata	293
VIII.03.f.	Corda: Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nuova	295
VIII.03.g.	Corda: Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Usata	297
VIII.03.h.	Cordino: Beal Nylon 5,5 mm Nuovo	299
VIII.03.i.	Cordino: Courant Kevlar 5,5 mm Nuovo	299
VIII.03.j.	Cordino: Repetto Dyneema 5,5 mm Nuovo	299
VIII.03.k.	Cordino: Repetto Dyneema 8,0 mm Nuovo	299
VIII.04.	Grafici dei processi d'asciugatura delle corde sottoposte ai test di valutazione dell'effetto idrolisi	300
VIII.04.a.	Corda Beal Antipodes Statica 10 mm Nuova	300
VIII.04.b.	Corda Beal Antipodes Statica 10 mm Usata	300
VIII.04.c.	Corda Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm Nuova	301

VIII.04.d.	Corda Cousin Testec 10 mm Nuova	301
VIII.04.e.	Corda Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm Nuova	302
VIII.04.f.	Corda Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm Usata	302
VIII.05.	Calcolo della Superficie efficace S_e di una corda	303
VIII.06.	Valutazione della visco-elasticità e delle sue variazioni in un materiale polimerico isotropo: Esperimento di Creep, Analisi Dinamico Meccanica (DMA) Lineare e Non-lineare	305
VIII.06.a.	Premessa	305
VIII.06.b.	Teoria e sviluppo dell'Esperimento "Creep" su un materiale isotropo visco-elastico	307
VIII.06.b.a.	Primo passo	308
VIII.06.b.b.	Secondo passo	308
VIII.06.b.c.	Terzo passo	308
VIII.06.c.	Teoria e sviluppo dell'Analisi Dinamico Meccanica <u>Lineare</u> su un materiale isotropo visco-elastico	309
VIII.06.c.a.	Modulo complesso, Modulo conservativo, Modulo dissipativo e Fattore di perdita	309
VIII.06.c.b.	Cedevolezza complessa, Cedevolezza conservativa, Cedevolezza dissipativa e Fattore di perdita	310
VIII.06.c.c.	Energia (e potenza) in gioco nei cicli d'isteresi	311
VIII.06.c.d.	Coefficiente di viscosità η del materiale polimerico	312
VIII.06.d.	Teoria e sviluppo dell'Analisi Dinamico Meccanica <u>Non-lineare</u> su un materiale visco-elastico con test a caduta di un peso	312
VIII.06.d.a.	Impostazioni teoriche ed elaborazioni matematiche analoghe a quelle della DMA Lineare	313
VIII.06.d.b.	Sintesi dell'elaborazione dei Moduli, del Fattore di perdita e delle Relazioni per il calcolo dell'Energia e della Potenza in gioco nella DMA Non-lineare	313
VIII.07.	L'Esperimento di Creep su una Corda speleo-alpinistica: valutazione dei diversi aspetti della sua deformabilità	314
VIII.07.a.	Premessa	314
VIII.07.b.	Le corde speleo-alpinistiche sono elementi anisotropi geometricamente	314
VIII.07.c.	La deformabilità complessiva di una corda speleo-alpinistica	314
VIII.07.d.	Esperimento di Creep su corda speleo-alpinistica	315
VIII.07.d.a.	Primo passo	315
VIII.07.d.b.	Secondo passo	316
VIII.07.d.c.	Terzo passo	317
VIII.07.d.d.	Quarto passo	317
	Parte IX: Bibliografia	318
	Parte X: Testo semplificato e di sintesi	321
	Le corde	324
	I cordini	447

Prefazione

Questo lavoro sulle **Corde e cordini** è al tempo stesso:

1. *una comunicazione scientifica,*
2. *uno strumento didattico e divulgativo,*
3. *una guida per un utilizzo in sicurezza,*

Quanto qui esposto è il risultato delle ricerche svolte, nell'arco di oltre vent'anni, prima dal **Gruppo di Lavoro** "Materiali e Tecniche" (GLMT) e poi dal **Gruppo di Studio** "Materiali e Tecniche" (GSMT), entrambi della Scuola Nazionale di Speleologia del Club Alpino Italiano.

Le conclusioni tratte sono soprattutto il frutto di programmi di **ricerca sperimentale** effettuati nel **laboratorio CRASC** di Costacciaro e Sigillo, di **test sperimentali realizzati da Aziende**, di **ricerche di Istituti universitari**, di **Tesi di laurea** e di **Studi pubblicati da vari autori** (vedi Bibliografia).

Ogni elaborazione e conclusione ha come **base** di partenza le **sperimentazioni** effettuate in laboratorio; per contro ogni **ipotesi teorizzata** ha avuto la convalida (o meno) di un **supporto sperimentale** appositamente predisposto e realizzato.

Le comunicazioni scientifiche e le analisi su base sperimentale, con elaborazioni e conclusioni originali mai presentate in precedenza, sono il frutto di ricerche iniziate nei primi anni ottanta del secolo scorso e proseguite senza interruzioni fino al 2020, sempre nell'ambito della Scuola Nazionale di Speleologia del CAI e con il contributo operativo determinante di Istruttori Nazionali di Speleologia del CAI.

Le conclusioni che è stato possibile trarre da queste indagini - che si basano sull'organica interconnessione fra chimica e fisica - danno una risposta molto articolata, quasi esaustiva, alla comprensione dei meccanismi che portano alla **costruzione** delle **Corde**, alla conoscenza delle loro **caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche**, alla definizione dei **modi** e dei **tempi** che ne contraddistinguono il **decadimento e la degradazione per l'usura** che deriva **dall'impiego speleo-alpinistico**.

Lo scopo di questa pubblicazione, come già detto, è anche didattico e divulgativo. Pertanto la sua strutturazione e i modi espositivi si adattano a queste finalità, evitando per quanto possibile la razionalizzazione e il rigore formale propri dell'esposizione di comunicazioni scientifiche.

Per contro abbiamo preferito, ad esempio, ripetere l'esposizione di formule e d'immagini piuttosto che rinviare, tramite codificazioni, a quanto espresso in precedenza e successivamente (codificazioni che comunque non è stato possibile evitare completamente, specie i riferimenti al numero di pagina).

Le immagini sono di grandi dimensioni, con colorazioni omogenee e ripetitive che possono creare una consuetudine interpretativa.

L'esposizione scritta è costruita in modo da separare fisicamente la successione delle argomentazioni, dando a ogni capitolo o capoverso un contenuto il più possibile monotematico. Alcuni argomenti sono stati trattati più volte in **Parti** diverse di questa pubblicazione, ma con modalità differenti, adattate al contesto in cui sono state di volta in volta inserite. Questa ripetitività, se da un lato ha allungato la pubblicazione, dall'altro ha anche contribuito ad una lettura semplificata e alla visione dello stesso argomento da ottiche diverse.

L'inserimento finale della Parte X "**Testo semplificato e di sintesi**" costituisce uno strumento d'assimilazione e d'interpretazione semplificata dei contenuti di questo lavoro, a volte presentati in modo tale da rendere difficoltosa l'appropriazione degli aspetti sostanziali delle analisi e delle conclusioni, specie nelle interconnessioni fra sperimentazione e riferimenti teorici.

Costacciaro-Sigillo 30 ottobre 2021

Guida alla lettura

Lo scopo anche didattico e divulgativo di questa pubblicazione ha richiesto, a nostro parere, la suddivisione dell'esposizione in **Parti**, **Capitoli**, **Paragrafi** e **Commi** (e anche altri modi di suddivisioni non codificate).

Riportando considerazioni, immagini, espressioni matematiche e relazioni, si mostrano le indicazioni dove, in questo lavoro, sono state presentate e descritte compiutamente. I collegamenti sono sempre accompagnati dall'indicazione delle pagine, le figure e le relazioni.

Sono numerosi, perché necessari, i riferimenti a trattazioni precedenti (e successive), ripetuti anche più volte.

Lo scopo è di rendere più spedita e meno faticosa la lettura per ricordare il significato dei simboli inseriti nelle figure e le basi scientifiche sperimentali e/o teoriche che le sostengono. Anche in questo caso la correlazione è data anche con l'indicazione del *n° pagine*, della **Parte**, del **Punto**, della **Figura**, della **Relazione**.

In **Appendici** sono contenute le Tabelle sulle Proprietà meccaniche dei materiali polimerici utilizzati e la raccolta dei dati forniti dalle sperimentazioni, in particolar modo quelli forniti dai test a caduta sulle corde e cordini, nonché i grafici prodotti dai test sull'effetto idrolisi sulle fibre polimeriche.

Sempre in **Appendici** sono riportate nel dettaglio gli sviluppi teorico-matematici relativi ai metodi di trattamento dei dati ottenuti con esperimenti di Creep e d'Analisi Dinamico Meccanica, su provini isotropici di polimeri e su corde anisotrope.

La **Bibliografia** allegata riporta in modo completo il quadro delle conoscenze che sono alla base di questo lavoro. Argomenti specifici possono essere approfonditi consultando direttamente la fonte dei dati utilizzati. Eventuali riferimenti bibliografici sono riportati fra parentesi quadrate.

Test semplificato e di sintesi

Nella **Parte X** di questo lavoro "**Test semplificato e di sintesi**" (*pag. 322*) sono contenute le considerazioni e le conclusioni più importanti, ordinate in modo da renderne agevole la ricerca, la consultazione e la comprensione. Lo scopo è di fornire una comunicazione adatta più alla **divulgazione**, senza il rispetto dei canoni, talvolta criptici, della comunicazione scientifica.

Tuttavia è possibile che questa lettura semplificata possa comunque avere un supporto conoscitivo scientifico adeguato. Infatti, tutte le considerazioni e indicazioni in essa riportate sono collegate con opportuni riferimenti (*n° pagine/a*, **Parte**, **Punto**, **Figura**, **Relazione**) a quanto esposto in dettaglio nelle otto parti che la precedono, lasciando quindi la possibilità di scelta sul livello di approfondimento voluto.

Al limite, è anche possibile tralasciare la lettura dell'intero lavoro e iniziare invece con la lettura del **Testo semplificato e di sintesi**, scegliendo di volta in volta, argomento per argomento, se approfondire e meno le conoscenze.

Rilevando errori di qualsiasi genere o volendo interloquire su argomenti specifici si prega di fare riferimento a:

francesco.salvatori@sns-cai.it

francesco.salvatori@cens.it

Parte I

***Test quasi-statici con dinamometro a
trazione lenta***

Strumenti e metodologie d'analisi

01. Strumentazione, modi d'uso e metodi d'analisi

01.a) Dinamometro – E' una macchina dove un sistema idraulico muove un pistone, creando una trazione (o compressione) a forza crescente (**Figura 1**). La velocità massima di trazione (o compressione) è di **0,006 m/s**.



Figura 1 F. Salvatori

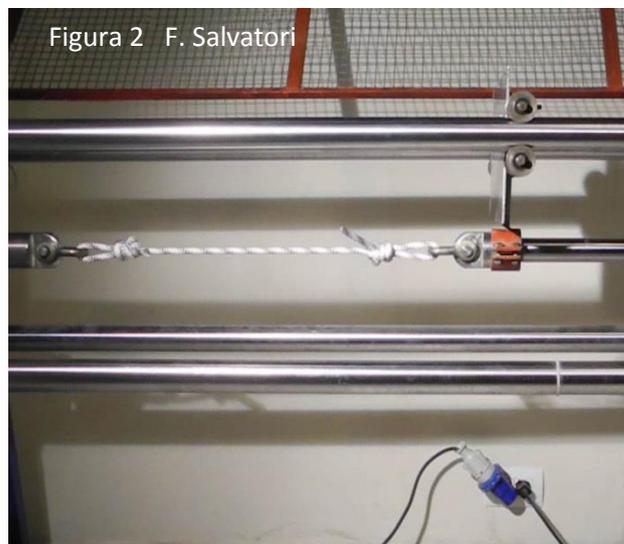


Figura 2 F. Salvatori

Ancorando un campione (nella fattispecie una corda speleo con nodi all'estremità) sugli ancoraggi del dinamometro (**Figura 2**), poi trazionando a velocità costante (se non viene specificato diversamente s'intende alla velocità massima di **0,006 m/s**), la forza applicata al campione va aumentando e un insieme di sensori di tempo, forza e allungamento inviano in sincronia i relativi dati a una apposita scheda d'acquisizione, che li trascrive nell'apposito programma informatico (**Figura 3**).

#	Spazio (mm)	Forza (kgp)	Tempo (msec)	21/06/2013 12:26
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8	0	0	0	
9	7,7	1,3	1	
10	7,7	1,3	2	
11	10,3	1,3	3	
12	18	2,5	4	
13	20,6	2,5	5	
14	20,6	2,5	6	
15	28,3	3,8	7	
16	30,8	5,1	8	
17	30,8	6,3	9	
18	38,5	6,3	10	
19	38,5	7,6	11	
20	46,2	8,9	12	
21	46,2	8,9	13	
22	53,9	8,9	14	
23	59,1	11,4	15	
24	59,1	12,7	16	
25	61,7	12,7	17	
26	69,4	13,9	18	
27	71,9	15,2	19	
28	71,9	17,7	20	
29	77,1	17,7	21	
30	84,8	19	22	
31	84,8	22,8	23	
32	92,5	22,8	24	
33	92,5	26,6	25	
34	100,2	27,9	26	
35	102,8	27,9	27	

Figura 3

L'intervallo di campionatura può variare da **1 msec** (millisecondo) a quanto necessario per completare il test programmato.

La forza massima raggiungibile è di **5000 kgp**, con un margine d'errore del **0,5 %**.

Le celle di carico per la misurazione delle forze sono con estensimetri e con diversi tempi di risposta in funzione dei diversi circuiti elettronici di acquisizione (**Figura 4**).

Per gli allungamenti la sensibilità è di **1 mm** con l'Encoder a filo e di **0,1 mm** con il misuratore di distanza laser.

01.b) Ancoraggi – I campioni da testare nel dinamometro possono essere di diversa natura e forma: barre, tondini, corde, moschettoni, tasselli, cavi d'acciaio, fettucce, ecc.

Per ogni tipo di campione occorre lo specifico tipo di ancoraggio: per esempio in **Figura 5** per i moschettoni, in **Figura 6** per le placchette e gli anelli, in **Figura 7** per i tasselli d'ancoraggio.

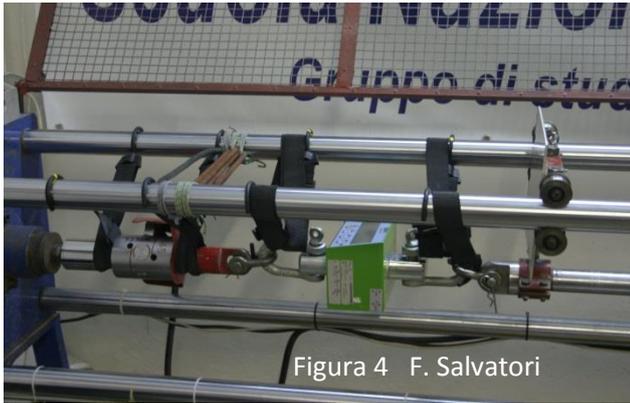


Figura 4 F. Salvatori



Figura 5 F. Salvatori



Figura 6 F. Salvatori



Figura 7 F. Salvatori

01.b.a) Ancoraggi per barre, tondini, fili elementari (elementi isotropi) - Sottoponendo a test degli

elementi isotropi come materiale e geometria - appunto barre, tondini, fili elementari - i sistemi d'ancoraggio nel dinamometro devono essere tali da non interferire nel determinare punti preferenziali di rottura alla trazione: il campione deve sempre iniziare a deformarsi e rompersi fra i punti d'ancoraggio e **mai nei punti di ancoraggio**. Solo così è possibile testare le **reali proprietà meccaniche** dei materiali, in funzione solo della quantità e della qualità che si oppone alle deformazioni e alla rottura.



Figura 8 F. Salvatori

Essendo le **Corde speleo-alpinistiche** l'oggetto d'interesse di questo lavoro, il materiale da provare sarà esclusivamente quello che le compone: il la Poliammide (PA o anche Nylon, nelle due forme 6 e 6.6). Nella **Figura 8** due provini di Nylon: quello soprastante con sezioni trasversali a diametro maggiorato alle estremità (per determinare la rottura, sotto trazione, nella parte centrale a sezione trasversale minore).

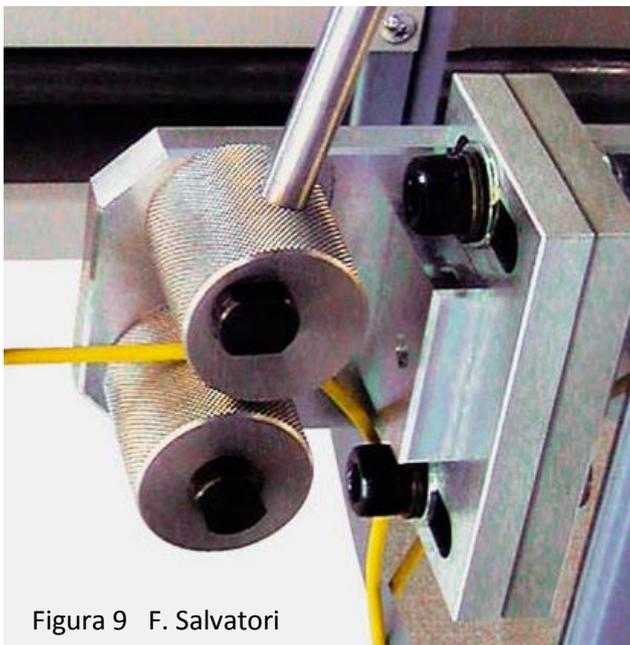


Figura 9 F. Salvatori

Con tale disposizione **isotropa della geometria e della natura del materiale** è possibile calcolare l'estensione della superficie trasversale (sezione) che si oppone allo snervamento e al cedimento, calcolando quindi lo Sforzo σ , la Deformazione ϵ e il modulo d'elasticità E , i tre elementi fondamentali caratterizzanti i materiali solidi isotropi (pag. 23, **Figura 11, Relazione 1**).

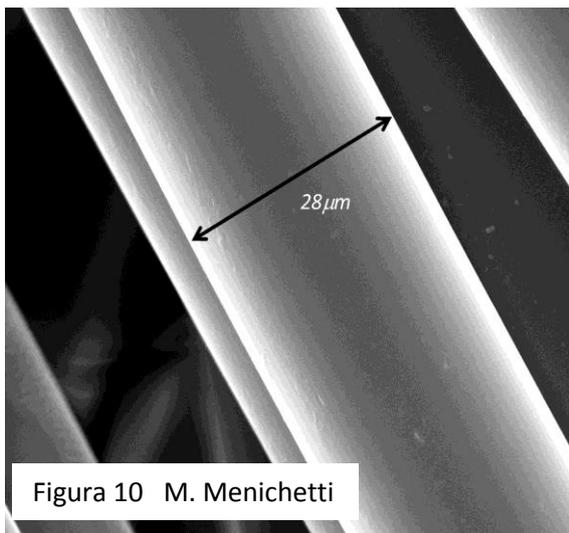
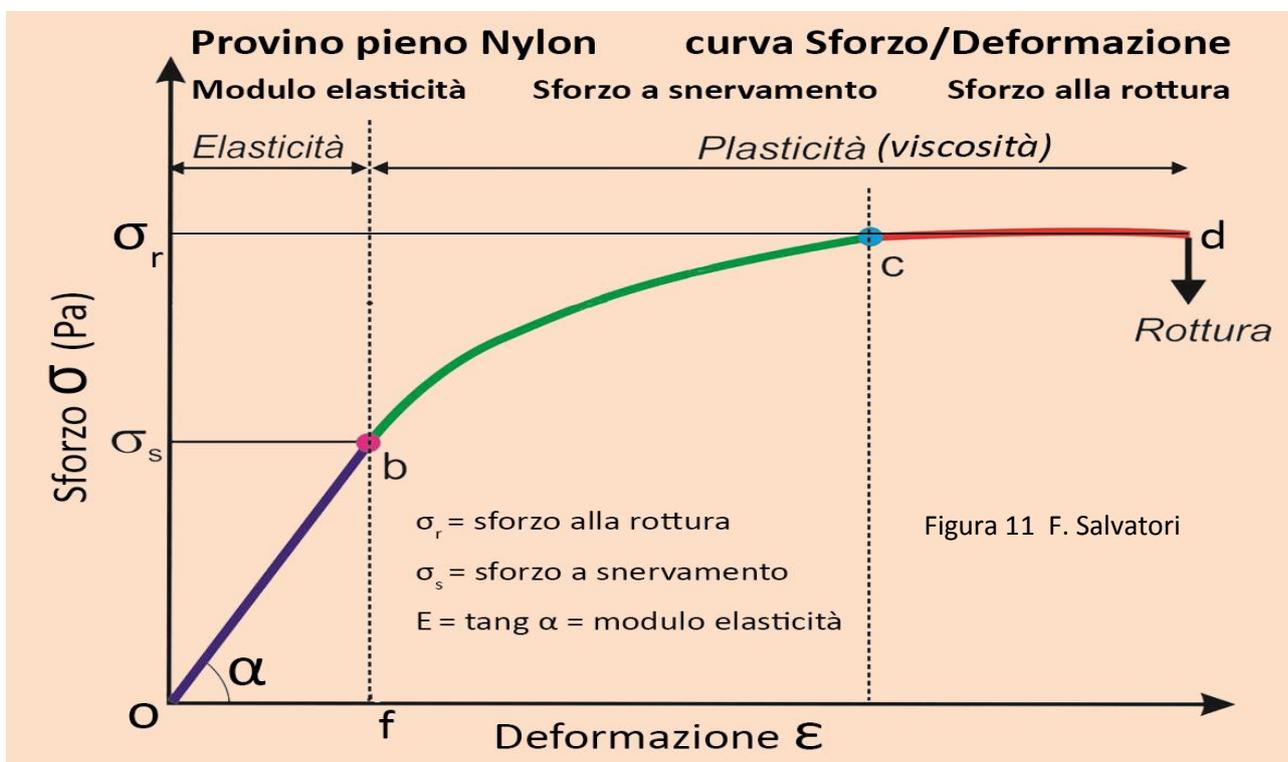


Figura 10 M. Menichetti

Per il fissaggio di provini come in **Figura 8** ci si avvale di morsetti autobloccanti tipo quello riprodotto in **Figura 9**; che comunque è valido anche per cordoni, nastri, barre a sezione quadrata e rettangolare o altra forma regolare.

Le stesse considerazioni qui sopra esposte valgono anche per i fili elementari di Poliammide (**Figura 10**), elementi isotropi di una corda speleo-alpinistica.

01.b.a.1) Curva sforzo/deformazione fino alla rottura di un campione isotropo, Sforzo a snervamento e Sforzo alla rottura – Sottoponendo a **trazione** dinamometrica **lenta** un provino di **poliammide** (o plastico in genere o metallico) con ancoraggi tipo **Figura 9**, si ottiene una curva dell'allungamento in funzione della forza applicata come quella rappresentata in **Figura 11**.



Con provino pieno isotropo (**Figura 8**) - essendo possibile misurare la sua sezione trasversale **S** - la curva non sarà semplicemente **Forza F/Allungamento A** (come in seguito vedremo nei grafici relativi alle corde, **anisotrope**), ma **Sforzo σ /Deformazione ϵ** , componenti fondamentali della **Legge di Hooke**:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \tag{1}$$

dove:

$$\sigma = F/S \text{ (N/m}^2 \text{ = Pascal = Pa)}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

l_0 = lunghezza del campione a riposo

l = lunghezza del campione traziionato

E = modulo d'elasticità o di Young (N/m² = Pascal = Pa)

Il primo tratto **o - b** della curva di carico è lineare e rispetta la Legge di Hooke. Su questo tratto è possibile misurare il Modulo d'elasticità, che è pari a **Figura 11**):

$$E = \text{tang } \alpha \quad (2)$$

In questo tratto c'è proporzionalità diretta fra Sforzo σ e Deformazione ϵ e la costante di proporzionalità è il Modulo elastico E . Il materiale sarà tanto più rigido quanto maggiore è il valore di $\text{tang } \alpha$ (come a dire, tanto è più grande l'angolo α).

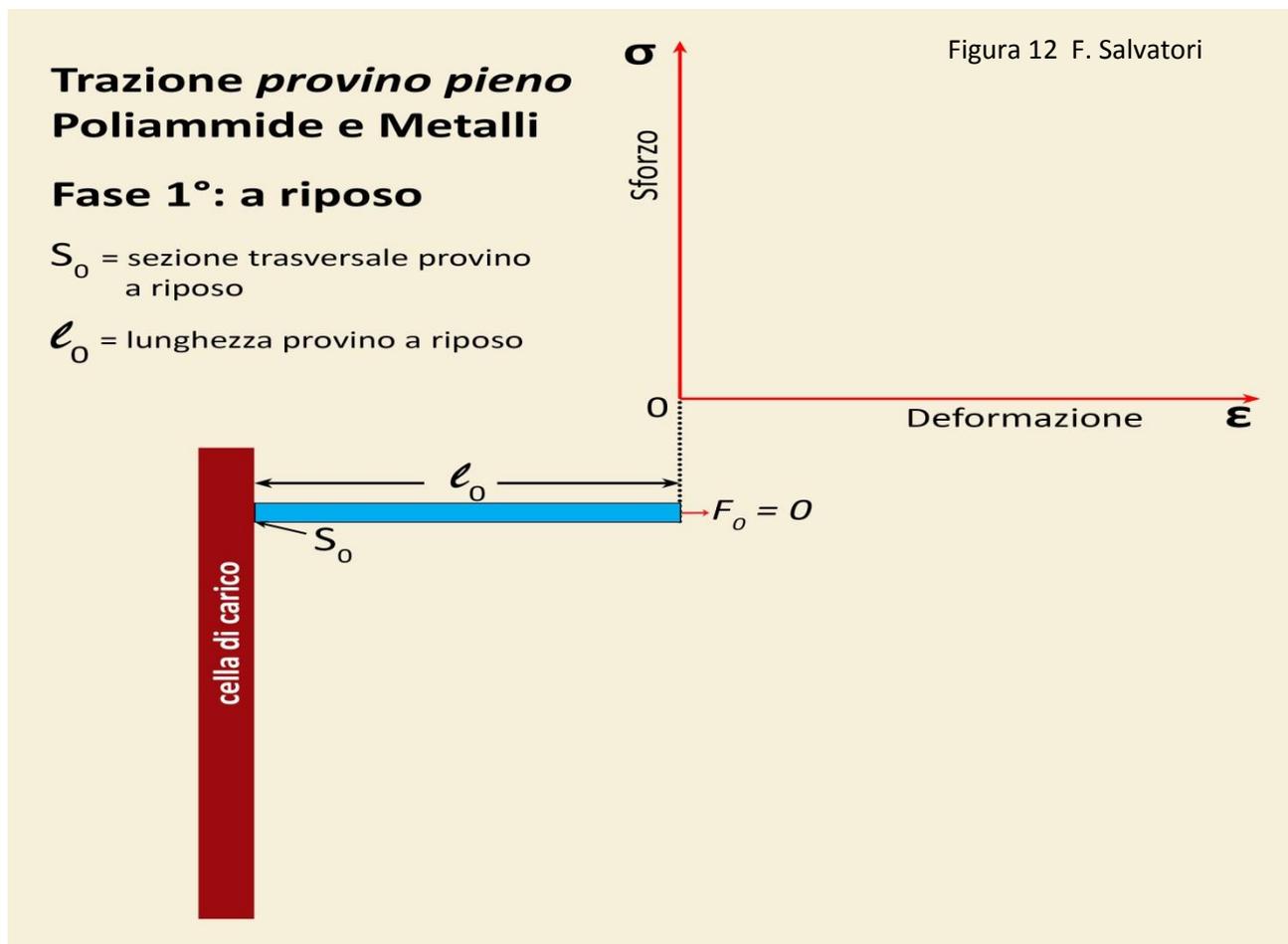
Dopo aver raggiunto con la trazione il punto **b** - un punto di confine caratteristico del comportamento del Nylon - l'andamento della curva non è più lineare ma "plasticizzata" e le deformazioni non sono più completamente reversibili. E' stato raggiunto lo sforzo $\sigma_s = \text{sforzo a snervamento}$: la Legge di Hooke non è più valida e le deformazioni non sono più reversibili come nel tratto **o - b** della curva.

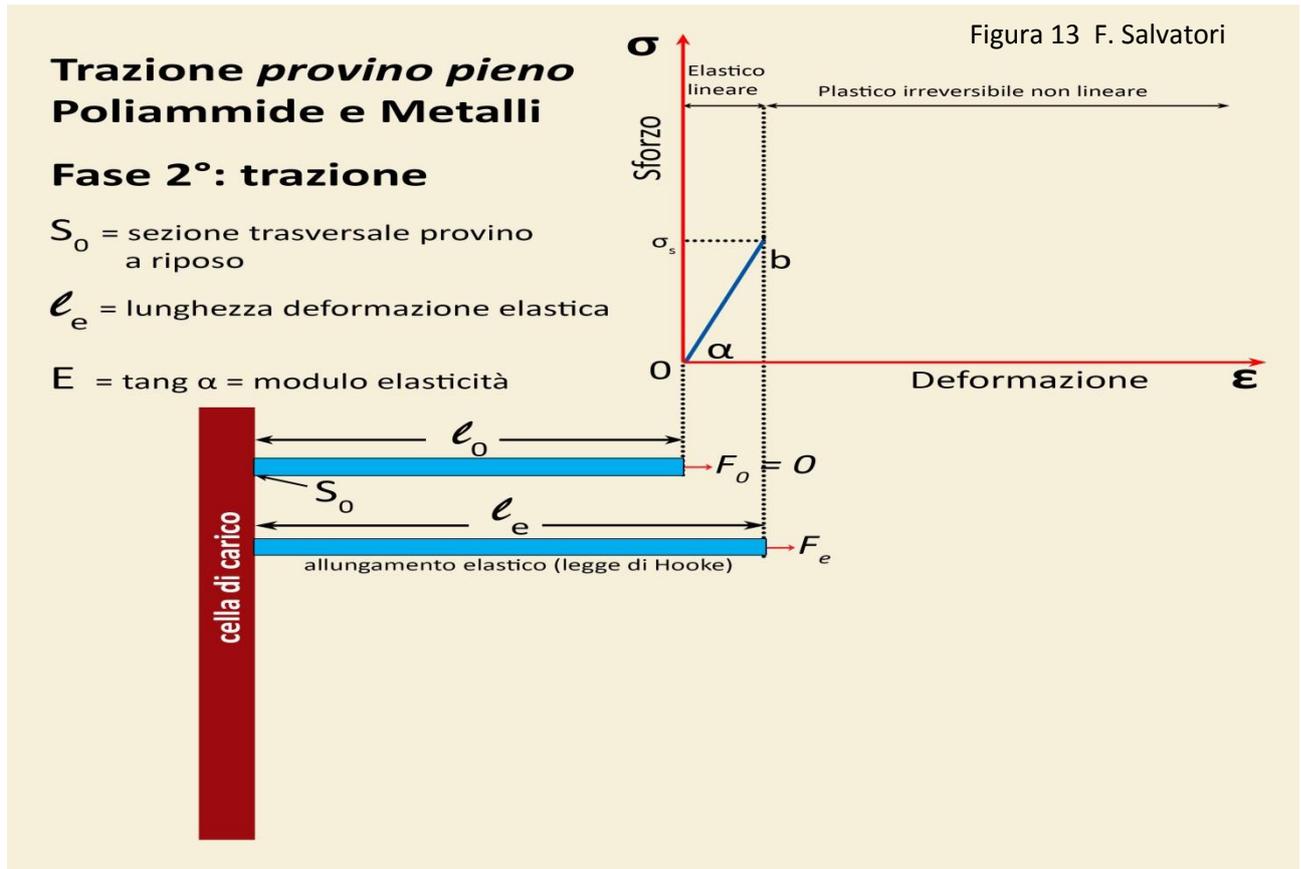
Proseguendo a trazionare, **con effetti plastificanti sempre più accentuati**, viene raggiunto il punto **c**: oltre la forza applicata rimane pressoché costante, ma il provino continua ad allungarsi, e comincia ad affilarsi nella parte centrale, formando quello che viene chiamato Neck (collo/strozzatura).

Raggiunto il punto **d** si verifica la rottura della barra proprio in corrispondenza del Collo: siamo a un altro punto peculiare delle caratteristiche meccaniche dei materiali isotropi, definito come sforzo $\sigma_r = \text{sforzo a rottura}$.

Per meglio definire le varie fasi della trazione di un **provino pieno isotropo** e comprendere il valore delle caratteristiche meccaniche che vengono definite con questo test a rottura, si riportano qui di seguito le **Figure 12-13-14-15-16** che mostrano altrettante **fasi salienti** del processo di deformazione e rottura del campione.

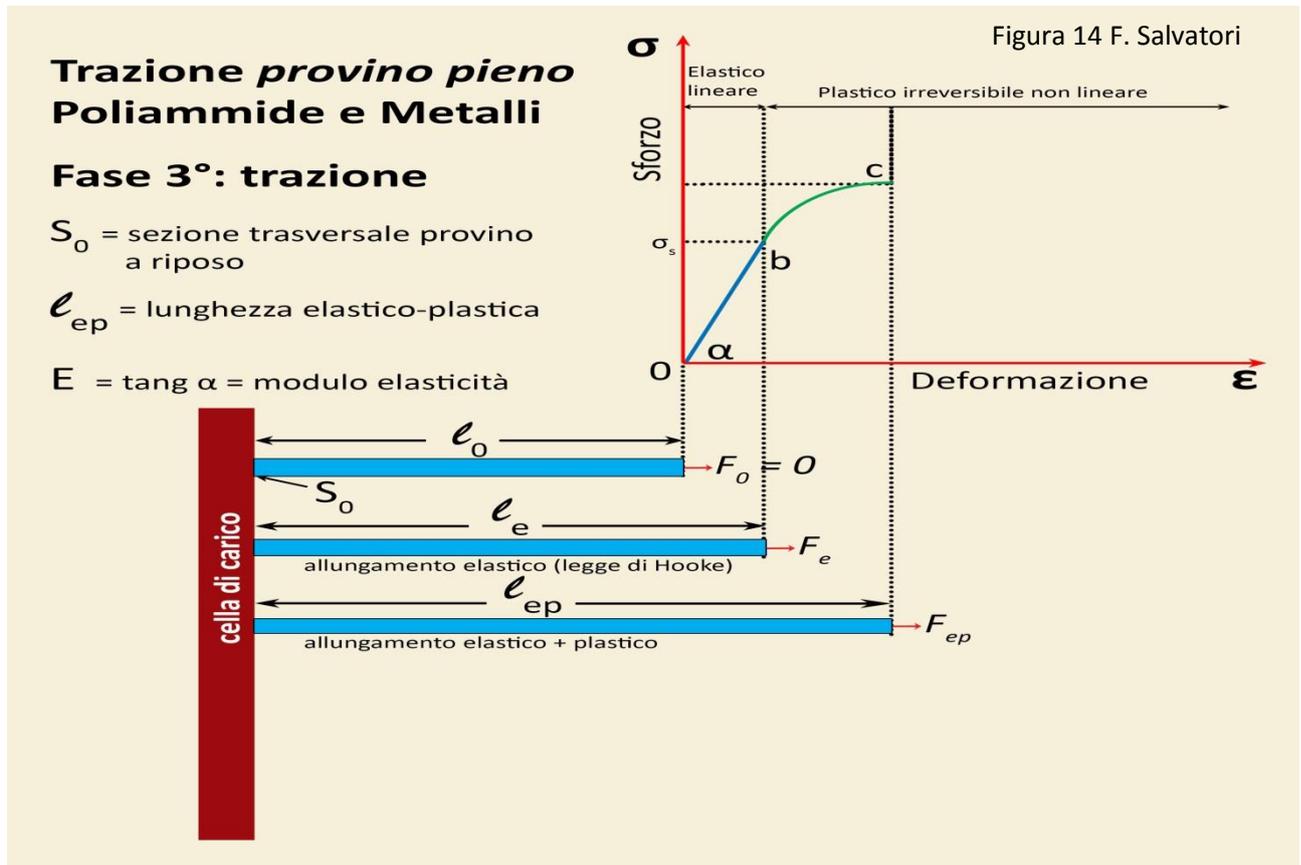
In **Figura 12** la situazione iniziale **a riposo**, dove sono misurabili le due caratteristiche fondamentali S_0 e l_0 .





In **Figura 13** c'è la prima fase della trazione con allungamenti proporzionale alla forza applicata (guida la Legge di Hooke); nel punto **b** viene raggiunto lo sforzo a snervamento σ_s ; segue una deformazione plastica.

In **Figura 14**, proseguendo la trazione, si entra nelle deformazioni irreversibili plastiche con un allungamento non più direttamente proporzionale rispetto alla forza di trazione.



Trazione provino pieno Poliammide e Metalli

Fase 4°: trazione

S_0 = sezione trasversale provino a riposo

l_{st} = lunghezza allo stiramento

$E = \tan \alpha$ = modulo elasticità

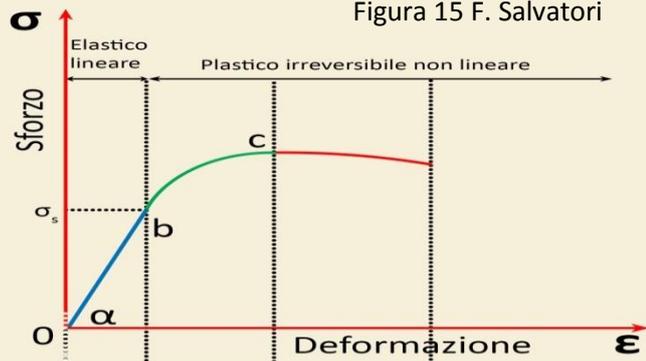
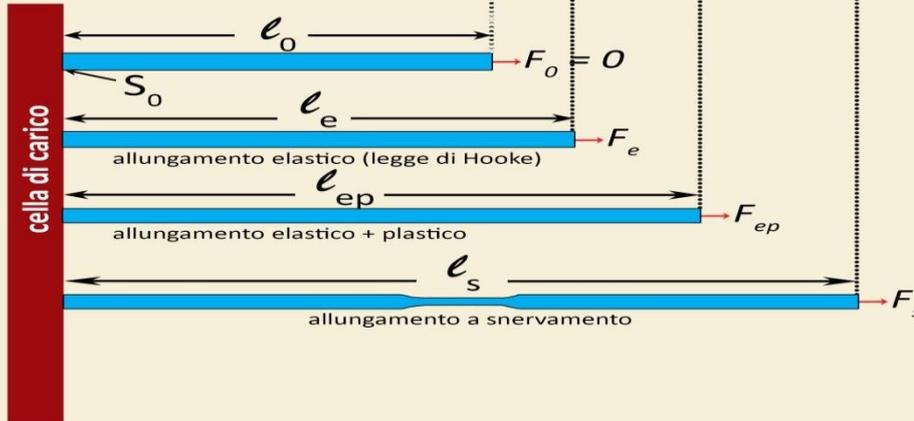


Figura 15 F. Salvatori

In **Figura 15** prosegue la trazione (con forze applicate in crescendo) e nella parte centrale del campione in prova si produce un restringimento (Neck collo) con sezione trasversale ridotta: è il punto debole dove si creano i presupposti per la rottura; che avviene (**Figura 16**) con forza F_r e sforzo alla rottura $\sigma_r = F_r/S_0$. Lo sforzo alla rottura è una delle caratteristiche meccaniche più significative dei materiali solidi (vale anche per le poliammidi).

Trazione provino pieno Poliammide e Metalli

Fase 4°: trazione

S_0 = sezione trasversale provino a riposo

l_r = lunghezza alla rottura

$E = \tan \alpha$ = modulo elasticità

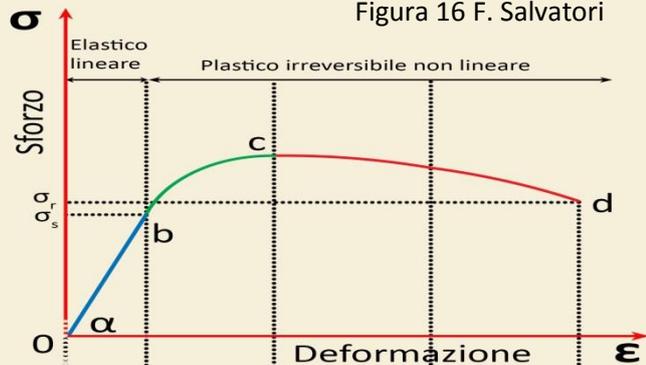
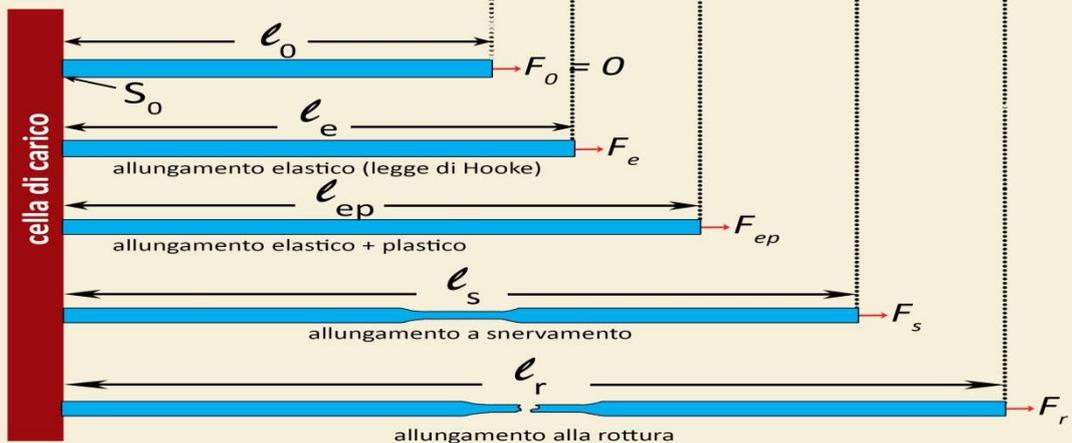
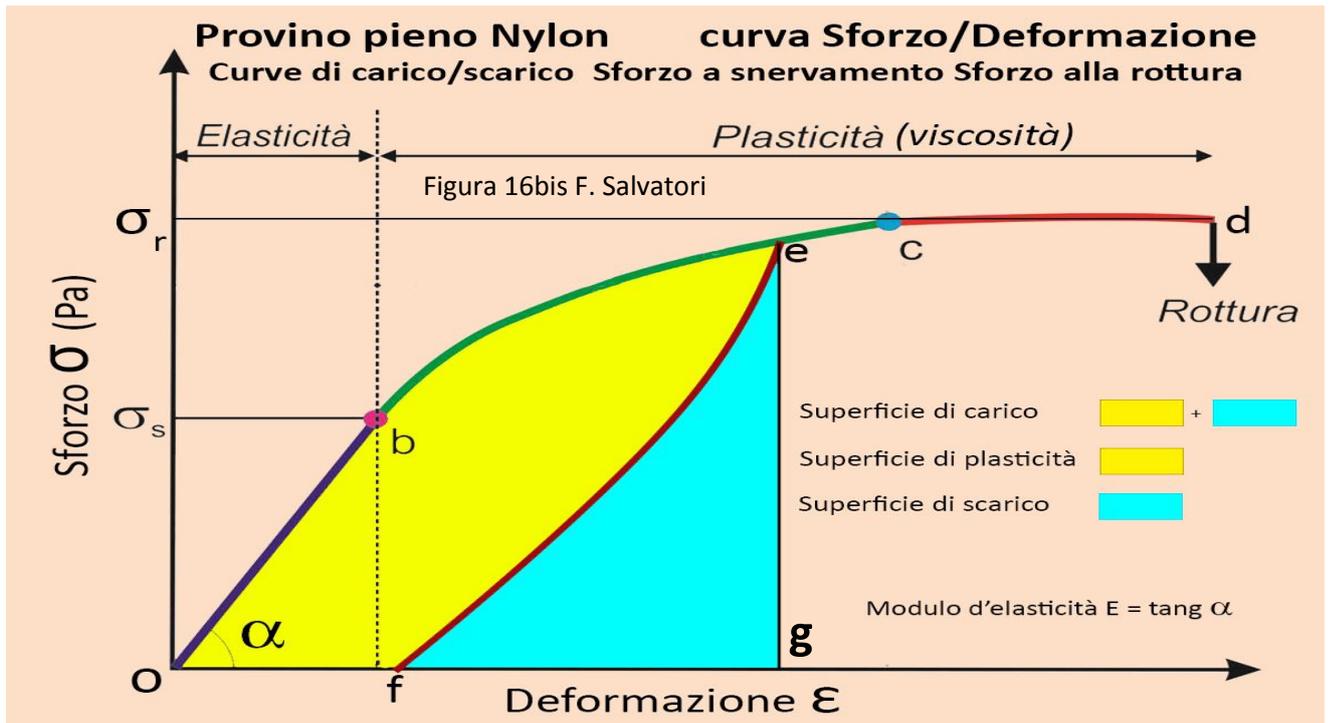


Figura 16 F. Salvatori

01.b.a.2) Curve sforzo/deformazione di carico/scarico di un campione isotropo – Il grafico rappresentato in **Figura 16bis** è equivalente - nell'esecuzione sperimentale e nei contenuti sostanziali - al grafico di **Figura 11** (il tratto **o - b - c - d** è anche equivalente alla curva ottenuta nella sequenza esposta nelle soprastanti **Figure 12-13-14-15-16**).

Ma se al Punto **e** s'interrompe la trazione, invertendola e facendo invece decrescere la forza, si delinea la **curva di scarico e - f**, che segue un percorso, **differenziato rispetto alla curva di carico**, fino a raggiungere **F = 0**. E' evidente, dato che il percorso di ritorno a forza zero si distingue dalla curva di carico, che parte della deformazione subita con la trazione fino al Punto **e** è permanente e non reversibile. Al termine del ciclo d'isteresi il provino rimane quindi allungato di un certo valore **A_r** (Allungamento residuo).



Nel grafico si distinguono tre superfici (sottese alle curve), la cui estensione è ricavabile **tramite integrazione grafica** delle curve $\sigma = f(\epsilon)$ [38] [39] [40]:

1. **Superficie di carico** o - b - e - g - o (gialla + celeste) che è equivalente al lavoro ΔL_{carico} svolto dal dinamometro per raggiungere lo Sforzo σ_e e la Deformazione ϵ_e ; ΔL_{carico} è anche l'energia totale in gioco prodotta da una qualsivoglia sollecitazione;
2. **Superficie di scarico** e - g - f (celeste) che equivale al lavoro $\Delta L_{scarico}$ restituito dalle deformazioni reversibili prodotte dalla sollecitazione;
3. **Superficie di dissipazione** (o di plasticità) (gialla) equivalente al lavoro $\Delta L_{dissipazione}$ perso in deformazioni permanenti, ottenibile dalla differenza

$$\Delta L_{dissipazione} = \Delta L_{carico} - \Delta L_{scarico} \quad (3)$$

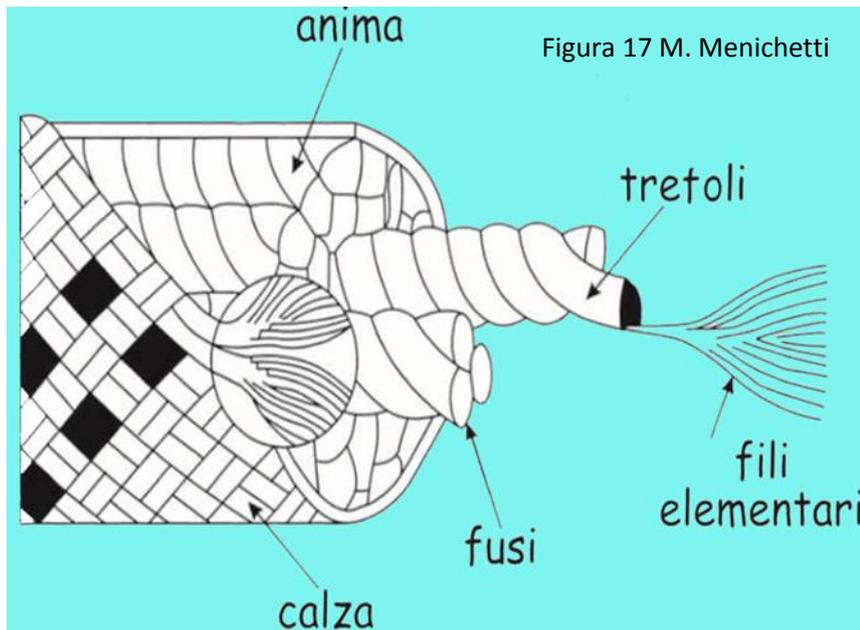
Il calcolo **attraverso l'integrazione grafica** dell'estensione delle superfici sottese alle curve sperimentali $\sigma = f(\epsilon)$ permette di valutare le quantità d'energia in gioco anche in mancanza della certificazione matematica di **continuità delle funzioni**. Quest'analisi energetica sperimentale è una procedura di fondamentale importanza per raggiungere la conoscenza dei meccanismi che intercorrono fra i vari aspetti delle deformazione dei materiali polimerici e la natura delle sollecitazioni che le producono.

I programmi d'acquisizione dati digitalizzati del **CRASC** sono predisposti per un'integrazione grafica, in tempo reale, del calcolo delle superfici sottese a qualsiasi curva, in un qualsiasi intervallo delle Deformazioni ϵ .

Queste curve di carico/scarico sono **test d'isteresi**, ma completando **solo il primo ciclo** e a **trazione lenta**.

In seguito e soprattutto nella **Parte II** di questo lavoro si tratterà di test analoghi, ma a caduta (trazione veloce) per valutare la **visco-elasticità** del Nylon: sono sempre test d'isteresi, ma su **più cicli** e con velocità di trazione **più elevata e variabile** (pag.44 e seg. , Figure 39 - 40 - 41) [20] [30].

01.b.b) Ancoraggi senza nodi per corde (elementi anisotropi), Carico di rottura senza nodi, Superficie efficace – Per sottoporre a test di deformazione e rottura questi elementi occorre tener presente la loro **natura anisotropa** e realizzare appositi sistemi d'ancoraggio ai bracci traenti del dinamometro.



Una corda speleo-alpinistica è in genere composta come in **Figura 17**, una **struttura estremamente anisotropa** (alta percentuale di spazi vuoti), anche se l'elemento base che costituisce le sue componenti (calza, fusi, trefoli) è fatto di **fili elementari isotropi** (pag. 25, **Figura 10**), in genere fibre estruse di Poliammide 6 e 6.6 (pag. 49 e seg.). Occorre fare in modo che nei punti d'ancoraggio non si verifichino contatti che possano portare a indebolire o a rompere i fili elementari (lacerazioni, incisioni, torsioni, piegature, riscaldamento per attrito).

Il carico di rottura senza nodi:

$$F_r = \text{Carico (o Forza) di rottura senza nodi} \quad (4)$$

caratterizza la **Corda** in maniera **determinante** nell'ambito delle sue **proprietà meccaniche**, fornendo una resistenza alla rottura che è un misura **esattamente proporzionale alla quantità e alla qualità dell'insieme dei fili elementari** che la compongono, **comunque vengano tessuti**, e che si oppongono alla rottura (e all'allungamento) così **superando il suo stato anisotropo**.

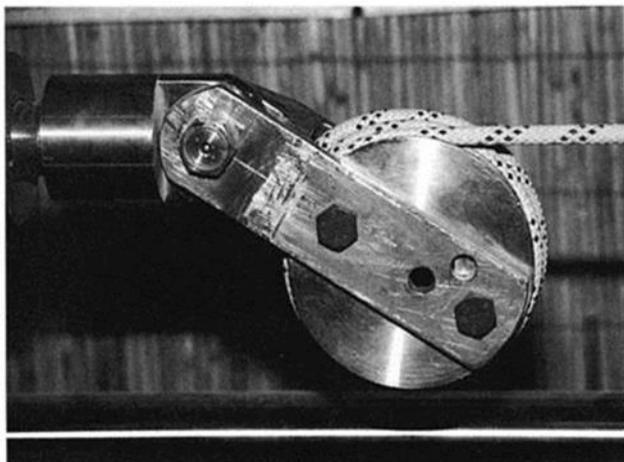
Nel caso delle corde speleo-alpinistiche il materiale che costituisce i fili elementari, come già detto, è il Nylon 6.6 o 6, del quale si conoscono tutte le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche, una delle quali è la **Tenacità T** o Sforzo Specifico a Rottura σ_{ST} , ottenuta con un test a trazione fino alla rottura (come descritto nella sequenza di **Figure 12-13-14-15-16**) su un filo elementare di Nylon (è questo un valore individuabile in letteratura e riportato nelle schede di **Figura 19**) (pag. 30).

E' facile intuire che, calcolato F_r , mettendolo in rapporto con la tenacità **T** è di fatto possibile calcolare la **sezione trasversale ideale effettiva della Corda** (di qualunque forma la si voglia) che determina il carico di rottura senza nodi (pag. 302, **Appendici 05**).

E' come calcolare le sezioni trasversali di ogni filo elementare che costituisce la corda e poi sommarle in un unico valore:

$$S_e = \text{Superficie (o Sezione) efficace} \quad (5)$$

L'ancoraggio è su tamburi di diametro adeguato come in **Figura 18**, in acciaio inox per garantire la massima levigatezza, e opportunamente sagomati con una gola a spirale (per creare la maggior superficie di contatto possibile) sono la soluzione più corretta e funzionale.



L'aggancio delle corde (e dei cordini) ai bracci di trazione del dinamometro col **sistema-tamburi** permette che non si verifichino contatti che possano portare a indebolire o a rompere i fili elementari della corda (lacerazioni, incisioni e deformazioni meccaniche; riscaldamento per attrito).

In aggiunta, appena la corda entra in contatto nella gola del tamburo per un tratto di lunghezza Δl_a si crea un attrito e, di conseguenza, una forza $-\Delta F_a$ che si oppone alla forza di trazione (registrata dal dinamometro). Nel successivo tratto Δl_a nel tamburo si aggiunge a opporsi alla forza di trazione un ulteriore incremento $-\Delta F_a$; e così via procedendo lungo la corda avvolta nelle spire del tamburo.

In tal modo, ogni sezione trasversale della corda a contatto con il tamburo subisce una forza di trazione ridotta, inferiore a quella che si applica invece al tratto di corda libero fra i due tamburi d'aggancio.

In questo tratto, necessariamente, avverrà una rottura non influenzata da alcun fattore esterno e con un valore di forza F_r proporzionale solo alla quantità e alla qualità del materiale polimerico che costituisce la corda.

Attenzione: S_e è un valore che, oltre alla quantità, misura **anche la condizione dei fili elementari** e quindi le eventuali diminuzioni di **Tenacità** per azioni dovute all'idrolisi, alla degradazione idrolitica, ai gas ossidanti, alla fotodegradazione, alle sollecitazioni e al calore (pag. 66 e seg. Parte III).

Con l'operazione sperimentale descritta, l'anisotropa **Corda** diviene, di fatto, resa equivalente a un **isotropo tondino** (come rappresentato in **Figura 8**) o **isotropo barra** o **isotropo striscia**, di cui si conosce l'estensione della **sezione trasversale complessiva**, trasformabile con operazioni matematiche nella sezione della forma che si vuole (circolare, quadrata, rettangolare, ellittica, ecc.).

Può essere utile, ad esempio, trasformarla in un tondino e calcolarne il:

$$d_e = \text{Diametro efficace} \quad (6)$$

che permette di raffrontarlo con il **diametro apparente** della corda, spesso definito in maniera arbitraria dai costruttori (sempre maggiore di quello efficace, ovviamente), e valutare quanto contribuisce al suo aspetto esteriore il modo di tesserla e la tensione con cui viene confezionata.

Per esplicitare quantitativamente sia S_e che d_e , si faccia innanzitutto riferimento alle schede riportate nella **Figura 19**, che contengono una sintesi dei dati ricavabili dall'abbondante letteratura relativa alle caratteristiche meccanico-chimico-fisiche delle principali fibre artificiali utilizzate per le **Corde** (e cordini e fettucce) speleo-alpinistiche (Poliammide Nylon 6, Poliammide Nylon 6.6, Aramide Kevlar (48), HMPE Dyneema SK 60).

La relazione che permette di calcolare la Superficie efficace è (pag. 302, **Appendici 05**):

$$S_e = \frac{F_r}{10^3 \cdot \sigma_{sr} \cdot \rho} \text{ mm}^2 \quad (7)$$

mentre il Diametro efficace:

$$d_e = 2 \sqrt{\frac{F_r}{10^3 \cdot \pi \cdot \sigma_{sr} \cdot \rho}} \text{ mm} \quad (8)$$

dove:

F_r = carico di rottura senza nodi (N)

σ_{sr} = tenacità del filo elementare (N / tex)

ρ = densità del filo elementare (g/cm³)

Poliammide Nylon 6.6			Poliammide Nylon 6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14		Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	265		Punto di fusione (°C)	218	
Tenacità (N/Tex)	0,64		Tenacità (N/Tex)	0,47	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	900	strength	Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	536	strength
Allungamento alla rottura (%)	16		Allungamento alla rottura (%)	26	
Modulo E (Gpa)	8,0		Modulo E (Gpa)	2,6	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	80		Lavoro alla rottura (mN/Tex)	76	

Figura 19 F. Salvatori

Aramide Kevlar (48)			HMPE Dyneema SK 60		
Densità ρ (g/cm ³)	1,45		Densità ρ (g/cm ³)	0,97	
Punto di fusione (°C)	500		Punto di fusione (°C)	150	
Tenacità (N/Tex)	2,03		Tenacità (N/Tex)	2,80	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	2900	strength	Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	3000	strength
Allungamento alla rottura (%)	3,6		Allungamento alla rottura (%)	3,5	
Modulo E (Gpa)	72		Modulo E (Gpa)	142	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	35		Lavoro alla rottura (mN/Tex)	55	

01.b.b.1) Curve forza/allungamento fino alla rottura di una corda - Con test a trazione quasi-statica (0,006 m/s) fino alla rottura e la conseguente registrazione della curva forza/allungamento si ottiene un grafico come in **Figura 20**.

In questa figura è ben rappresentata la registrazione delle **forze** risultanti in funzione degli **allungamenti**. Curva che s'interrompe bruscamente al momento del cedimento, subitaneo, della corda stessa.

Si calcola F_r , ma anche il lavoro $\Delta L_{rottura}$ svolto per portare al cedimento, **senza nodi**, la corda.

$\Delta L_{rottura}$ si valuta quantitativamente calcolando la superficie sottesa alla curva $F = f(A)$ (gialla in **Figura 20**) e, con opportune equivalenze, esprimere il lavoro in **J** (Joule).

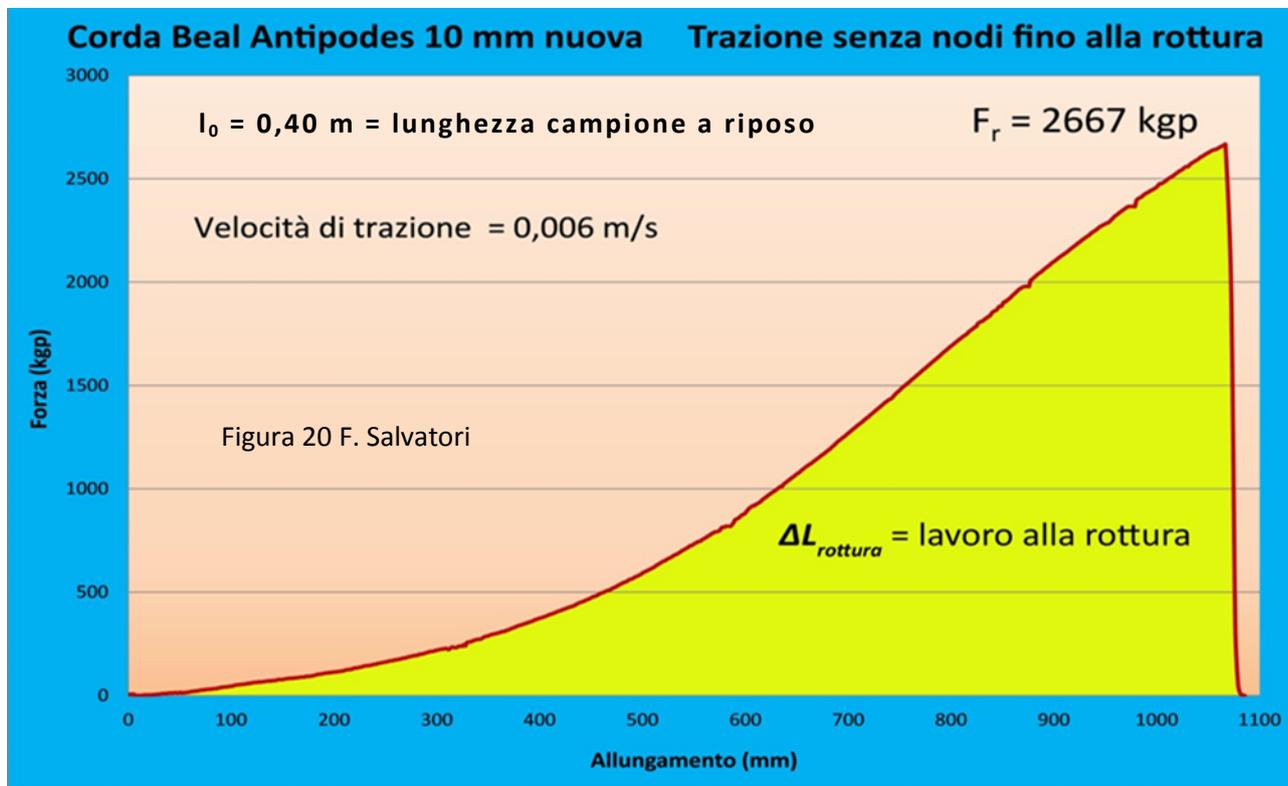
Per questa misurazione gli allungamenti sono rilevati su un campione di corda di **lunghezza nota** ed **escludendo gli scorrimenti che avvengono all'interno delle gole dei tamburi**.

Temendo presente che la retta tangente a ogni punto della curva forma un angolo α con l'asse delle ascisse e che (pag. 24, **Relazione 2**):

$$\text{tang } \alpha = E \quad (9)$$

il Modulo d'elasticità della corda varia continuamente, crescendo con gradiente sempre in aumento (la corda diventa sempre più rigida) per poi diminuire leggermente in prossimità del cedimento finale.

Ma lo sviluppo del grafico rappresentato in **Figura 20** non è frutto solo della qualità e della quantità dei fili elementari (come invece accade per i campioni isotropi) (*pag. 25, Figura 11*): un **ruolo molto importante** lo ricopre anche il **tipo di tessitura** che coinvolge i fili elementari e **la tensione** con cui questa tessitura viene realizzata.



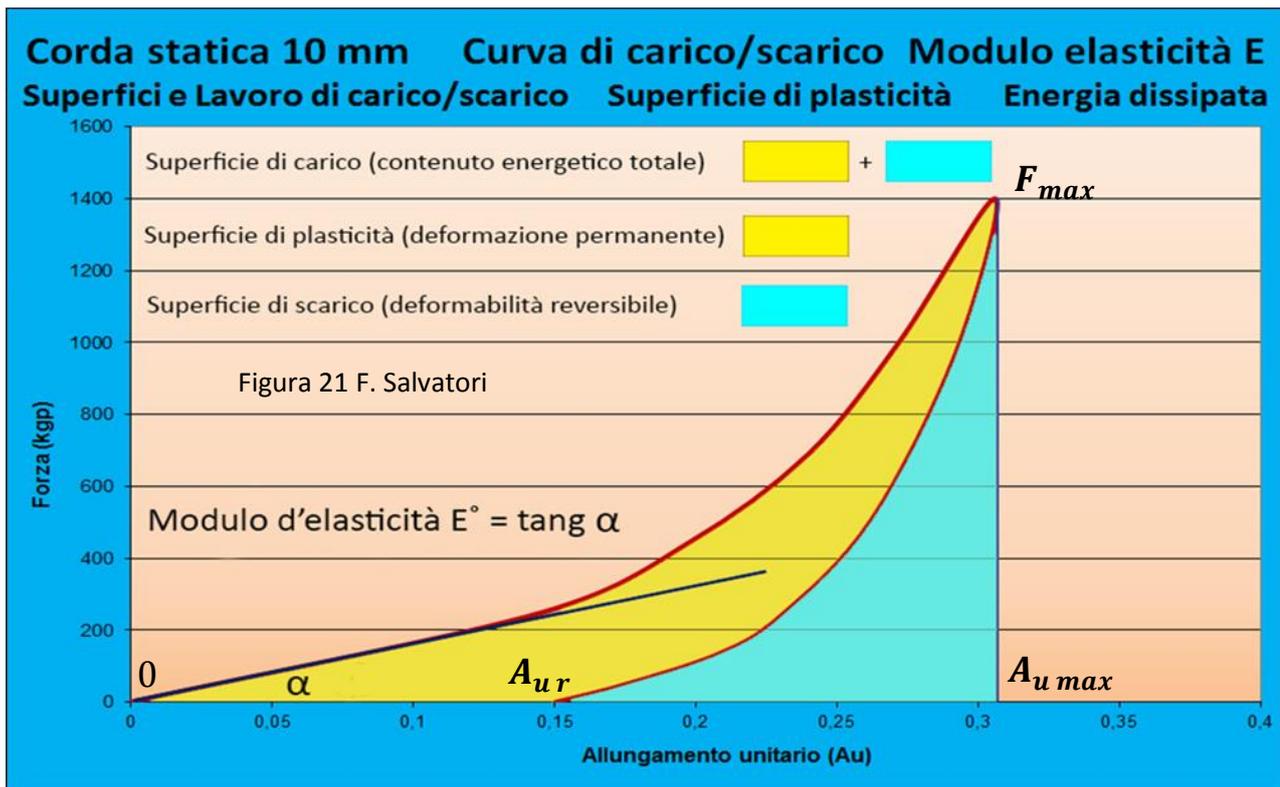
L'entità degli allungamenti che le forze di trazione applicate producono su una corda speleo-alpinistica sono infatti dovuti anche alla sua **struttura complessa in calza e anima**, struttura che sotto carico - soprattutto all'inizio della trazione - **si compatta, senza che però avvenga la deformazione dei fili elementari**.

Ne segue che la pendenza della curva $F = f(A)$ è il frutto della somma dei due tipi di deformabilità: quella propria dei fili elementari (dipendente dalla loro quantità e qualità) che costituiscono la corda, più quella prodotta dalla compattazione della sua struttura complessa. E da ciò discende la marcata differenziazione fra i grafici di **Figura 20** e **Figura 11** (*pag. 23*). Per valutare il modo d'incidere e l'entità del contributo dato dalla **Compattazione della Struttura Complessa della Corda**, in acronimo **CSCC**, si faccia riferimento ai risultati sperimentali ottenuti con le prove a caduta descritte e analizzate nella **Parte V** (*pag. 151 e seg.*).

È interessante notare, come anticipazione, che lo sviluppo della curva $F = f(A)$ inizia con valori del Modulo d'elasticità E ridotti (corda molto deformabile), che poi, crescendo la forza di trazione e l'allungamento, vanno aumentando progressivamente e la corda diventa più rigida: questo accade perché la **CSCC** entra in azione, con un ruolo quasi esclusivo, all'inizio della trazione, quando le forze applicate sono le minori.

Ma l'effetto **CSCC** si esaurisce rapidamente appena si superano i **500 kgp** di forza applicata, quando la deformazione passa tutta a carico degli allungamenti che si producono nei fili elementari, propri della loro visco-elasticità. Fra i **600 – 1000 kgp** la curva ha una pendenza quasi costante (analogia al tratto elastico **0 – b** di **Figura 11** (*pag. 25*)).

01.b.b.2) Curve forza/allungamento di carico/scarico di una corda – Il grafico rappresentato in **Figura 21** mostra i risultati di un test che permette d'indagare **con efficacia e incisività** sulla **qualità e quantità** dei fili elementari che compongono una corda (in modo più efficace di quanto permetta il test che ha disegnato la curva di **Figura 20**).



Parte di questa deformazione è irreversibile e sempre meno incide a seguito di una successione di sollecitazioni. Tanto che nelle corde usate è un fattore che tende a scomparire.

Per realizzare il test si opera in questo modo: stabilito un valore di forza massimo $F_{max} < F_r$ si calcola la curva che da zero porta al tale valore F_{max} . Questo tratto è definito "Curva di carico". Una volta raggiunto tale valore s'interrompe la trazione e si fa decrescere la forza e, di conseguenza, l'allungamento: viene così costruita anche la curva di scarico fino a ritornare a forza zero con Allungamento residuo A_{ur} .

Evidentemente c'è un'analogia con la **Relazione 1** (pag. 23), ma in questo caso è necessario utilizzare la l'Allungamento unitario A_u , al posto della Deformazione ϵ , perché la corda è una **struttura anisotropa**, dove i fili elementari sono confezionati lasciando un'alta percentuale di spazio vuoto, e la Sezione apparente (dichiarata dal costruttore) non rappresenta la sua sezione trasversale reale.

La misurazione degli allungamenti avviene su un campione di corda di **lunghezza nota** ed **escludendo** ancora una volta **gli scorrimenti che avvengono all'interno delle gole dei tamburi**. Questa **codificazione** che porta a utilizzare l'Allungamento unitario

$$A_u = (l - l_0) / l_0 \quad (10)$$

è necessaria per permettere il raffronto quantitativo fra i vari campioni di corda testati, indipendentemente dalla loro lunghezza a riposo.

Visto che le deformazioni subite durante il procedere della trazione sono in parte permanenti (plastiche, irreversibili, viscosi), la Curva di scarico **non coincide** con la Curva di carico, definendo così un Allungamento unitario residuo permanente A_{ur} (0,15 nella fattispecie).

Anche in questo caso, come nel precedente relativo a elementi isotropi (**Figura 16bis**, pag. 27), si distinguono tre superfici sottese alle curve, per le quali valgono gli stessi criteri e considerazioni.

Le tre superfici che si distinguono nel grafico di **Figura 21**, la cui estensione è sempre ricavabile **tramite integrazione grafica** delle curve $F = f(A_u)$ (su intervalli di Allungamento unitario definiti), sono:

1. **Superficie di carico** $0 - F_{max} - A_{u\ max} - 0$ (gialla + celeste) che è equivalente al lavoro ΔL_{carico} svolto dal dinamometro per raggiungere lo Forza F_{max} e l'Allungamento unitario $A_{u\ max}$;

ΔL_{carico} è anche l'energia totale in gioco prodotta da una qualsivoglia sollecitazione;

2. **Superficie di scarico** $0 - F_{max} - A_{ur} - 0$ (celeste) che equivale al lavoro $\Delta L_{scarico}$ restituito dalle deformazioni reversibili prodotte dalla sollecitazione;
3. **Superficie di dissipazione** (o di plasticità) (gialla) equivalente al lavoro $\Delta L_{dissipazione}$ perso in deformazioni permanenti, ottenibile dalla differenza $\Delta L_{dissipazione} = \Delta L_{carico} - \Delta L_{scarico}$.

Anche in questo caso, trattandosi sempre di curve costruite sperimentalmente senza la certificazione matematica di **continuità delle funzioni**, il calcolo **attraverso l'integrazione grafica** dell'estensione delle superfici sottese alle curve sperimentali $F = f(A_u)$ permette di valutare le quantità d'energia in gioco. Come sempre, quest'analisi energetica sperimentale è una procedura di fondamentale importanza per raggiungere la conoscenza dei meccanismi che intercorrono fra i vari aspetti delle deformazioni dei materiali polimerici e la natura delle sollecitazioni che le producono.

Ma è necessario precisare che, trattandosi in questo caso di sottoporre a trazione elementi anisotropi come una corda, l'analisi tiene conto anche delle dissipazioni d'energia dovute alla compattazione della sua struttura Complessa, soprattutto se sono corde dinamiche di destinazione alpinistica.

Nella **Parte II** (pag. 38 e seg.) per gli aspetti teorici e metodologici e nella **Parte V** (pag. 150 e seg.) e **Parte VI** (pag. 217 e seg.) per le valutazioni sperimentali sono esposti i risultati e le analisi di test d'isteresi su corde, ma **su più cicli** e con velocità di trazione **più elevata e variabile** (Test a caduta e Analisi Dinamico Meccanica).

L'integrazione grafica delle curve $F = f(A_u)$ per il calcolo delle superfici sottese a qualsiasi curva, in un qualsiasi intervallo di Allungamento unitario, può essere eseguita in tempo reale attraverso le schede e i programmi d'acquisizione digitalizzati predisposti per le strumentazioni del CRASC.

Anche qui si tratta di **test d'isteresi** a trazione lenta, ma completando **solo i primi due cicli**.

01.b.b.3) Superficie di plasticità, test d'isteresi per le corde (e cordini) e Analisi Dinamico Meccanica non-lineare – Questa superficie è quella compresa fra la **curva di carico** e **scarico (gialla)**: è intuitivo concludere che la loro estensione è equivalente a $\Delta L_{dissipazione}$, cioè il lavoro che viene assorbito e dissipato nel campione di corda, provocando delle deformazioni permanenti, irreversibili.

La **superficie di plasticità** dà quindi una misura della porzione d'energia, prodotta dalla trazione, che ha causato un **"danno"** permanente nella corda. Le cause: CSCC, deformazioni visco-elastiche, variazioni della cristallinità, plastificazione per idrolisi, degradazione idrolitica e altre cause minori (pag. 60 e seg., **Parte III**)

Inoltre, nella sua vita attiva, una corda speleo-alpinistica subisce un'infinità di sollecitazioni di piccola entità (a volte anche di grande entità): ognuna lascia un **contributo d'usura** che va a sommarsi a tutti quelli prodotti in precedenza. Anche questo **"danno"** da **successione di choc** incide sull'ampiezza della superficie di plasticità.

Questo ciclo di sollecitazioni su una **Corda** - costituito dall'insieme Curva di carico + Curva di scarico riprodotto in **Figura 21**, ottenuto trazionando fino ad un valore massimo di Forza (o Allungamento) per poi rilasciare la trazione fino a raggiungere di nuovo la forza iniziale uguale a zero - è del tutto analogo a quello ricavato sul campione polimerico **isotropo** di **Figura 16bis** (pag. 27). Anche questo è definito **Ciclo d'isteresi** e si svolge a trazione quasi-statica (0,006 m/s).

In queste condizioni di **trazione lenta**, data la strumentazione di misura disponibile nel laboratorio CRASC, la campionatura delle Forze e degli Allungamenti avviene con **intervalli di 1-3 secondi**.

$\Delta L_{dissipazione}$, con il suo valore, può essere correlato a una misura della decadenza complessiva della corda; ma **senza distinguere i diversi contributi portati dalle diverse cause**. Per poter correlare, anche quantitativamente, l'energia dissipata con le varie possibilità di deformazione di una corda trazionata è necessario che l'**isteresi** sia prodotta da una **sollecitazione veloce** e con strumentazioni che possano rilevare le Forze e gli Allungamenti con intervalli di tempo **uguali o inferiori al millisecondo** (cella di carico del dinamometro "dinamica", misurazione "laser" degli allungamenti e acquisizione con scheda adeguata).

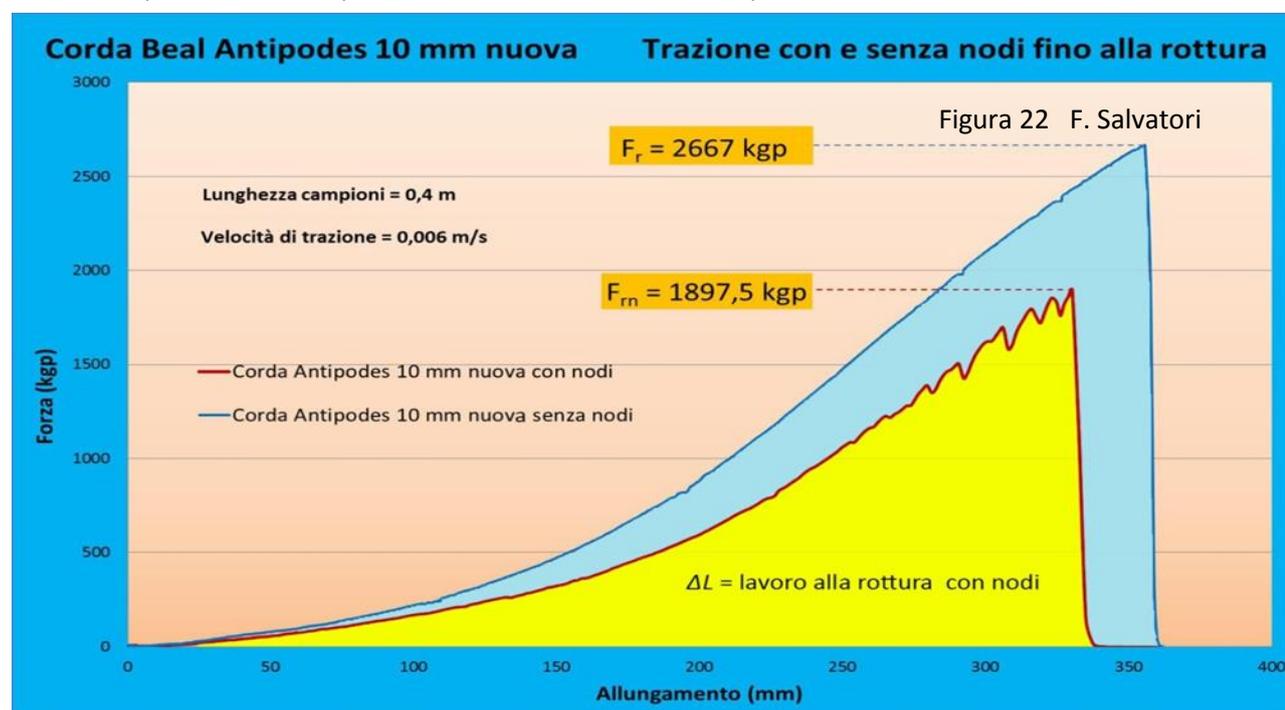
E' altresì necessario che l'isteresi si sviluppi in più cicli correlati, producendo quella che è definita **Analisi Dinamico Meccanica non-lineare** (pag. 47, **Figura 39**). Analisi che viene sviluppata nella parte teorica e nell'impostazione sperimentale nella **Parte II** (pag. 38 e seg.) e per l'analisi dei test eseguiti nella **Parte V** (pag. 150 e seg.) e nella **Parte VI** (pag. 217 e seg.).

01.c) Ancoraggi per corde con nodi e bloccanti - E' anche possibile ancorare per la trazione nel dinamometro una corda (o cordino o fettuccia) con nodi (pag. 21, **Figura 2**) o con bloccanti (pag. 35, **Figura 23** e **Figura 24**).

Ma in questo caso ha determinare il valore della forza alla quale avviene la rottura non è solo il tipo di materiale e la sua quantità, ma anche il modo di **confezionare il nodo** o **l'architettura del bloccante** (o di qualsiasi altro tipo d'aggancio meccanico si utilizzi).

01.c.a) Ancoraggi per corde con nodi - Nel caso di **corde con nodi d'aggancio alle estremità**, queste si rompono sempre in una sezione trasversale posta nel tratto trazonato che esce dalle spire del nodo (pag. 95, **Figura 78**), a un valore F_{rn} (più basso di $F_r = \text{rottura senza nodi}$). Le curve sono di nuovo $F = f(A)$.

Il grafico che ne rappresenta un esempio è in **Figura 22**, sotteso dalla **superficie gialla**, la cui estensione equivale al lavoro svolto per portare la corda alla rottura. Il grafico sotteso dalla **superficie celeste** si riferisce a quanto ottenuto portando alla rottura una corda equivalente, ma senza nodi.



Dal confronto fra i due diagrammi emergono le sostanziali differenze fra una trazione di una corda con nodi e senza nodi (valide sempre per qualsiasi tipo di corda):

1. il valore di F_{rn} è sempre inferiore a F_r di una percentuale variabile da nodo a nodo;
2. la parte finale del grafico "con nodi" è con andamento a denti di sega: è conseguenza della presenza dei nodi che, prima di raggiungere la rottura della corda, si strizzano con un susseguirsi in rapida successione di pressioni, scorrimenti, blocchi e rilasciamenti, producendo attriti, calore e innalzamento della temperatura (che è la causa del cedimento prematuro della corda sul nodo; pagg. 96 – 100, **Parte III**);
3. le due superfici sottese, misura del lavoro necessario per arrivare alla rottura, si differenziano: quella relativa alla trazione con nodo è sempre d'estensione inferiore in quanto la presenza di spire rende la corda soggetta a frizioni e attriti al loro interno che portano a un cedimento anticipato, che non viene compensato, se non in parte, dalla dispersione d'energia dovuta alla strizione delle spire stesse.

L'ascesa delle due curve è simile, propria di un elemento a struttura complessa anisotropa come le corde.

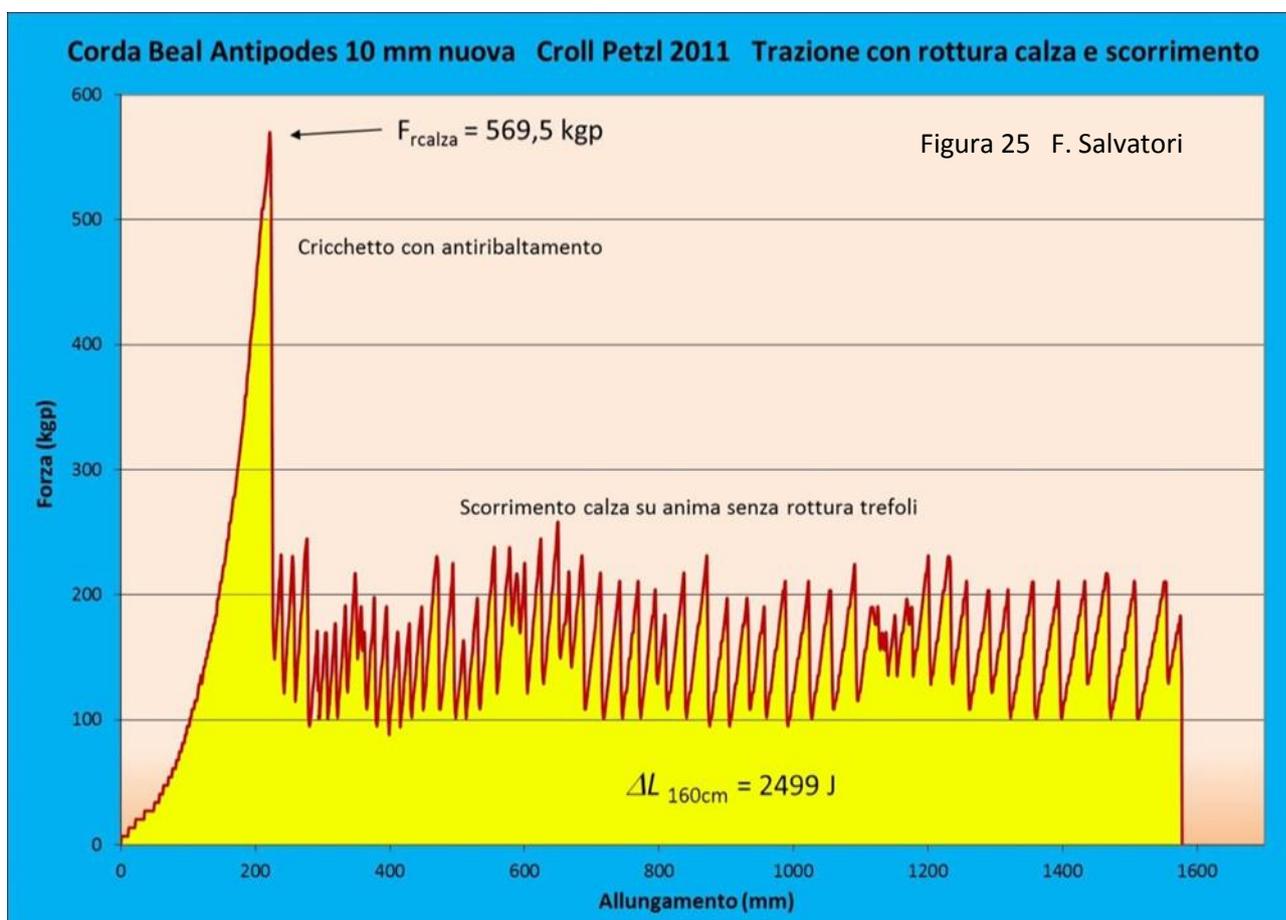
01.c.b.) Ancoraggi per corde con bloccanti – Con le stesse modalità del caso precedente, è stato trazonato nel dinamometro un campione di corda agganciato da una parte con un nodo e dall'altra con un bloccante **Croll Petzl anno 2011 con antiribaltamento** (Figura 23): il grafico risultante è riportato in Figura 25.



Figura 23 F. Salvatori



Figura 24 F. Salvatori



È evidente che l'ancoraggio con un bloccante riduce in modo ancor più netto, rispetto all'ancoraggio con nodi, il carico di rottura, che in questo caso coincide con il cedimento della sola calza $F_{r\text{calza}}$.

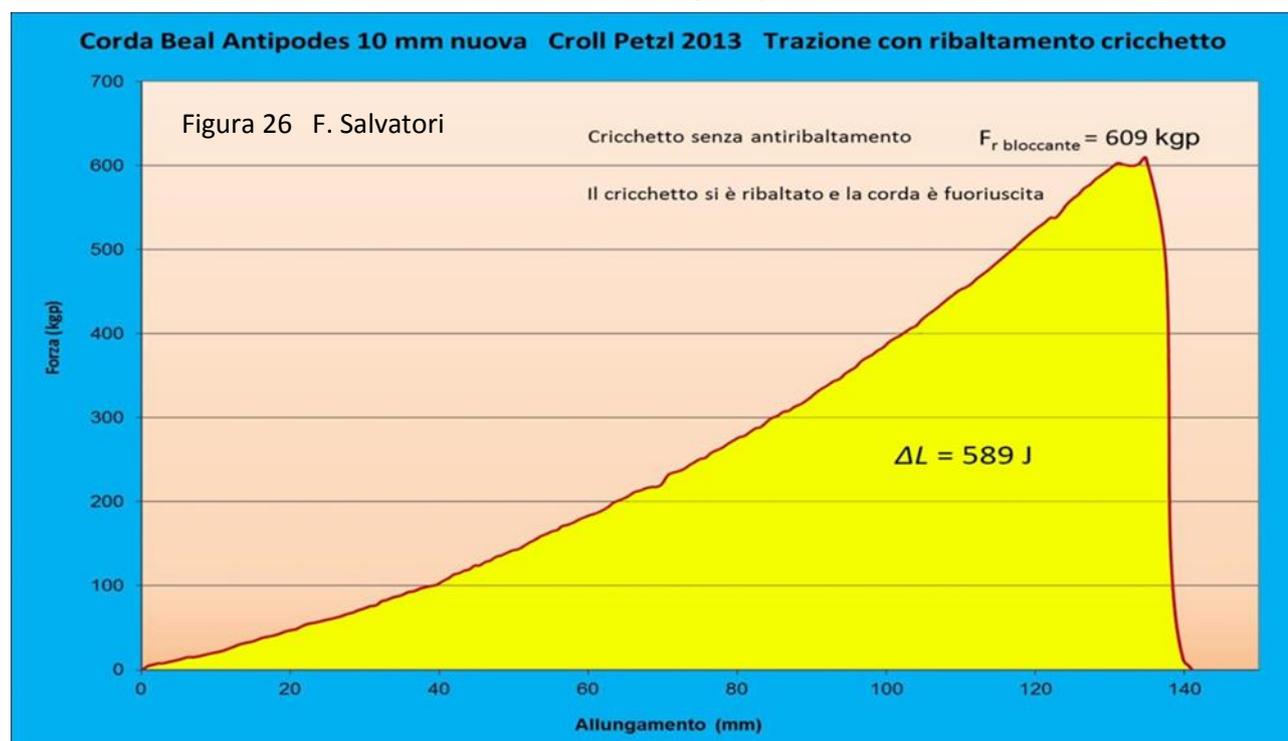
Tuttavia è interessante notare come la strumentazione del CRASC riesca a rilevare l'innesco di un sistema di dissipazione d'energia con attriti: il bloccante - lacerata la calza completamente e non potendo il cricchetto entrare nella gola per il blocco che impone l'antiribaltamento - inizia a **scorrere sull'insieme dei trefoli, senza romperli**.

Si crea di fatto un **dissipatore** per gli attriti bloccante/trefoli che si oppongono alla trazione; attriti che sottraggono energia all'allungamento e quindi all'aumento delle forze in gioco: dopo la rottura della calza ($F_{r\text{calza}} = 565,5 \text{ kgp}$), quando si manifesta la Forza massima di tutta l'evoluzione del grafico, seguono poi forze variabili comprese fra **100 e 200 kgp** che non compromettono la **tenuta della stessa struttura** del bloccante e degli altri componenti della catena di sicurezza della progressione, né di superare il LIR.

Nelle stesse condizioni la rottura della corda avverrebbe a ben **2667 kgp senza nodi** e a **1897,5 kgp con nodi**. L'innesco della "dissipazione per attrito" fa concludere la trazione con un lavoro di appena **2499 J** (superficie sottesa gialla) **senza rottura completa della corda** (rimangono intatti tutti i 13 trefoli dell'anima). Senza la "dissipazione per attrito" si sarebbe raggiunta la rottura della corda con un lavoro di **4899 J**, cioè più **196 %**. Questo particolare mezzo di dissipazione d'energia rende possibile l'utilizzo del bloccante in questione, nonostante che il produttore ne dia un limite di rottura a soli **500 kgp**, ben al di sotto di quanto richiede il LIR per tutti gli elementi che compongono la catena di sicurezza della progressione speleologica.

Per mostrare ancora una volta quanto sia penetrante e dettagliato il metodo d'analisi, soprattutto sperimentale, utilizzato per questo lavoro, facciamo due altri esempi di ancoraggio nel dinamometro di una corda con bloccanti.

Il primo (**Figura 26**) si riferisce a un'interazione Corda Beal Antipodes 10 mm nuova con bloccante **Croll Petzl 2013, senza antiribaltamento** e con lamierino in lega a spessore ridotto.



In questo caso, come nei precedenti viene messa in risalto l'efficacia analitica del metodo CRASC, che evidenzia:

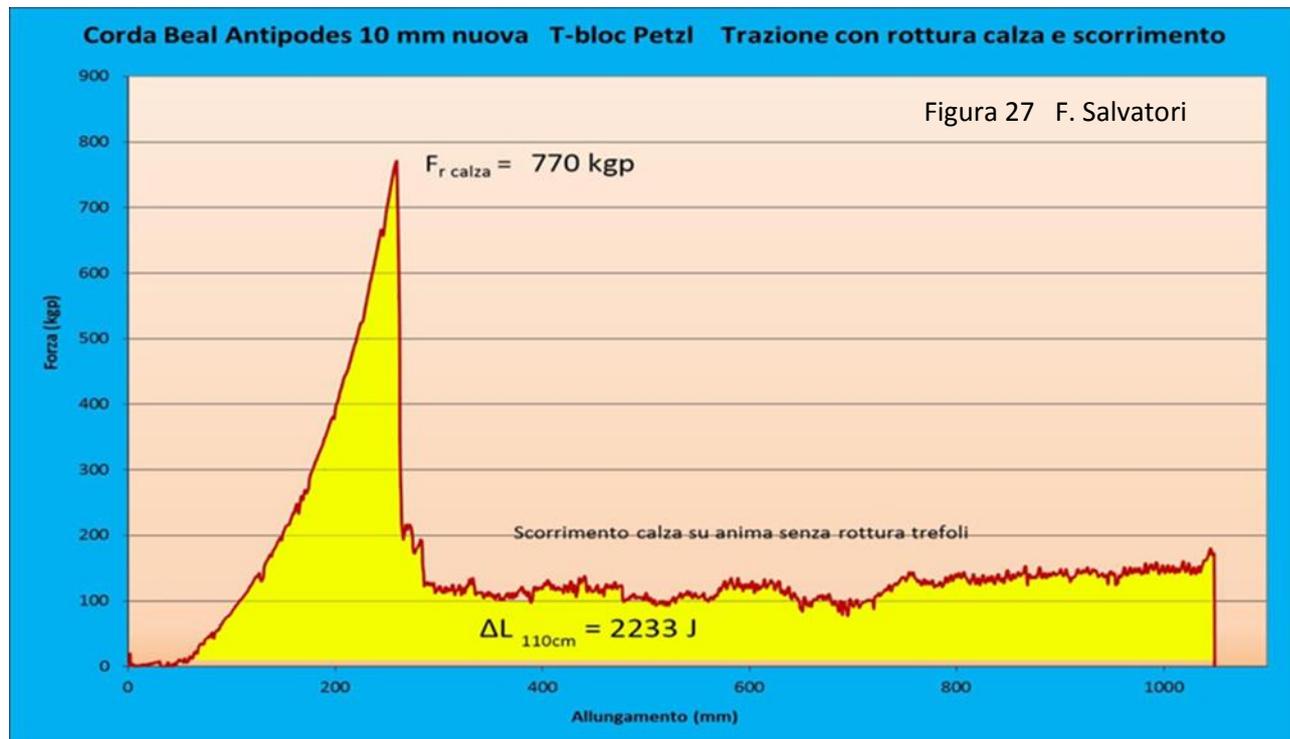
1. il malfunzionamento del meccanismo del **Croll 2013** (la mancanza di antiribaltamento permette al cricchetto di entrare senza limiti nella gola, forzandola ad allargarsi, complice anche il ridotto spessore del lamierino),
2. il basso valore di carico di rottura (molto al di sotto dei limiti di sicurezza),
3. l'insufficienza del sistema corda/bloccante nel fornire solo **589 J** di lavoro per impedire il suo cedimento.

Quest'ultimo risultato, confrontato con quanto accade nel caso di **Figura 25**, dimostra l'importanza dell'antiribaltamento, la cui azione di limitazione permette di selezionare la rottura della sola calza e d'innesicare un "dissipatore" che assorbe l'energia fornita dalla trazione del dinamometro e di mantenere la forza massima registrata ben al di sotto dei limiti di sicurezza.

Anche nel caso di **Figura 27** il metodo CRASC d'analisi mostra la sua efficacia: la corda è sempre la stessa, cambia il bloccante collegato che è il **T-bloc della Petzl**, tanto affidabile ed efficace quanto modesto nelle dimensioni e nel peso (*pag. 35, Figura 24*).

Il suo funzionamento è del tutto simile a quello del **Croll Petzl del 2011**, ma non ha bisogno dell'antiribaltamento perché la sua geometria e il sistema d'attrito sotto trazione non permette che la

corda sia strozzata e tranciata completamente). Inoltre la quantità d'energia assorbita dal "dissipatore" innescatosi con la rottura della calza, e non dei trefoli, è sufficiente a impedire l'innalzamento delle forze registrate, con il valore massimo nel momento della rottura della calza: **770 kgp** sono ben al di sotto dei **1100 kgp del Limite Inferiore di Resistenza (LIR)**.



01.d) Conclusioni – I test a trazione lenta (0,006 m/s) nel dinamometro CRASC, che permettono di costruire grafici **forza/allungamento** e **forza/allungamento unitario** (con provini anisotropi come le corde) o **sforzo/deformazione** (provini isotropi come fili elementari), sono di grande efficacia analitica.

Per le corde (e per i fili elementari che le compongono) si possono rilevare le caratteristiche meccaniche come:

1. Modulo d'elasticità,
2. Sforzo a snervamento,
3. Sforzo a rottura,
4. Carico di rottura senza nodi,
5. Carico di rottura con nodi,
6. Superficie efficace,
7. Curve di carico/scarico (isteresi),
8. Superfici di carico (energia),
9. Superfici di scarico (energia),
10. Superfici di plasticità (energia),
11. Ancoraggi con nodi (effetto nodo),
12. Ancoraggi con bloccanti (innesco dissipatori).

Tutti questi strumenti e metodi d'indagine tecnico-scientifica saranno utilizzati nella **Parte IV** (pag. 106 e seg.) per valutare le varie ricerche sperimentali effettuate e trarne indicazioni qualitative e quantitative sulle caratteristiche della **Corde speleo-alpinistiche** e valutarne l'affidabilità, i limiti di sicurezza, il grado di decadimento e la sua evoluzione.

Parte II

*Test a caduta con trazione veloce su Corde
speleo-alpinistiche*

Torre di caduta CRASC

*Strumenti, raccolta dei dati ed elaborazioni:
Analisi Dinamico Meccanica Non-lineare
con Modello Analogico Parallelo di Voigt*

Velocità di deformazione

Emblematici esempi d'analisi su test a
caduta con corde e attrezzature speleo

01. Strumentazione, modi d'uso e metodi d'analisi

01.a) Premessa – In generale, nel corso degli ultimi decenni, nel vasto campo dei test sui materiali (metallici, plastici o altro) si è sempre più evidenziata la necessità di definire il variare dei risultati, quantitativi e qualitativi, in funzione della **velocità di deformazione** V_d del campione sottoposto a prova.

E anche con i materiali e gli attrezzi per la progressione speleo-alpinistica è indispensabile mostrare le loro caratteristiche e la resistenza alla rottura anche nelle condizioni che sono più coerenti con la realtà, **molto dinamica**, della progressione, riproducendo situazioni traumatiche derivanti dall'eventuale cedimento della **catena di sicurezza** (cioè, per esemplificare, l'insieme concatenato degli strumenti che consentono di progredire in sicurezza in grotta e in montagna: roccia, ancoraggi, moschettoni, corda con nodi, discensore (o bloccanti), imbracatura, corpo umano).

Nel caso di una sollecitazione choc (ad esempio, caduta di un peso da una data altezza), la catena di sicurezza reagisce cercando di arrestare la caduta, deformandosi in allungamento fino ad assorbire l'energia cinetica del peso cadente: alcuni elementi "**rigidi**" (moschettoni, ancoraggi e similari attrezzi) hanno il compito di non rompersi; altri elementi "**soffici**" (la corda soprattutto), sono invece deputati a non rompersi ma anche, soprattutto, ad allungarsi per assorbire l'energia in gioco dovuta alla eventuale caduta di un peso.

Quindi la corda speleo (non quella alpinistica) ha il compito di essere, al tempo stesso, la via di progressione, il mezzo di assicurazione e lo strumento deformabile che assorbe l'energia di una eventuale caduta.

La corda risulta quindi come lo strumento speleologico di progressione più importante e delicato; ma al tempo stesso anche quello che subisce gli "attacchi" degradanti più pesanti derivanti dall'uso.

Come più volte già detto, questo lavoro è dedicato alla comprensione, all'analisi e, possibilmente, alla misura del decadimento di una corda per usura, individuandone i limiti di sicurezza; ma è anche dedicato a comprendere quali sia il modo migliore per proteggerla e conservarla.

Non può quindi mancare un'esposizione teorica e, soprattutto, sperimentale che riguardi gli effetti usuranti prodotti dalle **sollecitazioni choc**, come quelle derivanti dal cedimento della Catena di sicurezza e dalla conseguente caduta di un peso.

A tal scopo si espone in questa **Parte** quali sono le strumentazioni, i modi d'uso e i metodi d'analisi che vengono utilizzati nel **CRASC** per valutare gli effetti delle **sollecitazioni veloci per caduta di un peso**. In particolare tratteremo della **TORRE DI CADUTA CRASC**.

01.b) Torre di caduta CRASC – E', al momento, l'unico laboratorio esistente per test a trazione veloce variabile per attrezzature speleo-alpinistiche, con rilevazione di forza, allungamenti e tempo.

La Torre è costituita da una trave, posta in verticale, autoportante, di **9 m** di lunghezza, di forma e dimensioni tali da dare rigidità al sistema. Tale rigidità è resa estrema dal fatto che la trave è stata saldamente e ripetutamente ancorata a un muro dello spessore di 120 cm (**Figura 28**).

A questa trave sono applicati (con mensole) gli strumenti di misura della forza (**cella di carico dinamica**) e dell'allungamento (**sensore di spostamento laser**).

Il peso viene sollevato con un verricello e può essere posizionato a un'altezza qualsiasi all'interno della trave: uno sganciatore meccanico o elettromagnetico (**Figura 29**) provvede a farlo cadere al momento stabilito (una vasca con sabbia posta alla base della trave può eventualmente accoglierne la caduta senza urti eccessivi).

Il peso di massa m - una volta lasciato libero di cadere - è attratto dalla forza di gravità, che, con accelerazione g come costante di proporzionalità, aumenta, linearmente, la sua velocità col passare del tempo t . La relazione che controlla il fenomeno è:

$$V = g \cdot t \tag{11}$$



Figura 28 F. Salvatori

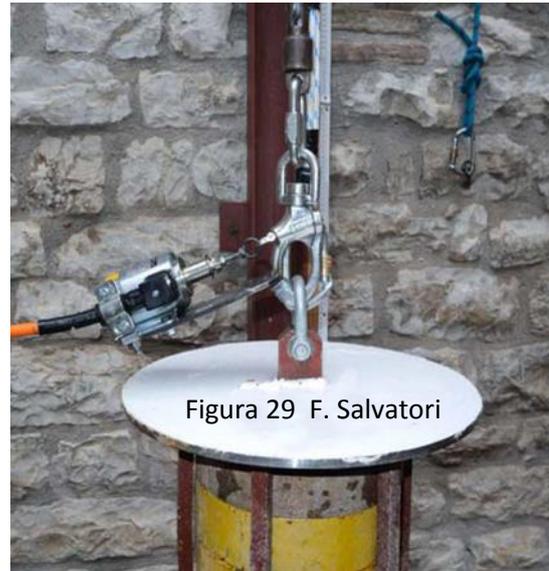


Figura 29 F. Salvatori

Prima della caduta del peso, s'interpone fra il peso stesso e la cella di carico l'elemento da testare (un campione di corda, un moschettone, l'insieme di più elementi come una corda e un bloccante, una longe o comunque uno dei tanti possibili elementi che vanno a costituire la catena di sicurezza) e se ne misura la lunghezza a riposo L_0 .

A questo punto si **solleva il peso** in modo che possa **cadere liberamente** per un'altezza h prima di mettere sotto sollecitazione l'elemento da testare.

E quindi si sgancia il peso (**Figura 29**): nel grafico di **Figura 30** è riportato lo svolgersi

della caduta, con la velocità del peso che varia da **zero** al massimo, per poi decresce ancora fino a **zero**, trattenuto dal campione testato, che si è allungato per assorbire tutta l'energia in gioco [pari a $E_{potenziale} = P (h + A_0)$] ($A_0 =$ **allungamento massimo del campione**).

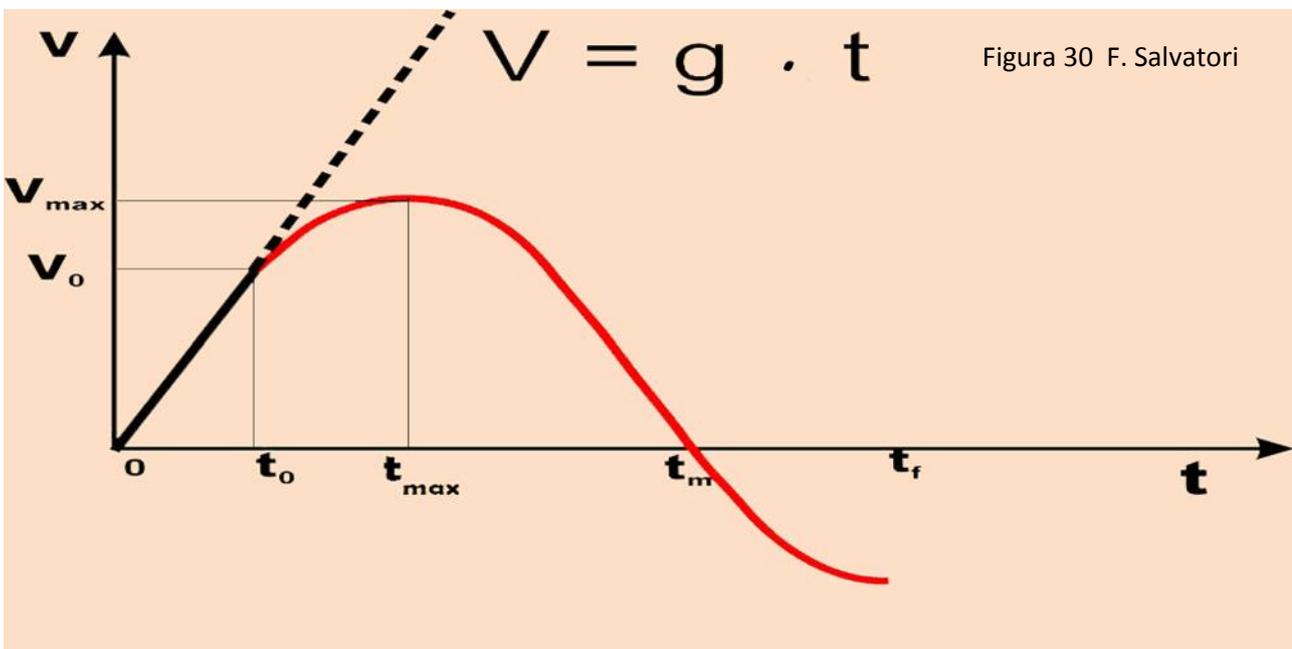


Figura 30 F. Salvatori

Quanto sin qui detto vale per ogni tipo di campione, isotropo o anisotropo che sia, corto pochi centimetri (**moschettone**) o lungo qualche metro (**corda**). Ma per adeguarci al tema di base di questo lavoro (e alle sperimentazioni che seguiranno nella **Parte III** e **IV**) tutte le impostazioni, considerazioni e conclusioni che seguono sono riferite a test a caduta dove il campione è una corda della lunghezza a riposo uguale a l_0 . Dunque, nel periodo $0 - t_0$ il peso cade per un'altezza h senza vincolo alcuno, raggiungendo la velocità V_0 :

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot h \cdot g} \quad (12)$$

che è anche definita come “**velocità d’impatto**” ed è la velocità con cui **si allunga inizialmente il campione**.

Il campione di corda comincia ad allungarsi, assorbendo energia: siamo nel tratto $t_0 - t_{max}$, dove la velocità aumenta ancora ma con incrementi sempre più ridotti finché al tempo t_{max} viene raggiunto il valore più elevato V_{max} . Da questo punto in avanti la velocità del peso decresce fintanto che al tempo t_m il peso è fermo, il campione raggiunge il suo allungamento massimo A_{max} (che viene registrato dal misuratore di distanza laser) e la cella di carico registra il valore massimo di forza F_{max} .

Dopo aver raggiunto il massimo allungamento il peso rimbalza verso l’alto spinto **dall’energia elastica** accumulata nel campione testato. Ma non raggiunge il punto di partenza iniziale perché quest’ultima porzione di energia è inferiore a quella conferita per la caduta del peso ($E_{potenziale} = P \cdot h$).

Si determina con il test a caduta una successione di cicli d’isteresi (smorzamento) dove si determinano le stesse superfici indicate nei **Paragrafi g – h** della **Parte III**: le valutazioni e le conclusioni lì tratte valgono anche per i cicli d’isteresi ottenuti con le prove a caduta.

Attenzione, il tempo in cui si verifica la forza massima e il tempo quando si registra l’allungamento massimo non coincidono: per effetto della viscosità dei fili elementari di Nylon che costituiscono le corde c’è un ritardo di alcuni millisecondi (nei paragrafi che seguono questo problema del ritardo è trattato dettagliatamente, essendo uno dei parametri maggiormente significativi per valutare lo stato di decadimento delle corde e la sua evoluzione con l’uso)

Ma, fatto di grande rilevanza ed eccezionalità, nei test a caduta, rispetto ai test quasi-statici, la velocità di trazione è molto più elevata e anche regolabile: la **Relazione 12** ci dice che variando l’altezza di caduta h possiamo variare a piacimento la velocità d’impatto e quindi anche quella d’esecuzione dei cicli.

Se per qualche motivo l’energia in gioco nella caduta ($E_{potenziale} = P \cdot h$) è superiore a quella che può assorbire con l’allungamento il campione di corda, il test si conclude con la rottura del campione, la caduta del peso e l’aborto dell’isteresi. In questo caso molte **valutazioni sulla viscosità/decadenza** non possono essere fatte.

Da tenere presente che l’energia in gioco nei test a caduta può essere variata, a parità di altezza di caduta, solo variando il valore della massa m del peso.

01.c) Test a caduta di una corda e Superficie efficace – Ogni valutazione sul decadimento delle poliammidi e quindi delle corde ottenute con la tessitura di fili elementari di Nylon, deve poter conoscere la sezione trasversale del campione di corda sottoposto a test, il quale quindi deve essere un solido isotropo nella geometria e nel materiale che lo costituisce. Infatti l’Analisi Dinamico Meccanica (DMA) Lineare (pag. 307 e seg., **Appendici 06**) e Non-lineare (pag. 310 e seg., **Appendici 06**), l’Esperimento di Creep su elemento isotropo (pag. 305 e seg., **Appendici 06**) e su corda (pag. 312 e seg., **Appendici 07**), fondamentali per valutare gli aspetti visco-elastici del Nylon (oggetto principale d’analisi in questa Parte del lavoro) richiede di utilizzare **curve Sforzo σ /Deformazione ε** e quindi di conoscere la sezione trasversale a riposo S_0 del provino [20].

Trattandosi di una **corda** sottoposta a test a caduta, per utilizzare l’Analisi Dinamico Meccanica e conoscerne la visco-elasticità, occorre ricavare l’equivalente superficie S_0 e cioè la Superficie efficace S_e attraverso la **Relazione 7** (pag. 41 e seg., **Appendici 05**):

$$S_e = \frac{F_r}{10^3 \cdot T \cdot \rho} \text{ mm}^2 \quad (7)$$

01.d) Test a caduta su una corda, modo d'aggancio del campione alla cella di carico e al peso, lunghezza minima a riposo del campione

– Anche nella Torre di caduta con trazione verticale (Figura 28), come nel Dinamometro a trazione lenta orizzontale (pag. 21, Figura 1), è necessario ancorare i campioni da testare alla cella di carico e al peso cadente (che sostituisce il pistone traente del dinamometro).

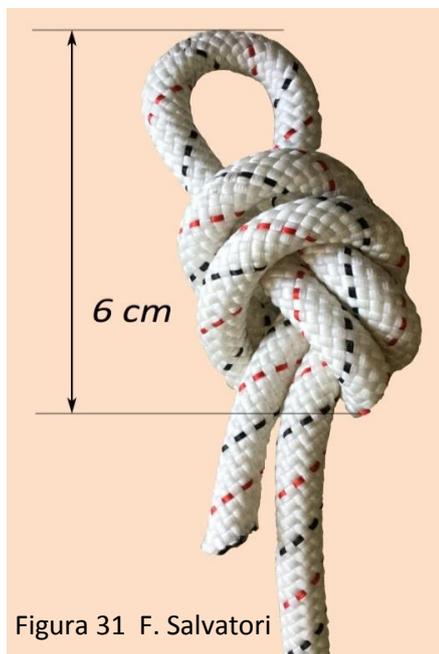


Figura 31 F. Salvatori

Dovendo quindi testare dei **campioni di corda** occorre evitare che i sistemi d'aggancio interferiscano troppo nella misurazione dei carichi di rottura: è necessario impedire che si crei un'addizionale deformabilità e dissipazione d'energia per attriti, come accade con la strizione dei nodi.

Non è possibile quindi utilizzare sistemi come l'avvolgimento su tamburi (pag. 29, Figura 18): per problemi pratici, sicuramente, ma soprattutto perché le spire di corda nelle gole, sotto trazione, scorrono creando allungamenti anomali che non permettono di misurare gli allungamenti effettivi del campione (che è invece, **fondamentale** per valutare gli **aspetti energetici** dei fenomeni).

Non è possibile neanche utilizzare dei morsetti tipo Figura 9 (pag. 22) perché, in una corda, inciderebbero marcatamente sui fili elementari della calza, abbassandone drasticamente il carico di rottura e lasciando poco margine per valutazioni sufficientemente ampie.

L'unica soluzione possibile è di agganciare il campione di corda con dei **nodi alle estremità**.

Ma questa soluzione, come detto, può inserire degli elementi - appunto i nodi - portatori di deformabilità aggiuntiva (la strizione delle spire del nodo), che andrebbero a falsare i risultati (infatti si potrebbe interpretare erroneamente che questa maggiore deformabilità sia dovuta alla viscosità dei fili elementari).

Comunque, per valutare sperimentalmente la percentuale d'elasticità aggiuntiva data dalla presenza di agganci tramite nodi, sono stati eseguiti dei **test a caduta** con Nodi Guida (Figura 31, il più semplice e facilmente ripetibile), variando la Lunghezza del campione, mentre si è mantenuto costante il Fattore di caduta F_c [11] [36] [37] [38]. Questi test hanno interessato cinque corde diverse, con lunghezza dei campioni variabili; tutte mai usate.

Secondo la teoria, espressa dalla relazione (Oscillazioni Armoniche Semplici) [36] [37]:

$$F_0 = P + \sqrt{P^2 + \frac{2P}{X} \cdot F_c} \quad (13)$$

la Forza massima F_0 - non variando il Peso P , il tipo di corda (X è il suo coefficiente d'elasticità, caratterizzante) e il Fattore di caduta F_c - dovrebbe rimanere costante. F_c è uguale al rapporto fra l_0 (lunghezza a riposo del campione di corda) e h (altezza di caduta libera del peso).

Ma il responso sperimentale ha dato risultati differenti, tali da indicare la via per un **aggancio corretto con nodi** sulla Torre. Questi risultati sono descritti nei grafici delle Figure 32 e 33. Le curve sono $l_0 = f(F_0)$.

Le condizioni sperimentali erano:

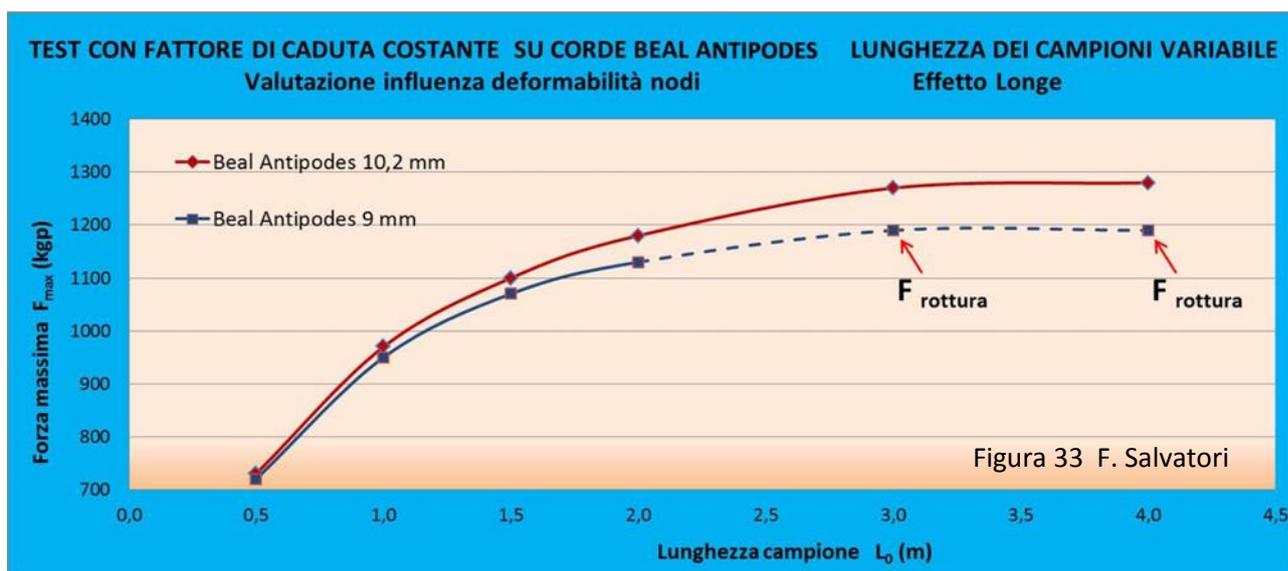
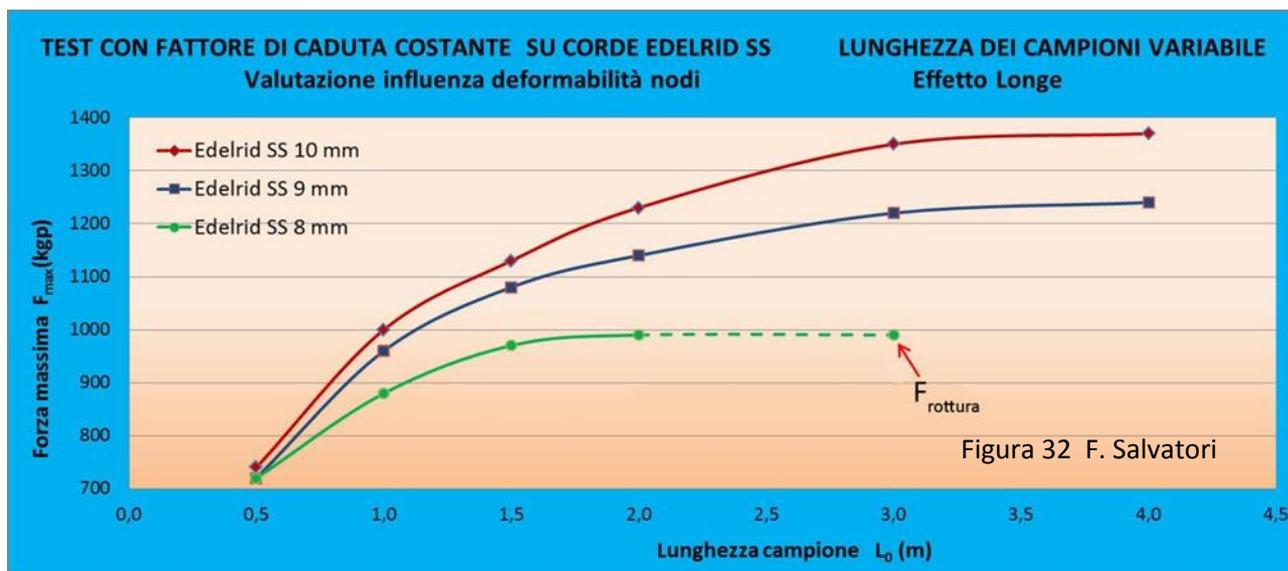
Nodi Guida alle due estremità del campione

Lunghezza gassa $l_g = 6 \text{ cm}$ (Figura 31)

Lunghezza campioni (fuori tutto) $l_0 = 0,5 \text{ m} - 1,0 \text{ m} - 1,5 \text{ m} - 2,0 \text{ m} - 2,5 \text{ m} - 3,0 \text{ m} - 4,0 \text{ m}$

Peso cadente $P = 90 \text{ kgp}$

Fattore di caduta $F_c = 1$



Le corde sottoposte a test sono:

1. Edelrid Super Statica 10 mm nuova,
2. Edelrid Super Statica 9 mm nuova,
3. Edelrid Super Statica 8 mm nuova,
4. Beal Antipodes 10,2 mm statica nuova,
5. Beal Antipodes 9 mm statica nuova.

In entrambe le figure è netta l'evidenza che la presenza dei nodi alle estremità d'aggancio dei campioni produce una deformabilità maggiore rispetto alla corda senza nodi. Ma è altrettanto evidente che, con **l'aumentare della lunghezza** del campione, questo apporto di **maggior duttilità cala d'importanza**.

Si può affermare, qualunque sia la corda, che con **campioni lunghi 3 m** l'apporto di deformabilità dei due nodi d'aggancio è **trascurabile** rispetto al contributo dato dall'allungamento del tratto di corda compreso fra i due nodi.

Questa osservazione ci fa concludere che per effettuare dei test con le corde senza subire l'influenza falsante della presenza dei nodi d'aggancio, occorre utilizzare campioni della **lunghezza di almeno 3 m**.

Da rimarcare, importante: dopo aver valutato il Carico di rottura della corda senza nodi F_T , e calcolato il valore della relativa Superficie efficace S_e , se il campione di corda ha una **lunghezza a riposo pari o superiore ai 3 m**, si può considerare che nella Torre di caduta si sta testando un **provino isotropo** di Nylon.

Ma dalle **Figure 32 e 33** possono essere ricavate altre importanti conclusioni sulla deformabilità delle corde. Risalta che, nello stesso tipo di corda (Edelrid o Beal), tanto è minore il diametro tanto maggiore è la loro capacità di allungarsi a parità di forza applicata. Questo è la conseguenza non di una maggiore duttilità dei fili elementari di Nylon impiegati per il confezionamento (*pag. 28, Figura 17*), ma perché diminuendo il Diametro apparente diminuisce anche la relativa Superficie efficace: quindi una quantità minore di materiale si oppone all'allungamento.

01.e) Test a caduta su una corda, acquisizione di dati sugli allungamenti, sulle forze e sui tempi

– Il sistema d'acquisizione dati nella Torre di caduta (*pag. 40, Figura 28*) è lo stesso utilizzato nel Dinamometro da banco: cella di carico "dinamica" per le forze, misuratore di distanza laser per gli allungamenti e misuratore dei tempi di campionamento. Il sistema di misura è automatizzato: appena la cella di carico rileva un peso di circa 10 kgp, la raccolta dei dati, sincronizzata, inizia; e prosegue fintanto che il test choc non si è completato.

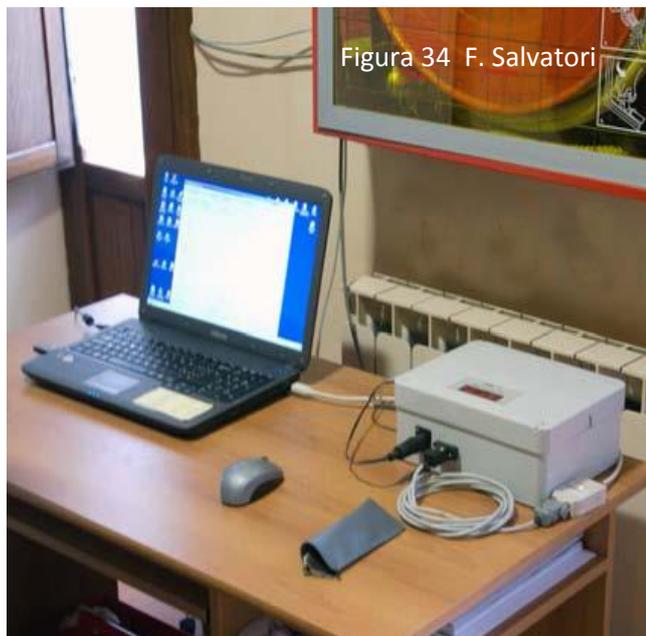


Figura 34 F. Salvatori

L'intervallo di campionatura è regolabile, a crescere da **1 ms** (millisecondo).

Quanto rilevato è inviato alla scheda d'acquisizione e quindi al computer (**Figura 34**), dove un programma dedicato li organizza, li elabora, rendendoli leggibili con varie organizzazioni e impostazioni grafiche.

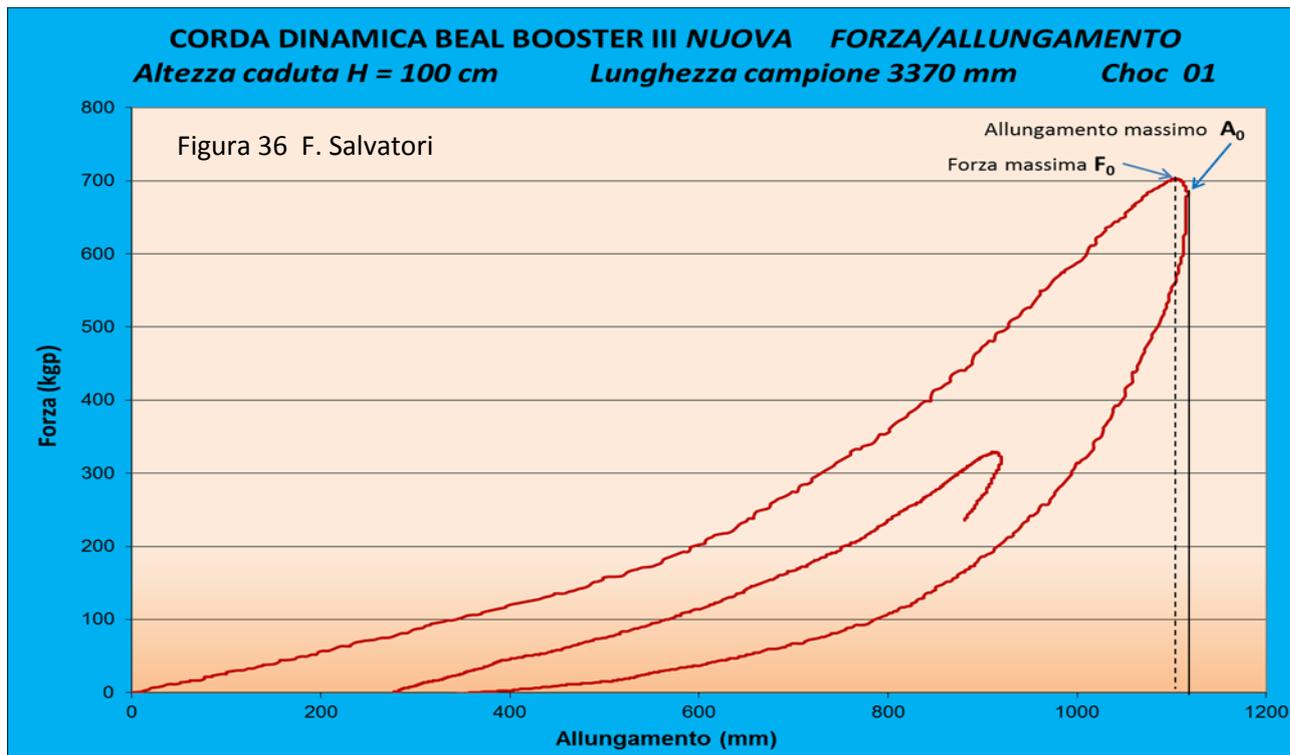
Le misure possono anche essere inserite in un foglio di lavoro, come mostrato in **Figura 35**, con incolonnati (da sinistra a destra) i dati di **allungamento**, di **forza** e di **tempo** registrati durante la **trazione** prodotta dalla caduta del peso - **senza rottura del campione** - e nei successivi rimbalzi e allungamenti, con **ciclo d'isteresi** in smorzamento.

Dai dati raccolti nella Tabella di **Figura 35** (rappresentata parzialmente) è possibile elaborare diversi diagrammi, a seconda delle necessità.

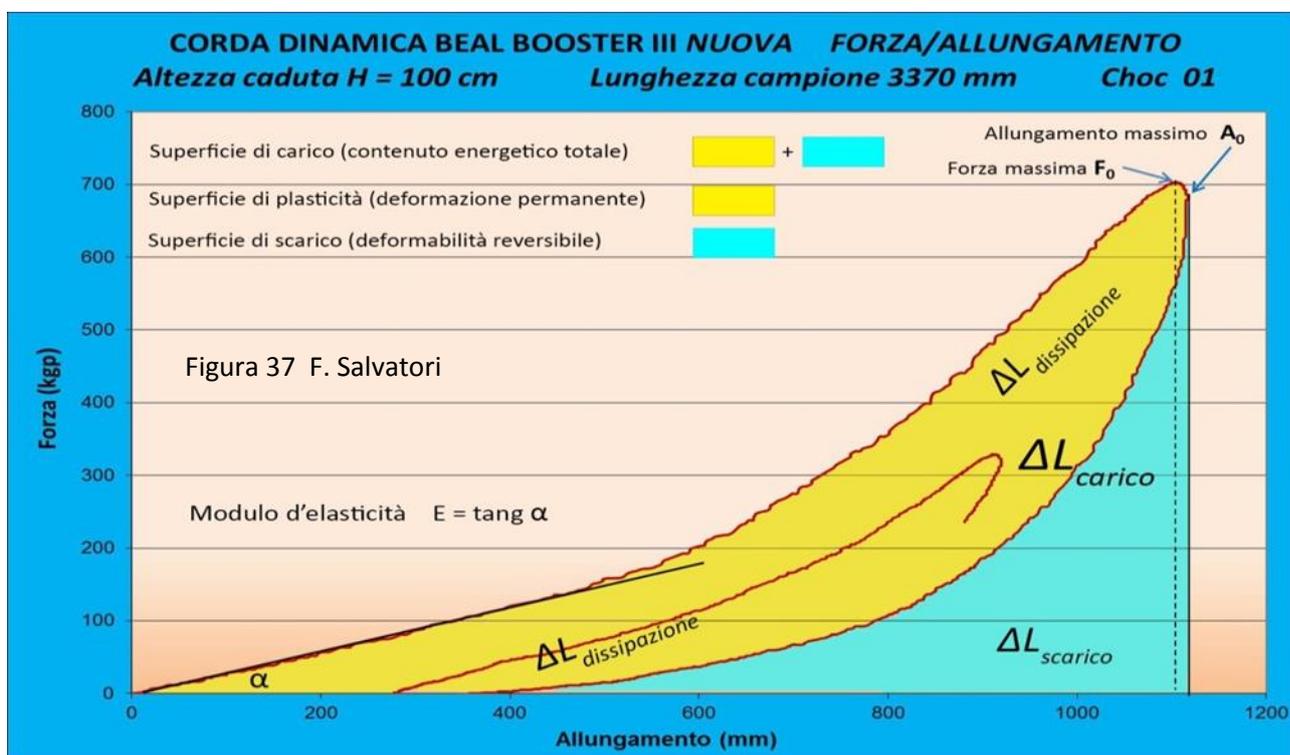
A		B	C	D
1	Data e Ora Creazione: 21/06/2013 12:45			
2	Versione Programma: ToolScopeWin Ver.: 1.45			
3	Anticipo misura laser: 27 msec			
4	Allungamento: 1117,6 mm			
5	Step campionamenti: 1 msec			
6	#			
7	Spazio (mm)	Forza (kgp)	Tempo (msec)	21/06/2013 12:44
8	0	0	0	
9	2,6	1,3	1	
10	2,6	1,3	2	
11	10,3	1,3	3	
12	10,3	2,5	4	
13	12,8	2,5	5	
14	23,1	2,5	6	
15	23,1	3,8	7	
16	30,8	5,1	8	
17	36	6,3	9	
18	41,1	6,3	10	
19	41,1	7,6	11	
20	51,4	8,9	12	

Figura 35 F. Salvatori

Elaborando un grafico della Forza in funzione dell'Allungamento $F = f(A)$ si ottiene quanto rappresentato nella **Figura 36**, cioè l'insieme del **Ciclo d'Isteresi** (1980 ms di tempo, pari al limite massimo di memoria disponibile nelle scheda d'acquisizione).



In questo diagramma è evidente il ritardo fra i **tempi** della Forza massima F_0 e dell'Allungamento massimo A_0 (come impone la natura visco-elastica dei fili di Nylon); ma sono altrettanto rilevabili le caratteristiche già mostrate per il ciclo d'isteresi a trazione lenta (pag. 34, **Figura 21**), come appunto è evidenziato in **Figura 37**.



Anche in **Figura 37** come in **Figura 21** (pag. 32) si possono trarre le stesse indicazioni:

1. nella fase iniziale l'andamento della curva è pressoché lineare, permettendo di calcolare il valore del modulo di elasticità $E = \text{tang } \alpha$;

2. segue un tratto con pendenza in costante aumento, quindi con E crescente e corda sempre più rigida;
3. la curva di scarico non segue lo stesso percorso di quella di carico, perché, ineluttabilmente, le deformazioni viscosi irreversibili hanno dissipato parte dell'energia dovuta alla caduta del peso;
4. le curve sottese sono sempre equivalenti alla quantità d'energia (data, restituita e assorbita).

La superficie gialla, compresa fra la curva di carico e scarico, è sempre la misura dell'energia "plasticizzata", cioè assorbita dal campione di corda in modo irreversibile: è un indice fra i più importanti per valutarne il decadimento della corda, ed è in relazione, anche quantitativa, con il ritardo δ fra il tempo dell'avvento della Forza massima F_0 e quello dell'avvento dell'Allungamento massimo A_0 .

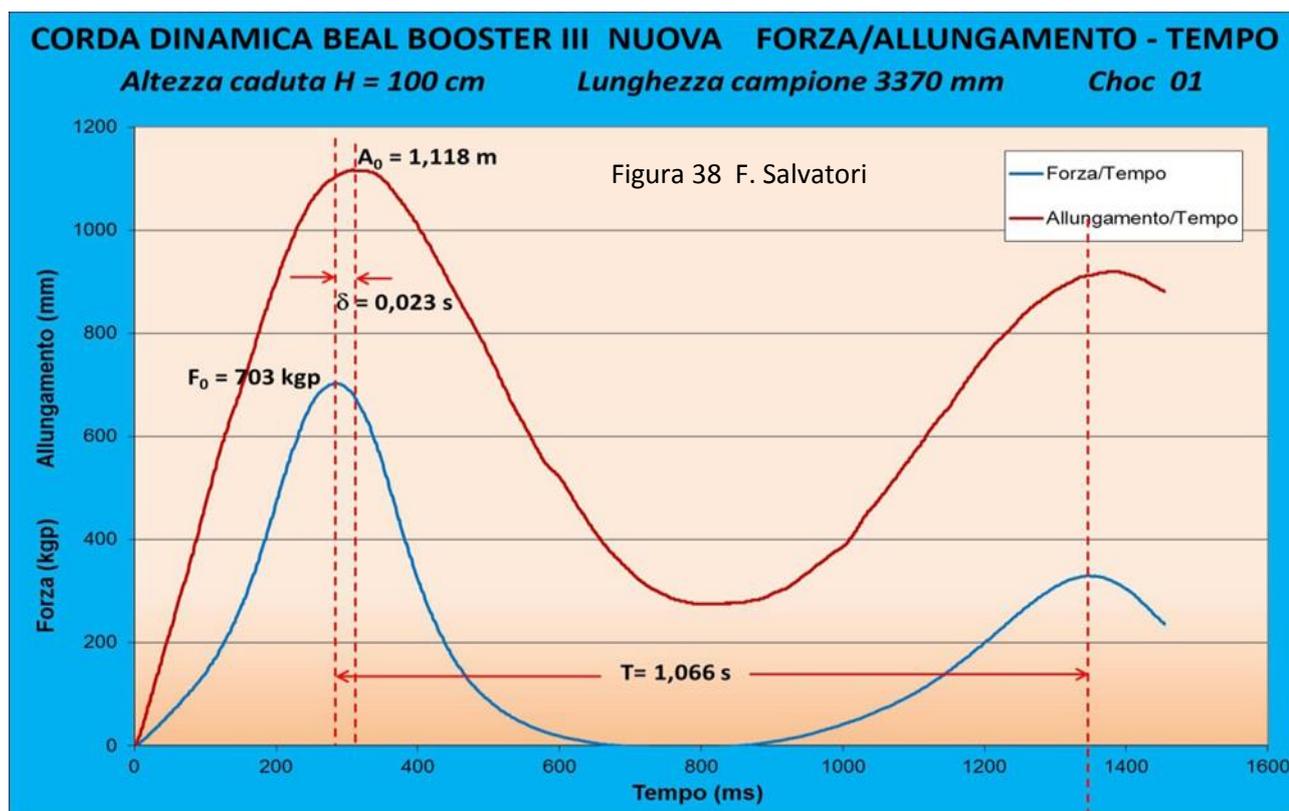
Apparentemente fra il grafico di **Figura 21** (trazione **lenta**) e quello di **Figura 37** (trazione **veloce**) c'è una differenza: nel primo non si manifesta il ritardo fra i tempi di F_0 e di A_0 ! Ma discrepanza è solo apparente, dovuta al fatto che a trazione lenta i tempi di campionamento vengono realizzati con intervalli compresi fra **1 e 2 secondi**: questo non fa apparire il ritardo, che esiste ed è **anche rilevante**, ma pur sempre impercettibile (poche **decine di millisecondi**) rispetto ai tempi di campionatura a trazione lenta.

Eseguito i test a **trazione lenta** con campionatura al **millesimo di secondo** (usando la strumentazione Laser), il ritardo δ si evidenzia. Nelle esperienze sperimentali contenute nella **Parte V** (pag. 150 e seg.) e nelle tabelle esposte nelle **Appendici** (pag. 279 e seg.) il valore di questo parametro è più volte evidenziato.

Proprio per sviluppare al meglio le elaborazioni relative al ritardo δ diagrammiamo i dati ottenuti nel test a caduta di cui a **Figura 36 e 37** e mettiamo a **confronto** le curve $F = f(t)$ e $A = f(t)$.

Si ricordi che il test è stato realizzato **su una corda**, un mezzo anisotropo, e quindi si utilizzano la Forza (in kgp) e l'Allungamento (in mm). Ma nel proseguo delle rilevazioni e dei calcoli - dovendoci basare sulla teoria dell'Analisi Dinamico Meccanica [20] (pag. 303 e seg., **Appendici 06**) - è necessario "trasformare" la corda in una "barra piena", a sezione trasversale costante, di materiale isotropo (Nylon), con il quale sia possibile trattare le relazioni matematiche utilizzando lo sforzo σ e le deformazioni ϵ (vedi elaborazioni nel Paragrafo che segue).

Perché questa "trasformazione" avvenga correttamente è inoltre indispensabile utilizzare la **Relazione 7** (pag. 29) che calcola la **Superficie efficace** (pag. 301 e seg., **Appendici 05**).



Nel grafico di **Figura 38** c'è un'ulteriore, fondamentale, elaborazione grafica che mostra nel dettaglio il comportamento di un elemento di materiale visco-elastico (come una corda speleo-alpinistica appunto) sotto una sollecitazione impulsiva a caduta, con i cicli d'isteresi, (utili i primi due), che si concludono in meno di due secondi (1980 ms).

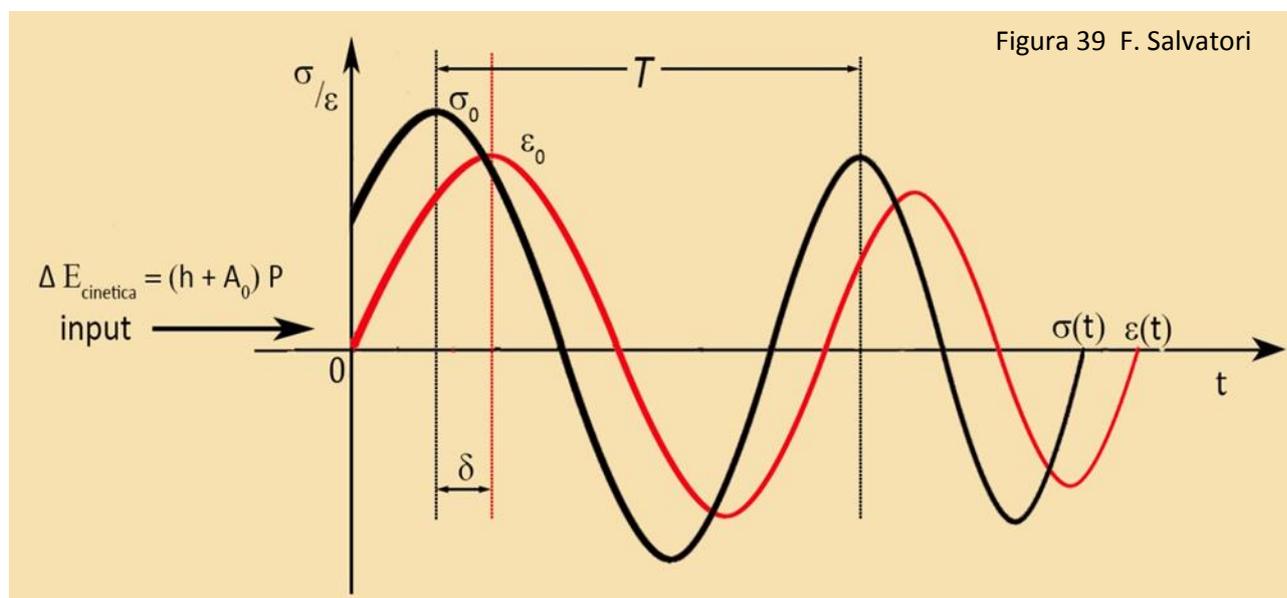
Si calcola innanzi tutto l'**Allungamento Massimo** A_0 , la **Forza Massima** F_0 e il **Periodo** T . Dal confronto fra curva **Allungamento/Tempo** (rossa) e curva **Forza/Tempo** (blu) si misura l'intervallo di tempo δ che intercorre fra il tempo in cui si raggiunge la **Forza massima** F_0 e, successivamente, l'**Allungamento massimo** A_0 :

$$\delta_{tempo} = \text{tempo di sfasamento (s)}$$

Questo tempo, di alcuni **millisecondi**, è una misura legata alla **natura visco-elastica** delle poliammidi, cioè a un **insieme di deformazioni elastiche reversibili e plastiche permanenti** conseguenti allo choc subito con la caduta del peso. Deformazioni che, a causa degli **attriti fra catene di macromolecole** sollecitate a distendersi dall'allungamento dei fili elementari, si attuano in ritardo rispetto alle forze applicate.

Di fatto, l'applicazione del carico costringe il groviglio di catene di polimeri a distendersi assumendo una posizione che solo in parte è reversibile.

01.f) Test a caduta su una corda, deformazioni dovute alla visco-elasticità delle Poliammidi (Nylon) e analisi dei relativi dati sperimentali – Da quanto mostrato nei grafici delle **Figure 36 – 37** e, soprattutto, dai diagrammi di **Figura 38**, dove sono messe a confronto in funzione del Tempo le curve $F = f(t)$ e $A = f(t)$, si rende evidente che la sollecitazione prodotta dalla caduta di un peso su una **corda – materiale anisotropo** - determina una **risposta visco-elastica** del tutto **analoga** a quella che si registra con l'**Analisi Dinamico Meccanica Non-lineare** su **materiali isotropi** (pag. 310 e seg., **Appendici 06**), di cui l'andamento e le dislocazioni dei grafici, riportati in **Figura 39**, ne sono un dimostrazione soddisfacente.



Questa analogia **permette di applicare le relazioni della DMA Non-lineare** (**Appendice 06, Paragrafo 06.c.a**) **anche ai test a caduta su una corda** [1] [20] [21], purché si tenga conto che le deformazioni possibili sono quelle indicate per l'**Esperimento di Creep su una corda speleo-alpinistica** (pag. 312 e seg., **Appendici 07**) e si faccia riferimento al **Modello Analogico Parallelo di Voigt**, ritenuto il **più rappresentativo per la visco-elasticità di una corda speleo-alpinistica** (comprendendo anche le deformazioni non viscose dovute alla sua CSCC).

01.g) Test a caduta su una corda, Modello Analogico Parallelo di Voigt e sua rappresentazione matematica – La composizione del Modello Analogico Parallelo di Voigt è quella indicata nella **Figura 40** ed è la combinazione "in parallelo" di un **elemento elastico** (reversibile) guidato dalla **Legge di Hook** e con un **elemento viscoso** (irreversibile), quantizzato dalla **Legge di Newton** [1] [20] [21] [30] [32].

L'equazione che esprime il Modello di Voigt è:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot d\varepsilon/dt \quad (14)$$

dove:

$$\sigma = F/S_0 = F/S_e = \text{sfuerzo} \text{ (Pa = N/m}^2\text{)}$$

$$F = \text{Forza (N)}$$

$$S_e = \text{Superficie efficace corda (m}^2\text{)}$$

$$E = \text{Modulo di elasticità (Young) (N/m}^2\text{)}$$

$$\varepsilon = (l - l_0)/l_0 = \text{deformazione}$$

$$l_0 = \text{lunghezza provino a riposo (m)}$$

$$l = \text{lunghezza provino trazonato (m)}$$

$$\eta = \text{coefficiente di viscosità (Pa} \cdot \text{s)}$$

$$t = \text{tempo (s)}$$

La Superficie efficace S_e di una corda è calcolabile, come già detto, attraverso la **Relazione 7** (pag. 29) e, ricordiamo, equivale alla sezione trasversale di un provino isotropo dello stesso materiale dei fili elementari. La superficie di S_e equivale anche alla somma delle superfici delle sezioni trasversali di tutti i fili elementari che compongono una corda, Calza più Anima (circa 70.000).

La conoscenza della Superficie efficace S_e è il passaggio fondamentale che permette di applicare ai test a **caduta su una corda** gli stessi metodi di calcolo, propri dell'Analisi Dinamico Meccanica Lineare e Non-lineare, per quantizzare i parametri caratterizzanti la visco-elasticità di un materiale polimerico isotropo [1] [20] [21] [30] [32].

Metodi di calcolo che, partendo dalla **Relazione 14**, si elaborano nel modo indicato in **Appendice 06** e che possono essere ricordati in sintesi come qui di seguito riportato:

$$\sigma/\varepsilon_0 = E' \text{ sen}\omega t + E'' \text{ cos}\omega t \quad d$$

$$\sigma = \sigma_0 \text{ cos}\delta \text{ sen}\omega t + \sigma_0 \text{ sen}\delta \text{ cos}\omega t \quad c$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{ cos}\delta = \text{Modulo elastico o conservativo} \quad e$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{ sen}\delta = \text{Modulo dissipativo o viscoso} \quad f$$

$$\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = E^* = \text{Modulo complesso} \quad g$$

$$E''/E' = \text{tang}\delta = \text{Fattore di perdita} \quad h$$

$$\Delta E_{\text{dissipazione}} = \pi \sigma_0^2 D'' = \pi \varepsilon_0^2 E'' \quad s$$

$$P_{\text{dissipazione}} = \frac{1}{2} \omega \sigma_0^2 D'' = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0^2 E'' \quad t$$

$$\eta = E'' \cdot \omega \quad u$$

$$\omega = 2\pi/T \text{ (radianti/s)} = (360^\circ)/T \text{ (gradi/s)} = \text{pulsazione} \quad v$$

Dai diagrammi tipo **Figura 38** si ricavano i dati sperimentali per definire i valori dei parametri sopra esposti:

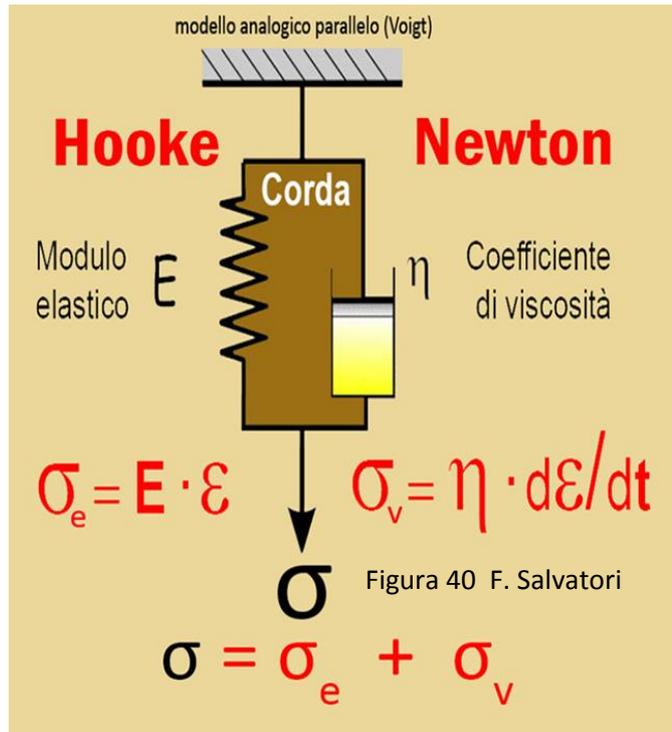
$$\delta = \text{tempo di sfasamento (s)}$$

$$\sigma_0 = F_0/S_e = \text{sfuerzo massimo 1}^\circ \text{ ciclo isteresi (Pa)}$$

$$\varepsilon_0 = A_0/l_0 = (l_0 - l)/l_0 = \text{deformazione massima 1}^\circ \text{ ciclo d'isteresi}$$

$$l_0 = \text{lunghezza del campione a riposo (m)}$$

$$T = \text{periodo (s)} = \text{intervallo di tempo fra 1}^\circ \text{ e 2}^\circ \text{ ciclo}$$



01.h) Test a caduta su una corda, esempio d'elaborazione matematica dei dati di tempo, di forza e d'allungamento per la valutazione della Velocità di deformazione, della visco-elasticità del materiale polimerico e dell'energia in gioco – Per ricavare un quadro completo di una corda, con tutte le sue caratteristiche meccaniche e chimico – fisiche, le condizioni di deformabilità e del suo stato d'uso è necessario integrare le conoscenze indicate nel precedente **Paragrafo 01.f** con altre note in letteratura [21] [28][30] [32], come la **Tenacità** e la **Densità**, contenute in tabelle (pag. 32, **Figura 19**) come quella qui di seguito riportata:

Poliammide Nylon 6.6			Poliammide Nylon 6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14		Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	265		Punto di fusione (°C)	218	
Tenacità (N/Tex)	0,64		Tenacità (N/Tex)	0,47	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	900	strength	Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	536	strength
Allungamento alla rottura (%)	16		Allungamento alla rottura (%)	26	
Modulo E (Gpa)	8,0		Modulo E (Gpa)	2,6	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	80		Lavoro alla rottura (mN/Tex)	76	

Integrato l'insieme di dati elencati nel precedente Paragrafo con quest'ultimi, si può compilare il Foglio di Lavoro di sintesi **relativo ad ogni test a caduta**, base poi d'ogni possibile elaborazione, sviluppo analitico, considerazione e conclusione; soprattutto se scaturite dal confronto fra i risultati di test analoghi, ottenuti in condizioni sperimentali omogenee, al variare di un ben individuato fattore.

Utilizziamo, per una migliore comprensione, l'esempio del test rappresentato graficamente nelle **Figure 36 – 37 – 38**, relativo a una **Corda Dinamica Beal Booster III**, diametro 9,7 mm, con altezza di caduta del peso di **100 cm**, lunghezza del campione a riposo di **3370 mm**, al **primo Choc**, massa del peso cadente **140 kg**.

Ecco la prima parte della compilazione con i dati di base e il valore calcolato della Superficie efficace S_e :

Corda Beal Booster III 9,7 mm Nuova H100 cm L3370 mm Choc 01		
Descrizione parametro	Simboli	Valori
Lunghezza campione fuori tutto (gasse 6 cm) pretiraggio 140 kgp (m)	$l_0 =$	3,370
Fibra calza		Nylon 6.0
Fibra anina		Nylon 6.0
Forza alla rottura senza nodi (kgp)	$F_r =$	1130
Tenacità=sforzo specifico alla rottura (N/tex)	$\sigma_{gr} =$	0,47
Densità (g/cm ³)	$\rho =$	1,14
Densità lineare (kg/m)	$\rho_l =$	0,024
Sezione efficace (m ²)	$S_e =$	2,06892E-05
Diametro efficace (mm)	$d_e =$	5,1

A questa serie di dati segue la **seconda parte** della tabella dedicata ai parametri caratterizzanti la **visco-elasticità dei fili elementari** della corda e il decadimento che ne consegue.

Utilizzando, come già descritto, la caduta del peso come impulso (**input**) dell'**Analisi Dinamico Meccanica Non-lineare** (a smorzamento), si prendono in esame i primi due cicli dell'isteresi che ne conseguono (pag. 48, **Figura 38**). I dati che si possono rilevare sono (in evidenza il Periodo **T**):

Forza massima primo ciclo (kgp)	$F_0 =$	703
Allungamento massimo primo ciclo (m)	$A_0 =$	1,118
Sfasamento $F_0 - A_0$ (s)	$\delta_{tempo} =$	0,023
Periodo: tempo necessario per completare un ciclo completo (s)	$T =$	1,066
Pulsazione: $360^\circ/\text{periodo}$ (gradi/s)	$\omega =$	338
Pulsazione: $2\pi/\text{periodo}$ (radianti)	$\omega =$	5,89
Sfasamento $F_0 - A_0$ (gradi)	$\delta_{gradi} =$	7,8
Sfasamento $F_0 - A_0$ (radianti)	$\delta_{radianti} =$	0,136
Sforzo massimo ($F_0/\text{sezione efficace}$) nel primo ciclo (GPa)	$\sigma_0 =$	0,333
Deformazione massima (A_0/l_0) nel primo ciclo (adimensionale)	$\epsilon_0 =$	0,332
Coseno di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\cos \delta =$	0,991
Senò di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\text{sen } \delta =$	0,135
Tangente di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\tan \delta =$	0,136
Modulo complesso (σ_0/ϵ_0) (GPa)	$E^* =$	1,005
Modulo elastico (in-fase reversibile) ($E^*\cos\delta$) (GPa)	$E' =$	0,996
Modulo viscoso (fuori-fase irreversibile) ($E^*\text{sen}\delta$) (GPa)	$E'' =$	0,136
Rapporto di dissipazione	$E''/E' = \tan \delta$	0,136
Coefficiente di viscosità (ω in radianti)	$\eta = E''/\omega$	0,023

In quest'ultima sezione della tabella sono stati calcolati i principali parametri che definiscono la sola visco-elasticità di una corda speleo-alpinistica:

1. E^* è il **Modulo Complesso**, la **misura totale** delle deformazione, elastiche e viscoso, subite dalla corda;
2. E' è il **Modulo Elastico**, la misura della deformazione **elastica, conservativa, reversibile**;
3. E'' è il **Modulo Viscoso**, la misura della deformazione **viscoso, dissipativa, irreversibile**;

Questi tre parametri sono di fondamentale importanza per la **valutazione separata degli effetti della sola visco-elasticità** a seguito della sollecitazioni a caduta. Con tali dati è possibile un confronto fra lo stato di corde diverse, sollecitate in modo diverso.

Ma di ancor maggior rilievo analitico è il **Fattore di dissipazione o di perdita** $E''/E' = \text{tang} \delta$ che dà la misura di quanta parte delle deformabilità visco – elastica di una corda risulta viscosa e quindi permanente. E' una delle misure più significative per valutare il danno prodotto dalle sollecitazioni - grandi o piccole – sulle corde, tanto in funzione del **n° degli choc** subiti che della **Velocità di deformazione** V_d .

Un significato simile a $\text{tang} \delta$ lo possiede il **Coefficiente di viscosità** η . La differenza sta nel fatto che quest'ultimo è dipendente unicamente dalle deformazioni viscosi, mentre $\text{tang} \delta$ è legato sia alle deformazioni elastiche che viscosi dalla relazione $E''/E' = \text{tang} \delta$. In termini semplificati questo parametro è una misura di quale variazione negativa è avvenuta nella visco – elasticità nei fili elementari a seguito di un'applicazione di un carico, quasi-statica o impulsiva che sia. Al limite, con $\text{tang} \delta = 0$ il materiale non è più viscoso.

$\text{tang} \delta$ non contiene alcuna indicazione su ogni altro tipo di modificazione come, ad esempio, la Compattazione della Struttura Complessa della Corda o **CSCC** (così importante nelle corde "dinamiche").

$\text{tang} \delta$ si modifica, innalzando il suo valore, anche nel caso che una sollecitazione provochi **la rottura di fili elementari**. Ma questa è una deformazione, irreversibile, solo apparentemente legata alla visco – elasticità; infatti si tratta del cedimento delle fibre polimeriche, che, in termini d'usura, è ben più grave di una modifica permanente nella strutturazione delle catene di macromolecole.

Dal punto di vista strettamente energetico, è possibile fare delle altre valutazioni utilizzando i dati ricavati da ogni test a caduta (pag. 23, Figura 3). Attraverso i grafici prodotti con la diagrammazione delle curve $F = f(A)$ è possibile, **anche se la funzione non è continua**, calcolare le aree sottese alla curva d'isteresi, come mostrato in **Figura 37** (pag. 47), e, dato che queste sono equivalenti all'energia che compete ad ogni singola fase (carico/scarico), danno:

1. una misura di quanta energia ΔL_{carico} è stata necessaria per allungare la corda fino alla registrazione dell'Allungamento massimo A_0 (curva di carico oltre la massima forza F_0);
2. una misura di quanta energia $\Delta L_{\text{scarico}}$ è stata restituita dalla deformazione elastica (curva di scarico dal massimo allungamento a forza minima; se s'interseca l'asse delle ascisse, fino a $F = 0$);
3. una misura di quanta energia $\Delta L_{\text{attrito}}$ è stata dissipata per gli attriti prodottisi fra gli elementi componenti la corda (calza + trefoli + fili elementari) durante il primo ciclo d'isteresi (per questa misurazione occorre conoscere la quantità d'energia $\Delta L_{\text{caduta libera+allungamento}}$ prodotta dalla caduta del peso, per un'altezza pari alla caduta libera più l'allungamento massimo A_0).

Lavoro deformazione primo ciclo fino al massimo allungamento (J)	$\Delta L_{\text{carico}} =$	2769
Lavoro deformazione primo ciclo dal massimo allungamento a zero (J)	$\Delta L_{\text{scarico}} =$	1015
Lavoro dissipato per viscosità (J)	$\Delta L_{\text{dissipazione}} =$	1754
Percentuale di dissipazione $(\Delta L_{\text{dissipazione}}/\Delta L_{\text{carico}})*100$	% dissipazione =	63

Occorre tuttavia precisare che ΔL_{carico} è conseguente agli allungamenti prodotti tanto dalla trazione sui fili elementari, che fanno riferimento alla sola visco – elasticità, quanto dalla compattazione della struttura complessa della corda.

Sottraendo $\Delta L_{\text{scarico}}$ a ΔL_{carico} si ottiene $\Delta L_{\text{dissipazione}}$ e infine si ottiene $\% \text{dissipazione}$ che rappresenta la percentuale di energia totale in gioco dissipata in deformazioni irreversibili.

E' bene ricordare che $\% \text{dissipazione}$ rispetto a $\text{tang} \delta$, che fa riferimento alle sole deformazioni legate alla visco – elasticità, comprende invece ogni tipo di deformazione che possa assorbire l'energia della caduta del peso. Dal **confronto fra i due parametri** è possibile valutare quant'è il **contributo** dato dalle sole deformazioni dovute alla **compattazione della struttura complessa della corda**.

Peso massa cadente (kgp)	P =	140
Altezza caduta libera (m)	H =	1
Energia prodotta dalla caduta libera + massimo allungamento (J)	$\Delta L_{\text{caduta+allung.}}$ =	2909
Lavoro dissipato per attrito (J)	$\Delta L_{\text{attrito.}}$ =	140
Percentuale lavoro dissipato per attrito (calore) (%)	$\Delta L_{\text{att}} / \Delta L_{\text{cad+all}}$ =	5

Inoltre dalla differenza fra $\Delta L_{\text{caduta+allungamento}} = \text{energia totale in gioco}$ e ΔL_{carico} si può ottenere $\Delta L_{\text{attrito}}$ che è la quantità di lavoro dissipato, durante la trazione, in attriti fra i vari elementi componenti un a corda.

Modulo angolare m di F (kgp) = $m A_{(mm)} + q$ (200-400)	m =	0,82
Modulo di elasticità iniziale (Hook-Young) (GPa)	E =	1,31
Velocità d'impatto (alla fine delle caduta libera) (m/s)	v_0 =	4,43
Velocità di deformazione v_d/l_0 (s^{-1})	v_d =	1,31

La valutazione del Modulo d'elasticità (Hook-Young) E della corda viene definito prendendo in considerazione la curva $F = f(A)$ nel tratto compreso fra $F = 200 \text{ kgp}$ e $F = 400 \text{ kgp}$ dove l'andamento è pressoché lineare [il valore di E che ne scaturisce è dipendente tanto dalla compattazione della struttura complessa della corda (calza + trefoli) quanto dalle caratteristiche meccaniche del Nylon].

Il Modulo d'elasticità è un valore che ha dunque un significato reale, soprattutto se la sollecitazione non è tale da superare i valori di Forza massima tipici della progressione speleologica, come identificati in **Figura 41**.

Infine, nell'ultima riga, la **Velocità di deformazione (s^{-1})**: è un parametro fondamentale per la valutazione dei risultati dei test a caduta, la cui dinamicità ripete le ipotetiche situazioni reali della progressione speleologica o alpinistica (con $0,1 \leq V_d \leq 1$ per la prima e con $1 \leq V_d \leq 2$ per la seconda progressione).

02. Velocità di deformazione

02.a) Premessa – Questa “velocità” non ha le dimensioni di una velocità classica (*spazio/tempo*), in quanto rappresenta la velocità con cui si allunga un **campione di lunghezza unitaria** e le sue dimensioni sono **1/tempo (s^{-1})**.

Lo scopo di questo modo di definire sta nel fatto che i **risultati che si ottengono sono confrontabili** senza ulteriori calcoli d'equivalenza.

02.b) Relazione di definizione e campi d'attività – L'espressione matematica che definisce la Velocità di deformazione è:

$$V_d = V_0/l_0 \quad (15)$$

dove:

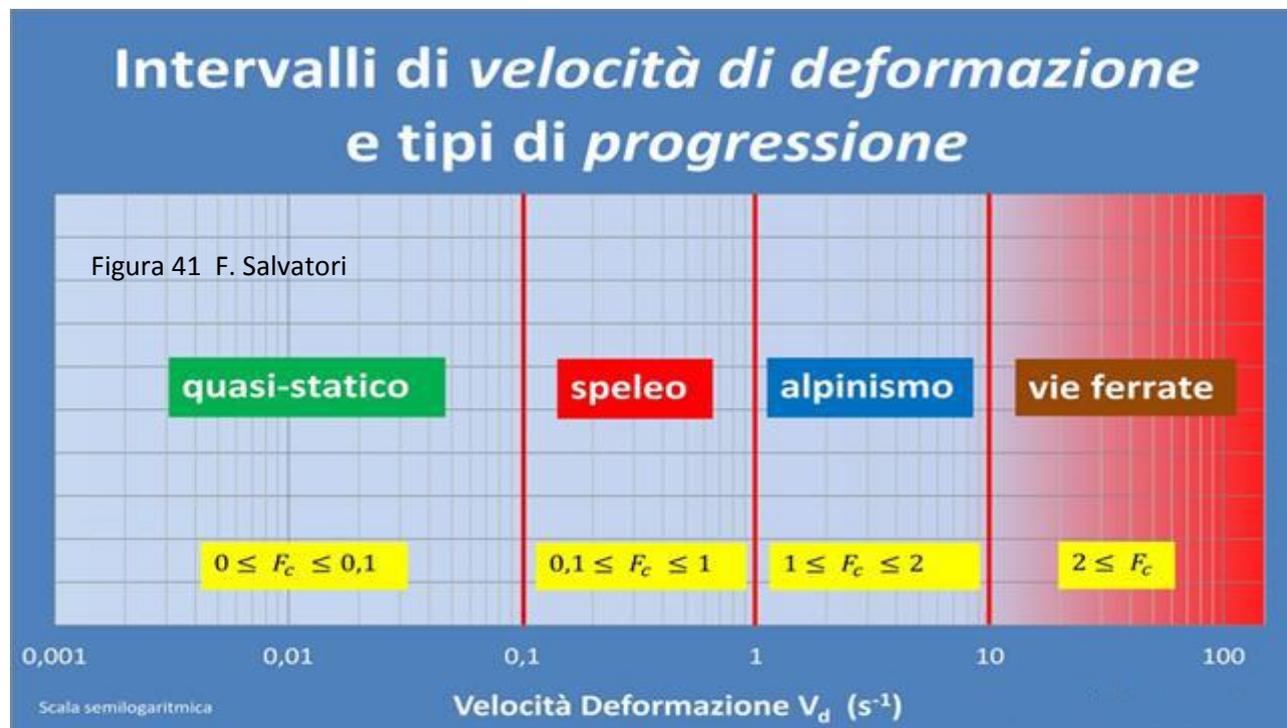
V_d = velocità di deformazione (s^{-1}), inverso del tempo

$V_0 = \sqrt{2 \cdot h \cdot g}$ = velocità del peso cadente al momento dell'impatto con il campione

h = altezza di caduta libera del peso

l_0 = lunghezza del campione a riposo

Con la Torre CRASC possono essere applicate velocità di deformazione che variano da $0,1 s^{-1}$ a $100 s^{-1}$.



Per meglio comprendere la corrispondenza dei valori della Velocità di deformazione con la realtà dell'uso delle corde (o di altri materiali speleo-alpinistici) si faccia riferimento all'immagine di **Figura 41**, dove sono definiti i quattro settori d'attività, a dinamicità crescente, che interessano questo lavoro:

1. **quasi-statiche**, si riferisce alle sollecitazioni che si producono nel dinamometro da banco e quando un peso immobile carica una corda senza oscillazioni;
2. **speleo**, sono le possibili sollecitazioni in una progressione in grotta dove il fattore di caduta non supera il valore di 1;
3. **alpinismo**, contempla una progressione che prevede cadute con fattore 2;
4. **via ferrate**, con possibili sollecitazioni prodotte da cadute con Fattore superiore a 2.

Sintetizzando, nell'area "quasi-statico" agiscono le sollecitazioni del dinamometro a trazione lenta con $V = 0,006 m/s$; nelle altre aree sono presenti solo le sollecitazioni impulsive prodotte con la Torre a caduta.

Attenzione: sovrapponendo i grafici *Proprietà dei materiali/Velocità di deformazione* al diagramma di **Figura 41**, viene evidenziata l'influenza di V_d nei diversi settori d'attività alpinistica-speleologica (come ad esempio a: pag. 56, **Figura 45**; pag. 57, **Figura 46**; pag. 189, **Figure 153**; pag. 275, **Figura 219**).

Nelle etichette gialle i relativi intervalli della Fattore di caduta F_c . La relazione fra **Fattore di caduta** e **Velocità di deformazione** è:

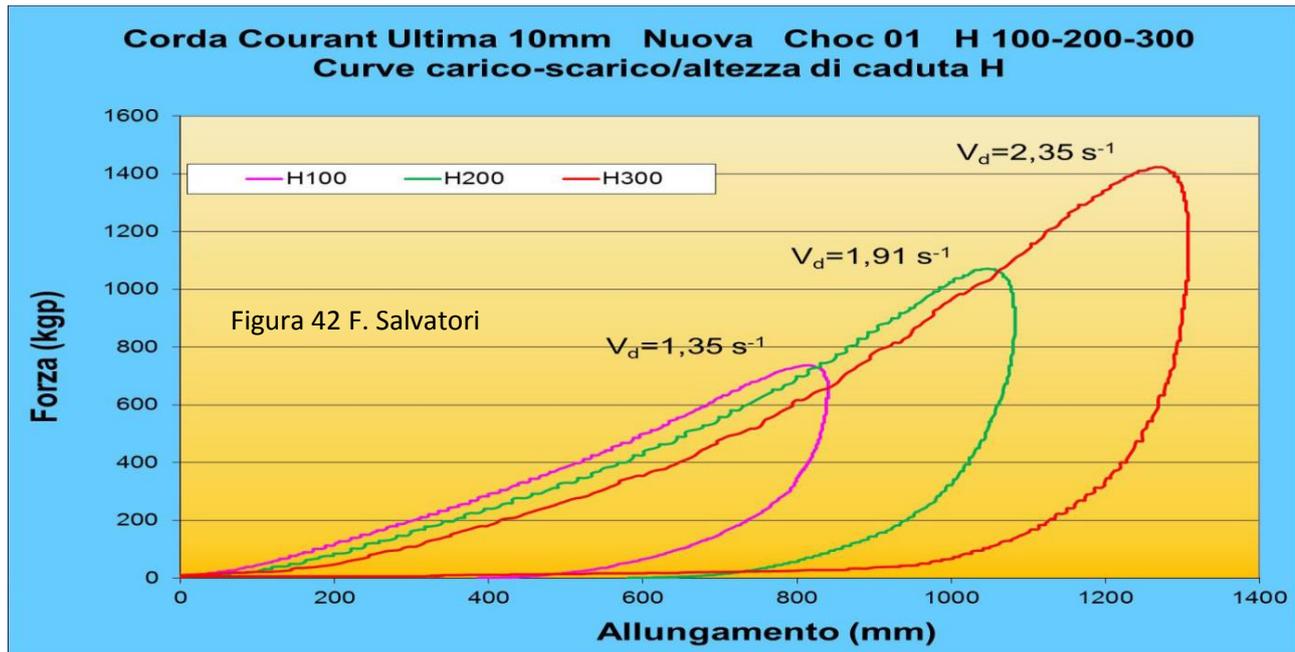
$$V_d = \sqrt{F_c \cdot \frac{2g}{l_0}} \quad (16)$$

Per classificare una sollecitazione si può utilizzare sia l'uno che l'altra. Il fattore di caduta è d'interpretazione più rapida. La velocità di deformazione deve essere utilizzata per una più corretta e confrontabile analisi dei risultati.

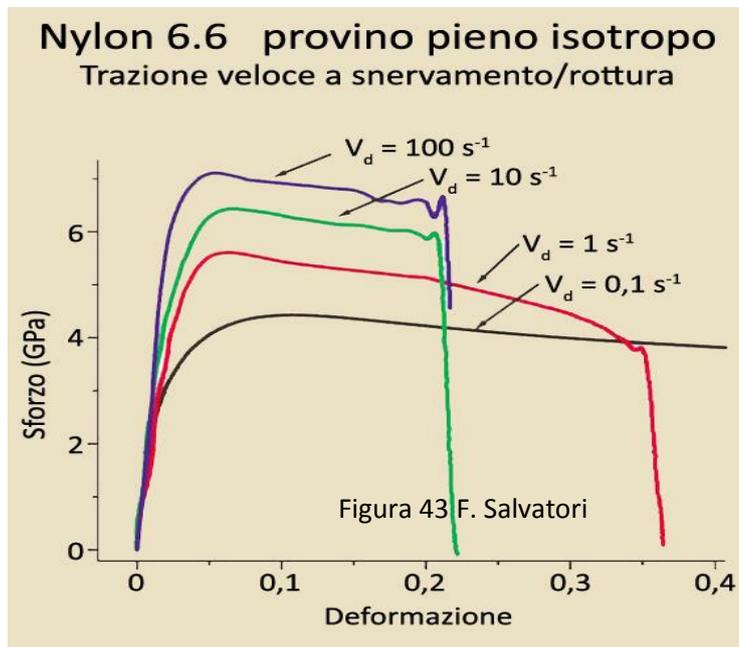
03. Esempi emblematici d'analisi su test a caduta su corde e attrezzature speleo

Fra le variegate possibilità d'analisi che i test con la Torre di caduta permettono, qui di seguito ne riportiamo, a titolo d'esempio, alcuni fra i più significativi.

03.a) Altezza di caduta e velocità di deformazione crescente, curve di carico/scarico, modulo di elasticità, superfici sottese/energia, energia dissipata - In **Figura 45** i grafici **Forza/Allungamento** di campioni di corda statica nuova, lungo 3279 mm (comprese le gasse d'aggancio), al variare dell'altezza di caduta del peso h (100 cm, 200 cm, 300 cm).



In tutte le tre curve, la pendenza iniziale va aumentando: i campioni s'irrigidiscono con l'aumentare dell'allungamento. Ma nel primo tratto, dopo le interferenze dovute alla strizione dei nodi e prima di raggiungere l'irrigidimento prodotto dalla compattazione della struttura complessa della corda, c'è un "segmento" pressoché rettilineo dove si può calcolare il Modulo d'elasticità ($E = \text{tang } \alpha$) come meglio indicato in **Figura 37** (pag. 47).



Prima osservazione: l'aumento della velocità di deformazione diminuisce il valore del Modulo elastico E della corda.

Questo è un dato in controtendenza rispetto alla norma, che prevede, con l'aumentare di V_d , un irrigidimento dei materiali solidi (come provini di Nylon sotto forma di tondini pieni con geometria omogenea e materiale isotropo).

A tal proposito si vedano i grafici di **Figura 43** dove le curve sforzo/deformazione realizzate con Velocità di deformazione crescente mostrano che i provini di Nylon 6.6 reagiscono alla trazione aumentando la resistenza alla rottura e la rigidità. Di fatto le proprietà meccaniche delle poliammidi migliorano se sottoposte a trazioni veloci.

Da notare che i grafici di **Figura 43** sono analoghi al grafico di **Figura 11** (pag. 25) e che le deformazioni nella disposizione delle catene di macromolecole nei fili elementari che compongono la corda del test di **Figura 42** sono dovute allo spacchettamento dei diversi settori cristallini del materiale polimerico e al conseguente districarsi dei grovigli di catene di polimeri dei settori amorfi (pagg. 67-68-69, **Figure 58-59**).

Per contro, con **test su corda**, la Compattazione sotto trazione della loro Struttura Complessa anisotropa (CSCC) gioca un ruolo importante sulla deformabilità; ruolo che evidentemente prende il sopravvento sugli effetti prodotti dall'aumento di V_d sulle proprietà meccaniche legate alla visco-elasticità del Nylon.

Seconda osservazione: l'area compresa all'interno delle curve di carico e di scarico è la superficie che con la sua estensione misura l'energia dissipata con le deformazioni permanenti (legate alla viscosità del Nylon).

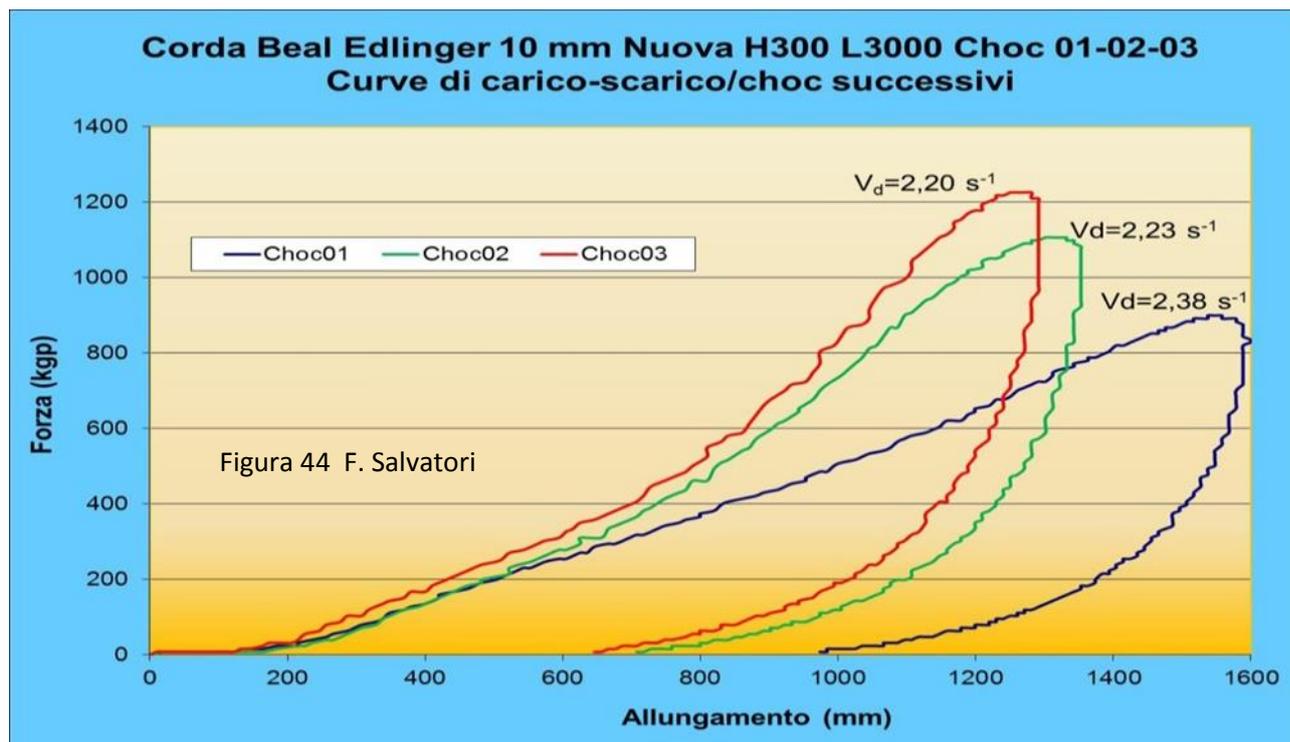
Queste aree sono necessariamente diverse, innanzitutto perché aumentando l'altezza di caduta del peso l'energia in gioco cresce (rispetto al test con $h = 100 \text{ cm}$, di due volte con $h = 200 \text{ cm}$ e di tre volte con $h = 300 \text{ cm}$), e con essa cresce la percentuale di deformazioni permanenti. Ma le superfici si estendono anche a seguito delle maggiori deformazioni irreversibili legate a più elevate velocità di deformazione.

Terza osservazione: è dunque evidente che tanto maggiore è l'altezza di caduta del peso, tanto più elevata è l'energia in gioco e la velocità di deformazione, tanto più consistente è il "decadimento" di una corda. Nello specifico, l'aumento della Velocità di deformazione incide sia sul Carico di rottura F_r che sulla perdita di capacità di assorbire lavoro.

Quarta osservazione: rimanendo inalterate tutte le altre condizioni sperimentali, ma aumentando l'altezza di caduta del peso e quindi la quantità d'energia in gioco, la forza massima registrata sale. Se l'altezza di caduta cresce ancora, la Forza massima aumenta ma con incrementi via via più ridotti.

Tutto questo, con i dati numerici forniti dai test, può essere reso quantitativamente.

03.b) Successione di choc equivalenti sullo stesso campione di corda: variazione del Modulo d'elasticità, quantità decrescente d'energia dissipata per trasformazione viscosa, superficie compresa fra curva di carico e scarico - In **Figura 44** i grafici **Forza/Allungamento** di tre choc in successione sullo stesso campione di corda, lungo 3000 mm (al 2° choc lungo 3180 mm; al 3° lungo 3310 mm) con un peso di 140 kgp che cade da 300 cm d'altezza.



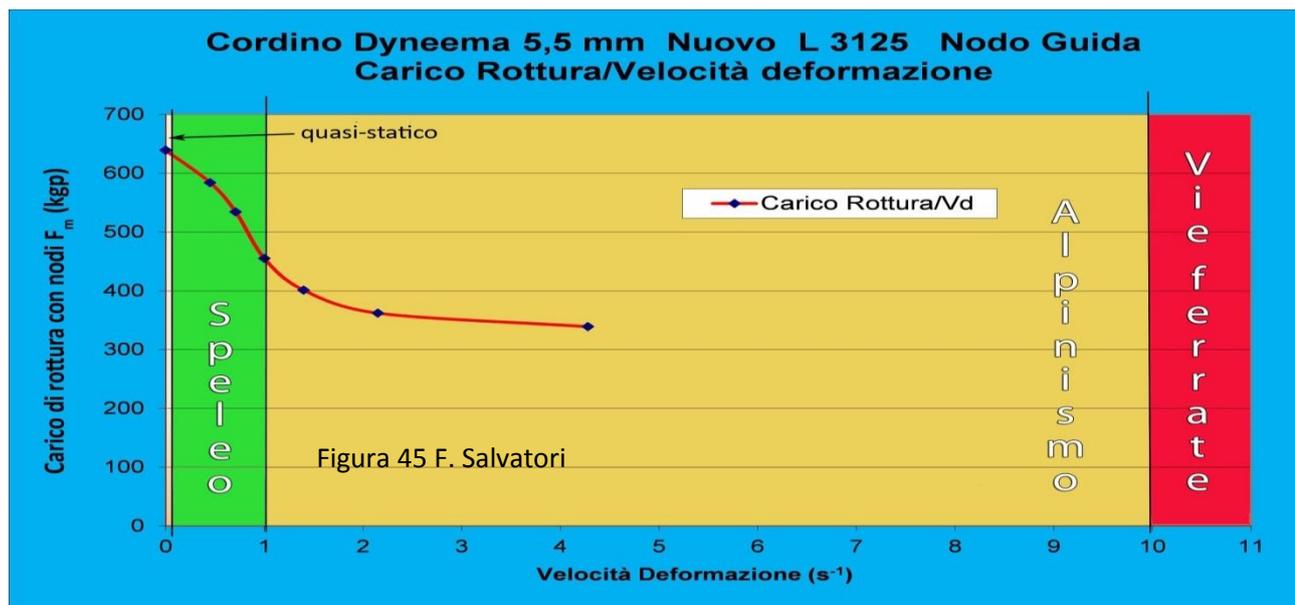
Prima osservazione: con il primo choc il campione di corda si rileva molto deformabile; e questa è una caratteristica delle corde nuove, mai sollecitate, dove la CSCC gioca un ruolo primario, specialmente se dinamiche.

Seconda osservazione: sempre con il primo choc, l'andamento della curva di carico della corda è pressoché rettilineo. Il comportamento è lineare e simile a quello di un elemento isotropo solido che segue la Legge di Hooke; verosimilmente il contributo integrato **subitaneo** della CSCC e dello stiramento **elastico** dei legami interatomici e intermolecolari delle catene di macromolecole è tale da rispondere *in primis* con deformazioni reversibili.

Terza osservazione: quanto è rilevabile al primo choc (Seconda osservazione) non è più valido negli choc successivi, con le curve che risentono delle perdite di deformabilità prodotte dagli choc precedenti (Modulo d'elasticità variabile in aumento): con il secondo choc gran parte della deformabilità è persa e la corda risulta più rigida e la pendenza tende a innalzarsi (**$\tan \alpha$** cresce).

Quarta osservazione: l'aumento della forza massima cresce perché è aumentato il Modulo **E** (pag. 44, **Relazione 13**), anche se il carico d'energia prodotto dal peso che cade è sempre lo stesso.

03.c) Cordino Dyneema: variazione del carico di rottura con nodo in funzione della variazione della velocità di deformazione - E' questo un caso (**Figura 45**) in cui la **Torre di caduta** mostra tutta la sua **efficacia** nel rilevare l'influenza della **velocità di deformazione** sulle caratteristiche di tenuta alla rottura delle attrezzature speleo-alpinistiche, specie se il "provino" contiene, anche solo in parte, una struttura complessa come un nodo.



HMPE Dyneema SK 60	
Densità ρ (g/cm ³)	0,97
Punto di fusione (°C)	150
Tenacità (N/Tex)	2,80
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	3000 <small>strength</small>
Allungamento alla rottura (%)	3,5
Modulo E (Gpa)	142
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	55

Prima osservazione: il Dyneema è una fibra artificiale con un'alta rigidità: **$E = 142 \text{ GPa}$** contro **$E = 2,6 \text{ GPa}$** del Nylon 6. Con una tale rigidità è una fibra artificiale molto influenzata dalla velocità di deformazione; più aumenta **V_d** più il carico di rottura con nodo **F_{rn}** diminuisce, anche con marcati incrementi.

Seconda osservazione: la presenza di nodi aumenta ulteriormente, e di molto, la tendenza al cedimento con l'aumentare della **V_d** ; questo sempre accade quando s'introducono attrezzature con architetture complesse (oltre il nodo, bloccanti, discensori, moschettoni, longe, trilonge, ecc.).

Terza osservazione: tutti i valori ottenuti con la caduta di un peso di 140 kgp con altezze fino a 4 m hanno portato a valori di forza di rottura abbondantemente al di sotto del Limite inferiore di resistenza (LIR) di 1100 kgp stabilito per tutti gli elementi della Catena di Sicurezza speleologica. Anche il primo valore rilevato, a trazione lenta (0,006 m/s), è di appena di 640 kgp. E il maggior decremento si verifica proprio nel passaggio dal settore “trazioni quasi-statiche” a quello pertinente alle sollecitazioni della progressione speleo.

Si mette dunque in evidenza come una corda di piccolo diametro (5,5 mm), costituita da una fibra estremamente rigida (Dyneema), annodata alle estremità (nodi guida), sia un elemento molto sensibile **all'aumento della velocità di deformazione:** passando da $V_d = 0,002 \text{ s}^{-1}$ a $V_d = 2 \text{ s}^{-1}$ il carico di rottura si dimezza!

E' questo un caso, come quelli esposti nei paragrafi successivi, in cui si mostra l'efficacia dei test realizzati con la Torre di caduta: permette sperimentazioni molto realistiche con risultati chiari e dettagliati rispetto alla conoscenza dei problemi di sicurezza nella progressione speleo-alpinistica.

03.d) Moschettoni in lega (e d'acciaio): Carico di rottura/Velocità di deformazione

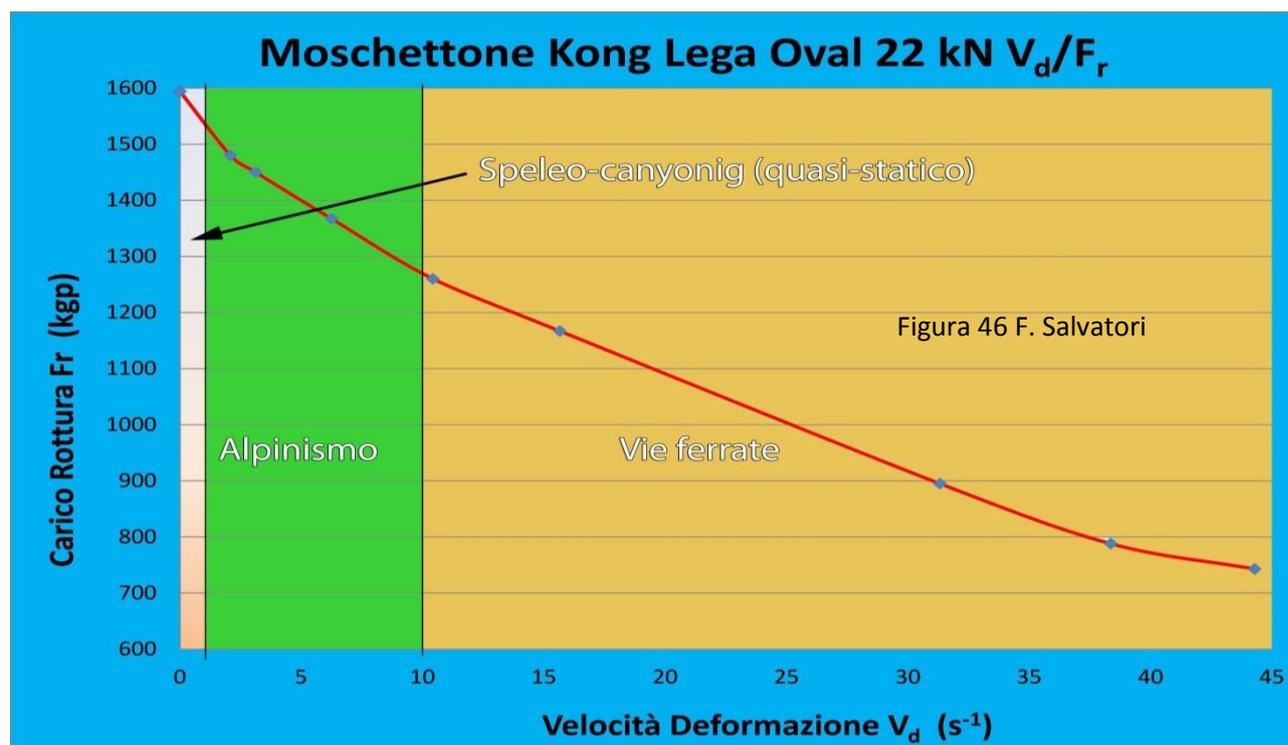
In **Figura 46** si mostra con grande risoluzione quanto la Velocità di deformazione possa incidere sulle caratteristiche delle attrezzature speleo-alpinistiche, di solito con geometria e architettura complesse.

Come ad esempio un moschettone, la cui struttura suddivide il carico su due rami (anche in modo non simmetrico) e a determinare i valori del carico di rottura incidono in modo determinante due punti deboli, tutti inseriti nel del dito mobile d'apertura: il suo perno di rotazione e il sistema a incastro.

Anche in questo caso, i test con varie altezze di caduta del peso mostrano l'influenza della **Velocità di deformazione** nel determinare la diminuzione del carico di rottura di un moschettone in lega: anche qui, tanto maggiore è V_d tanto più basso è F_r .

Ma questo decremento di F_r non è così marcato come nel caso precedente del cordino annodato di Dyneema: nel campo delle sollecitazioni **Speleo-canyonig** diminuisce al massimo del 4 %; mentre si riduce del 23 % nel campo **alpinistico**.

Pertanto i moschettoni in lega d'alluminio (come del resto tutte le attrezzature dello stesso metallo) mantengono la loro tenuta al di sopra del **LIR** anche con velocità di deformazione elevate.



Se invece entriamo nel campo delle sollecitazioni "Via ferrata" la diminuzione di F_r è consistente e pericolosa.

Anche in questo caso c'è da notare che gli stessi test a caduta su **barre cilindriche isotrope** di lega d'alluminio (o acciaio) avrebbero dato risultati opposti: all'aumentare di V_d sarebbe aumentato il carico di rottura (e anche la rigidità), come può essere riscontrato nella **Figura 43** (pag. 56).

Infatti, ripetiamo, è una constatazione generalizzata: più si rende complessa l'architettura di un campione (moschettone rispetto a barra, per esempio) più V_d ha un'influenza negativa su F_r .

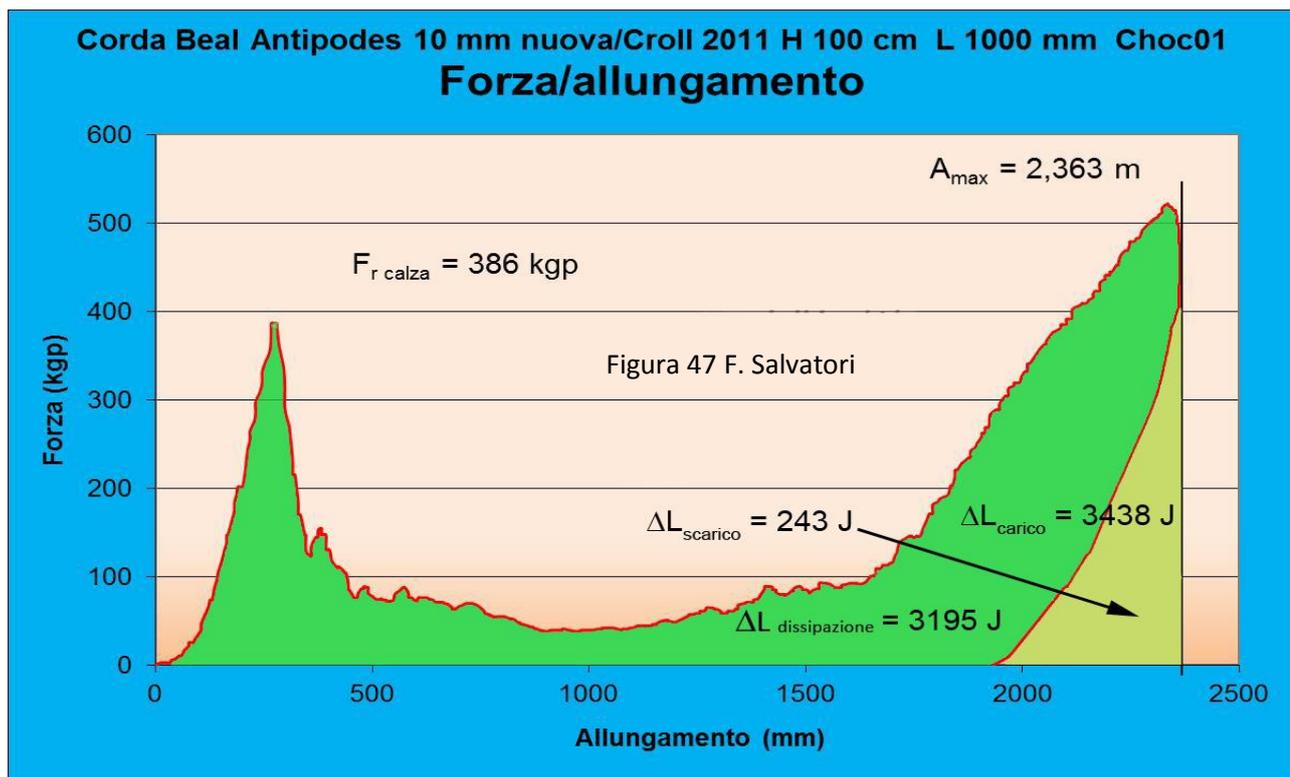
03.e) Bloccante/corda statica: carico di rottura calza, forza massima, allungamento massimo, energia assorbita - Nella **Figura 47** è rappresentato il grafico **forza/allungamento** di un test a caduta applicato a un bloccante Petzl Croll (anno 2011, con antiribaltamento) inserito in una corda statica.

L'altezza della caduta libera del peso (sempre 140 kgp) è di 100 cm e 1000 mm è la distanza l_0 fra il punto d'ancoraggio della corda (nodo Guida) alla cella di carico e il Croll (al quale è collegato il peso in caduta).

Il grafico è molto dettagliato (la campionatura è al **millisecondo**, come in tutti gli altri casi esaminati), mettendo in risalto comportamenti e valori di F in funzione della trazione e quindi degli allungamenti:

1. inizio con allungamento della corda secondo i criteri normali e nessun cedimento;
2. lacerazione completa della calza con quantificazione del valore relativo ($F_{r\text{ calza}} = 386\text{ kgp}$);
3. trascinarsi della calza lacerata sui trefoli, con attrito e conseguente dissipazione d'energia (s'innescia il "dissipatore");
4. compattamento del grumo e del rigonfiamento della calza con aumento della pressione sui trefoli e quindi della forza d'attrito fino all'esaurimento di tutta l'energia, quando al punto con allungamento uguale a 2,363 m il peso si arresta, sospeso ai trefoli rimanenti (12 su 13);
5. nei trefoli rimanenti c'è energia elastica conservata che spinge il peso a rimbalzare e ritornare a forza **zero**, ma con un "allungamento" residuo non recuperabile (compreso lo scorrimento del bloccante trascinando la calza) di quasi due metri.

Il test sulla Torre di caduta fa risaltare in modo straordinario anche i minimi particolari dell'evento (compreso il picco secondario a circa 400 mm di allungamento legato alla rottura dell'unico trefolo) e permette molte valutazioni quantitative tanto in termini di forza che d'energia.



Dai risultati numerici del test risulta un'analisi completa e penetrante, che fa risaltare con chiarezza il motivo per cui un simile attrezzo, il Croll 2011, il cui carico di rottura dichiarato non supera qualche centinaio di kgp, è accettato all'interno della catena di sicurezza, dove il limite inferiore di resistenza (LIR) è di 1100 kgp! Infatti il Croll 2011, se sottoposto a sollecitazione, raggiunta una forza F , intorno ai 300-500 kgp, lacera la sola calza (merito dell'antiribaltamento) e inizia a scorrere trascinando la calza che si aggruma. La forza d'attrito che si oppone allo scorrimento dissipa l'energia della caduta del peso, fino a esaurirla prima di rompere tutti i trefoli.

Pertanto, nonostante il carico limite dichiarato per il Croll (anche solo 180 kgp), l'attrezzo può essere accettato, con sicurezza, nella catena di progressione speleologica.

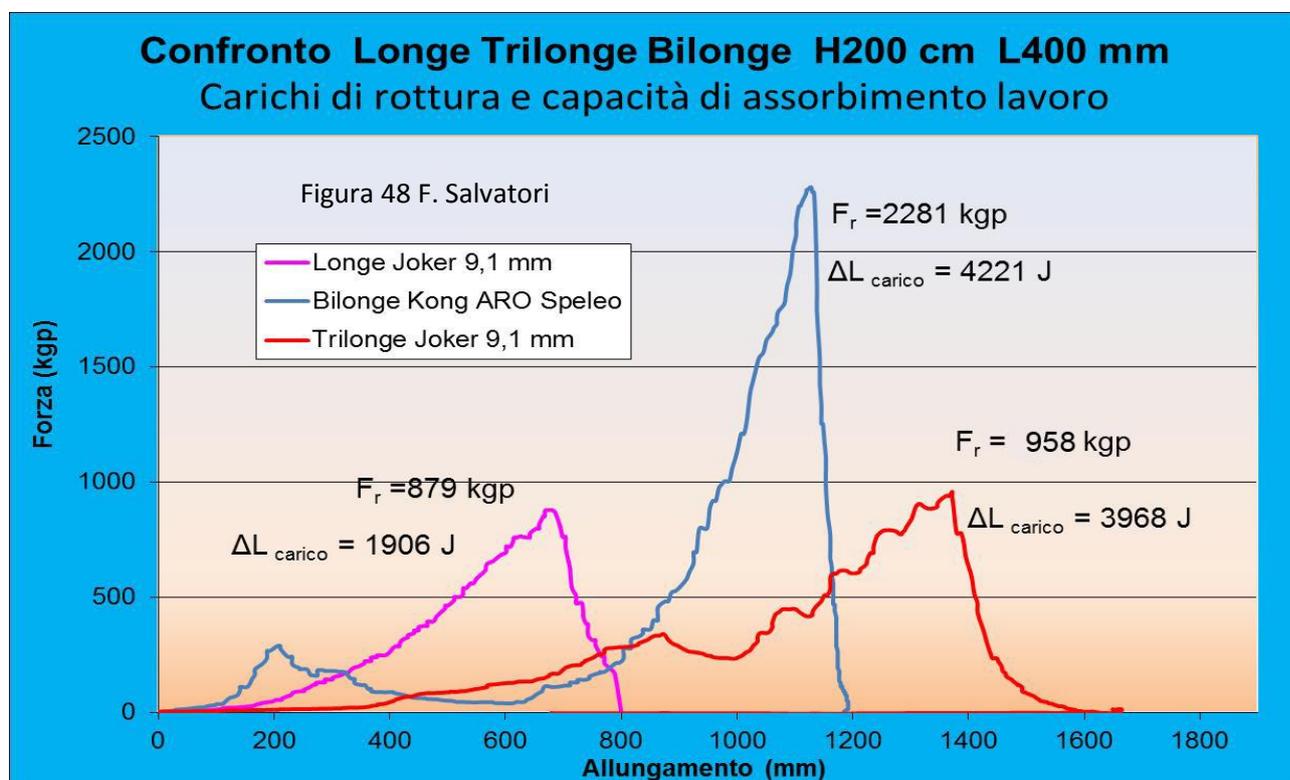
Altro aspetto significativo: il fatto che il sistema ammortizzante non abbia mai permesso alla trazione di superare i 550 kgp, ha fatto mantenere al bloccante la sua configurazione geometrica, tanto che, a test ultimato, non vi è alcuna difficoltà ad aprire il cricchetto, togliere il Croll da quanto rimane della corda e riutilizzarlo nella sua parte non danneggiata.

03.f) Confronto fra longe, bilonge (fettuccia confezionata) e trilonge: carichi di rottura e capacità d'assorbimento energia - La Figura 48 riporta i grafici forza/allungamento di test a caduta (altezza H 200 cm) su longe e trilonge di corda (lunghezza L 40 cm), nonché su bilonge confezionata "ARO" (le superfici sottese alla curva equivalgono alle quantità d'energia-lavoro dissipate).

Lo scopo è di mettere in risalto qual è l'attrezzo migliore, tanto per il carico di rottura F_r , che per la capacità di assorbire lavoro ($\Delta L_{rottura}$) prima di raggiungere il cedimento.

Lo scopo è stato raggiunto pienamente: la **Bilonge Kong ARO Speleo** è di **gran lunga la migliore**, sia per il carico di rottura (ben 2281 kgp) che per la capacità di assorbire il lavoro prodotto dalla sollecitazione a caduta (4221 J).

E' questa un'altra dimostrazione di quanto i test a caduta siano risolutivi nell'analizzare le caratteristiche delle attrezzature speleo-alpinistiche.



Parte III

Corde, fili elementari, catene di macromolecole e monomeri

Composizione atomico-molecolare e distribuzione dei legami chimici

Applicazione di carichi ed evoluzione della struttura cristallina e amorfa dei polimeri

Effetto idratazione, depolimerizzazione degradazione idrolitica e calore

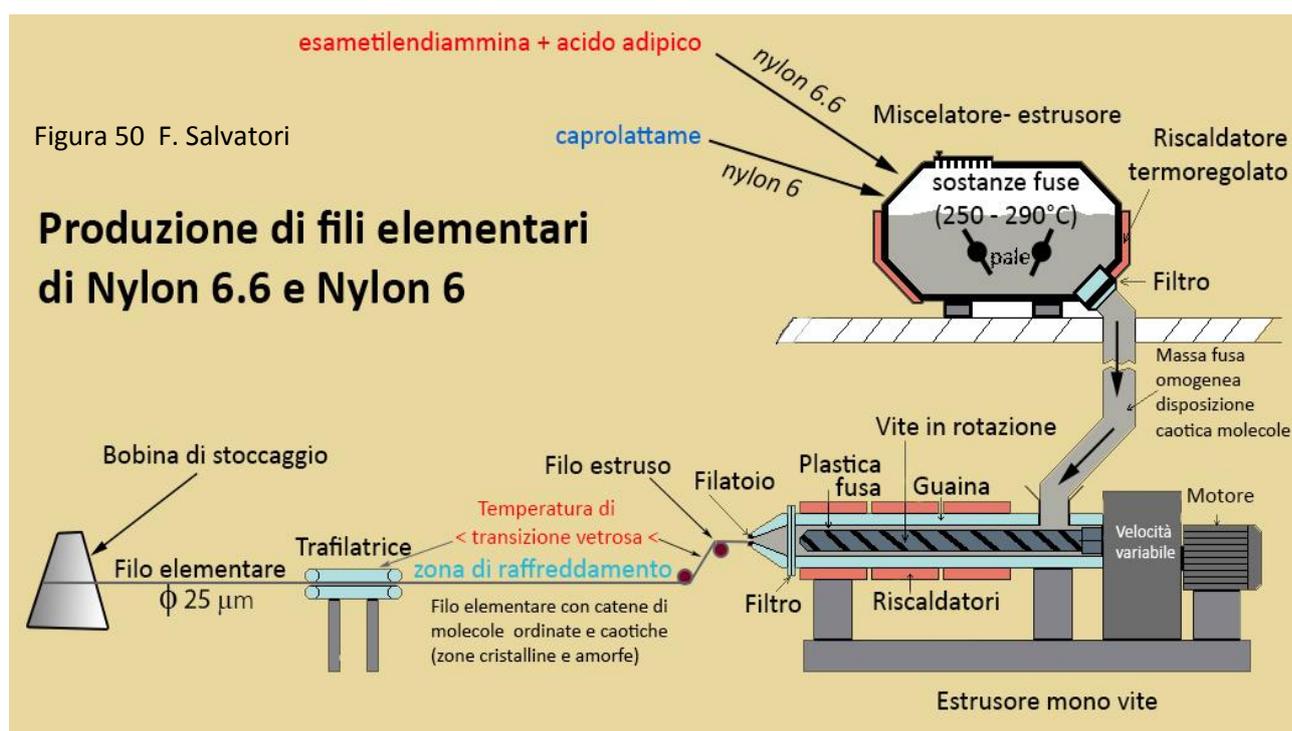
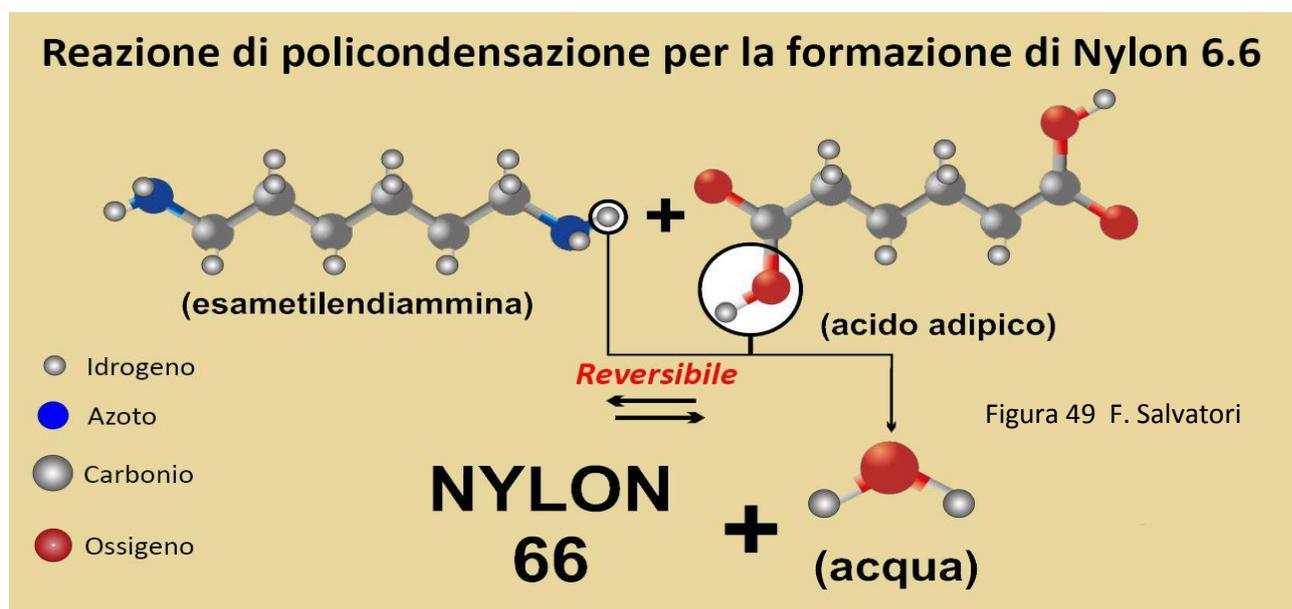
01. Fili elementari di Nylon (poliammide), composizione chimica, produzione e struttura semi-cristallina

La molecola di **Nylon 6.6** si produce con una reazione di condensazione, cioè una reazione chimica che sintetizza due molecole diverse, **con espulsione di una molecola d'acqua**. Nel caso specifico si "sintetizza" una molecola di **Esametildiammina** con una molecola di **Acido adipico** (vedi Figura 49).

Per produrre **Nylon 6** si condensano invece due molecole di **Caprolattame**.

I grani di Nylon prodotti o con l'una o con l'altra delle reazioni sopra indicate sono poi introdotti nel **miscelatore-estrusore** (Figura 50) a temperature superiori di 30-40°C rispetto alle temperature di fusione (265°C per il *Nylon 6.6* e 218°C per il *Nylon 6*).

Raggiunta la fusione, le molecole sono disposte in modo caotico - amorfo, **senza legami intermolecolari e con alta agitazione termica**. La massa fusa non ha settori con catene di macromolecole organizzate ("cristallinità").



Nel miscelatore - estrusore, per evitare fenomeni di depolimerizzazione e/o degradazione, è importante che i grani di Nylon introdotti abbiano un'umidità non superiore allo 0,1 % (1000 ppm).

Il Nylon fuso viene portato nell'**estrusore mono vite** che spinge la massa fluida, costringendola ad uscire dal **filatoio**. Il **filo elementare (o fibra)**, con diametro di qualche decina di micrometro (μm), fuoriesce e viene **raffreddato** (in ambiente basico): le molecole si agganciano una all'estremità dell'altra per formare dei polimeri (macromolecole) composte anche da migliaia di monomeri, lunghe ben più di **100 Å**.

Anche aiutate dal passaggio nella **trafilatrice**, una parte consistente di queste catene di polimeri, raffreddandosi (e diminuendo drasticamente **l'agitazione termica**), si dispongono all'interno del filo elementare in modo ordinato, allineate parallelamente al suo asse longitudinale, e andando così a costituire la parte cosiddetta "**cristallina**", presente dal 55 % (Nylon 6) al 70 % (Nylon 6.6).

Una parte invece, anche allo stato solido, mantiene la disposizione caotica che aveva nella massa fusa e va a formare i settori "**amorfi**" dei fili elementari.

Il **rapporto fra l'estensione delle zone cristalline e l'estensione dei settori amorfi** nel filo elementare formatosi dipende dal suo contenuto d'acqua idroscopica all'origine (al massimo può arrivare al 10 % del peso), dalla velocità d'estrusione e dalla velocità di raffreddamento.

L'acqua presente nel filo elementare ha un "**effetto plastificante**": tanto maggiore è la sua quantità tanto maggiore risulterà l'estensione dei settori amorfi e tanto più ridotte saranno le sue proprietà meccaniche (come lo sforzo a snervamento o a rottura).

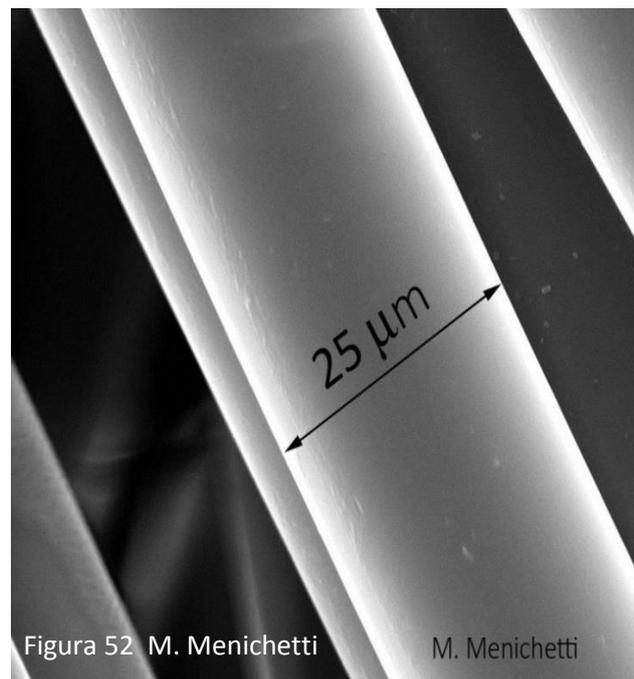
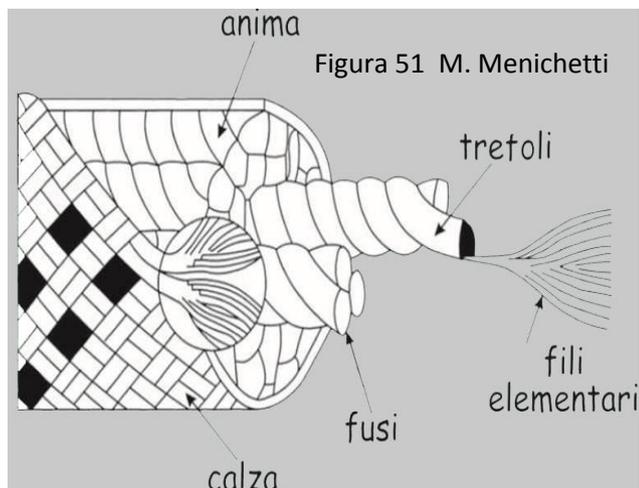
Meno veloce è l'estrusione e più lento il raffreddamento, più risulterà elevato è il rapporto "cristallino"/"amorfo" e migliori saranno dunque le caratteristiche meccaniche del filato.

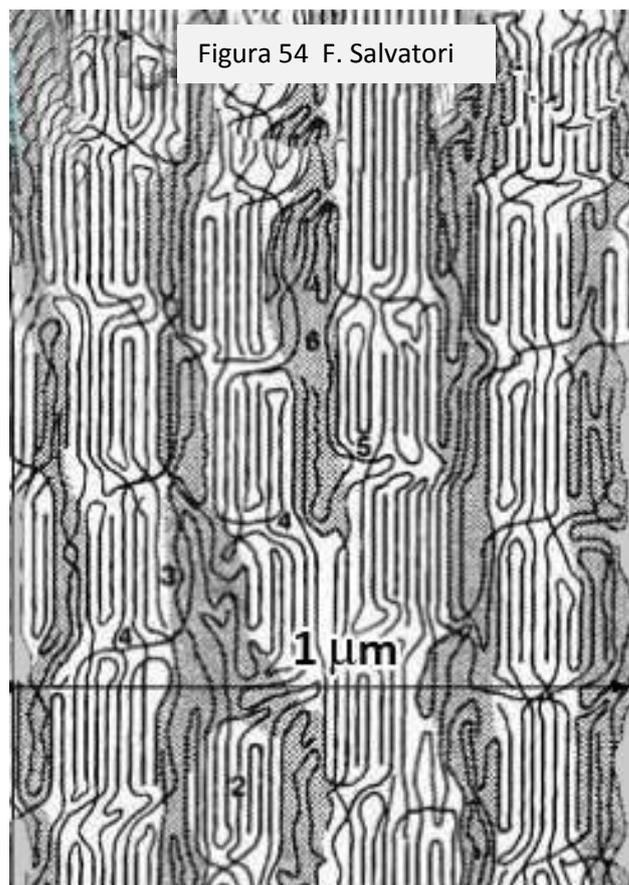
02. Catene di macromolecole e loro disposizione nei fili elementari

Le corde, in genere, sono composte come in **Figura 51**: la calza protegge tutta la struttura interna, composta da trefoli, fusi e fili elementari. E' quella che viene definita **Struttura Complessa della Corda**.

Il **filo elementare è la componente base**: ha una struttura cilindrica **isotropa**, la cui sezione trasversale ha un diametro di circa **28 μm** (**Figura 52**).

In **Figura 53** una porzione di **sezione trasversale** del filo elementare: nelle corde mai usate, appena uscite di fabbrica, il rapporto fra il volume dei settori cristallini e dei settori amorfi è compreso fra il 55 % del Nylon 6 e il 70 % del Nylon 6.6.

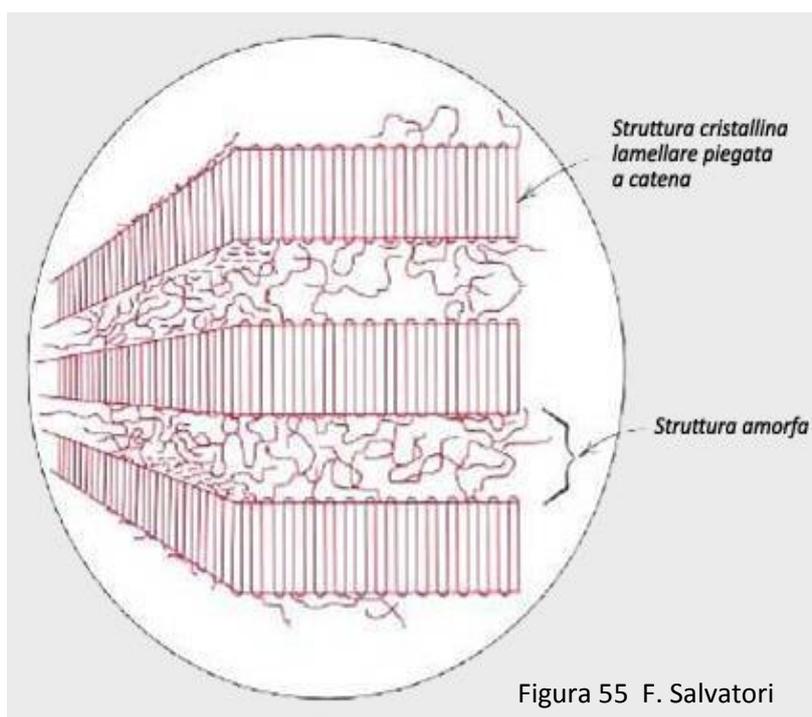




Le catene di macromolecole si dispongono come in **Figura 54**, dove una porzione di sezione longitudinale di un filo elementare ne mostra l'organizzazione:

- 1) aree più chiare, dette anche zone "cristalline", con una disposizione a file parallele più regolare;
- 2) aree più scure, dette anche zone "amorphe", dove la sistemazione delle catene di macromolecole è più caotica.

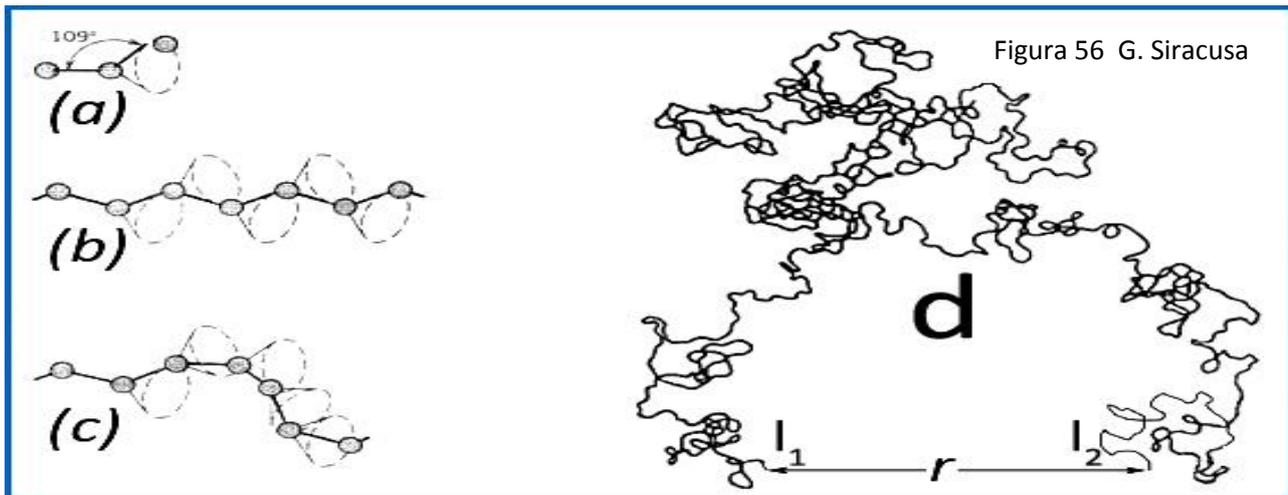
Osservando al microscopio elettronico l'organizzazione delle catene di macromolecole nei fili elementari (di Nylon), si possono osservare anche altre strutturazioni semi-cristalline, a "biscotto" come in **Figura 55**.



Anche in questo caso c'è un'organizzazione delle catene di **polimeri**, anche diverse decine di migliaia di **monomeri**, che si organizza a stratificazioni, con le fibre messe curvate, parallele e ordinate su un livello che si alterna a livelli (più o meno di uguale spessore) dove il disordine nella disposizione delle catene di macromolecole è la regola.

Anche in questo caso la disposizione delle catene di macromolecole nella fase di produzione del filo elementare dipende dalle condizioni chimico-fisiche che impone l'estrusore (**Figura 50**). Ma il risultato finale non è mai del tutto prevedibile, se non in termini percentuali (accertabile attraverso analisi a raggi X).

Un'altra importante caratteristica dei polimeri si evidenzia analizzando una singola catena: molte proprietà meccaniche delle poliammidi sono spiegabili con la struttura riportata in **Figura 56** [32].



Una catena di macromolecole come le fibre di Nylon, composta anche da centinaia di migliaia di monomeri si dispone nello spazio come indicato alla lettera **d**: l'andamento è il più imprevedibile, con una serie di piegamenti, contorcimenti, raggomitamenti, doppi e cappi.

Questa disposizione caotica dipende dalla conformazione di base a zig-zag degli atomi di carbonio come indicato nell'**Immagine (a)** che permette di agganciarsi a un altro atomo di carbonio in un punto qualsiasi del cono di rivoluzione tratteggiato e quindi mantenendo costante l'angolo d'apertura di 109° . In tal modo i legami di una singola catena sono in grado di ruotare e flettersi nello spazio per **assumere un numero infinito di strutturazioni steriche**. Si deve rispettare solo la distanza fra atomi di carbonio (circa 1 \AA) e l'angolazione di 109° .

Il risultato della concatenazione può essere come nell'**Immagine (b) e (c)** o in un altro degli infiniti possibili svolgimenti e sviluppi. Per questo è comprensibile che una catena di macromolecole possa avere una configurazione spaziale come indica nell'**Immagine (d)**.

Quindi una catena polimerica è una struttura rigida a filo con due capi l_1 e l_2 che, se sottoposti a un sollecitazione che li allontana o avvicina, possono aversi deformazioni elastiche reversibili fino a un certo di forza e poi anelastiche irreversibili. E' questa una caratteristica fondamentale delle proprietà meccaniche di una poliammide, che spiega con chiarezza il caratteristico comportamento dei materiali visco-elastici.

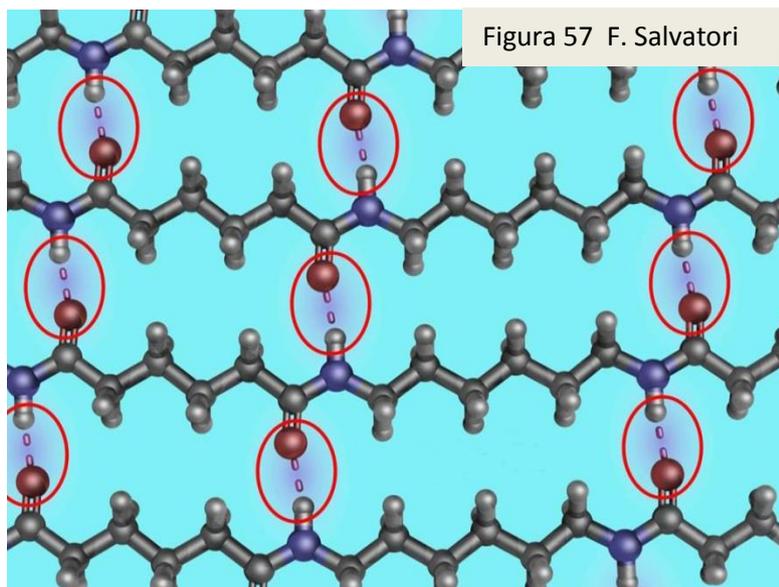
Ma un'altra caratteristica delle fibre polimeriche è **anche** quella di organizzarsi parzialmente in modo ordinato come indicato nelle **Figure 53 - 54 - 55**, dando così origine ai **materiali semicristallini**.

Ricordo che la percentuale di cristallinità dipende da vari fattori (come è spiegato dettagliatamente nel proseguo di questo lavoro). Ma dipende anche, al momento della formazione nell'estrusore, dalla "trafilatura" prevista dopo il raffreddamento e prima di uscire: evidentemente questa azione forza le estremità della fibra l_1 e l_2 a distanziarsi, favorendo una organizzazione spaziale più allungata e ordinata.

03. Settori cristallini dei fili elementari, legami idrogeno e rafforzamento delle proprietà meccaniche delle poliammidi

Le catene di macromolecole in alcuni settori tendono ad affiancarsi, parallelamente le une alle altre, nelle tre direzioni dello spazio, andando a costituire i settori cristallini come indicato nelle **Figure 53 - 54 - 55**.

Infatti, così facendo, sfasandosi di un "anello" CH_2 (base aromatica delle poliammidi), gli atomi d'idrogeno di una catena fronteggiano gli atomi d'ossigeno delle catene adiacenti: si costituiscono, a tutti gli effetti, dei "**legami idrogeno intermolecolari**", di natura **elettrostatica** (cerchiati in rosso), come indicato per le poliammidi (Nylon) nella **Figura 57** (per l'identificazione degli atomi si veda **Figura 49**).



Sono questi dei legami **deboli** non covalenti (quindi senza sovrapposizione di orbitali e messa in comune di elettroni) formati per l'attrazione di cariche di polarità diversa.

Questi legami idrogeno intermolecolari fanno costituire una struttura a "nido d'ape" particolarmente adatta a resistere a cedimenti e deformazione, facendo, di conseguenza, aumentare, a parità di massa del Nylon, il carico di rottura senza nodi e la rigidità della corda. Più legami idrogeno entrano in azione e maggiore sarà F_r e il Modulo d'elasticità E (più è alto il suo valore, maggiore è la rigidità).

04. Rapporto spaziale nel filo elementare fra settori cristallini e amorfi: influenza sul carico di rottura e sulla rigidità

Nei fili elementari convivono settori "cristallini" con settori "amorfi" (Figure 53 - 54 - 55), con rapporto variabile a seconda delle condizioni. Ne seguono le considerazioni qui di seguito riportate.

04.a) Effetto agitazione termica - Nei settori "cristallini" l'agitazione termica delle catene di molecole è minore rispetto a quelli delle zone amorphe, dove ci sono meno legami intermolecolari e una minor risonanza strutturale. Nei settori "cristallini" c'è dunque una minore disponibilità a subire deformazioni e rotture. Ne segue che - per quanto riguarda la sola agitazione termica - tanto più elevata è la percentuale di "cristallinità" tanto maggiore sarà la **Tenacità e il Carico di rottura**.

04.b) Costituzione di legami idrogeno intermolecolari - Ma le caratteristiche meccaniche di un filato polimerico sono fortemente condizionate dal numero di legami intermolecolari - in genere **legami idrogeno** - che si formano **fra le catene di macromolecole** di Nylon, come rappresentato in **Figura 57**. Come è stato già detto in precedenza, più è alto questo numero di legami maggiore sarà la capacità del filo elementare di resistere alla rottura e opporsi agli allungamenti. La struttura a **nido d'ape** che si viene a realizzare (notoriamente fra le più resistenti) e l'ulteriore rafforzamento dei legami interatomici per la risonanza molecolare (innescata dalla maggiore continuità elettronica fra gli orbitali atomici del Carbonio) sono i fattori che determinano le peculiari e, per certi versi straordinarie, caratteristiche meccaniche delle fibre poliammidiche, che le rendono così adatte nella costruzione delle corde speleo-alpinistiche.

04.c) Strutturazione cristallina/amorfa e legami intermolecolari - Quando si realizza una **strutturazione "cristallina"** nel reticolo di catene, disposte in modo ordinato parallelamente all'asse longitudinale del filo elementare, la **formazione di legami idrogeno intermolecolari è favorita**, essendo alta la probabilità che si **fronteggino opportunamente** atomi d'idrogeno e atomi d'ossigeno.

Per contro nei **settori "amorfi"**, dove la disposizione delle catene di macromolecole è **caotica**, la **probabilità che atomi d'idrogeno e d'ossigeno** si dispongano **favorevolmente** a formare **legami idrogeno intermolecolari è molto ridotta**.

Mettendo insieme le due precedenti considerazioni, risulta che **tanto maggiore è la cristallinità in un filato, tanto più elevate sono le sue qualità di resistenza alla rottura e alla deformazione**.

A dimostrazione che questa conclusione analitica è corrispondente alla realtà si notino, ad esempio, i dati riportati nella tabella sottostante (estratti dai prontuari che riportano le caratteristiche dei diversi polimeri)

dove sono messi a confronto i principali aspetti meccanici e chimico-fisici del Nylon 6 e 6.6 (si tenga presente ancora una volta che tali dati si riferiscono a test effettuati su provini di materiale isotropo, tipo barre o tondini, altrimenti non sarebbe possibile calcolare la Tenacità quando occorre conoscere la sezione trasversale del materiale testato; se si trattasse di una corda, anisotropa, occorre trasformarla in un equivalente oggetto isotropo, come definito dalla **Relazione 7** (pag. 29).

Polimero	Cristallinità (%)	Tenacità (N/tex)	Modulo (GPa)	Densità (g/cm ³)	Punto di fusione (°C)
Nylon 6	55	0,47	2,6	1,14	218
Nylon 6.6	70	0,64	8,0	1,14	265

La tenacità T (una misura caratteristica dei fili elementari, **isotropi**, assimilabile al carico di rottura F_r , proprio di una corda, **non isotropa**) del Nylon 6.6 è **maggiore del 36 %** rispetto a quella del Nylon 6. Per contro il modulo d'elasticità E **crece del 208 %**. Questo straordinario risultato è dato dalla differenza di cristallinità fra Nylon 6.6 e Nylon 6 (70 % contro 55 %).

04.d) Formazione dei fili elementari e rapporto cristallino/amorfo - Nelle migliori condizioni (corde nuove con filati estrusi con raffreddamento lento, in ambiente basico e trafilatura) il rapporto fra estensione dei settori "cristallini" e "amorfi" nel Nylon 6.6 è al massimo del 70 % e nel Nylon 6 del 55 %.

Nelle **peggiori condizioni** di estrusione, con **raffreddamento veloce**, il rapporto **può scendere fino al 10 %**.

05. Correlazioni fra test a trazione lenta/veloce dei fili elementari di una corda ed evoluzione della loro struttura semi-cristallina

05.a) Prima premessa: trazione lenta su una corda speleo-alpinistica – Se trazioniamo in progressione una **corda speleo-alpinistica**, inizialmente la sua struttura complessa (calza + trefoli) **si compatta** assorbendo una certa quantità d'energia. Dopo di che, **le successive deformazioni sono quasi esclusivamente legate alle proprietà visco-elastiche dei fili elementari**, cioè delle poliammidi (o in genere dei polimeri).

Per **la corda, nel suo insieme**, la tipica curva forza/allungamento $F = f(A)$ è quella mostrata in **Figura 20** (pag. 31), ricavata a trazione quasi-statica (ma vale anche per trazioni veloci) e dove **l'andamento** è conseguenza sia della deformazione trasversale della struttura complessa della corda, sia delle caratteristiche proprie della poliammide (Nylon 6), cioè la visco-elasticità.



Ma in tal modo è difficile individuare quanto l'andamento sia dipendente dalla tessitura della corda e quanto invece dalle proprietà del polimero: non è possibile collegare i vari tratti di curva a quanto accade nella struttura semicristallina dei fili elementari (pag. 62 e seg., **Figure 52 - 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 58**) e nella **CSCC** (pag. 62, **Figura 51**).

Possiamo solo affermare, **in grandi linee**, che nel **tratto iniziale** la pendenza della curva è condizionata dalla CSCC, che determina un Modulo E di basso valore, approssimativamente costante o in leggera crescita. Mentre, superati i 300 – 400 kgp di trazione, la CSCC va esaurendo la sua funzione di deformabilità aggiuntiva e subentra, sia pur gradualmente, la visco-elasticità dei fili elementari di Nylon.

Visco-elasticità che tende a produrre, a partire dai 600 kgp, deformazioni del tipo reversibile/elastiche nella struttura atomico-molecolare dei fili elementari (segue la legge proporzionale diretta di Hook) fino ad arrivare agli 800 kgp dove, con un flesso, si manifesta un'inversione di tendenza: subentra l'effetto dissipativo delle deformazioni viscosi irreversibili prodotte dai moti tra catene (con attriti e ritardi di tempo) e dagli "allungamenti" che subiscono seguendo la direzione della trazione.

Proseguendo la sollecitazione la forza di trazione aumenta e alcuni legami fra atomi e macromolecole si rompono (inizia lo snervamento) e la curva $F = f(A)$ diminuisce progressivamente la pendenza perché, di fatto, diminuisce la quantità di materiale polimerico che si oppone alla rottura (diminuisce progressivamente la Superficie efficace S_e).

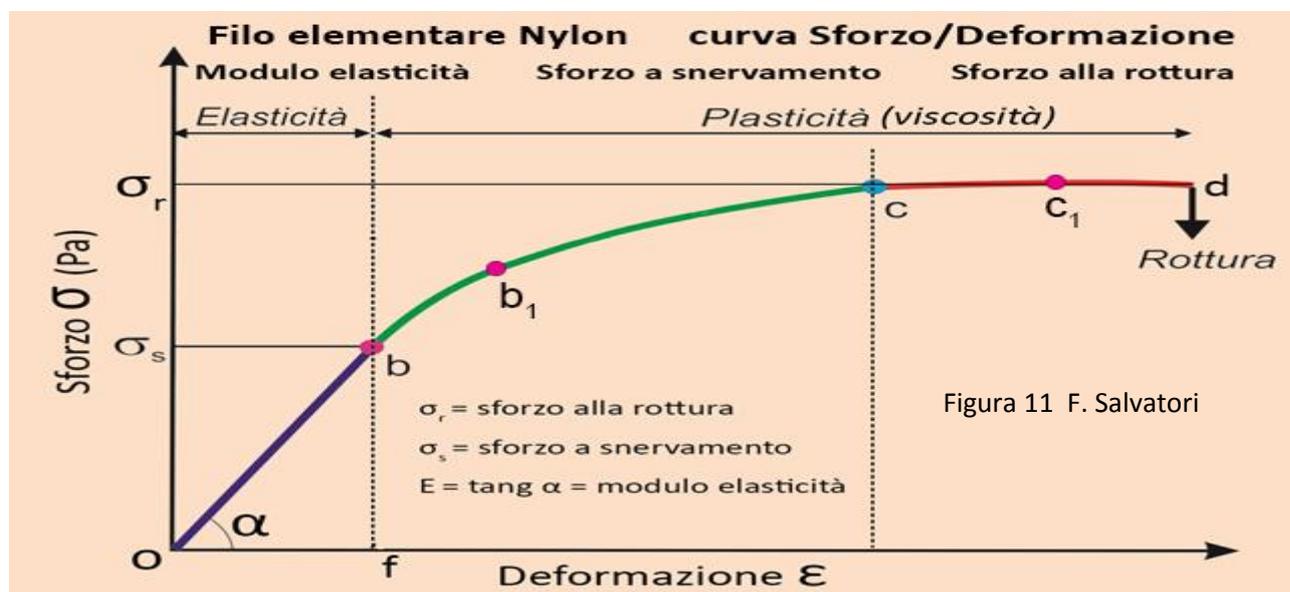
Il cedimento avviene quando il valore della di forza corrispondente alla S_e viene raggiunto con la trazione.

Con le indicazioni fornite dal grafico di **Figura 20** l'analisi dei rapporti fra curva $F = f(A)$ e modifiche nella strutturazione semicristallina dei fili elementari della corda non va oltre indicazioni generiche con valutazioni quantitative grossolanamente indicate.

05.b) Seconda premessa: trazione lenta su un filo elementare di poliammide e modifiche nella disposizione delle catene di macromolecole

Se invece sottoponiamo a trazione un elemento - omogeneo geometricamente e isotropo per caratteristica del materiale come un filo elementare (pag. 62, **Figura 52**) - la curva Sforzo/Deformazione $\sigma = f(\epsilon)$ (possibile solo conoscendo la sezione trasversale del campione testato) risulta come nella **Figura 11** (pag. 23), adatta per una analisi differenziata da tratto a tratto e correlabile a quanto avviene a livello della disposizione delle catene di macromolecole nel filo elementare (l'effetto CSCC è eliminato).

In questo grafico è possibile distinguere i vari tratti della curva, collegandoli con quanto accade nelle catene di macromolecole che costituiscono il materiale semi-cristallino dei fili elementari, sia nei settori cristallini che in quelli amorfi.

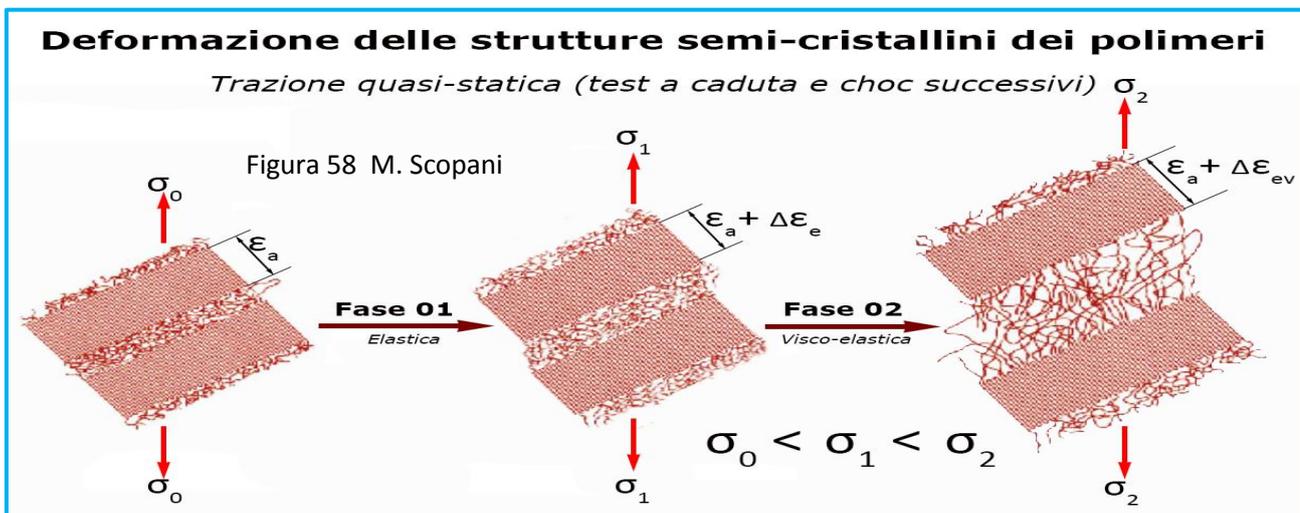


A tal proposito, facendo sempre riferimento alle **Figure 52– 53 – 54 – 55 - 57**, si ricordano le principali configurazioni **a riposo** delle catene di polimeri: **52)** filo elementare poliammide nuovo; **53)** sezione trasversale di porzione di filo elementare con settori cristallini e amorfi; **54)** sezione longitudinale di porzione di filo elementare con settori cristallini e amorfi; **55)** strutture cristalline lamellari; **57)** disposizione ordinata di catene di macromolecole nei settori cristallini dei fili elementari, con legami idrogeno e conseguente formazione di struttura a nido d'ape

Si ricorda che nelle poliammidi la percentuale d'estensione delle zone cristalline del Nylon 6.6 può arrivare al 70 %, mentre nel Nylon 6 al 55 %.

Sotto trazione, queste conformazioni si modificano tanto nella parte amorfa quanto in quella cristallina; le deformazioni nei settori amorfi richiedono una quantità d'energia inferiore a quella necessaria nelle zone cristalline.

Ora mettiamo in relazione quanto accade nella disposizione semi-cristallina con le varie fasi della trazione, in sequenza (**Figura 58 - 59**).



Nel tratto O – b iniziale della curva di **Figura 11** (in rispetto della Legge di Hook $\sigma = f(\epsilon)$ con proporzionalità diretta fra deformazioni e sforzi, con deformazioni elastiche reversibili) avviene quanto mostrato nella **Fase 01** di **Figura 58**. I settori cristallini con catene, piegate e ordinate, si deformano in maniere elastica/reversibile e lo spessore ϵ_a aumenta di $\Delta\epsilon_e$; mentre in quelli amorfi le catene di macromolecole si flettono, ma senza superare il limite d'elasticità e di reversibilità. E' dunque attiva solo l'elasticità. E' la Fase del processo che richiede maggior energia per unità lineare.

Per la parte amorfa, osservando la **Figura 56** (pag. 64), si comprende quanto avviene nella realtà delle catene polimeriche, se prese singolarmente: la **Catena d**, per effetto della trazione, i capi l_1 e l_2 si allontanano e la distanza r aumenta. Ma questa crescita di r è ancora nel limite della reversibilità e, se venisse tolta la forza traente, tutto il "groviglio" della catena riacquisterebbe la conformazione iniziale, restituendo tutta l'energia assorbita. Lo stesso comportamento si avrebbe nei settori cristallini, allargati di $\Delta\epsilon_e$. Nella **Figura H** delle **Appendici 06** (pag. 306) questa fase è indicata come "Deformazione istantanea elastica".

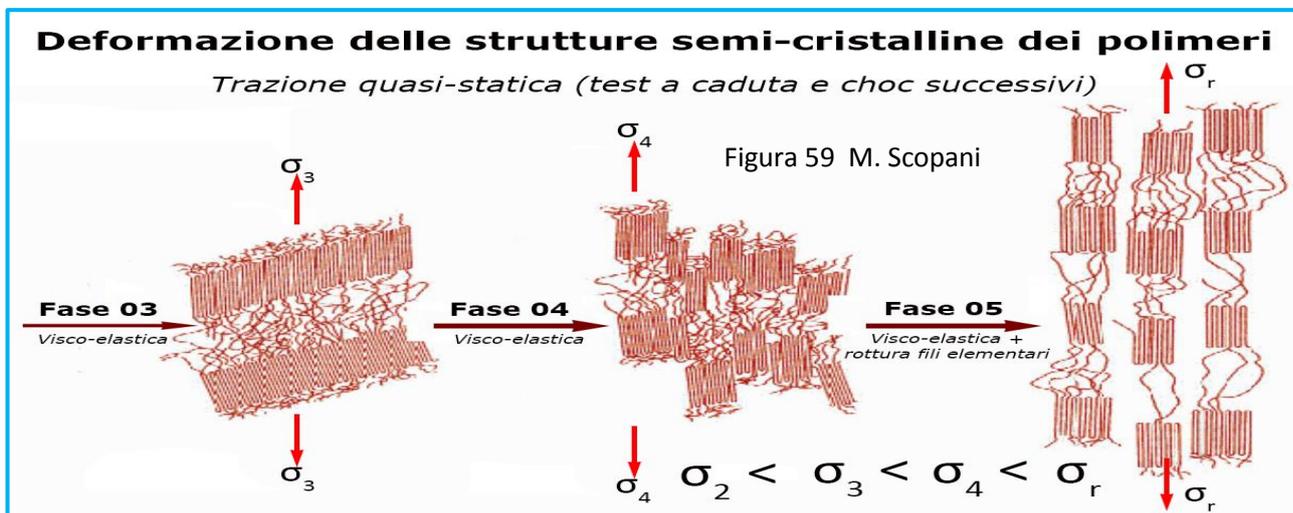
Nel tratto b – b₁ della curva di **Figura 11** le deformazioni sono in parte **elastiche** e in parte **plastiche** irreversibili: nella **Catena d** (**Figura 56**) la trazione, che continua, tende ad allontanare i capi l_1 e l_2 , la distanza r aumenta ancora e supera il limite d'elasticità. Ora, una parte dell'energia data non sarà recuperabile, anche perché parte dell'energia **viene dissipata con gli attriti** fra catene di macromolecole: è la viscosità che entra in gioco e la **Deformazione** che ne consegue avanza con un ritardo di tempo rispetto all'applicazione della forza.

In questo tratto la curva $\sigma = f(\epsilon)$ flette e rende evidente che non è possibile recuperare la conformazione precedente, se non in parte.

Anche gli spazi cristallini del filo elementare si deformano, aumentando nelle zone lamellari di uno spessore pari a $\Delta\epsilon_{ev}$ (**Figura 58 Fase 02**), ma sempre senza modificare la struttura ordinata delle catene. Il contenuto energetico in questa fase è di poco superiore a quello della **Fase 01**. Il comportamento dei fili

elementari è ora, embrionalmente, tanto elastico che plastico. A parità di Sforzo la Deformazione s'incrementa.

Nel tratto $b_1 - c$ della curva di **Figura 11** lo Sforzo di trazione σ_3 produce Deformazioni sempre crescenti e si attua la **Fase 3** della **Figura 59**): nelle lamelle le catene ripiegate ordinatamente scorrono le une sulle altre, allineandosi con l'asse di trazione; gli spazi amorfi aumentano ancora e la capacità del polimero di resistere alla trazione diminuisce progressivamente (a parità di sforzo l'allungamento è ulteriormente incrementato). Il materiale polimerico diventa via via più "gommoso" e il cedimento s'avvicina.



Nel tratto $c - c_1$ della curva di **Figura 11** lo sforzo di trazione s'incrementa ancora, ma in modo sempre più ridotto (σ_4), producendo la **Fase 4** (**Figura 59**): le lamelle si frazionano in blocchi cristallini di minore estensione, la parte amorfa aumenta ancora d'estensione, i legami idrogeno intermolecolari (pag.65, **Figura 57**) diminuiscono (la disposizione più caotica delle catene di macromolecole rende meno probabile una contrapposizione favorevole all'instaurazione di legami idrogeno) e la resistenza alla rottura e all'allungamento decresce rapidamente. L'energia necessaria per attuare la **Fase 4** è minore a quella delle fasi precedenti. Le trasformazioni sono ora **completamente irreversibili** (o quasi). Le zone amorphe aumentano ancora.

Nel tratto $c_1 - d$ della curva di **Figura 11** lo sforzo di trazione rimane costante (anzi, in realtà, decresce), portando alla **Fase 5** di **Figura 59**, quando avviene lo **stiramento** dei blocchi cristallini prodottisi, che si allungano lungo l'asse di trazione intervallati da residui di zone amorphe. Fra di essi non ci sono catene che creano collegamenti intermolecolari, e il materiale diventa sempre più cedevole. I settori amorfi prendono il sopravvento.

Anche la possibilità che i blocchi cristallini si affianchino per creare legami idrogeno intermolecolari diminuisce drasticamente: il filo elementare non oppone più resistenza di un fluido altamente viscoso e si sfilaccia, raggiungendo il cedimento con uno sforzo più basso di quelli raggiunti in precedenza.

05.c) Il fattore di ritardo di tempo δ è il parametro che quantizza la differenza fra trazione lenta (quasi-statica) e a caduta (Torre)

Quello che è stato descritto per una trazione a bassa velocità (quasi-statica), vale anche per una **sollecitazione veloce** prodotta con la Torre di Caduta: l'evoluzione della disposizione delle catene di polimeri **dalla Fase 1 alla Fase 5 è nella sostanza identica**.

La differenza sta solo nel ritardo δ fra l'avvento dello Sforzo massimo e dell'Allungamento massimo, come mostrato nella **Figura 38** (pag. 46) (nella **Parte V** viene data una conferma sperimentale di questo fenomeno, anche quantizzando la dipendenza del ritardo δ dalla velocità di deformazione V_d). Sorprendentemente, come si può vedere nel proseguo di questo lavoro, il **ritardo è tanto più elevato** quanto più ci si avvicina a **velocità di trazione nulla**.

05.d) Test a caduta ripetuti su una corda con uguale velocità di trazione, modifiche sui fili elementari e nella disposizione delle catene di macromolecole

Sottoponendo una corda a dei test a caduta, **ripetuti anche 10 volte sullo stesso campione di corda**, con altezze di caduta sempre uguali (quindi con velocità di deformazione che non cambia), la successione delle modifiche nella struttura semi-cristallina delle poliammidi (Nylon) sono sempre le stesse, identiche a quelle indicate nelle **Figure 58a - 58b (Fasi 1 – 5)**.

La successione di choc sullo stesso campione produce gli stessi fenomeni di degradazione (“invecchiamento per uso”) che comporta una trazione continua; ma il risultato finale (snervamento e poi la rottura) si raggiunge attraverso una **successione discreta di step**.

Da rilevare che solo arrivando **con la successione di choc** a uno stadio di deformazione come indicato nella **Fase 5** della **Figura 58b**, si compromette la resistenza alla rottura dei fili elementari (e quindi della corda); prima si andava a incidere solo sulla rigidità del filo elementare (e quindi della corda) con la diminuzione del Modulo d’elasticità E . Nella **Parte V** un test apposito fa fede a questa affermazione.

05.e) Test a caduta ripetuti su una corda con velocità di trazione crescente, modifiche sui fili elementari e nella disposizione delle catene di macromolecole

In questo caso nulla cambia rispetto a quanto descritto nei precedenti **Paragrafi**, se non che con l’aumentare dell’altezza di caduta (maggiore velocità di deformazione V_d) i fenomeni deformanti e degradanti si accentuano, nell’**intensità** e nelle **differenze** (vedi **Parte V**).

06. Acqua e Nylon: igroscopia, idrolisi e modifica caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche

06.a) Premessa - I fili elementari di Nylon, e quindi le corde da questi composte, variano marcatamente le loro caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche in funzione dell’**acqua** e del **calore** assorbiti. In questo capitolo ci interessiamo del problema dell’acqua; nel successivo del calore. I grafici riprodotti in questo capitolo sono il frutto di una ricerca sperimentale “Poliammidi Assorbimento di umidità” della LATI [24] [29].

06.b) Assorbimento igroscopico dell’acqua nel Nylon - Il Nylon 6 e Nylon 6.6 sono polimeri **igroscopici** (come molti altri) e **possono assorbire molecole d’acqua fino a circa il 10 % del loro peso!**

Si tratta di una vera e propria penetrazione delle molecole d’acqua all’interno dei fili elementari. E’ un’idratazione che sfrutta gli spazi intramolecolari e quindi in contatto diretto con gli atomi d’idrogeno, d’ossigeno, d’azoto e di carbonio (che compongono le macromolecole di poliammide).

Questo fenomeno igroscopico è regolato dalla **Teoria della diffusione** e in particolare dalla **Seconda Legge di Fick** [14]:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (17)$$

dove:

C = contenuto umidità al tempo t [% in peso]

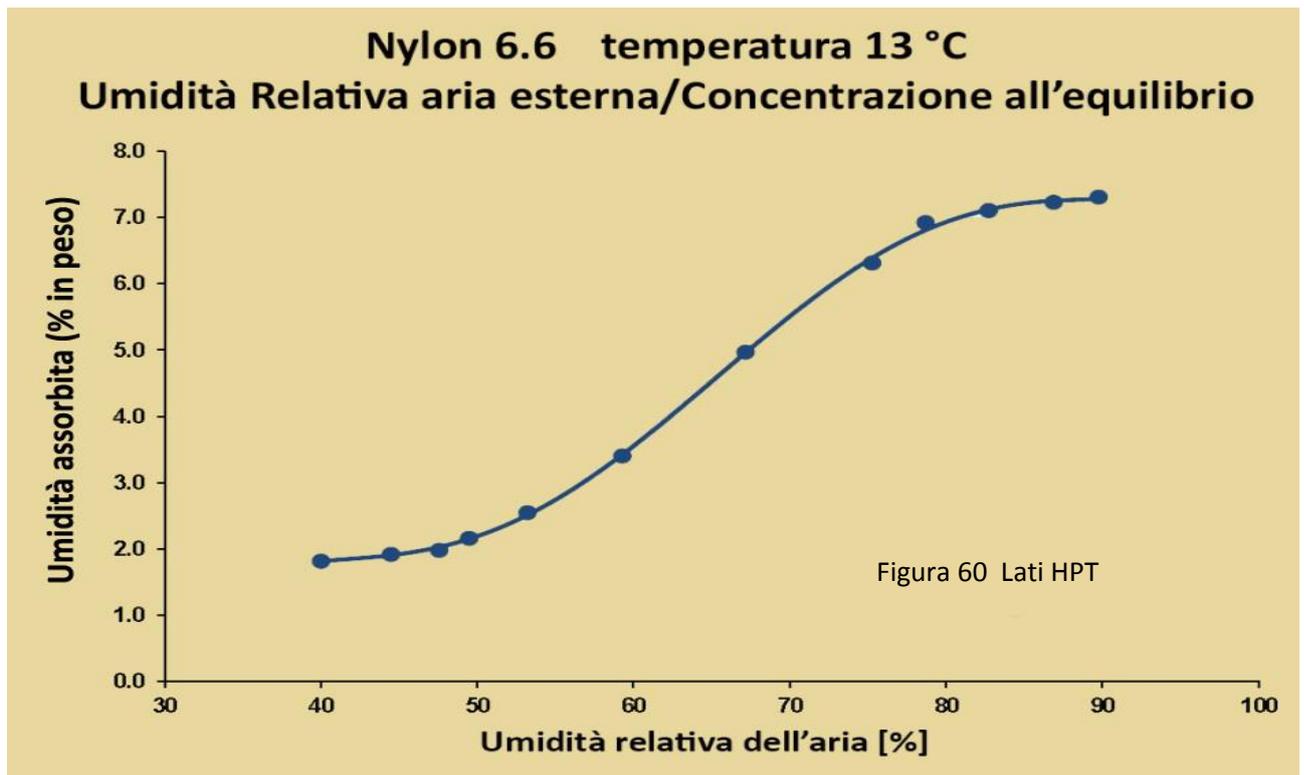
t = tempo [s]

x = penetrazione elemento poliammide [mm]

D = coefficiente di diffusione [mm^2/s]

$\frac{dC}{dt}$ = variazione della concentrazione nel tempo [%/s]

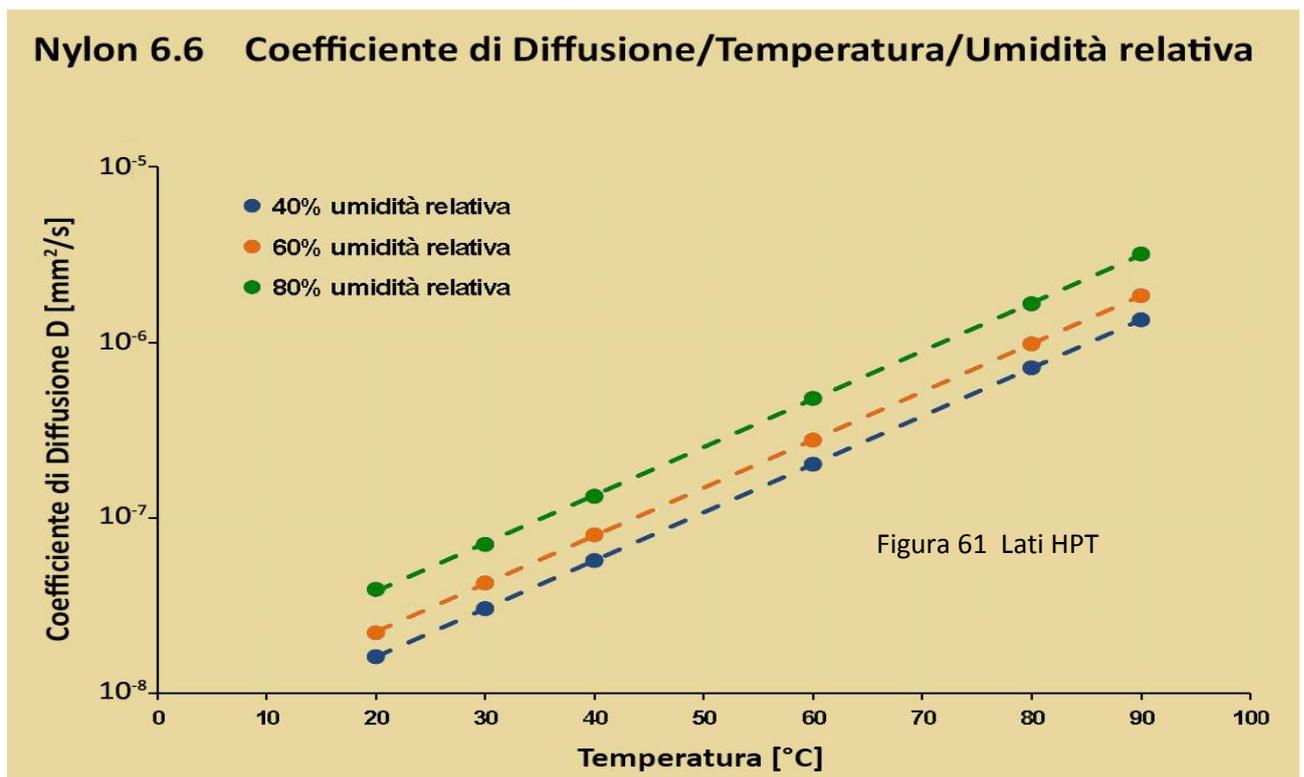
$\frac{d^2C}{dx^2}$ = riduzione del gradiente della concentrazione lungo la coordinata x [%/ mm^2]



In forza della **Relazione 17**, il fenomeno della penetrazione igroscopica delle molecole d'acqua nei fili elementari di Nylon **si esaurisce** quando al loro interno viene, uniformemente, **raggiunta la concentrazione d'equilibrio C_{eq}** .

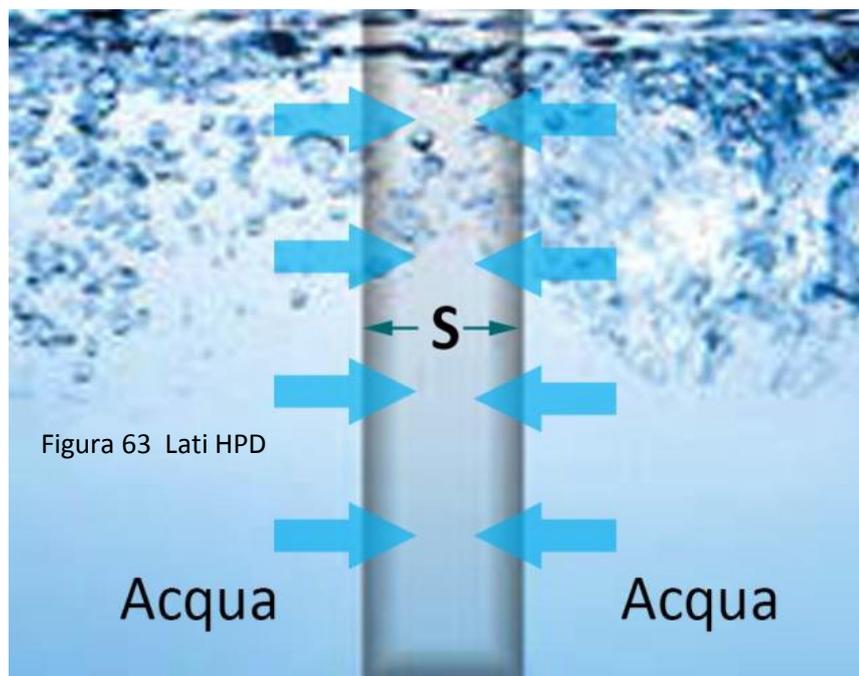
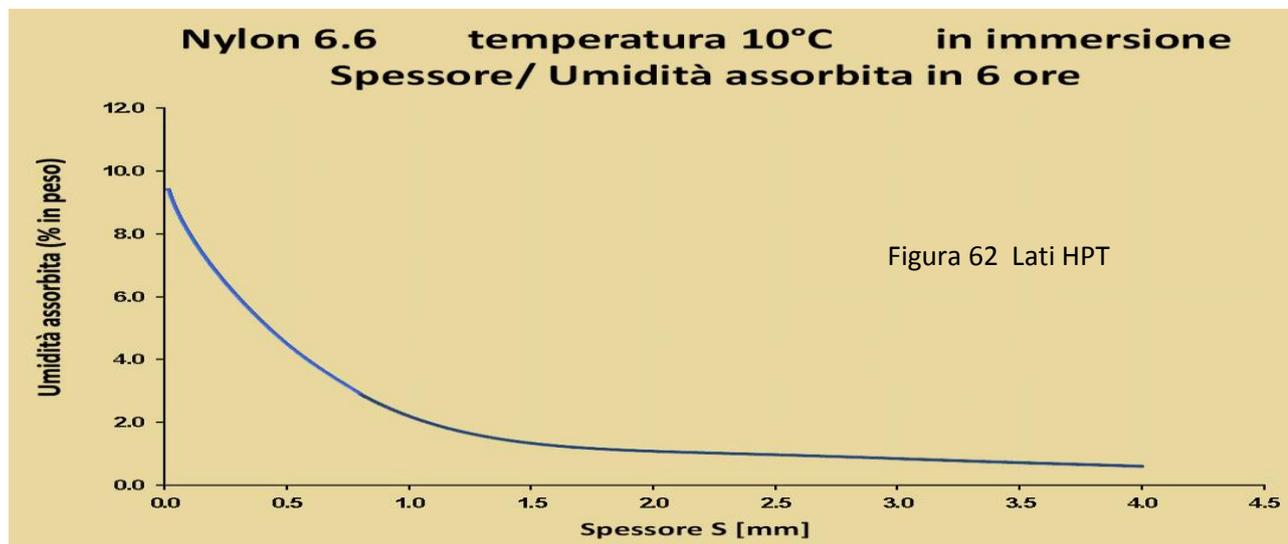
La concentrazione d'equilibrio C_{eq} dipende dal grado di umidità relativa (U.R.) dell'ambiente esterno al polimero, com'è diagrammato in **Figura 60**. Se le corde sono immerse totalmente in acqua l'umidità relativa è pari al 100 % [29].

A temperature più elevate (23°C) e U.R. 100 %, si può raggiungere il 9,5 – 10,0 % di concentrazione all'equilibrio [14].



Il coefficiente di diffusione D (Relazione 17) incide marcatamente nel determinare il processo d'idratazione del Nylon, ed è dipendente dalla *capacità igroscopica* del materiale interessato e, soprattutto, dalla *temperatura*.

Nel diagramma di **Figura 61** si evidenzia l'influenza della temperatura sul coefficiente D del Nylon 6.6. Con temperatura e umidità relativa tipo "grotta" (5-10°C e 95 - 100 %) questo coefficiente è molto piccolo e il tempo per raggiungere la saturazione si allunga. Da dati sperimentali (**Parte VII**) si raggiunge la **saturazione in grotta in non più di 2 ore**.



Nella **Figura 62** è diagrammata, in funzione dello spessore, la percentuale di umidità assorbita in 6 ore da un campione isotropo di Nylon 6.6 immerso in acqua (**Figura 63**): **tanto minore è lo spessore da penetrare igroscopicamente tanto più rapido sarà il raggiungimento della saturazione.**

Ricordando che per il Nylon la concentrazione di saturazione all'equilibrio a 10°C è all'incirca 9,5 %, 6 ore d'immersione sono dunque sufficienti per raggiungere l'idratazione completa di un filo elementare del diametro di circa **25 μm** . Un'idratazione istantanea.

Quando le corde vengono immerse completamente in acqua, i fili elementari che le compongono sono avvolti dall'acqua immediatamente su tutta la superficie esterna (semmai, con piccole differenze di tempo fra calza e trefoli).

Questa considerazione fa concludere che in una **corda immersa in acqua**, dopo **qualche ora al massimo, tutti i suoi fili elementari sono saturi di molecole d'acqua**, raggiungendo al massimo un'idratazione del 10 % in peso.

Conclusioni - La penetrazione igroscopica dell'acqua nei fili elementari di Nylon è condizionata dai seguenti parametri:

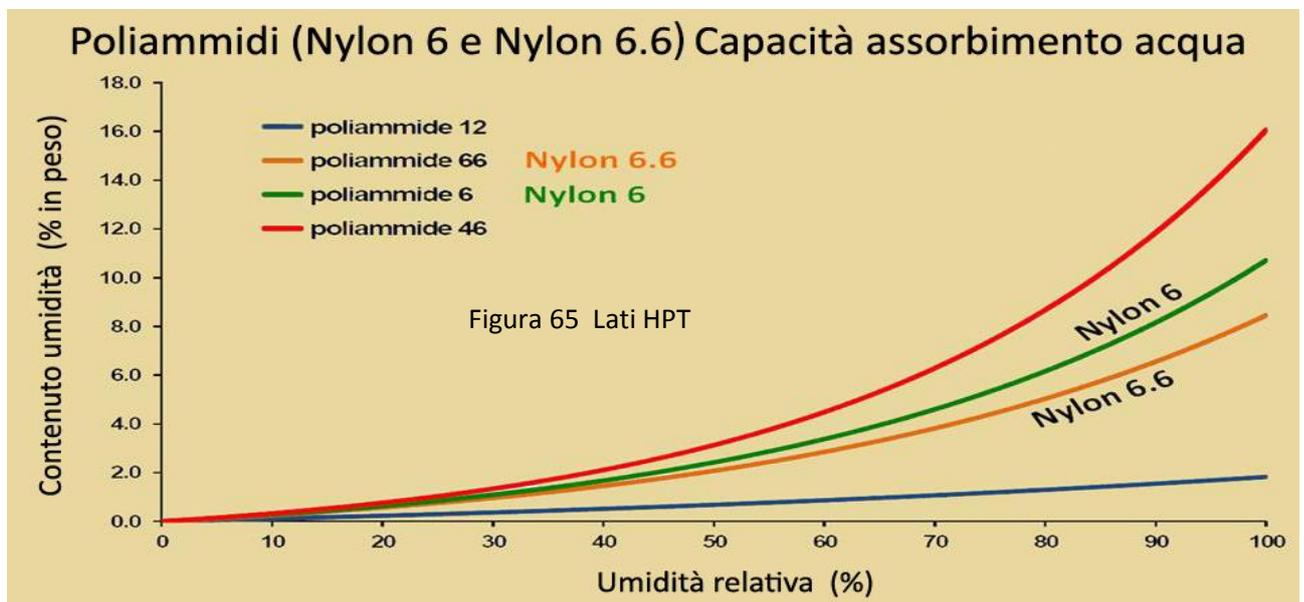
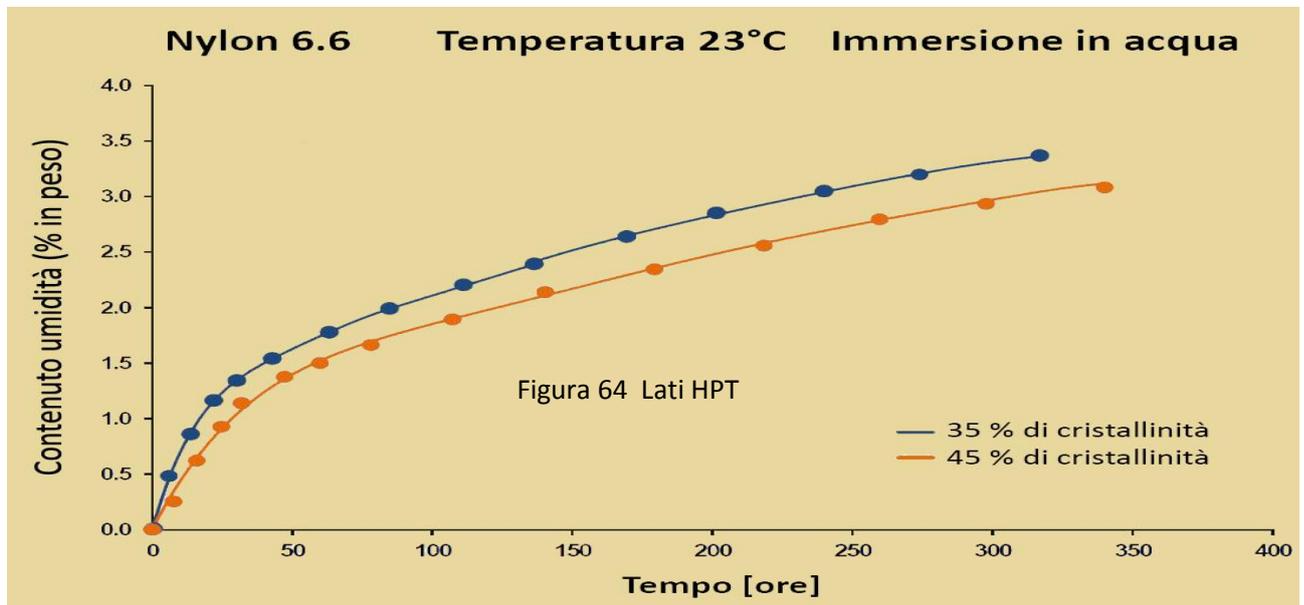
1. **umidità relativa dell'aria** (nel caso d'immersione totale equivale al 100 %): più è alta, maggiore è la quantità d'acqua assorbita;

2. **limite massimo d'acqua assorbibile** a temperatura ambiente: 10 % in peso;
3. **temperatura dell'ambiente**: il suo aumento favorisce l'incremento del coefficiente di diffusione;
4. **spessore da permeare**: tanto più si riduce tanto minore è il tempo necessario a raggiungere la concentrazione d'equilibrio; l'idratazione dei fili elementari è un fenomeno quasi istantaneo;
5. quando una corda viene a contatto con l'acqua - sia perché esposta all'umidità relativa dell'aria sia perché immersa completamente - in tutti i suoi fili elementari inizia, **contemporaneamente**, la penetrazione igroscopica delle molecole d'acqua; date le ridottissime dimensioni delle singole fibre (qualche decina di μm) questa penetrazione si esaurisce in pochi minuti, raggiungendo la concentrazione d'equilibrio; quindi, dopo pochi minuti tutta la corda, specie se immersa in acqua, è nelle stesse condizioni di assorbimento d'acqua, che non variano più nel tempo **finché l'immersione resta**.

07. Cristallinità dei fili elementari e assorbimento d'acqua

Facendo riferimento alle **Figure 53 – 54 - 55 (pag. 63)** è dimostrato sperimentalmente che le fibre con settori amorfi percentualmente più estesi, a parità delle altre condizioni, assorbono una quantità maggiore d'acqua.

Ciò è conseguenza del fatto che nelle **zone amorphe**, essendoci una minore organizzazione delle macromolecole, ci sono **più spazi per penetrare e accumulare molecole d'acqua**. Nei grafici delle **Figure 64 – 65** c'è la conferma sperimentale di quanto affermato.



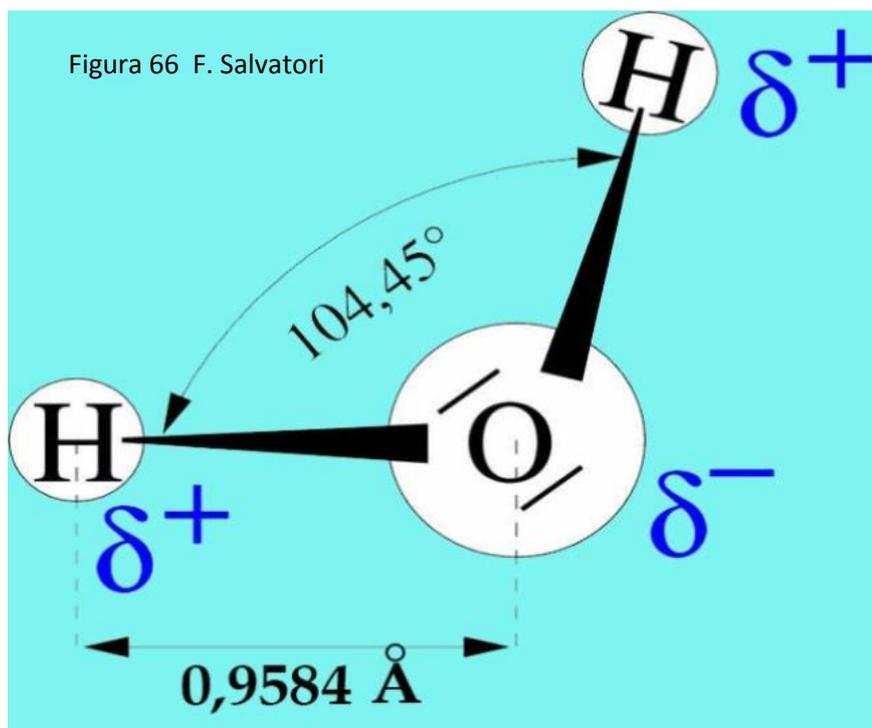
Nella **Figura 64** è ben evidente quanto corrispondano alla realtà sperimentale le considerazioni prima espresse: un campione isotropo di Nylon 6.6 immerso in acqua (UR 100 %) con maggiore cristallinità (45 %) assorbe, a parità di tempo d'immersione, una quantità minore di umidità rispetto a un altro campione con settori amorfi più estesi.

Nella **Figura 65** è mostrata un'ulteriore conferma sperimentale che le molecole d'acqua penetrano in quantità maggiore nelle fibre a minor cristallinità: in questo caso il Nylon 6.

08. Idrolisi dei legami idrogeno nel Nylon: variazioni delle caratteristiche meccaniche dei fili elementari

Da quanto esplicitato nel paragrafo precedente, è chiaro che la **costituzione di legami idrogeno fra le catene di macromolecole** delle poliammidi è **uno dei fattori più incisivi nel conferire le caratteristiche meccaniche dei fili di Nylon**, dandogli capacità di **resistere alla rottura**, ai **cicli d'usura a fatica**, alla **successione d'urti** (resilienza) e alle **abrasioni** (tutti argomenti trattati nel proseguo di questo capitolo). Ricordiamo ancora una volta che **i legami idrogeno agiscono in tutte e tre le dimensioni dello spazio**.

Ma la **costituzione dei legami idrogeno** intermolecolari (*pag. 65, Figura 57*) è una **reazione reversibile**, che è annullata (o comunque ridimensionata) in presenza di molecole d'acqua all'interno del filo elementare, penetrate proprio come descritto nel capitolo precedente attraverso l'igroscopicità delle poliammidi.



Il **meccanismo che rompe i legami idrogeno** intramolecolari è conseguenza dell'**idratazione igroscopica delle fibre polimeriche**: quando le **molecole d'acqua** entrano in contatto con le catene di polimeri del filo elementare, **avvolgono** - con le cariche opportunamente orientate - gli **atomi d'ossigeno e d'idrogeno** dei legami intermolecolari e **producono** il fenomeno chimico dell'idrolisi, cioè **la rottura**.

Il **meccanismo** d'annullamento del legame inizia con l'avvolgimento degli atomi d'ossigeno e idrogeno delle catene polimeriche con delle **"nuvole" di molecole**

d'acqua, come indicato nella **Figura 67** (l'avvicinamento intimo delle molecole d'acqua agli atomi idrogeno e ossigeno delle macromolecole è possibile perché l'ingombro del "dipolo acqua" è di **1,51 Å** (**Figura 66**) mentre le maglie delle catene polimeriche hanno dimensioni superiori (**1,65 Å** e oltre). Dunque "maglie" larghe che consentono un'omogenea diffusione delle molecole d'acqua.

La molecola d'acqua ha una disposizione asimmetrica degli atomi nello spazio, come appunto è rappresentato in **Figura 66**, e per questo è definita un "**dipolo**", con un lato dove si concentra la carica negativa (in corrispondenza dell'atomo d'ossigeno) e l'altro quella positiva (nel versante dove si protendono gli atomi d'idrogeno). Questa asimmetrica disposizione delle cariche elettriche guida le molecole d'acqua fra le catene di poliammidi, che sono attratte con la parte negativa dall'atomo d'idrogeno (**A e A₁**) mentre con quella positiva dall'ossigeno (**B e B₁**); come descritto sinotticamente in **Figura 67** (per l'identificazione degli atomi si veda *pag. 61, Figura 49*).

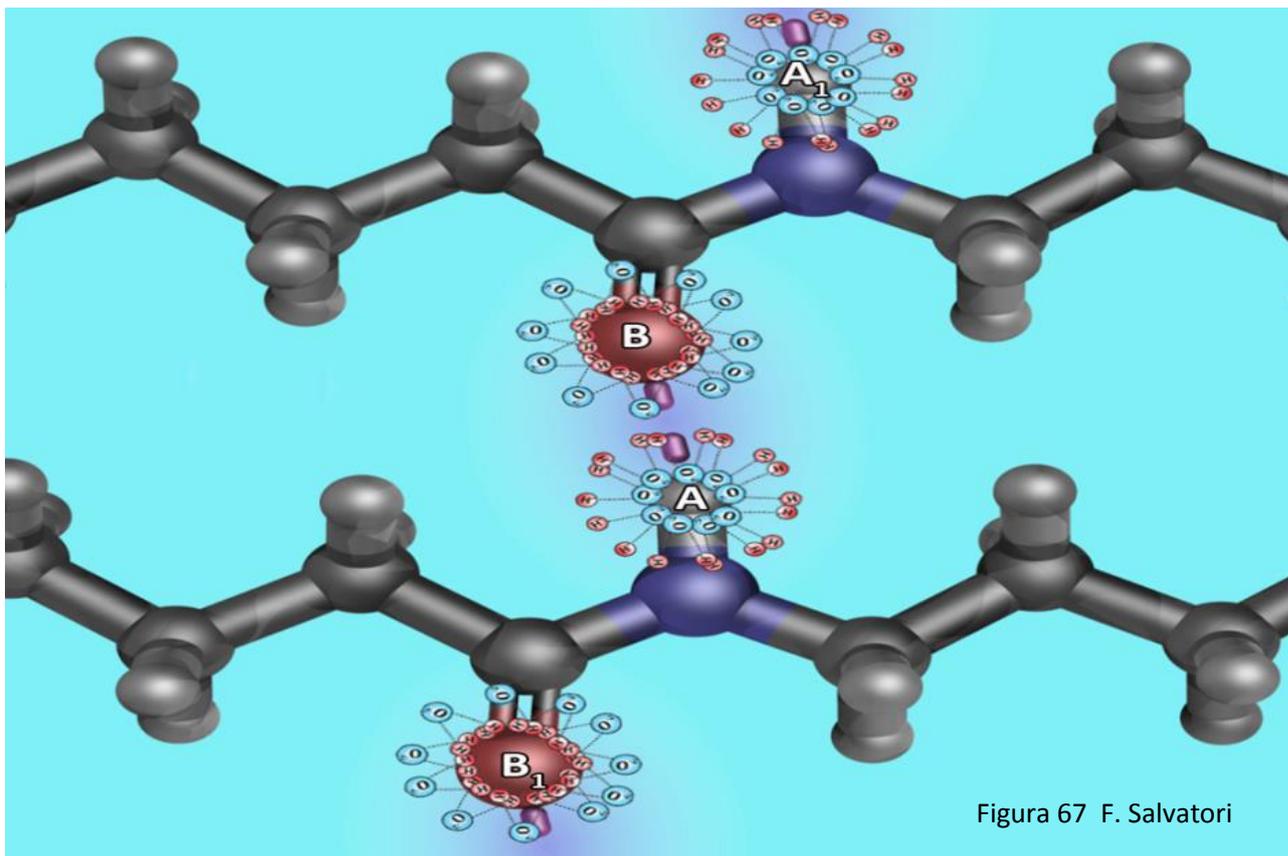


Figura 67 F. Salvatori

E' questo un fenomeno - **chiamato idrolisi** - sempre presente ogni qual volta una sostanza che ha **punti d'aggancio elettrostatico** è disciolta in acqua. Nel caso specifico, accade che l'atomo d'idrogeno **A** della macromolecola è **avvolto da una "nube" di molecole d'acqua, orientate opportunamente**. E la stessa cosa, **con verso opposto**, accade attorno all'atomo d'ossigeno **B**. L'idratazione è **simultanea e immediata**, coinvolgendo istantaneamente anche tutti gli altri atomi **B₁** e **A₁** presenti nel filo elementare.

La causa che porta alla rottura del legame intermolecolare **-H----O-** è dovuta **all'interazione elettrostatica che i "dipoli acqua" esercitano quando si coordinano con i due atomi** (ognuno con la polarità giusta): a ogni dipolo che si collega all'atomo **A** e all'atomo **B** il **legame intermolecolare idrogeno - ossigeno diminuisce di forza**, finché il numero di dipoli-acqua coordinati è sufficiente ad **annullarlo completamente**. E visti gli ingombri molecolari prima menzionati (**Figura 66**), questo è possibile: c'è spazio a sufficienza per coordinare tutte le molecole d'acqua necessarie.

L'azione d'idrolisi si manifesta non solo con l'immersione totale in acqua ma anche con la sola l'umidità presente nell'atmosfera: più è alto il valore dell'umidità relativa più molecole d'acqua entrano nel filo elementare; più dipoli acqua sono disponibili per l'idrolisi; più legami intermolecolari si annullano e più decrescono le proprietà di tenuta e rigidità dei fili elementari (proprietà meccaniche).

Nei capitoli che seguono sono presentati diversi risultati sperimentali che mostrano come, in effetti, la presenza d'acqua abbia capacità "plastificanti" nei riguardi dei polimeri e in particolare delle poliammidi: in effetti l'umidità rende il Nylon "gommoso" riducendo sia **F_r** che **E** .

L'introduzione di molecole d'acqua nel Nylon, come meglio è specificato nella **Figura 72 (pag. 80)**, ha una netta influenza anche sulla **Temperatura di Transizione Vetrosa**, uno dei parametri più significativi nel determinare le caratteristiche meccaniche delle poliammidi in correlazione alla presenza di fondi di calore.

Le considerazioni sinora fatte **sull'interazione Nylon/acqua** nel determinare marcatamente le caratteristiche meccaniche, chimico-fisiche (ed elettriche) delle fibre poliammidiche mettono in risalto il grande rilievo di questo problema nell'incidere sull'usura delle corde in speleologia. E per questo nei capitoli che seguono sono esaminati nel dettaglio alcuni aspetti particolari della questione.

09. Disidratazione/essiccazione e annullamento dell'effetto idrolisi

Occorre tenere presente che l'**idrolisi**, come rappresentata in **Figura 67**, **non cambia** in alcun modo la **disposizione e la composizione atomica delle catene di macromolecole** ed è una **reazione reversibile**.

Tanto è vero che, **eliminando o riducendo la presenza d'acqua** dai fili elementari (non più in immersione e poi essiccazione) il **Nylon riacquista le proprietà perse**. L'effetto d'**indebolimento** sulle fibre polimeriche portato dall'acqua igroscopica è **annullato** (o comunque ridotto).

Resta comunque da comprendere quali sono i tempi che portano all'eliminazione dell'acqua dalle fibre. E nella **Figura 68** ci sono alcune indicazioni in proposito: infatti - mettendo in relazione i dati sperimentali delle temperatura, del contenuto d'umidità residuo e il tempo - si rileva che l'eliminazione dell'acqua dal Nylon 6.6 (per esempio) non è un processo subitaneo.

Come la diffusione delle molecole d'acqua all'interno del polimero è regolata dalla **Seconda Legge di Fick (Relazione 17)**, ugualmente lo è la loro fuoriuscita.

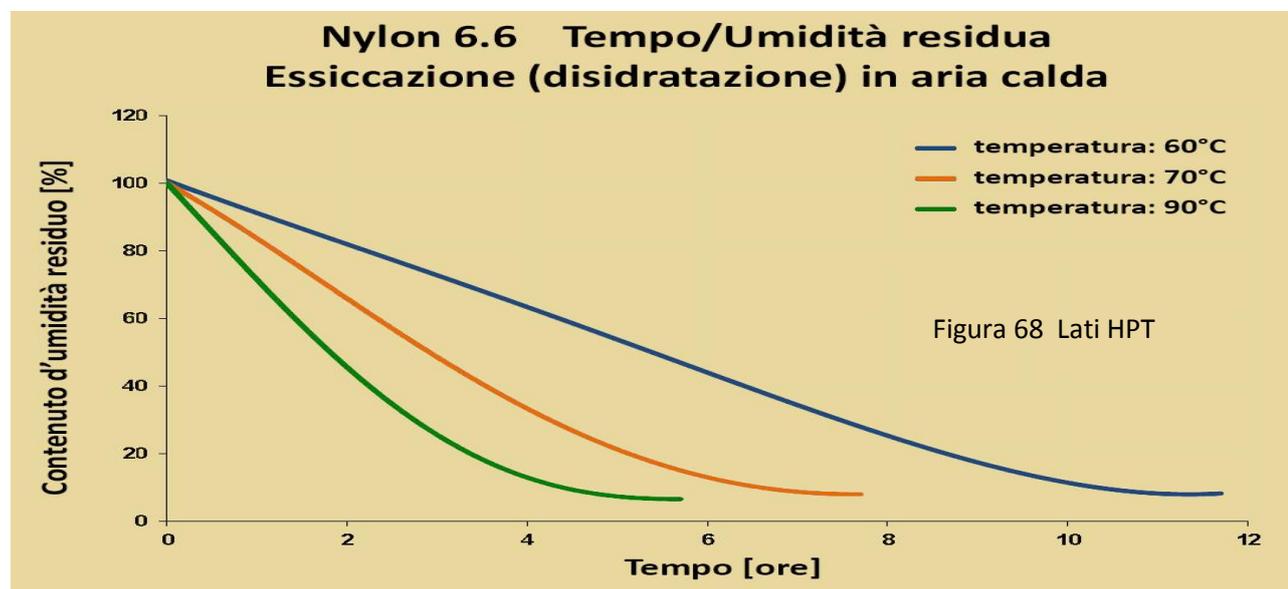


Figura 68 Lati HPT

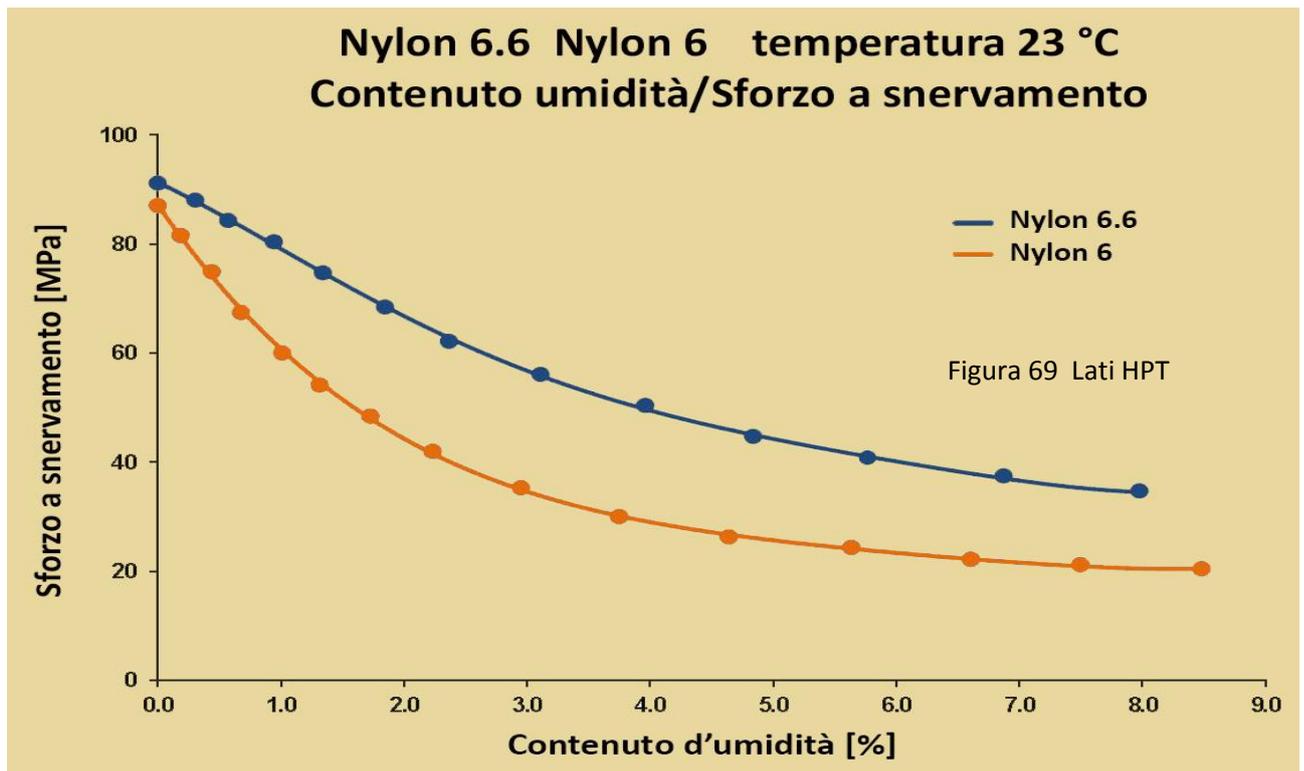
I grafici di **Figura 68** mostrano che l'eliminazione delle molecole d'acqua è in funzione della **temperatura della corrente d'aria essiccante**, la quale stabilisce la velocità con cui il contenuto d'umidità viene eliminato.

Considerato il caso, realistico per la grotta, che una corda sia stata immersa in ambiente con umidità relativa al 100 % e temperatura inferiore ai 10°C (perdendo in tal modo, per **effetto idrolisi**, una certa percentuale di capacità a opporsi alla rottura), togliendola da questa condizione e messa ad asciugare in condizioni "magazzino" speleo, **saranno comunque necessarie alcune ore prima che riacquisti tutte le sue caratteristiche di tenuta e rigidità** (fino a 24 ore).

10. Idrolisi nel Nylon e variazione delle caratteristiche meccaniche

Nei grafici che seguono sono rappresentate, a titolo d'esempio, alcune fra le principali situazioni in cui si mostra evidente l'influenza dell'umidità sul comportamento delle fibre poliammidiche.

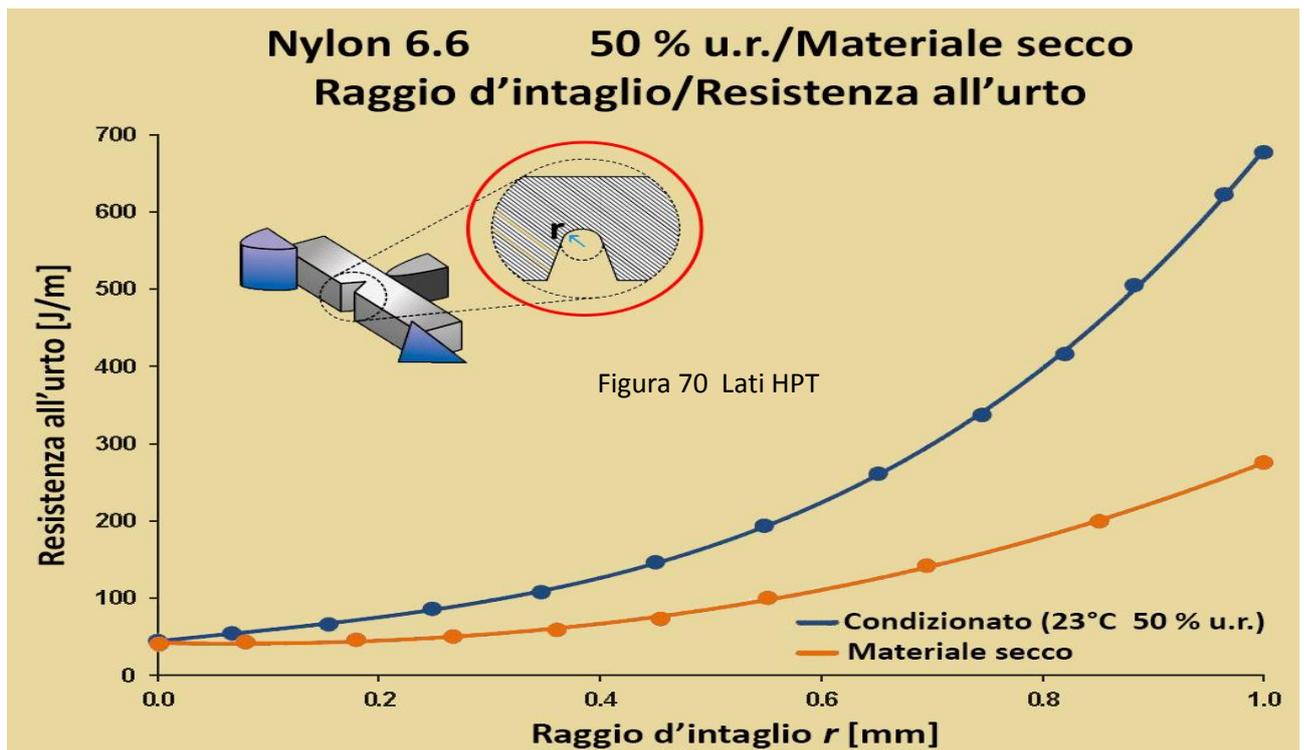
10.a) Contenuto d'umidità, idrolisi e sforzo a snervamento - Nel grafico di **Figura 69** si mette in relazione lo sforzo a snervamento (quando il campione sottoposto a trazione perde la linearità fra forza applicata e allungamento, pag. 23, **Figura 11**) e il contenuto d'umidità (% in peso) nel Nylon 6.6 e nel Nylon 6.



Innanzitutto si evidenzia che la **capacità di resistere alle deformazioni permanenti diminuisce** con l'**aumentare del contenuto d'acqua nel polimero**: questo è coerente con il fatto che aumentando l'umidità cresce il numero dei **legami idrogeno intermolecolari annullati per idrolisi**. E' una **conferma sperimentale** di quanto ipotizzato teoricamente.

Ma risulta evidente anche una diversità fra Nylon 6.6 e Nylon 6: in quest'ultimo, più amorfo, l'effetto riduttivo della stessa quantità d'acqua è più marcato che nel primo, più cristallino.

Come già detto, questo è dovuto alla maggiore "permeabilità" all'acqua del Nylon 6, dove le zone amorfe hanno valori percentuali più elevati e danno alle molecole d'acqua una più facile via d'accesso ai legami idrogeno delle zone cristalline, dove si concentra il maggior numero di legami intermolecolari fortificanti.



10.b) Contenuto d'umidità, raggio d'intaglio e resistenza all'urto – I test rappresentati graficamente in **Figura 70** mostrano, ancora una volta, e con nettezza, l'influenza dell'umidità introdotta igroscopicamente nel Nylon 6.6 (ma vale anche per il Nylon 6) sulle sue caratteristiche meccaniche.

In questo caso si riportano le variazioni di resistenza agli urti (test a caduta) in funzione del raggio d'intaglio (vedi particolare contornato in rosso in **Figura 70**) e della percentuale d'umidità nel campione: a confronto un materiale essiccato quasi completamente (contenuto residuo umidità 1 %) e un materiale condizionato con corrente d'aria al 50 % d'umidità relativa e temperatura di 23°C.

E' innanzitutto evidente che in entrambi i casi la resistenza agli urti (**resilienza**) aumenta in funzione del raggio r d'intaglio. Il che è del tutto normale e prevedibile, visto che con r più grande la superficie d'appoggio è maggiore e a parità d'energia d'urto la pressione è minore.

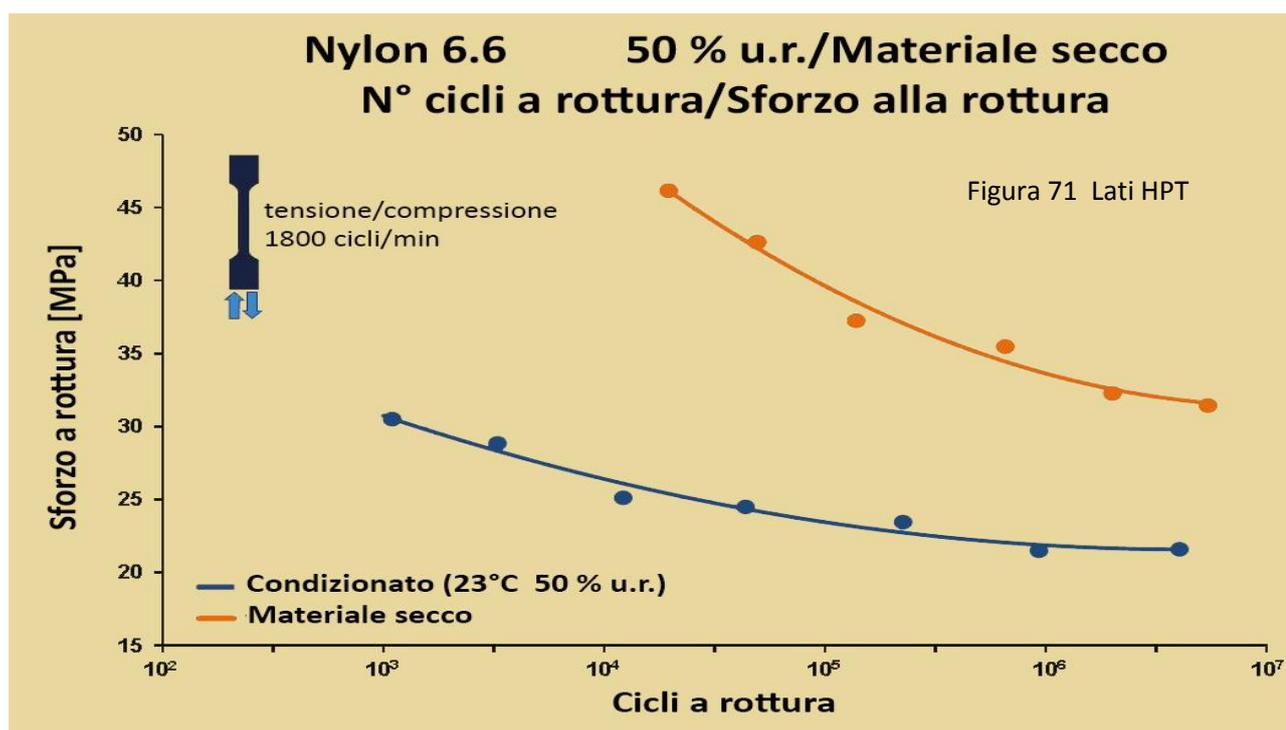
Ma, **per contro**, è un risultato sorprendente che il materiale condizionato al 50 % di umidità relativa sia più resiliente del materiale secco. Per questo il Nylon condizionato a un certo tasso di umidità è più adatto a essere modellato e inserito a pressione come parte di strumentazioni.

Il risultato di **Figura 70** indica anche, per estrapolazione, che le corde sottoposte a un susseguirsi di choc a caduta, **se bagnate**, hanno maggiore attitudine di quelle asciutte a deformarsi e quindi a assorbire meglio l'energia prodotta dagli urti. Ma ciò non toglie che il carico di rottura con le corde bagnate sia più basso e che risulti necessario un valore minore di forza per raggiungere la rottura.

10.c) Analisi Dinamica Meccanica, usura a fatica e tasso d'umidità – I diagrammi di **Figura 71** mostrano i risultati di una serie di test che mettono in relazione l'umidità assorbita, il numero di cicli di trazione-allungamento e lo sforzo a rottura. Si tratta di test d'Analisi Dinamica Meccanica (DMA, tipici per la definizione delle caratteristiche viscoelastiche dei materiali come le poliammidi) **ognuno dei quali produce un punto da diagrammare nel grafico**.

Le coordinate di questo punto (*ascisse = n° cicli; ordinate = sforzo alla rottura*) si ottengono sottoponendo un campione isotropo di poliammide a un succedersi ciclico (con macchinario apposito) di sollecitazioni a trazione sempre uguale (vedi particolare di **Figura 71** e pag. 307 e seg. **Appendici 06**), raggiungendo ad ogni trazione sempre lo stesso sforzo massimo e calcolando il numero di cicli che portano poi alla rottura del provino.

Nel caso di **Figura 71** sono stati eseguiti diversi test DMA, fissando ogni volta un differente carico massimo di trazione, con campioni di Nylon 6.6 a vario grado di umidità (come nella precedente sperimentazione).



I risultati ci dicono che:

1. **umentando il carico massimo di sforzo** applicato ad ogni serie di cicliche sollecitazioni, il numero di cicli necessario per raggiungere la rottura **diminuisce**;
2. a parità di carico massimo applicato alla serie ciclica di sollecitazioni, il Nylon con maggior grado di umidità (Condizionato) è più plastico e occorre un numero di cicli minore per raggiungere il cedimento (risultato coerente con le aspettative).

Questo tipo di test viene definito come “**usura a fatica**” e chiarisce, anche quantitativamente, come un materiale nuovo con carico di rottura F_r , se sottoposto a una successione ripetitiva di trazioni-allungamenti, possa cedere a valori di forza anche molto più bassi di F_r . E questo effetto viene accentuato quando nel polimero aumenta il contenuto d’umidità.

10.d) Conclusioni - Il Nylon deve le sue caratteristiche di rigidità e resistenza alla rottura alla presenza di legami idrogeno intermolecolari che uniscono le catene di macromolecole.

Le poliammidi sono igroscopiche e possono assumere acqua al loro interno fino a oltre il 9 - 10 % del proprio peso. L’ingresso di molecole d’acqua fra le catene di macromolecole va ad annullare l’effetto d’irrobustimento dei legami idrogeno intermolecolari.

Pertanto le modifiche delle caratteristiche meccaniche del Nylon modificate con la presenza dell’umidità sono:

1. *lo sforzo a snervamento che diminuisce con l’aumento dell’umidità (Figura 69);*
2. *la resistenza agli urti che aumenta con l’umidità presente (Figura 70);*
3. *il Nylon diventa più plastico e subisce maggiormente l’effetto “fatica a usura” con l’aumento dell’umidità (Figura 71).*

Il flusso igroscopico nelle fibre polimeriche è reversibile; e quindi i legami idrogeno intermolecolari possono essere ricostituiti e il materiale può riconquistare le caratteristiche meccaniche perdute.

Sia l’idratazione che l’essiccazione sono favorite da alte temperature e comunque anche a basse temperature si concludono nell’arco di qualche decina di ore al massimo.

Per questo l’idratazione e la disidratazione non possono essere responsabili di processi di decadimento che proseguono per decine di anni (pag. 129 e seg.).

L’immersione completa in acqua equivale a un tasso d’umidità del 100 %. Ciò significa che all’interno delle grotte le corde sono sempre “in immersione completa” (verifica sperimentale a pagg. 128 -129).

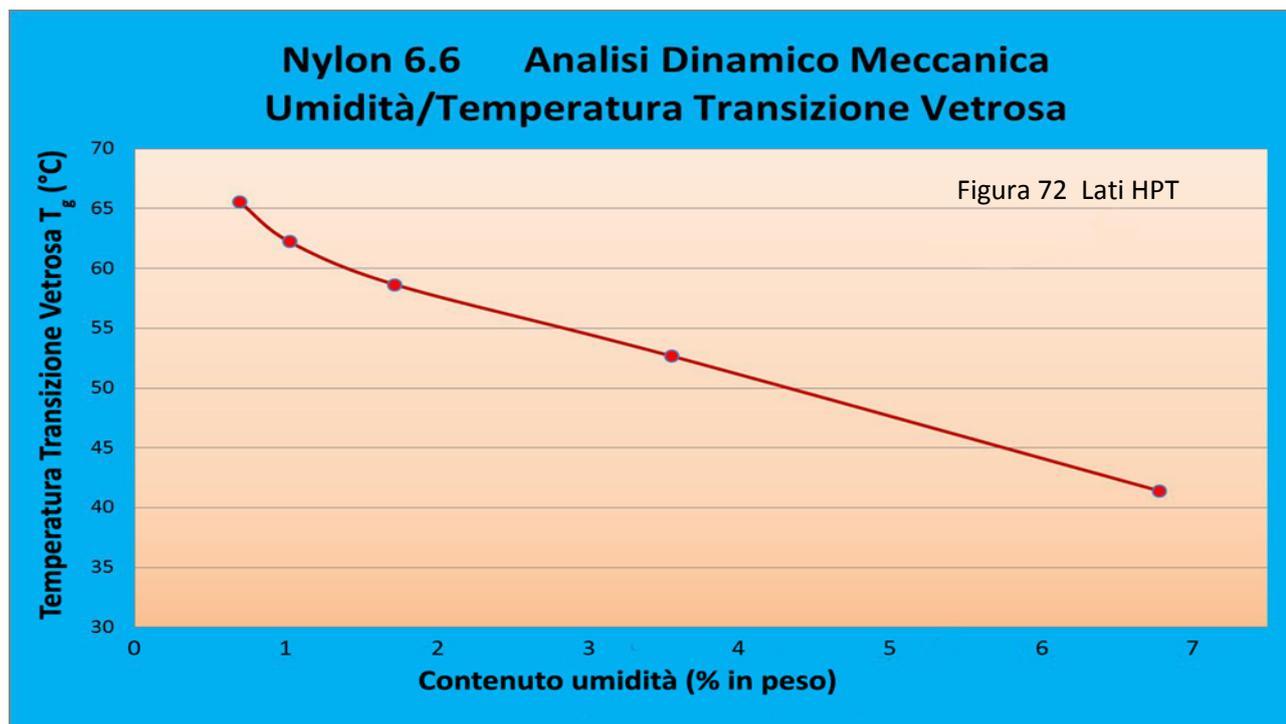
11. Temperatura di transizione vetrosa del Nylon e umidità

11.a) Premessa – La **Temperatura di Transizione Vetrosa T_g** ha un’importanza fondamentale nel definire lo stato di una fibra poliammidica (Nylon 6.6 e Nylon 6): è la temperatura che delimita il confine fra condizione solida semicristallina e condizione gommosa, due condizioni che trasformano nettamente il comportamento del poliammide. **Non è un passaggio di stato**, ma una **modifica del contenuto cinetico** delle macromolecole, che aumentano la loro agitazione termica **senza modificare il proprio contenuto analitico e la disposizione sterica**.

Questo argomento è trattato adeguatamente nei capitoli successivi quando verranno valutati i comportamenti delle poliammidi in rapporto alle variazioni di temperatura. Ma ora prendiamo in esame solo il rapporto che lega T_g all’umidità igroscopica contenuta nei fili elementari, per rispondere alla domanda: la T_g ha un unico valore come la **temperatura di fusione T_m** oppure è variabile e seconda di condizioni esterne? La risposta dice: è **variabile e dipende dalla percentuale di umidità assorbita** igroscopicamente dalla fibra, come riportato nel paragrafo che segue.

11.b) Calcolo sperimentale dell’influenza dell’umidità sulla temperatura di transizione vetrosa T_g

Per valutare la T_g sono stati sottoposti a test DMA (Analisi Dinamica Meccanica) dei campioni isotropi di Nylon 6.6, condizionato a vari gradi di umidificazione. Il risultato è esposto in **Figura 72**.



È molto evidente l'**effetto plastificante** dell'umidità: più molecole d'acqua s'inseriscono igroscopicamente fra le catene di macromolecole dei fili elementari (in maggior quantità nei settori amorfi dove il passaggio è facilitato) e più facilmente le catene posseggono agitazione termica (contorcersi, scivolare, comprimersi e dilatarsi). A parità di temperatura il Nylon è tanto più "gommoso" quanto più acqua è penetrata: questo, ripetiamo, è l'**effetto plastificante**.

Ciò fa sì che le poliammidi abbiano una T_g tanto più bassa quanto maggiore è il tasso di umidità, **discendendo anche da 65°C a 41°C**. Questo risultato sperimentale dimostra ancora una volta come l'acqua a contatto con il Nylon ne diminuisca le caratteristiche meccaniche, come il Carico di rottura e il Modulo di elasticità.

12. Polimerizzazione, depolimerizzazione e variazioni del peso molecolare medio o numerico delle macromolecole

12.a) Premessa - Le fibre polimeriche nascono attraverso un processo chiamato **polimerizzazione**, cioè l'unione (agganciamento alle estremità) di **monomeri** (pag. 61, **Figura 49**). Si formano macromolecole che, a loro volta, costruiscono catene variamente disposte nello spazio (pag. 64, **Figura 56**). L'organizzazione intramolecolare, come già detto più volte, può essere ordinata (settori cristallini) o caotica (settori amorfi) (pag. 63, **Figura 55**).

In base al principio della chimica per cui ogni reazione va anche nel senso opposto, **la polimerizzazione** ineluttabilmente **comporta**, se cambiano le condizioni chimico - fisiche, **la depolimerizzazione**. E con l'uso, specie in speleologia, nelle corde le condizioni chimico - fisiche dei polimeri mutano marcatamente e frequentemente.

Pertanto, le **corde**, man mano che vengono **usate**, sono gradualmente "modificate", in senso peggiorativo, perdendo gran parte delle caratteristiche di tenuta alla rottura e di rigidità che avevano da nuove; caratteristiche per le quali vengono tanto utilizzate, proficuamente e in maniera affidabile.

12.b) Polimerizzazione - I polimeri nascono in due modi diversi:

1. per condensazione di due molecole differenti con espulsione d'acqua (Nylon 6.6) (pag. 61, **Figura 49**),
2. per sintesi di due molecole di Caprolattame uguali (Nylon 6 con).

In entrambi i casi, i prodotti - con processi successivi che avvengono anche al momento dell'estrusione e della trafilazione dei fili elementari - si agganciano a **catena formando dei lunghi "filamenti" che possono contare anche decine di migliaia di molecole-base** (monomeri) (pag. 64, Figura 56).

Nel momento della filatura delle fibre poliammidiche (pag. 61, Figura 50), passando dallo stato completamente amorfo fuso a quello semicristallino solido, i monomeri tendono (e/o sono spinti) a polimerizzare, agganciandosi l'uno all'altro fino a formare lunghe catene, **le macromolecole**, con peso molecolare anche superiore a 10.000 g/mol (si può arrivare a 100.000 g/mol). Nella **Figura 56** (pag. 64) il caso di una catena polimerica con struttura amorfa.

Queste macromolecole costruiscono dei legami intermolecolari (*idrogeno*, per lo più) che le collegano e irrobustiscono la struttura complessiva (pag. 65, **Figura 57**, nido d'ape), tanto da dargli le ben note caratteristiche meccaniche di resistenza alla rottura (e rigidità).

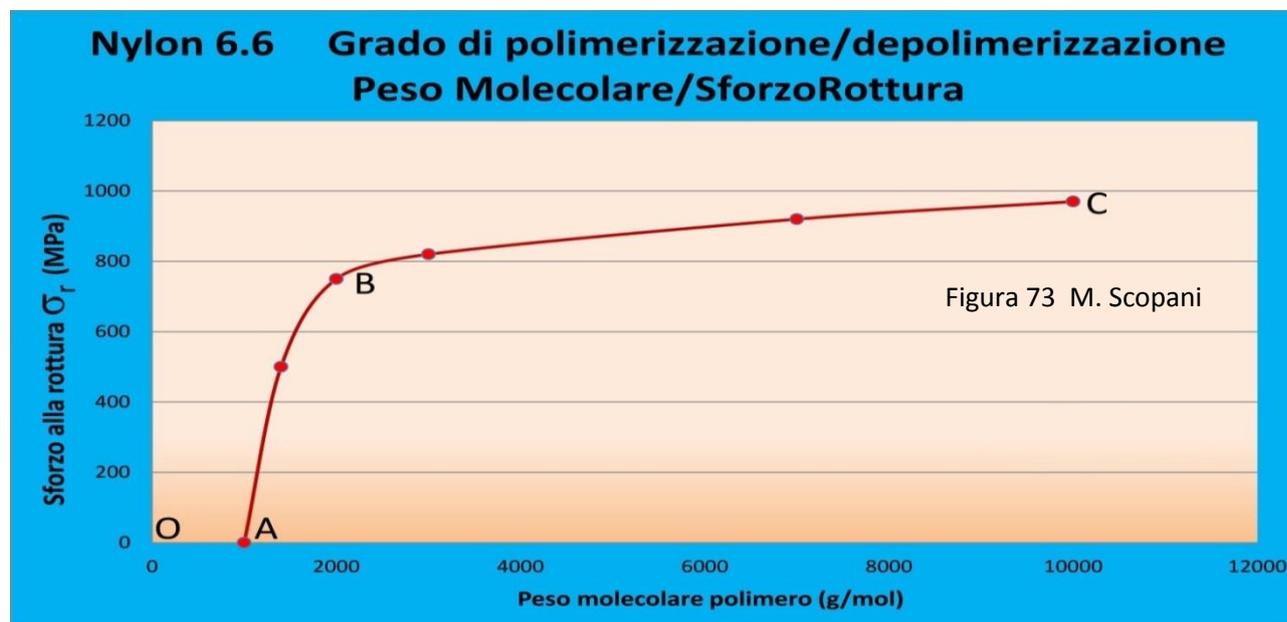
12.c) Depolimerizzazione - Abbiamo visto nei capitoli e paragrafi precedenti come la presenza dell'acqua igroscopica fra le catene può indebolire il materiale polimerico, **idrolizzando i legami idrogeno intermolecolari**; e questo è un effetto negativo di grande rilievo, ma è **completamente reversibile** (pag. 272., **Figura 220**).

Ma altrettanto **rilevante** può essere la **depolimerizzazione**, cioè l'effetto prodotto dalla **rottura delle catene dei monomeri**, sia all'interno delle molecole stesse che alle loro estremità: infatti la depolimerizzazione può avvenire per la rottura dei legami formati alle estremità dei monomeri (Ossigeno-Idrogeno o Azoto-Idrogeno) oppure per la rottura dei legami covalenti Carbonio-Carbonio (pag. 61, **Figura 49**). E' un effetto **puramente chimico, difficilmente reversibile**.

La conseguenza della **depolimerizzazione** sui fili elementari di una **corda speleo**, dopo anni di attività e permanenza in grotta, può essere anche molto marcata e potenzialmente tale da **renderla insicura** e con **carichi di rottura al di sotto del LIR**. La conferma sperimentale nella **Parte IV** (pag. 130).

La differenza fra l'effetto riduttivo dell'idrolisi e quello della depolimerizzazione è che il primo si manifesta in maniera subitanea ad opera delle sole molecole d'acqua assorbite igroscopicamente (e anche il processo inverso della disidratazione è veloce e ha effetti immediati di riconquista delle caratteristiche meccaniche); mentre la depolimerizzazione avviene con tempi più lunghi e ad opera di molteplici fattori.

12.d) Depolimerizzazione, diminuzione del peso molecolare medio e diminuzione dello sforzo a rottura - Si tenga presente che **depolimerizzazione significa rompere macromolecole "grandi", di elevato peso molecolare, in macromolecole più "piccole", con peso molecolare ridotto**. Di conseguenza la depolimerizzazione porta a un aumento del numero di macromolecole "piccole" che **fa diminuire il peso molecolare "medio" del polimero**, definito anche come **Peso molecolare numerico M_n** .



Stabilita questa correlazione fra depolimerizzazione e variazioni di M_n , si osservi il grafico di **Figura 73**, dove vengono messe in relazione le **caratteristiche meccaniche di un polimero**, nella fattispecie lo Sforzo alla rottura di un campione isotropo di Nylon (un filo elementare, ad esempio), con il **suo peso molecolare numerico M_n** . Per lo sforzo alla rottura si veda la **Figura 11** (pag. 23) e la **Figura 19** (pag. 30).

Interpretando il grafico come il procedere della polimerizzazione e dell'organizzazione dei legami intermolecolari - dovuto soprattutto all'abbassamento della temperatura nel Miscelatore/Estrusore (pag.61, **Figura 50**) durante il processo di formazione di un filo elementare - si **distinguono tre settori**:

1. da 0 g/mol di peso molecolare a circa 1000 g/mol (fino al punto **A**) la crescita del numero di monomeri nelle macromolecole **non produce agganci e legami intermolecolari** in quantità e qualità tali da produrre una resistenza alla rottura significativa (il Nylon è in una condizione, per effetto dell'alta temperatura, simile alle paraffine);
2. da circa 1000 g/mol a 2000 g/mol (punto **B**) si ha una **crescita della polimerizzazione con un rapido lineare aumento** della capacità di opporsi alla rottura (si formano i legami intermolecolari, oltre a quelli d'aggancio fra monomeri, e il filo elementare acquisisce, quasi totalmente, le sue caratteristiche meccaniche: si sta raffreddato e passando nella trafilatrice, pag. 61, **Figura 50**);
3. da 2000 g/mol in avanti la formazione dei legami intermolecolari è trascurabile ma **aumenta soprattutto il numero dei monomeri che vanno a caricare le catene**; si verifica un più lento ma costante **aumento del carico di rottura**, fino a raggiungere il valore massimo nel punto **C: peso molecolare 9800 g/mol e sforzo alla rottura 960 MPa**, che sono i valori standard del Nylon 6.6 appena filato.

Nel momento che intervengono con l'uso (della corda) dei fattori che portano al processo inverso - **la depolimerizzazione delle macromolecole nei fili elementari** - e ipotizzando verosimilmente che tale processo segua all'inverso lo stesso percorso della polimerizzazione, il carico di rottura comincia a decrescere, lentamente e linearmente fra il punto **C** e **B**.

Per poter assistere a una decrescita più marcata dello Sforzo a rottura σ_r , è necessario raggiungere una depolimerizzazione molto spinta (punto **B**), ottenibile solo **dopo lunghi periodi d'uso** della corda o sotto l'azione di fattori depolimerizzanti molto forti come le radiazioni UV, il calore, gli acidi e la degradazione idrolitica (vedi proseguo di questo Capitolo).

Oltre questo livello d'usura, la depolimerizzazione incide marcatamente su σ_r , che, con una variazione di appena 1000 g/mol, diminuisce fino ad azzerarsi.

Questa potrebbe essere la motivazione che ha determinato **incidenti con la rottura di corde speleo** sollecitate con **appena qualche centinaio di kgp**: erano state **lasciate in grotta per periodi di diversi anni** (con **U.R.** al **100 %**).

Verosimilmente questa considerazione può essere collegata anche col lento, costante decrescere del carico di rottura F_r , delle corde immerse in acqua, come mostrato dai test riportati nella **Parte IV** (pag. 129 e seg.)

Quindi la polimerizzazione è una reazione reversibile e la depolimerizzazione, dovuta a diversi fattori, è un agente che porta al decadimento dei fili elementari di poliammide e di conseguenza delle corde. Ma esistono dei risultati sperimentali che fanno ipotizzare una depolimerizzazione **da uso in grotta** reversibile verso una nuova polimerizzazione (pag. 258 e seg., **Parte VII**).

13. Degradazione dei polimeri

Con questo termine "degradazione" s'intende definire processi che comportano modificazioni chimiche d'entità limitata o nulla, il cui effetto sulle proprietà meccaniche del materiale è però non trascurabile.

I **fattori degradanti sono numerosi e agiscono con azioni specifiche**. I meccanismi con i quali intervengono spesso non sono sufficientemente chiari ed è molto complesso individuare le cinetiche chimiche che li guidano, specie se agiscono in sinergia. Qui di seguito è riportato un elenco (non completo?) di cause.

13.a) Degradazione idrolitica con perdita di massa (erosione) - E' un "invecchiamento", fra

i più incisivi, dovuto al contatto dei polimeri con l'acqua (da **non confondere con l'idrolisi**, che è un fenomeno puramente chimico!). Piuttosto si creano delle interazioni con H_2O che portano a quella che sembra una vera e propria erosione meccanica, con **perdita di massa** e, quindi, **diminuzione di peso**.

Diminuzione di peso che, a un esame al microscopio elettronico, avviene **sia in superficie** (asporto non omogeneo) che **all'interno del polimero** (asporto omogeneo).

Per quantizzare il fenomeno (e cercare di comprenderne i meccanismi) alcuni polimeri sono stati sottoposti a test di degradazione idrolitica, con immersione in acqua (U.R. 100 %), con **rilevazioni dopo 21 – 50 – 90 – 120 giorni**.

In funzione di questi tempi è stato calcolato il peso residuo:

$$\text{Peso residuo} = \left(1 - \frac{m_{in} - m_{fin}}{m_{in}}\right) \cdot 100 \quad (18)$$

dove:

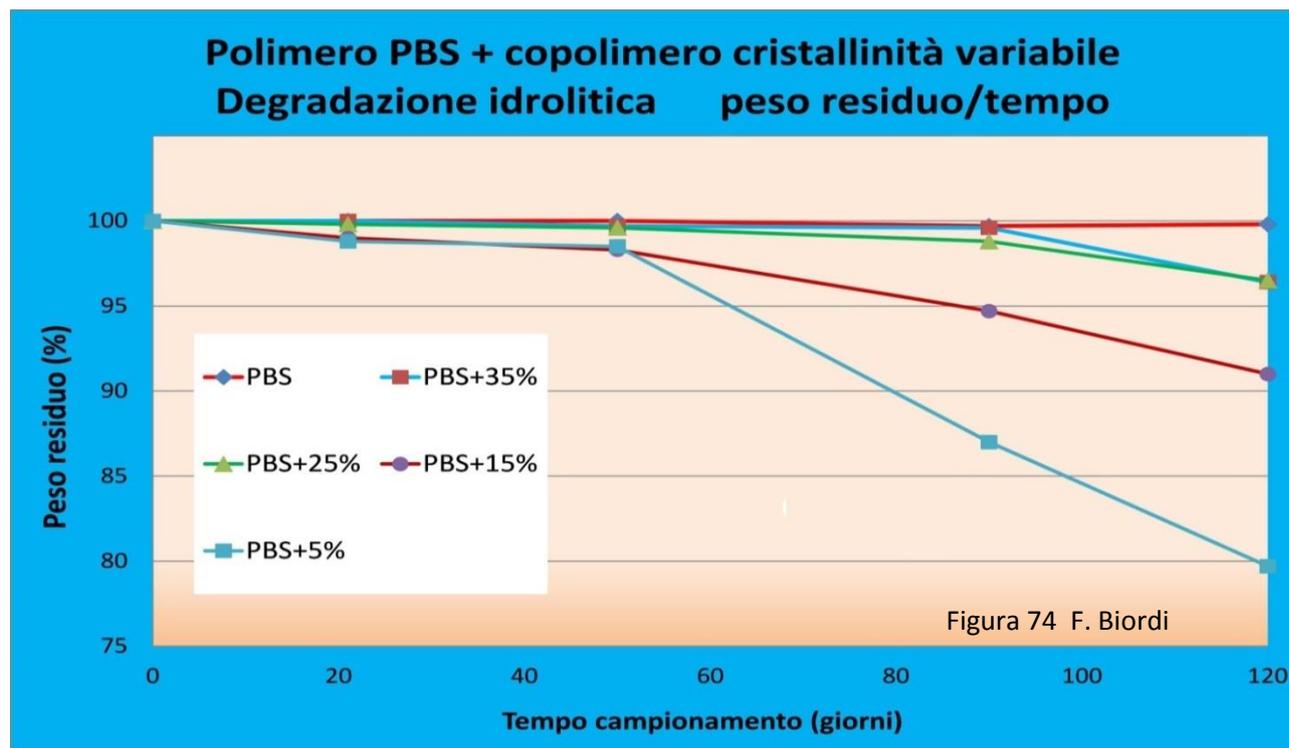
m_{in} = massa iniziale

m_{fin} = massa finale

Ai test di degradazione idrolitica sono stati sottoposti cinque tipi diversi di polimeri alifatici (con gruppi $-CH_2-$ come nelle poliammidi):

1. PBS (Polibutilenesuccinato) con cristallinità 50 – 55 %,
2. PBS + copolimero (Polibutilene adipato/dichicolato) con cristallinità 35 %,
3. PBS + copolimero (Polibutilene adipato/dichicolato) con cristallinità 25 %,
4. PBS + copolimero (Polibutilene adipato/dichicolato) con cristallinità 15 %,
5. PBS + copolimero (Polibutilene adipato/dichicolato) con cristallinità 5 %,

di fatto una serie, appositamente costruita, di polimeri con cristallinità decrescente, che ha dato i risultati diagrammati in **Figura 74**.



Il confronto, sotto l'azione idrolitica dell'acqua, riguarda dunque un polimero a cristallinità abbastanza elevata (circa 50 % con PBS come monomero unico) con quattro diversi polimeri a **cristallinità decrescente**.

L'azione idrolitica è stata attivata sia con l'immersione completa in acqua sia a contatto con l'aria con Umidità Relativa variabile (si ricorda che l'immersione completa equivale a un'umidità relativa del 100 %).

Il risultato è chiaro: il PBS (**ad alta cristallinità pari al Nylon 6**) **non subisce** in 120 giorni alcuna **diminuzione di peso**, mentre gli altri campioni sono tanto più sensibili alla degradazione quanto maggiore è la parte amorfa che li compone, fino ad avere con il campione **PBS + 5 %** (solo 5 % di cristallinità) una diminuzione di peso (sempre in 120 giorni) del 20 %.

Questo fenomeno di degradazione idrolitica è dunque tanto più marcato quanto minore è il grado di cristallinità: se raggiunge o supera il 50 % tale "erosione" scompare.

13.b) Degradazione idrolitica per diminuzione di peso e riduzione dello sforzo alla rottura σ_r dei fili elementari - La situazione che può essere valutata quantitativamente utilizzando la formulazione della sezione efficace di una corda (pag. 29, **Relazione 7**), trasformandola in:

$$F_r = 10^3 \cdot T \cdot \rho \cdot S_e \quad (19)$$

dove:

F_r = carico di rottura senza nodi (N)

T = tenacità del filo elementare (N / tex)

ρ = densità del filo elementare (g/cm³)

S_e = Sezione efficace (mm²)

e quindi, trasponendo l'esame da una **corda anisotropa** a un provino o **filo elementare isotropo** (come appunto richiede la coerenza con quanto esposto nel paragrafo precedente e nella **Figura 74**), elaboriamo ancora in:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_e} = 10^3 \cdot T \cdot \rho \quad (20)$$

con:

σ_r = sforzo alla rottura

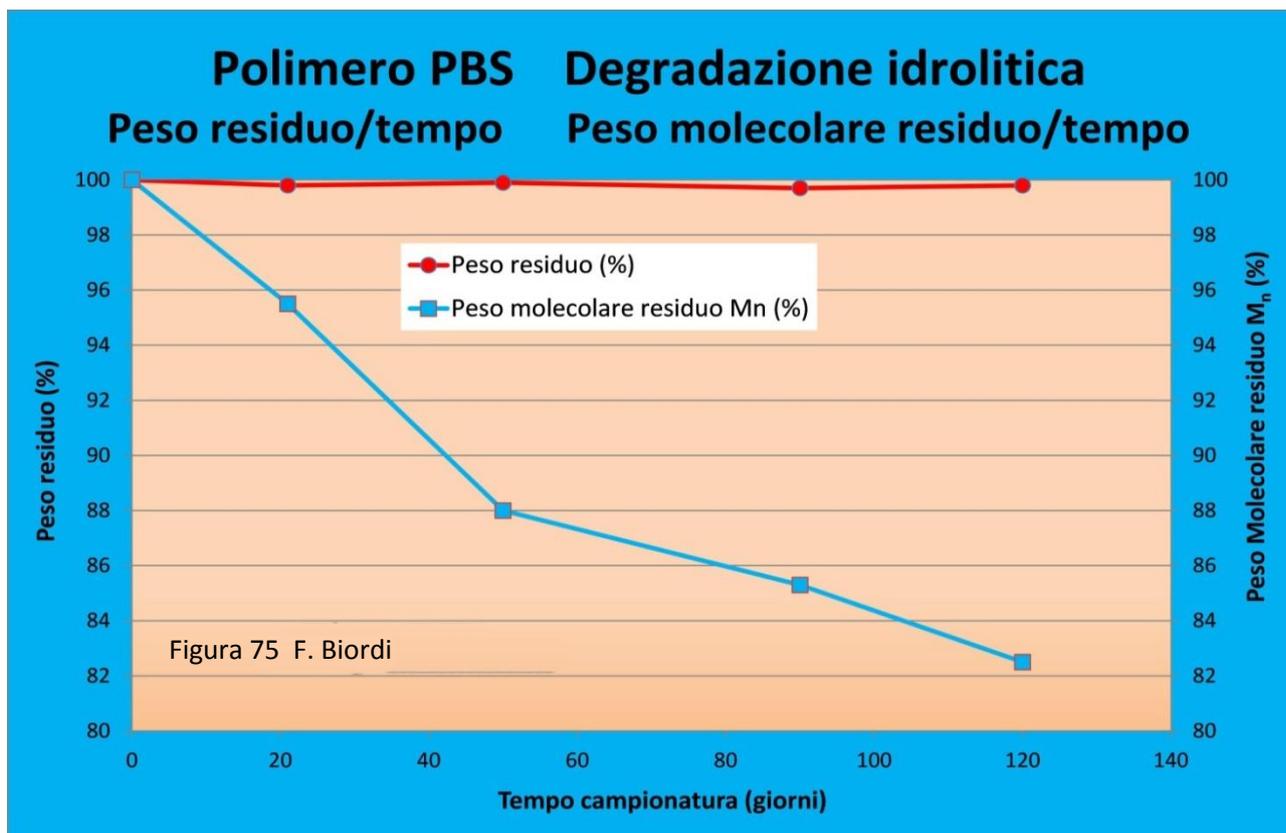
La tenacità T è una Costante caratteristica del polimero, mentre la densità ρ è il rapporto fra **massa e volume**, che nel caso di degradazione idrolitica per perdita di peso (o l'equivalente perdita di massa), **rimanendo immutato il volume** (?!), diminuisce man mano che avanza l'erosione del materiale polimerico.

E' come se il materiale diminuisse la sua densità, e di conseguenza riducesse il valore dello sforzo a rottura.

Ecco perché la degradazione idrolitica con perdita di peso di fatto rende il polimero meno capace di resistere alla rottura (σ_r) e più disponibile ad allungarsi a parità di forza applicata per la trazione (E diminuisce).

13.c) Degradazione idrolitica con diminuzione del peso molecolare numerico M_n dei polimeri – Come abbiamo visto in **Figura 74**, la degradazione idrolitica può - con polimeri semicristallini come il PBS (50 % cristallinità) o le poliammidi (Nylon 50 % - 70 % cristallinità) - **non produrre perdita di peso**.

Ma, al tempo stesso, può produrre una **depolimerizzazione** delle catene di macromolecole, rompendo sia i legami d'aggancio fra monomeri che i legami Carbonio – Carbonio ($-CH_2 - CH_2-$) che collegano i gruppi alifatici all'interno della molecola base (pag. 61, **Figura 49**). E questo vale anche per i polimeri ad alta cristallinità dove la degradazione idrolitica con perdita di massa non avviene. Nella **Figura 75** è rappresentato un esperimento che conferma quanto testé affermato.



Effettuando un test analogo a quello relativo alla **Figura 74**, ma mettendo a contatto con l'acqua solo il **polimero PBS ad alta cristallinità** e misurando nell'arco di 140 giorni la **diminuzione di peso** e del **Peso molecolare numerico M_n** (con opportune strumentazioni), si registra l'andamento riportato in **Figura 75**.

Il primo grafico (**linea rossa**) dà la variazione di peso in funzione del periodo passato a contatto con l'acqua: non c'è alcuna perdita di peso, esattamente come già misurato nell'esperimento precedente di **Figura 74**.

Nel secondo grafico (**linea celeste**) l'andamento è ben diverso: la degradazione idrolitica produce anche una marcata depolimerizzazione nello stesso PBS e quindi la diminuzione del suo peso molecolare numerico M_n . Infatti la depolimerizzazione, in sostanza, dividendo le macromolecole più grandi in macromolecole più piccole, fa sì che esistano più polimeri a minor peso molecolare e quindi, facendo la media fra quelli presenti ad esempio in un filo elementare, il valore di M_n risulta inferiore.

In **120 giorni di contatto con l'acqua** il PBS (molto simile al Nylon 6) ha una **diminuzione del Peso molecolare numerico del 20 %**.

13.d) Degradazione idrolitica per diminuzione di peso molecolare numerico M_n e riduzione dello sforzo alla rottura σ_r dei fili elementari – Con questo tipo di degradazione idrolitica si ha un effetto di riduzione delle caratteristiche meccaniche dei polimeri (che ovviamente si trasferisce alle corde), come lo sforzo a rottura σ_r e il modulo d'elasticità E . Riduzione che va a **sommarsi a quella prodotta dalla degradazione idrolitica con diminuzione di peso** (se questa è presente).

La spiegazione di questo comportamento dei polimeri si ricava integrando i risultati sperimentali di **Figura 75** con quelli di **Figura 73** (pag. 81) (valida per il Nylon 6.6 ma estendibile anche agli altri polimeri).

In quest'ultima, infatti, si deduce con chiarezza che lo sforzo alla rottura di un provino o di un filo elementare diminuisce con il decrescere del peso molecolare (da intendersi "numerico" anche in questo caso).

Ma non in modo uniforme: inizialmente - dal punto **C** al punto **B**, da **10.000 g/mol** a **1.800 g/mol** - è una decrescita moderata quasi lineare; a seguire - dal punto **B** al punto **A**, da **1.800 g/mol** a **zero g/mol** (che equivale al materiale fuso) - le caratteristiche meccaniche scompaiono.

13.e) Degradazione idrolitica: velocità e reversibilità - La velocità della degradazione idrolitica, tanto con **perdita di peso** quanto con diminuzione del **peso molecolare numerico**, dipende dal grado di **cristallinità** e dalla **bagnabilità** del polimero: tanto più è bagnabile tanta più l'erosione agisce veloce; analogamente, tanto più è amorfo tanto più veloce è il processo di decadimento.

Aspetto di grande rilievo: la depolimerizzazione idrolitica è un fenomeno chimico che non modifica le strutture molecolari dei monomeri e delle catene da essi costituite; dunque **può essere reversibile** una volta che il **contatto con l'acqua sia stato eliminato**.

Se questa reversibilità è possibile, come sembra probabile, in questa nuova condizione si può innescare un nuovo processo di polimerizzazione, e quindi con conseguente riconquista di proprietà meccaniche.

I test sugli effetti dell'immersione in acqua o all'equivalente condizione di permanenza in grotta con U.R. al 100 % (pag. 155, **Figura 136**; pag. 157, **Figura 134**; pag. 168, **Figura 142**) sembrano confermarlo sperimentalmente. Ma indicando anche che gli effetti sulla riduzione di F_r si manifestano nel corso di più anni.

13.f) Foto degradazione - La **foto degradazione** nei polimeri è promossa dalle **radiazioni UV** (lunghezza d'onda λ compresa fra 290 e 400 nm) che attivano, per effetto dei radicali idrogeno, la rottura dei legami **C - C** dei gruppi alifatici e la formazione d'idroperossidi (composti termolabili).

Questo primo stadio di reazioni innesca una successiva reazione a catena, che, unita alla caduta delle proprietà meccaniche, porta all'**aumento del contenuto di umidità** nei fili elementari (di conseguenza aumenta la parte amorfa e la plasticità). Infatti la rottura dei legami **C - C** conduce di fatto a una depolimerizzazione, e a una conseguente diminuzione del peso molecolare numerico M_n e a una riduzione del carico di rottura (pag. 81, **Figura 73**).

Per eliminare l'azione dei raggi UV sulle poliammidi si può **intervenire** al momento della **filatura aggiungendo degli additivi nella massa fusa** dell'estrusore (pag. 61, **Figura 50**); oppure trattare il filato con delle **sostanze "opacizzanti"** che vengono **adsorbite** sulla superficie delle fibre e riducono quasi completamente l'effetto UV.

Conferma a questa neutralizzazione, come già accennato in precedenza, il risultato di un test su corda esposta alla luce diurna per 365 giorni, che ha dato una diminuzione complessiva del carico di rottura senza nodo F_r del 3 %: nella pratica, dopo il trattamento dei fili di Nylon, il problema della fotodegradazione è inesistente.

13.g) Degradazione per ozonolisi - L'ozono O_3 è molto aggressivo chimicamente e può attaccare i legami covalenti **C - C** dei gruppi alifatici. La sua concentrazione nell'aria è compresa fra i **20 mg/m³** e gli **80 mg/m³**.

Questo tipo di decadimento, pur non essendo di grande rilievo nell'insieme delle variegata azioni **degradanti** delle corde, ha pur sempre un ruolo, specie se si tratta di corde lasciate in luoghi aperti e assolati (i raggi UV sono il catalizzatore della reazione $3 O_2 = 2 O_3$). Ecco un effetto raddoppiato della fotodegradazione.

13.h) Degradazione per ossidazione - La presenza d'ossigeno O_2 nell'ambiente, fatto ineluttabile, porta a dei fenomeni di degradazione di difficile connotazione chimica. Ma comunque questi agiscono in maniera diffusa lungo tutte le catene di macromolecole, producendo danni al materiale polimerico (di fatto, una depolimerizzazione difficilmente definibile come meccanismi chimici).

Tuttavia il decadimento si manifesta con incidenza trascurabile ed evidenziabile in qualche modo solo se l'azione si prolunga molto nel tempo (decine d'anni).

13.i) Degradazione per pirolisi o decondensazione - Data la complessità della struttura dei polimeri (lineare, ramificata o a rete che sia) e il numero elevatissimo di gruppi alifatici - $CH_2 - CH_2$ -, è statisticamente possibile che nei legami covalenti **C - C** avvenga la **pirolisi con rotture omolitiche** (nel concreto, si rompe il legame **C - C** e ognuno dei due atomi di carbonio si prende il suo elettrone).

Di conseguenza avviene la rottura nelle macromolecole, quindi la loro depolimerizzazione, l'abbassamento del peso molecolare numerico M_n e, infine, la diminuzione del carico di rottura (pag. 81, **Figura 73**).

La pirolisi è favorita da temperature elevate, ma **può manifestarsi anche a temperatura ambiente** con velocità di reazione molto bassa.

In questo stesso ambito sta il fenomeno della **decondensazione di molecole di polimero**.

Infatti - formandosi il Nylon 6 per raffreddamento, con condensazione di due monomeri diversi ed espulsione di una molecola d'acqua - a temperature elevate e in presenza di un forte grado d'umidificazione si può verificare il processo inverso.

Ma una **depolimerizzazione di questo tipo** avviene anche **a temperatura ambiente**, ma **con velocità al limite della trascurabilità**.

13.1) Degradazione a seguito di sollecitazioni quasi-statiche - L'applicazione a bassa velocità ai polimeri di carichi (anche ripetuti con diversa intensità) concorre a modificarne le proprietà meccaniche, soprattutto la deformabilità plastica (viscosa), irreversibile.

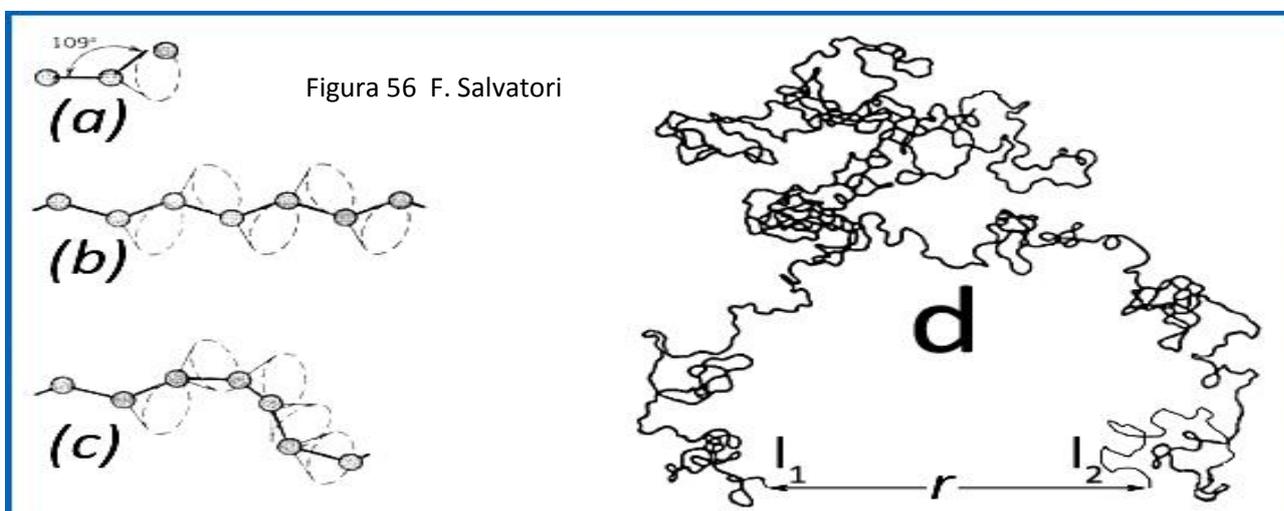
Questo tipo d'applicazione di forze - che può essere meglio definita **quasi-statica** visto che comunque dopo l'applicazione del peso c'è una certa dinamicità (oscillazioni) prima che il peso stesso stabilizzi la sua posizione - non produce effetti che portano alla riduzione del carico di rottura F_r o dello sforzo alla rottura σ_r , come invece causano la depolimerizzazione, la rottura di fili elementari per l'abrasione della calza delle corde su pareti, la degradazione idrolitica di vario tipo, la plastificazione per presenza acqua, il riscaldamento, la fotodegradazione, l'ossidazione e l'ozonizzazione.

Con la sola applicazione quasi-statica di pesi, il campione sottoposto a test si allunga e questo va a incidere sulla deformabilità visco-elastica, che è in parte reversibile (elastica) e in parte irrecuperabile (plastica, viscosa).

Anche se possono essere invocati altri aspetti, un esempio chiarificatore del fenomeno della deformazione viscoelastiche è rappresentato nella **Figura 56** (pag. 64): se la catena di macromolecole **d** viene sottoposta a trazione e la distanza **r** fra le due estremità della fibra l_1 e l_2 aumenta, la fibra tende ad allungarsi, divenendo meno contorta e più rettilinea.

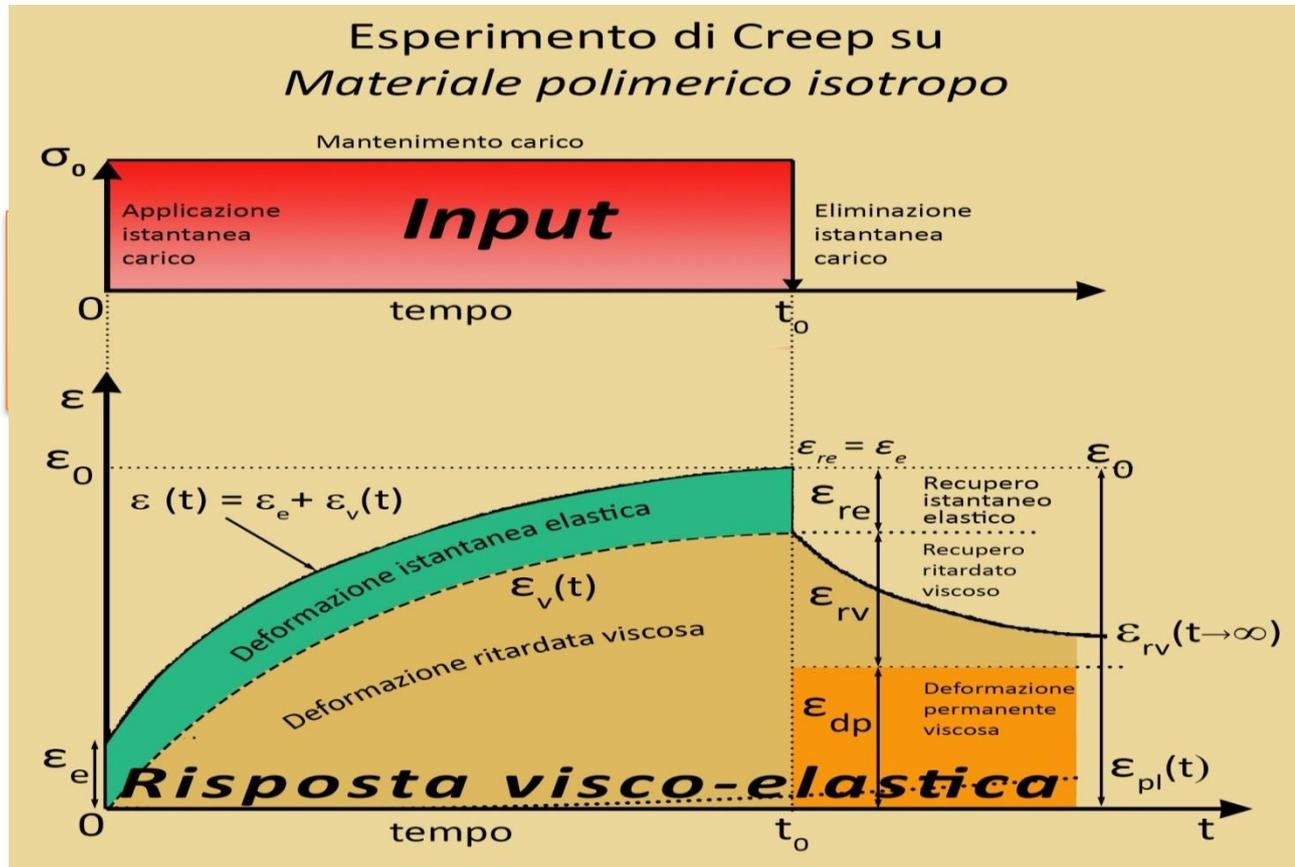
Se il peso viene tolto, la fibra tende a ritornare nella configurazione originale (parte elastica della deformazione), ma non completamente: una parte dell'allungamento viene eliminata e una successiva sollecitazione non potrà produrre gli effetti di prima. Il filo elementare sarà meno deformabile (a parità di forza si allungherà di meno), ma la capacità di opporsi alla rottura (F_r) resterà immutata, in quanto dipende dalla quantità del materiale che si oppone al cedimento e non dalla sua disposizione nello spazio.

La parte irreversibile di rettificazione della catena di macromolecole è dovuta al fatto che l'energia conferita dalla trazione tende a far ruotare parzialmente la collocazione della successione di atomi di carbonio (catena alifatica) dalla struttura (c), caotica amorfa, alla struttura (b), più rettilinea più cristallina. Quand'è più probabile che si formino legami intermolecolari che aumentano F_r e σ_r .



Verrebbe da prendere in considerazione l'ipotesi che, a seguito di una successione di sollecitazioni che portano alla rettificazione delle catene di macromolecole, il materiale polimerico anziché indebolirsi si rafforzerebbe. Ma ciò non si verifica perché il "danno" di deformabilità prodotto dagli choc successivi sulla parte cristallina è superiore al vantaggio prodotto dalla "rettificazione" delle catene nei settori amorfi.

Volendo meglio rappresentare quanto accade in realtà nelle catene di macromolecole tipo **Figura 56**, possiamo utilizzare la **Figura H** (pag. 308, **Appendici 06**) in cui viene mostrato cosa accade a un materiale visco-elastico quando si applica un carico e poi lo si toglie (Esperimento di Creep).



La successione di choc non è altro che una successione di Creep. Se si tratta di choc prodotti da caduta di un peso (pag. 39 e seg.) il carico applicato non è di valore fisso, ma variabile da $\sigma = 0$ a $\sigma = \text{massimo}$ per poi discendere di nuovo a $\sigma = 0$.

Comunque, col succedersi di queste sollecitazioni, gli effetti si sommano e le proprietà meccaniche della fibra si modificano in senso peggiorativo.

L'effetto è presente anche quando si ha una **successione di sollecitazioni all'apparenza trascurabili**, ma ripetute **più volte**. L'uso prolungato fa sì che la somma di **piccoli incrementi trascurabili** possa diventare una **degradazione rilevante**.

Considerato il tipo d'utilizzo di una corda speleo, dove la normalità è sostenere carichi statici e ciclici (si pensi alla risalita con bloccanti e alla discesa su discensore a velocità variabile), è chiaro che gli effetti di una degradazione di questo tipo, se prolungati nel tempo e nelle frequenze d'utilizzo, possono essere tali da rendere una corda usata inutilizzabile e pericolosa.

13.m) Considerazioni sintetiche sulla degradazione dei polimeri - Il termine degradazione, utilizzato per indicare la modificazione della struttura molecolare di un composto, nel caso di materiali polimerici è usato per definire processi che comportano modifiche chimiche di entità varia, il cui effetto però sulle caratteristiche chimico-fisiche-meccaniche del materiale può anche essere rilevante. Da tener comunque presente, che **l'efficacia di più effetti irrilevanti, agenti in sinergia, può portare a una degradazione significativa**.

E l'estrema complessità della struttura chimica dei materiali polimerici (con pesi molecolari che possono arrivare anche a **100.000 g/mol**) e dell'organizzazione spaziale delle catene polimeriche (lineare, ramificata e a rete) rende **molto probabile** l'azione congiunta di diverse azioni.

Se poi a queste ultime considerazioni sui fattori che portano alla degradazione dei polimeri si aggiunge quanto esposto nell'insieme di questo lavoro in merito ai decadimenti di altra natura delle corde per uso prolungato, la situazione diventa ancor più complessa e incerta.

A questo quadro d'incertezza, non sempre definibile chiaramente, si aggiunge il fatto che la natura chimica delle strutture anomale e delle impurezze promotrici di fenomeni di degradazione non può, nella maggior parte dei casi, essere individuata perché la loro concentrazione è al di sotto dei limiti di rilevazione da parte dei metodi analitici oggi disponibili.

Tutto questo richiama **l'esigenza di mettere in atto azioni protettive e stabilizzanti** sull'uso delle corde in speleologia (e alpinismo e canyonig), **pena l'aumento del rischio per usura eccessiva e incontrollata**.

Ma quest'azione preventiva presuppone conoscenze teoriche e sperimentali adeguate. Ed è per questa ragione che abbiamo sviluppato le ricerche teorico-empiriche che qui proponiamo, nell'intento di suggerire comportamenti e azioni a speleologi, alpinisti e canyonisti per salvaguardare al meglio e per più tempo possibile le corde, strumento fondamentale e indispensabile per la progressione.

Volendo fare una sintesi di quanto sinora esaminato in merito alla poliedrica degradazione dei polimeri, è stata compilata la tabella che segue, **contenente sinteticamente i principali aspetti del fenomeno**.

Alcune precisazioni: 1) la terzultima colonna da sinistra "Reversibilità" indica se l'azione degradante, tolto l'elemento "Agente", può essere reversibile e quindi giustificare il possibile recupero delle proprietà meccaniche; 2) l'ultima colonna a destra "Efficacia" riporta un giudizio del *Gruppo di Studio Materiali e Tecniche* su quanto la specifica azione degradante debba essere presa in considerazione nell'uso normale di una corda in ambito speleologico. Comunque sono giudizi soggettivi, anche se, in gran parte, sostenuti da dati sperimentali e valutazioni teoriche.

Sintesi degli effetti dovuti alla degradazione dei polimeri								
Azione	Agente	Dipendenza	Meccanismo	Effetti	Conseguenze	Reversibilità	Riferimenti	Efficacia
Idrolitica con perdita di massa	Acqua H_2O	Cristallinità	Erosione	Diminuzione massa	Diminuzione F_r ed E	Reversibile	Pag. 83 – 84 Figura 74	Rilevante
Idrolitica con perdita di peso molecolare	Acqua H_2O	Cristallinità Bagnabilità	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare M_n	Diminuzione F_r ed E	Reversibile	Pag. 84 Figure 75 - 56	Rilevante
Foto degradazione	Raggi UV	Tempo insolazione	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare M_n	Diminuzione F_r ed E	Reversibile ma con altri meccanismi	Pag. 85 86 Figura 75	Irrilevante
Ozonolisi	Ozono O_3	% O_3 atmosfera	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare M_n	Diminuzione F_r ed E	Reversibile ma con altri meccanismi	Pag. 86 Figura 75	Irrilevante
Pirolisi Condensazione	Calore H_2O	Temperatura Umidità	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare M_n	Diminuzione F_r ed E	Reversibile	Pag. 86 Figura 75	Irrilevante
Ossidazione	Ossigeno O_2	% O_2 atmosfera	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare M_n	Diminuzione F_r ed E	Irreversibile	Pag. 86 Figura 75	Irrilevante
Sollecitazioni statiche e cicliche (choc)	Salita e discesa su corda	Pesi applicati, numero di cicli e velocità di deformazione	Trasformazioni catene macromolecole	Variazioni rapporto cristallino/amorfo cricche superficiali	Diminuzione F_r ed E	Irreversibile	Pag. 76 -87 - 88	Molto rilevante

14. Calore nelle corde: influenza sulle proprietà meccaniche e sulle caratteristiche chimico-fisiche dei fili elementari

Oltre all'**acqua** (come abbiamo visto nei capitoli precedenti), il **calore** è il fattore che maggiormente determina le variazioni delle caratteristiche dei polimeri e dei fili elementari che compongono le corde speleo-alpinistiche. Al binomio calore-acqua, singolarmente o in abbinamento, è da imputare la gran parte del decadimento delle corde usate in grotta, in montagna (e in forra).

Addirittura è documentato sperimentalmente l'influenza, molto forte, del contatto con l'acqua in abbinamento all'effetto calore: ne è un esempio emblematico quanto riportato in **Figura 72** (pag. 80) a proposito dell'influenza dell'**umidità** sulle variazioni della **Temperatura di Transizione Vetrosa T_g** , parametro termometrico di riferimento per il comportamento termoplastico dei polimeri (pag. 91 e seg.).

Nei capitoli e nei paragrafi che seguono saranno esposte dettagliatamente le questioni legate alla produzione del calore e del conseguente innalzamento della temperatura (fattore così incisivo dal determinare in gran parte l'usura delle corde).

14.a) Misurazione del calore prodotto sulla corda durante la progressione in grotta verticale su corda (e nell'arrampicata sportiva)

Sul decadimento complessivo della corda, quindi **anche dell'anima**, insiste con un rilevante contributo la penetrazione del calore prodotto con gli attriti che si sviluppano durante la discesa in grotta con il discensore (e la calata in arrampicata sportiva con appositi freni).

Volendo dare una valutazione quantitativa dell'energia in gioco (in entrambi i casi) occorre riferirsi alla relazione che dà l'energia potenziale di un corpo posto alla sommità di un dislivello che deve essere disceso (o calato):

$$E_p = P \cdot h \quad (21)$$

dove:

E_p = energia potenziale

P = peso speleologo/arrampicatore

h = dislivello che discende/viene calato

La **quantità d'energia potenziale posseduta dallo speleologo all'inizio della discesa** è quella indicata dalla **Relazione 21**.

E questa l'energia che **deve essere dissipata**, attraverso gli **attriti** prodotti dalla pressione della corda nel discensore, per permettere allo speleologo il superamento del dislivello **h** con una **discesa controllata e non "precipitosa"** (la velocità di discesa dello speleo è così limitata da poter trascurare la quantità d'energia potenziale che si trasforma in energia cinetica).

L'energia che l'attrito trasforma in calore è una rilevante quantità: ogni **10 m di discesa**, per uno speleologo di **80 kgp**, sono **7848 J**, che solo in minima parte si disperde nell'aria, mentre la **quasi totalità si scarica sulla corda**, penetrandovi all'interno e facendovi **crescere la temperatura**.

La conducibilità termica del Nylon, pari a **0,23 W / (K · m)**, non è troppo elevata, ma - date le ridottissime dimensioni dei fili elementari (**0,28 μ m**) - sufficiente a garantirvi una rapida penetrazione del calore e l'innalzamento della temperatura (in una serie di test, simulando la discesa con discensore classico su un tratto di corda di 20 m, con una velocità di circa 2 m/s, la temperatura del freno ha raggiunto e anche superato i 100°C dopo pochi metri).

S'immagini, per esempio in due anni d'uso, quanti cicli di riscaldamento ha subito una corda speleo (o nell'arrampicata sportiva)! Si tratta di **centinaia di migliaia di Joule** (decine di migliaia di calorie) che hanno prodotto anche **molte centinaia di "ondate" di calore**. A queste "ondate" di calore sono seguiti sempre dei rapidi raffreddamenti che hanno riportato le corde alla condizione termica iniziale.

A seguito di **ognuno di questi cicli** riscaldamento/raffreddamento la struttura d'insieme delle **catene di macromolecole dei fili elementari**, soprattutto il grado di cristallinità, è **stato modificato in modo permanente** e una parte delle proprietà meccaniche della corda **sono andate perse**, con un suo progressivo decadimento per usura (come è specificato nei dettagli nei paragrafi che seguono).

14.b) Rapporto cristallino/amorfo in funzione del calore prodotto e sottratto: temperatura di transizione vetrosa T_g - Nel **Figure 53 - 54 - 55** (pag. 63) è trattato l'argomento che descrive la **disposizione delle catene di macromolecole** nel corpo dei fili elementari.

Queste si possono disporre in modo **regolamentato con catene parallele** (stato "cristallino) e **intercollegate da legami idrogeno** (pag. 65, **Figura 57**); oppure in **modo caotico** (stato "amorfo") con un **numero inferiore di legami intermolecolari** e maggiore **penetrabilità igroscopica** per le molecole d'acqua.

Nelle corde nuove, prodotte nelle migliori condizioni possibili (in ambiente basico ed estrusione dei fili elementari dalla massa fusa del Nylon con **lento abbassamento della temperatura**), il rapporto fra estensione dei **settori cristallini** rispetto agli **amorfi** è il **migliore possibile** ed è valutabile intorno al **70 % per il Nylon 6.6** e **50 % per il Nylon 6**.

Nel precedente **Capitolo 05** (pag. 66 e seg.) è stato messo in risalto quanto le **proprietà meccaniche** e chimico-fisiche delle fibre poliammidiche dipendano, oltre dal loro grado di umidificazione, anche dal **rapporto fra estensione dei settori cristallini ed estensione dei settori amorfi** (pag. 70, **Capitolo 6**).

La **temperatura**, e quindi la produzione di calore, concorre in modo determinante a **definire l'entità di questo rapporto**; e ha dunque una funzione dirimente nel caratterizzare il comportamento delle fibre che compongono le corde, tanto nel definirne le proprietà meccaniche quanto nel graduarne il decadimento con l'uso.

14.b.a) Temperatura/modulo d'elasticità e temperatura/sforzo a snervamento del Nylon 6.6

L'argomento che viene ora trattato è di grande importanza per comprendere i comportamenti fondamentali di una corda, sia rispetto all'**usura** sia all'**effetto nodo**. Pertanto riteniamo utile per l'esposizione e la comprensione prendere come oggetto d'esame un polimero in rappresentanza di tutti.

Il **Nylon 6.6**, molto utilizzato per il confezionamento delle corde e con caratteristiche molto simili al Nylon 6, è la poliammide che prendiamo come riferimento.

Un provino pieno isotropo di Nylon 6.6, prodotto sotto le condizioni migliori possibili (rapporto cristallino/amorfo 70 %), con condizioni ambientale standard (Umidità Relativa U.R. al 50 % e 2 % in peso d'acqua igroscopica nel filo elementare), è stato sottoposto a un teste a trazione lenta registrando sia la **forza** (e di conseguenza, lo **sforzo**) che la **deformazione**; e quindi il Modulo d'elasticità **E** . Questo test è stato ripetuto a varie temperature (su camera termostata) da 5°C a oltre 265°C, che è la temperatura di fusione del Nylon 6.6.

Ne è scaturito il grafico di **Figura 76a** dove è diagrammata la variazione del **modulo d'elasticità E** in funzione dell'innalzamento della **temperatura**.

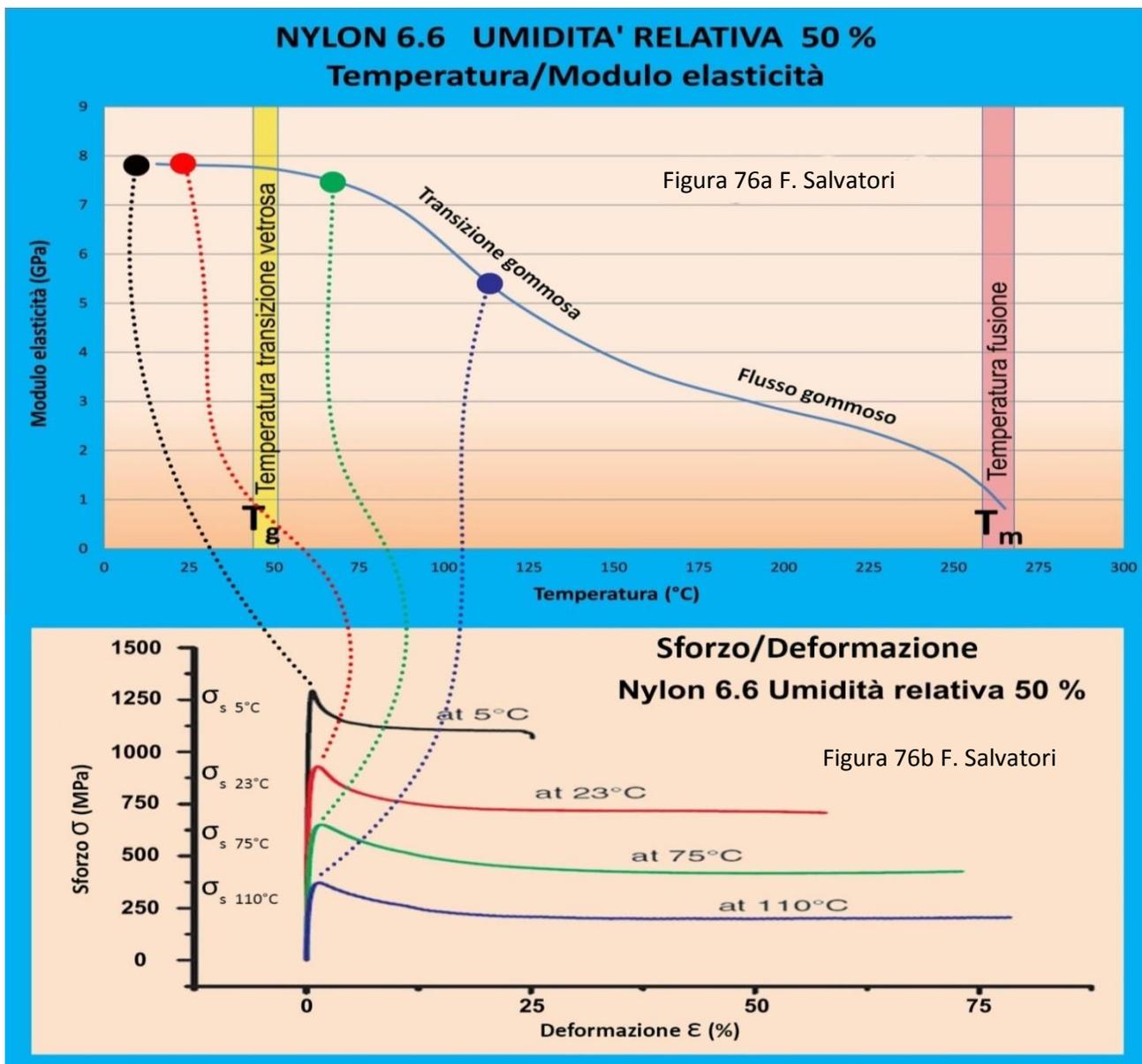
Sotto le stesse condizioni operative indicate per il grafico di **Figura 76a**, nella **Figura 76b** sono disegnate le curve **deformazione/sforzo** realizzate sullo stesso provino di Nylon 6.6 a quattro diverse temperature: **5°C - 23°C - 75°C - 110°C**.

Interpretando, confrontando e collegando i grafici dei due diagrammi, si possono evidenziare i punti focali dell'evoluzione delle caratteristiche del Nylon 6.6 in funzione dell'aumento della temperatura:

1. s'inizia con temperatura di 5°C (possibile temperatura della grotta); il materiale si presenta solido; il modulo d'elasticità (8 GPa) e lo sforzo a snervamento (1250 MPa) sono quelli tipici della poliammide 6.6 a bassa temperatura che va a costituire i fili elementari di una corda (per. es. Cavalieri Cave Explorer, *pagg. 137-140 - 141*);
2. la situazione non cambia granché fino ad arrivare intorno ai **49°C**, che è la **temperatura di transizione vetrosa T_g** del Nylon 6.6 con 50 % U.R. (come nell'ambiente protetto di un magazzino); valore di confine della temperatura, quando avviene un brusco cambiamento con passaggio del polimero da uno

stato solido semi-cristallino a una **consistenza gommosa**; il modulo d'elasticità ha anch'esso un brusco calo e lo sforzo a snervamento (e poi a rottura) sotto trazione diminuisce drasticamente;

- intorno a questa temperatura avviene un **brusco cambiamento** nella condizione "cinetica" delle poliammidi: i legami intermolecolari fra le catene di macromolecole si allentano e si riducono di numero, permettendo un **aumento dell'agitazione termica** e la possibilità di scorrimento e contorcimento delle catene polimeriche (plastificazione); questo accade soprattutto nei settori amorfi, dove il materiale diventa **gommoso** e il **modulo d'elasticità si riduce** rapidamente insieme allo **sforzo a snervamento** (690 MPa), che è il **preludio alla rottura**;
- proseguendo l'innalzamento della temperatura, l'agitazione termica aumenta ancora, come pure aumenta la parte amorfa del Nylon; il modulo d'elasticità diminuisce ancora (a 125°C si riduce a 5 GPa) e i **fili elementari si snervano e rompono con trazioni quasi nulle**;
- intorno 200°C il materiale ha la **consistenza di una paraffina**; la parte cristallina è di fatto scomparsa, la mobilità delle catene polimeriche è simile a quella di un flusso viscoso (come a dire, leggermente più consistente del miele), il modulo d'elasticità vale appena 2,7 GPa e lo sforzo alla rottura è pari a qualche decina di MPa e ogni sollecitazione produce **deformazioni plastiche irreversibili**;
- arrivati alla Temperatura di fusione T_m (265°C) il Nylon 6.6 è una massa omogeneamente amorfa, senza più alcuna parte cristallina, con le catene di macromolecole disposte in modo totalmente caotico e al massimo dell'agitazione termica; il modulo d'elasticità e lo sforzo a snervamento sono di fatto nulli.



La **temperatura di transizione vetrosa** è un **confine, abbastanza definito**, che determina **cambiamenti repentini** della condizione vetrosa/gommosa dei fili elementari, con conseguente brusco cambiamento delle proprietà meccaniche del polimero.

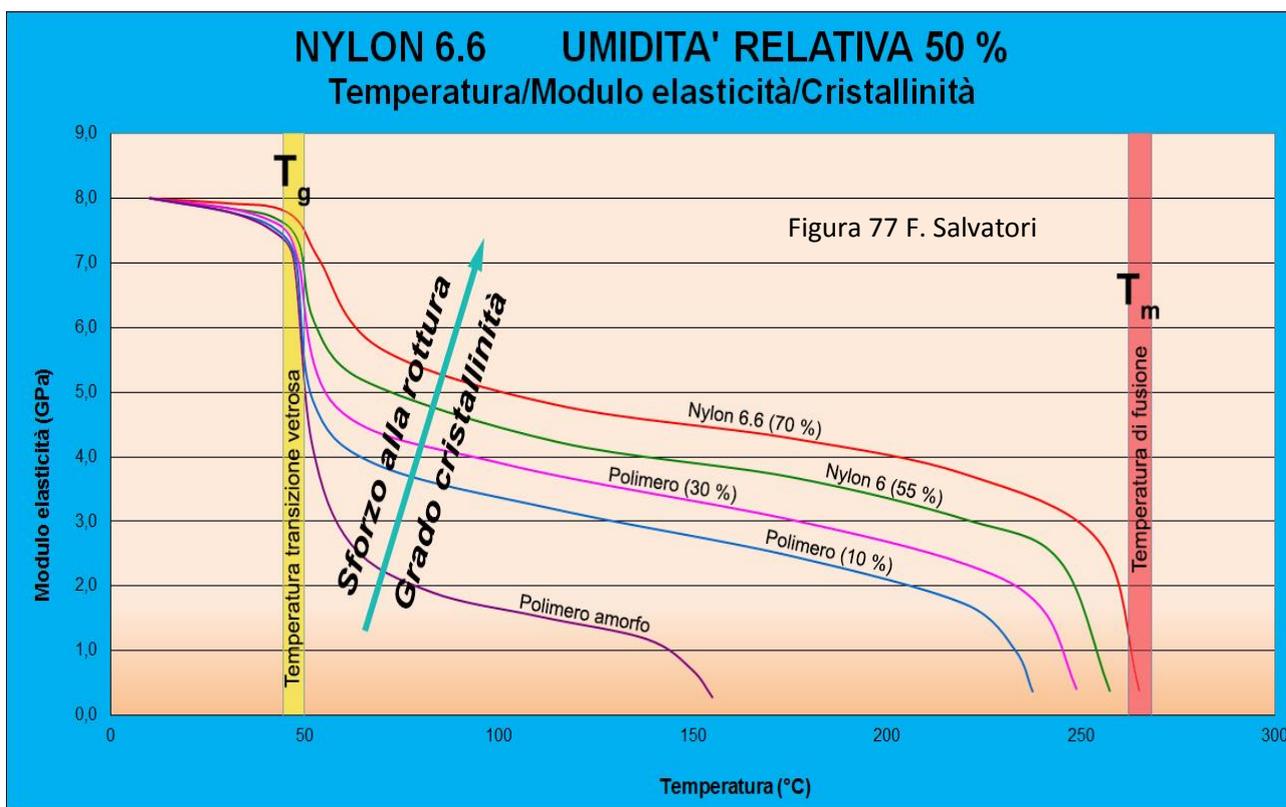
Ne è una dimostrazione palese quanto accade nella rottura di una corda annodata (come viene dettagliatamente descritto in seguito, *pag. 95*): trazionando una corda con nodi all'estremità, nelle spire di questi (*pag. 96, Figura 79*) si produce calore per attrito e di conseguenza vi aumenta la temperatura; nel nodo, e in particolare nel settore dove esce la corda trazionata, si crea il punto debole dove avviene il cedimento ad un valore inferiore anche del 60 % rispetto al carico di rottura senza nodi.

14.b.b) Diagrammi Temperatura/Modulo elasticità in funzione del grado di cristallinità del Nylon e polimeri diversi

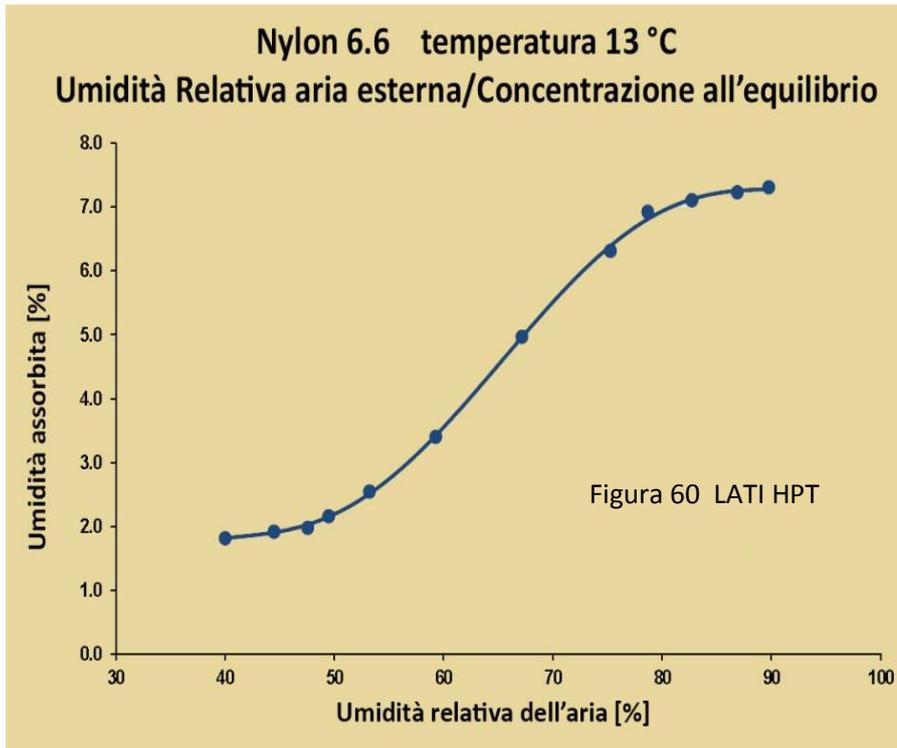
Se il test rappresentato in **Figura 76a** viene ripetuto per polimeri a diverso grado di cristallinità, si ottiene il diagramma di **Figura 77**, dove è chiaro il ruolo del rapporto di cristallinità nel definire le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche di un polimero:

1. inizialmente, prima di raggiungere la Temperatura di transizione vetrosa, il modulo E dei diversi polimeri si mantiene pressoché uguale;
2. ma raggiunta la zona T_g (fascia gialla) i grafici si diversificano nettamente e tanto minore è la cristallinità tanto maggiore è la decadenza delle proprietà meccaniche.

Da osservare il comportamento del Nylon 6, che ha caratteristiche costantemente inferiori al Nylon 6.6, con **Temperatura di transizione vetrosa intorno ai 47°C** e **Temperatura di fusione di 218°C**. Sarebbe dunque plausibile che il **Nylon 6.6 venisse preferito per il confezionamento delle corde speleo-alpinistiche**. Ma è vero esattamente il contrario: il Nylon 6 è di gran lunga il più utilizzato.



14.c) Temperatura di transizione vetrosa e quantità d'acqua assorbita igroscopicamente dal Nylon 6.6 - Riproponiamo qui, allo scopo di semplificare la consultazione, quanto esposto in precedenza nelle **Figure 60 e 72** a proposito dell'igroscopia del Nylon 6.6 e dell'influenza del contenuto d'umidità sulla Temperatura di Transizione Vetrosa; argomenti di fondamentale importanza per capire e controllare l'usura delle corde (le argomentazioni sono trasponibili al Nylon 6 senza alcuna riserva, ma solo con i valori dei parametri specifici diversi).

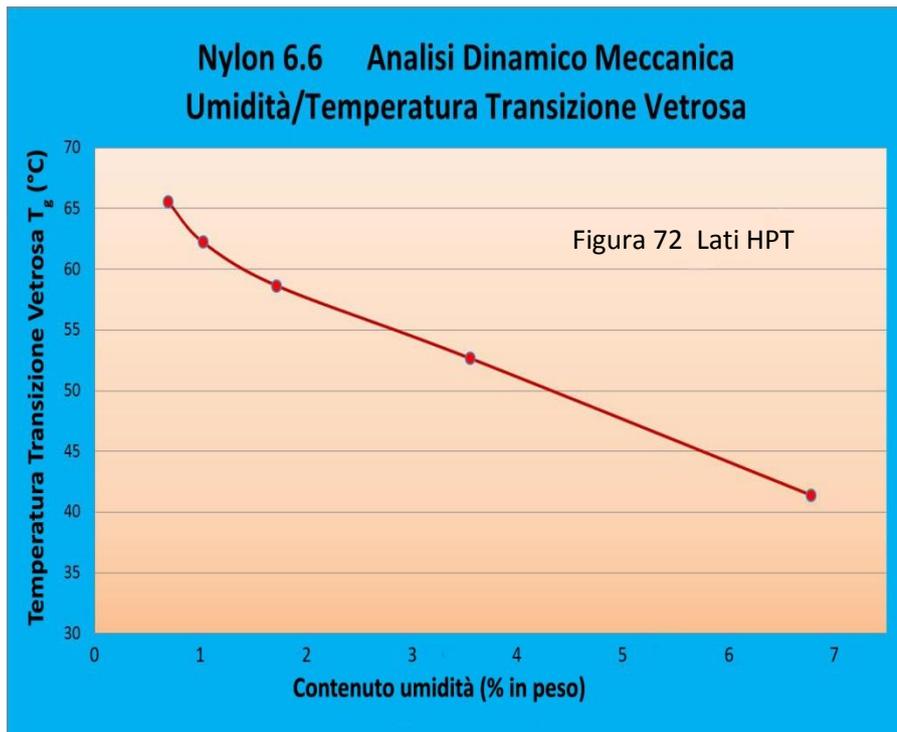


Nella **Figura 60** è diagrammato il rapporto fra U.R. nell'ambiente e la quantità d'acqua assorbita igroscopicamente dal Nylon 6.6.

Ricordiamo che il Nylon 6.6 acquisisce a temperatura ambiente (circa 20°C) un massimo del 9 % d'acqua (percentuale in peso).

Il Nylon 6, essendo più amorfo del 6.6, ne può assorbire fino al massimo del 10 %.

Dunque questi massimi valori di umidità assorbita sono raggiunti con un ambiente saturo d'umidità al 100 % (tipico dell'ambiente sotterraneo delle grotte). Da ricordare che l'immersione delle corde in acqua equivale al 100 % d'umidità dell'aria.



Nella **Figura 72** riproponiamo il grafico che mette in relazione il rapporto d'umidità in peso del Nylon 6.6 con la Temperatura di transizione vetrosa: varie decine di °C di differenza passano da un rapporto di umidificazione in peso di 0,5 % (sostanza essiccata con $T_g = 65,6^\circ C$) a un rapporto di 6,8 % (con $T_g = 41,4^\circ C$).

Pertanto, ha un **forte effetto plastificante** la **presenza d'acqua** fra le catene di macromolecole, con conseguente **diminuzione** - a parità delle altre condizioni -

del **modulo d'elasticità**, dello **sforzo a snervamento**, dello **sforzo a rottura** e, per quanto riguarda la corda, del suo **carico di rottura** (per inciso, anticipando conclusioni contenute nel successivo paragrafo, il carico di rottura F_{rn} di una corda bagnata con nodo è inferiore a quello della stessa corda asciutta).

In conclusione la Temperatura di transizione vetrosa T_g è un punto di riferimento fondamentale nel delineare l'evoluzione delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle poliammidi: sotto la T_g i fili elementari sono materiale solido semicristallino con elevato carico di rottura e modulo d'elasticità; oltrepassata la T_g il materiale polimerico diventa gommoso, con settori amorfi sempre più estesi, sempre più facile da deformare e rompere. Di questo, come già detto, **occorre tener presente** al momento d'analizzare il **meccanismo** che porta le **corde a rompersi sempre fra le spire dei nodi**.

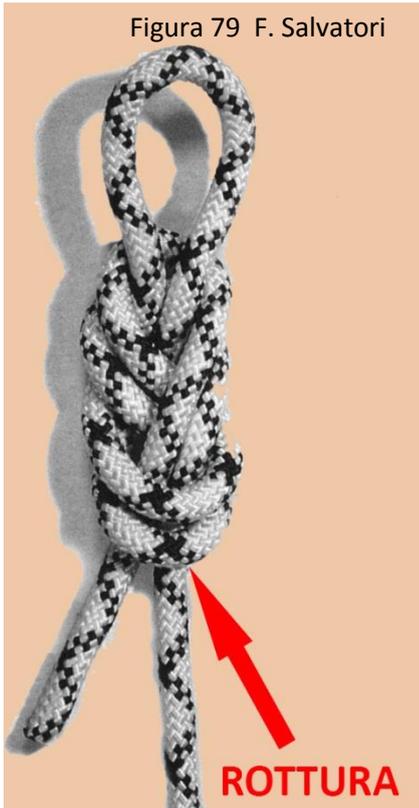
14.d) Rottura delle corde nel nodo: ruolo della temperatura di transizione vetrosa -

Figura 78 F. Salvatori

Nel variegato modo di confezionamento dei nodi, secondo le esigenze d'armo, sono stati calcolati i vari carichi di rottura F_{rn} per alcuni dei principali nodi in uso in speleologia e alpinismo. I risultati dei test con velocità di trazione lenta (0,006 m/s) (Figura 78) sono riportati nella tabella sottostante [37]; si riferiscono a cinque tipi di corda nuova: Edelrid Super Statica 10 mm - 9 mm- 8 mm e Beal Antipodes Statica 10,2 mm - 9 mm.

TIPO DI NODO ancoraggio	E 10		E 9		E 8		B 10,2		B 9		MEDIA %
	F_{rn}	%									
Senza nodi	2715	100	2400	100	1673	100	2655	100	1857	100	100
Guida d. sot.	1956	72	1502	63	1067	64	1461	55	1075	58	62
Guida d. sop.	2079	77	1498	62	1023	61	1355	51	990	53	61
Guida con frizione d. sot.	1986	73	1590	66	1094	65	1481	56	1103	59	64
Guida con frizione d. sop.	1913	70	1414	59	1156	69	1396	53	1062	57	62
Guida con frizione cattiva esecuzione	2023	74	1542	64	1164	70	1462	55	1069	58	64
Nove d. sot.	2239	82	1811	75	1196	71	1859	70	1232	66	73
Nove di sop.	2421	89	1648	69	1207	72	2025	76	1170	63	74
Bolina capo interno	1949	72	1643	68	1138	68	1711	64	1126	61	67
Bolina capo esterno	1913	70	1598	67	1145	68	1504	57	1118	60	64
Inglese combaciante	1900	70	1333	55	1027	61	1395	52	1105	59	59
Inglese non combaciante	1769	66	1440	60	940	56	1403	53	1044	56	58
Cravatta d. sot.	1923	71	1466	61	1048	62	1415	53	1075	58	61
Cravatta d. sop.	1923	71	1496	62	1196	71	1453	55	1148	62	64

Figura 79 F. Salvatori



La presenza di nodi riduce il carico di rottura della corda con percentuali che variano dal 36 al 42 %, perché all'interno del nodo con la trazione si produce calore e ciò fa aumentare la temperatura fino a raggiungere e superare la Temperatura di Transizione Vetrosa, facendo diventare il nodo il punto più debole della catena trazionata nel dinamometro e procurandone il cedimento. La forza F_{rn} che determina la rottura varia da nodo a nodo, in dipendenza della curva $T = f(\text{tempo})$. Infatti, a parità di condizioni di velocità di trazione, l'andamento dell'innalzamento della Temperatura T è condizionato dal tipo di nodo.

Entrando nei dettagli, secondo il tipo di nodo le spire si dispongono in modo differente, formando volute e avvolgimenti, con pressioni anomale su ampie superfici della calza.

Queste pressioni creano delle forze d'attrito che si oppongono allo scioglimento del nodo stesso, e aumentano d'intensità man mano che cresce la forza di trazione applicata dal dinamometro.

Con la trazione la corda scorre nelle spire del nodo, facendo aumentare il movimento di strizione e la pressione interna al nodo stesso. Così aumenta l'attrito e si produce sempre più calore e la temperatura aumenta, in modo non omogeneo, sia nel nodo che nei dintorni.

In ogni caso il settore di corda dove maggiormente si concentrano le pressioni e la massima velocità di scorrimento è indicato con una freccia in **Figura 79**.

In questo tratto appena fuori dalle spire, ineluttabilmente, si verifica il **cedimento della corda** (solo nei rari casi di corde estremamente usurate o immerse continuamente in acqua per molti anni, la rottura è avvenuta fuori dalle spire del nodo).

Dopo il cedimento di tutti i fili elementari che compongono la corda, lungo una sezione ideale trasversale ben individuabile coincidente con la sezione di cedimento, si possono osservare alcuni rigonfiamenti al termine degli stessi fili tranciati.

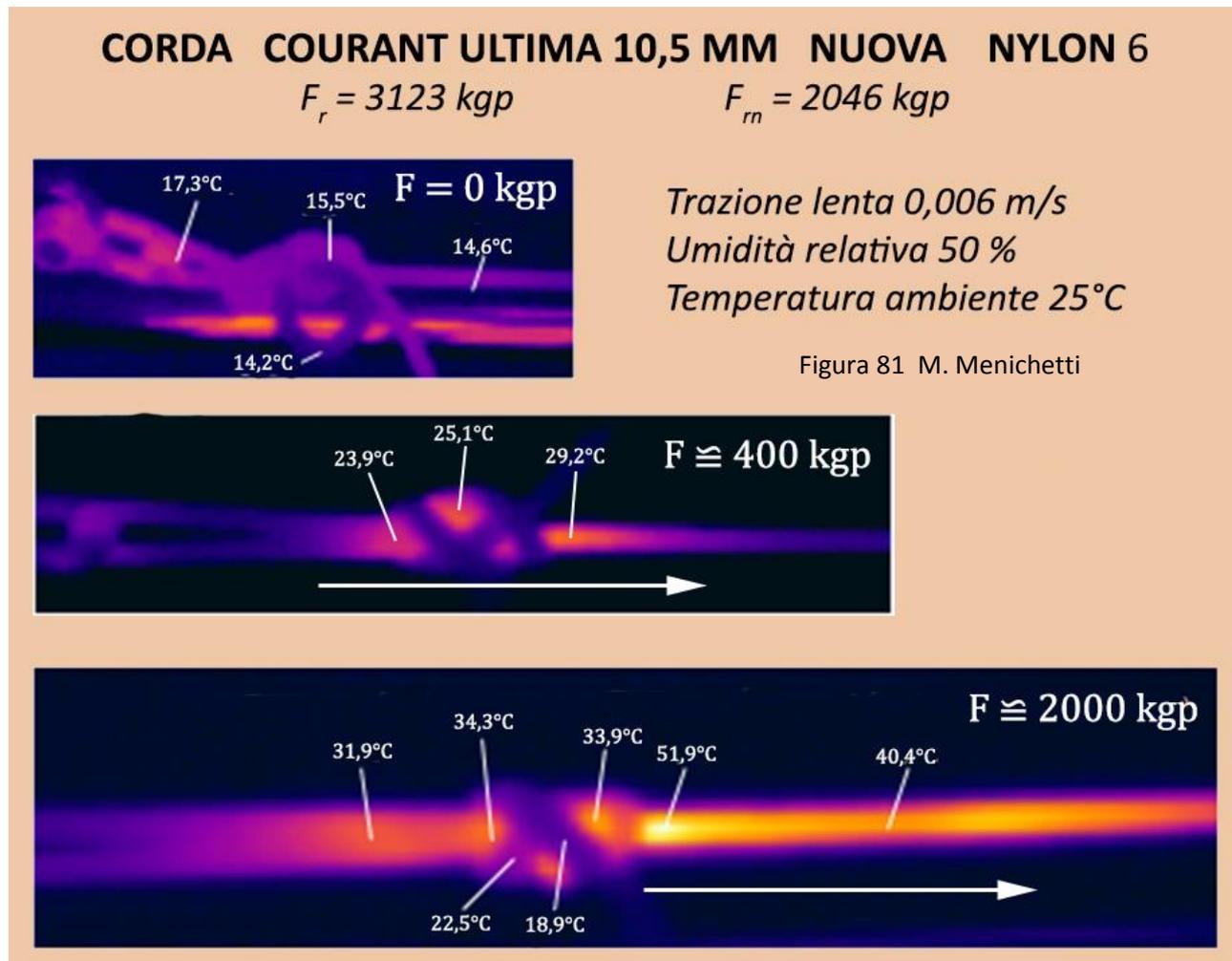
Questo fenomeno, che potrebbe indurre a ipotizzare un cedimento dovuto al raggiungimento del punto di fusione del Nylon 6 (218°C), è invece dovuto al rinculo molto veloce dei fili elementari dopo la rottura: evento istantaneo che mette in campo elevate forze d'inerzia che contraggono gli estremi dei fili recisi (si abbina anche lo sprigionamento d'energia termica per compressione del Nylon, con principi di fusione).

Ma il meccanismo che produce la rottura della corda sul nodo, come si è visto, è di ben altra natura e **non richiede il raggiungimento della Temperatura di fusione T_m** , ma solo il superamento della T_g .



Figura 80 M. Menichetti

Infatti, andando a rilevare con una **termocamera** (Figura 80) le **temperature** sulle varie porzioni di corda durante la trazione che porta al cedimento, si osserva (Figura 81) che queste **vanno aumentando** man mano che aumenta la forza di trazione del dinamometro, ma **differenziandosi sia all'interno del nodo che nei settori circostanti**.



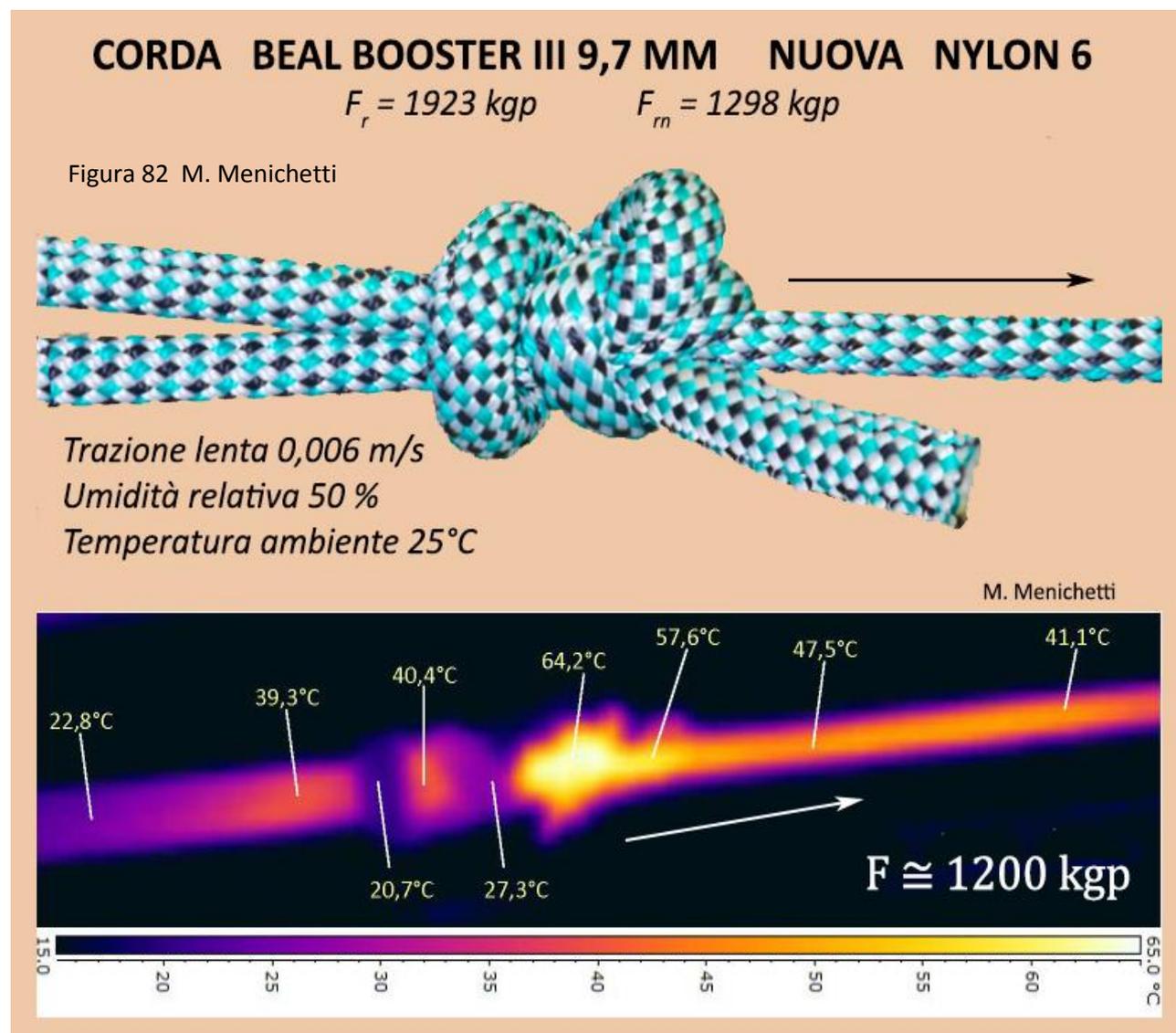
Nella **Figura 81** viene mostrata l'intera evoluzione fino alla rottura della corda Courant Ultima statica 10,5 mm **Nylon 6** (che avviene nel punto indicato dalla freccia in **Figura 79**):

1. all'inizio della trazione, con **$F = 0 \text{ kgp}$** (prima immagine in alto), le temperature nel nodo e dintorni sono compatibili con la temperatura ambiente (circa 16°C);
2. nell'immagine termografica successiva (trazione verso destra), con **$F = 400 \text{ kgp}$** , la strizione del nodo è cominciata e la corda ha iniziato a scorrere nelle spire, producendo attrito, calore e innalzamento delle temperature: all'ingresso del nodo la temperatura è salita fino a **23,9°C**, nel nodo ha raggiunto **25,1°C**, all'uscita dal nodo, proprio dove avverrà il cedimento brusco e totale, è **29,2°C**;
3. nella **terza immagine**, la forza di trazione ha raggiunto **$F = 2000 \text{ kgp}$** e siamo in **prossimità della rottura** (avvenuta con una forza pari a **$F = 2046 \text{ kgp}$**): prima e all'interno del nodo le temperature variano tra i **18,9°C** e i **34,3°C**, ben al di sotto della Temperatura di transizione vetrosa T_g (circa 45°C); **all'uscita del nodo**, dove maggiore è la velocità di scorrimento e più marcata la pressione delle spire, **dove la corda cederà repentinamente**, l'attrito produce la maggiore quantità di calore e la **temperatura s'innalza sopra la T_g** fino a raggiungere i **51,9°C** (è da immaginare che prima di ottenere la rottura della corda questa temperatura limite salga ancora).

La conclusione è di grande evidenza e incontrovertibile: nel tratto di corda dove per primo si supera la T_g , in base a quanto indicato in **Figura 76a**, si passa bruscamente dalla condizione "semicristallina" solida alla condizione "gommosa", dove - in maniera differenziata rispetto a tutto il resto della corda - il carico di snervamento e di rottura si abbassano in modo più rilevante.

Si crea quindi una situazione in cui nella **sezione trasversale della corda** indicata dalla freccia di **Figura 79** si ha un **calo del carico di rottura**, creandovi **“l’anello debole”**. E quindi qui, **e solo qui**, può avvenire la rottura non appena nel dinamometro si raggiungerà la forza di trazione sufficiente.

Il valore di questo **“carico di rottura con nodo”** F_{rn} è ovviamente inferiore al **“carico di rottura senza nodo”** F_r , con una percentuale variabile da nodo a nodo, da corda a corda, da corda nuova/usata e da corda asciutta/bagnata. La diversità di valori è dovuta all’interagire di un numero rilevanti di diversi fattori, non facilmente definibili e quantizzabili, sia singolarmente che in sinergia.



In **Figura 82** un secondo esempio, sperimentale, a conferma del meccanismo che porta alla rottura delle corde all’uscita dal nodo. Si tratta della corda **dinamica** nuova Beal Edlinger 9,7 mm **Nylon 6**.

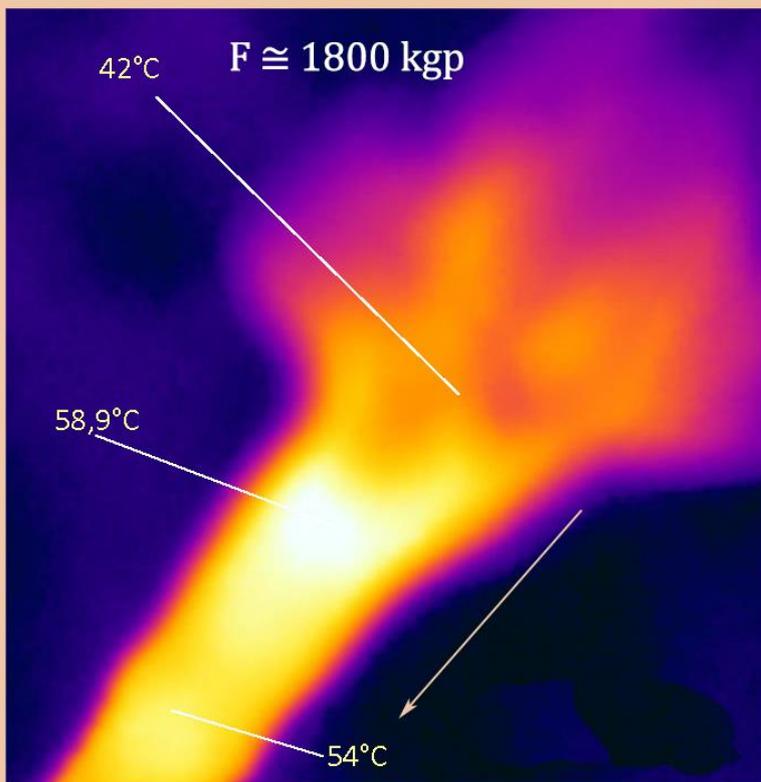
Pochi istanti prima della rottura della corda, con forza di trazione di circa 1200 kgp, nella sezione trasversale che fuoriesce dalle spire del nodo - dove la **temperatura (64,2°C)** è **salita al di sopra della T_g** - si verifica il **cedimento repentino e totale**: non potrebbe essere diversamente visto che quel punto della corda è divenuto il più debole (stato gommoso) e appena la forza di trazione del dinamometro raggiunge il F_{rn} tipico per quella combinazione corda/nodo/bagnato/asciutto/nuova/usata vi avviene il cedimento.

Rispetto al test precedente con la corda statica Courant Ultima 10, 5 mm, la temperatura rilevata nella zona di rottura è più elevata (64,2°C contro 51,9°C), pur essendo uguale la velocità di trazione. Non è semplice comprenderne il motivo: si può ipotizzare che in quest’ultimo caso, essendo minore la massa della corda (peso 59 g/m contro 64 g/m), la quantità di calore prodotto dall’attrito ha avuto un effetto riscaldante superiore.

CORDA CAVALIERI CAVE EXPLORER 10,6 MM NUOVA NYLON 6.6

$$F_r = 3344 \text{ kgp}$$

$$F_{rn} = 1840 \text{ kgp}$$



*Trazione lenta 0,006 m/s
Umidità relativa 50 %
Temperatura ambiente 25°C*

Figura 83 M. Menichetti

In **Figura 83** la termofotografia si riferisce a una corda diversa dalle precedenti: sia l'anima che la calza sono confezionate con fili elementari di **Nylon 6.6**, la cui **temperatura di fusione T_m** è **265°C** e la **cristallinità pari al 70 %**.

Tuttavia queste diversità **non hanno cambiato le modalità che portano alla rottura della corda**: nella **sezione trasversale** che a circa 1800 kgp di forza di trazione (prossima al carico di rottura con nodo $F_{rn} = 1840$) ha **raggiunto la temperatura di 58,9°C**, superando la **temperatura di transizione vetrosa**, si verifica la **trasformazione del poliammide** (da semicristallino a gommoso), creando così il **punto più debole** di tutto il campione di corda, dove, di conseguenza, avviene **la rottura**. Anche per questo test non è facile spiegare la differenza nella temperatura massima raggiunta.

Conclusioni:

1. è netta la coincidenza fra la sezione trasversale dove avviene la rottura della corda (**Figura 79**) con il suo ben individuato settore dove, per primo, si supera la temperatura di transizione vetrosa;
2. non è la fusione dei fili elementari a determinare i presupposti del cedimento, bensì la trasformazione della fibra poliammidica da semicristallina a gommosa (**Figura 76a/b**);
3. le differenze nelle temperature massime raggiunte è conseguenza della geometria dei modi e della manifattura della corda, entrambe con architetture abbastanza complesse;
4. le stesse cause sono all'origine delle differenze "nell'effetto nodo" come viene ben evidenziato nella tabella riportata in precedenza (pag. 95);
5. è comunque altrettanto **evidente che maggiore è il numero degli avvolgimenti e delle spire** che caratterizzano i diversi nodi, **minore è la pressione che si esercita** per contrastare lo scioglimento del nodo, minore è l'attrito e la produzione di calore per unità di superficie e **più difficoltoso è l'innalzamento della temperatura; minore dunque l'effetto riduttivo del carico di rottura;**
6. per. es. il "**nodo a nove**" ha più avvolgimenti e spire del "**nodo guida con frizione**": il che giustifica che nel primo l'effetto nodo porta a una riduzione del carico di rottura del **36 %** mentre nel secondo del **28 %** (pag. 95).

14.e) Irreversibilità delle trasformazioni cristallino/amorfo dovute alle variazioni di temperatura: decadimento delle proprietà meccaniche dei fili elementari - Abbiamo visto nel precedente **Paragrafo b** (pag. 91 e seg.) l'evoluzione delle condizioni cristallino/amorfo (o vetroso/gommoso) delle fibre poliammidiche per l'azione di fonti di calore e quindi per l'aumento della temperatura nelle corde.

In particolare è stato messo in risalto il rapporto fra il superamento della T_g , il **decadimento localizzato delle caratteristiche meccaniche della corda** e la conseguente individuazione del punto di rottura della corda con nodi (sempre all'uscita delle spire).

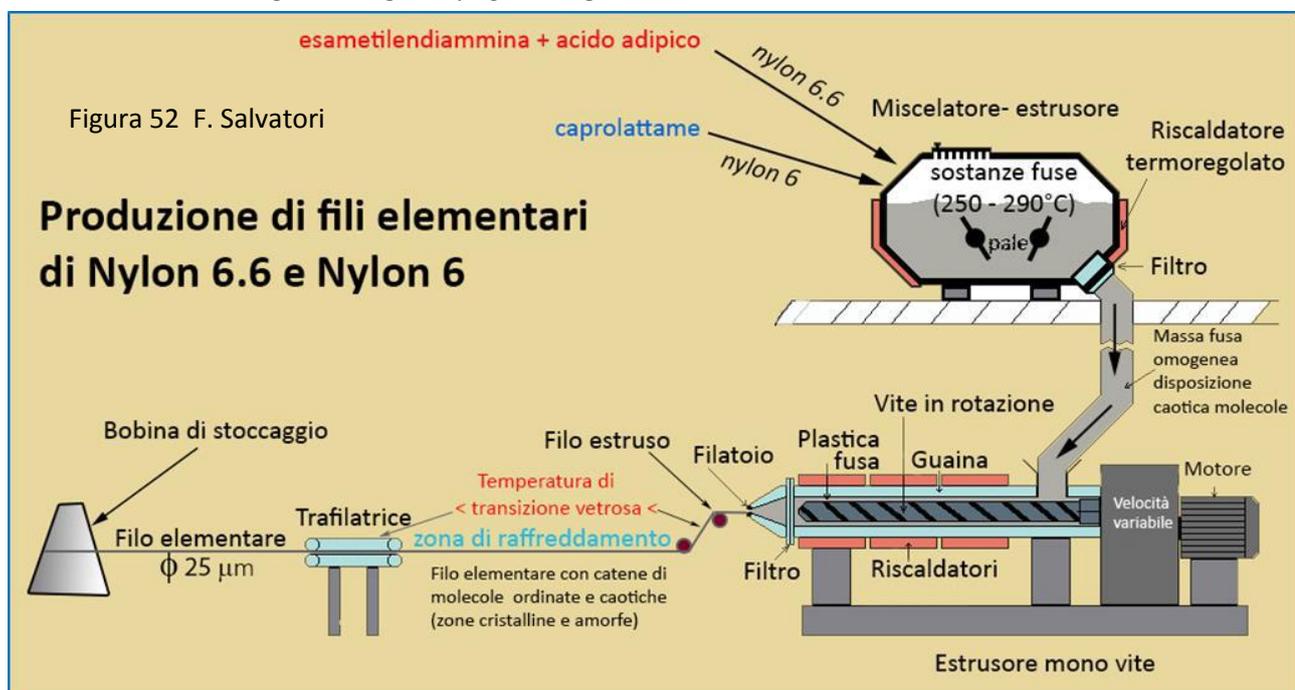
In aggiunta a questo conclamato fatto sperimentalmente, occorre ricordare che uno dei fattori che più incide nell'usurare una corda è il **susseguirsi di variazioni di temperatura**, dovuto all'**alternarsi di produzione di calore**, con conseguenti **alternate trasformazioni della cristallinità dei polimeri**.

Per meglio definire questo elemento di decadimento di una corda per uso speleologico (e in arrampicata sportiva) è necessario riproporre quanto già rappresentato in **Figura 50** (pag. 61) dove viene mostrato lo schema della produzione di fili elementari di Nylon 6.6 o 6 per raffreddamento di una massa fusa.

14.e.a) Processo di raffreddamento per la formazione di fili elementari

Si parte dal materiale fuso nel Miscelatore-estrusore e, in sintesi, si raffredda la massa fluida dove la disposizione delle catene di macromolecole è interamente caotica a formare un materiale amorfo con il massimo dell'agitazione termica.

Con l'aiuto dell'estrusore e della trafilatrice, raffreddando la poliammide fusa (il tutto favorito da un ambiente chimico basico) si formano i fili elementari, in cui una parte delle catene polimeriche si dispone in modo non caotico (cristallino), parallelamente all'asse longitudinale del filo elementare e creando agganci intermolecolari con legami idrogeno (pag. 65, **Figura 57**).



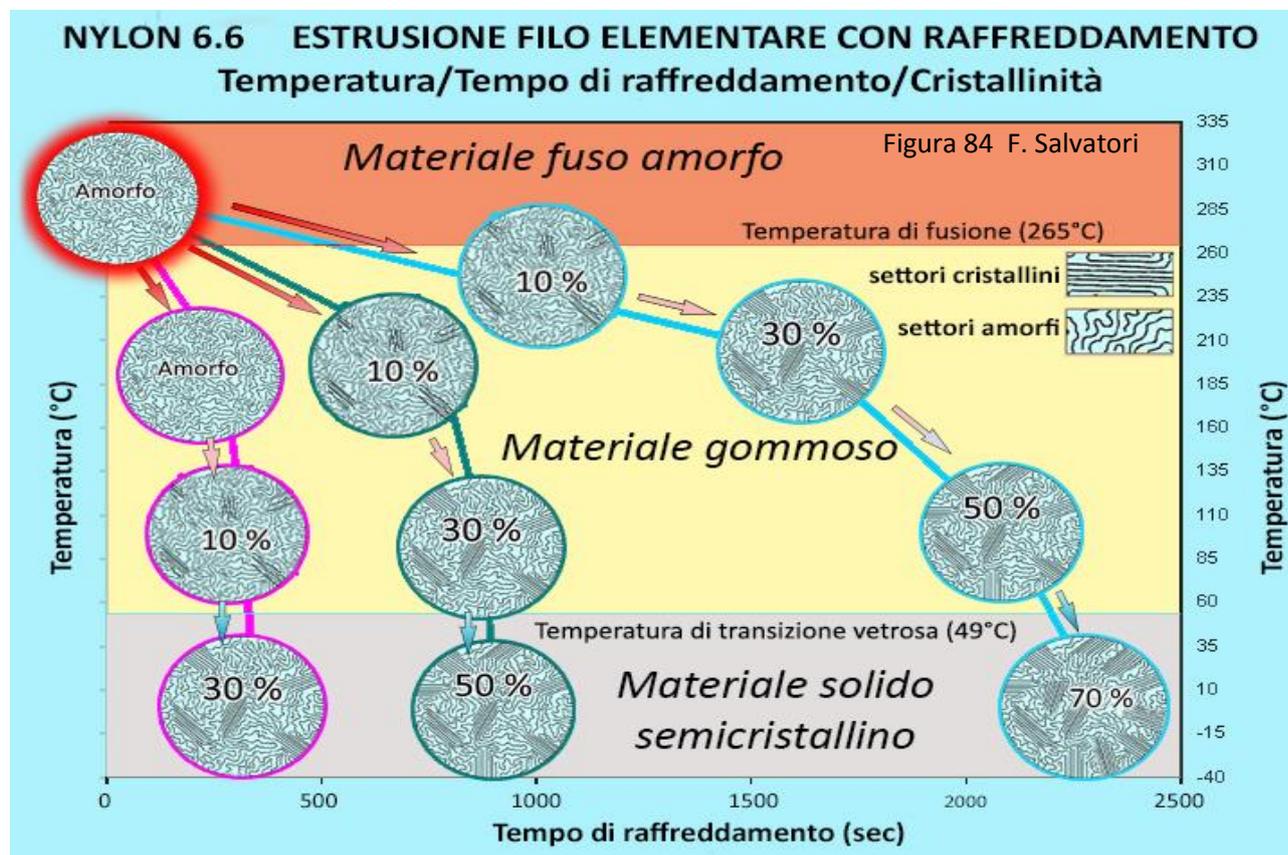
Alla fine del processo di formazione, si può ottenere, agendo nelle migliori condizioni chimico-fisiche possibili, uno stato solido costituito da un insieme di settori "cristallini" che nel Nylon 6.6 è pari al 70 % della massa del filo elementare (il restante 30 % è caotico e amorfo). Nel Nylon 6 si raggiunge, al massimo, un rapporto cristallino/amorfo del 55 %.

Ma il processo di **formazione dei fili elementari** può essere eseguito con **velocità di raffreddamento diverse**. Il risultato finale, in relazione al rapporto cristallino/amorfo (e quindi alle proprietà meccaniche del

polimero), può variare dal 70 % a un valore praticamente nullo: **tanto più è veloce il raffreddamento** tanto minore risulterà la percentuale di **cristallinità** e le conseguenti **proprietà meccaniche**. Dal punto di vista della **qualità di una corda per uso speleologico** (o per l'arrampicata sportiva) i **migliori fili elementari** sono quelli prodotti con **velocità di raffreddamento ridotte**.

14.e.b) Formazione dei fili elementari, temperatura, tempo di raffreddamento e cristallinità

Nella **Figura 84** c'è l'esposizione sinottica delle possibili vie di produzione delle fibre di poliammide 6.6 in funzione dei tempi di raffreddamento. L'esempio, nella sostanza, è valido per i polimeri in generale.



E' una constatazione sperimentale che la cristallinità finale dei fili elementari dipende dal modo e dai tempi che portano alla filatura finale delle fibre: tanto più è rapido il raffreddamento tanto più è ridotta la cristallinità, e tanto più diminuiscono le proprietà meccaniche del poliammide. Si può passare da un massimo di cristallinità del 70 %, con un tempo di raffreddamento di almeno 120 minuti, a un minimo del 30 %, con tempo di raffreddamento di circa 10 minuti.

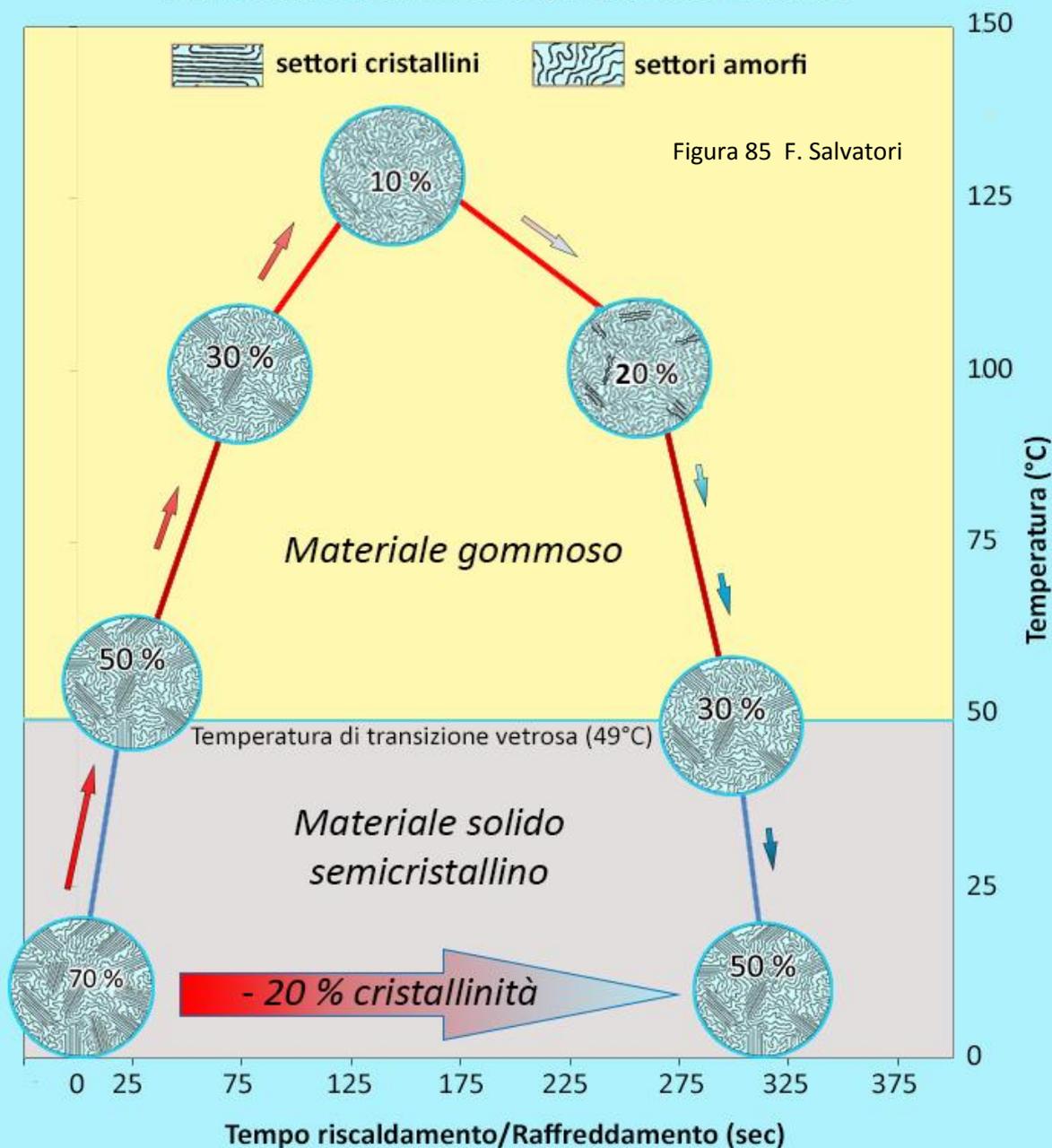
Ma occorre ricordare che dopo l'estrusione entra in azione la **trafilatura, azione puramente meccanica**, che contribuisce **ad aumentare la cristallinità** e a ridurre i tempi di raffreddamento. Occorre altresì ricordare che **l'ambiente chimico basico favorisce l'organizzazione cristallina** del Nylon (da questo si può dedurre che ambienti acidi non favoriscono la polimerizzazione, la qualità di una corda e la sua tenuta al cedimento e al deterioramento). Se si tratta di Nylon 6, la massima cristallinità possibile è intorno al 55 %, che può scendere fino al 20 %.

14.e.c) Cicli di riscaldamento/raffreddamento nella progressione in grotta (e arrampicata sportiva): trasformazioni irreversibili nei fili elementari di Nylon e decadimento delle proprietà meccaniche delle corde

Quanto descritto in **Figura 76a/b** (variazioni temperatura/modulo, cristallino/amorfo, solido/gommoso e temperatura/sforzo a snervamento) e **Figura 84** (produzione per raffreddamento di fili elementari a diverso grado di cristallinità) ci permette, integrando le varie conclusioni, d'interpretare l'effetto degradante del **succedersi sulle corde di fasi di riscaldamento e raffreddamento** (**Figura 85**), provocate soprattutto dall'uso di freni in discesa (**discensori**): effetto quantizzato nel **Paragrafo a** (pag. 90) "Misurazione del calore prodotto sulla corda durante la progressione in grotta (e nell'arrampicata sportiva)".

NYLON 6.6 FILO ELEMENTARE CICLO RISCALDAMENTO/RAFFREDDAMENTO

Variazioni irreversibili delle proprietà meccaniche



Nella **discesa su corda** uno **speleologo dissipa in calore gran parte dell'energia potenziale** posseduta dal suo corpo: calore **originatosi dal contatto corda/discensore** (pag. 90, **Relazione 21**). Attraverso delle misurazioni di temperatura sul discensore durante alcune discese, i valori registrati variano a seconda del tipo di corda e del suo stato: corda speleo nuova asciutta 50 – 110°C; corda speleo nuova bagnata 40 – 100°C; corda speleo usata asciutta 50 – 130°C; corda speleo usata bagnata 40 – 135°C.

Pertanto, durante la progressione in discesa, tutte le sezioni trasversali della corda subiscono un **riscaldamento momentaneo**, anche con il **superamento della temperatura di transizione vetrosa**, che è subito seguito da un **raffreddamento**, con ritorno alla temperatura ambiente (grotta o altro che sia).

Questo comporta che in ogni sezione trasversale della corda percorsa **si passi in poco tempo** (qualche minuto) dallo stato solido **semicristallino** (al 70 % di cristallinità, se si tratta di una corda nuova in Nylon 6.6) allo stato **gommoso**, con cristallinità tanto più ridotta quanto più è alta la temperatura raggiunta con il riscaldamento per attrito.

Dopo il passaggio del discensore, i fili elementari si raffreddano e recuperano cristallinità, **ma non completamente**: il raffreddamento è veloce e, come descrive la **Figura 85**, non permette un recupero totale della cristallinità e quindi delle proprietà meccaniche del Nylon.

Inoltre, il recupero della cristallinità risulterà tanto più ridotto quanto più elevata sarà la temperatura massima raggiunta.

Se comunque c'è stato **riscaldamento, anche se non sufficiente a elevare la temperatura oltre quella di transizione vetrosa**, il **successivo raffreddamento non può** rigenerare una condizione di **cristallinità pari a quella iniziale**. Sia pur di poco, ma un decadimento verrà sempre marcato sulla corda, che, sommato a tanti altri simili, la porta a una usura anche di grande rilievo (progressiva diminuzione della cristallinità). La causa di ciò, ripetiamo, è il susseguirsi di "ondate di calore", grandi o piccole che siano, dovute alle discese con discensore in grotta.

In **Figura 85** è rappresentato lo schema esemplificativo di un ciclo riscaldamento/raffreddamento, con conseguente perdita irreversibile di cristallinità e, quindi, diminuzione del carico di rottura e di rigidità dei fili elementari.

Parte IV

Corde speleo-alpinistiche

Effetto idrolisi/asciugatura

*Valutazione del decadimento reversibile
con test quasi-statici (trazione lenta)*

01. Test quasi - statici a conferma della riduzione del carico di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} delle corde speleo - alpinistiche, nuove e usate, per l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari causata dalla presenza d'acqua igroscopica nei fili elementari

01.a) Premessa – Nella **Parte III** (pag. 61 e seg.) è stato trattato l'argomento legato al contatto fra le fibre polimeriche (in specie il Nylon) e l'acqua, mettendo in evidenza che questa **poliammide è igroscopica** e può assorbire molecole d'acqua fino anche al 10 % del suo peso.

Soprattutto per le corde usate in grotta, dove il contatto con l'acqua è una condizione ineludibile, questa situazione d'idratazione deve essere approfondita e valutata quantitativamente, anche perché ha l'effetto di **deprimere le proprietà meccaniche dei fili elementari**.

Se poi si considera che l'esporre una corda di materiale polimerico igroscopico (come il Nylon e il Kevlar; non il Dyneema) in un ambiente ipogeo, sempre saturo di vapore d'acqua con U.R. al 100 %, **equivale** a tenere la corda **immersa in acqua**, il solo fatto che la corda entra in grotta le produce, per **idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari**, un'azione riduttiva delle caratteristiche meccaniche dei fili elementari di Nylon. **Azione riduttiva** che però **scompare completamente** nel momento in cui la corda viene tolta dall'immersione in acqua e/o fatta uscire dalla grotta (l'azione riduttiva e il suo annullamento avvengono in tempi ridotti, non più di qualche decina di minuti la prima e di qualche ora la seconda).

Da quanto si conosce teoricamente e dai risultati di ricerche sperimentali precedenti si può prevedere con una certa approssimazione quanto accade alle corde speleo-alpinistiche al contatto con l'acqua o con l'ingresso in grotta: per esempio una riduzione, recuperabile, di F_r e F_{rn} compresa fra 5 % e il 25 %, a seconda delle condizioni in cui si trova la cristallinità del materiale polimerico.

Ma per dare un dimensionamento quantitativo più preciso, visti i tanti parametri che inserisce l'anisotropia propria della **struttura complessa di una corda**, occorre sviluppare una ricerca sperimentale che ne coinvolga diverse, di diversi costruttori, fra le più rappresentative in commercio.

Infatti è bene ricordare che le teorie e le sperimentazioni note sono relative a campioni di materiale polimerico isotropo (barre, tondini, fili elementari pieni, ecc.) e non a strutture complesse come le corde, ottenute con il confezionamenti di non meno di 60.000 fili del diametro di circa **30 μm** . Confezionamenti che si differenziano da costruttore a costruttore e che, quindi, possono comportare reazioni diverse da corda a corda sia per l'idratazione che l'asciugatura.

I dati raccolti sono anche in funzione **del tempo trascorso dall'inizio** dell'idratazione e dell'asciugatura.

01.b) Riassunto sintetico delle conoscenze teoriche e sperimentali – Essendo i polimeri come il Nylon un materiale termoplastico utilizzatissimo in ogni settori della costruzione di macchine, le ricerche fatte vanno a costituire una letteratura specifica estremamente vasta, interessando in modo particolare la formazione a caldo dei vari pezzi.

Il **calore** è un fattore determinante nel definire i modi adatti alle produzioni; ma è anche la presenza d'**acqua** a condizionare fortemente la bontà e la resistenza di quanto si va a produrre. Il Nylon allo stato di materia prima, ad esempio, necessita che il suo grado d'umidità sia inferiore all'1 %, pena la qualità e la resistenza dei pezzi prodotti, con degradazioni possibili di varia natura sia nei processi di formazione che nei risultati finali.

01.b.a) La quantità d'acqua assorbita dipende dal grado di cristallinità dei fili elementari delle corde - Il Nylon 6 ha una grado di cristallinità intorno al 50 %; mentre il grado di cristallinità del Nylon 6.6 può arrivare a superare il 70 %.

Pertanto, vista l'estensione dei settori amorfi (dove le molecole d'acqua s'inseriscono più facilmente), nei fili elementari di Nylon 6 s'inserisce acqua fin quasi il 10 % in peso, mentre nel Nylon 6.6 si arriva al 7-8 %: l'effetto riduttivo nella prima poliammide è più marcato (ecco un altro motivo per preferire il secondo tipo di filo elementare nel confezionamento delle corde da grotta).

01.b.b) La diffusione igroscopica dell'acqua nei fili elementari segue la Legge di Fick - Questa legge (pag. 70, **Relazione 17**) ci dice che la velocità di penetrazione delle molecole d'acqua fra le catene di macromolecole del Nylon, solido e isotropo, ha una dipendenza diretta dal coefficiente di diffusione D .

Tale coefficiente dipende dal tipo di materiale da penetrare, dall'U.R. e dalla temperatura dell'ambiente. Dal che, data soprattutto dalla bassa temperatura all'interno di una grotta (salvo casi straordinari), questo coefficiente D ha un valore molto basso (pag. 71, **Figura 60**). Il che potrebbe far allungare a giorni il tempo necessario per arrivare alla saturazione igroscopica dei fili elementari.

01.b.c) La diffusione igroscopica dell'acqua nei fili elementari dipende dal loro diametro - Ma a contrapporsi all'azione ritardante della bassa temperatura sta il fatto che la saturazione si completa tanto più rapidamente quanto più è ridotto il diametro dei fili elementari.

Avendo questi un diametro che si aggira intorno ai **30 μm** , l'assorbimento si completa in pochi minuti, se non **istantaneamente** (pag. 72, **Figura 62**).

01.b.d) I legami idrogeno intermolecolari fra le catene di macromolecole del Nylon si realizzano quasi esclusivamente nei settori cristallini - Le catene di macromolecole nei settori cristallini dei fili elementari di Nylon si dispongono in un modo ordinato, con spazi interatomici che permettono la penetrazione e la collocazione adeguata di molecole d'acqua.

Tale situazione favorisce la formazione di legami idrogeno intermolecolari, responsabili del rafforzamento della struttura atomico-molecolare a maglie (pag. 74, **Figure 66 - 67**).

01.b.e) Il numero di legami idrogeno e l'estensione delle zone cristalline determinano le caratteristiche meccaniche delle fibre polimeriche - Tanti più legami idrogeno si formano tanto più elevate sono le proprietà meccaniche delle fibre; soprattutto i carichi di rottura F_r e F_{rn} .

Quindi questi carichi di rottura sono proporzionati al numero di legami idrogeno presenti nelle zone cristalline e all'estensione di queste rispetto alle zone amorphe (pag. 76 e seg., **Figure 69 - 70 - 71**).

01.b.f) Il rapporto fra l'estensione delle zone cristalline e l'estensione dei settori amorfi dei fili elementari dipende anche dalla "qualità" del polimero - Le caratteristiche meccaniche di un filato polimerico come il Nylon dipendono anche dalla "purezza" della materia prima, in particolar modo dell'umidità presente nei grani di Nylon al momento dell'immissione nel miscelatore-estrusore (pag. 61, **Figure 49 - 50**), che non deve essere superiore allo **0,1 %** (1000 ppm).

Con tassi d'umidità superiori il Nylon degrada diminuendo l'estensione dei settori cristallini e quindi il numero di legami idrogeno attivati.

01.b.g) Qualità del polimero ed entità dell'effetto idrolisi - L'effetto riduttivo dell'idrolisi si manifesta laddove sono posizionati i legami idrogeno e, di conseguenza, la riduzione è tanto maggiore quanto più è elevato il loro numero, quanto più estese sono le zone cristalline, quanto meno sono state usurate le corde.

In ultima sintesi, l'entità dell'effetto idrolisi è una misura della "qualità" della fibra, dipendente, come già detto, sia dalle **condizioni di filatura iniziali** (soprattutto legate al tasso d'umidità della materia prima) che dalla condizione determinata dal **grado d'usura**.

01.b.h) L'effetto riduttivo della presenza di nodi d'aggancio alle estremità dei campioni di corda dipende anche dalla Temperatura di Transizione Vetrosa del polimero che costituisce i fili elementari - La Temperatura di Transizione Vetrosa T_g di un polimero (pag. 91 e seg., **Figure 76 - 77**) è di fondamentale importanza nel definire il carico di rottura di una corda trazionata al banco dinamometrico con nodi d'aggancio alle estremità (pag. 95 e seg., **Figure 79 - 81 - 82 - 83**).

01.b.i) La Temperatura di Transizione Vetrosa è in funzione del tipo di polimero, del suo grado di cristallinità e dell'umidificazione - La T_g è caratteristica di ogni polimero: per esempio, 50°C per il Nylon 6.6, 40°C per il Nylon 6, -90°C per il Dyneema e 820°C per il Kevlar.

Ma questi valori di T_g non sono fissi. Infatti variano con l'U.R. dell'ambiente circostante (pag. 94, **Figure 60 - 72**) e con il rapporto cristallino/amorfo dei fili elementari che tende a variare con l'uso della corda, soprattutto per il calore prodotto dagli attriti con gli attrezzi di progressione (specie il discensore o qualsiasi altro tipo di freno) (pag. 100 e seg., **Figure 84 - 85**).

01.b.j) Asciugatura – Come detto nei punti precedentemente elencati, la lavorazione di materiali termoplastici come il Nylon richiede che il polimero di partenza (allo stato fuso) contenga la minor quantità possibile d'umidità per dare prodotti con le migliori proprietà meccaniche possibili: una minor quantità d'acqua igroscopica (anche meno dell'1 %) garantisce che questo accada.

Per contro la presenza d'umidità intermolecolare in quantità superiore nel prodotto di partenza (pag. 61, **Figure 49 – 50**) determina il fenomeno della "plasticizzazione", con aumento della porzione gommosa rispetto a quella vetrosa. I prodotti risultano "difettosi" per la presenza di bolle, rigonfiamenti e fragilità.

Per ottenere questo grado di essiccazione ottimale occorre sottoporre le poliammidi a flussi d'aria calda, con temperature prossime ai 200°C (più alte non è possibile dato che la temperatura di fusione del Nylon 6 è di 220°C.) (pag. 76 e seg., **Figura 68**).

Ma nel caso di corde speleo-alpinistiche, dati i criteri di normale uso speleologico, non occorre l'essiccazione con aria calda per ripristinare le condizioni d'umidità iniziali. Per l'**asciugatura** è sufficiente toglierle dall'ambiente grotta (100 % di U.R.) e porle in un ambiente domestico o in un magazzino al chiuso, con temperature non inferiore ai 10°C /15°C e U.R. compresa fra il 40 % e 50 %.

In tal modo, le corde bagnate possono asciugarsi, raggiungendo di nuovo un'umidità compatibile a quella del Laboratorio dove sono stati eseguiti i test per definire lo stato iniziale dell'idratazione.

01.c) Scopi della ricerca – Con questo **programma di test si vuole verificare e dimensionare** per le corde elencate nel successivo paragrafo:

1. la reversibilità o meno del fenomeno dell'idrolisi, cioè costatare numericamente se, tolto il contatto con l'acqua e asciugandole fino a riportare l'idratazione al valore iniziale con U.R. 40 % - 50 % (quello dell'ambiente contenente i campioni di corda prima dell'immersione), i carichi di rottura F_r e F_{rn} recuperano i valori registrati inizialmente con le corde nuove/asciutte;
2. i gradienti di tempo dell'idratazione e dell'asciugatura che cadenzano il decadimento e il recupero di F_r e F_{rn} .

01.d) Condizioni sperimentali - Si tratta di una sperimentazione a trazione lenta (quasi-statica con $v = 0,006 \text{ m/s}$) fino alla rottura, **senza nodi** e **con nodi**, che coinvolge corde statiche e dinamiche, nuove e usate (tutte con fili elementari di Nylon 6, ad eccezione della calza della Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm).

I test sono stati fatti su corde:

1. asciutte,
2. bagnate, immergendole in acqua (equivale a una esposizione in ambiente con U.R. uguale al 100 %),
3. asciugate, togliendole dall'immersione in acqua e ponendole in ambiente con U.R. al 45 % - 48 % e con temperatura compresa fra 15°C – 18°C).

Per "corde usate" s'intende:

- Beal Antipodes statica 10 mm: più di 2 anni d'intensa attività, senza lunghe permanenze in grotta;
- Beal Edlinger dinamica 9,8 mm: più di 3 anni di uso in falesia e parete d'arrampicata;
- Edelrid Static 10 mm: circa 7 anni d'attività normale in grotta e in palestra, senza permanenze prolungate in grotta e parete.

Per le corde, sia bagnate che asciugate, sono stati calcolati i valori di carico di rottura in funzione dei tempi di permanenza in acqua e d'asciugatura (0 ore, 1 ora, 12 ore, 24 ore, 48 ore).

Le corde prese in considerazione sono:

1. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *nuova* asciutta,
2. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *nuova* bagnata,
3. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *nuova* asciugata,

4. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *usata* asciutta,
5. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *usata* bagnata,
6. Beal Antipodes Statica 10,0 mm *usata* asciugata

7. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *nuova* asciutta,
8. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *nuova* bagnata,
9. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *nuova* asciugata,

10. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *usata* asciutta,
11. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *usata* bagnata,
12. Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm *usata* asciugata

13. Edelrid Static 10 mm *nuova* asciutta,
14. Edelrid Static 10 mm *nuova* bagnata,
15. Edelrid Static 10 mm *nuova* asciugata,

16. Edelrid Static 10 mm *usata* asciutta,
17. Edelrid Static 10 mm *usata* bagnata,
18. Edelrid Static 10 mm *usata* asciugata,

19. Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm *nuova* asciutta (calza Nylon 6.6),
20. Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm *nuova* bagnata (calza Nylon 6.6),
21. Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm *nuova* asciugata (calza Nylon 6.6),

22. Cousin Trestec Statica 10,5 mm *nuova* asciutta,
23. Cousin Trestec Statica 10,5 mm *nuova* bagnata,
24. Cousin Trestec Statica 10,5 mm *nuova* asciugata.

Per la **trazione senza nodi** il modo d'ancoraggio è quello rappresentato nella **Figura 18** (pag. 28 e seg.), il solo che garantisce il risultato necessario: un valore di F_r dipendente unicamente dal materiale polimerico che si oppone al cedimento, senza interferenze nei punti d'aggancio al sistema traente del banco dinamometrico (che potrebbero interferire in modo anomalo e imprevedibile, anche con una riduzione rilevante, erronea, dei valori).

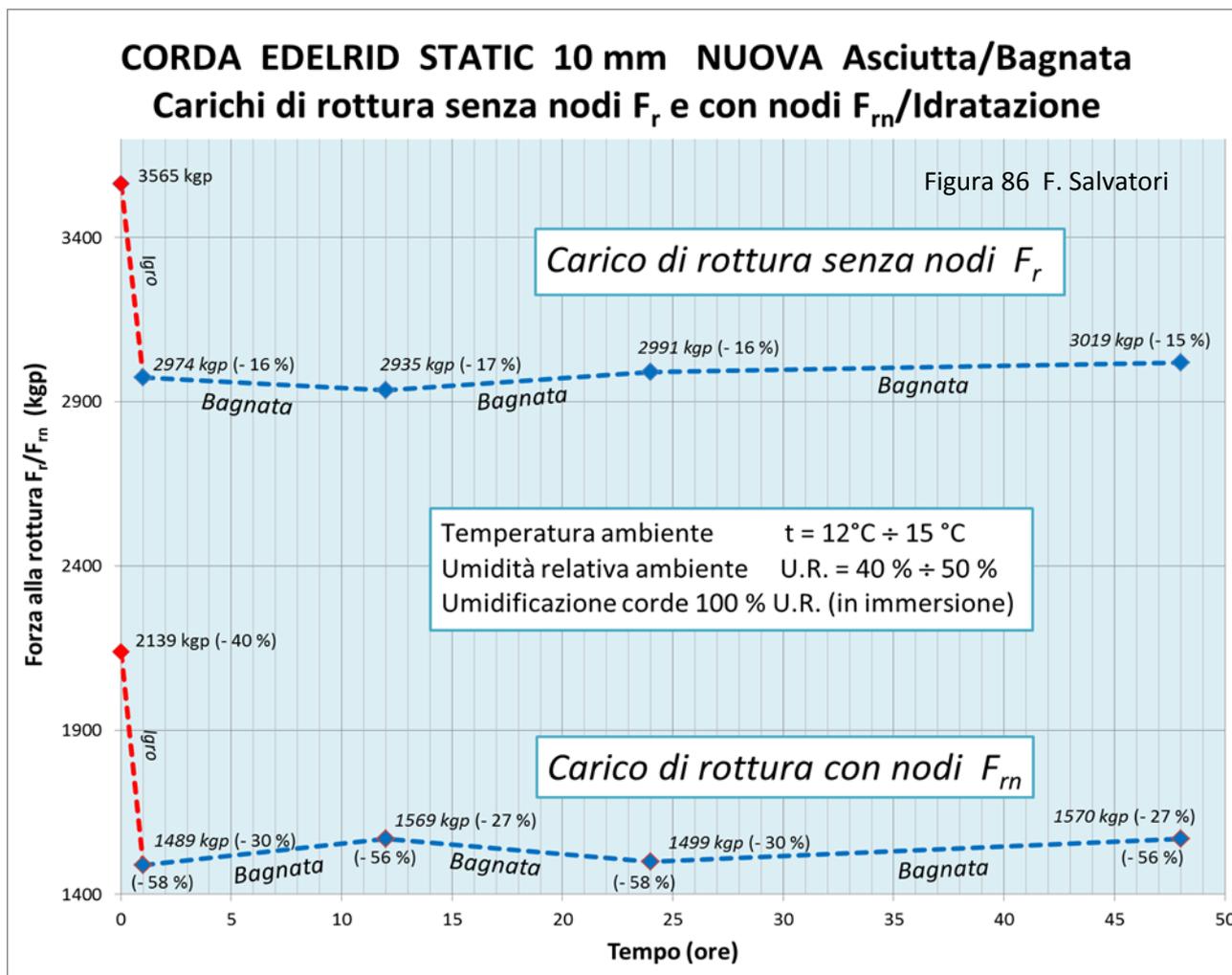
Per la **trazione con nodi**, l'ancoraggio al sistema traente del banco dinamometrico è stato realizzando con due gasse all'estremità del campione di corda (1,8 m di lunghezza) chiuse da **nodi guida** semplici. I valori di forza presentati sono la **media di almeno due risultati** di test analoghi.

01.e) Risultati sperimentali – I valori ottenuti con i **test sull'idrolisi** sono stati sintetizzati sinotticamente in grafici che riportano le variazioni della forza in funzione del tempo (ore), a cominciare dal momento in cui è avvenuta l'immersione in acqua. Come valore iniziale di riferimento (tempo "zero") i carichi F_r o F_{rn} con corda asciutta.

Per i valori ottenuti con il **processo inverso d'asciugatura** si procede nella stessa maniera, costruendo dei grafici in cui si riportano le forze F_r o F_{rn} in funzione del tempo passato dall'emersione dei campioni di corda dall'acqua. Come valore iniziale del processo d'asciugatura (tempo "zero") si riporta la media dei valori di F_r o F_{rn} ottenuti sui campioni in immersione.

01.e.a) Idratazione-idrolisi – Otto sono i grafici che si riferiscono a quest'azione, uno per ogni tipo di corda elencato. Ricordiamo che ogni valore immesso è il risultato della **media di almeno due test** uguali.

01.e.a.1) Corda Edelrid Static 10 mm Nuova – In **Figura 86** è contenuto il grafico di una corda **nuova**, emblematica per progressione speleologica: la **Edelrid Static da 10 mm**.



01.e.a.1.1) Prima considerazione: dopo l'immersione in acqua (U.R. 100 %) l'effetto riduttivo dell'idrolisi si manifesta completamente e rapidamente – La linea tratteggiata rossa "igro" delle curve relative ai carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} discende immediatamente e **nel giro di un'ora** raggiunge i valori, rispettivamente, di **2974 kgp** e **1489 kgp**, che poi **verranno mantenuti in tutte le rilevazioni successive**, fino a 48 ore dopo l'immersione.

Questa **immediatezza nella completa realizzazione dell'effetto idrolisi**, ricordiamo, è dovuta alla Legge di Fick (pag. 70, **Relazione 17**) che contempla un coefficiente di diffusione D elevatissimo per fili elementari del diametro di circa **30 μm** (pag. 72, **Figura 62**).

Si conferma quindi che una corda in Nylon nuova quando viene portata in grotta (U.R. 100 % che equivale all'immersione in acqua) subisce **immediatamente l'effetto riduttivo completo per idrolisi**.

01.e.a.1.2) Seconda considerazione: l'entità dell'effetto riduttivo per idrolisi si raddoppia in presenza di nodi; ruolo della Temperatura di Transizione Vetrosa - Questo effetto si aggira intorno al **-16%** per la corda trazionata senza nodi d'aggancio ed è in media il **-29%** per la corda testata con nodi d'aggancio: quasi il doppio.

E' dunque evidente che la presenza di nodi inserisce nelle corde bagnate non solo l'effetto riduttivo dell'idrolisi, ma anche l'altro fattore degradante legato alle variazioni del valore della Temperatura di Transizione Vetrosa T_g del Nylon in dipendenza dell'U.R.: aumentando questa, la T_g diminuisce e di conseguenza decresce ulteriormente F_{rn} (pag. 80, **Figura 72**).

01.e.a.1.3) Terza considerazione: l'effetto per idrolisi combinato all'effetto nodo – Nella progressione speleologica è assolutamente necessario che una corda debba essere annodata e che quindi al decadimento per idrolisi si aggiunga il decadimento per la presenza di nodi (altri modi d'ancoraggio, per esempio con i bloccanti, sono ancor più peggiorativi). Da ciò discende la necessità ineludibile di valutare anche la combinazione dei due effetti.

Per il solo effetto nodo la corda nuova asciutta diminuisce il carico di rottura del **40 % (2139 kgp contro 3565 kgp)**. Aggiungendo l'effetto idratazione si passa dai **3565 kgp** ai **1489 kgp**, con una diminuzione complessiva del **58 %**. Di fatto, i due effetti si sommano: **18 %** più **40 %**.

Dai test effettuati e riportati sempre in **Figura 86** si registra che la riduzione del carico di rottura F_r con corda asciutta è del **40 % (2139 kgp contro 3565 kgp)**. Ma con l'effetto idrolisi si passa al **58 % (1489 kgp contro 3565 kgp)**. Per questo tipo di corda l'effetto riduttivo complessivo è il risultato della somma dei due.

Nel complesso, una corda nuova asciutta, non appena diventa operativa entrando nell'armo di una grotta dove l'U.R. è del 100 %, dopo appena un'ora di permanenza riduce del **58 %** il sul carico di rottura, con un valore di **1489 kgp**, più elevato di soli **389 kgp** rispetto al **Limite Inferiore di Resistenza (LIR) fissato a 1100 kgp**.

Ma il carico di rottura residuo di **1489 kgp** è di certo più che sufficiente per garantire affidabilità e sicurezza alla corda all'inizio del suo uso. Ma è anche molto prossimo a raggiungere i **1100 kgp** del Limite Inferiore di Resistenza (LIR), limite inferiore di resistenza alla rottura per ogni componente della Catena di Sicurezza speleo.

Sapendo bene che l'uso in grotta, anche di breve durata e di moderata intensità, produce decadimento e degradazione nelle proprietà meccaniche delle fibre di Nylon, ogni corda ben presto si trova a operare non troppo distante dal superamento del LIR e quindi in condizioni di ridotta affidabilità.

Anche da ciò, dunque, discende la necessità di utilizzarle seguendo le regole della tecnica d'armo corrette, mantenendole e conservandole in modo adeguato. Il che si può fare soprattutto se si conoscono le caratteristiche delle corde, nel loro complesso e dei fili elementari che le compongono. Scopo per il quale nasce questo lavoro.

01.e.a.2) Corda Edelrid Static 10 mm Usata – In **Figura 87** il grafico dello stesso tipo di corda del punto precedente, ma **usata** (7 anni di utilizzo di normale attività, in grotta, senza prolungate permanenze).

01.e.a.2.1) Prima considerazione: analogia nelle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ della corda nuova e usata – Si confermano valide anche per la corda usata le osservazioni fatte sull'immediatezza dell'effetto idrolisi (dopo un'ora è completata) e sulla costanza dei valori ottenuti con corda bagnata con U.R. al 100 %.

01.e.a.2.2) Seconda considerazione: effetto idrolisi ridotto – Se con la corda nuova il processo di idratazione riduceva F_r del **16 %** e F_{rn} del **30 %**, nella corda usata le riduzioni rispettive sono del **10 %** e del **10 %**.

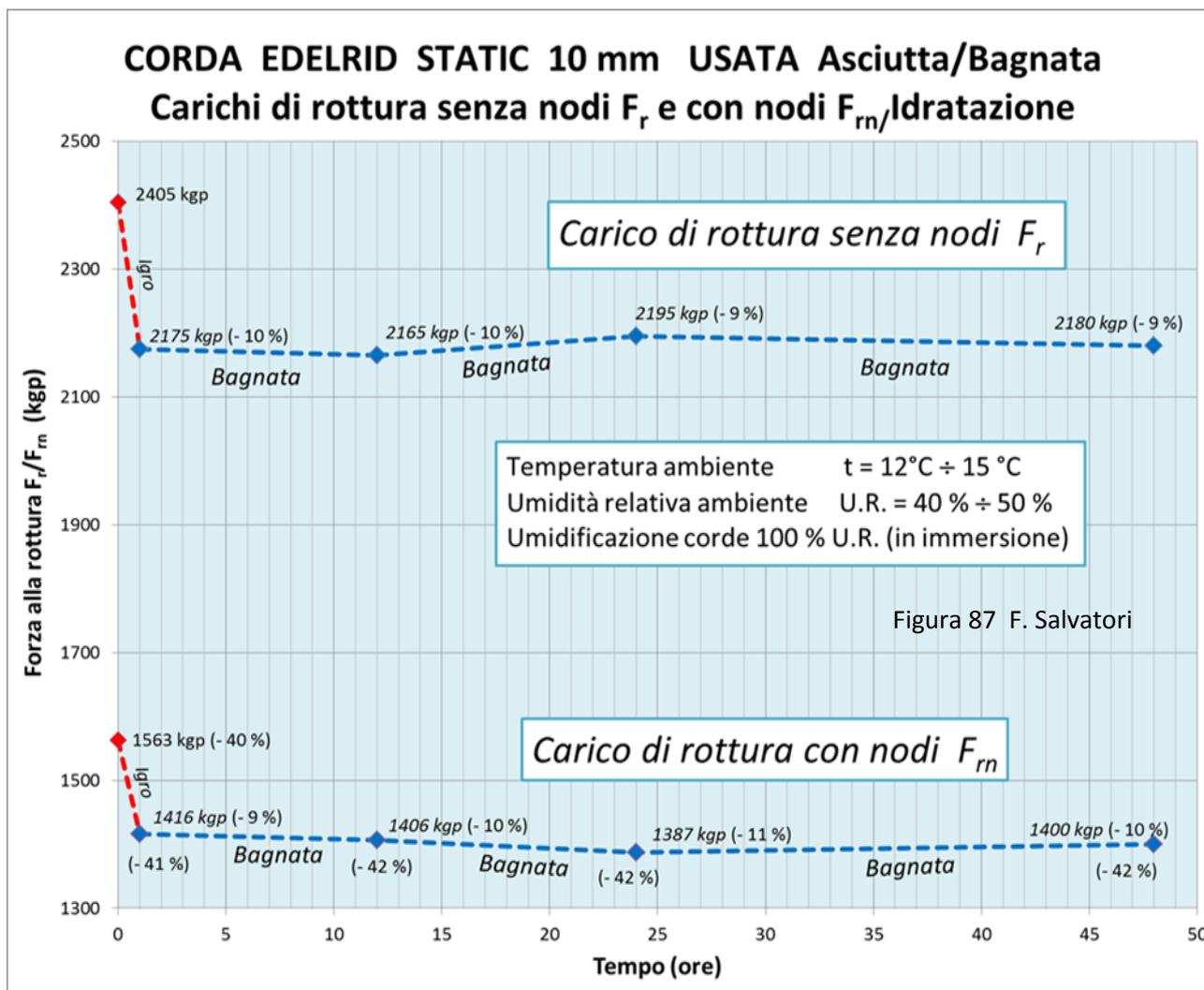
Questa differenza fra corde nuove e usate è legata verosimilmente al fatto che con l'uso la parte amorfa dei fili elementari aumenta d'estensione, a scapito dell'estensione dei settori cristallini. (pag. 101, **Figure 84 – 85**).

Questo significa che aumenta la percentuale di acqua assorbita per igroscopia per la maggiore disponibilità di spazi nei settori amorfi, ma al tempo stesso, visto che i legami idrogeno sono presenti solo nelle zone cristalline, si riduce anche il numero di legami intermolecolari da interrompere, compromettendo in misura ridotta il carico di rottura della corda per l'effetto dell'idratazione.

Questa particolare situazione fa sì che l'effetto riduttivo complessivo nella corda usata sia inferiore a quello riscontrato nella corda nuova. Rispettivamente: per l'**usata 2405 kgp** discendono a **1416 kgp** (– **41 %**), per la nuova **3565 kgp** diminuiscono a **1489 kgp** (– **58 %**).

E' evidente che il **risultato finale non è molto diverso: 1489 kgp** per la corda nuova contro **1416 kgp** per l'usata.

Questa risultanza sperimentale conferma risultati analoghi evidenziati in altre ricerche: l'uso produce nelle corde un decadimento e un degrado che fanno diminuire le loro proprietà meccaniche; ma è altrettanto vero che l'effetto nodo e idrolisi hanno una minore rilevanza. Il che è un fattore che prolunga, e non di poco, l'utilizzo affidabile di una corda.



01.e.a.3) Corda Beal Antipodes Statica 10 mm Nuova – In **Figura 88** il grafico di una corda **nuova**, emblematica per progressione speleologica: la **Antipodes da 10 mm della Beal**. Una corda molto utilizzata, da decenni, perché nel tempo mantiene una buona duttilità. Ma il suo carico di rottura senza nodi è di 1000 kgp inferiore a quello della corda Edelrid Static 10 mm esaminata nei precedenti commi (**Figure 86 – 87**), la cui rigidità è ben nota e tale da rendere difficoltoso l'esecuzione di nodi.

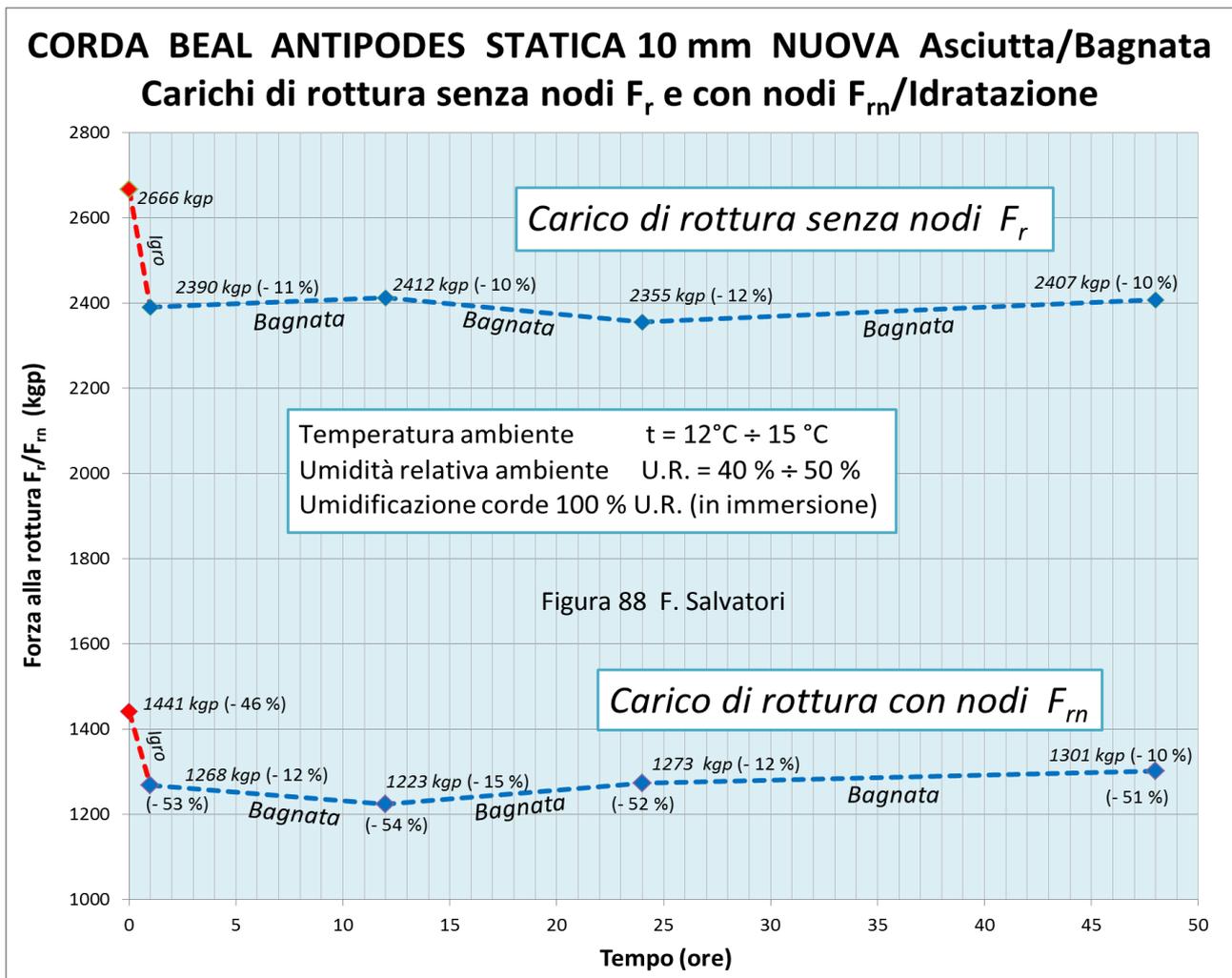
01.e.a.3.1) Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello della Edelrid Static precedentemente esaminata – Anche qui la linea tratteggiata rossa "igro" delle curve relative ai carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} discende immediatamente e **nel giro di un'ora** raggiunge i valori, rispettivamente, di **2390 kgp** e **1268 kgp**, che poi **verranno mantenuti in tutte le rilevazioni successive**, fino a 48 ore dopo l'immersione.

Anche in questo caso risulta evidente per via sperimentale che l'idratazione igroscopica è praticamente immediata e altrettanto immediata è l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari.

Altrettanto inconfutabile è il fatto che l'entità dell'idrolisi, una volta raggiunto il massimo valore, si mantiene costante nel tempo fintanto che si mantiene l'immersione in acqua.

01.e.a.3.2) Seconda considerazione: cambiano le percentuali dell'effetto idrolisi – Sulla corda nuova/asciutta la riduzione dei carichi di rottura per effetto idrolisi è **- 11 % senza nodi** e **- 12 % con nodi**. Per l'Edelrid sono più elevati, soprattutto per la corda annodata: rispettivamente, **- 16 %** e **- 29 %**.

Essendo entrambe le corde costituite da fili elementari di Nylon 6, queste differenze non sono spiegabili con processi chimici che, a parità di condizioni d'idratazione, si realizzano quantitativamente in modo differente. Ne è probabile che le diverse tessiture della struttura complessa delle corde incida sull'idrolisi.



E' più verosimile che i due filati, nonostante che le corde fossero nuove, avessero dei gradi di cristallinità differenti: minore per l'Antipodes, più elevato per l'Edelrid. Come a dire che quest'ultima corda sia confezionata con un Nylon di qualità superiore.

E a tal proposito si ricordi che i filati di poliammide hanno gradi di cristallinità differenti a seconda dell'umidità presente nella fase iniziale della filatura (miscelatore + estrusore + stiratura, pag. 61, Figura 49). Maggiore è la fase d'essiccazione iniziale, migliore è la qualità del filato e più elevato il costo.

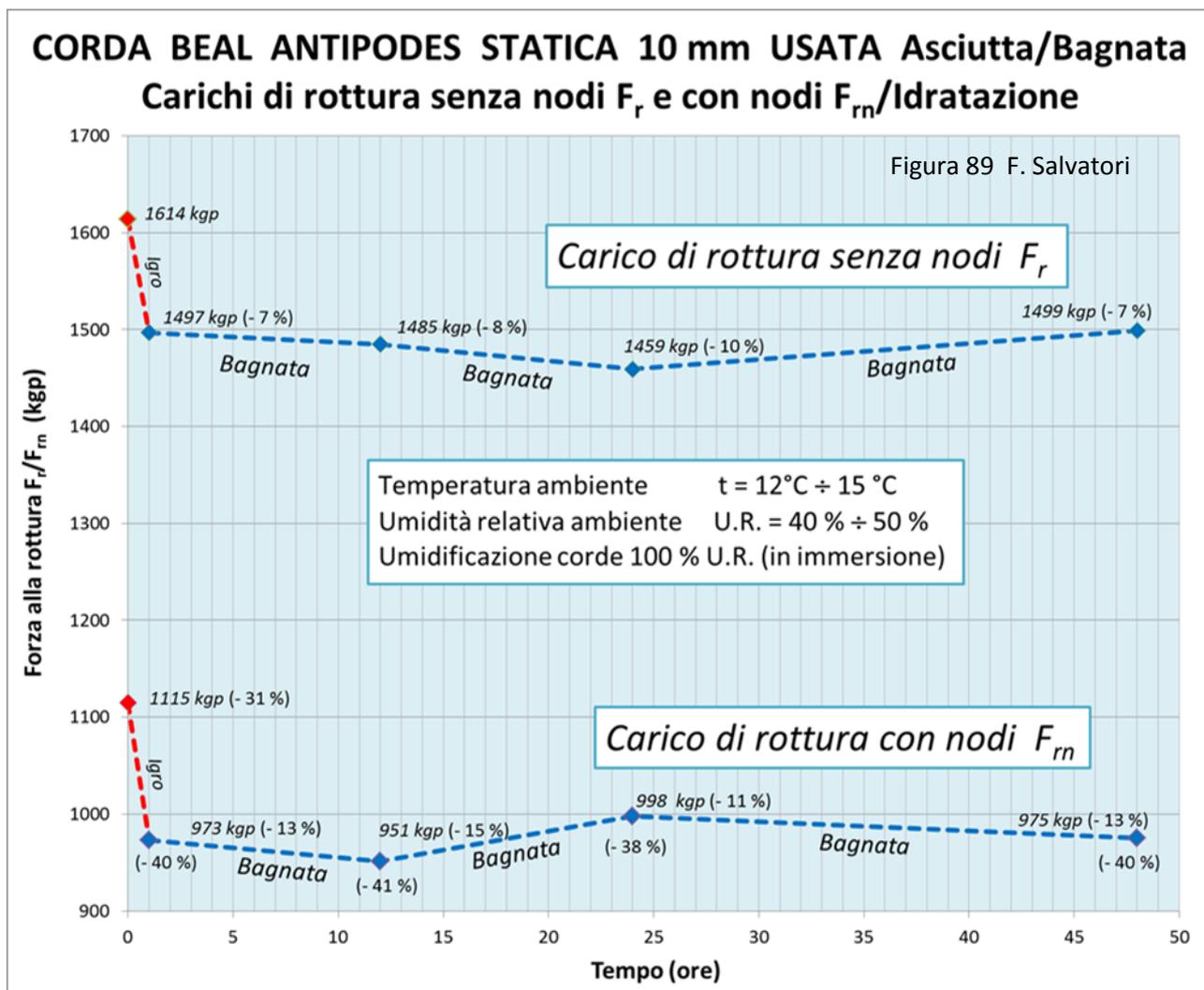
La qualità inferiore del Nylon 6 porta, di conseguenza, a una minore Temperatura di Transizione Vetrosa e quindi di conseguenza a una maggiore entità dell'effetto nodo.

Per contro si rileva che (e non poteva essere diversamente) la somma degli effetti idrolisi e nodo è più rilevante nella corda Edelrid (- 58 %) rispetto a quella della Beal Antipodes (- 53 %).

In conclusione, il risultato riduttivo totale degli effetti imprescindibili per l'uso in grotta porta a un carico di rottura di **1490 kgp** per l'Edelrid Static e di **1280 kgp** per la Beal Antipodes. Considerato infine che l'uso porta la corda, inevitabilmente, a una rapida decrescita delle proprietà meccaniche del Nylon, il suo l'utilizzo in sicurezza e affidabilità ha periodi di tempo più limitati.

01.e.a.4) Corda Beal Antipodes 10 mm Usata – In Figura 89 i grafici relativi a questo tipo di corda, costruiti con le modalità già indicate in precedenza.

01.e.a.4.1) Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello della stessa corda nuova – Anche qui la linea tratteggiata rossa "igro" delle curve relative ai carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} discende immediatamente e nel giro di un'ora raggiunge i valori, rispettivamente, di **1497 kgp** e **973 kgp**, che poi verranno mantenuti in tutte le rilevazioni successive, fino a 48 ore dopo l'immersione.



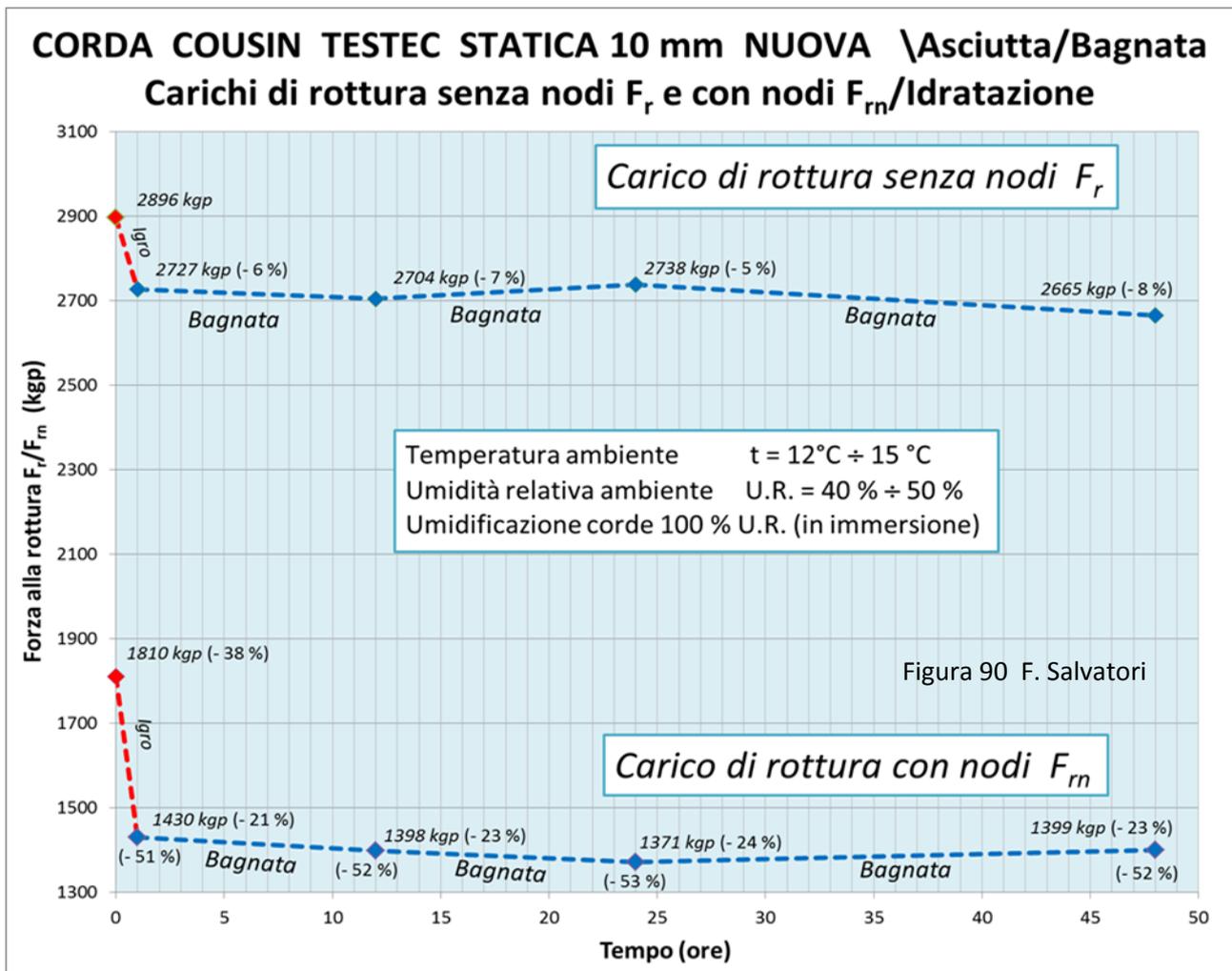
01.e.a.4.2) Seconda considerazione: si conferma il risultato sperimentale che l'effetto nodo nelle corde usate è **minore** – E' una constatazione sperimentale generalizzata che nelle corde usate l'effetto nodo si riduce: per la corda Beal Antipodes **nuova**/asciutta è del **46 %**, mentre scende al **31 %** per la corda **usata**/asciutta.

01.e.a.4.3) Terza considerazione: le percentuali dell'effetto idrolisi e dell'effetto nodo fanno discendere i carichi di rottura sotto il valore del LIR – Separatamente, le riduzioni portate dall'effetto idrolisi e dall'effetto nodo non portano a diverse considerazioni da quelle dette per l'Antipodes nuova. A parte il fatto che l'usura della corda ha portato a una diminuzione generalizzata dei carichi di rottura a seguito della diminuzione del grado di cristallinità dei fili elementari (pag. 101, Figure 84 – 85).

Invece c'è da sottolineare che i valori finali dovuti alla somma dei due effetti portano la corda usata (più di due anni con utilizzo molto intenso in grotta) a raggiungere valori inferiori ai 1100 kgp del LIR, **rendendola di fatto inaffidabile, sia pur per soli 100 kgp in meno**. Questo risultato conferma quanto costatato con l'esperienza riportata nella **Parte IV** (pag. 103) che indica, preferenzialmente, in due anni il limite temporale d'utilizzo affidabile per una generica corda speleo quanto questi avviene intensamente e in particolari condizioni aggravanti.

01.e.a.5) Corda Cousin Testec 10 mm nuova – In **Figura 90** i grafici relativi a questo tipo di corda, costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza.

01.e.a.5.1) Prima considerazione: l'andamento delle curve $F_r = f(\text{tempo})$ e $F_{rn} = f(\text{tempo})$ è del tutto uguale a quello delle due corde statiche precedentemente esaminate – Anche qui la linea tratteggiata rossa "igro" delle curve relative ai carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} discende immediatamente e nel giro di un'ora raggiunge i valori, rispettivamente, di **2727 kgp** e **1430 kgp**, che poi, come in precedenza, sono mantenuti in tutte le rilevazioni successive, fino a 48 ore dopo l'immersione.



01.e.a.5.2) Seconda considerazione: ridotto effetto idrolisi ma pari effetto complessivo – E' la corda che mostra la **più bassa percentuale riduttiva per effetto idrolisi**, fermandosi ad appena il **6 %** e attestando, quindi, una **qualità inferiore dei fili elementari**.

Ma sommando l'effetto idrolisi all'effetto nodo, il risultato finale è di un carico di rottura di **1430 kgp**, con una riduzione complessiva del **52 %**. Tutti valori compatibili con quelli ottenuti con le altre corde speleo nuove

01.e.a.6) Corda Edelrid Static Low Stretch 10,5 mm Nuova – In **Figura 91** i grafici relativi a questo tipo di corda, costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza.

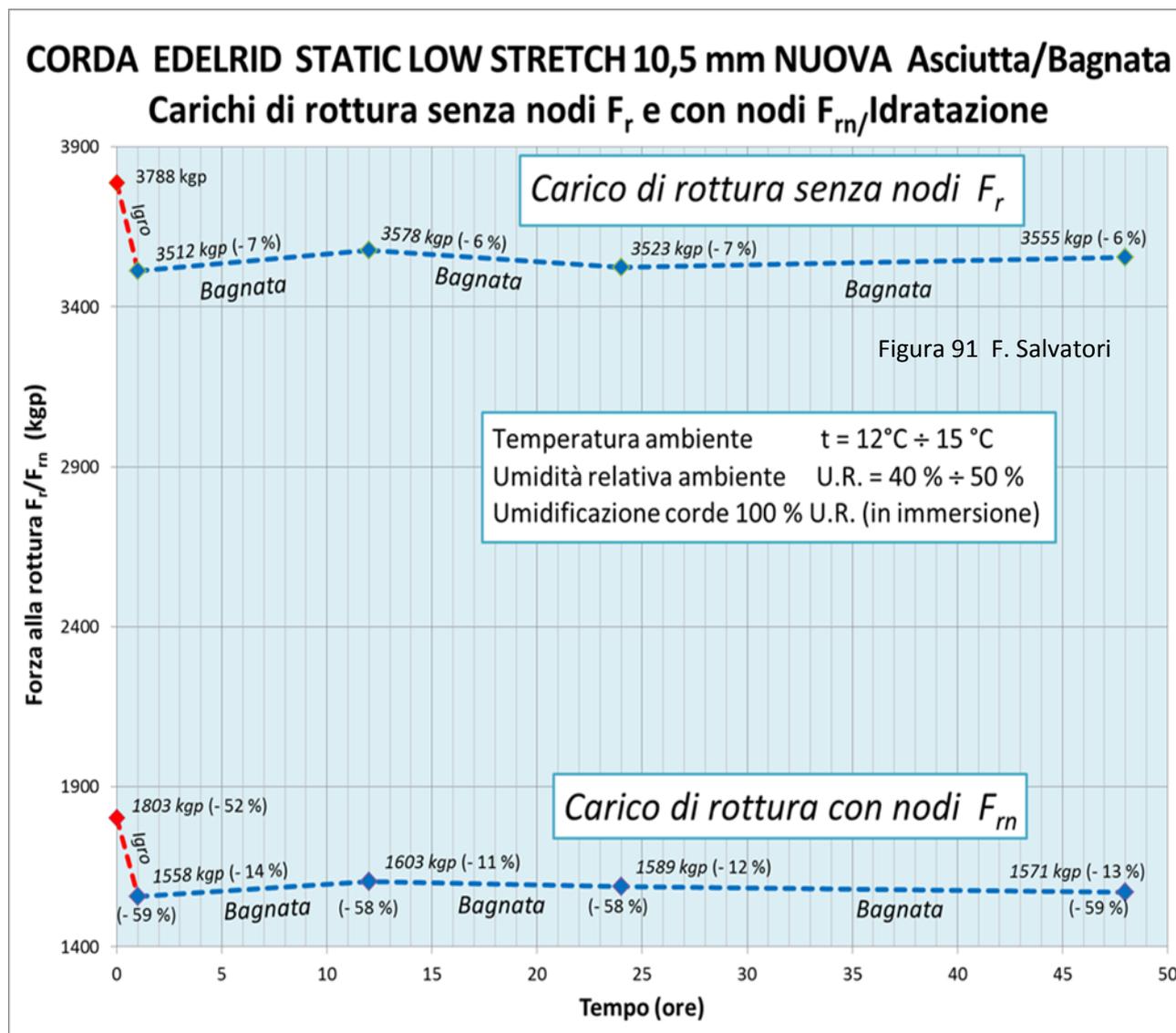
E' una corda d'alta gamma, abbastanza costosa, il cui comportamento al contatto con l'acqua è del tutto simile a quello riscontrato nelle corde prima esaminate. Si distingue solo dall'altra corda Edelrid Static 10 mm di bassa gamma (costa la metà), che ha un **effetto idrolisi pressoché triplicato**, quindi di qualità inferiore.

Si distingue dalle altre corde descritte in questa Parte perché è l'unica ad avere la calza tessuta con fibre di Nylon 6.6. E' verosimile ritenere che il suo più elevato carico di rottura **F_r (3788 kgp contro 3565 kgp)** sia dovuto proprio alla più alta Tenacità di questo nuovo filato (**0,64 N/Tex** contro **0,47 N/Tex**).

La corda Edelrid Static Low Stretch si distingue anche per l'elevatissimo effetto nodo da nuova/asciutta, ben il **52 %** contro il **40 %** della Edelrid di bassa gamma.

Ma c'è da rilevare anche che fra le due corde Edelrid non c'è differenza se si valuta la somma degli effetti, idrolisi + nodo: **- 58 %** per la Static e **- 59 %** per la Low Stretch.

Unica differenza a favore della Low Stretch sta nel fatto che questa ha un carico di rottura finale superiore all'altra Edelrid: **1580 kgp** contro **1490 kgp**, più o meno i **100 kgp** che derivano dalla presenza della calza in Nylon 6.6.



Da quanto commentato qui sopra risaltano tre fatti:

1. la conoscenza della struttura chimico-fisica dei materiali che compongono una corda porta a conoscerne teoricamente i comportamenti più intimi e particolareggiati;
2. queste conoscenze teoriche portano a ipotizzare comportamenti e reazioni che hanno la necessità di essere confermate sperimentalmente;
3. non è tutto oro quello che luccica.

01.e.a.7) Corda Beal Edlinger Dinamica 9,8 mm Nuova e Usata – Nelle **Figura 92 - 93** sono disegnati i grafici relativi a queste corde, costruiti con le modalità precedentemente utilizzate.

Come è possibile evidenziare dai grafici in esse contenuti, l'andamento e i valori dei carichi di rottura sono del tutto comparabili a quelli delle analoghe corde statiche, raggiungendo a causa della somma dell'effetto idrolisi e dell'effetto nodo, i **1400 kgp** da nuova e i **960 kgp** da usata.

Ma una diversità netta fra la Beal Edlinger dinamica e le altre corde già esaminate esiste: essendo una corda utilizzata in ambiente esterno dove l'U.R. è raramente vicino al 100 %, l'effetto idrolisi è molto ridotto rispetto a quello presente all'interno di una grotta.

Pertanto, sia da nuova che usata, quei valori limite di **1400 kgp** e **960 kgp** non possono essere raggiunti, se non i casi estremi (pioggia o contatto con neve/ghiaccio in fusione) o utilizzando corde dinamiche per attività speleologica.

CORDA BEAL EDLINGER DINAMICA 9,8 mm NUOVA Asciutta/Bagnata
Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Idratazione

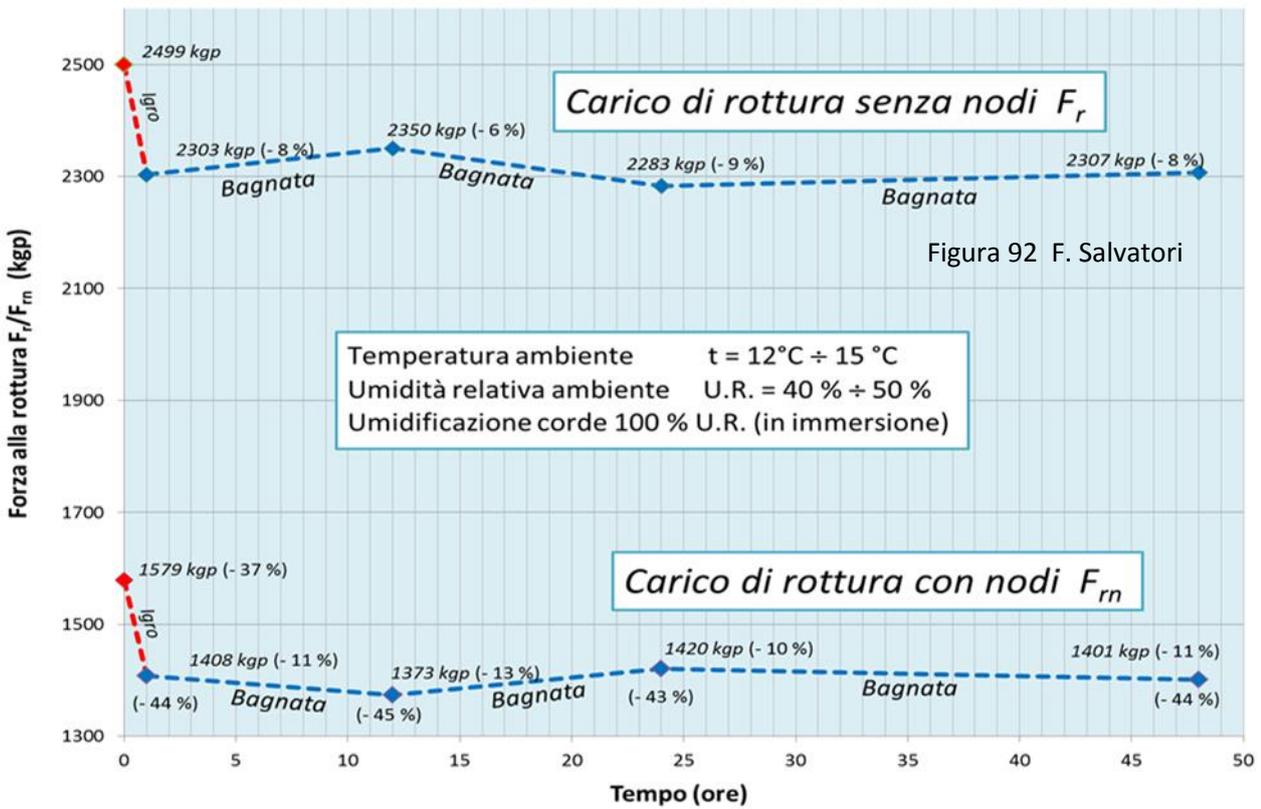


Figura 92 F. Salvatori

CORDA BEAL EDLINGER DINAMICA 9,8 mm USATA Asciutta/Bagnata
Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Idratazione

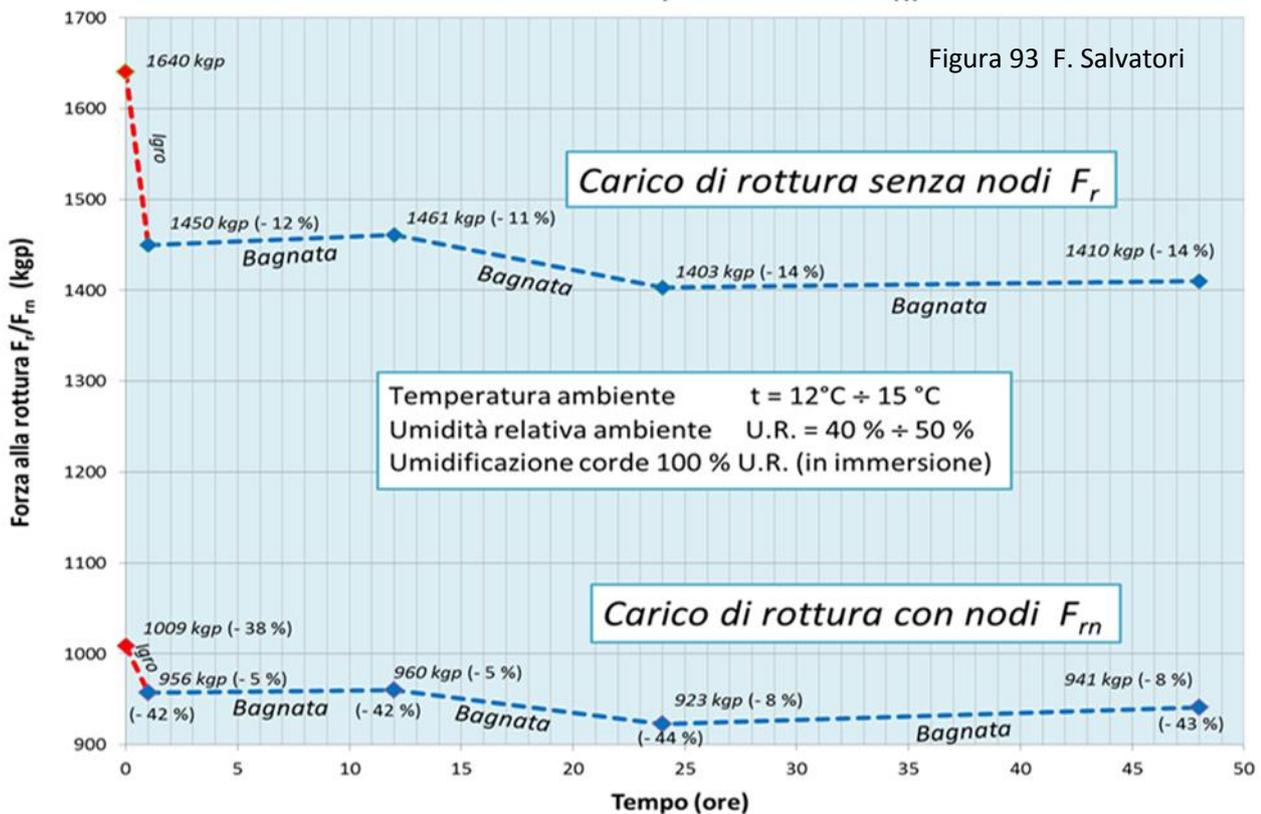


Figura 93 F. Salvatori

01.e.a.8) Tabella di sintesi per l'Effetto Idrolisi e Nodo – In **Figura 94** è contenuta la sintesi dei risultati sperimentali sull'Effetto Idrolisi e l'Effetto Nodo, presi separatamente e sommati.

Legenda Effetto Idrolisi, Effetto Nodo ed Effetto Idrolisi + Effetto Nodo	
(A)	<i>Corda asciutta nuova/usata condizionata in ambiente con temperatura $t = 12^{\circ}\text{C} \div 15^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa U.R. = 40 % \div 50 %.</i>
(B)	<i>Corda umidificata con immersione in acqua (equivalente a condizionamento con U.R. al 100 %)</i>

Figura 94 F. Salvatori

Corda		$F_r(A)/F_r(B)$ Effetto idrolisi senza nodi	$F_{rn}(A)/F_{rn}(B)$ Effetto idrolisi con nodi	$F_r(A)/F_{rn}(A)$ Effetto nodo corda asciutta	$F_r(A)/F_{rn}(B)$ Effetto nodo + effetto idrolisi
Edelrid Static	Nuova	- 16 %	- 29 %	- 40 %	- 57 %
Edelrid Static	Usata	- 10 %	- 10 %	- 40 %	- 42 %
Antipodes	Nuova	- 11 %	- 12 %	- 46 %	- 53 %
Antipodes	Usata	- 8 %	- 13 %	- 31 %	- 40 %
Cousin Testec	Nuova	- 7 %	- 23 %	- 38 %	- 52 %
Edelrid Stretch	Nuova	- 7 %	- 13 %	- 52 %	- 59 %
Beal Edlinger	Nuova	- 8 %	- 11 %	- 37 %	- 44 %
Beal Edlinger	Usata	- 13 %	- 7 %	- 38 %	- 43 %

01.e.a.8.1) Prima considerazione: effetto idrolisi e qualità delle fibre utilizzate per il confezionamento delle corde - In **primo luogo**, risalta con evidenza che - pur essendo tessute tutte le corde con la stessa fibra Nylon 6 (a parte la calza della Edelrid Low Stretch che è di Nylon 6.6), mostrano una certa dispersione dei dati.

Quando invece, specie nella condizione “nuove”, dovrebbero avere una **omogeneità** di comportamento dettata dal fatto che l'idrolisi e le variazioni della Temperatura di Transizione Vetrosa sono **fenomeni chimico-fisici** che incidono in misura uguale quando il materiale su cui agiscono ha sempre la **stessa struttura atomico-molecolare**. E' dunque verosimile ritenere che altri fattori vanno a influenzare il fenomeno dell'idratazione igroscopica delle poliammidi.

Una prima causa può essere la qualità nel rapporto cristallino/amorfo del Nylon 6,; qualità strettamente legata al valore iniziale di umidità della materia prima: tanto più è elevata la presenza d'acqua nel Nylon immesso nel miscelatore tanto peggiori sono le proprietà meccaniche dei fili elementari (il tutto legato al processo di essiccazione della materia prima).

Se l'essiccazione è condotta adeguatamente si raggiunge una percentuale d'acqua inferiore all' 1 %; in questo caso il Nylon può guadagnare un rapporto cristallino/amorfo anche superiore al 60 % (con il Nylon 6.6 si raggiunge anche il 75 %).

Ricordando che i legami idrogeno sono concentrati soprattutto nei settori cristallini, ne discende che l'entità complessiva dell'idrolisi dipende dall'estensione dei settori cristallini: tanto più si estendono tanto maggiore sarà la riduzione dei carichi di rottura.

01.e.a.8.2) Seconda considerazione: effetto idrolisi come misura della cristallinità del Nylon nei fili elementari delle corde – Sintetizzando il contenuto del precedente comma, il valore dell'**effetto idrolisi** su una corda può essere interpretato anche come una **misura della buona qualità della fibra** che la compone.

Infatti, essendo le **proprietà meccaniche** (fra cui il carico di rottura e il Modulo d'elasticità) **legate** in gran parte al grado di **cristallinità dei fili** elementari e risultando che **l'effetto idrolisi** si manifesta quasi esclusivamente **nei settori cristallini** dove i legami idrogeno possono crearsi (data la disposizione in catene allungate e parallele di macromolecole di poliammide e viste le dimensioni degli spazi interatomici dove allocare le molecole d'acqua d'origine igroscopica), il **valore numerico percentuale dell'idrolizzazione** determinato dalla condizione standard prodotta dall'immersione in acqua (equivalente a un ambiente con U.R. pari al 100 %) è un **indice quantitativo della cristallinità dei fili elementari**. E quindi della "qualità" della poliammide che compone i fili elementari.

Altrimenti, la misura adeguatamente precisa della cristallinità può essere ottenuta solo con opportune analisi diffrattometriche. Analisi che in questo lavoro non sono state eseguite.

Nella presente fattispecie, da quanto risulta nella Tabella di **Figura 94**, la **Corda Edelrid Static 10 mm** guida la classifica (- 16 %) mentre la **Cousin Testec** la chiude (- 7 %). Una "qualità", in quest'ultimo caso, ridotta alla metà; che indica la corda Edelrid come quella confezionata con il miglior filato polimerico.

E' un'ulteriore conferma alla correlazione "Effetto idrolisi"/"Cristallinità"/"Proprietà meccaniche" il rapporto fra Carico di rottura senza nodi della Edelrid e della Cousin: 3565 kgp contro 2896 kgp, nonostante che entrambe le corde abbiano dichiarato lo stesso diametro apparente e lo stesso filato (Nylon 6).

01.e.a.8.3) Terza considerazione: effetto idrolisi e corde usate – Sull'entità della diminuzione dei carichi di rottura per effetto idrolisi incide non poco il grado d'usura che la corda ha raggiunto.

Infatti - ricordando quanto descritto nella **Parte III** sull'influenza del calore, della successione degli choc e della depolimerizzazione delle catene di macromolecole nel modificare le caratteristiche chimico-fisiche delle fibre polimeriche – con l'uso le corde perdono cristallinità e, di conseguenza, si riducono di numero i legami idrogeno e, quindi, l'effetto dell'idratazione igroscopica.

Ne sono una dimostrazione i risultati sperimentali in tabella (**Figura 94**): tutte le corde usate hanno percentuali di decrescita per effetto idrolisi nettamente inferiore a quelle registrate per le equivalenti corde nuove. Ancora una dimostrazione quantitativa sperimentale che l'uso, specie in grotta, porta a un declassamento della qualità/cristallinità dei fili elementari.

01.e.a.8.4) Quarta considerazione: effetto nodo su corde nuove asciutte – Su questo tema risalta che la corda Edelrid Low Stretch 10,5 mm raggiunge il **52 %** (contro il **38 % - 40 %** delle altre corde esaminate), un valore inusualmente alto, legato verosimilmente al modo e alla tensione con cui è stata confezionata, condizioni che hanno reso molto rigida e poco "annodabile" la fune.

Questa correlazione fra rigidità e "annodabilità" è un fatto che è stato rilevato più volte in diversi programmi di ricerca sperimentali.

01.e.a.8.5) Quinta considerazione: la condizione reale con effetto idrolisi sommato a effetto nodo – L'ultima colonna a destra della Tabella di **Figura 94** registra i valori prodotti dall'insieme effetto idrolisi + effetto nodo, che sono quelli più propri per valutare, anche dal punto di vista strettamente operativo, i limiti di sicurezza e affidabilità di una corda usata per la progressione speleologica.

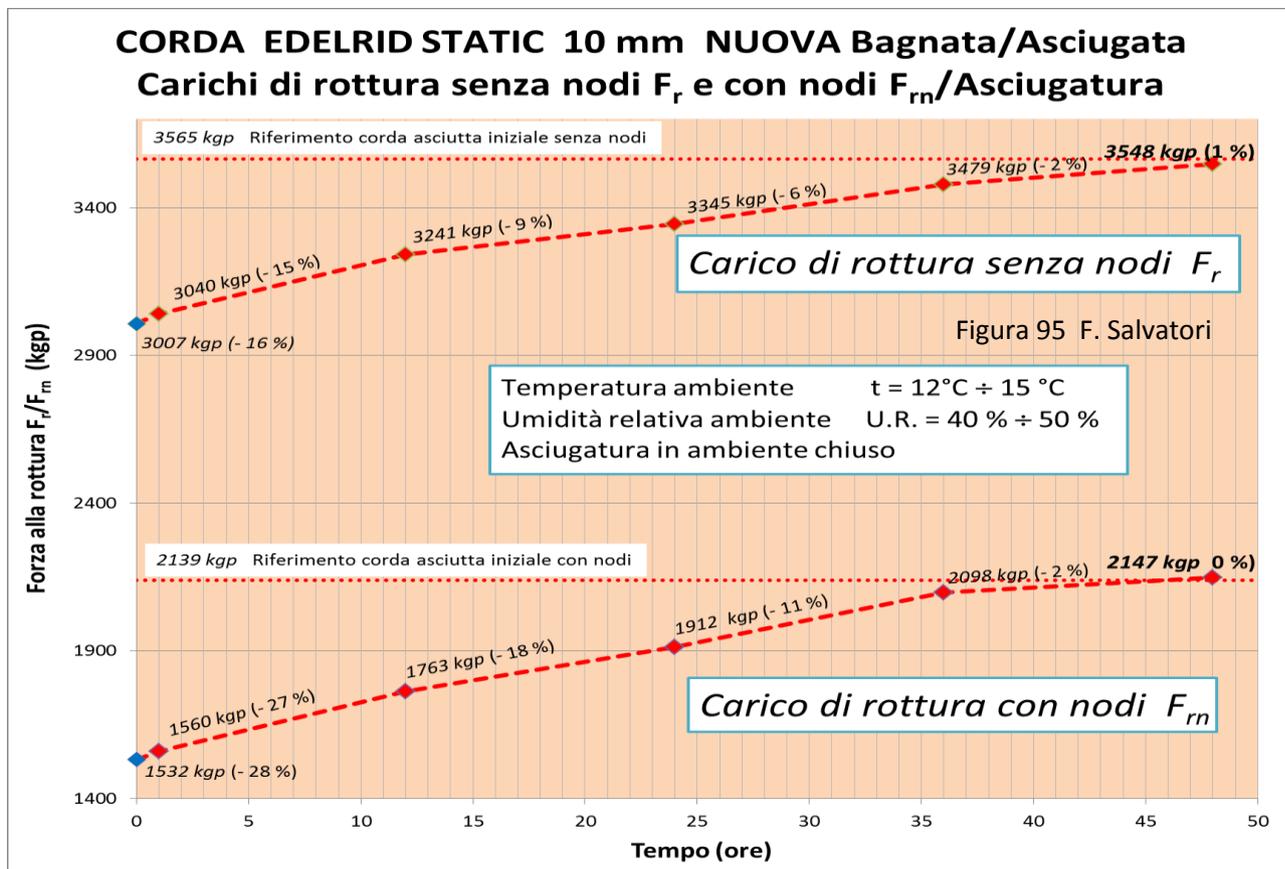
Risalta molto chiaramente che, partendo da una corda **nuova asciutta**, l'effetto complessivo di riduzione del carico di rottura è superiore al **-52 %**, con punte fino al **- 59 %**. In tal modo, ci si avvicina a superare, in ogni caso, i limiti di sicurezza previsti dal LIR.

Per le corde usate la percentuale di decadimento di F_r è minore, aggirandosi intorno al **40 %**; valore che porta le corde usate a superare in negativo il LIR. Ecco un altro segno che impone di utilizzare, mantenere e conservare le corde speleologiche nella maniera più corretta possibile.

Per le corde dinamiche usate in alpinismo (lontane comunque dal contatto con l'acqua) il problema dei limiti per garantire sicurezza e affidabilità, rispetto ai carichi di rottura, deve fare riferimento non all'ultima colonna ma alla penultima (Beal Edlinger 9,8 mm, - 37 % da nuova contro - 38 % da usata, senza la presenza di acqua). Una situazione sicuramente migliore rispetto alle corde statiche. Senza poi considerare l'ulteriore contributo dato alla maggiore "elasticità" delle corde per alpinismo.

01.e.b) Asciugatura – Per gli otto tipi di corda elencati (nuove/usate e asciutte/bagnate) sono stati eseguiti dei test a rottura a trazione quasi-statica. I risultati riportati sono la media di almeno due test uguali. La procedura sperimentale seguita è quella descritta nel precedente **Comma 01.e** (pag. 108).

01.e.b.1) Corda Edelrid Static 10 mm Nuova – In Figura 95 il grafico della corda Edelrid Static da 10 mm nuova.



01.e.b.1.1) Prima considerazione: evoluzione temporale dell'asciugatura di una corda nuova – Tolta la corda dall'immersione in acqua e posta ad asciugare nell'ambiente con U.R. compresa fra **40 %** e il **50 %** e temperatura oscillante fra i **12°C** e i **15°C**, inizia il processo di disidratazione con l'evaporazione dell'acqua igroscopica assorbita dai fili elementari poliammidici. Siamo al tempo "zero" del grafico: indicatore blu (**3007 kgp** per F_r e **1532 kgp** per F_{rn}).

I valori abbinati alle due curve si riferiscono ai carichi di rottura e, fra parentesi, alla percentuale mancante per completare il processo inverso di ricostituzione dei legami idrogeno.

Esaminando entrambe le curve d'asciugatura si registra che dopo un'ora i carichi di rottura sono saliti di qualche decina di kgp appena.

Per avere variazioni più rilevanti occorre attendere 12 ore (1/3 del processo completato), 24 ore (1/2 del processo completato), 36 ore (processo quasi completato), 48 ore (processo completato, con il raggiungimento del carico di rottura che la corda aveva nella condizione iniziale prima dell'immersione in acqua).

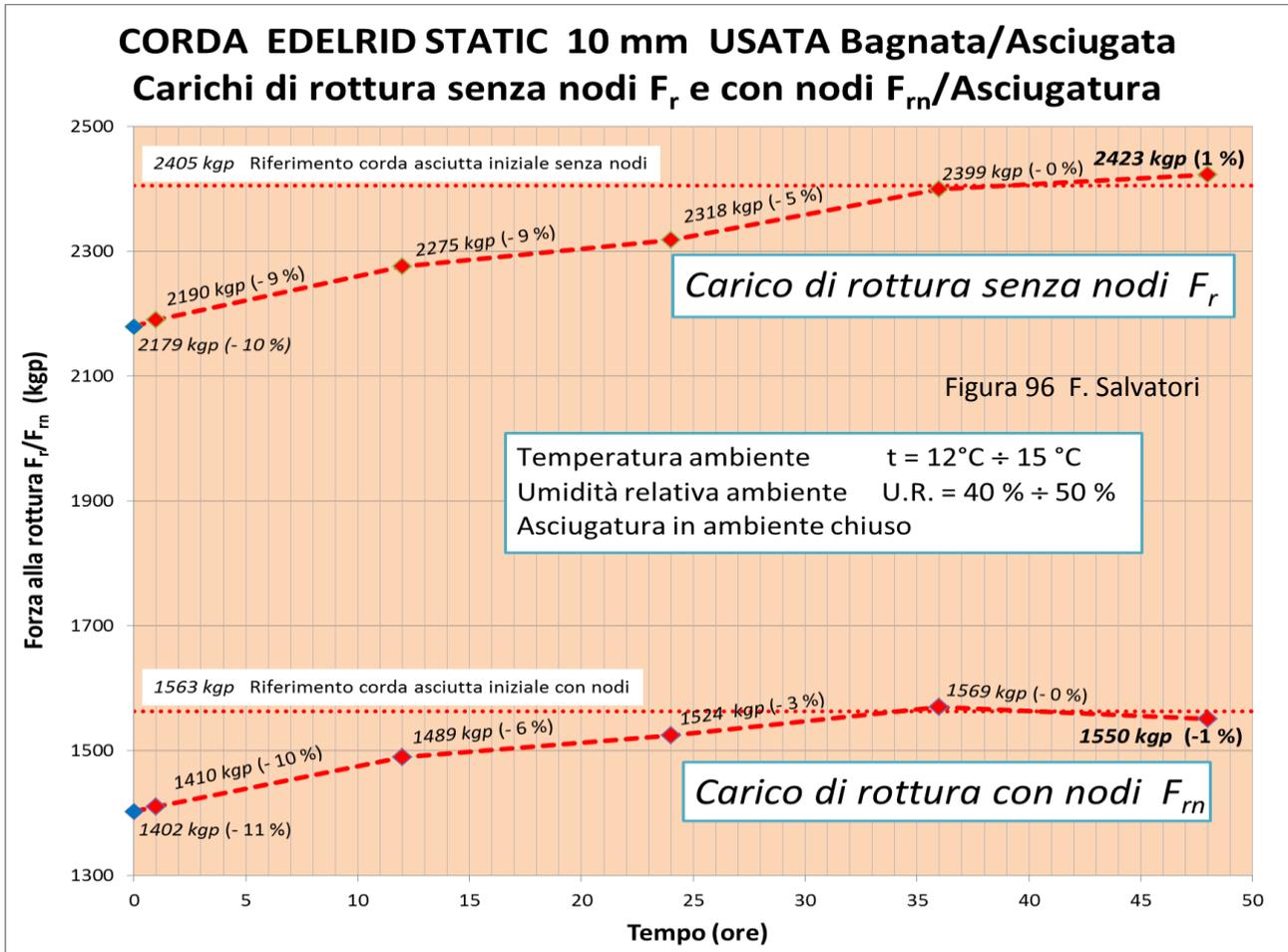
Con il ripristino delle condizioni d'idratazione iniziali i carichi di rottura tornano ad assumere i valori da nuova e asciutta (come riferimento la linea rossa punteggiata orizzontale). **Il processo d'idrolisi è dunque completamente reversibile.** E questo vale tanto per la corda senza nodi che con nodi.

Da considerare con nettezza: quanto affermato in questo Comma vale per corde rimaste immerse in acqua per un **massimo di quattro giorni**.

Se invece il tempo di permanenza in immersione è superiore, magari per mesi e anni, è necessario tenere presente anche il **decadimento** dei fili elementari per **Degradazione idrolitica** e **Depolimerizzazione delle**

catene di macromolecole poliammidiche: tutti processi **in parte irreversibili** che avanzano proporzionalmente al tempo passato in immersione e che si vanno ad aggiungere all'effetto idrolisi prima definito. (pag. 164, Figura 141; pag. 167, Figura 142).

01.e.b.2) Corda Edelrid Static 10 mm Usata – Nella **Figura 96** l'evoluzione temporale del processo d'asciugatura della stessa corda oggetto del precedente Comma, ma **usata**. I risultati sono del tutto analoghi: **stesso andamento e stessa tempistica**.



01.e.b.3) Per tutte le altre corde sottoposte ad asciugatura – In relazione a tutte le corde, nuove e usate, elencate in precedenza (pag. 108) possiamo concludere che i risultati sperimentali ottenuti affermano che i processi d'asciugatura sono del tutto analoghi, con la stessa progressione temporale e completamente reversibili. Tutti i grafici mancanti sono stati inseriti nell'**Appendici 04** (pag.300).

Parte V

*Test a trazione quasi-statica (lenta)
su corde speleo-alpinistiche*

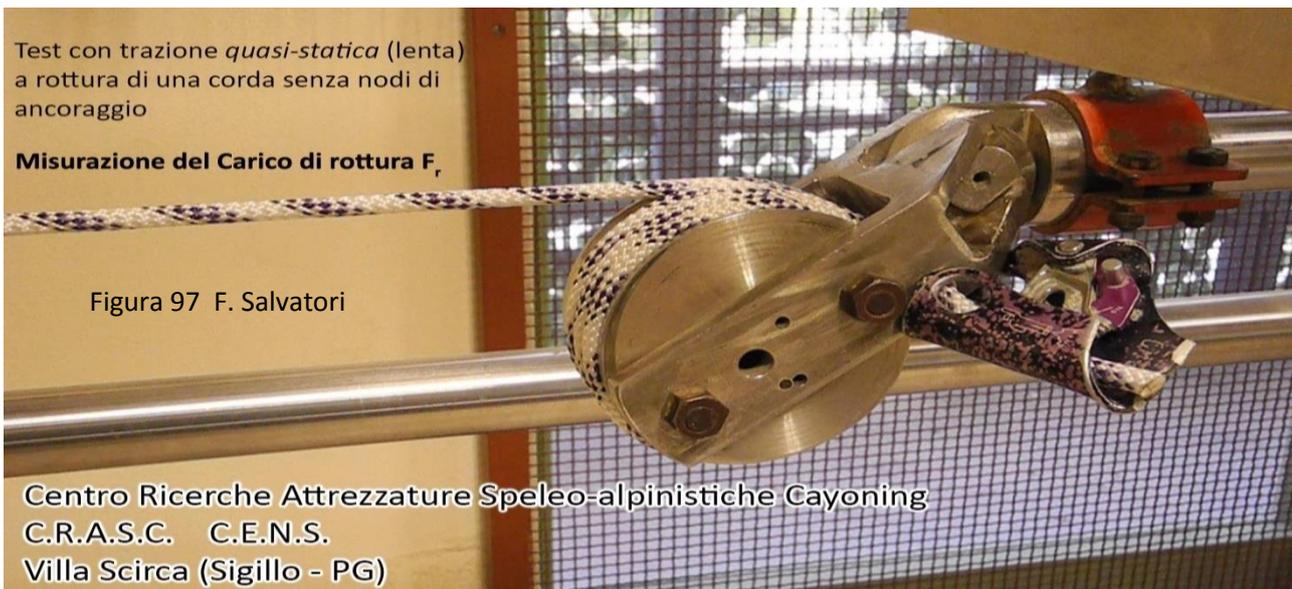
Valutazione del decadimento irreversibile

Decadimento in funzione del tempo
e del modo d'uso

Degradazione idrolitica, per raggi UV,
ossidazione e ozonizzazione

Effetto calore e choc ripetuti

Decadimento per immersione prolungata
in acqua



01. Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)

In questa **Parte V** sono presentati, analizzati e commentati i risultati di prove sperimentali svoltesi nell'arco di più anni, con la coordinazione del "Gruppo di Lavoro Materiali e Tecniche" (GLMT) prima e del "Gruppo di Studio Materiali e Tecniche" della SNS CAI (GSMT) poi.

I test sono stati eseguiti, quasi esclusivamente, nel Laboratorio Materiali del CENS (CRASC), con la collaborazione d'Istruttori della Scuola Nazionale di Speleologia del Club Alpino Italiano. Le ricerche e i test si sono svolti in più riprese, **nell'arco di 25 anni**.

Questa parte della pubblicazione può essere considerata come la presentazione completa dei risultati ottenuti col lavoro sperimentale **a trazione lenta** svolto dal GLMT/GSMT - dai primi anni novanta del secolo passato a oggi - sulle caratteristiche, sul decadimento, sulla degradazione e sui limiti di sicurezza delle corde per la speleologia (e la montagna).

Sulle strumentazioni, sui protocolli e sulle metodologie di sperimentazione a trazione lenta fare riferimento alla **Parte I** (pag. 20 e seg.).

Classificazione delle condizioni dei campioni di corda testati:

1. **NUOVA ASCIUTTA** – corda mai utilizzata, appena uscita di fabbrica e mantenuta in magazzino in assenza di raggi solari, a temperatura compresa fra 15 °C – 20°C, con U.R. 40 %; nessun contatto diretto con l'acqua;
2. **NUOVA BAGNATA** – corda come al punto precedente ma immersa in acqua per almeno 24 ore e irrorata d'acqua durante il test a trazione;
3. **NUOVA ASCIUGATA** – corda come al punto 2 ma asciugata per 24 ore in condizione ambiente-magazzino e testata entro le 24 ore successive;
4. **USATA ASCIUTTA**– corda usata nella progressione in grotta o in arrampicata sportiva per un tempo prolungato, asciugata mantenendola in magazzino a temperatura di circa 15 °C e U.R. 40 %;
5. **USATA BAGNATA** – corda come al punto precedente ma immersa in acqua per almeno 24 ore e irrorata d'acqua durante il test a trazione;
6. **USATA ASCIUGATA** – corda come al punto 5 ma asciugata per 24 ore in condizione ambiente-magazzino e testata entro le 24 ore successive.

ATTENZIONE:

- ✓ i valori ottenuti per il Carico di rottura delle corde non bagnate durante i test (asciutte e asciugate) non tengono conto del decadimento - completamente reversibile togliendo il contatto con l'acqua -

Caratteristiche, decadimento, degradazione e limiti di sicurezza

delle proprietà meccaniche delle poliammidi per effetto dell'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari (pag. 65, **Figura 57**; pagg. 74 – 75, **Figure 66 - 67**);

- ✓ in base ai risultati ottenuti con **test a trazione lenta** (pag. 117, tabella di **Figura 94**) la riduzione dei carichi di rottura F_r e F_{rn} per l'immersione in acqua varia fra il 10 % – 30 %, **decadimento che sempre è presente quando le corde entrano in grotta** (un'immersione completa in acqua equivale all'esposizione nell'ambiente grotta, dove l'U.R. è sempre al 100 %).

01.a) Condizioni sperimentali iniziali

Durata: **24 mesi**

Corda: **800 m di Beal Antipodes diametro 10,5 mm nuova** (statica) **Nylon 6** (acquistati dalla Commissione Centrale "Materiali Tecniche" del Club Alpino Italiano)

La corda è stata suddivisa in **20 campioni della lunghezza di 40 m ciascuno**.

Un campione (n° 1) è stato utilizzato per ricavare i valori iniziali di riferimento.

Un altro campione (n° 2) è stato utilizzato per verificare il decadimento naturale delle fibre della corda nell'arco di due anni, senza utilizzarla in alcun modo e conservandolo in assenza di luce e di scambi gassosi. Gli altri **diciassette campioni** sono stati distribuiti ad altrettanti Gruppi Speleologici (vedi elenco seguente) per farne un uso secondo le proprie necessità e modalità, ma con l'obbligo di elaborare una relazione sul loro utilizzo e di restituirli al GLMT alla scadenza di due anni.

N.B. Un campione di corda è stato disteso sopra il tetto del CNS a Costacciaro, con l'intento di verificarne, nell'arco di due anni, il decadimento per l'esposizione alla luce solare e agli agenti atmosferici. Ma è "scomparso" dopo circa 18 mesi e non è stato possibile analizzarlo.

01.b) Elenco dei campioni di corda (G. Grotte assegnatari) e relazioni sul loro uso

n°	Gruppi Grotte	Relazioni
01	CENS Costacciaro	Corda nuova, appena uscita di fabbrica (da 30 giorni max.)
02	CENS Costacciaro	Corda nuova, non usata e chiusa in un contenitore senza luce e scambi gassosi per 24 mesi
03	G.S. CAI Napoli	Grotte del M. Matese e del M. Alburno Discese: 61 Risalite: 85
04	G.G. CAI Carnago	Abisso Schiaparelli (Campo dei Fiori): calcare selcifero con acqua Discese: 130 Risalite: 130
05	G.G. CAI Belluno	Grotte e molte forre del bellunese Discese: 24 Risalite: 10
06	G.S. CAI Macerata	Grotte, forre e palestre dell'Appennino umbro-marchigiano Discesa: 241 Risalite: 230
07	G.S. CAI Feltre	Abisso dei Piani Eterni: calcare dolomia Temperatura 1°C ↔ 2°C Teleferica: 108 Discese: 42 Risalite: 42
08	Boegan CAI-SAG Trieste	Monte Canin e Carso triestino Discese: 100 Risalite: 100
09	Speleo G.A.M. Mezzano	Grotte varie nei gessi, con molta acqua e fango Discese: 271 Risalite: 271
10	G.G. CAI Saronno	Grotte, forre e palestre, con calcari selciferi e acqua Discese: 382 Risalite: 382
11	G.S. CAI Cento Talpe	Palestra, grotte nel gesso con acqua e fango Discese: 103 Risalite: 103
12	G.G. CAI SAT Rovereto	Grotte, palestre e forre del Trentino, anche basse temperature Discese: 156 Risalite: 156
13	G.G. XXX Ottobre Trieste	Grotte e palestre del Carso triestino Discese: 62 Risalite: 62
14	G.G. CAI Valstagna	21 mesi di armo fisso Pozzo Esterno Abisso Pianca Discese: 108 Risalite: 108
15	G.S. CAI Bolzaneto	Grotte Marguareis e Alpi Apuane, palestra esterna Liguria Discese: 343 Risalite: 343
16	G.S. CAI Lucca	Grotte, palestre e forre delle Alpi Apuane Discese: 264 Risalite: 264
	G.S. CAI Imperiese	Non inviato
	G.S. CAI Ravenna	Non inviato
	G.G. CAI Teramo	Non inviato

Figura 98 F. Salvatori

Nella prima colonna a sinistra c'è il numero che contraddistingue il campione di corda.

Nella colonna centrale è indicato il Gruppo Grotte che ha curato la sperimentazione sul terreno.

Nella colonna di destra è riportata in sintesi la relazione d'uso, con le eventuali particolari indicazioni geomorfologiche e idrologiche.

01.c) Test a rottura della corda senza nodo F_r (pag. 28 e seg. , Figure 17 - 18)

Su ogni campione di corda (elencati nella tabella di **Figura 98**) sono state eseguite prove a trazione lenta (0,006 m/sec) **senza nodi** fino alla rottura F_r (pag. 122, **Figura 97**). E' questo un valore, in kgp, che tiene conto della resistenza complessiva del materiale che costituisce la corda. **Non tiene conto della tessitura e della strutturazione**, cioè la CCCC.

01.d) Test a rottura della corda con nodo F_{rn} (guida con frizione) (pag. 21, **Figura 2**)

Prova a trazione lenta analoga alla precedente, ma con estremità del campione con gasse chiuse da un nodo **guida con frizione** (doppino sopra) per ottenere F_{rn} (in kgp).

01.e) Curve di carico/scarico con trazione fino a 1600 kgp (pag. 32, **Figura 21**)

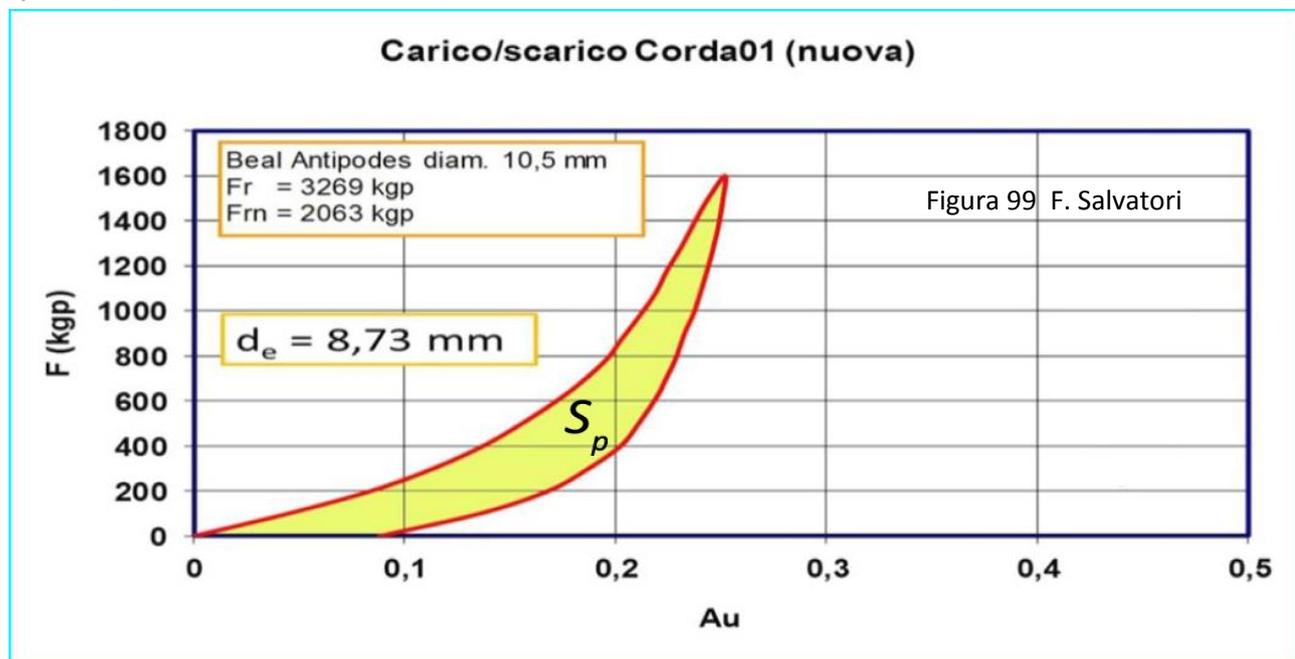
Con trazione **lenta** sono state costruite le curve $F = f(A_u)$ fino a raggiungere i 1600 kgp per poi discendere fino a forza nulla. Per il Campione n° 1 (corda nuova) ne scaturisce un grafico come in **Figura 99**, dove A_u è l'allungamento unitario:

$$A_u = l/l_0 \quad (22)$$

con:

l = lunghezza del campione traziionato

l_0 = lunghezza del campione a riposo



All'interno del diagramma è riportato un riquadro con il tipo di corda usata, il suo carico di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} (guida con frizione d.s.).

Viene indicato anche il valore del diametro efficace d_e (pag. 30, **Relazione 8**), che è la misura del diametro di una barra cilindrica isotropa di Nylon 6 (il materiale che costituisce i fili elementari della corda) la cui sezione trasversale è pari alla somma delle sezioni trasversali di tutti i fili elementari che compongono la corda.

Il **diametro efficace** si contrappone al **diametro apparente** (10,5 mm), dichiarato dal costruttore (Beal).

La scelta di utilizzare il valore A_u nell'asse delle ascisse si è resa necessaria per poter sovrapporre al

confronto i grafici di tutti i campioni in esame. La curva (rossa) del grafico di **Figura 99** relativo alla **corda nuova** farà da punto di riferimento in tutti i diagrammi degli altri campioni di corda qui di seguito esposti.

Attenzione “Viscosità” o “Plasticità”: per facilitare le valutazioni sui decadimenti irreversibili dovuti alla viscosità dei fili elementari di una corda, ripetiamo in sintesi quanto descritto nella **Parte I (pag. 33 e seg.)** in merito al comportamento del Nylon in quanto materiale visco-elastico):

1. la superficie S_p compresa fra la curva di carico e scarico (in giallo, definita “Superficie di plasticità”) ha un’estensione pari all’energia dissipata nella corda con deformazioni **permanenti** (irreversibili) anche legate alla CSCC (pag. 327 e seg., **Figura O**);
2. all’estensione della superficie S_p contribuisce la viscosità del materiale polimerico dei fili elementari;
3. contribuisce anche l’eventuale rottura di alcuni fili elementari, con il lavoro a rottura come rappresentato in **Figura 20 (pag. 31)**; (test effettuato su una corda ma, nella sostanza, valido anche per i fili elementari);
4. l’allungamento residuo A_r (ricavabile dal valore dell’ascissa della curva di scarico a $F = 0$) è anch’esso una quantizzazione dei processi irreversibili dovuti alla sollecitazione a trazione.

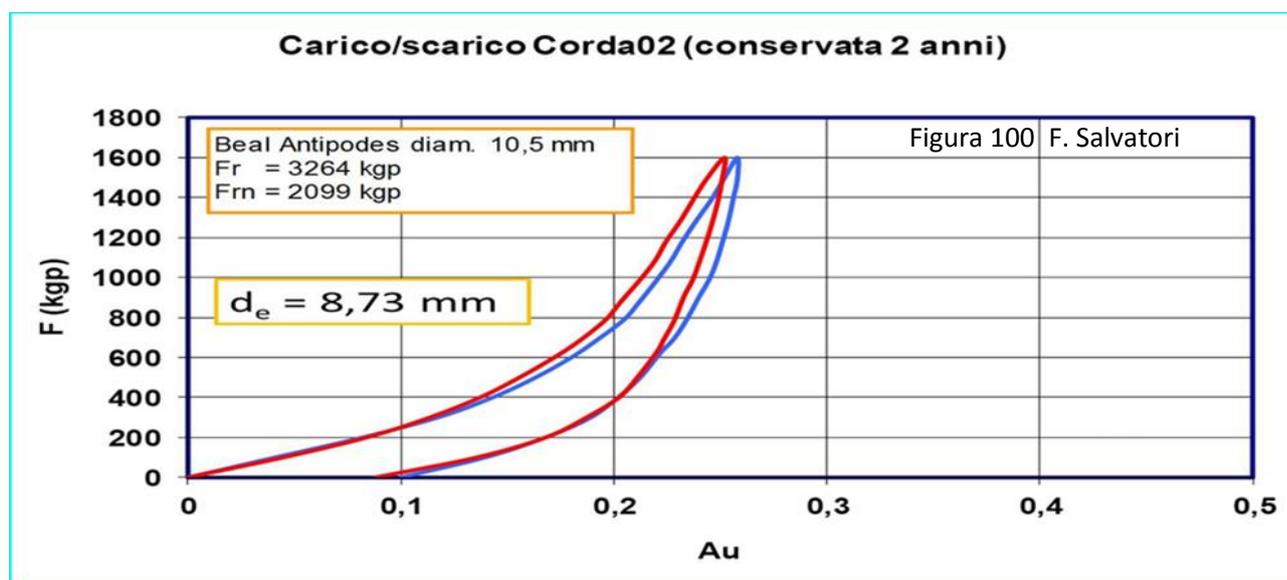
La **Viscosità** della corda, subendo una sollecitazione, produce un “**danno**” irrecuperabile, che si va a sommare a quanto causato dalle eventuali sollecitazioni precedenti e a ciò che produrranno quelle successive. Progressivamente si perde la possibilità di assorbire anergia, la corda diventerà più rigida e, a parità di sollecitazione choc, le forze massime F_m risultanti aumentano di valore. (pag. 42 e seg., **Relazione 13**).

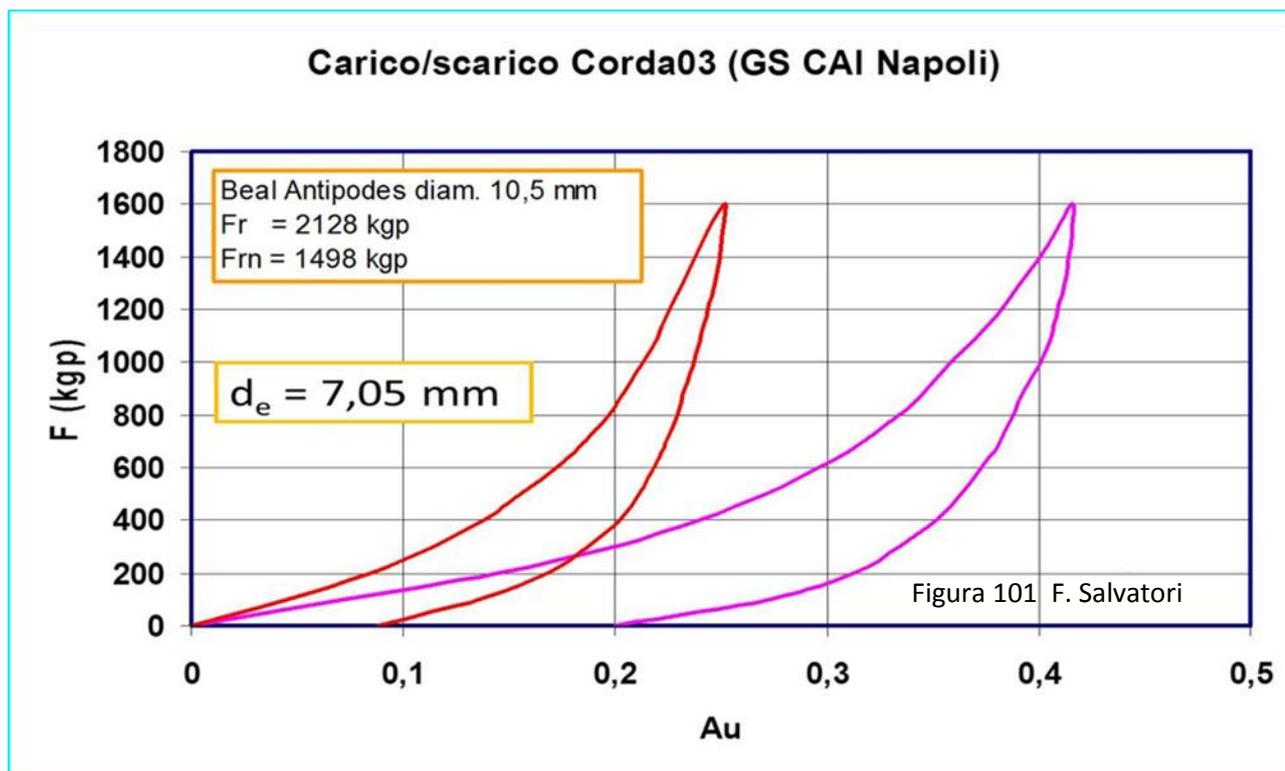
L’usura per diminuzione del **grado di viscosità** è una delle componenti principali che causano la riduzione della deformabilità di una corda (e quindi della sua capacità d’assorbire l’energia prodotta da una eventuale caduta di un peso).

Diminuzione che si va a sommare alle altre causate da altri fattori degradanti, come ad esempio la successione di choc in numero e velocità di deformazione crescenti (pag. 174 e seg., **Parte VI**); test dedicati soprattutto alla misura del grado di viscosità e alle sue variazioni.

I risultati esposti nei grafici delle 15 figure che seguono hanno un grande valore interpretativo dei fattori legati all’usura delle corde speleologiche (statiche): è possibile individuarci soprattutto il risultato complessivo del loro decadimento, alle volte senza la possibilità di discriminare l’effetto delle diverse componenti.; discriminazione alla quale sono invece dedicate tutte le restanti parte di questo lavoro.

Il grafico di **Figura 100** riporta la curva di carico/scarico del campione di corda dopo due anni di conservazione al buio e in assenza di scambi gassosi: la corda “vecchia” (in blu) ha, di fatto, le stesse caratteristiche della corda “nuova” (in rosso). Identica conclusione era stata tratta in una precedente analoga prova di **usura di un anno**. E’ evidente, come del resto è inconfutabilmente confermato da altri test, che una **corretta conservazione** in magazzino delle corde **non comporta alcun decadimento**, anche dopo decenni di non attività.





Il grafico di **Figura 101** è relativo alla corda usata dal G.S. CAI Napoli; è molto evidente che ha perso capacità di tenuta all'allungamento: con pari forze si ha un allungamento quasi raddoppiato.

Questo è dovuto a diversi fattori:

1. con le abrasioni, il contatto con le pareti e gli elementi microcristallini e selciferi contenuti nel fango, alcuni fili elementari si rompono e/o s'incidono; questo porta ad avere una minore quantità di materiale ad opporsi all'allungamento e la corda sembra più "elastica"; la netta riduzione del Diametro efficace lo dimostra;
2. il calore prodotto dall'attrito negli attrezzi di progressione portano i fili elementari a superare la "**Temperatura di transizione vetrosa**" T_g (che per il Nylon 6 è di circa 42° , a temperatura ambiente "grotta" e con U.R. al 100 %) per poi ritornare a temperature inferiori (pag. 101 – 102, **Figure 84 – 85**); questo con il discensore, ad esempio, avviene più volte in ogni discesa; a ogni superamento della temperatura T_g la condizione dei fili elementari passa da "vetrosa" a "gommosa", acquistando maggiore duttilità; ritornando poi a una temperatura più bassa il filato non riacquista tutta la "cristallinità" persa; pertanto, a ogni passaggio di T_g , i fili elementari (e quindi la stessa corda) sono più cedevoli a parità di forza applicata (pag. 93, **Figure 77**); tante più volte e più intensamente la temperatura T_g viene attraversata e tanto maggiore sarà il decadimento della corda per diminuzione di cristallinità, con conseguente decrescita dello Sforzo a rottura e del Carico di rottura senza nodi;
3. il filo elementare di Nylon è costituito, nella sua parte cristallina, da macromolecole disposte parallelamente l'una all'altra, con legami ionici ("idrogeno") trasversali (pag. 65, **Figure 57**) che le collegano e lo rendono più resistente alla trazione ("struttura a nido d'ape"); ogni fattore che possa far diminuire questi legami idrogeno rende i fili elementari più cedevoli, e la diminuzione di cristallinità a vantaggio dell'estensione dei settori amorfi abbassa il valore del Carico di rottura della corda anche del 13%; disidratando, l'idrolisi dei legami idrogeno è completamente reversibile.
4. al decadimento complessivo della corda contribuisce la Degradazione idrolitica con perdita di massa e/o di peso molecolare numerico M_n : anche qui diminuisce E e lo sforzo a rottura σ_r dei fili elementari, e queste diminuzioni sono reversibili solo in parte e gli effetti delle modifiche permanenti si accumulano (pagg. 82-86) (pag. 161 e seg., **Figure 142-143**);
5. il succedersi delle tante sollecitazioni dovute alla progressione, soprattutto nella risalita con bloccanti e nella discesa con il discensore, producono nelle catene di macromolecole dei fili elementari (come in **Figure 56**, pag. 64, per esempio) delle modeste deformazioni nella

disposizione spaziale, in parte irreversibili; deformazioni che vanno a sommarsi a quelle precedenti, costituendo tuttavia, dato l'alto numero delle sollecitazioni, un risultato complessivo negativo di rilievo; in questo caso però diminuisce solo E ma non la Sezione efficace S_e perché nella catena di macromolecole rappresentata in **Figura 56** (pag. 64) le sollecitazioni allontanano permanentemente gli estremi l_1 e l_2 , diminuendo la deformabilità del materiale polimerico senza recidere la catena;

- alle volte, ma l'eventualità ha ridotte possibilità d'attuazione e poca incidenza quantitativa, può agire la depolimerizzazione causata dalla fotodegradazione (soprattutto raggi UV) e dal contatto con ossigeno e ozono.

Sempre in relazione alla corda usata per due anni dal G.S. CAI Napoli, dai carichi di **rottura con nodo o senza nodo** si rileva che è ancora in buono stato, e può essere ancora utilizzata. Infatti, valore di **1100 kgp** ($LIR = \text{limite inferiore di resistenza}$), imposti come forza minima per gli anelli della **Catena di Sicurezza**, è bel lontano dal carico di rottura con nodo F_{rn} (1498 kgp).

La corda usata GS CAI Napoli può essere ancora utilizzata in sicurezza, mantenendo gli stessi standard d'uso, per ancora diverso tempo. Anche in considerazione che la decadenza per usura è molto accentuata all'inizio della vita di una corda speleo, ma poi gli incrementi negativi vanno diminuendo d'intensità.

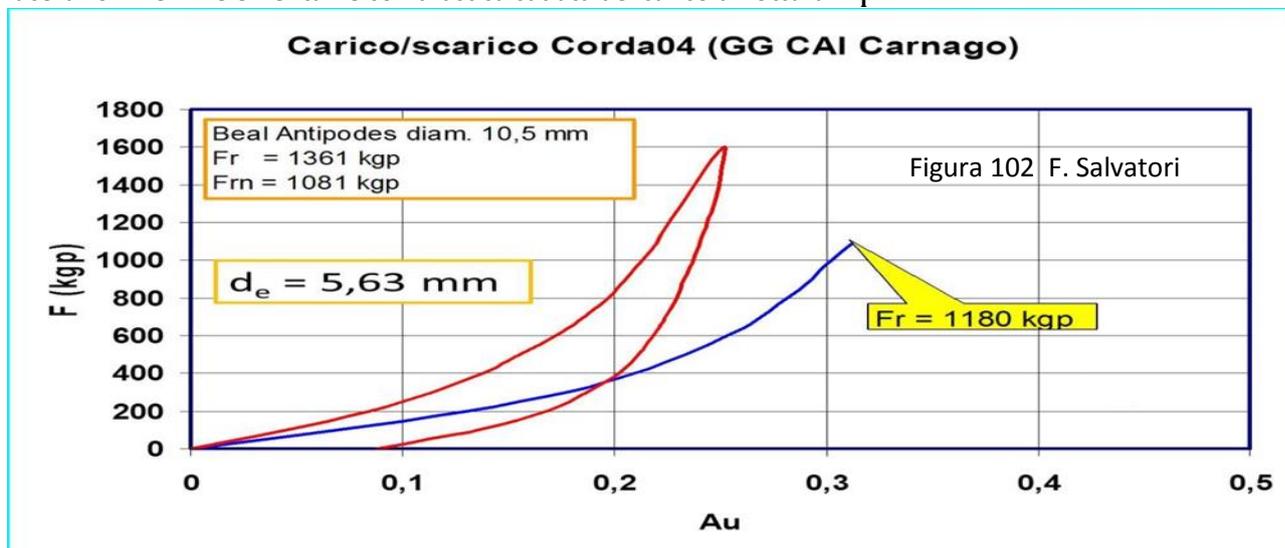
Sempre in relazione a quanto osservabile in **Figura 101**, si constata che la Superficie di Plasticità (compresa fra le curve di carico e scarico) è abbastanza estesa. Questo porta una duplice conclusione:

- che il test a trazione lenta con il raggiungimento di **1600 kgp** di forza è sufficientemente "penetrante" da mettere in risalto in modo adeguato la reazione del campione sottoposto a test e l'interpretazione selettiva dei fattori usuranti;
- che il "danno" subito dalla corda con l'uso di due anni in grotta è rilevante, ma ancora non sufficiente a decretarne l'eliminazione.

Da sottolineare, i test presentati in questo **Capitolo 01** sono stati eseguiti nel periodo 1997-2000, ma solo ora, dopo i test effettuati a partire dal 2015, siamo in grado d'interpretare i vari fattori che concorrono all'usura, come elencato nei precedenti punti 1-6. Solo ora siamo in grado di valutare in termini temporali la possibilità di utilizzo in sicurezza di una corda speleo.

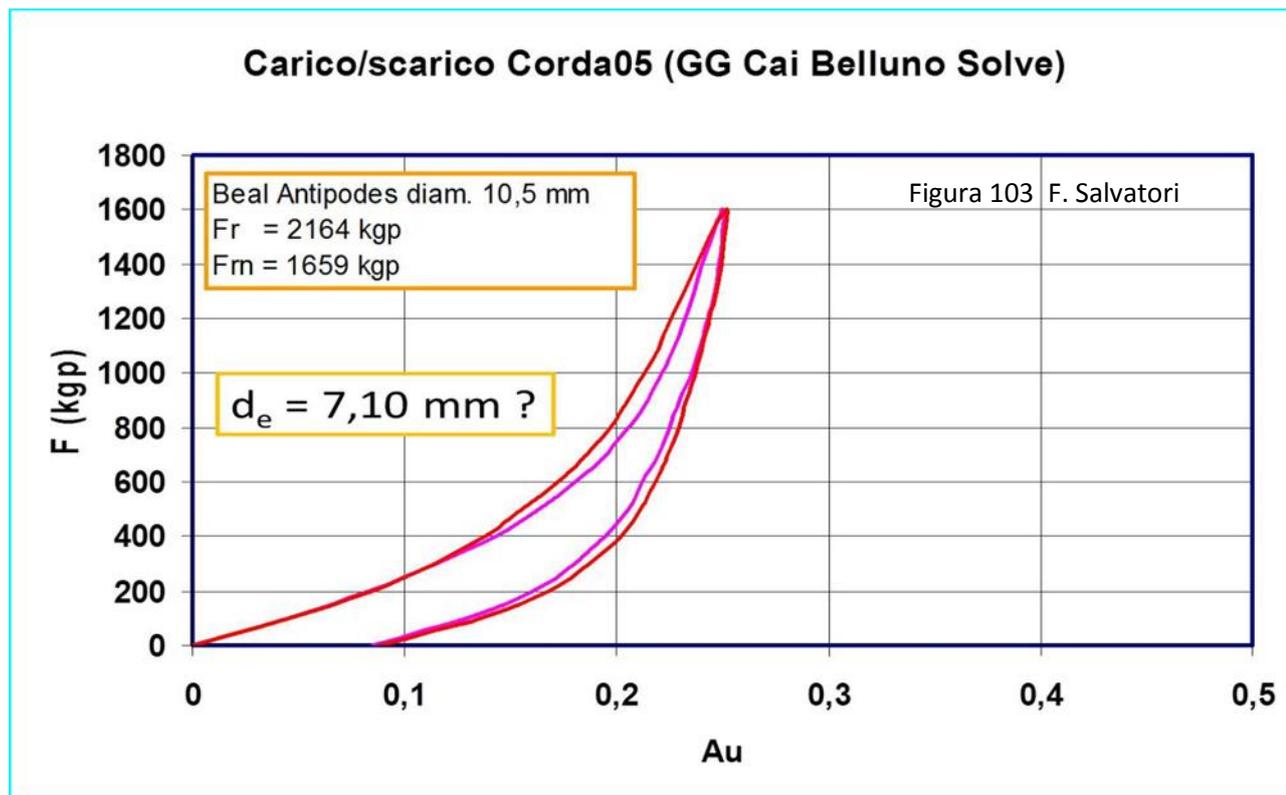
Il grafico di **Figura 102** (G.G. CAI Carnago) mostra la condizione d'usura, molto avanzata, della corda usata nell'Abisso Schiaparelli (Campo dei Fiori - VA). Il calcare è fortemente selcifero (micro granuli di selce sedimentatisi con la calcite) è marcatamente abrasivo. Si vede subito che siamo in una situazione d'eccezionalità ambientale che si discosta fortemente dal caso "normalità"; il che suggerisce di andare molto **cauti nel definire i tempi d'uso di una corda**, controllando bene l'eventuale **presenza di fattori straordinari**.

Il tipo di calcare in cui è scavata la grotta fa sì che il contatto con le **pareti e le sedimentazioni accumulate** sia un fattore straordinario che produce non solo la diminuzione del Modulo d'elasticità E ma anche molte lacerazioni nei fili elementari e con drastica caduta del carico di rottura F_r .



La corda non riesce a raggiungere (senza nodi) i 1600 kgp di forza e **si rompe a 1180 kgp**. Il **carico di rottura con nodo (1081 kgp)** è coincidente con il LIR. Tutto questo porta a concludere che la corda è **malridotta e da eliminare senza esitazioni**.

Tenuto conto di quanto è stato ricavato sperimentalmente e rappresentato nella **Figura 137** (pagg. 157 - 158) su una corda usata continuamente nello stesso pozzo della stessa grotta (Abisso Schiaparelli) per 6 anni, il decadimento straordinario dato dai calcari selciferi viene pienamente confermato. Ma si rileva anche che al decadimento misurato nella **Figura 102** si deve aggiungere, nella realtà dell'ambiente ipogeo, il decadimento temporaneo dato dall'idrolisi dei legami idrogeno (pag. 75, **Figura 67**): tutto sommato, essendoci un decadimento del 85 % (solo 442 kgp di F_{rn}), la presenza di **rocce abrasive** rende il **processo d'usura straordinariamente rapido**.



Il grafico di **Figura 103** è relativo ai test sulla corda utilizzata dal GG CAI Belluno Solve: **un caso con risultati fortemente in contrasto!**

Se non fosse per i carichi di rottura F_r e F_{rn} , **tipici di corde usate in modo normale**, osservando solo la curva di carico/scarico, si direbbe che la corda testata è **praticamente nuova** (coincide con la curva della **Figura 100**).

Ma è impossibile che la curva di carico/scarico di una corda usata, anche in maniera ridotta, sia identica a quella di una corda mai usata e, al tempo stesso, si registri rispetto a quest'ultima una riduzione di F_r del 35% e di F_{rn} del 50%.

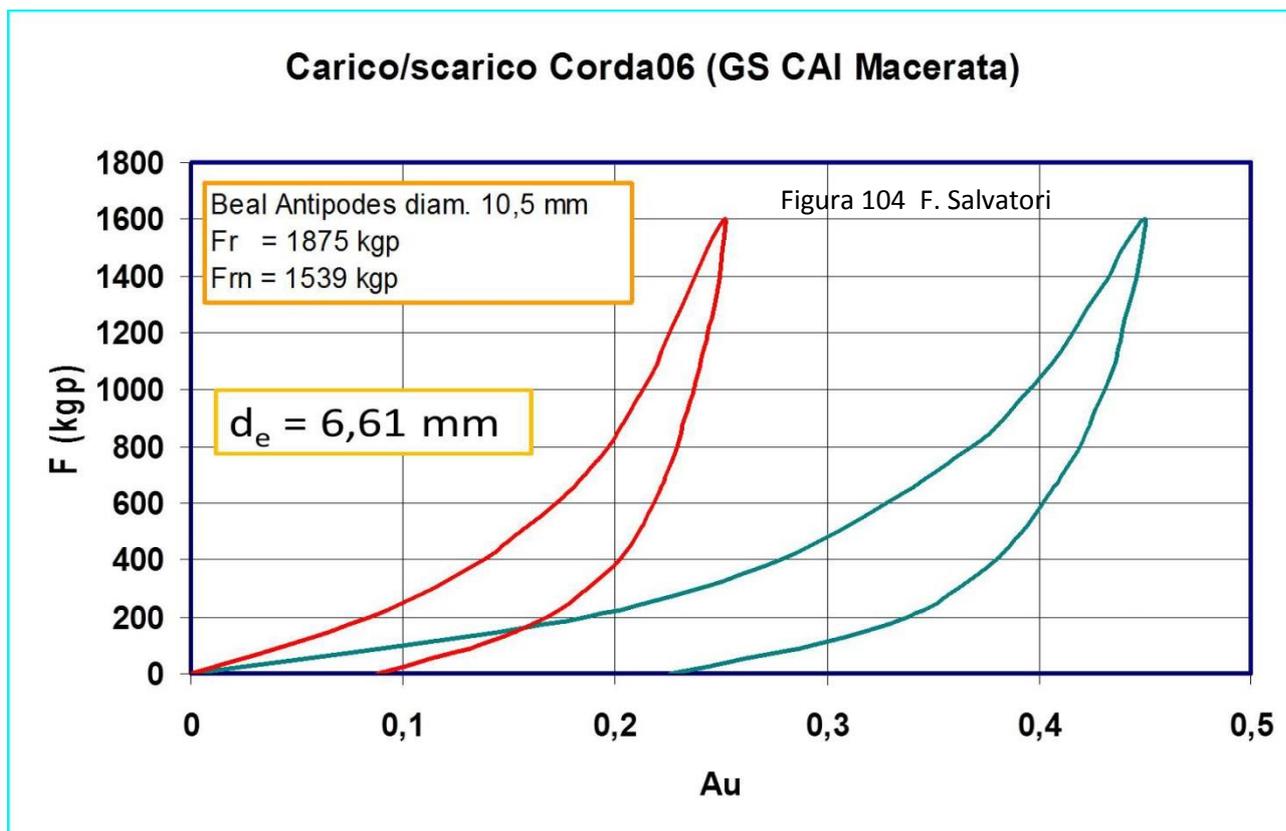
E' altrettanto impossibile che una corda usata abbia un allungamento residuo A_u uguale a quello della corda nuova.

Su questo caso non è possibile fare alcuna ipotesi plausibile, tecnicamente e scientificamente, se non attribuire i contrasti a un errore di trascrizione di dati. Comunque, dopo due anni d'uso, la corda è ancora in buono stato.

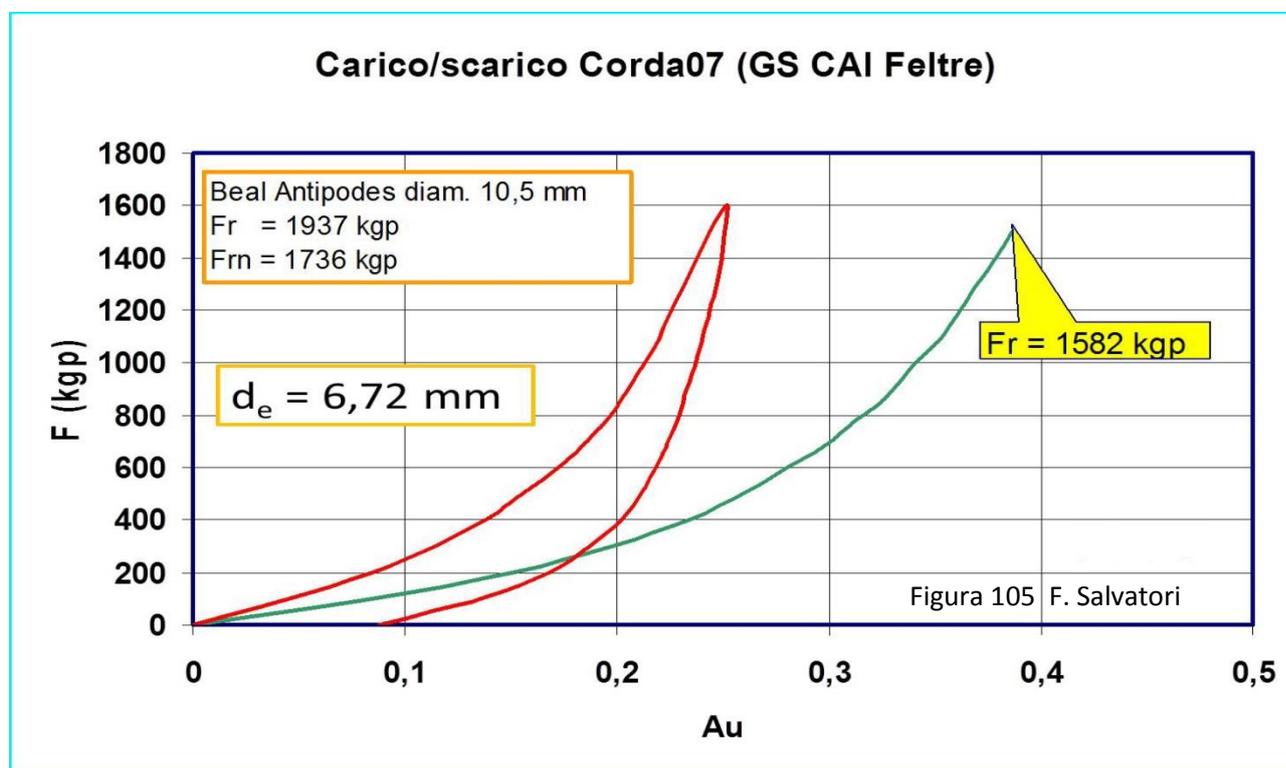
Il grafico di **Figura 104** riporta i dati relativi ai 40 m di corda consegnati al Gruppo Speleologico CAI Macerata.

I test mostrano che la corda è stata usata in assenza di condizioni negative particolari (le grotte dell'Appennino umbro - marchigiano si aprono in genere in calcari non selciferi o dolomitici).

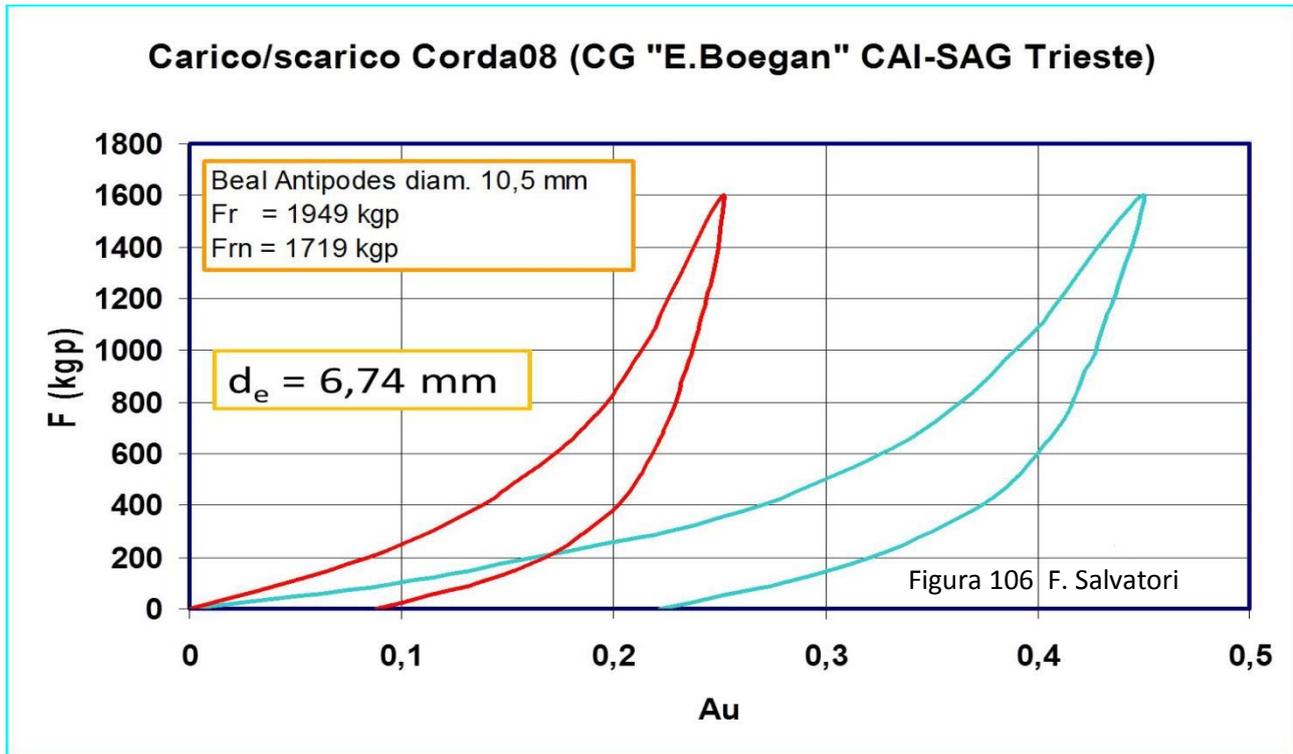
Il valore del diametro efficace (6,61 mm) indica che la corda ha subito un decadimento medio-basso, ma è ancora possibile utilizzarla entro i limiti di sicurezza.



Il grafico di **Figura 105** mostra i dati di una corda (GS CAI Feltre) ancora utilizzabile. Il cedimento a 1582 kgp di forza non ha permesso di completare la curva di carico a 1600 kgp, tutti gli altri dati (F_r , F_{rn} , d_e) indicano una condizione ancora accettabile. La rottura a 1582 kgp potrebbe essere “casuale” e indice di un uso difforme lungo i 40 m del campione di corda.



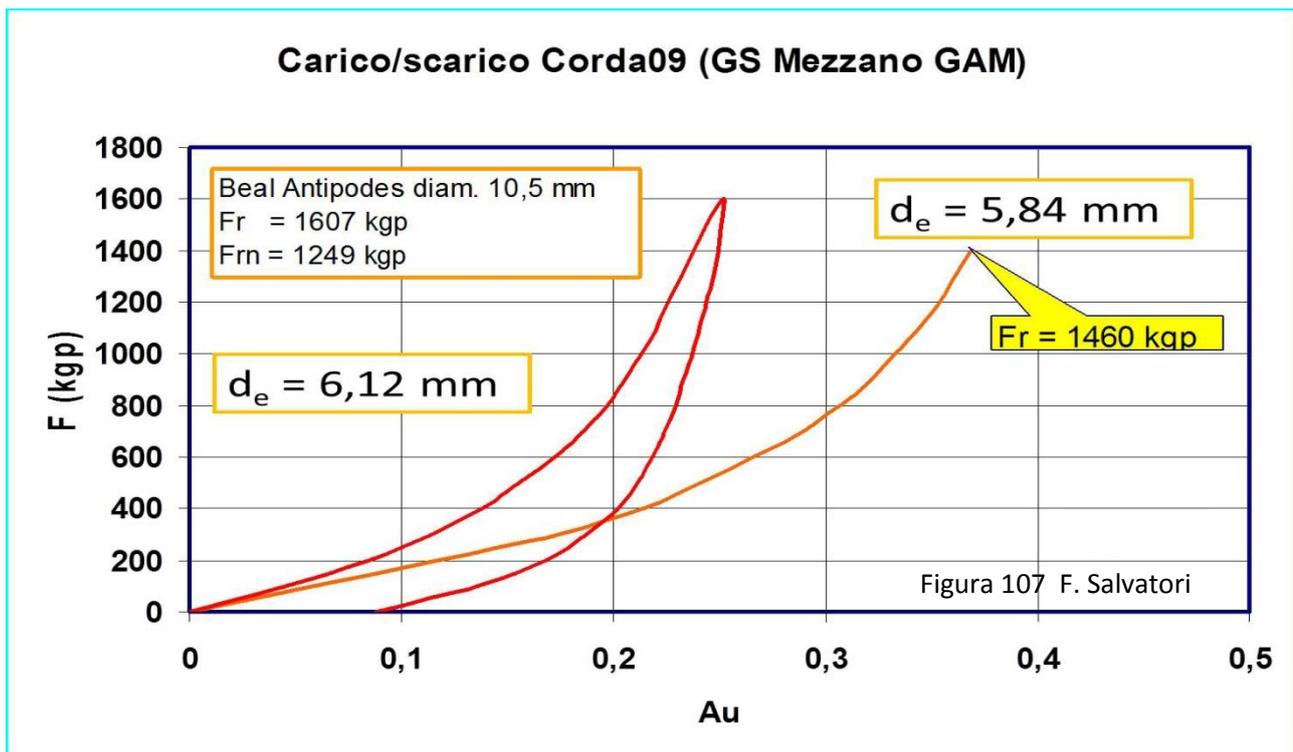
Il grafico di **Figura 106** si riferisce a un campione di corda che è stato molto utilizzato, ma le sue condizioni sono ancora buone. Si può ipotizzare che l'effetto **Temperatura di transizione vetrosa** T_g sia stato ridotto, viste le basse temperature delle grotte dove la corda è stata utilizzata (Monte Canin 1°C – 2°C).



Il grafico di **Figura 107** è relativo alla situazione di una corda utilizzata intensamente (ben 271 discese/risalite) dal G.S. Mezzano GAM in grotte nel gesso in ambiente **molto bagnato**.

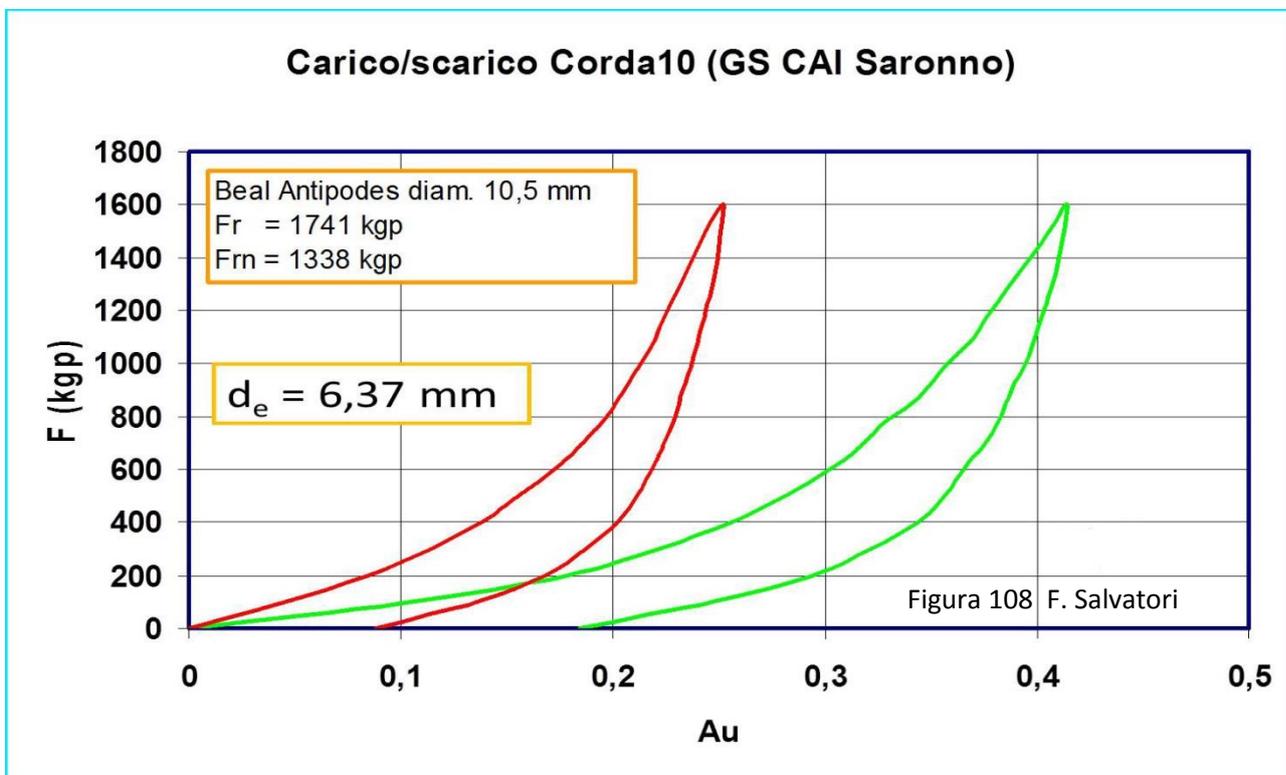
Una corda abbastanza compromessa, su cui non è facile dare un giudizio: il suo stato, rispetto al carico di rottura e alla capacità di assorbire l'energia di un'eventuale sollecitazione choc, è al limite della sicurezza. Il carico di rottura senza nodo di 1460 kgp, ridotto del 30 % per effetto nodo, porta a un valore di 1022 kgp, inferiore al LIR imposto dalla catena di sicurezza.

La situazione di degrado è dovuta, soprattutto, all'alto numero di discese/risalite che ha incrementato l'effetto Temperatura di Transizione vetrosa; effetto che non è stato certamente attenuato dalle temperature interne delle grotte (circa 15°C – 20°C).

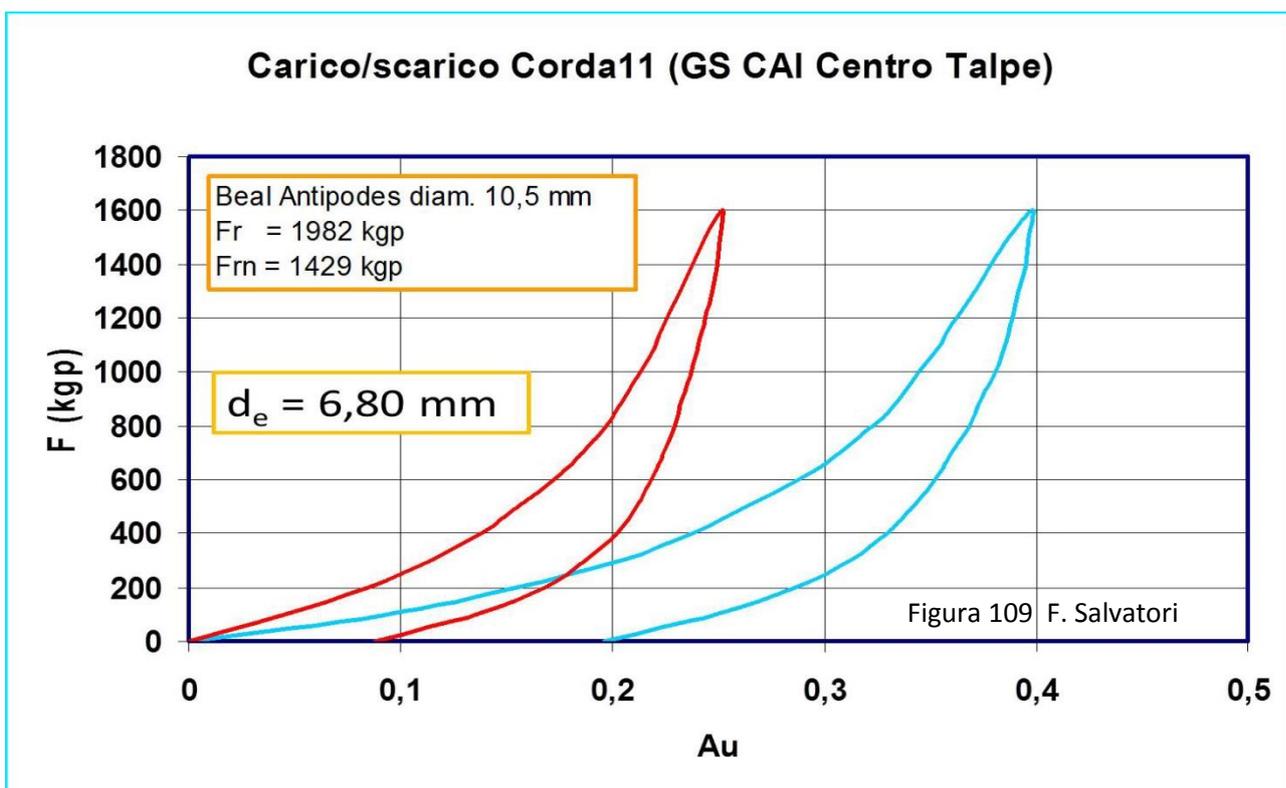


Inoltre la presenza di argille provenienti dalla dissoluzione del gesso ha reso il contatto fra corda e pareti abbastanza abrasivo (nelle argille possono essere presenti micro granuli appuntiti e taglienti).

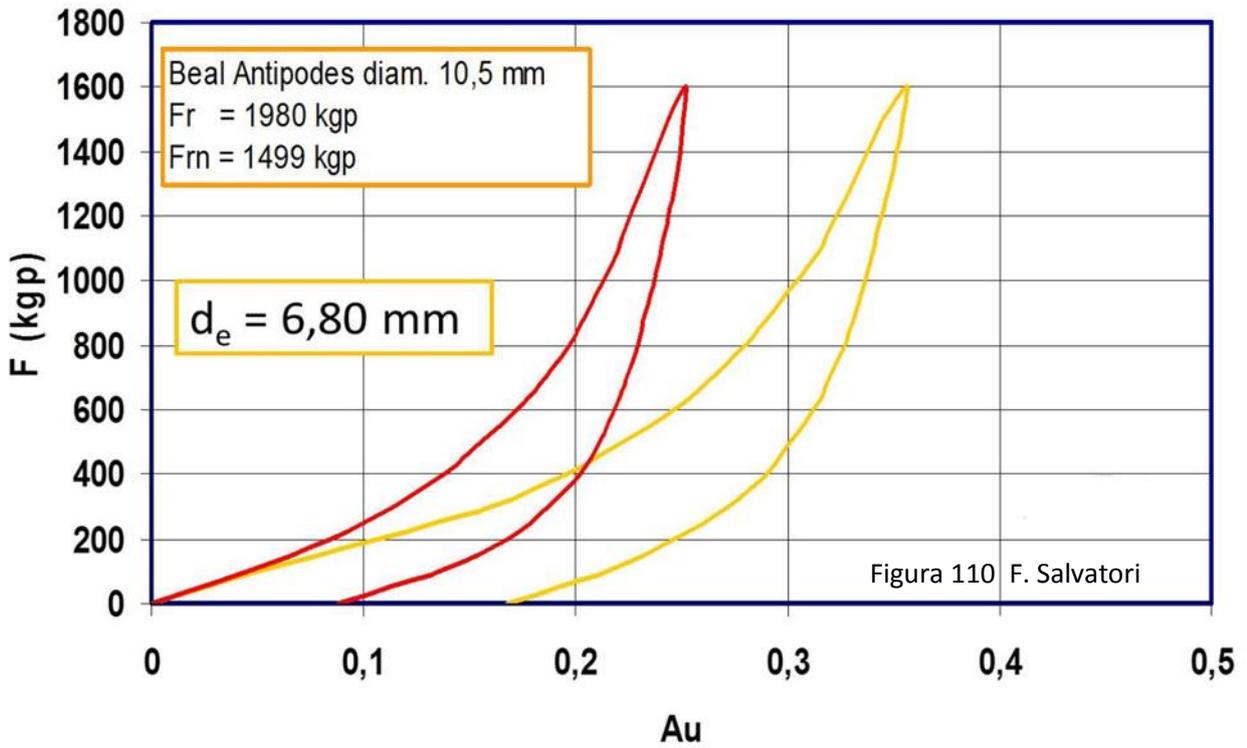
Infine, la situazione determinata da acqua in abbondanza ha sicuramente fatto crescere la **degradazione idrolitica** delle macromolecole del Nylon, con conseguente diminuzione dello Sforzo a rottura dei fili elementari e del Carico di rottura della corda, che comunque rimane utilizzabile in sicurezza.



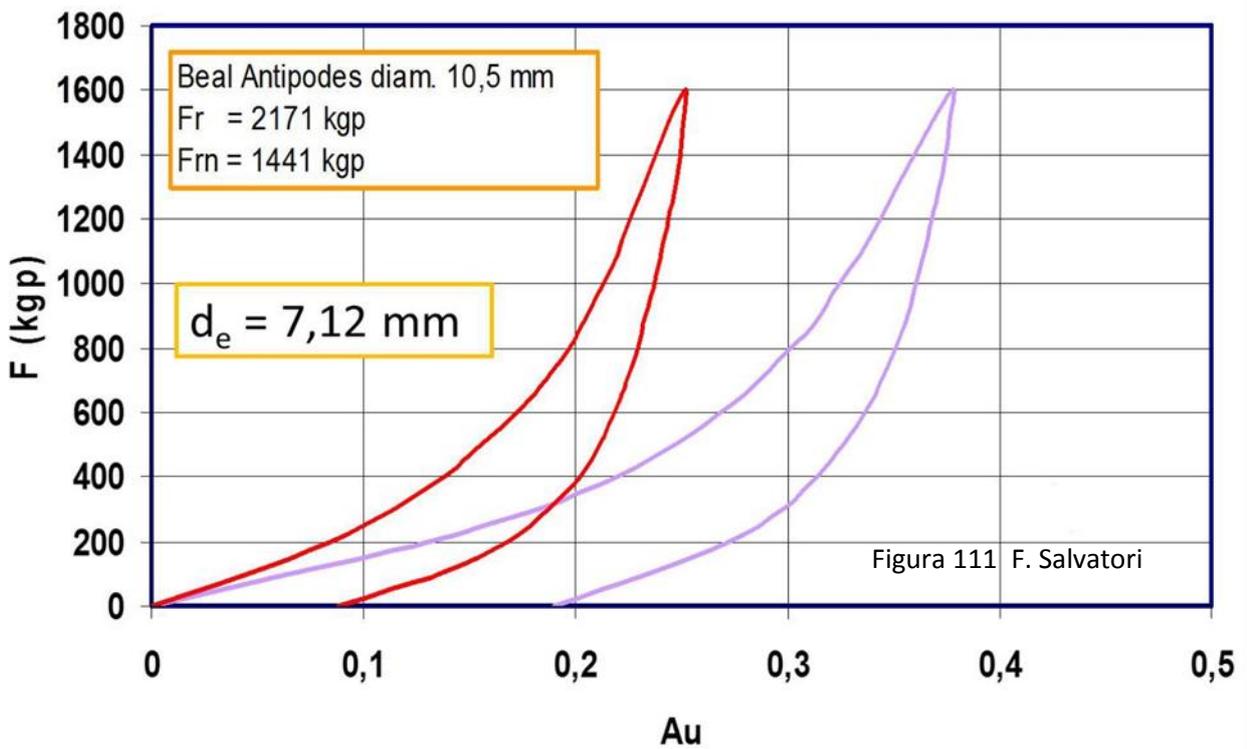
I grafici della **Figura 108** e quelli che seguono delle **Figure 109 -110 – 111- 112**, sono del tutto analoghi ai diagrammi della **Figura 101** e non necessitano quindi di ulteriori commenti: le corde in questione **sono tutte in uno stato accettabile** e ancora utilizzabili in sicurezza.

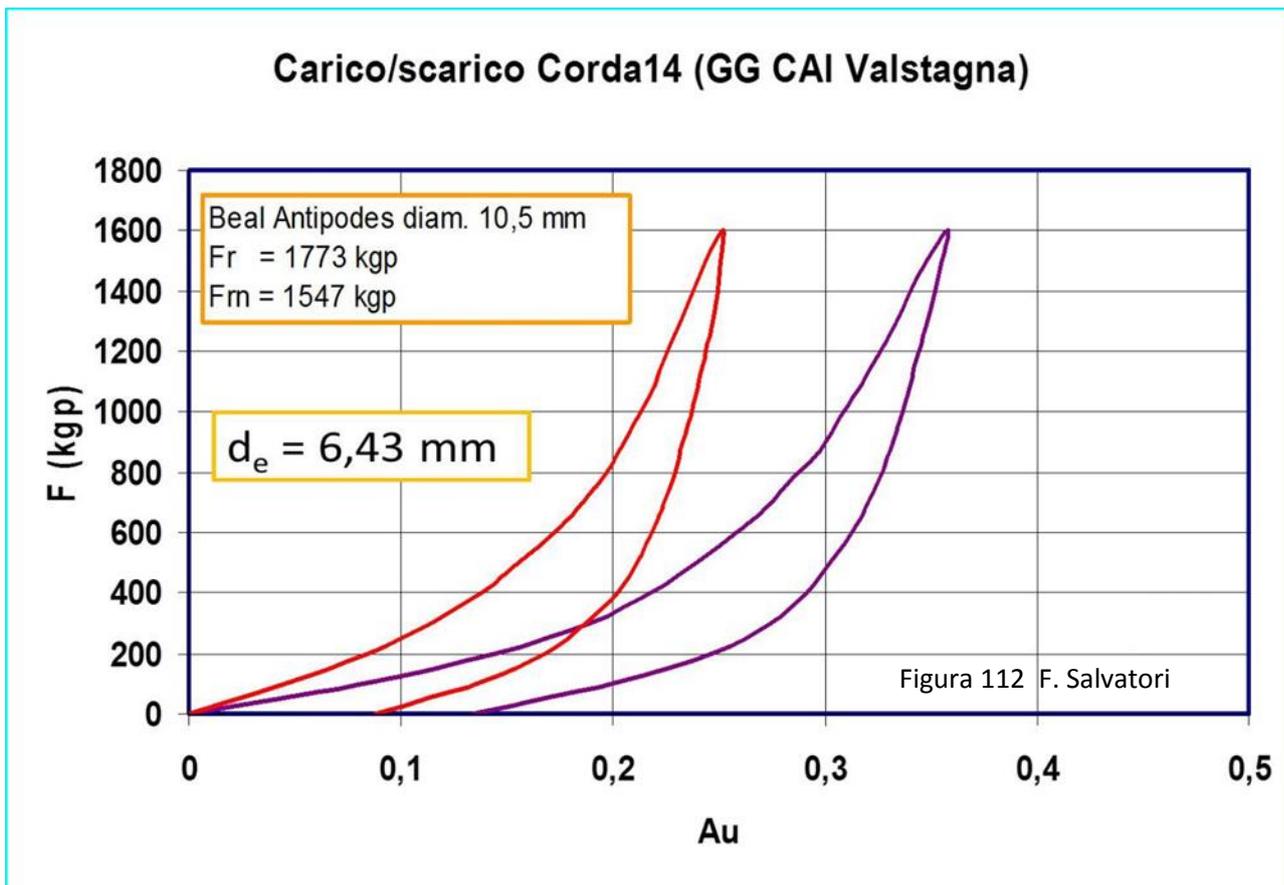


Carico/scarico Corda12 (GG "Roner" CAI-SAT Rovereto)

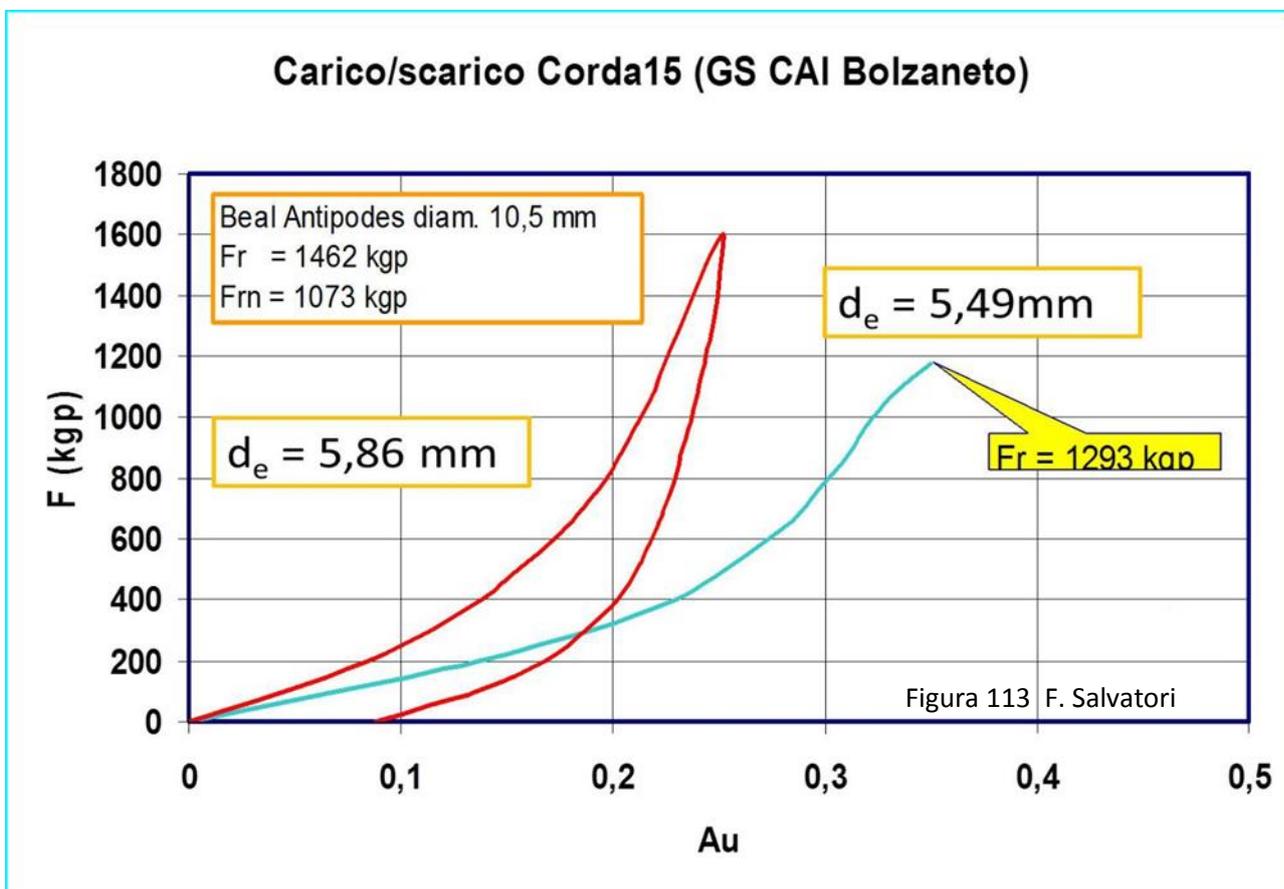


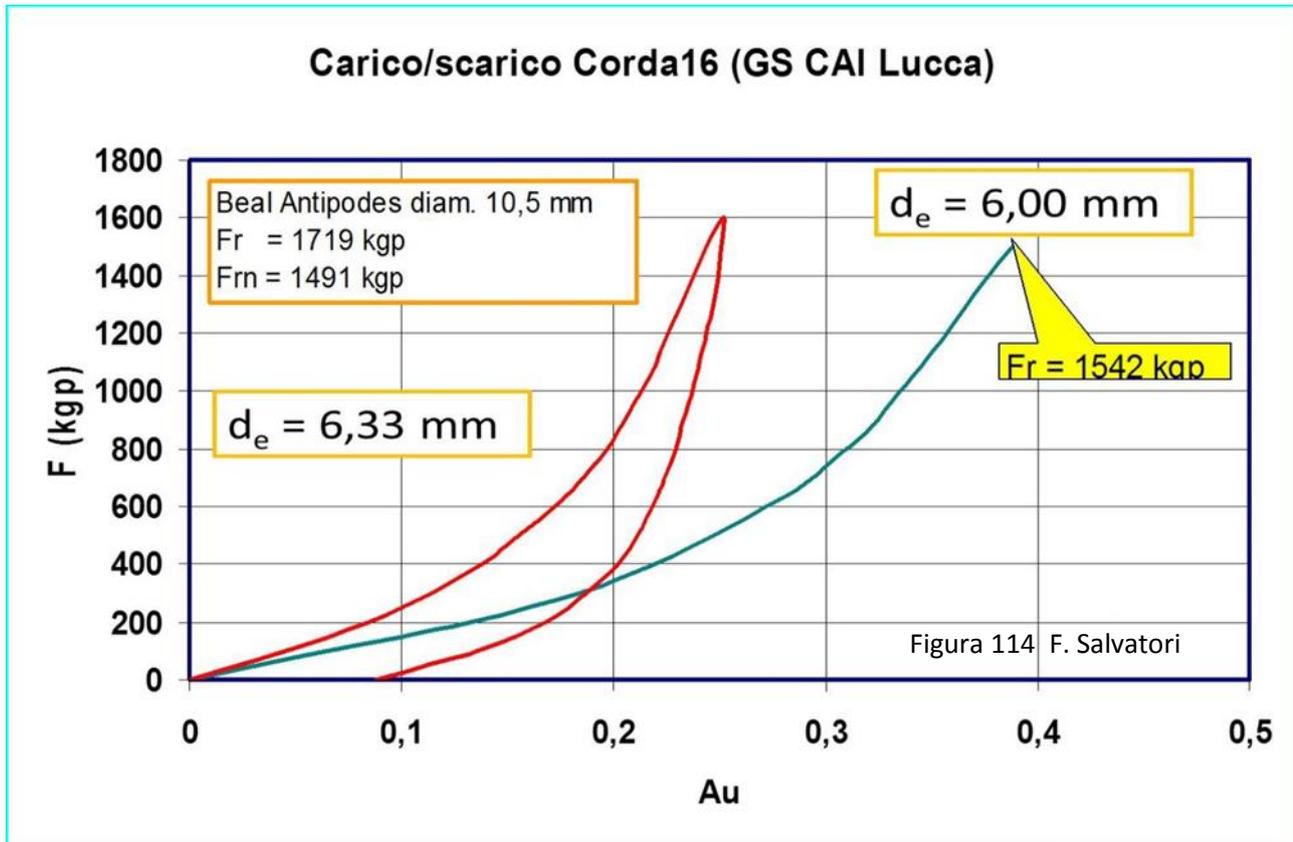
Carico/scarico Corda13 (GG XXX Ottobre CAI Trieste)





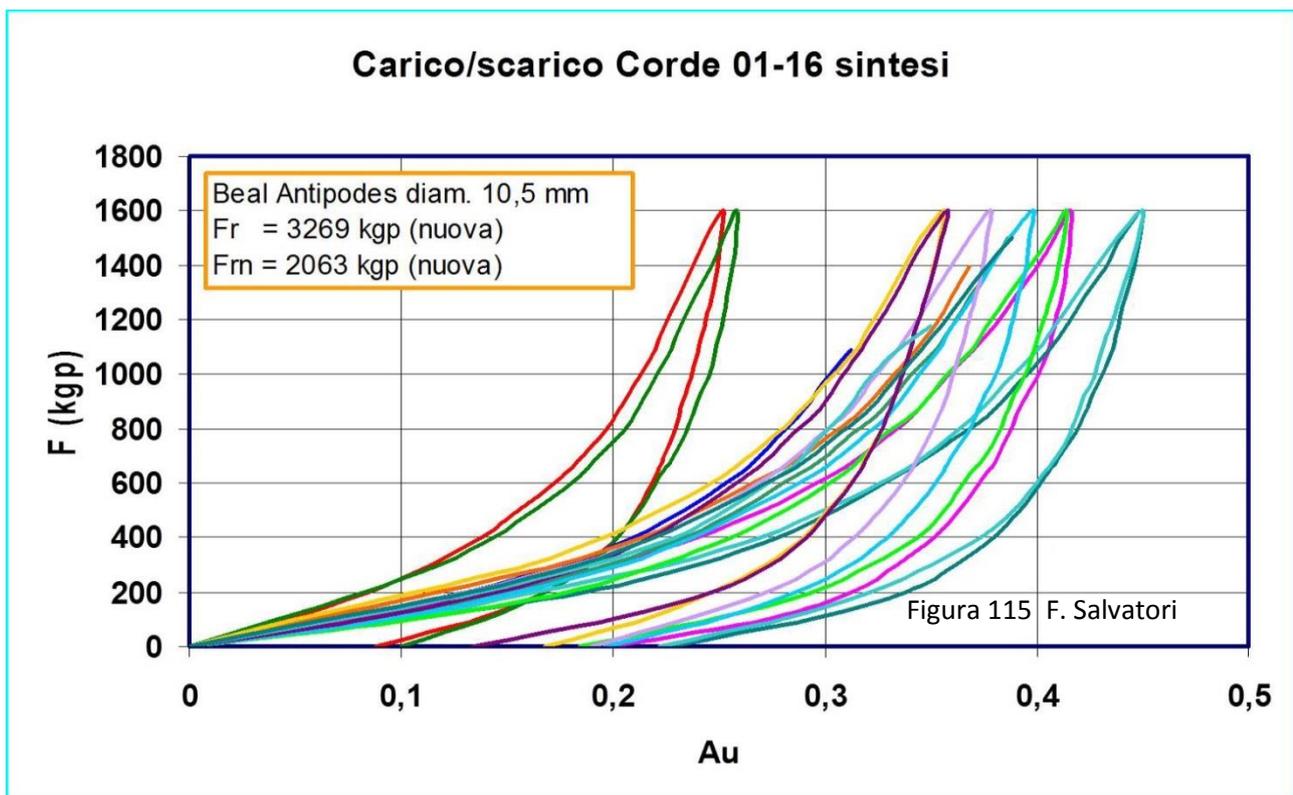
Nel grafico di **Figura 113** la corda è nelle condizioni peggiori, con F_{rn} abbondantemente sotto il LIR: **inutilizzabile**. La leggera flessione della curva di carico prima del cedimento è sintomo di snervamento: se avviene in una corda, la sua situazione di degrado è molto elevata se non addirittura eccezionale.





Nel grafico di **Figura 114** la corda è in condizioni precarie, quasi al limite, ma ancora utilizzabile con precauzione (per poco tempo).

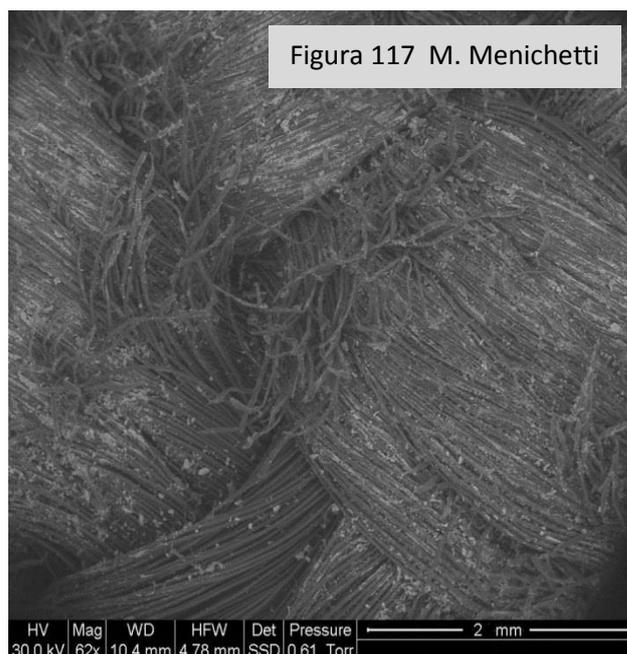
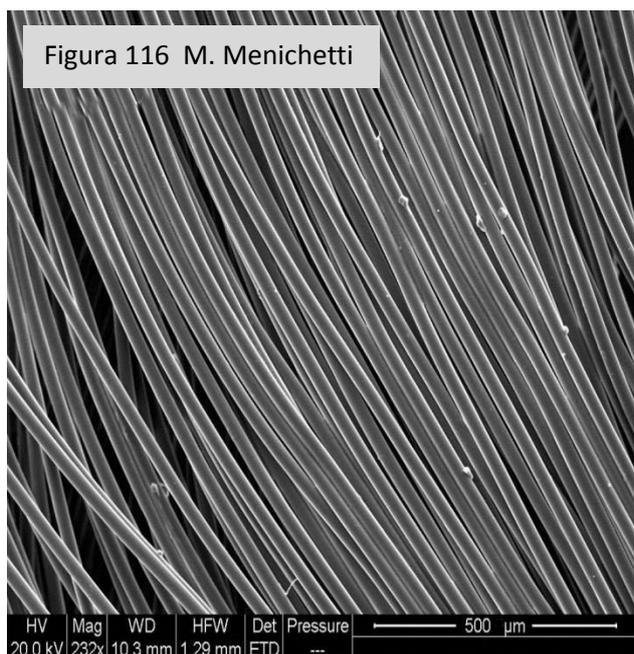
01.f) Carico/scarico Corde 1 - 16 sintesi - Il grafico di sintesi di **Figura 115** (esclusa la **Corda 05** per la sua inattendibilità) porta ad alcune significative e istruttive conclusioni. Nel complesso l'uso, qualunque esso sia, produce ineluttabilmente il deterioramento della corda, la rende **più cedevole**, più **propensa alla rottura** e **meno capace di assorbire energia** a seguito di una sollecitazione.



L'apparente maggiore "elasticità" (che, non essendo reversibile, è deformabilità permanente/plasticità/viscosità) e la riduzione del carico di rottura non sono altro che gli effetti conseguenti alla:

1. **rottura** di alcuni fili elementari della corda, soprattutto della calza, operata da asperità delle pareti, da granuli di selce e altri materiali solidi contenuti nelle argille;
2. **riduzione della cristallinità** (effetto "Temperatura di transizione vetrosa") conseguente al calore prodotto dall'uso degli attrezzi di progressione, soprattutto il discensore (pagg. 101 - 102);
3. **degradazione idrolitica** con perdita di massa e con riduzione della polimerizzazione delle macromolecole di Nylon (pag. 80 e seg., **Figure 73 – 74 - 75**).

Gli allungamenti A_u nella corda usata, a parità di forza di trazione e rispetto alla corda nuova, sono anche di dimensione doppia (si passa da allungamenti del 20-25 % ad allungamenti del 40 - 45 %).



In riferimento al primo punto, le soprastanti foto al microscopio si riferiscono alla superficie della calza della corda Beal Antipodes 10,5 mm usata dal G S CAI Napoli (pag. 126, **Figura 101**).

La foto di **Figura 116** è relativa alla superficie della calza della **corda nuova**, mai usata: i fili elementari sono intatti e sistemati parallelamente l'uno all'altro.

Nella **Figura 117** c'è invece la foto della superficie della calza della **corda usata**, dove sono evidenti gli effetti del contatto con le pareti di roccia: rotture, incisioni, deformazioni e abrasioni dei fili elementari; è evidente il "danno", che potremmo definire meccanico ed erosivo, prodotto dall'utilizzo in grotta sulla sola superficie esterna della calza.

L'abrasione contro le rocce è una componente importante dell'usura di una corda speleo, che però è molto dipendente dalla natura geologica delle pareti. A tal proposito si faccia riferimento alla **Figura 102** (pag. 127) dove è analizzato il comportamento della corda data al GG CAI Carnago e utilizzata nei **calcari selciferi** dell'Abisso Schiaparelli.

La corda usata, per la sola presenza di fili elementari rotti o incisi, ha di fatto un diametro inferiore a quello iniziale da nuova e, di conseguenza, ha un carico di rottura F_r più basso e una maggiore cedevolezza (meno materiale che si oppone all'allungamento).

01.g) Riduzione Diametro e Superficie efficace - L'effetto "abrasione" incide sul calcolo del Diametro efficace (insieme agli altri importanti agenti "acqua", "calore", "sollecitazioni ripetute") e se ne può trovare riscontro nella seguente tabella di **Figura 118** di sintesi del Diametro efficace d_e sui 16 campioni di corda.

Campione	D _{efficace} 01 (mm)	D _{efficace} 02 (mm)	% riduzione 01	% riduzione 02
1	8,73		0	
2	8,73		0	
3	7,05		19,2	
4	5,63	5,25	35,5	39,9
5	7,10		18,7	
6	6,61		24,3	
7	6,72	6,07	23,0	30,1
8	6,74		22,8	
9	6,12	5,84	29,9	33,1
10	6,37		27,0	
11	6,80		22,1	
12	6,80	Figura 118 F. Salvatori	22,1	
13	7,12		18,4	
14	6,63		27,5	
15	5,86	5,49	32,9	37,1
16	6,33	6,00	27,5	31,3
Media	6,55	5,73	25,1	34,3

La diminuzione in percentuale di d_e rispetto a quello della corda nuova (8,73 mm) varia dal 18,4 % al 35,5 %, in media il 25,1 %; mentre la diminuzione della Superficie efficace S_e varia dal 47 % al 60 %, in media il 45 %.

Il che fa concludere che dopo due anni di una normale attività in grotta la condizione di resistenza di una corda speleo è dimezzata, e quella che inizialmente appariva con diametro 10,5 mm (in realtà 8,73 mm) si riduce a diametro 6,55 mm in media.

La causa di queste nette riduzioni (ripetiamo in sintesi quello che stato detto nella **Parte III, pag. 60 e seg.**) è dovuta ai tre fattori precedentemente indicati: rottura fili elementari, produzione di calore e aumento della temperatura, acqua a contatto coi polimeri. Il primo fattore incide geometricamente, il secondo e il terzo modificano la condizione dei fili elementari rendendoli meno resistenti alla rottura e più duttili.

Nelle **corde usate l'area** compresa fra le **curve di carico e scarico** (che è una misura dell'energia assorbita dalle deformazioni plastiche) è **maggiore dell'equivalente area della corda nuova**. Ciò è dovuto al fatto che le corde usate reagiscono alla trazione con un maggior tasso di deformazioni permanenti (plastiche, viscosi e irreversibili).

Ma questa maggiore propensione all'allungamento dipende dal fatto che l'uso, con i suoi diversi agenti, tende a far diminuire la Sezione efficace, in quanto:

1. l'abrasione recide e incide i fili elementari (quindi minor materiale a contrastare gli allungamenti);
2. il contatto con l'acqua (sia sotto forma d'umidità relativa dell'aria che l'immersione completa) producono una degradazione idrolitica con perdita di massa e di Peso molecolare numerico delle poliammidi (pag. 81 e seg.) (aumenta la depolimerizzazione);
3. la presenza di acqua igroscopica nei fili elementari di Nylon (tanto maggiore è la porzione di settori amorfi, tanto più elevata risulta la percentuale d'acqua inserita fra le catene di macromolecole) li rende più plastificabili (più duttili e meno resistenti alla rottura); infatti **l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari** rompe la struttura a nido d'ape delle poliammidi e quindi ne diminuisce lo sforzo alla rottura (questo effetto dell'acqua, contrariamente alla degradazione idrolitica, è completamente reversibile se si elimina il contatto con l'acqua o l'aria umida);

4. la produzione di calore, con il passaggio ripetuto al di sopra e al di sotto della Temperatura di transizione vetrosa T_g , con gli attrezzi per la discesa su corda, porta ad una progressiva diminuzione della cristallinità dei fili elementari della corda (pag. 101, **Figure 84 – 85**).

Ricordiamo: la deformabilità legata ai quattro punti sopraelencati si manifesta in modo ridotto se lo stesso campione di corda viene sottoposto a un secondo analogo test di carico/scarico; ancor più ridotto ad un terzo test. E così via, con la corda che diventa sempre più rigida al succedersi di ulteriori test a trazione.

RIDUZIONE LUNGHEZZA		
n° campione	Lunghezza residua (m)	% riduzione
1	40	0
2	39,36	1,6
3	34,10	14,8
4	34,32	14,2
5	33,84	15,4
6	32,11	20,0
7	34,45	13,9
8	34,30	14,3
9	33,60	16,0
10	34,20	14,5
11	34,52	13,7
12	36,27	9,3
13	34,97	12,6
14	34,99	12,5
15	33,55	16,1
16	33,79	15,5
Media	34,21	14,5

01.h) Riduzione lunghezza campioni - Quanto riportato nella tabella di **Figura 119** sono le misure ricavate sui 16 campioni di corda testati in relazione alla diminuzione in percentuale della lunghezza (rispetto ai 40 m iniziali, da nuova). La diminuzione media è del **14,5 %** (dai **6 m** agli **8 m**).

Non s'intravedono motivazioni che possano giustificare la diversità dei dati fra campione e campione. Si tenga presente che un'analogha prova di usura della durata di **12 mesi** ha dato una riduzione media del **13 %**.

Questo della contrazione è un fenomeno tipico dei manufatti in poliammide (e dei polimeri in genere), che vale dunque anche per le corde speleo se sottoposte alla tipica attività in grotta (il processo è meno percepibile nell'alpinismo).

La "deformazione" si manifesta in tutte le direzioni dello spazio, in maniera macroscopica con l'accorciamento, meno rilevabile trasversalmente. Fenomeno che avviene sempre e comunque e **si completa** anche dopo un utilizzo temporale minimo.

Il fenomeno dell'accorciamento delle corde non progredisce linearmente nel tempo: è molto rapido nei primissimi tempi, con un aumento poi sempre più lento fino a divenire nullo.

Comunque perché l'accorciamento si manifesti occorre che la corda sia stata usata, con salite, discese, abrasioni, contatti con ambienti umidi e fonti di calore. Se la corda non è usata ed è mantenuta protetta come con il campione di **Figura 100** (pag. 125) (due anni inattiva e in assenza di luce e di aria circolante) la diminuzione "fisiologica" è di appena l'1% (dato più volte confermato anche da altri test similari).

CARICO DI ROTTURA SENZA NODI				
n° campione	Carico rottura F_r (kap)			% riduzione F_r
1	3 269			0
2	3 230			1
3	2 128			35
4	1 361	Figura 120	F. Salvatori	58
5	2 164			34
6	1 875			43
7	1 937			41
8	1 949			40
9	1 607			51
10	1 741			47
11	1 982			39
12	1 980			39
13	2 171			34
14	1 773			46
15	1 462			55
16	1 719			47
Media	1 847			44

01.i) Carico di rottura senza nodi - Nella tabella di **Figura 120** sono elencati i test a rottura delle corde trazionate **senza nodi**. Questi test hanno dato in media, rispetto alla corda nuova, una diminuzione di F_r del 44%, **che è più del doppio dell'analogo valore riscontrato nella prova di usura di 12 mesi (21 %)**.

Questi valori, che scandiscono l'usura in base al tempo d'utilizzo, delineano la curva di decadimento di una corda speleo: nei primi due anni d'attività si ha una progressione quasi lineare. E un uso anche "normale" portano le corde statiche da grotta a una drastica riduzione di resistenza alla rottura (per inciso, non pochi test indicano che nelle corde a minor diametro il decremento è ancora più veloce, netto, e pericoloso!).

Da sottolineare le ancor più evidenti riduzione delle proprietà meccaniche dei **Campioni 4, 9 e 15**, verosimilmente legate all'intenso uso e, soprattutto, alle condizioni ipogee geologiche e ambientali (calcari selciferi abrasivi e residui fangosi con micro granuli taglienti, attriti elevati con produzione di calore, persistente contatto con l'acqua).

Anche quest'analisi conferma che dopo due anni d'uso le corde per la progressione speleologica raggiungono una condizione al limite. In casi particolari la loro tenuta è sotto i limiti di sicurezza, come nel caso del **Campione 15**.

01.j) Effetto nodo - Nella tabella di **Figura 121** sono riportati i risultati dei carichi di rottura **con nodi** (Guida con frizione d.s.), e subito risalta che i **campioni di corda non usata 1 e 2** (nuova e conservata) hanno una riduzione per "effetto nodo" del **35 %**. Con le corde usate la riduzione sale invece al valore medio del **56 %**.

Le corde usate hanno ancora un valore di F_{rn} tale da permetterne, sia pur con una certa accortezza, di utilizzarle ancora. Ma questo vale solo per le corde meno utilizzate e meno maltrattate; mentre per condizioni come quelle riscontrate nei **campioni 4 e 15** la decisione più corretta è l'eliminazione.

EFFETTO NODO (guida con frizione d.s.)		
n° campione	Carico rottura con nodo F_{rn} (kgp)	% riduzione F_r/F_{rn}
1	2063	37
2	2099	36
3	1498	54
4	1081*	67
5	1659	49
6	1539	53
7	1736	47
8	1719	47
9	1249*	62
10	1338	59
11	1429	56
12	1499	54
13	1441	56
14	1547	53
15	1073*	67
16	1491	54
Media	1450	56

Figura 121 F. Salvatori

01.k) Confronto analitico fra F_r e F_{rn} - Volendo valutare in una corda usata sia l'effetto decadimento per uso (con i suoi molteplici agenti), sia l'effetto nodo, tanto insieme che separatamente, occorre tenere presente che il carico di rottura F_{rn} è il risultato della somma dei due fattori.

CONFRONTO ANALITICO fra F_r e F_{rn}					
Figura 122 F. Salvatori					
n° campione	F_r (kgp)	% riduzione $F_{r\text{ nuova}}/F_{r\text{ usata}}$	F_{rn} (kgp)	% riduzione $F_{r\text{ nuova}}/F_{rn\text{ usata}}$	% riduzione solo effetto nodo
1	3269	0	2063	37	37
2	3230	1	2099	36	35
3	2128	35	1498	54	19
4	1361	58	1081	67	9
5	2164	34	1659	49	15
6	1875	43	1539	53	10
7	1937	41	1736	47	6
8	1949	40	1719	47	7
9	1607	51	1249	62	11
10	1741	47	1338	59	12
11	1982	39	1429	56	17
12	1980	39	1499	54	15
13	2171	34	1441	56	22
14	1773	46	1547	53	7
15	1462	55	1073	67	12
16	1719	47	1491	54	7
Media	1847	44	1450	56	12

Nella tabella di **Figura 122**, dove sono messe a confronto le colonne dei dati delle due tabelle precedenti, è evidente che l'effetto nodo contribuisce per il 12 % alla diminuzione del carico di rottura della corda (56 % l'effetto totale e 44 % l'effetto della sola usura).

Nei **Campioni n° 1 e 2** la diminuzione è interamente dovuta all'effetto nodo (solo nel campione n° 2 si ha un impercettibile decremento dell'1% per "uso").

Di notevole rilievo è il fatto che l'effetto nodo nei campioni di corda usata è in media del 12%, molto al di sotto del valore riscontrabile nelle corde nuove, che oscilla intorno al 40%. Fortunatamente!

I **Campioni n° 7, 8, 14 e 16** hanno dei decrementi per effetto nodo inferiori addirittura al 10%. Allo stato non sembra possibile fare delle ipotesi plausibili per spiegare tale situazione. Ma il dato sperimentale resta ed è positivo: **con le corde usate l'effetto nodo è ridotto drasticamente.**

Analoghe constatazioni erano state fatte nella precedente analoga prova d'usura della durata di 12 mesi (1 aprile 1985 – 1 aprile 1986 presso il laboratorio prove materiali del CNS Monte Cucco CAI di Costacciaro): anche in questo caso le corde usate hanno mostrato delle riduzioni di tenuta per il solo effetto nodo molto basse, dell'ordine di qualche punto percentuale.

Al limite, in certi casi di corde particolarmente logore, il carico di rottura con nodo F_{rn} è risultato uguale al carico di rottura senza nodo F_r ! Ma attenzione: la corda era così mal ridotta da non reggere che qualche centinaia di kgp di forza.

01.I) Conclusioni - Questa prova di usura delle corde speleo ha mostrato, con decisione e univocità, **che una corda dopo due anni d'uso è, in genere, giunta in una condizione da poter essere ancora utilizzata**, sia pur con accortezza e assidui controlli. **Salvo casi di straordinaria incidenza ambientale (calcari selciferi, ad esempio) e utilizzo esasperato.**

Mettendo insieme quest'ultima considerazione con altre scaturite da diverse prove d'usura sulle corde speleo, si evidenzia che il loro decadimento procede in modo non lineare: rapido all'inizio e sempre meno veloce successivamente. Dopo due anni il decadimento è molto lento, permettendo un proseguo d'uso non certo breve.

Queste conclusioni non sono valide se si tratta di corde tenute continuativamente in grotta per lunghi periodi, specie se in presenza di molta acqua. Il limite temporale viene raggiunto ben prima di due anni (pag. 157, Figura 137).

In ultimo si ricorda che una corda non usata, tenuta lontana dalla luce, mantiene inalterate le sue caratteristiche per molte decine di anni.

02. Corda speleo nuova non usata per 18 anni

A seguito di una **situazione straordinaria**, una corda Edelrid SS 10 mm, fabbricata nel 1986, è stata conservata in magazzino, in assenza di luce, per oltre 18 anni. Testata nel 2015 a trazione lenta ($v = 0,006$ m/s) nel dinamometro del laboratorio CRASC a Costacciaro, ha dato i seguenti risultati:

senza nodo	2939 kgp	
con nodo guida con frizione d.s.	1901 kgp	(- 35%)

In precedenza, nel 1996 è stata sottoposta a test a trazione lenta lo stesso tipo di corda, nuova, appena acquistata dal rivenditore. I risultati per F_r e F_{rn} sono rispettivamente **2948 kgp** e **1899 kgp**: valori praticamente identici a quelli rilevati nel 2015.

E' un risultato che toglie ogni dubbio: **le corde se conservate opportunamente mantengono la condizione iniziale anche per decine di anni.**

03. Corde con utilizzo intenso, ridotto e ridottissimo

Per una serie di circostanze fortuite, seguite poi da una ricerca ad hoc, sono stati ricavati dei dati sull'evoluzione del decadimento di corde speleo con uso molto intenso, ridotto e ridottissimo.

La corda oggetto di queste prove sperimentali è la Beal Antipodes diametro 10, 5 mm statica.

03.a) Modalità d'esecuzione delle prove sperimentali e risultati

Corda Beal Antipodes diametro 10,5 mm (statica)

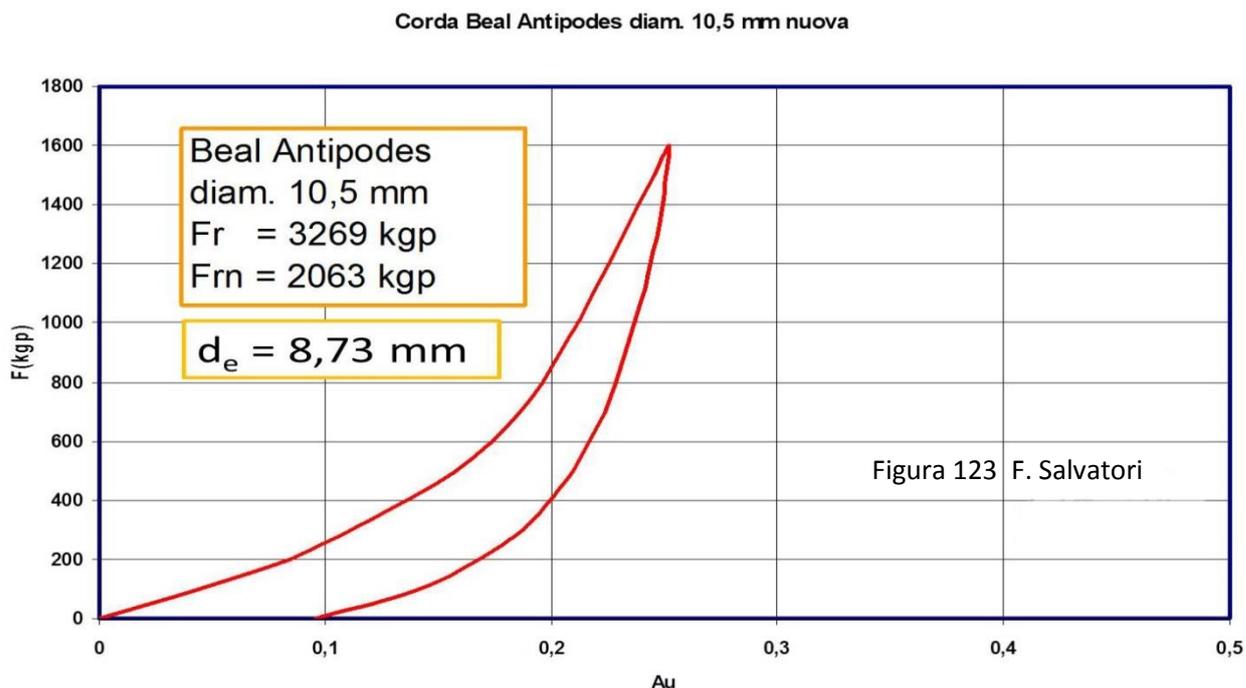
Trazione lenta (0,006 m/s)

Test a rottura senza nodo per ricavare F_r

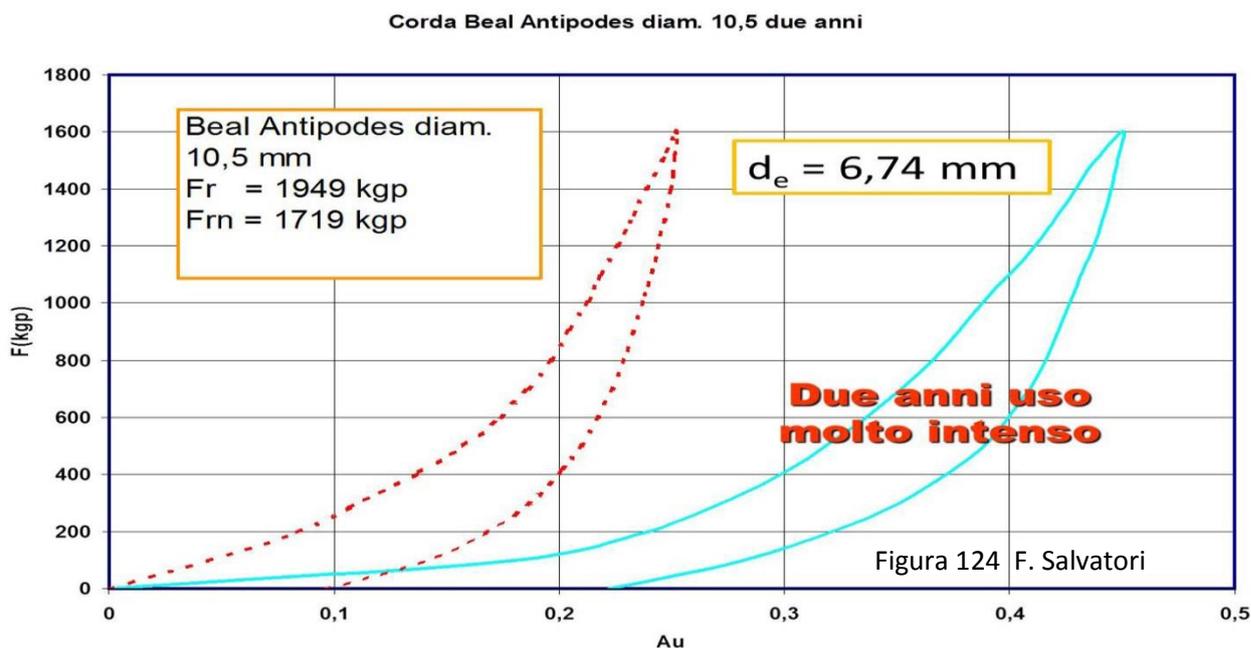
Test a rottura con nodo (guida con frizione) per ricavare F_{rn}

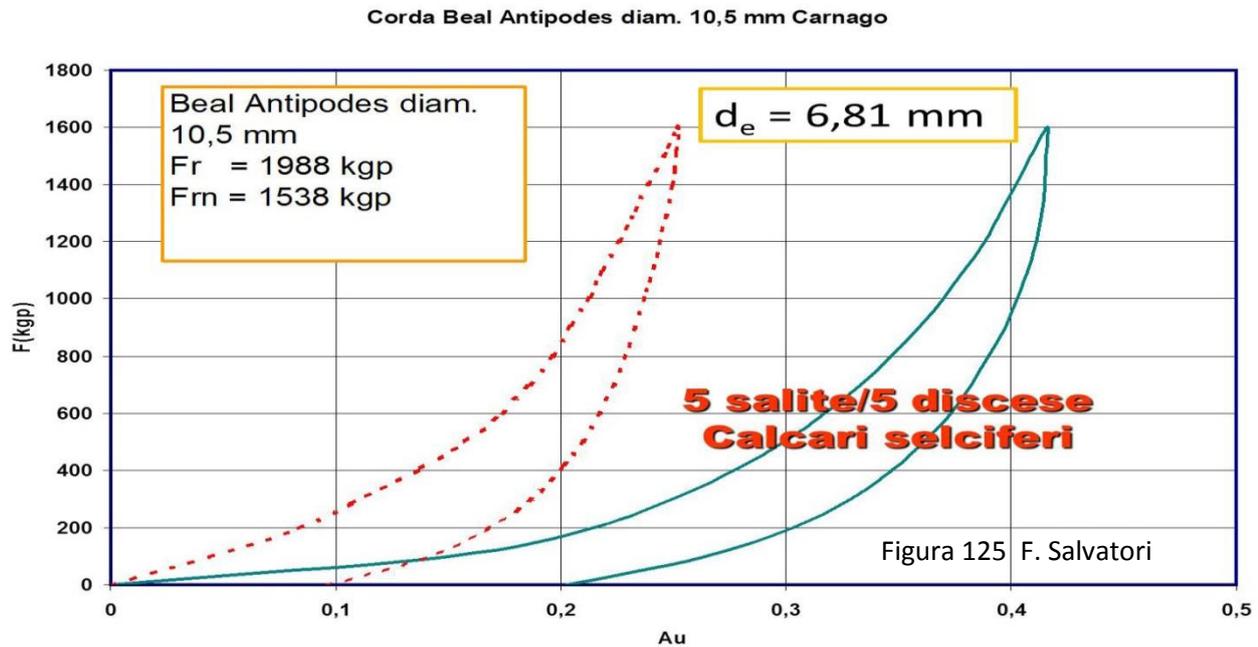
Curve di carico/scarico fino a 1600 kgp di forza

Il grafico di **Figura 123** (identico al grafico di **Figura 99**, pag. 124) si riferisce ai test effettuati sulla corda nuova e farà da riferimento rispetto ad analoghi test su corda usata, come rappresentati nelle figure che seguono.

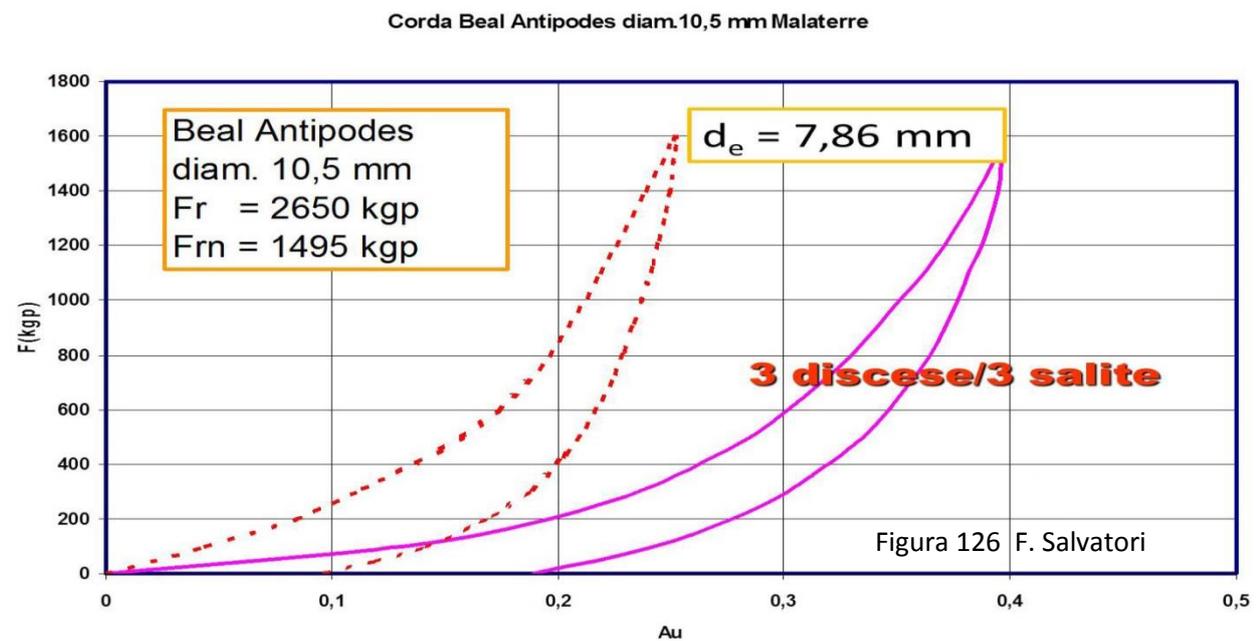


Nel grafico di **Figura 124** i dati dei test sullo stesso tipo di corda, ma **molto usata per due anni** in condizioni d'attività normale in grotta e forra.





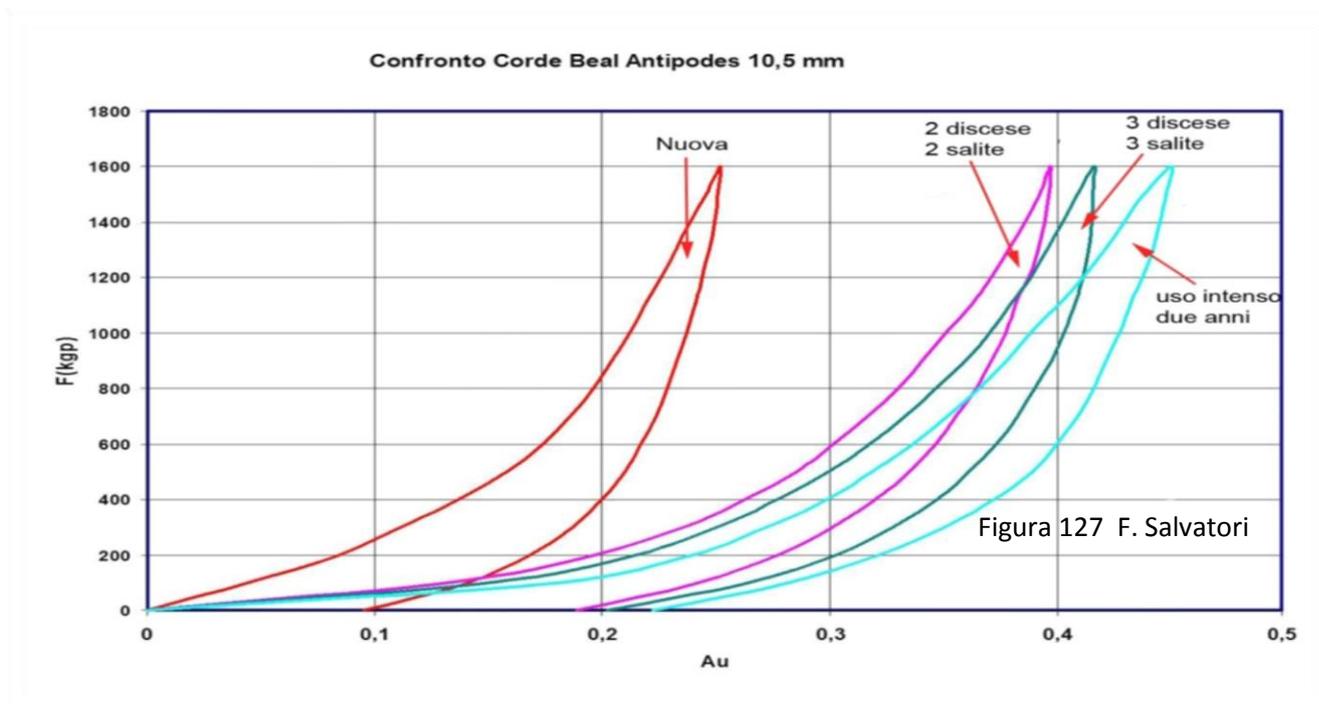
Nel grafico di **Figura 125** sono contenuti i dati di una corda **poco usata**: solo 5 discese e altrettante salite. Ma la grotta dove è stata utilizzata è scavata nei calcari selciferi, abrasivi.



Nel grafico di **Figura 126** la condizione di una corda utilizzata per solo 3 discese e 3 salite, in una voragine a cielo aperto profonda 110 m, con un solo frazionamento e senza regime idrico apparente. La corda nuova è stata bagnata prima di discendere e le discese sono avvenute a velocità moderata.

Ma per comprendere quali sono le diverse cause che portano a queste differenziazioni d'usura, per certi aspetti sorprendente, è opportuno tabellare i dati i dati rilevati in questo paragrafo:

Condizione	F_r (kgp)	- % F_r	F_{rn} (kgp)	- % F_{rn}	d_e	E (GPa)	- % E
Corda nuova	3269	-	2062	37	8,73	0,83	-
Usata 2 anni	1949	40	1719	12	6,74	0,75	9,6
5 discese/salite	1988	39	1538	23	6,81	0,78	6,0
3 discese/salite	2650	19	1495	44	7,86	0,80	4,0



Mettendo a confronto le curve di carico/scarico delle quattro corde (1 nuova + 3 usate) (**Figura 127**), risalta come siano sufficienti poche discese e risalite per modificarne nettamente la dislocazione nel diagramma, rispetto al grafico della corda nuova.

03.b) Conclusioni – Osservando i dati contenuti nella tabella soprastante e l’andamento delle curve di **Figura 127**, risalta che la deformabilità della corda “3 discese/3 salite” produce un **allungamento molto vicino** a quello delle **corde ben più usate**.

Per contro la diminuzione del diametro efficace d_e è minima.

Integrando queste due ultime osservazioni sperimentali, la deformazione plastica sotto trazione del campione di corda “3 salite/3 discese” è dovuta solo in parte minima alla diminuzione per usura della quantità di materiale che si oppone alle sollecitazioni, del che è indice la ridotta diminuzione del d_e .

La maggiore deformabilità è dovuta, invece, all’assestamento della struttura molto complessa della corda (CSCC), all’aspetto praticamente nuova.

La deformabilità dovuta alla CSCC, legata alla tessitura “calza + trefoli + fili elementari” diminuisce rapidamente con l’uso, tant’è che le corde usate si compattano e s’irrigidiscono.

Se invece la deformabilità all’allungamento si manifesta in modo rilevante lo si deve, essenzialmente, alla diminuzione del diametro efficace, come si può verificare dai dati della tabella soprastante dove il d_e delle corde “usata intensamente due anni” e “5 discese/salite” in grotte con calcari selciferi si riduce del 22-23%.

Un dato da sottolineare: già dopo il primo utilizzo la corda decade nelle sue caratteristiche, sia nella tenuta alla rottura (senza e con nodo) sia in deformabilità.

In presenza del nodo (che è poi la situazione più aderente alla realtà della progressione) il carico di rottura F_{rn} di una corda usata dopo una sola discesa di 3 speleo è di poco inferiore al valore di F_{rn} di una corda molto usata per due anni. Sorprendente!

In sintesi, da quanto preso in considerazione in questo capitolo, si può affermare che lo stato di “corda nuova” è puramente nominale e teorico, perché bastano poche discese con il discensore e poche risalite coi bloccanti, anche nel vuoto e non a contatto con la parete, per far decadere la corda a valori di tenuta e deformabilità prossimi a quelli di una corda intensamente utilizzata per più anni.

Senza però dimenticare, ancora una volta, che, da quanto esposto nel precedente capitolo, il gradiente del decadimento di una corda va riducendosi con il proseguire dell’utilizzo.

04. Test a conferma del decadimento delle corde per la degradazione idrolitica, la fotodegradazione, i gas ossidanti, le sollecitazioni ripetute e la trasmissione di calore

Si tratta di una sperimentazione che coinvolge corde per speleologia (statiche) e alpinismo (dinamiche), nuove e usate, di Nylon 6 e Nylon 6.6.

Sono analizzate le proprietà meccaniche della corda intera e, separatamente, delle sue componenti (calza e trefoli).

Lo scopo è di rilevare gli effetti della degradazione per uso, possibilmente individuandone i singoli contributi fra i diversi agenti: degradazione idrolitica, fotodegradazione, gas ossidanti, sollecitazioni ripetute e trasmissione del calore.

Attenzione: non viene valutata l'incidenza riduttiva dell'idrolisi dovuta alla presenza di molecole d'acqua igroscopica nei fili elementari (in grotta U.R. 100 %), in quanto i test sono sempre avvenuti con corda nuova asciutta o usata asciugata.

Ma la valutazione sulla sicurezza delle corde utilizzate deve tener conto non solo del loro stato d'usura acquisito a seguito dell'azione dei fattori prima elencati, ma anche del decremento del Carico di rottura e del Modulo d'elasticità che, in poco tempo (un'ora al massimo), si va ad aggiungere a causa dell'idrolisi dei legami idrogeno.

04.a) Condizioni sperimentali

Trazione lenta (0,006 m/s) a temperatura ambiente (20°C) con 45 % di Umidità Relativa.

Test su corde nuove e usate per ricavarne i carichi di rottura **senza nodi** F_r .

Test separati su calza e trefoli delle corde per valutarne i carichi di rottura **senza nodi** $F_{r\text{ calza}}$ e $F_{r\text{ trefolo}}$.

Le corde sottoposte a test (replicati tre volte) sono:

1. Beal Antipodes **statica nuova** diametro 10 mm **Nylon 6**,
2. Beal Antipodes **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10 mm Nylon 6,
3. Beal Booster III **dinamica nuova** diametro 9,7 mm **Nylon 6**,
4. Beal Booster III **dinamica usata** (4 anni arrampicata sportiva) diametro 9,7 mm Nylon 6,
5. Cavalieri Cave Explorer **statica nuova** diametro 10,6 mm **Nylon 6.6**,
6. Cavalieri Cave Explorer **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10,6 mm Nylon 6.6.

Le tre corde sottoposte a test sono diversamente caratterizzate nelle proprietà iniziali e nelle modalità di utilizzo:

1. le corde 1. 3. 5. sono nuove, testate dopo pochi giorni dalla loro uscita di fabbrica,
2. le corde 2. 6. sono le 1. 5. ma dopo un periodo di almeno 3 anni d'uso in grotta anche con lunghi periodi di permanenza continua,
3. la corda 4. è la 3. ma dopo un periodo d'uso di 4 anni,
4. le corde 1. 5. sono "statiche" tipiche per l'attività in grotta,
5. la corda 3. è l'unica "dinamica";
6. le corde 1. 3. sono composte di fili elementari di Nylon 6 (calza e trefoli),
7. la corda 5. è costituita con fili elementari di Nylon 6.6 (calza e trefoli).

Lo scopo di queste prove sperimentali è valutare l'incidenza di tutti fattori di degradazione esaminati nei capitoli precedenti su corde di diversa natura (Nylon 6 e Nylon 6.6), di diverso grado di elasticità (statiche e dinamiche) e diverso uso (in grotta e arrampicata sportiva).

Le prove empiriche a trazione lenta (quasi-statiche) effettuate sulle corde sopra indicate hanno portato alla compilazione delle **sei tabelle che seguono** (una per ogni tipo di corda, nuova e usata).

Corda Beal Antipodes 10 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10 mm n° trefoli 12

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	587	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	1046	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	141	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	2666	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1441	<i>- 46 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	7,9	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	64	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Beal Antipodes 10 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 10 mm n° trefoli 12

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	862	<i>tutti trefoli rotti (*)</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	470	<i>- 55 % (**)</i>
carico rottura trefolo (kgp)	75	<i>- 47 % (**) (***)</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	1370	<i>- 49 % (**)</i>
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1059	<i>- 26 % (**)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	5,7	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	72	

(*) La stessa corda usata ma bagnata ha visto la rottura di soli 4 trefoli

(**) Rispetto alla corda nuova

(***) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Corda Beal Booster III 9,7 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n° trefoli 9

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	542	<i>2 trefoli rotti (*)</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	764	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	120	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	1862	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1257	<i>- 32 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	6,6	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	70	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Beal Booster III 9,7 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n°trefoli 9

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	474	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	372	- 51 % (*)
carico rottura trefolo (kgp)	98	- 18 % (*) (**)
carico rottura senza nodi (kgp)	1370	- 36 % (*)
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1059	- 36 % (*)
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	5,1	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	67	

(*) Rispetto alla corda nuova

(**) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n°trefoli 16

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	589	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	864	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	157	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	3344	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1840	- 45 % (*)
punto fusione calza (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
punto fusione anima (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
diametro efficace (mm)	7,6	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	74	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 11,6 mm n°trefoli 16

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	843	<i>tutti i trefoli rotti</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	566	- 36 % (*)
carico rottura trefolo (kgp)	116	- 26 % (*) (**)
carico rottura senza nodi (kgp)	1533	- 54 % (*)
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1222	- 34 % (*)
punto fusione calza (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
punto fusione anima (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
diametro efficace (mm)	5,1	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	83	

(*) Rispetto alla corda nuova

(**) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Corde: test quasi-statici		confronto dati nuove/usate		
Beal Antipodes 10 mm Nylon 6				Figura 128 F. Salvatori
		Nuova	Usata	Diminuzione %
F_r corda (kqp)		2666	1370	49
F_r calza (kqp)		1046	470	55
F_r trefolo (kqp)		141	75	47
Diametro efficace (mm)		7,9	5,7	28
Punto fusione (°C)		218	218	
Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6				
		Nuova	Usata	Diminuzione %
F_r corda (kqp)		1862	1130	39
F_r calza (kqp)		764	372	51
F_r trefolo (kqp)		120	98	18
Diametro efficace (mm)		6,6	5,1	23
Punto fusione (°C)		218	218	
Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nylon 6.6				
		Nuova	Usata	Diminuzione %
F_r corda (kqp)		3344	1533	54
F_r calza (kqp)		864	566	34
F_r trefolo (kqp)		157	116	26
Diametro efficace (mm)		7,6	5,1	33
Punto fusione (°C)		265		

Dalle Tabelle precedenti è stata estratta una sintesi, tabella di **Figura 128**, di dati ritenuti utili per conoscere e **quantizzare** i fattori che determinano l'usura di una corda, soprattutto attraverso il confronto fra corde nuove e usate, usate in speleologia e in arrampicata sportiva, di Nylon 6 e Nylon 6.6.

Soprattutto da quanto esposto nella **Parte III** e nei **precedenti capitoli** sappiamo che il decadimento di una corda dipende da diversi fattori, che spesso agiscono in sinergia e con capacità d'incidenza diversificata:

1. il contatto con l'acqua produce l'**idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari e la riduzione del Carico di rottura** (anche del 16 %), ma, **eliminando il contatto con l'acqua, l'effetto** è completamente reversibile (per questo l'idrolisi non viene presa in considerazione in questo capitolo, visto che i test effettuati sono stati eseguiti tutti con corde asciutte nuove o asciugate usate);
2. il contatto con l'acqua che produce la degradazione idrolitica (azione solo parzialmente reversibile);
3. il contatto con l'acqua che causa la depolimerizzazione;
4. la produzione di calore durante la progressione su corda, che determinano ripetute variazioni di temperatura al passaggio delle attrezzature;
5. l'effetto cumulativo di deformazioni permanenti dovute al ripetersi di sollecitazioni (anche cicliche);
6. l'influenza della fotodegradazione dovuta ai raggi UV (sia d'origine solare che prodotti da lampade);
7. il contatto con gas tipo ossigeno e, soprattutto, ozono,
8. la produzione di calore con conseguenti innalzamenti di temperatura al di sopra della Temperatura di transizione vetrosa.

Le osservazioni e le conclusioni contenute nei paragrafi che seguono fanno anche riferimento, necessariamente, a tutte le altre elaborazioni sperimentali riportate nei precedenti **Capitoli 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6**.

Inoltre deve essere fatta un'integrazione anche con tutti gli altri elementi derivanti dalle sperimentazioni contenute nella **Parte III** (di volta in volta, a seconda dell'argomento trattato, sono indicati specifici riferimenti teorici o di risultati sperimentali).

04.b) Confronto sperimentale fra la Corda Beal Antipodes 10 mm statica Nylon 6, la Corda Beal Booster III 9,7 mm dinamica Nylon 6 e la Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm statica Nylon 6.6 - Dal confronto fra i dati ottenuti (Tabella di **Figura 128**) nascono diverse considerazioni rispetto ai fattori che portano una corda a usarsi e a decadere nelle sue proprietà meccaniche e chimico-fisiche, in particolar modo con la diminuzione del carico di rottura F_r e del modulo d'elasticità E , nonché della variazione della sua capacità di dissipare l'energia prodotta dalle sollecitazioni.



Figura 129 F. Salvatori

04.b.a) Corda Beal Antipodes - Partiamo con l'osservazione, di **valore emblematico**, relativa ai dati ricavati per la corda speleo **Beal Antipodes statica 10 mm Nylon 6** (replicheremo successivamente analoghe analisi per le altre due corde sottoposte a prove equivalenti).

In **Figura 129** i capi recisi della corda: a destra usata e a sinistra nuova. E' evidente la differenza fra le condizioni della sua calza all'esterno: senza segni d'abrasione e di recisione dei fili elementari, la **corda nuova (Figura 130)**; fasci di fili elementari deformati, strizzati, incisi, rotti nella calza della **corda usata (Figura 131)**.

La calza della **corda nuova**, non essendo stata sottoposta ad alcun tipo d'azione e sollecitazione, ha un aspetto lucente, sericeo e pulito, con le maglie della calza morbide e non compatte.

La calza della **corda usata**, per contro, ha subito l'azione dell'abrasione, del contatto con le pareti e con i materiali detritici tipici degli ambienti dei sistemi carsici sotterranei.

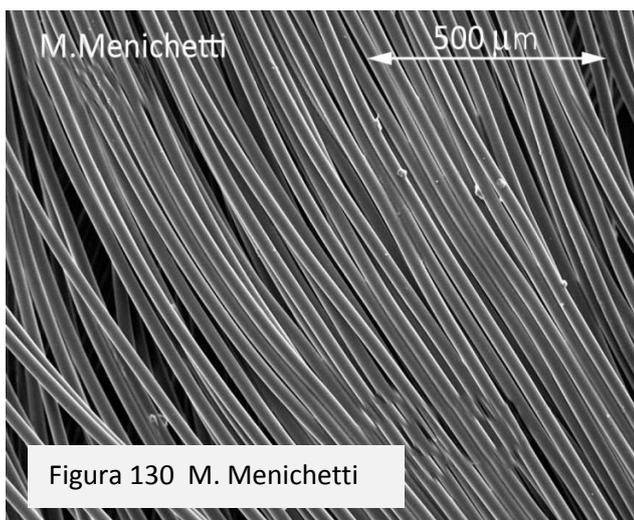


Figura 130 M. Menichetti

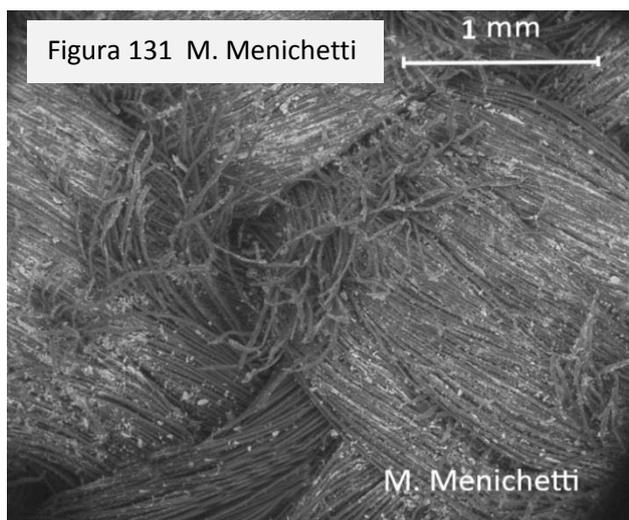


Figura 131 M. Menichetti



Figura 132 F. Salvatori



Figura 133 F. Salvatori

Il solo confronto fra le foto delle **Figure 130 – 131** (i fili elementari della calza della corda nuova e della corda usata) conforta la motivazione, **parziale**, per la **diminuzione del 49 %** del carico di rottura della corda usata (pag.147, **Figura 128**).

Ma questo deperimento “meccanico”, dovuto certamente anche all’abrasione su pareti, non può giustificare la perdita del 47 % di proprietà meccaniche dei trefoli.

Infatti, se esaminiamo la parte terminale delle due corde - con la calza aperta e i trefoli liberi (**Figura 132** corda nuova; **Figura 133** corda usata) - appare evidente che i trefoli della corda usata non hanno subito abrasioni, rotture, deformazioni e incisioni, tali da giustificare la marcata diminuzione del carico di rottura (ridotto alla metà rispetto ai trefoli della corda nuova) (**Figura 128**). Diminuzione non tanto diversa da quella della calza che invece ha subito l’intera gamma usurante, compresa l’azione meccanica d’abrasione sulle pareti.

Visivamente non s’individuano aspetti che possano indicare una degradazione localizzata **all’interno della calza** e/o nei **trefoli**, a parte una leggera colorazione marrone. **Le anime (calza + trefoli) della corda nuova e della corda usata sono praticamente uguali.**

I **trefoli della corda usata** sono puliti, sericei, senza segni di cedimenti, ammaccature, incisioni, esattamente **come quelli della corda nuova**. E non potrebbe essere altrimenti data la protezione che la calza oppone al passaggio di ogni **elemento solido** - tagliente, incisivo e contundente – proveniente dall’ambiente esterno.

Può oltrepassare la **barriera-filtro costituita dalla calza** solo un **liquido** (acqua, naturalmente) e/o un **gas** (ossigeno e ozono) e/o il **calore** (per. es., quello trasmesso per attrito dal discensore) e/o l’effetto delle **sollecitazioni** statiche e cicliche applicate alla corda durante la normale progressione o in casi straordinari.

Sono proprio questi **quattro agenti** che hanno fatto decadere nella corda usata $F_{r\ trefolo}$ con una **percentuale non troppo dissimile** da quella di $F_{r\ calza}$: **55 % contro 47 %**. E la **differenza dell’ 8 %** è, verosimilmente, imputabile all’azione meccanica dell’abrasione della corda sulle pareti, **quella che ha colpito solamente la parte esterna della calza**. Da quest’ultima considerazione si può dedurre un’indicazione **su quanto percentualmente contribuisca l’abrasione esterna sull’usura complessiva** di una corda: meno del 10 %.

Dunque l’usura su una corda speleo-alpinistica non agisce solo con azioni per contatto solido-solido, ma anche e soprattutto con azioni chimico-fisiche e meccaniche che colpiscono la calza, ma poi la penetrano e agiscono anche sul suo corpo, sulla sua parte interna e, infine, sui trefoli.

Riepilogando e anche ripetendo quanto prima elencato, gli agenti che possono agire su tutta la corda, ma anche superare la protezione della calza sono:

1. la **degradazione idrolitica** per perdita di **massa** dei fili elementari e di **peso molecolare numerico** (depolimerizzazione) delle poliammidi;
2. la **produzione di calore**;
3. l’effetto delle **deformazioni permanenti** prodotte dalle sollecitazioni;
4. la **foto-degradazione**;
5. i **gas ossidanti**;
6. la **pirolisi** e la **decondensazione**.

A proposito dell’elenco Punto 1, considerato che la corda usata in grotta può essere stata:

- a) immersa in acqua,
- b) bagnata dall’acqua,
- c) esposta ad una umidità relativa U.R. quasi sempre vicina al 100 % (che equivale, si ricorda, ad una immersione totale),

ha avuto modo d’agire la **degradazione idrolitica** con diminuzione di massa e/o di peso molecolare del polimero (depolimerizzazione).

Questo, di conseguenza, ha prodotto una diminuzione dei carichi di rottura come mostrano i grafici sperimentali riportati nella **Figura 73** (pag. 81 e seg.) e nelle **Figure 74 – 75** (pag. 83 e seg.).

È questo un fattore di decadimento che, dato il **tempo non breve d'utilizzo della corda** in esame (3 anni), è di un certo rilievo, **non trascurabile**.

A proposito dell'elenco Punto 2, già nei **Paragrafi a – b** (pag. 90 e seg.) sono messi in evidenza gli effetti della produzione di calore per gli attriti generati con i discensori, soprattutto in presenza di materiale siliceo: si generano attriti di grande incidenza e, dopo tre anni d'attività, **possono far decadere un corda al punto da non essere più utilizzabile in sicurezza**, sia per l'azione "erosiva" sulla superficie esterna della calza, sia per l'aumentato coefficiente d'attrito dell'insieme corda/discensore, con conseguente maggiore produzione di calore.

Anche nell'analisi della **Corda del Pozzo Pataton** (pag. 155 e seg.) si è visto come i tratti di corda maggiormente usurati sono quelli dove hanno agito i discensori (e quindi la produzione di calore). È dato che gli anni di utilizzo e permanenza in grotta sono più di 10, il **decadimento è tale da rendere la corda insicura e inaffidabile**.

Nella **Parte III** (pag. 90 e seg.) è ben inquadrato il contributo negativo del calore sulle corde e le conseguenze che vi produce: un apporto inevitabile e di grande incisività; il **maggiore fra tutti**.

A proposito dell'elenco Punto 3, è difficile individuarne l'entità dello specifico contributo con test a trazione lenta e con un carico limitato d'energia in gioco.

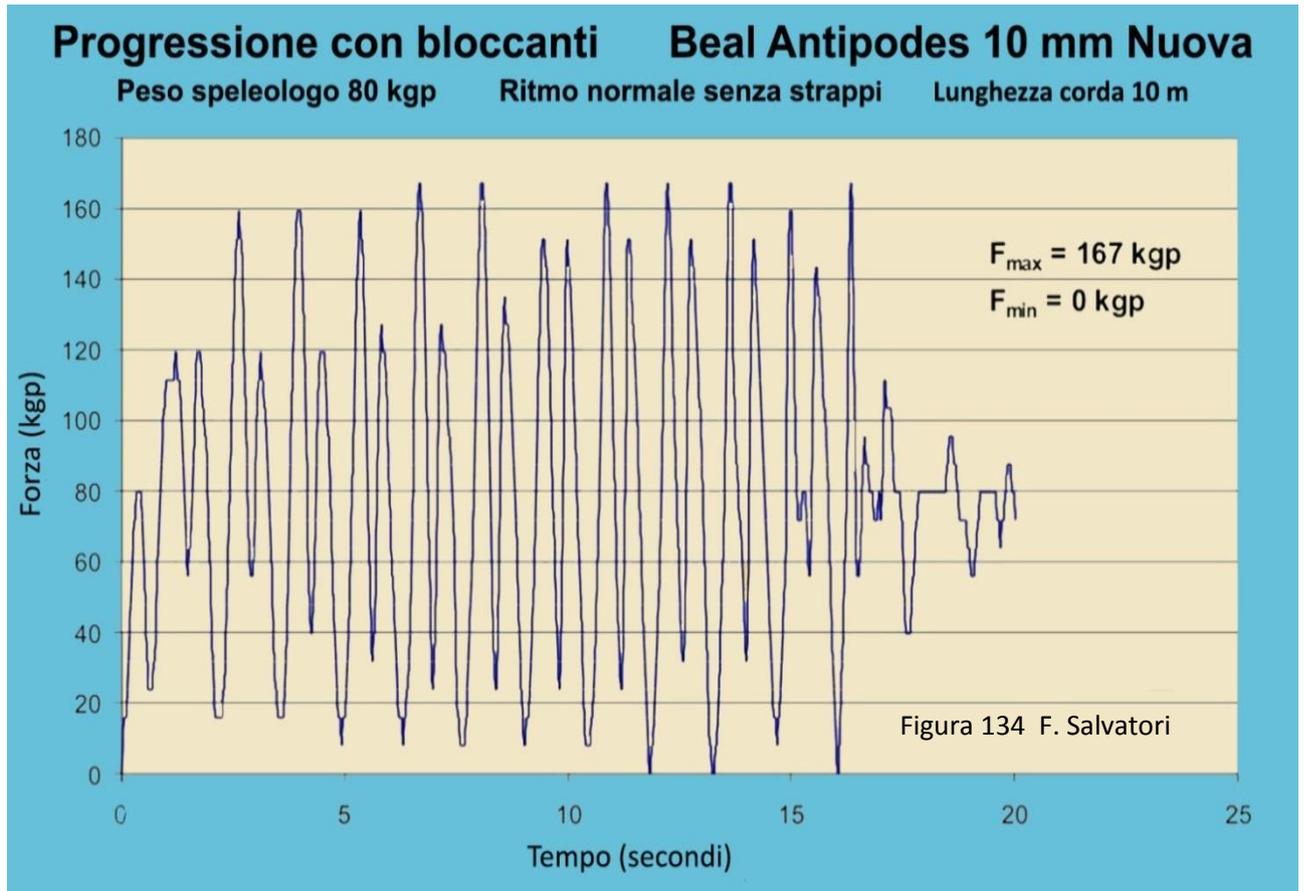
Nella successiva **Parte VI** (pag. 169 e seg.), dove è esposto il risultato dei test sulla **Torre di Caduta** (pag. 38 e seg.) sulle stesse corde elencate in precedenza (tabelle di pag. 144), le analisi e le conclusioni saranno ben specificate e dettagliate.

Tuttavia, fin d'ora ricordiamo le parziali anticipazioni già esposte nella **Parte III** (pag. 61 e seg., **Figure 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 58 - 59**), quando vengono messe in evidenza le conseguenze delle sollecitazioni (piccole e grandi, ripetitive o cicliche che siano) sulla stessa struttura della corda (pag. 62, **Figura 51**) e sulla forma e distribuzione delle catene di macromolecole nei fili elementari (di Nylon nella fattispecie) e sul rapporto cristallino/amorfo delle poliammidi.

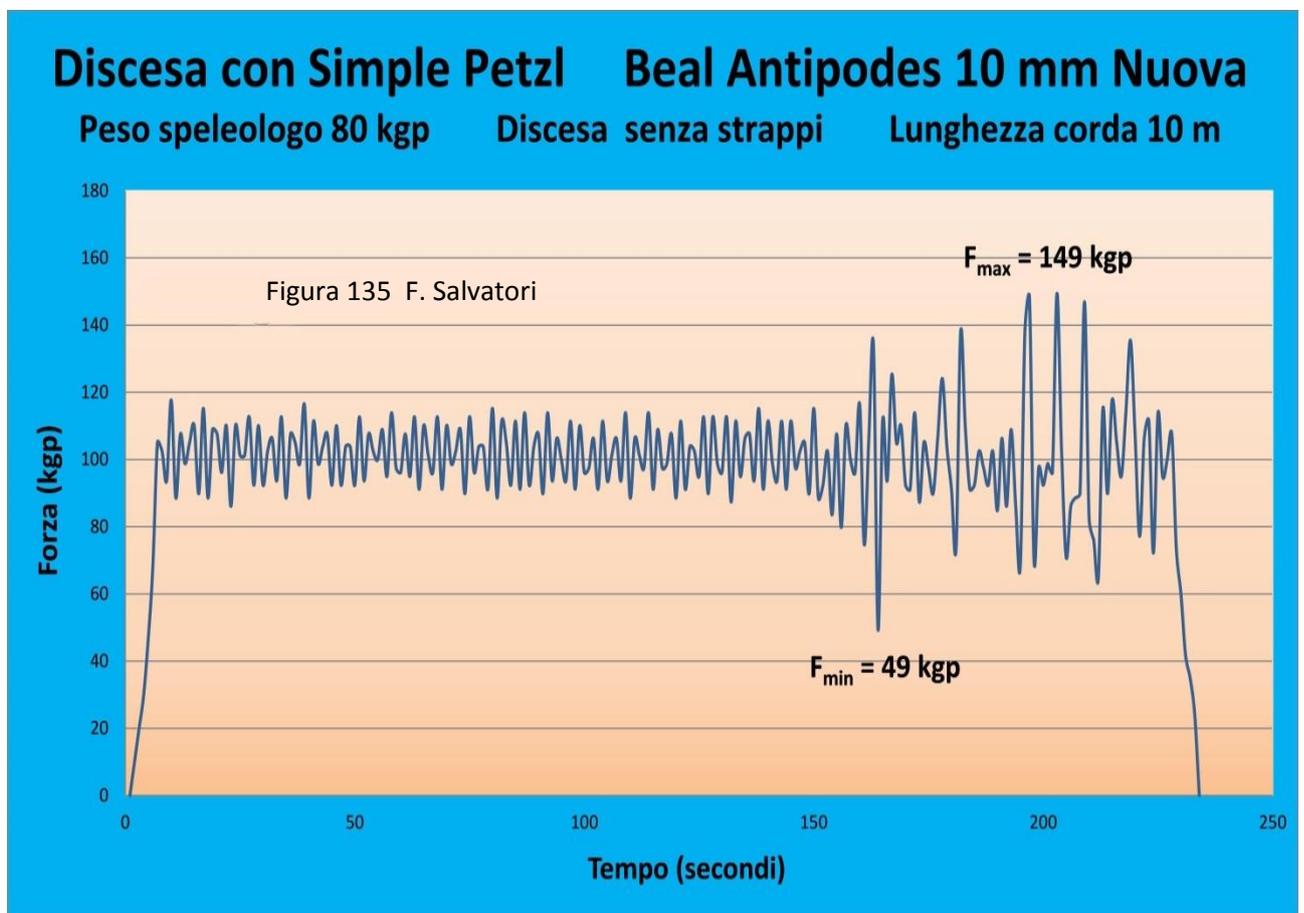
Possiamo elencare nel dettaglio gli aspetti salienti del fenomeno degradante causato dal **succedersi delle sollecitazioni**:

1. la compattazione della struttura della corda (calza + trefoli + fili elementari) è in gran parte irreversibile, ma si consuma già nelle prime sollecitazioni, per poi andare ad esaurirsi rapidamente; viene diminuito solo al Modulo d'elasticità E .
2. la compattazione della struttura complessa della corda non comporta la rottura dei fili elementari o la riduzione della loro resistenza alla trazione e pertanto per questa causa non c'è diminuzione del carico di rottura F_r ;
3. la struttura semicristallina dei fili elementari (pagg. 63 – 64, **Figure 55 – 56**) si modifica in modo irreversibile a vantaggio dell'aumento dei settori amorfi; configurazioni a strati come quella indicata in **Figura 55** (pag. 63) tendono a distanziare le stratificazioni "cristalline" e aumentare lo spazio occupato dai settori amorfi (ricordiamo che le zone amorphe hanno la capacità di acquisire più acqua igroscopica come rilevato sperimentalmente nei grafici della **Figure 64 – 65** (pag. 73) e che più acqua all'interno dei fili elementari significa più "plasticità" del Nylon, con diminuzione sia di E che di F_r);
4. la dislocazione spaziale di una catena di macromolecole di Nylon, come emblematicamente rappresentata in **Figura 56** (pag. 64), sotto trazione tende, in parte irreversibilmente, a disporsi nello spazio in modo sempre meno intricata e più lineare, facendo aumentare la distanza r fra i capi l_1 e l_2 ; questo non comporta la diminuzione di F_r , ma solo di E ;
5. si possono creare sui fili elementari, soprattutto in superficie e in corrispondenza delle zone cristalline più fragili, delle "cricche", cioè delle microfrazioni con rottura parziale di alcuni fili elementari; ciò va a discapito del carico di rottura F_r (e diminuisce anche E).

Sempre in relazione agli effetti delle sollecitazioni, è da tenere presente che anche quelle d'intensità bassa danno il contributo degradante, specie se sono molteplici; come nel caso della progressione in risalita su corda, quando ad ogni "pedalata" la corda è sollecitata.



Nei grafici delle **Figure 134 - 135** ci sono i risultati sperimentali della registrazione della variazione di forza applicata alla corda durante una risalita/discesa di uno speleologo.



Come è ben evidente queste sollecitazioni non arrivano a superare i 200 kgp (appena il 5 - 6 % del carico di rottura F_r della corda); ma nella sua vita media (sempre al di sopra dei 2 anni) queste “trazioni” sono molte migliaia e ognuna dà un sia pur piccolo contributo al decadimento. Tutto sommato, l'effetto non è trascurabile.

Infatti, nonostante che le sollecitazioni registrate nelle **Figure 134 – 135** siano di valore molto ridotto rispetto al carico di rottura F_r dell'Antipodes nuova (3269 kgp), sono pur sempre tali da superare, sia pur in piccola parte, il limite d'elasticità e lasciare delle deformazioni permanenti: la natura **viscoelastica** del Nylon lo impone.

A conferma di ciò, se le poliammidi vengono sottoposte a una **prova d'usura con sollecitazioni ripetute**, subiscono il **fenomeno del “creep”**, come a dire la fluidificazione del materiale polimerico, che diminuisce il modulo d'elasticità con il succedersi delle trazioni fino a produrre il cedimento della corda a un carico di rottura molto più basso di quello riscontrato con corda nuova.

In **Figura 71** (pag. 78) è riportata la sintesi sinottica di questo fenomeno di “Creep” (anche denominato “**usura a fatica**”), frutto di una serie di prove sperimentali DMA (Analisi Dinamica Meccanica) su **provini isotropi di poliammidi**. Da questa sintesi grafica si può rilevare l'incidenza di questo particolare tipo di decadenza sull'usura complessiva: per produrre una “plastificazione” dei fili elementari di una corda, con conseguente **totale cedimento meccanico**, agendo con sforzi massimi dell'ordine di qualche decina di MPa, occorrono alcune **decine di milioni di cicli!** E anche ipotizzando un alto numero di sollecitazioni cicliche applicate alle corde a seguito di un'intensa attività in grotta, di cicli prodotti se ne possono contare, al massimo, una decina di migliaia, insufficiente a produrre il cedimento per “usura a fatica”.

Pertanto l'incidenza di questo fattore di decadimento, in percentuale sul complessivo degrado, non è trascurabile ma non certo primario. Ben prima di poter raggiungere con la sola progressione il milione di cicli, una corda speleo si logora a sufficienza, per altri motivi, da essere necessario eliminarla.

Ma di tutt'altro rilievo è l'applicazione a corde di Nylon di carichi dinamici di notevole entità (anche più di 2000 kgp di forza massima e oltre 5000 J d'energia totale), con test ripetuti sullo stesso campione. In questo caso sperimentale le prove sono molto penetranti per l'esplorazione delle caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche delle corde, mettendo in risalto e quantificando diversi meccanismi “d'invecchiamento” che altrimenti sarebbe difficile evidenziare. La descrizione dettagliata di questo fenomeno “degenerativo” è contenuta nella **Parte V** (pag. 169 e seg.) di questo lavoro.

A proposito dell'elenco Punto 4, è noto che i raggi UV colpiscono le poliammidi in modo netto e rapido, provocando una drastica depolimerizzazione e quindi una dannosissima azione di diminuzione di E e, soprattutto di F_r ; ma quest'azione viene praticamente annullata con il trattamento dei fili elementari, sia con sostanze opacizzanti (che si assorbono sulla superficie esterna del filo e vengono applicate dopo la laminatura e la filatura) o additivi inseriti nella massa fusa nel miscelatore-estrusore (pag. 61, **Figura 50**); a conferma dell'efficacia di questi trattamenti, un test che ha esposto alla luce diurna una corda speleo per 12 mesi ha dato un diminuzione del carico di rottura F_r del 4 % rispetto alla equivalente corda nuova.

A proposito dell'elenco Punto 5, i gas ossidanti producono una depolimerizzazione attraverso la rottura dei legami $-CH_2 - CH_2-$ delle macromolecole delle poliammidi (ma i meccanismi chimici sono tutti da individuare) producendo di fatto una **depolimerizzazione** che, come indica il grafico di **Figura 73** (pag. 81), porta a una riduzione di F_r (e di E).

Non ci sono rilevazioni sperimentali adeguate, ma è verosimile ritenere che **ossigeno** o **ozono** facciano decadere le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche dei fili elementari di Nylon in maniera molto limitata, sicuramente trascurabile.

A proposito dell'elenco Punto 6, l'effetto degradante può essere prodotto anche dalla **pirolisi** o dalla **decondensazione** (inverso della reazione di policondensazione indicata nella **Figura 49**, pag. 61) che avvengono in genere solo ad alta temperatura ed equivalgono alla rottura di legami chimici, e quindi alla depolimerizzazione con le conseguenze su F_r e E indicate nei precedenti **Punti 4 – 5**.

Ma sia la pirolisi che la decondensazione possono avere effetti, sia pur molto ridotti, anche a temperatura ambiente-grotta. Ma non ci sono riscontri sperimentali accreditati, e tutto porta a concludere che questi effetti siano trascurabili nell'ambito della vita media di una corda speleo.

04.b.b) Depolimerizzazione con agenti acidificanti - E' questa un'azione estremamente rapida e distruttiva: se un acido - anche debole, tanto in fase liquida che gassosa - entra in contatto con una poliammide, rompe i legami $-CH_2-CH_2-$ delle macromolecole, riportandole a uno stato "quasi-fuso", simile a quello in cui si trovano nel miscelatore - estrusore di **Figura 50** (pag. 61), con F_r e E praticamente nulli.

Gli ambienti delle grotte possono prevedere anche delle cavità d'origine ipogenica con presenza di **idrogeno solforato** H_2S (letale sopra certe concentrazioni). Se ne percepisce l'odore (uova marce) con concentrazioni superiori a 0,2 ppm. Oltre le 10 ppm diviene irritante e non sopportabile a lungo all'uomo.

E' solubile in acqua, dove forma un ambiente acido con pH che può arrivare a 4,5. Ma, in condizioni vadose a contatto con l'aria, si ossida (con catalizzazione batterica) in acido solforico H_2SO_4 . In questo caso la soluzione può raggiungere anche **pH = 1-2**.

A tal proposito, una corda **Edelrid SS 10 mm** è rimasta sospesa nel Pozzo Trieste (100 m) delle Stufe di S. Calogero dal 1979 al 1998 (19 anni): al momento della messa in opera era nuova ed è servita solo per la calata e il recupero di uno speleologo; dopo di che è rimasta nella voragine senza che venisse più utilizzata.

Le Stufe di S. Calogero è un sistema carsico ipogeo solfureo dove la temperatura varia fra i 37°C e i 42°C, l'umidità è al 100 % e la concentrazione dell'idrogeno solforato H_2S è intorno a 5 ppm.

Nel 1998 la corda in questione è stata tolta dal Pozzo Trieste e nel 1999 vi sono stati fatti dei test a trazione lenta per valutare, su diversi tratti, il carico di rottura senza nodi F_r . Il laboratorio CRASC dove sono state fatte le prove aveva una temperatura di 23°C e una U.R. del 45 %. La corda era stata fatta asciugare fino a farla mettere in condizioni d'equilibrio con l'U.R. del laboratorio.

La media di F_r su 13 diversi tratti di corda è stata: $F_r = 650 \text{ kgp}$.

Per valutare questo risultato lo mettiamo a confronto nella tabella che segue con i dati ottenuti in altre prove confrontabili (le esperienze hanno visto le corde permanere continuativamente in grotta per i giorni indicati).

Corda statica Edelrid SS 10 mm (o equivalenti)				
Condizione	Modo d'uso	Giorni in grotta	F_r (kgp)	Diminuzione F_r
Nuova	-	-	2939	-
Conservata	18 anni non usata	-	2925	0,002 kgp/giorno
Usata	Progressione uso gruppo 730 (2 anni)		1356	2,16 kgp/giorno
Usata	500 passaggi	3955 (11 anni)	795	0,60 kgp/giorno
Appesa	Nessun passaggio	3955 (11 anni)	1366	0,48 kgp/giorno
Usata (H_2S)	2 passaggi	6939 (19 anni)	650	0,33 kgp/giorno

Considerazioni:

1. la corda "conservata" per 18 anni, protetta dalla luce e senza scambi gassosi, ha le stesse proprietà meccaniche della corda nuova;
2. la corda "usata" per 730 giorni (2 anni) per una normale attività speleologica di un gruppo, senza una permanenza in grotta continuativa, ha avuto una **diminuzione** del carico di rottura senza nodi pari a **2,16 kgp al giorno**;
3. la corda "usata" con 500 passaggi discesa/salita rimasta in grotta continuativamente per 3955 giorni ha avuto un decremento di F_r pari a 0,60 kgp/giorno, tale da rendere la corda non più valida a permettere una progressione in sicurezza;
4. la corda del Pozzo Trieste, dove la presenza dell'acidificante H_2S ha contribuito al decadimento del Nylon con la depolimerizzazione, l'usura è stata tale da rendere la corda assolutamente inutilizzabile.

Conclusioni (in parte già esposte in precedenza):

- è evidente che la poliammide è un materiale che **non decade nel tempo** se conservata adeguatamente;
- se l'uso di una corda speleo si protrae oltre i due anni, specie se è stata mantenuta costantemente in grotta, questa è al limite della sicurezza e affidabilità; si può continuare a usarla ma sempre sotto stretto controllo;
- dopo periodi d'utilizzo in grotta - in vario modo - di più anni la corda è da eliminare senza esitazione, anche se è rimasta solamente appesa (decade anche per la sola esposizione a U.R. al 100 %);
- se oltre al decadimento per progressione e per contatto con l'acqua si aggiunge la presenza di un acidificante come l'idrogeno solforato la corda è tale che potrebbe cedere in un punto qualsiasi anche sotto l'azione di una sollecitazione di poche centinaia di kgp.

Da rilevare, anche in assenza di agenti acidificanti e per la sola esposizione in un ambiente-grotta al 100 % di U.R., la corda decade e se il periodo di permanenza supera i 6 – 7 anni può diventare pericolosa. E' però altrettanto evidente che prolungando tale periodo l'effetto degradazione diminuisce (fino a scomparire?).

04.b.c) Confronto fra test su corda usata in grotta e corda usata in arrampicata sportiva - Tenendo presente la produzione di calore per attrito (*pag. 90, Relazione 21*), dalla tabella di **Figura 128** (*pag. 147*) le differenze che maggiormente si rilevano fra la **Beal Antipodes statica** e la **Beal Booster III 9,7 mm dinamica** (entrambe di **Nylon 6**) sono:

- differenza **rilevante** fra corda nuova e usata nella riduzione percentuale del carico di rottura F_r della corda intera: 49 % per l'Antipodes contro 39 % per la Booster;
- differenza **contenuta** fra corda nuova e usata nella riduzione percentuale del carico di rottura della calza ($F_{r\text{ calza}}$): 55 % per l'Antipodes contro il 51 % per la Booster;
- differenza **molto accentuata** fra corda nuova e usata nella riduzione percentuale del carico di rottura del trefolo ($F_{r\text{ trefolo}}$): 47 % per l'Antipodes contro il 18 % per la Booster;

Il **primo punto** suggerisce l'ipotesi che la differenza netta delle percentuali dipenda dalla **manca**za di **contatto ruvido** con le pareti **nell'arrampicata sportiva**, con conseguente mancanza d'incisioni e rotture dei fili elementari nella parte esterna della calza. La differenza del 10 % è quantitativamente compatibile con quanto indicato nel precedente **Punto 12.a.b.1**.

Il **secondo punto** è spiegato con il fatto che la calza della corda dinamica e quella della statica subiscono un'azione abrasiva non troppo dissimile, ma **si distinguono** perché nella dinamica non agisce il contatto con l'acqua e quindi la degradazione idrolitica non ha prodotto alcun effetto. Anche in questo caso, facendo e debiti calcoli, la differenza del 4 % è compatibile con quanto rilevato per altre vie.

La differenza **molto accentuata** indicata dal **terzo punto** è verosimilmente dovuta a una duplice motivazione: nella corda Booster dinamica non agisce l'azione degradante dell'idratazione (che in grotta con la corda statica ineluttabilmente avviene), mentre la quantità di calore prodotto dai discensori speleologici è superiore a quella prodotta dai freni usati nell'arrampicata sportiva.

04.b.d) Confronto fra test su corda di Nylon 6 e corda Nylon6.6 e conseguenze per diversa Temperatura di fusione T_m - Sempre sulla base dei dati contenuti nella tabella di **Figura 128** (*pag. 147*) si nota un'altra conseguenza dell'effetto calore prodotto per attriti fra corda e discensore: nella corda Cavalieri di **Nylon 6.6**, con **punto di fusione a 265°C**, il calore prodotto dagli attriti fra corda e discensore durante le calate ha un **effetto degradante ridotto rispetto** a quanto di analogo accade **nella corda Antipodes di Nylon 6**, con punto di fusione a 218°C.

Questo emerge dal confronto fra corda nuova e corda usata nelle riduzioni percentuali dei carichi di rottura $F_{r\text{ calza}}$ e $F_{r\text{ trefolo}}$ della corda Beal e della corda Cavalieri: rispettivamente 55 % e 47 % nella prima, mentre molto più basse, 34 % e 26 %, nella seconda.

Si conferma dunque il principio per cui il materiale con più elevata temperatura di fusione "sopporta" meglio gli innalzamenti di temperatura, mantenendo, per esempio, più facilmente le proprietà meccaniche.

05. Decadimento differenziato di una corda su armo speleo

05.a) Premessa - Con i campioni di corde oggetto delle considerazioni dei precedenti capitoli non abbiamo fatto distinzione da tratto a tratto: sono state recapitate in laboratorio asciugate e dopo averle disfatte, eventualmente, dai nodi e dalle matasse e sono state testate prelevando i campioni in modo casuale.

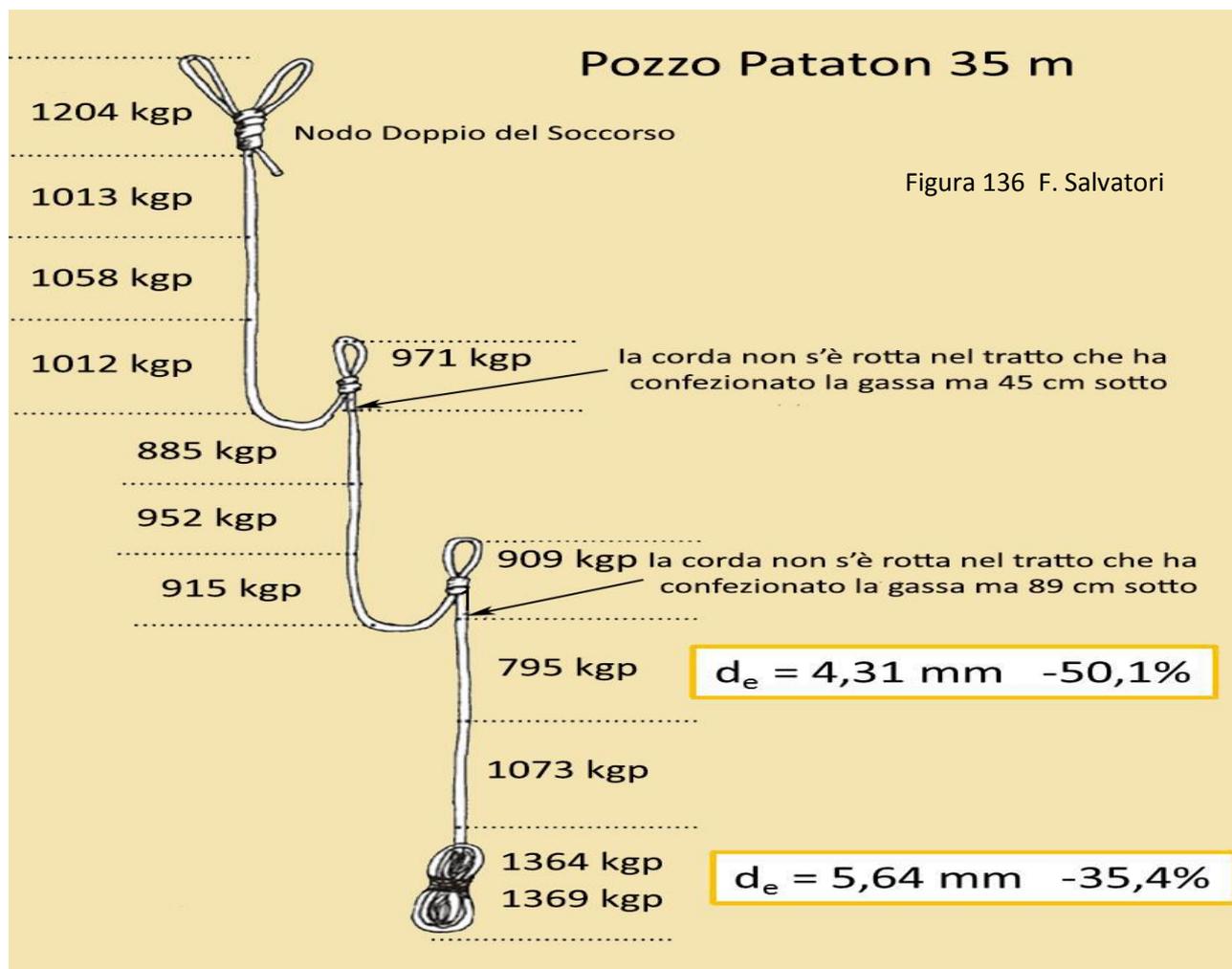
Ma una corda nella realtà dell'utilizzo in grotta è usurata in modo disuguale, da tratto a tratto, a seconda della funzione che svolge nell'armo:

1. attività di discesa/risalita (dinamica);
2. compressione fra le spire dei nodi (statica);
3. pressione sugli ancoraggi (statica);
4. collegamenti fra ancoraggi (statici);
5. scorrimento/appoggio nei traversi (statico-dinamico, non presente nel sistema d'armo in esame);
6. ammatassamento a fine corda (statico).

Per evidenziare le difformità nel decadimento abbiamo analizzato una corda tratta dalla grotta senza disciogliere nodi e matasse (Abisso Spaurasso – Monte Grappa - **Pozzo Pataton**) (**Figura 136**).

Anche in questo caso la corda è una Beal Antipodes con diametro (apparente) 10,5 mm. I valori che la caratterizzano **da nuova** sono: carico di rottura senza nodi $F_r = 3269 \text{ kgp}$; con nodi $F_{rn} = 2063 \text{ kgp}$ e diametro efficace $d_e = 8,73 \text{ mm}$.

Il sistema d'armo è rimasto in grotta **dall'agosto 1995 fino al giugno 2006; nel complesso 10 anni + 10 mesi**. La grotta è **idrologicamente attiva** con depositi di **sabbia silicea**. Gli speleologi transitati non sono **meno di 500**, in discesa e risalita.



I risultati dei molteplici test inseriti in **Figura 136** si riferiscono ai **carichi di rottura senza nodi**: sono molto significativi e statisticamente validi (le prove sperimentali su campioni dello stesso tratto sono state ripetute più volte). La corda in questione era stata estratta dalla grotta e mantenuta al buio in magazzino a 12°C di temperatura e con U.R. al 40 %. Le prove sono state **eseguite circa 10 giorni dopo che la fune è stata tolta dalla grotta**. Qui di seguito l'esposizione dei punti salienti scaturiti dall'analisi.

05.b) Conclusioni

05.b.a) Decadimento complessivo - La corda appare ben conservata e senza apparenti lesioni. Ma il suo deterioramento è marcato, tanto che il diametro efficace si è ridotto alla metà (**8,73 mm** da nuova contro una media di **4,90 mm** da usata). Le rotture **con nodo** hanno dato valori intorno ai 650-700 kgp, ben al di sotto di quello che richiede la catena di sicurezza (LIR = 1100 kgp). Integrando questa constatazione (relativa a quasi 11 anni d'uso continuativo, permanentemente in grotta) con le conclusioni tratte con la prova **d'usura di 24 mesi** esposta nel **Capitolo 01** (pag. 123 e seg.), possiamo affermare che la decadenza di una corda (prodotta da molteplici fattori, come CSCC, calore, contatto con l'acqua ed esposizione in aria con U.R. al 100 %, successione di choc) aumenta con il passare del tempo d'utilizzo, molto rapidamente all'inizio e poi con incrementi via via più ridotti, ma pur sempre presenti. Nella realtà della progressione in grotta aggiungere l'effetto idrolisi.

05.b.b.) Decadimento nei tratti con attività dinamica (discesa/risalita) - Sono i segmenti più "consunti" e con i carichi di rottura più bassi: qui ha agito sia l'effetto **calore**, sia l'**abrasione**, sia il **contatto con l'acqua**, sia la **successione di choc** procurati nelle discese con l'uso del discensore e in risalita con l'alternarsi delle spinte sui bloccanti. Da notare che nei tratti immediatamente sottostanti ai frazionamenti l'usura è più elevata (la discesa viene controllata con più difficoltà e l'effetto calore è più alto). Nel complesso la resistenza alla rottura ha valori nettamente inferiori a quanto richiesto dal LIR.

05.b.c.) Decadimento nei tratti non dinamici (pressione/compressione/collegamento) - Interessa i tratti di corda implicati nell'ancoraggio principale, con la doppia gassa (appoggio + collegamento) e le spire del nodo. Qui i carichi di rottura sono di circa 250 kgp superiori: essendo un tratto interessato solo da azioni statiche, **manca soprattutto il fattore calore**.

05.b.d) Decadimento nei tratti non dinamici (pressione/compressione) - Sono segmenti di corda utilizzati per mettere in opera i frazionamenti: nodi in appoggio sugli ancoraggi e compressione nelle spire del nodo. I valori dei carichi di rottura sono nella media, né bassi né alti. Da rilevare che hanno valori di Carico di rottura F_r inferiori a quelli riscontrati nella gassa doppia dell'ancoraggio principale, dove il fattore "pressione" è ridotto alla metà.

05.b.e) Decadimento della "Bambolina" (matassa) raccolta a fine corda - Questo risultato è di grande interesse per la condizione del tutto speciale che ha subito questo tratto di corda: non è stato mai percorso per la progressione; non ha subito abrasioni, appoggi, strizioni, riscaldamenti, lesioni, sollecitazioni. È rimasto in grotta per **3955 giorni**: appeso, senza contatti con le pareti o il pavimento, al buio totale, immerso in un ambiente con U.R. al 100 %. I due valori ricavati di F_r (carico di rottura senza nodi) sono 1364 kgp e 1369 kgp: **media 1366 kgp**. Da nuova la corda aveva un $F_r = 3269 kgp$; per cui si è avuta una riduzione complessiva di F_r di **1903 kgp**. Pertanto la sola esposizione "nell'ambiente-grotta" - dove l'U.R. è sempre prossima al massimo valore (100 %), che **equivale all'immersione totale in acqua** - produce un decadimento irreversibile di F_r pari a:

$$1903 \text{ kgp} / 3955 \text{ giorni} = 0,48 \text{ kgp/giorno}$$

Quest'ultimo risultato ha un rilevante significato: una corda con fibre in Nylon 6 lasciata in grotta per 3955 giorni senza essere in alcun modo usata, ma rimasta solo esposta all'umidità dell'ambiente-grotta (con U.R. al 100 %, quindi come immersa in acqua) (pag. 71 e seg., **Figure 60 – 61 – 62 – 64 – 65**) **decade di 0,48 kgp di F_r al giorno**, verosimilmente accumulando, in funzione diretta al numero di giorni trascorsi in grotta, questo tasso di degrado non reversibile. A tal proposito si ricorda che questa forma di diminuzione delle proprietà meccaniche di una corda **non fa in alcun modo riferimento all'idrolisi** dei legami idrogeno intermolecolari delle catene di macromolecole dei fili elementari, fenomeno **completamente** reversibile non appena la corda perde il contatto con l'ambiente-grotta o esce dall'immersione in acqua, e raggiunge lo stato di "asciugata" (come appunto quello della corda in esame) (pag. 74 e seg., **Figure 66-67**).

La spiegazione di questo fenomeno di “**usura senza uso**” (che si manifesta in modo rilevabile e quantificabile solo nell’arco di diversi anni di “sperimentazione” continua e omogenea) è probabilmente legata ai tre fattori di decadimento delle poliammidi per esposizione all’umidità dell’aria e/o all’immersione nell’acqua indicati nella **Parte III**:

1. il materiale polimerico è igroscopico (*pag. 70 e seg.*);
2. l’esposizione di una corda speleo all’ambiente ipogeo con U.R. 100 % è equivalente all’immersione della stessa corda in acqua (*pag. 70 e seg.*);
3. il contenuto d’acqua nei fili elementari di Nylon produce una depolimerizzazione delle catene di macromolecole, in parte irreversibile (*pag. 80 e seg.*);
4. l’esposizione all’ambiente umido produce la degradazione idrolitica, con perdita di massa e riduzione del peso molecolare numerico dei polimeri (*pag. 81 e seg.*).

Questi fattori elencati producono infatti una riduzione del carico di rottura F_r (*pag. 81, Figura 83*).

05.b.f) Analogie nei risultati sperimentali in merito al decadimento irreversibile delle corde per contatto con l’acqua - Il comportamento della “Bambolina” del Pozzo Pataton è analogo a quello riscontrato nei test, relativi a una corda Cousin Testec 10 mm statica, riportati nei **due capitoli che seguono**: nel Pozzo da 22 m nella Scala Celeste per **sei anni (2190 giorni)**; nella vasca carsica di Chorance per **8 anni (1781 giorni)**.

In sintesi i valori del gradiente di decadimento per “usura senza uso” delle corde esaminate sono:

- | | |
|--|--|
| 1. Beal Antipodes 10, 5 mm del Pozzo Pataton | 0,48 kgp = 1903 kgp/3955 giorni |
| 2. Cousin Testec 10 mm del Pozzo Scala Celeste | 0,55 kgp = 1199 kgp/2190 giorni |
| 3. Cousin Testec 10 mm della Vasca di Chorance | 0,54 kgp = 961 kgp/1781 giorni |

Indiscutibile la coincidenza dei valori ottenuti per “**usura senza uso**” (al netto delle accettabili differenze dovute al margine d’errore strumentale), pur variando il periodo temporale di permanenza in grotta: se la condizione sperimentale per tutti e tre i casi è la sola l’esposizione **all’ambiente-grotta con U.R. al 100 % e/o l’immersione in acqua** – che si equivalgono come fattore di degrado (*pag. 71 e seg.*) – il risultato finale è identico. In tutti i casi il gradiente giornaliero di perdita di F_r è uguale.

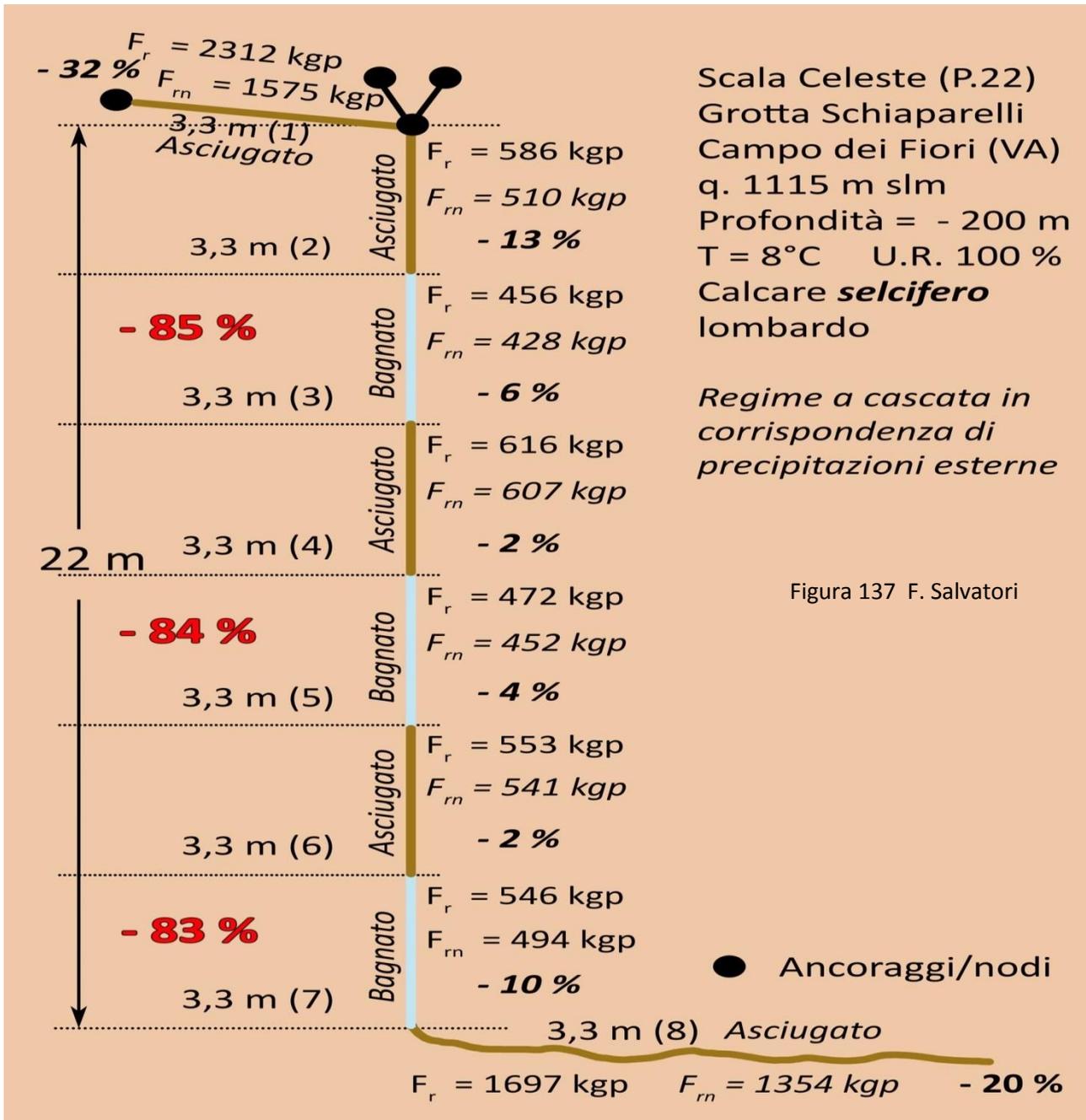
È una perdita che si accumula con tasso di crescita costante. Ed è **parzialmente irreversibile**: togliendo il contatto con l’acqua (U.R. al 100 % e/o immersione che sia), il degrado, lasciando la corda ad asciugarsi, si recupera solo parzialmente, con tempi da valutare. Come già detto, l’ipotesi maggiormente plausibile è che si tratti di **degradazione idrolitica**, in una delle sue forme o in più forme in sinergia (*pag. 81 e seg., Figure 73 – 74 – 75*).

Attenzione: **non si tratta di idrolisi** delle poliammidi (*pag. 105 e seg.*), un fenomeno legato all’igroscopia del Nylon che si annulla completamente togliendo l’esposizione all’aria delle grotte e all’immersione in acqua.

06. Decadimento differenziato di una corda usata, asciutta e bagnata su armo speleo fisso (6 anni): valutazione con i carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} ; altro esempio di valutazione dei tempi d’utilizzo in sicurezza di una corda nella progressione speleologica

06.a) Premessa – Anche in questo caso il fondamento della ricerca sperimentale sta nell’utilizzo di un programma di test a trazione lenta per valutare, attraverso la misurazione dei carichi di rottura F_r e F_{rn} , il grado di decadimento di una corda statica lasciata continuamente in opera in grotta per un lungo periodo (6 anni), avendo subito il rilevante degrado prodotto dal passaggio (discesa/salita) di 500 speleo e più.

La corda in questione **Cousin Testec 10 mm statica** è stata prelevata e asciugata e sistemata in ambiente "magazzino" (12°C di temperatura; 40 % di U.R.), mantenendo la disposizione dei nodi e dei frazionamenti. Da questa corda sono stati sezionati dei campioni della lunghezza opportuna, prelevandoli dai diversi settori caratterizzati da diversi modi d'uso (corrimano, appoggio su ancoraggio, progressione in discesa e risalita, parte finale non utilizzata per la progressione).



Alcuni di questi spezzoni di corda sono stati poi **immersi in acqua per 48 ore** per valutare la sua condizione di degrado comprendente anche l'effetto riduttivo dell'idrolisi, quella condizione che rispecchia la situazione di tenuta alle sollecitazioni come effettivamente avviene nell'ambiente sotterraneo (dove l'U.R. è al 100 %) (a tal proposito si faccia riferimento a quanto espresso nella precedente **Parte IV** a pag. 105). I test su questa corda si distinguono da quelli eseguiti sulla corda del Pozzo Pataton (pag. 155, **Figura 136**) perché alcuni suoi spezzoni sono stati immersi in acqua - per riprodurre le condizioni reali di tenuta alla rottura, comprendendo anche l'effetto idrolisi - e poi testati in condizione di "bagnati".

Questo ha permesso di rilevare tanto la situazione di degrado generale quanto particolareggiata, che mette in evidenza anche la diversità d'usura da tratta a tratto di corda.

In tal modo si rende possibili fare delle valutazioni sui limiti d'utilizzo di una corda in grotta, ben difficilmente rilevabili con metodi diversi vista la complessità della sua struttura, dove intervengono una molteplicità di fattori di varia natura (meccanici, chimici, fisici). Impossibile raggiungere risultati credibili per via teorica.

Si ricorda che in questo lavoro sono presenti analoghe ricerche sperimentali sull'usura delle corde in grotta (pagg. 104 – 121 – 170 e seg.), alle quali bisogna far riferimento per avere un quadro completo di come, di quanto e in quanto tempo avviene l'usura di una corda speleo; e soprattutto dopo quanto tempo d'utilizzo si superano i limiti di sicurezza e affidabilità.

06.b) Condizioni e risultati sperimentali - Si tratta di una sperimentazione a trazione lenta (quasi-statica, con velocità di trazione di **0,006 m/s**, pag. 28 e seg., **Figura 18**) su vari tratti di una corda rimasta in grotta per oltre **6 anni** nella Grotta Schiaparelli (Campo dei Fiori – Varese; q. 1114 m slm; temperatura 8°C; U.R. 100 %). I test sono stati **effettuati circa 10 giorni dopo che la fune è stata tolta dalla grotta**.

La corda esaminata era posta a 200 m di profondità nel primo salto di 22 m della "Scala Celeste", frequentemente battuto da un flusso d'acqua a cascata, a seguito di precipitazioni.

Come già detto la corda in esame è una **Cousin Testec 10 mm statica** che **da nuova** ha dato i seguenti risultati (pag. 114, **Figura 90**):

asciutta	$F_r = 2896 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1810 \text{ kgp}$	(- 38 %)
bagnata	$F_r = 2704 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1398 \text{ kgp}$	(- 48 %)

Raffrontando percentualmente le altre possibili situazioni:

asciutta/bagnata senza nodi	$F_r = 2896 \text{ kgp}$	$F_r = 2704 \text{ kgp}$	(- 7 %)
asciutta/bagnata con nodi	$F_{rn} = 1810 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1398 \text{ kgp}$	(- 23 %)
asciutta senza nodi/bagnata con nodi	$F_r = 2896 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1398 \text{ kgp}$	(- 52 %)

Si ricorda che il dato percentuale che rappresenta il confronto più attinente fra la corda in condizioni "da nuova asciutta" con la condizione "da nuova bagnata con nodi" (somma dell'effetto idratazione con l'effetto nodi, che rispecchia la realtà della condizione della corda che opera in grotta) è l'ultimo a destra dell'elenco soprastante.

Lo schema d'armo della corda usata come precedentemente indicato è rappresentato nella **Figura 137** con indicate le principali caratteristiche:

1. suddivisione dell'armo: corrimano, ancoraggi principali, tratto per discesa/risalita in libera (senza contatti con le pareti);
2. campioni di corda selezionati (da 1 a 8) con la relativa lunghezza;
3. quali di questi sono stati immersi in acqua (3 - 5 - 7);
4. carichi di rottura senza e con nodi, con relativa percentuale di diminuzione (in corsivo);
5. per i tratti immersi in acqua, la riduzione percentuale del carico di rottura fra **corda nuova senza nodi asciutta** e **corda usata con nodi bagnata** (in rosso, valore più rappresentativo dello stato d'usura).

06.c) Prima considerazione: decadimento differenziato – E' evidente che la corda ha subito un'usura che si differenzia da tratto a tratto, in funzione del tipo di progressione che ha subito:

1. nel tratto iniziale (1) ha avuto la funzione di corrimano, quindi non ha visto l'utilizzo di discensori e bloccanti e non vi è mai stata applicata una sollecitazione (l'arrivo al tratto verticale è facilitato da appoggi facili e sicuri per i piedi);
2. nel tratto di 22 m in verticale (2) (3) (4) (5) (6) (7), senza contatti della corda con le pareti, ha subito il passaggio, discesa/risalita con discensore e bloccanti, di non meno di 500 speleologi;
3. nel tratto finale (8) non ha ricevuto alcuna sollecitazione, ne il contatto con discensori e bloccanti (o altri attrezzi metallici); ma è entrato a contatto con il pavimento ed eventualmente con altri materiali (potrebbe anche essere stato calpestato).

Nel tratto "corrimano" (1) la diminuzione di F_r è di appena il **20 %** (32 % con effetto nodo) dovuta alla sola

Degradazione idrolitica, per la presenza quantomeno dell'U.R. al 100% (*pag. 82 e seg.; pag. 86 e seg.; pag. 161 e seg., Figure 138 – 139 - 140; pag. 167, Figure 142-143*) la quale, sommata alla riduzione di F_r prodotta dall'inevitabile effetto idrolisi, porta a una riduzione complessiva della tenuta alla rottura del **28 %**, appena.

Nel tratto verticale di 22 m la situazione cambia radicalmente a causa degli effetti prodotti dalla progressione con discensore e bloccanti (sollecitazioni + calore). Tutti gli effetti sommati (usura per la progressione + effetto idrolisi + effetto nodo + degradazione idrolitica) si arriva a un totale di **- 84% !!**.

Nel tratto finale di corda, non interessato alla progressione, si ha una situazione senza usura da sollecitazioni ripetute e calore, dovuta soprattutto alla degradazione idrolitica e in modo quasi irrilevante al contatto con il pavimento, a possibili calpestii, all'energia dell'acqua che vi cade a cascata.

Questo risultato sperimentale ci indica, fra l'altro, che le valutazioni su corde usate devono tener conto delle differenti azioni di degrado praticata da tratto a tratto di corda. Un test su un solo spezzone di corda, individuato in maniera casuale, può dare indicazioni del tutto non corrispondenti alla reale tenuta minima dell'intera corda.

06.d) Seconda considerazione: decadimento per il solo effetto-idrolisi – Nella corda **Cousin Testec 10 mm nuova** il solo effetto idrolisi è pari a **- 7 %** di riduzione del Carico di rottura. Nella corda usata in esame questo effetto raddoppia e sale al **- 14 %**.

Questo risultato mostra che ci sono, percentualmente, più legami idrogeno intermolecolari da rompere nella corda usata, dove sembrerebbe essere presente una maggiore estensione della "cristallinità" dei fili elementari.

Ma questa conclusione contrasta con il fatto che nella corda usata l'usura causata dalla progressione discensore/bloccanti ha fatto aumentare l'estensione dei settori amorfi delle fibre e quindi ridurre il numero di legami intermolecolari da rompere con l'idratazione.

In aggiunta c'è da prendere in considerazione anche che l'aumento delle zone amorphe permette alle molecole d'acqua di penetrare più facilmente e in maggior quantità nel filo elementare.

In sintesi, è impossibile, con questi dati, individuare con precisione e certezza la causa del maggiore **effetto idrolisi** in questa corda usata, rispetto a quanto verificato nell'equivalente nuova. Ma è comunque possibile concludere che con la sperimentazione un risultato quantitativo viene raggiunto; mentre non si può generalizzarlo a tutte le corde usate: ognuna ha una sua vita peculiare. Ancora una volta risalta che la Struttura Complessa di una Corda gioca un ruolo importante nel diversificare una situazione da un'altra.

06.e) Terza considerazione: valutazione del decadimento irreversibile nel tratto di corda che ha subito solo l'esposizione all'ambiente – grotta – Nel tratto di corda n. 8 del sistema d'armo di cui alla **Figura 137** il degrado è stato provocato unicamente dal contatto con l'U.R. della grotta (al 100 %, che è equivalente all'immersione in acqua) e ha agito attraverso la degradazione idrolitica irreversibile, proprio come è accaduto nella Corda del Pozzo Pataton (*pag. 155, Figura 136*).

Quindi, stesse condizioni, stesso risultato per il gradiente giornaliero di diminuzione del Carico di rottura della corda: **0,55 kgp = 1199 kgp/2190 giorni**.

E' evidente che l'identità dei risultati di questo tipo di decadimento, confermata dai dati ottenuti in tre diverse condizioni (come esposto a *pag. 157*), rende verosimile ipotizzare che al solo ingresso in grotta una corda riduce il Carico di rottura F_r di circa **0,5 kgp/giorno**.

06.f) Quarta considerazione: quantizzazione dei tempi d'usura e per il raggiungimento dei limiti di sicurezza e affidabilità – E' difficile valutare quale possa essere il tempo limite entro il quale usare una corda in sicurezza/affidabilità. Troppi e di diversa natura sono i fattori usuranti. Ma ciononostante molte esperienze, oltre questa presentata in questo Capitolo, sono esposte in questo lavoro.

Una di queste è particolarmente adatta a essere utilizzata per un confronto: nello stesso pozzo di 22 m della Scala Celeste, con identico schema d'armo, è stata posta per due anni continuativamente una corda

nuova **Beal Antipodes 10,5 mm statica**; esperienza descritta e commentata in questa **Parte V**, nel *Capitolo 01 "Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)"* (pag. 127, **Figura 102**). In questo caso si sono avuti i seguenti risultati:

nuova asciutta	$F_r = 3269 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 2063 \text{ kgp}$
usata asciugata	$F_r = 1361 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1081 \text{ kgp}$

Come si vede un test a rottura senza nodi, con corda usata asciugata, ha dato una media di $F_r = 1361 \text{ kgp}$, con una punta negativa di **1180 kgp**. Se è presente anche l'effetto nodo (non l'effetto idrolisi che comunque deve essere sempre considerato) la tenuta a rottura si riduce a $F_{rn} = 1081 \text{ kgp}$, **inferiore ai 1100 kgp del LIR**.

Si ricorda che insieme a questo spezzone di corda, altri 13 della stessa sono stati sottoposti a un identico carico d'usura (due anni), ma in grotte diverse e senza permanervi continuativamente. L'utilizzo, di fatto, è stato quello tipico di una normale attività di un gruppo speleo.

Ne scaturisce che, valutando l'insieme dei risultati, ma dopo solo **due anni d'attività**, una corda è ancora **utilizzabile con sicurezza/affidabilità**, rimanendo sempre con carichi di rottura al di sopra del LIR. A meno che le condizioni ambientali non siano tali da produrre un degrado particolarmente incisivo, come appunto accade alle corde poste nella Grotta Schiaparelli, scavata nei "Calcari selciferi lombardi", estremamente abrasivi per la presenza di granuli di selce nella matrice calcitica.

D'altro canto sappiamo che la corda **Cousin Testec 10 mm**, dopo 6 anni di permanenza in grotta, con 500 speleo che vi sono transitati sopra, **non è più in grado di sopportare** le sollecitazioni che si possono produrre con la progressione speleo (con un brusco arresto con il discensore si superano anche 500 kgp di forza massima).

Interpolando lo sviluppo dell'usura fra quanto rilevato nell'esperienza di due anni e quella di sei anni, tenendo conto che il gradiente di decadimento di una corda va diminuendo con l'avanzare dell'utilizzo, si può verosimilmente concludere che **una corda speleo può essere utilizzata** anche per un tempo **superiore ai due anni**, specie se non rimane continuativamente in grotta, se l'ambiente sotterraneo è tale da non creare situazioni particolarmente abrasive, se non ci sono contatti con le pareti o il pavimento, se una cascata d'acqua non scarica la sua energia battendo sulla corda, se il numero dei passaggi degli speleo non è troppo rilevante, se non ha subito degli choc d'intensità troppo elevata.

07. Degradazione e recupero di corde nuove per 5 anni immerse in acqua e poi per 13 anni conservate in magazzino al buio e asciutte; le variazioni del Carico di rottura senza nodi F_r in condizioni asciutte e asciugate; costruzione delle curve di carico/scarico

A seguito di alcuni incidenti in grotte **molto bagnate**, dovuti a inattesi cedimenti di corde (al di fuori dei nodi, anche con sollecitazioni di poche centinaia di kgp), il GLMT SNS CAI ha intrapreso nel 2003 un programma di ricerche sperimentali e teoriche per verificare la possibilità che fibre artificiali come il Nylon possano subire un'azione degradante legata alla presenza di acqua a contatto con il materiale polimerico. All'indagine ha collaborato Georges Marbach (Chorance – Vercors – Francia) fornendo le corde e provvedendo al trattamento in acqua e alla conservazione in magazzino.

07.a) Condizioni sperimentali

Luogo: Cirque de Choranche (Vercors – Francia) quota 400 m slm

Vasca in luogo chiuso tipo "grotta" con acqua di sorgente carsica: Ph = 7,6; temperatura 10°C.

Corde: **Cousin-Testec** con diametri apparenti da 10 - 9 - 8 mm **immerse completamente in acqua**.

Test a trazione lenta (0,006 m/s) nel giugno 2003 (circa 20 giorni dopo l'uscita di fabbrica della corda) per valutare le **condizioni iniziali** della **corda nuova asciutta**:

1. per ogni diametro di corda, tre test uguali per calcolare il carico di rottura senza nodo F_r ;
2. per ogni diametro di corda, costruzione delle Curve di carico/scarico con limite massimo di forza di 850 kgp per il diametro 8 mm, di 1000 kgp per il diametro di 9 mm e di 1400 kgp per il diametro 10 mm (i grafici non sono sovrapponibili perché le isteresi hanno sollecitazioni massime differenti).

Primo giorno d'immersione delle corde: **18/06/2003**.

Durata programma di prove: **17 anni** (precisamente **6527 giorni**), di cui i primi **1781 giorni**, senza soluzione di continuità, con **corde immerse in acqua** e poi **4746 giorni fuori dall'acqua conservate al buio e in assenza di scambi gassosi**, in un ambiente chiuso con U.R. al 40 % e temperatura media di 12°C.

Successivamente all'inizio dell'immersione, per il periodo 18/06/2003 – 03/05/2008 (1781 giorni), a **cadenza annuale e/o biennale**, sono stati **prelevati dalle vasche d'acqua** dei tratti di corda, uno per ciascun diametro, per sottoporli a test analoghi a quelli eseguiti per valutarne le condizioni iniziali (F_r e Curve carico/scarico).

Questi test dinamometrici sono stati effettuati circa **10 giorni** dopo essere stati tolti dall'acqua, quindi, con campioni di corde in condizione di "asciugati".

Ultimo prelievo dall'immersione in acqua dei campioni di corda e **ultimo giorno d'immersione** delle corde: **03/05/2008** (1781 giorni dopo l'inizio).

A partire **dal 03/05/2008 e fino al 01/05/2021 (4746 giorni)**, le corde sono state mantenute fuori dal contatto con l'acqua e in condizione "asciutta" e conservativa, come descritto in precedenza.

Su queste, in questo lasso di tempo, sono stati effettuati altri test, e precisamente il:

24/08/2019

14/06/2020

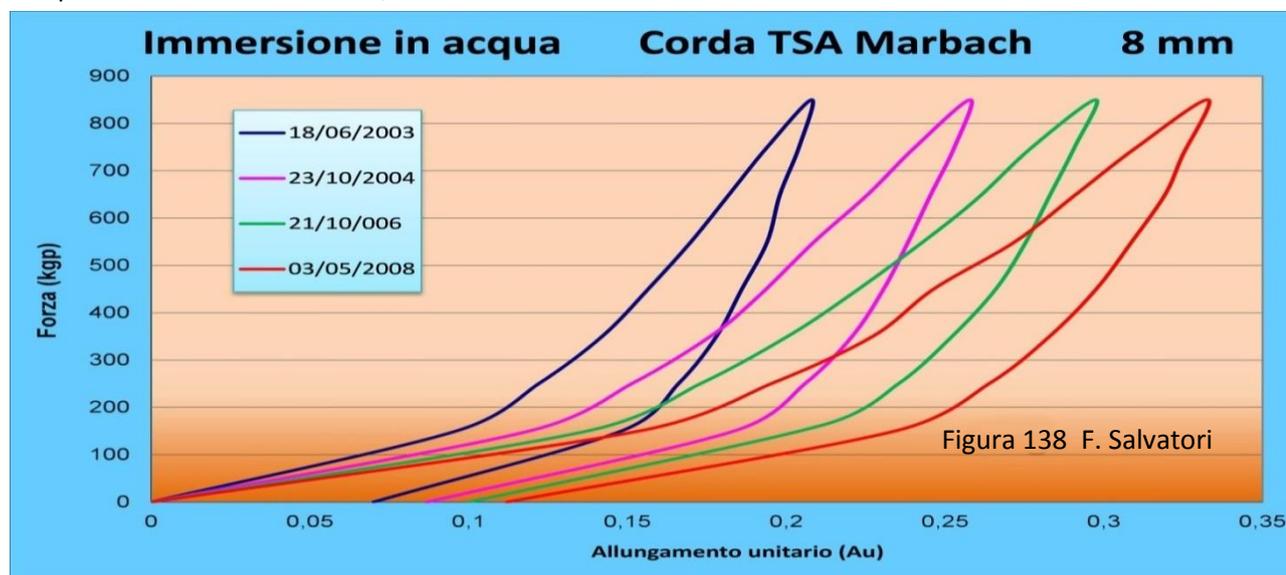
21/12/2020

01/05/2021

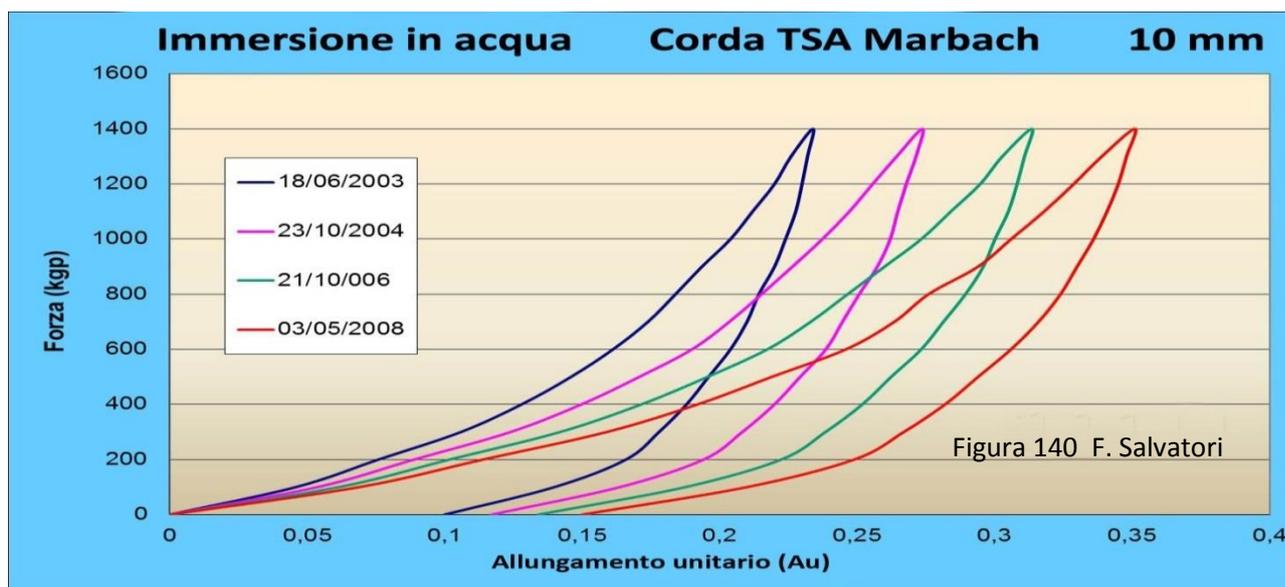
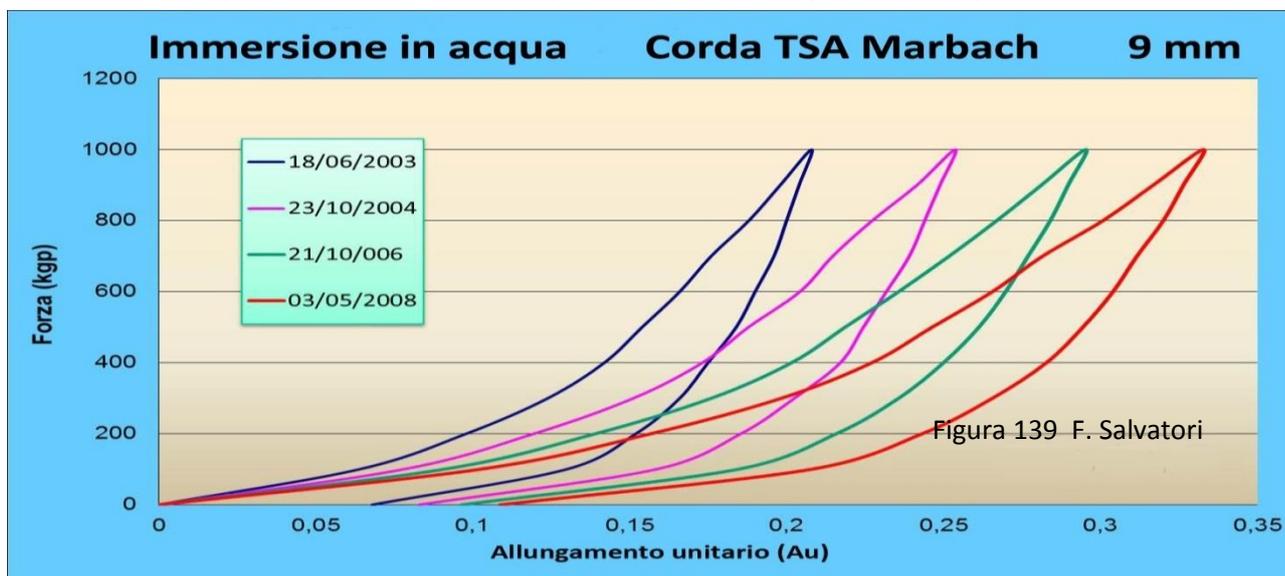
con lo scopo di valutarne il Carico di rottura senza nodi F_r e le Curve di carico/scarico, sempre a trazione lenta (0,006 m/s), con le condizioni sperimentali indicate nei precedenti punti 1. e 2.

Lo scopo è mettere in evidenza se **l'immersione in acqua** procura un **decadimento delle proprietà meccaniche** delle corde e se, tolto in contatto con l'acqua, queste proprietà **possono essere, in tutto o in parte, recuperate**. **Attenzione: non si tratta dell'idrolisi dei legami idrogeno** delle fibre polimeriche (*pag. 104 e seg.*), che si manifesta solo in presenza d'acqua igroscopica all'interno della corda e, quindi dei fili elementari, e che è un fenomeno integralmente reversibile appena si toglie il contatto con l'acqua (invece i campioni di corda qui menzionati sono stati testati "asciutti").

Tutti i **test sono realizzati**, dunque, con campioni di corda asciutti "condizionati" in una atmosfera a 12°C di temperatura e con U.R. al 40% , in assenza di effetto idrolisi.



07.b) Grafici con curve di carico/scarico – Le curve di carico/scarico delle **Figure 138 - 139 - 140** mostrano che la permanenza in acqua ha reso i fili elementari dei campioni analizzati più cedevoli (“*plasticizzati*”), tanto che a parità di forze applicate l’allungamento va aumentando con i giorni di permanenza in acqua. Il decadimento sembra procedere in modo regolare nel tempo.



Questa conclusione sperimentale ha una validazione statistica elevata, visto che l’andamento è praticamente identico in tutti i tre grafici (28 misure per costruire quelli di **Figura 138**, 40 misure per quelli di **Figura 139**, 56 misure per quelli di **Figura 140**).

Volendo fare delle comparazioni fra i diagrammi contenuti nelle tre figure, occorre tenere presente che fra le prime due curve di carico/scarico l’intervallo di tempo è **1 anno**; mentre fra le tre successive l’intervallo è **2 anni**. Quindi, **per la sola deformabilità**, il decremento all’inizio è più marcato; poi diminuisce e quindi si stabilizza.

Per tutti i 12 diagrammi delle corde valgono le descrizioni e le considerazioni fatte nella **Parte I (pag. 32, Figura 21)** e per i test d’usura **di 24 mesi delle corde (pag. 124 e seg.)**.

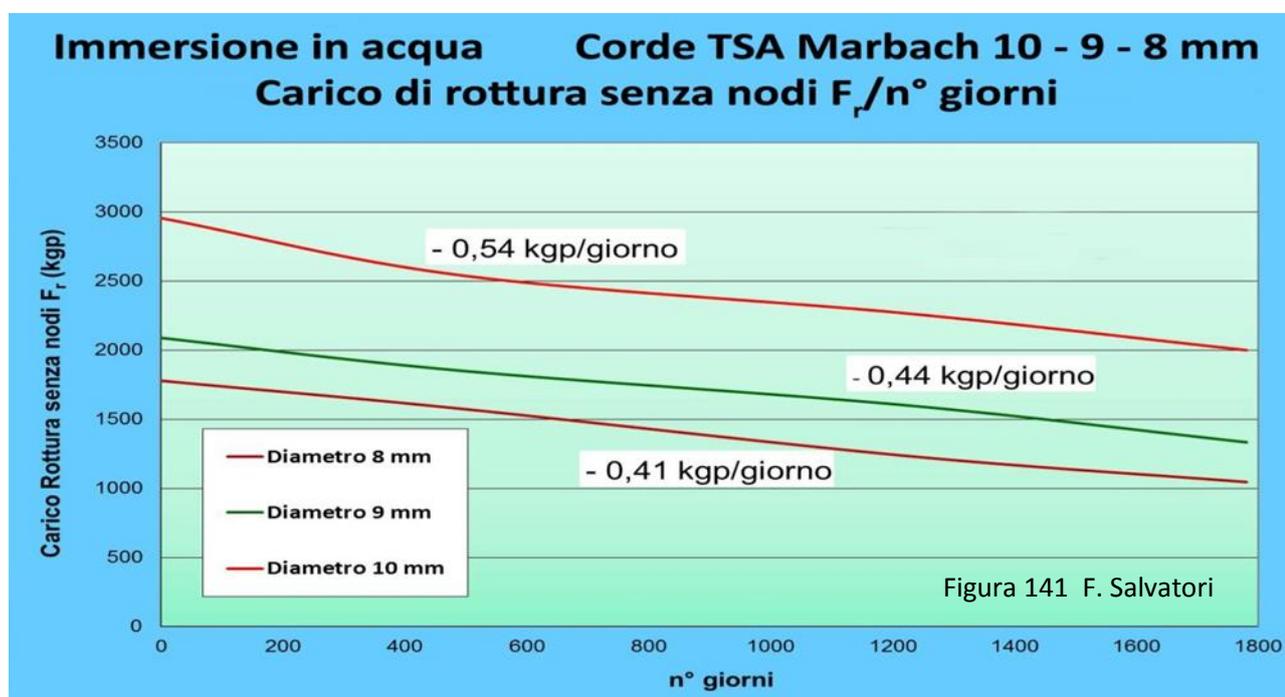
In particolare:

1. con il passare del tempo di permanenza in acqua i campioni di corda danno curve di carico più adagiate sull’asse delle ascisse;
2. il materiale che costituisce le macromolecole (Nylon) diventa via via più deformabile e a parità di forza si hanno allungamenti maggiori;
3. con il passare del tempo in acqua le superfici di plasticità S_p (pag. 32, **Figura 21**) aumentano

d'estensione: il Nylon è sempre Nylon, ma cambia almeno in parte la sua struttura molecolare, rendendola più disponibili a dissipare - anche **irreversibilmente** - l'energia prodotta dalle eventuali sollecitazioni.

Si ricorda ancora una volta, che in questo test d'immersione l'unica responsabile dell'usura è la permanenza in acqua: non intervengono tutti gli altri tipici fattori di degradazione di una corda, come l'abrasione della calza, la rottura dei fili elementari, il calore, il succedersi delle sollecitazioni, ecc.; questo permette un'analisi stringente molto selettiva, come nei casi analoghi della "Bambolina" del Pozzo Pataton (pag. 155, Figura 136) e della Scala Celeste (pag. 157, Figura 137).

07.c) Grafici della diminuzione di F_r delle corde asciutte e asciugate in funzione del tempo trascorso in immersione in acqua - I diagrammi di Figura 141 sono molto espliciti nel definire l'influenza permanente e progressiva dell'immersione nell'acqua su una corda speleo: le curve Carico di rottura F_r/n° giorni immersione hanno un andamento indubbiamente lineare, mostrando una diminuzione del carico di rottura senza nodi F_r direttamente proporzionale al tempo trascorso in immersione.



E questo vale per ognuno dei tre diametri. Le etichette bianche indicano l'entità della decrescita: circa **mezzo kgp per ogni giorno d'immersione in acqua**.

In sintesi, le tre corde oggetto del test con immersione in acqua per **1781 giorni** hanno dato un decadimento:

1. $F_r = 0,54 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 10 mm,
2. $F_r = 0,44 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 9 mm,
3. $F_r = 0,41 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 8 mm.

Per "corda asciugata" s'intende un campione prelevato dall'immersione e testato dopo circa 10 giorni: sette giorni impacchettato ermeticamente + tre giorni nel laboratorio, libero di asciugarsi con U.R. pari a circa il 40 % e temperatura ambiente di 12°C.

07.c.a) Prima ipotesi di decadimento: degradazione idrolitica con perdita di peso – Questo tipo di degradazione legato al contatto con l'acqua produce una graduale perdita di materiale polimerico che, quindi, si manifesta con una perdita di peso (e quindi di massa) dovuta sia a un'erosione nella superficie del campione isotropo (**asporto non omogeneo**) che all'interno del campione stesso (**asporto omogeneo**) (pag. 83 e seg., Figura 74, Relazione 18). Per il Dyneema non igroscopico quest'ultimo asporto non si verifica. La diminuzione progressiva del Carico di rottura F_r , come da Figura 141 e per la parte dovuta alla degradazione idrolitica con perdita di massa/peso, è conseguente a quanto stabilisce la Relazione 20 (pag. 84), che definisce lo Sforzo alla

rottura e di conseguenza, con proporzione diretta, il Carico di rottura F_r (pag. 28, **Relazione 7**):

$$\sigma_r = 10^3 \cdot T \cdot \rho \quad (20)$$

dove

σ_r = sforzo alla rottura

T = tenacità del filo elementare (N / tex)

ρ = densità del filo elementare (g/cm^3)

La tenacità T è una Costante caratteristica del polimero e non varia per il fatto che parte del materiale polimerico viene asportato: **non è responsabile della decrescita** registrata in **Figura 141**.

La responsabilità di questa diminuzione può essere invece tutta della diminuzione della Densità ρ che, essendo uguale al rapporto m/v , diminuisce man mano che procede l'erosione del materiale polimerico.

E' come se il materiale diminuisse la sua densità e di conseguenza **il valore del Carico di rottura**.

Ma, **attenzione**, questo tipo di degradazione idrolitica da perdita di peso **non è reversibile al momento della perdita del contatto con l'acqua**. E di questo è necessario tenere conto quando, al momento della verifica sperimentale espressa nel proseguo di questo Capitolo con **l'asciugatura dei campioni**, si verificherà se quanto è stato valutato in **Figura 141** è recuperabile o meno, in tutto o in parte.

Altro problema: la **degradazione idrolitica per perdita di massa/peso** è tanto **più ridotta** quanto **minore è il grado di cristallinità** del polimero utilizzato, tanto che con cristallinità superiore al 50 % è praticamente inesistente (pag. 83, **Figura 74**). E le fibre utilizzate per le corde speleo-alpinistiche sono di **Nylon 6 e 6.6** dove la cristallinità è, **da nuove**, rispettivamente del 50 % e più e del 70 % e più. Il che farebbe escludere la degradazione idrolitica con perdita di massa/peso come fattore responsabile principale di quanto ricavato nel complesso il **Figura 141**. Ma è verosimile un'ipotesi che questa **degradazione possa comunque incidere, sia pur flebilmente**, in quanto i polimeri, in tempi lunghi, a contatto con agenti degradanti come l'acqua, possono diminuire la propria cristallinità e divenire attaccabili dalla Degradazione idrolitica per perdita di massa.

Purtroppo una **verifica sulla diminuzione di peso** delle corde sottoposte **all'immersione per 1781 giorni** non è stata fatta: avrebbe potuto essere un elemento sperimentale dirimente, risolutivo.

07.c.b) Seconda ipotesi di decadimento: degradazione idrolitica con diminuzione di Peso molecolare numerico M_n – Questo tipo di degradazione invoca invece la **depolimerizzazione delle poliammidi per contatto con l'acqua** (da ricordare ancora: non si tratta dell'idrolisi dei legami idrogeno dei polimeri, pag. 74 e seg.), con la **recisione** dei legami "carbonio – carbonio" ($-CH_2 - CH_2-$) che collegano i gruppi alifatici all'interno della molecola base (pag. 61, **Figura 49**). La depolimerizzazione per contatto con acqua può essere causata anche dalla rottura dei legami d'aggancio all'estremità dei monomeri e delle catene.

Infatti, come in genere accade in tutte le reazioni di **Polimerizzazione** con condensazione ed espulsione di molecole d'acqua (pag. 61, **Figura 49**), imponendo invece una condizione d'idratazione forzata, come appunto l'immersione continuativa in acqua, si produce la reazione inversa e quindi la **Depolimerizzazione**. Invertendo di nuovo le condizioni d'idratazione si torna alla Polimerizzazione. Pertanto la **Degradazione idrolitica con diminuzione del Peso molecolare numerico M_n** è una **reazione potenzialmente reversibile**.

Nella **Figura 75** (pag. 85) è rappresentato un esperimento che conferma quanto testé affermato: anche con un polimero ad alta cristallinità (come il Nylon 6 e 6.6) la **degradazione idrolitica agisce il maniera incisiva sulla diminuzione del Peso molecolare numerico M_n** delle catene di macromolecole.

Questo comporta una conseguente perdita di F_r (e quindi di Sforzo alla rottura σ_r) come stabilisce quanto indicato sperimentalmente dal grafico di **Figura 73** (pag. 81). Di questo grafico il tratto competente ai polimeri utilizzati nelle corde speleo- alpinistiche (alta cristallinità) è quello compreso nel tratto **B – C**, quello stesso che mette in relazione piccoli incrementi di Sforzo alla rottura σ_r anche per grandi incrementi di M_n , proprio come è stato costatato per via sperimentale.

Questo è un dato certo. Ma se si conoscono i tempi con cui questo fenomeno degrada le corde (pag. 164, **Figura 141**) non sono, per ora, definiti i tempi con cui avviene il recupero, che comunque avviene e con entità tale da far recuperare in gran parte le caratteristiche meccaniche perse (pag. 168, **Figura 142**).

07.c.c) Il meccanismo di cinetica chimica che guida la degradazione idrolitica nel suo complesso

– Dall'andamento delle tre curve $F_r = f(n^\circ \text{ giorni immersione})$, dov'è evidente una progressione in decrescita **lineare**, è verosimile ipotizzare che la reazione chimica che le rappresenta è **di ordine "zero"**, che nel concreto significa che un numero costante di legami – $CH_2 - CH_2 -$ (o d'altro tipo) si rompono in funzione di un numero costante di giorni (e parimenti accade nella perdita di massa/peso?).

Questo **meccanismo cinetico**, anche derivante dalla somma delle due degradazioni, è **compatibile**, in linea di principio, con quanto registrato in **Figura 141**:

- una cinetica chimica di ordine "zero" produce una quantità di "modifiche" molecolari (nel nostro caso la depolimerizzazione con rottura di legami alifatici) e perdita di massa/peso **costanti nel tempo**;
- di conseguenza la diminuzione del Peso molecolare numerico M_n è in **funzione diretta** del tempo di contatto con l'acqua;
- l'erosione del materiale polimerico (eterogeneo e omogeneo) è in **funzione diretta** del tempo di contatto con l'acqua (ricordiamo, manca però una verifica sperimentale);
- data la dipendenza funzionale $\sigma_r = f(M_n)$ (pag. 81, **Figura 73**), soprattutto nel tratto **B - C** con andamento lineare, e la dipendenza dalla **Relazione 20** fa sì che le **conseguenti curve** $F_r = f(n^\circ \text{ giorni})$ di **Figura 141** abbiano un **andamento lineare**.

Proseguendo su questa linea interpretativa la **velocità di reazione** può essere espressa dalla relazione [35]:

$$F_d = K_d \cdot S/\tau \quad (23)$$

dove:

F_d = velocità di degradazione [n° legami/ n° giorni]

K_d = costante di degradazione (propria del polimero a contatto con l'acqua)

S = superficie di separazione solido/liquido

τ = volume d'acqua sovrastante la superficie S

Pertanto la velocità F_d è in funzione di:

- una **costante K_d** dipendente dalle caratteristiche della poliammide interessata,
- dal rapporto S/τ che è costante non essendoci degradazione idrolitica con perdita di massa/peso e quindi nessuna variazione di volume.

In sintesi finale, il decrescere di F_r per immersione in acqua è verosimilmente dovuto all'azione della depolimerizzazione in presenza di contatto con l'acqua, che può essere rappresentata come l'inverso della reazione di condensazione che porta alla formazione dei polimeri (pag. 61, **Figura 49**).

E' verosimile ipotizzare che, togliendo il contatto con l'acqua, il primo effetto sia l'annullamento di F_d seguito poi da una sua inversione di direzione e quindi da nuova polimerizzazione, che porta alla ricostituzione di macromolecole sempre più grandi. Polimerizzazione che potrebbe produrre, come all'origine, l'espulsione di molecole d'acqua (pag. 61, **Figura 49**).

Pertanto, contrariamente a quanto accade nella degradazione idrolitica con perdita di massa/peso, la **degradazione idrolitica con diminuzione del Peso molecolare numerico M_n è reversibile**: togliendo le corde dall'immersione in acqua il Carico di rottura F_r viene recuperato. Nel proseguo di questo Parte è **contenuta la conferma sperimentale di ciò e se tale eventuale recupero è totale o parziale**.

07.d) Raffronto fra le sperimentazioni su corde con immersione prolungata in acqua o esposizione nell'ambiente - grotta

07.d.a) Matassa (bambolina) al fondo della corda nel Pozzo Pataton - La “Bambolina” di corda (matassa) (pag. 151, **Figura 136**) rimasta in grotta per **3955 giorni**, appesa, senza contatti con le pareti o il pavimento, al buio totale, immersa in un ambiente con umidità relativa al 100 % (che equivale ad un’immersione in acqua), ha dato i seguenti risultati:

1. corda nuova e asciutta $F_r = 3269 \text{ kgp}$;
2. corda recuperata dalla grotta e asciugata (10 giorni) F_r di **1366 kgp**.

Pertanto il decadimento per **esposizione nell’ambiente grotta con U.R. al 100 %** ha prodotto una diminuzione del carico di rottura senza nodi **pari a 1903 kgp**, cioè:

$$1903 \text{ kgp} / 3955 \text{ giorni} = 0,48 \text{ kgp/giorno}$$

07.d.b) Tratto di corda finale inutilizzato nel Pozzo della Scala Celeste - La parte finale della corda (pag. 158, **Figura 137, Tratto n. 8**) rimasta per sei anni nel primo salto della **Scala Celeste** senza sopportare sollecitazioni, attriti e abrasione della calza (“usura senza uso”), ha subito un decadimento per degradazione idrolitica di:

$$1199 \text{ kgp} / 2190 \text{ giorni} = 0,55 \text{ kgp/giorno}$$

Valore molto simile a quello ricavato nel punto precedente, leggermente più alto perché il tratto n° 8 di corda è stato sottoposto ad azioni di degrado aggiuntivo (calpestio, contatto con il fondo del pozzo ?) che invece l’ammattassamento non ha permesso.

07.d.c) Corda nuova rimasta in immersione per 1781 giorni – La corda nuova da 10 mm di diametro apparente utilizzata nella Vasca di Chorance, di dimensioni e fattura compatibili per un confronto con le corde indicate nei due precedenti commi, ha dato il seguente risultato:

$$961 \text{ kgp} / 1781 \text{ giorni} = 0,54 \text{ kgp/giorno}$$

07.d.d) Compatibilità nei valori di degrado – In tutti e tre i casi (Pozzo Pataton, Scala Celeste e Vasca di Chorance) la degradazione idrolitica è andata avanti con lo stesso gradiente, in media:

$$0,52 \text{ kgp/giorno}$$

La compatibilità dei dati ottenuti, a parità di condizioni sperimentali ma in luoghi ipogei differenti e con periodi di sperimentazione di lunghezza diversa, dà ulteriore **validità alle considerazioni e alla conclusioni tratte sulle modalità e l’intensità della Degradazione idrolitica** sulle corde speleo-alpinistiche.

07.d.e) Valori decrescenti con diametro apparente decrescente - Ricordando quanto ottenuto dai test per immersione in acqua (Vasche di Chorance, pag. 141)

1. $F_r = 0,54 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 10 mm,
2. $F_r = 0,44 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 9 mm,
3. $F_r = 0,41 \text{ kgp/giorno}$ per la corda di diametro 8 mm,

E’ evidente che la degradazione idrolitica maggiore è in corrispondenza dei diametri apparenti maggiori (e quindi della massa maggiore di materiale polimerico).

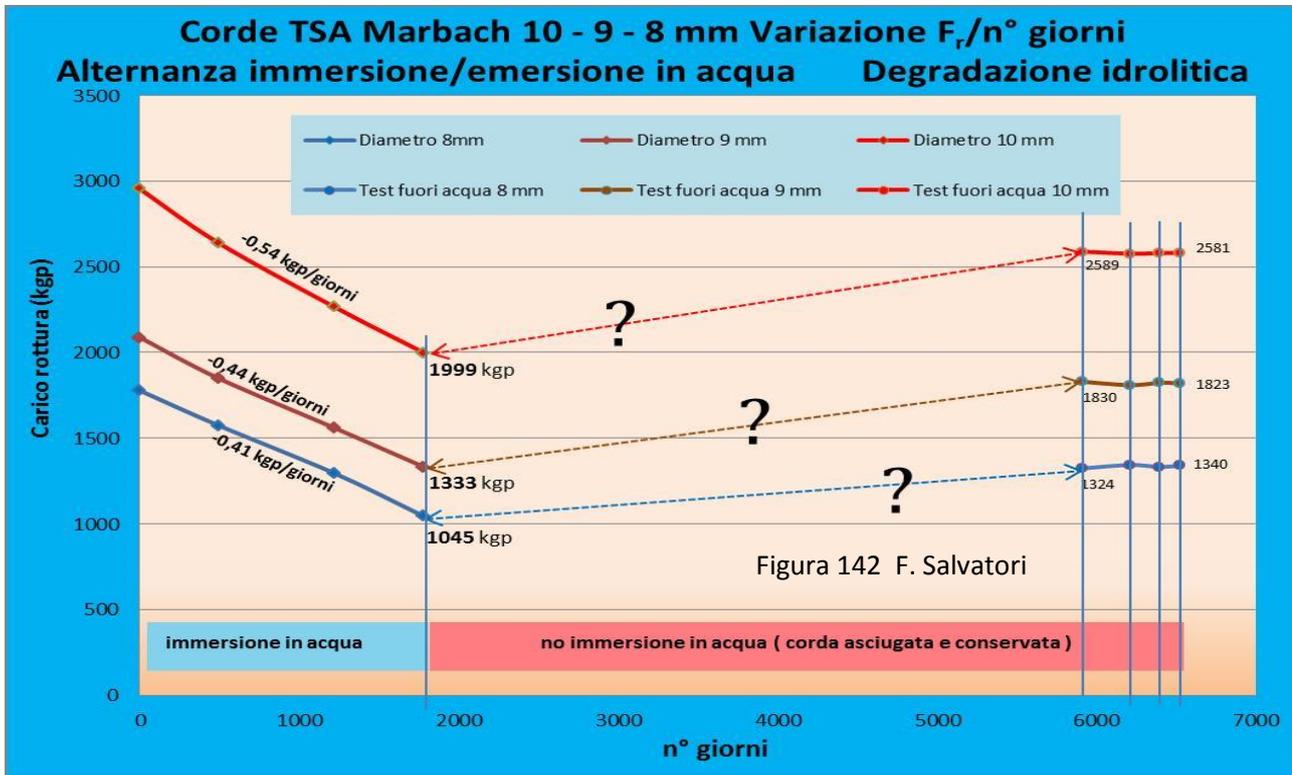
La **Relazione 23** (pag. 166) giustifica questo risultato: la velocità di degrado F_d diminuisce in funzione del rapporto S/τ : la **superficie di separazione fili elementari/acqua diminuisce**, mentre il **volume τ rimane costante**.

07.e) Reversibilità degli effetti dovuti all’immersione in acqua, recupero del Carico di rottura F_r e del Modulo d’elasticità E - Dopo i **1781 giorni** d’immersione nella Vasca di Chorance le corde sono state tolte dall’immersione. Alcuni campioni sono stati asciugati e utilizzati per effettuare gli ultimi test per misurare il Carico di rottura F_r e costruire le ultime curve carico/scarico.

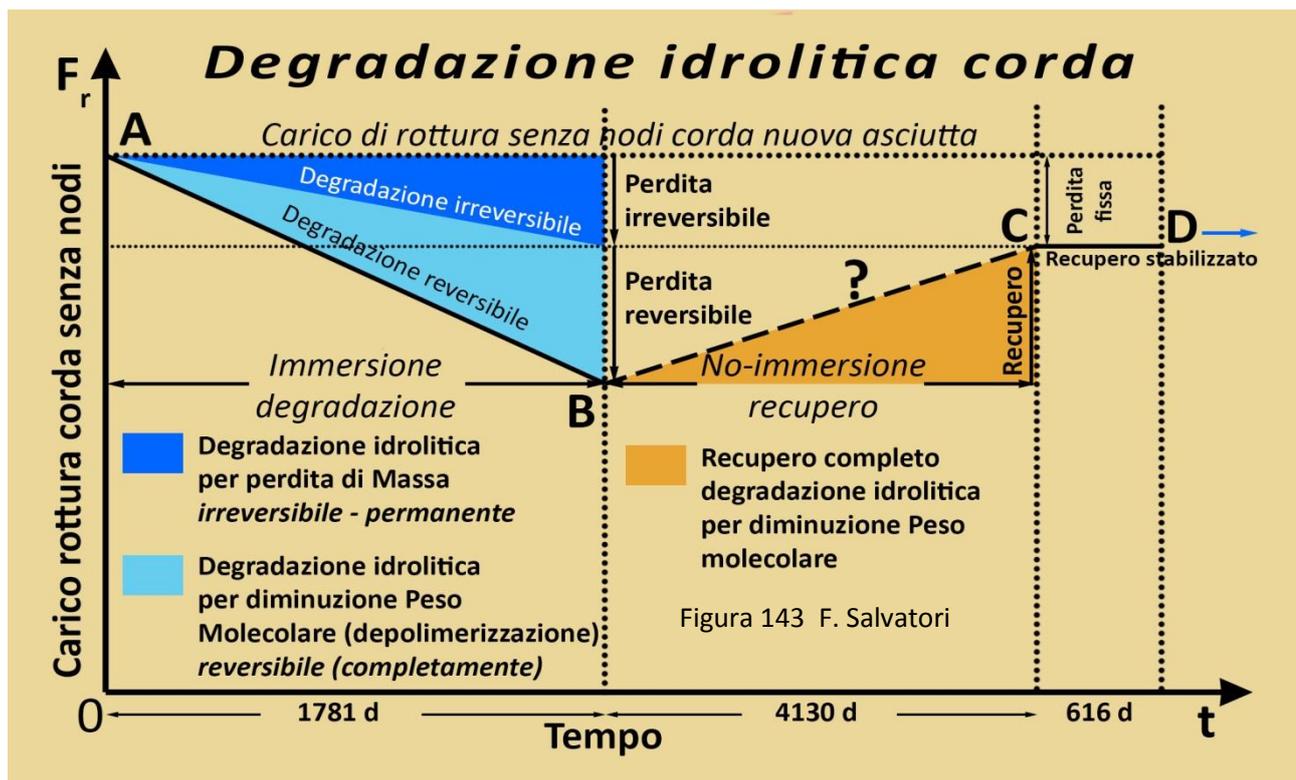
Le restanti corde sono state conservate al buio, in assenza di scambi gassosi, in un ambiente con temperatura di 12°C e U.R. 40 %.

Il **23/08/2019** (dopo **4130** giorni dall'eliminazione dell'immersione e l'inizio delle conservazione) sono stati effettuati altri test per misurare ancora i Carichi di rottura F_r e costruire nuove curve di carico/scarico.

La stessa cosa è stata fatta il **14/06/2020** (295 giorni), il **21/12/2020** (190 giorni) e il **01/05/2021** (131 giorni).



Nei grafici di **Figura 142** sono raccolti e diagrammati tutti i dati contenuti nella **Figura 141** più quelli raccolti con le **ultime quattro sperimentazioni del 2019, 2020 e 2021**. Nel complesso **6527** giorni (più di 17 anni d'analisi), di cui **1781** in immersione in acqua e **4746** in conservazione in magazzino.



07.e.a) Decadimento e recupero parziale del Carico di rottura F_r - Volendo sintetizzare il risultato complessivo delle variazioni del Carico di rottura senza nodi F_r nell'arco dell'intera esperienza di 6527 giorni d'idratazione, asciugatura e conservazione, il grafico di **Figura 143** ne è una rappresentazione sinottica adeguata, valida per ogni diametro di corda (variano solo le percentuali di decadimento e di recupero).

È evidente che l'evoluzione di F_r nel tempo per il contatto con l'acqua è suddivisa in tre fasi.

Il **tratto A – B**, legato all'immersione senza soluzione di continuità, in cui agiscono le due forme di **degradazione idrolitica** descritte in precedenza (pagg. 164 – 165) che portano a una **riduzione complessiva**

- del **33 %** per il diametro **10 mm**,
- del **37 %** per il diametro **9 mm**,
- del **41 %** per il diametro **8 mm**.

Il **tratto B – C**, corrispondente al periodo con le corde fuori dalla Vasca di Chorance, asciugate e mantenute in condizione conservativa, che permette un **recupero del Carico di rottura senza nodi** :

- del **20 %** per la corda da **10 mm**, (70 % di quanto perso)
- del **23 %** per la corda da **9 mm**, (63 % di quanto perso)
- del **16 %** per la corda da **8 mm**. (72 % di quanto perso)

Il **tratto C - D** in cui le corde, nella condizione descritta nel punto precedente, sono state di nuovo testate per ottenere F_r e le curve di carico/scarico, rilevando così che queste hanno raggiunto la condizione di mantenere costanti i valori delle proprietà meccaniche, con una **perdita permanente**:

- del **13 %** per il diametro **10 mm**,
- del **14 %** per il diametro da **9 mm**,
- del **25 %** per il diametro da **8 mm**.

07.e.a.1) Prima osservazione: degradazione idrolitica per perdita di peso (irreversibile) e per diminuzione di peso molecolare numerico M_n (reversibile) – Da quanto si evidenzia nel **tratto A – B**, durante l'immersione (5 anni) le corde **hanno perso, complessivamente**, per la **degradazione idrolitica** poco **più di un 1/3** della capacità di resistere alla rottura.

La perdita è **aumentata in funzione della diminuzione del diametro** apparente delle corde: 41 % per il diametro 8 mm, contro il 33 % per il diametro 10 mm. Anche in questo caso si conferma il **principio generale che l'usura**, in ogni sua forma, è tanto **più influente** quanto **minore è il diametro** della fune.

07.e.a.2) Seconda osservazione: recupero parziale delle proprietà meccaniche per la reversibilità della degradazione idrolitica per variazione del Peso molecolare numerico – Dopo l'immersione, le corde, per il lasso di tempo relativo al **tratto B – C**, le corde sono rimaste in magazzino, al buio e non utilizzate per **4746 giorni**: in base ai risultati dei test effettuati nel **Tratto C – D** le corde **hanno recuperato circa il 70 %** di quanto perso in termini di Carico di rottura (più di **2/3**): ciò è conseguenza dell'aumento del Peso molecolare numerico M_n per il ripristino della polimerizzazione che ha prodotto l'allontanamento del contatto con l'acqua.

07.e.a.3) Terza osservazione: rapporto fra i contributi della Degradazione idrolitica per perdita di peso e Degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare numerico – Indirettamente, dalle considerazioni fatte nei precedenti due commi, si viene a conoscere il rapporto fra l'azione della Degradazione idrolitica per perdita di peso e per diminuzione del Peso molecolare numerico: a **poco più di 2/3 spetta alla seconda** e a **poco meno di 1/3 contribuisce la prima**.

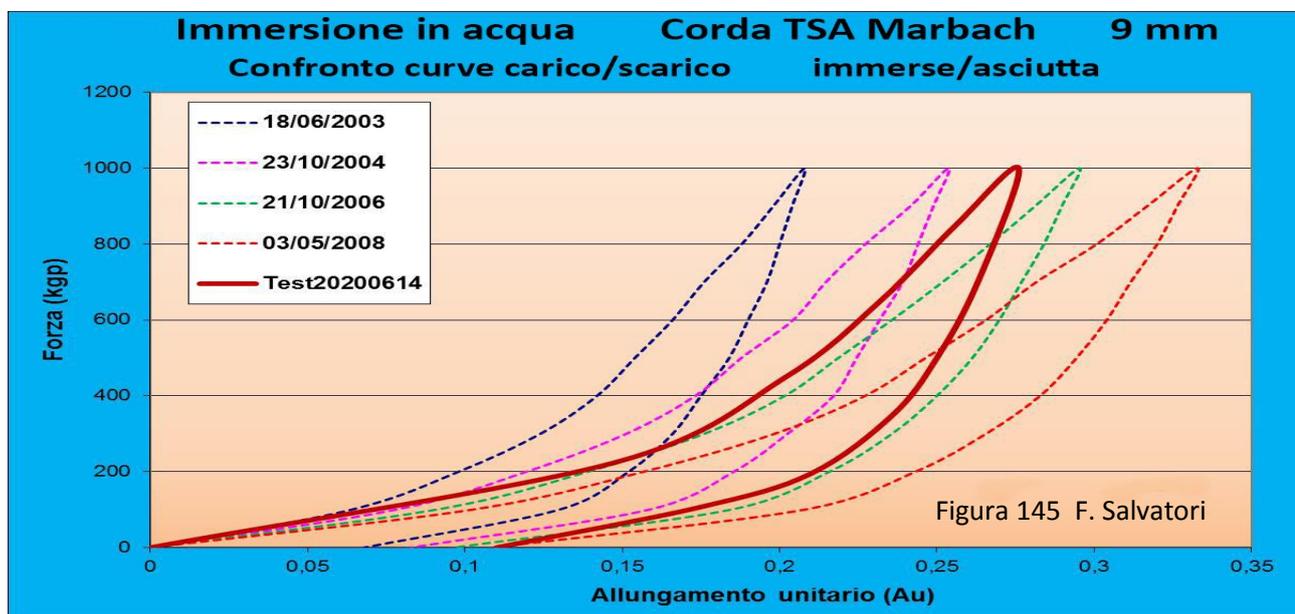
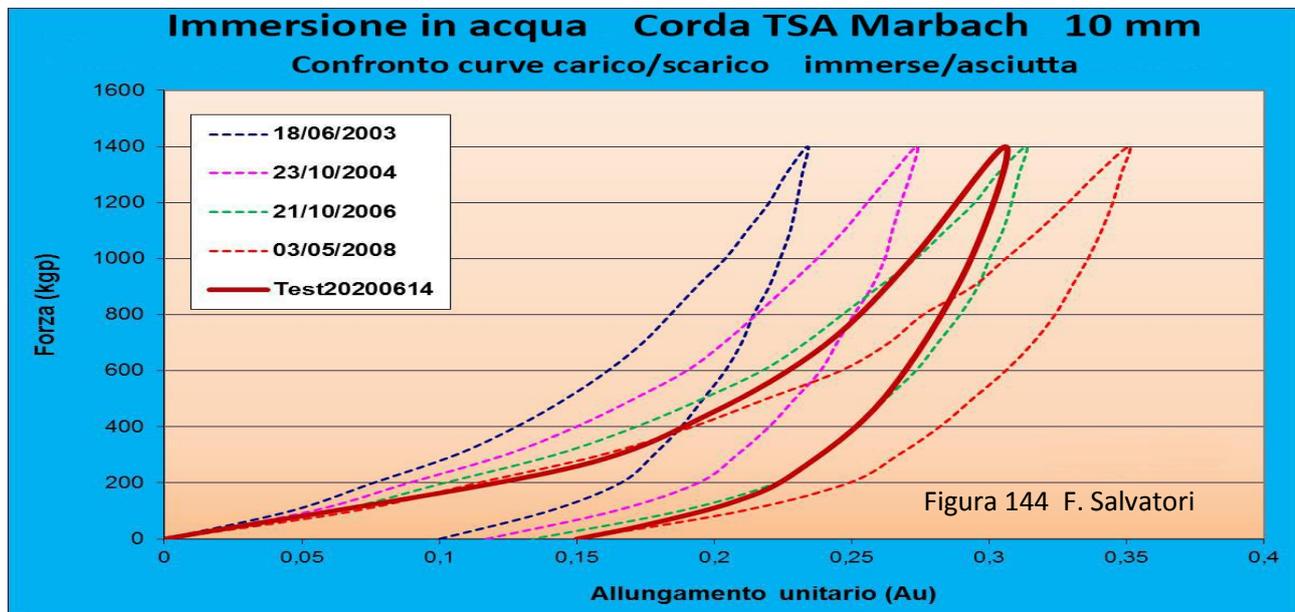
07.e.a.4) Quarta osservazione: il recupero dell'effetto "Degradazione idrolitica per diminuzione di Peso molecolare numerico" avviene completamente e si mantiene nel tempo – Le misurazioni sperimentali del

Tratto C – D, effettuate a intervalli di un anno e poi di sei mesi (circa) mostrano che una volta avvenuto il recupero completo di cui al **Tratto B – C**, questo si mantiene inalterato se le corde vengono mantenute in uno stato di conservazione.

07.e.a.5) Quinta osservazione: indeterminazione del tempo minimo necessario per il recupero della Degradazione idrolitica (per Diminuzione del Peso molecolare numerico) e dell'andamento della curva – L'entità dell'intervallo di tempo di **4130 giorni**, relativo al **Tratto B – C**, trascorso prima di effettuare le misurazioni del **Tratto C – D** è puramente casuale, derivante da una serie di equivoci intercorsi fra la gestione dell'immersione dei test in laboratorio. Anche l'andamento della curva relativa è sconosciuto.

Non c'è alcun elemento che possa permettere d'avanzare delle ipotesi; se non sull'andamento della curva di recupero di F_r , verosimilmente lineare come per la curva di decadimento e in dipendenza della Relazione 23 (pag. 166). E questo ci permette di ipotizzare che il tempo di recupero è proporzionale direttamente all'entità della Degradazione per diminuzione di Peso molecolare numerico.

07.e.b) Recupero parziale del Modulo d'elasticità E - Nei diagrammi delle **Figure 144 – 145** sono evidenziate (in marrone) le curve di carico/scarico delle corde da **10 mm** e **9 mm** di diametro prodotte con i test del 14/06/2020, dopo che per 4425 giorni (circa 12 anni) sono rimaste asciutte, al buio e non utilizzate. E' evidente che le corde, una volta che sono state tolte dall'acqua della sorgente carsica, hanno riacquisito oltre la capacità di resistere alla rottura (**Figura 142**) anche quella di opporsi agli allungamenti.

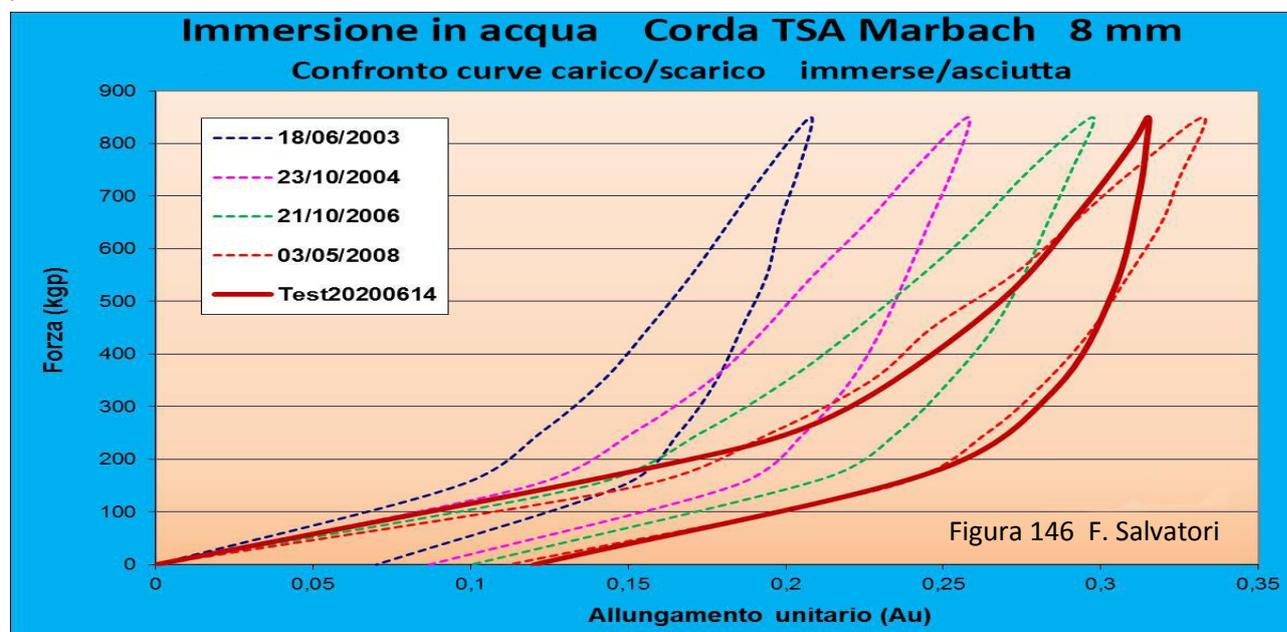


Infatti la pendenza di queste due curve di carico/scarico ha recuperato qualche posizione retrograda, rispetto alla curve che hanno segnato il progredire del decadimento (tratteggiate).

Ma occorre distinguere: le curve tratteggiate sono il frutto del combinato fra Degradazione idrolitica per perdita di massa/peso e Degradazione idrolitica per Diminuzione di Peso molecolare numerico, **la prima irreversibile la seconda completamente reversibile**; le curve a linea **continua marrone** sono legate invece alla sola reversibilità della Degradazione idrolitica per variazione del Peso molecolare numerico del materiale polimerico.

Nel caso della Degradazione idrolitico per perdita di peso/massa competente è la **Relazione 7** (pag. 29): essendo il meccanismo legato all'erosione meccanica (quindi all'asportazione di materiale polimerico) di fatto diminuisce la Superficie efficace S_e e, conseguentemente, la **quantità di materiale** che si oppone agli allungamenti (e alla rottura).

Nel caso invece della Degradazione idrolitica per variazione del Peso molecolare numerico (che non comporta l'asportazione di materiale, ma solo processi di depolimerizzazione/polimerizzazione) è competente la **Relazione 20** (pag. 165): cambiando M_n **non muta la quantità** del materiale polimerico, ma si modifica la sua strutturazione molecolare e quindi **la qualità** del materiale polimerico. Nella sostanza, con la depolimerizzazione diminuisce il valore della Tenacità T che invece aumenta con la polimerizzazione.



Fa **eccezione** la corda di **diametro più piccolo (8 mm)** (Figura 146) dove non c'è stato un recupero significativo; il che contrasta, **apparentemente in modo inspiegabile**, con l'avvenuto recupero di F_r per la stessa corda: **se** aumenta il Carico di rottura deve aumentare necessariamente anche il Modulo d'elasticità.

Comunque, ancora una volta, le corde di piccolo diametro mostrano di subire le varie forme di usura in modo più marcato e/o con maggiore difficoltà di recupero: facendo riferimento alla **Relazione 23** (pag. 166) è verosimile ritenere che il minor diametro fa diminuire la Superficie di separazione solido/liquido S e quindi la velocità di polimerizzazione F_d . Da non escludere che l'assenza del contatto con l'acqua dell'acqua possa far diminuire anche il valore della costante K_d , con il risultato di deprimere ancora di più il recupero delle proprietà meccaniche dei fili elementari.

07.e.c) Conclusioni e contributo dell'immersione in acqua delle corde all'usura complessiva delle corde - E' dunque chiaro che i polimeri immersi nell'acqua modificano le proprie caratteristiche meccaniche, come la diminuzione del carico di rottura e del modulo d'elasticità: il primo in modo costante (lineare) di circa 0,5 kgp/giorno, il secondo con variazioni che vanno decrescendo con incrementi sempre più ridotti (cioè l'attitudine ad allungarsi a parità di forza tende a diminuire e con essa, conseguentemente, la capacità di assorbire l'energia prodotta da un'eventuale sollecitazione).

Per quanto riguarda il Carico di rottura delle corde, la decrescita prosegue con incrementi costanti anche per 11 anni, come abbiamo constatato sperimentalmente nel caso del Pozzo Pataton (*pag. 155 e seg., Figura 136*). Oltre questo limite non abbiamo dati sperimentali a conferma, ma è verosimile attendersi che un andamento identico possa proseguire fino alla consumazione della corda.

Di per sé l'immersione in acqua, visti i tempi lunghi che questo processo richiede per produrre decadimenti pericolosi, non può essere interpretato come un aspetto che merita un'attenzione particolare.

Ma tuttavia non si dimentichi che per una corda speleo:

1. una permanenza in grotta con U.R. al 100 % equivale all'immersione totale in acqua;
2. gli effetti di più periodi d'immersione/permanenza si sommano;
3. nel momento in cui viene utilizzata in grotta, indipendentemente dal degrado accumulato precedentemente, entra in azione l'immissione rapida d'acqua igroscopica che va a idrolizzare i legami idrogeno intermolecolari (*pag. 75, Figura 67*) con conseguente ulteriore marcata diminuzione del Carico di rottura (*pagg. 77 – 78, Figure 69 – 70 – 71*) (effetto che poi scompare totalmente con la corda asciugata, ma che si riproduce appena esposta di nuovo all'ambiente grotta);
4. alla decrescita delle proprietà meccaniche di tenuta delle poliammidi dà un notevole contributo l'applicazione di ondate di calore con superamento della Temperatura di transizione vetrosa (*pagg. 101 – 102, Figure 84 - 85*);
5. la diminuzione di carico di tenuta per effetto nodo;
6. se usata, alla diminuzione delle proprietà meccaniche contribuiscono le successioni di sollecitazioni, la diminuzione della cristallinità, l'ossidazione e l'ozonizzazione.

E quindi, sommando il tutto, la Degradazione idrolitica per immersione in acqua, per lunghi periodi o per somma di molti periodi, può essere il fattore determinante che compromette l'utilizzo sicuro e affidabile di una corda usata (come alcune rotture di corde, apparentemente ingiustificabili, hanno dimostrato).

Facendo una sintesi quantitativa dal valore indicativo generalizzato, all'effetto Degradazione idrolitica si deve aggiungere il 10 – 20 % di riduzione dovuto **all'effetto idrolisi**, il 30 – 50 % per **l'effetto nodo**, valori a due cifre di diminuzione percentuale per gli altri tipi di consumazione dovuti all'uso tipico della progressione speleologica. Si tratta nel complesso di riduzione pari al 50 % con corde nuove, per arrivare al 70 % con corde usate normalmente per due anni (*pag. 123 e seg.*)

Ad esempio se una **corda speleo statica da 10 mm** di diametro apparente ha un $F_r = 3000 \text{ kgp}$ da nuova, da usata (che è la condizione più normale) appena entra in grotta (con U.R. al 100 %) ha un carico di rottura effettivo $F_{rn} = 1000 \text{ kgp}$. Se a questa situazione di reale tenuta si aggiunge la Degradazione idrolitica per permanenza continuativa in grotta si possono raggiungere valori di resistenza al cedimento molto pericolosi, come è dimostrato con nettezza dai risultati della sperimentazione sulla corda rimasta 6 anni nel pozzo della Scala Celeste (*pag. 157, Figura 137*), un tratto della quale ha fatto registrare un **Carico di rottura di appena 452 kgp**.

Parte VI

Corde speleo-alpinistiche

*Test a caduta in funzione del n° degli choc
e della Velocità di deformazione V_d*

L'energia in gioco e la sua dissipazione

L'influenza della viscosità e della *Compattazione della
Struttura Complessa della Corda (CSCC)*

Le deformazioni reversibili e irreversibili

La variazione della Superficie efficace per il
decadimento e la rottura dei fili elementari di Nylon

Laboratorio CRASC
Torre di Caduta
Costacciaro (CENS)



Figura 28 F. Salvatori

In questa **Parte V** sono presentati, analizzati e commentati i risultati di prove sperimentali svoltesi nell'arco di più anni dal "Gruppo di Studio Materiali e Tecniche" della SNS CAI (GSMT).

I test sono stati eseguiti nel Centro Ricerche Attrezzature Speleo-alpinistiche Canyoning (CRASC di Costacciaro) da Istruttori della Scuola Nazionale di Speleologia del Club Alpino Italiano e da operatori del CENS. Le ricerche e i test si sono svolti in più riprese nell'arco di 25 anni.

Questa parte della pubblicazione, insieme alla seguente **Parte VII**, può essere considerata come la presentazione completa dei risultati ottenuti col lavoro sperimentale **a trazione veloce** svolto dal GSMT nel periodo 2010 – 2020, sul tema delle caratteristiche, del decadimento, della degradazione e dei limiti sicurezza delle corde speleo-alpinistiche.

Per la trazione veloce con la Torre, le impostazioni sperimentali, la strumentazione, i protocolli e le metodologie di ricerca sono descritte nella **Parte II**.

01. Test per valutare il decadimento delle corde speleo-alpinistiche per effetto di choc a caduta ripetuti in successione e con velocità di deformazione crescente

E' questa una sperimentazione mai realizzata in precedenza, con rilevanti aspetti d'innovazione strumentale e analitica. E' messa sotto esame la visco-elasticità delle fibre polimeriche (fili elementari).

Si valutano le trasformazioni degradanti che le corde speleo-alpinistiche subiscono per effetto di test sulla Torre di Caduta, come descritta in **Figura 28** (pag. 40) replicata qui sopra.

Lo scopo è di rilevare le variazioni delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle corde in esame in funzione di una **successione di choc ad alto contenuto energetico** con **peso cadente da altezze in aumento**.

Sono test che - con sollecitazioni a Velocità di deformazione V_d ed energia in gioco crescenti - portano i campioni di corda ai limiti del cedimento, per sondare **in modo drastico** uno dei fattori principali dell'invecchiamento delle corde speleo-alpinistiche: l'applicazione occasionale, ciclica o d'isteresi di carichi.

I test a caduta sono stati effettuati in funzione:

1. della Velocità di Deformazione V_d (altezza di caduta del peso),
2. del Numero di Choc ricevuti,
3. del Tipo di Corda (statica e dinamica),
4. del Tipo di Poliammide (Nylon 6 e Nylon 6.6) dei fili elementari,
5. della Condizione (nuova e usata).

I campioni di corda utilizzati per i test sono spezzoni di corda con **nodi guida** all'estremità, necessari per l'aggancio dei campione stessi fra la cella di Carico della Torre e il peso traente in caduta.

Per evitare che la presenza di questi due nodi possano erroneamente influenzare - con la loro deformabilità per strizione - le letture dei dati sulle energie in gioco, sulla deformabilità, sui coefficienti e i moduli d'elasticità, sulla visco-elasticità dei fili elementari di Nylon la lunghezza dei campioni di corda, fuori tutto (comprese le gasse dei nodi), deve essere al **minimo di 300 cm**: solo con tale lunghezza minima la deformabilità aggiuntiva dei nodi è trascurabile (*pag. 42 e seg., Figure 32 – 33*) e il campione di corda annodato può essere considerato geometricamente omogeneo e isotropo.

Inoltre, per limitare ulteriormente che i nodi influenzino i risultati dei test, tutti i campioni di corda sono stati pretirati a 140 kgp.

I test sono stati effettuati con corde asciutte o asciugate, in ambiente esterno con umidità relativa pari al 40 – 60 % e con temperature variabili fra 13 °C e 23 °C.

Attenzione, anche in questo caso, come nei test a trazione lenta, non si tiene conto del decadimento delle proprietà meccaniche delle poliammidi per effetto dell'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari (*pag. 75, Figura 67*) che è **presente sempre quando le corde entrano in grotta** (U.R. al 100 %, valore standard per l'ambiente sotterraneo, equivalente a un'immersione completa in acqua).

In base ai risultati ottenuti con **test a trazione lenta**, il contributo nella riduzione del carico di rottura F_r dell'idrolisi dei legami idrogeno potrebbe raggiungere anche il **16 %**.

Attenzione, dal punto di vista pratico-operativo, gli effetti degradanti dovuti agli choc ripetuti descritti e quantizzati nei paragrafi che seguono in questa **Parte VI** vanno aggiunti a quelli valutati nelle **Parti III – IV - V** e cioè: degradazione idrolitica, depolimerizzazione, fotodegradazione, ossidazione e trasmissione di calore, tutti effetti che comunque si **manifestano solo a seguito dell'uso della corda in grotta** (e, a parte il contatto con l'acqua, in arrampicata).

01.a) Condizioni sperimentali

Trazione a caduta con V_d variabile fra 0 (quasi-statico) e $2,87 \text{ s}^{-1}$

Lunghezza campioni (fuori tutto) > 3 m

Campioni di corda con nodi pretirati a 140 kgp.

Peso cadente 140 kgp

Sullo stesso campione una serie di 10 choc in successione per ognuna di queste altezze di caduta: **0 cm (trazione quasi-statica), 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm**

Le corde sottoposte a test sono (le stesse delle prove a trazione lenta della **Parte V**, *pag. 144*):

1. Beal Antipodes **statica nuova** diametro 10 mm **Nylon 6**,
2. Beal Antipodes **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10 mm Nylon 6,
3. Beal Booster III **dinamica nuova** diametro 9,7 mm **Nylon 6**,
4. Beal Booster III **dinamica usata** (4 anni arrampicata sportiva) diametro 9,7 mm Nylon 6,
5. Cavalieri Cave Explorer **statica nuova** diametro 10,6 mm **Nylon 6.6**,
6. Cavalieri Cave Explorer **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10,6 mm Nylon 6.6.

Le tre corde sottoposte a test sono diversamente caratterizzate nelle proprietà iniziali e nelle modalità di utilizzo:

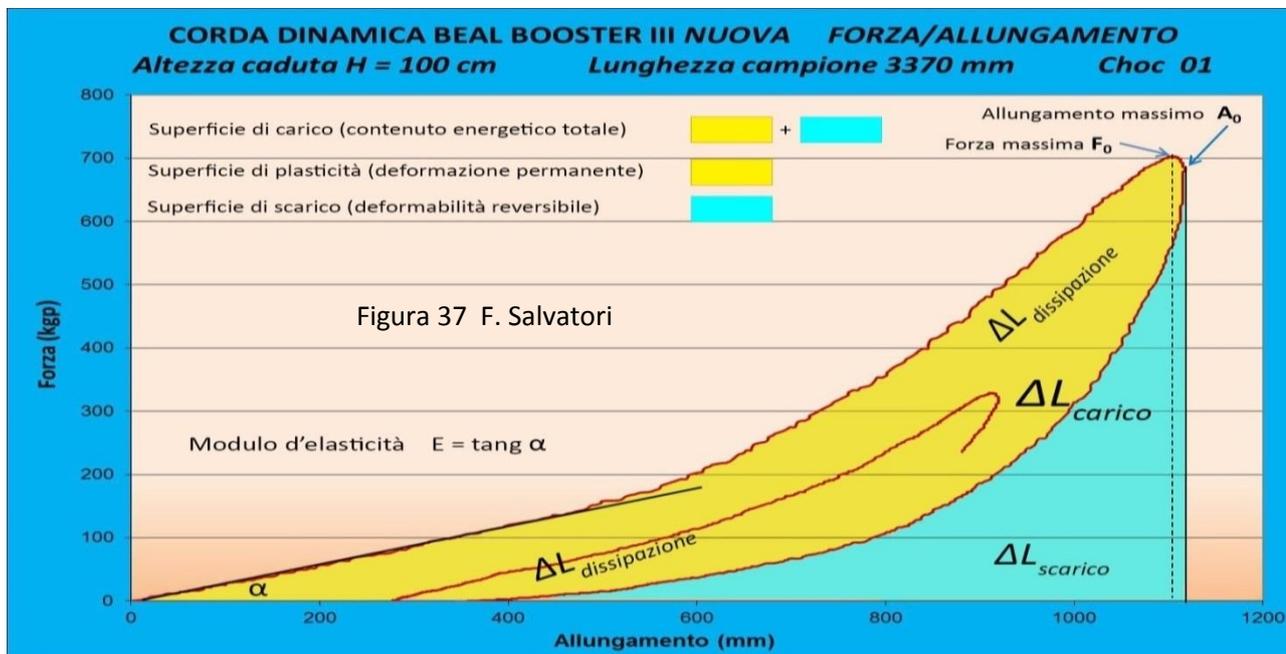
- le corde 1. 3. 5. sono nuove, testate dopo pochi giorni dalla loro uscita di fabbrica,
- le corde 2. 6. sono le 1. 5. ma dopo un periodo di almeno 3 anni d'uso in grotta anche con lunghi periodi di permanenza continua,

- la corda 4. è la 3. ma dopo un periodo d'uso di 4 anni,
- le corde 1. 5. sono "statiche" tipiche per l'attività in grotta,
- la corda 3. è l'unica "dinamica", utilizzata per 4 anni in arrampicata sportiva;
- le corde 1. 3. sono composte di fili elementari di Nylon 6 (calza e trefoli),
- la corda 5. è costituita con fili elementari di Nylon 6.6 (calza e trefoli).

01.b) Diagrammi ottenuti e raccolta, organizzazione e tabellazione dei risultati

Nel complesso sono stati effettuati **480 test**, ognuno dei quali ha permesso di compilare una tabella di sintesi (su foglio di lavoro) come indicata esemplificatamene in **Figura 35** (pag. 44).

Per raggiungere le finalità preposte sono stati elaborati dei grafici d'isteresi con curve di carico/scarico (come quello indicato, per esempio, nella **Figura 37** di pag. 45, che replichiamo qui sotto), ricavandone i dati caratterizzanti le **forme d'energia** fornite, restituite e dissipate e la misura del **Modulo d'elasticità** e della **Velocità di deformazione**. Dei grafici simili sono stati ottenuti anche con trazione lenta ($0,006 \text{ m/s}$, nei diagrammi riportata con Velocità di trazione $V_d = 0,002$, praticamente Velocità di deformazione nulla), raggiungendo la forza massima di trazione di **800 kgp**.

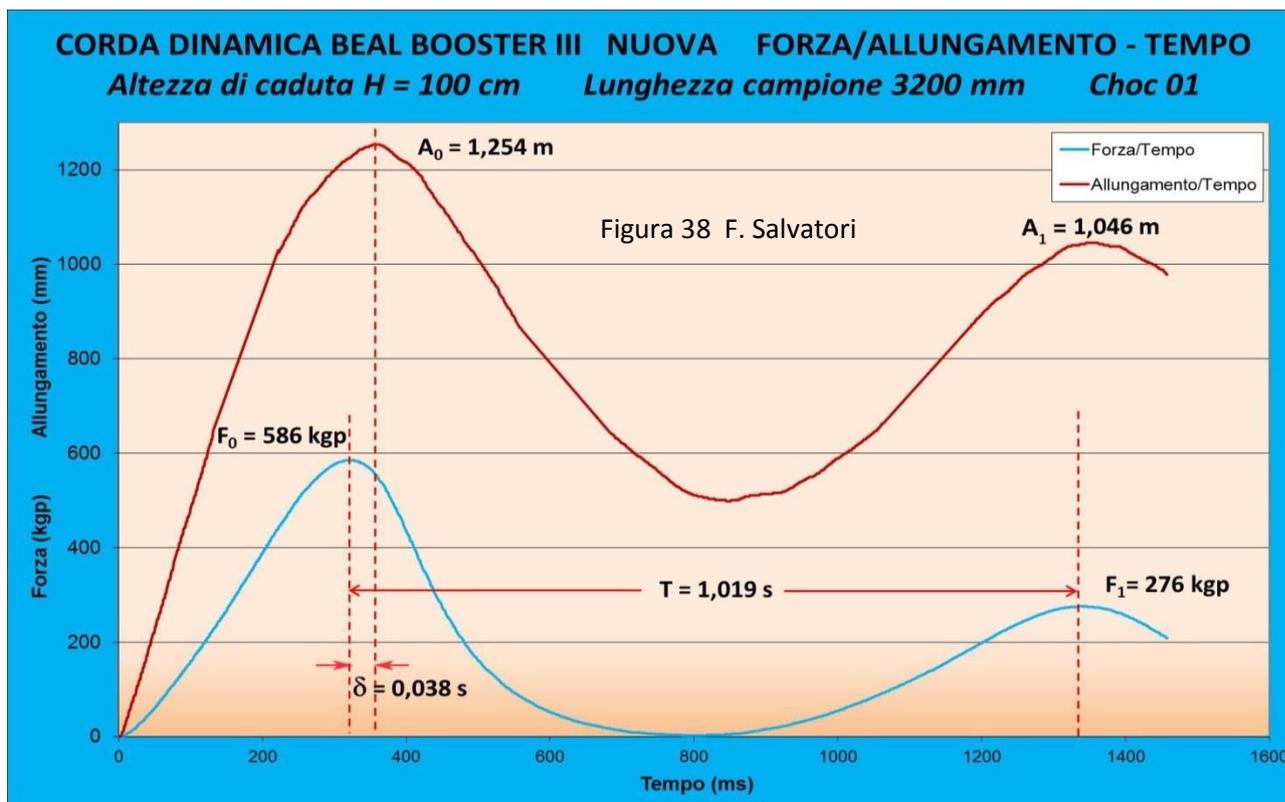


Mentre dai diagrammi che disegnano le curve $F = f(\text{tempo})$ $A = f(\text{tempo})$, come quelli di **Figura 38** (pag. 46), ripetuti qui sotto a titolo d'esempio, si ricavano i dati concernenti il comportamento e al decadimento visco-elastico dei fili elementari di Nylon.

Allo scopo, per ognuna **delle sei corde prese in esame** è stata compilata un **tabella di sintesi** con inseriti tutti dati significativi ottenuti tramite (pag. 44 e seg., **Figure 35 – 36 – 37 – 38**):

- le valutazioni sulle superfici sottese alle curve indicate nella **Figura 37**, equivalenti alle diverse energie in gioco,
- la pendenza iniziale α della curva di carico (**Figura 37**), interpretata come valore del Modulo d'elasticità;
- i valori della caduta libera del peso, per calcolare la velocità d'impatto sul campione di corda e quindi la velocità di deformazione (pag. 52, **Relazione 15**);
- l'Analisi Dinamico Meccanica, che misura attraverso il comportamento **visco-elastico delle poliammidi** il decadimento di una corda in Nylon speleo-alpinistica (pag. 47, **Figura 39**).

Le sei Tabelle riassuntive (**03.b – 03.c – 03.d – 03.e – 03.f – 03.g**) sono visibili nell'**Appendice 03** (pag. 286 e seg.): confrontando, elaborando, incrociando e integrando i dati in esse contenuti sono state sviluppate delle analisi e tratte delle conclusioni sugli effetti degradanti della visco-elasticità del Nylon per effetto **dell'incremento della velocità di deformazione** V_d e del **numero di choc subiti in successione** sulle corde speleo-alpinistiche.



01.c) I parametri ricavati con l'analisi sulla velocità di deformazione, sull'elasticità, sulle forme d'energia dissipanti o conservative e con l'Analisi Dinamica Meccanica sulla visco-elasticità

Con le 480 azioni sperimentali sui 48 campioni di corde diverse, indicate nel precedente **Punto 01.a**, nuove e usate, sono stati misurati i parametri fondamentali caratterizzanti il loro decadimento per l'applicazione di choc ripetuti con velocità di deformazione crescente. I metodi di studio sperimentale sono stati, ripetiamo, quelli indicati nei **Punti a-b-c-d** del precedente **Paragrafo b**. E precisamente:

1. Caratteristiche meccaniche e geometriche (pag. 28 e seg.)

- 1.1. Forza alla rottura senza nodi F_r
- 1.2. Tenacità δ_{sr} (o Sforzo a rottura)
- 1.3. Superficie efficace S_e

2. Parametri elasticità (Figura 37)

2.1. Modulo d'elasticità E

3. Parametri velocità di trazione (pag. 52, Relazione 15)

3.1. Velocità di deformazione V_d

4. Parametri forme d'energia (Figura 37)

- 4.1. Energia prodotta dalla caduta fino al massimo allungamento ΔL_{carico}
- 4.2. Energia restituita per effetto della reazione alle deformazioni elastiche reversibili $\Delta L_{scarico}$
- 4.3. Energia dissipata $\Delta L_{dissipazione}$ ($\Delta L_{carico} - \Delta L_{scarico}$)
- 4.4. Percentuale di dissipazione $\%_{dissipazione}$ $[(\Delta L_{dissipazione}/\Delta L_{carico}) \times 100]$
- 4.5. Energia dissipata in calore per attrito $\Delta L_{attrito}$ ($\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico}$)

5. Parametri decadimento visco-elastico (Analisi Dinamica Meccanica) (pag. 47 e seg.)

5.1. Tempo di ritardo δ_{tempo}

- 5.2. Periodo T
- 5.3. Modulo complesso E^*
- 5.4. Modulo elastico E'
- 5.5. Modulo viscoso E''
- 5.6. Rapporto di dissipazione viscoso $\tan \delta = E'/E''$
- 5.7. Coefficiente di viscosità $\eta = E''/\omega$

La descrizione analitica dei parametri ricavati con la MDA è nel **Punto 01.g** (pag. 48).

I fattori **evidenziati** in celeste sono quelli che fungono da **riferimento** nelle considerazioni, che seguono, sul **decadimento delle corde speleo-alpinistiche**.

01.d) I diversi modi di dissipazione dell'energia nei campioni di corda sollecitati a caduta

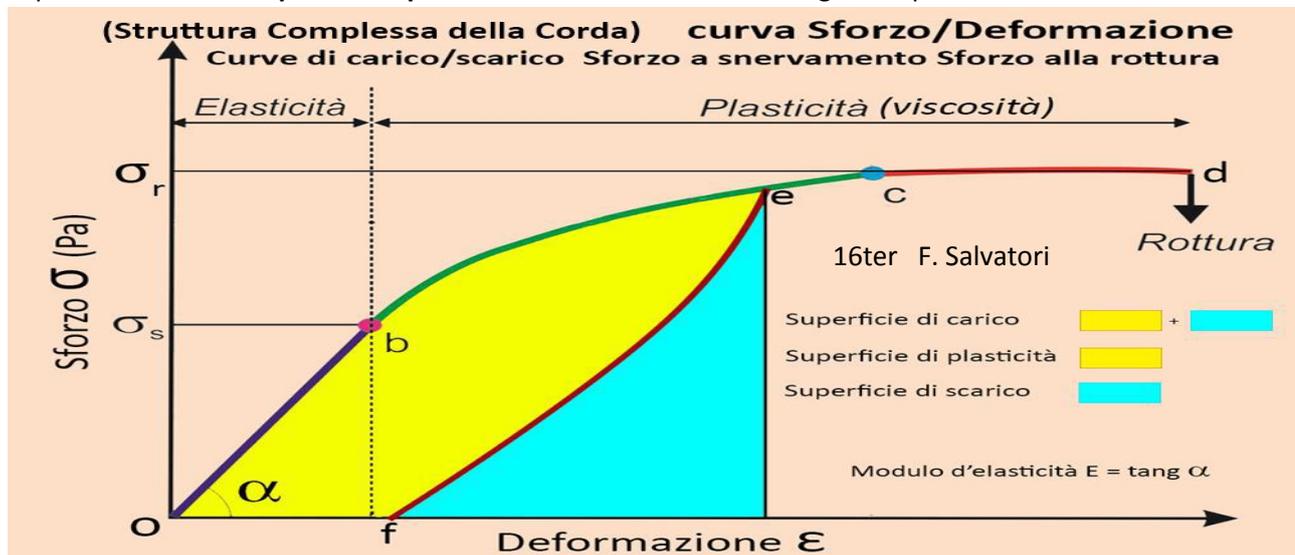
Le deformazioni registrate nelle soprastanti **Figure 37 - 38**, prodotte dalla caduta del peso (o da un test quasi-statico a trazione lenta), sono conseguenza della **natura** e dalla **condizione dei fili elementari** e, in sinergia, del tipo di **tessitura/strutturazione della corda**. Questo vale tanto per le corde nuove quanto per l'usate.

Questa **commistione di reazioni** fra **elementi isotropi** (fili elementari visco-elastici) e **anisotropi** (la struttura tessuta della corda) rende difficoltoso valutare i contributi separati all'assorbimento dell'energia totale in gioco $\Delta L_{caduta+allungamento}$ delle due deformazioni. Però fa da elemento di **discrimine** il **ritardo** δ_{tempo} fra l'avvento della Forza massima F_0 e l'Allungamento massimo A_0 , che contraddistingue solo le deformazioni legate alla parte isotropa visco-elastica delle corde (i fili elementari).

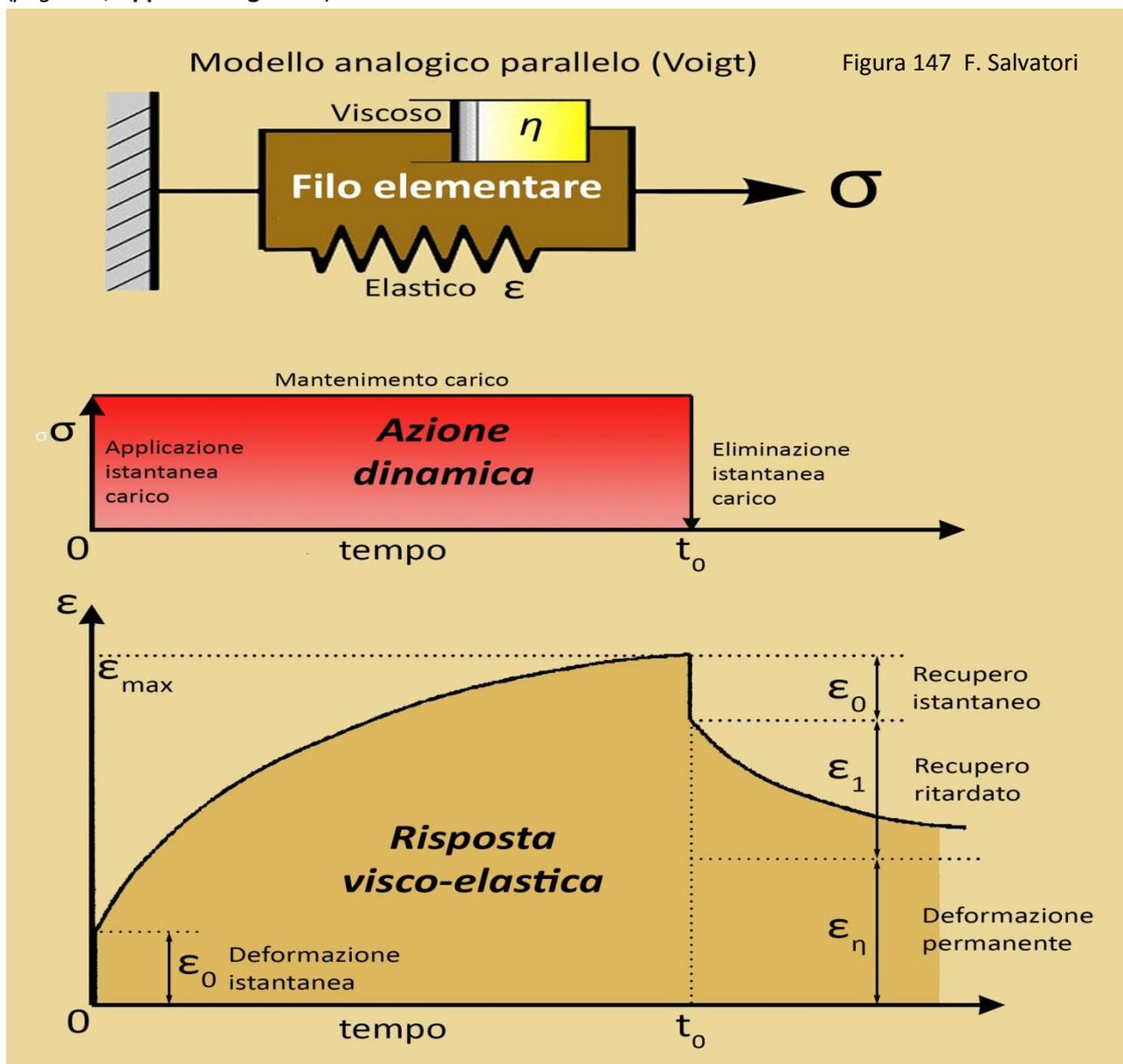
01.d.a) Primo tipo di dissipazione dell'energia: compattazione della struttura complessa della corda (CSCC) – Nella reazione all'applicazione del carico con la **CSCC** il ritardo δ_{tempo} non si manifesta e all'applicazione del carico segue, immediatamente, istante per istante, la dovuta deformazione. E, raggiunta la Forza massima F_0 , contestualmente, termina l'allungamento, con $t(F_0) = t(A_0)$. Dopo di che, immediatamente, inizia il recupero dell'energia accumulata con la parte elastica della deformazione.

Non si manifesta alcun intervallo δ_{tempo} e il contributo di questo tipo di deformazione a dissipare l'energia della caduta del peso non è misurabile con le elaborazioni che utilizzano questo parametro. Infatti gli attriti che si manifestano con la CSCC fra i fili elementari sono di valore trascurabile e determinano un ritardo di tempo trascurabile rispetto a quello prodotto dagli attriti fra catene di macromolecole polimeriche nei fili elementari (responsabili della visco-elasticità, come descritto nel Punto che segue).

La relativa curva forza/deformazione (**Figura 16ter**) è simile, **ma non uguale**, a quella rappresentata in **Figura 16bis** (pag. 27): si ha una crescita della forza con curve di carico e di scarico non coincidenti. Infatti le deformazioni della struttura complessa della corda sono solo parzialmente reversibili, e fra le due superfici risulta una **superficie di plasticità** che è la misura dell'energia dissipata.



01.d.b) Secondo tipo di dissipazione dell'energia: reazione visco-elastica dei fili elementari – Nella reazione visco-elastica, propria dei soli fili elementari isotropi (pag. 177, Figura 38) c'è un ritardo fra forza applicata e le reazioni che producono deformazioni, che sono una combinazione fra risposte immediate elastiche (e totalmente reversibili) e risposte ritardate nel tempo. Questo è un comportamento, come già detto, tipico delle sostanze viscosi, dove il ritardo δ_{tempo} fra il tempo $t(F_0)$ e il tempo $t(A_0)$, opportunamente elaborato con l'Analisi Dinamica Meccanica, è una chiara misura dello stato visco-elastico (pag. 312, Appendici Figura M).



I grafici di **Figura 147** mostrano il comportamento sotto trazione della parte visco-elastica di una corda (deformazioni dei fili elementari di Nylon, senza considerare le deformazioni dipendenti dalla struttura complessa anisotropa della corda stessa).

L'**Azione dinamica** su un campione di corda che si sviluppa in tre fasi:

1. applicazione istantanea di un carico con sforzo σ al tempo 0 (zero),
2. mantenimento costante del carico per un tempo t_0 ,
3. rilascio istantaneo al tempo t_0 del carico fino ad annullarlo,

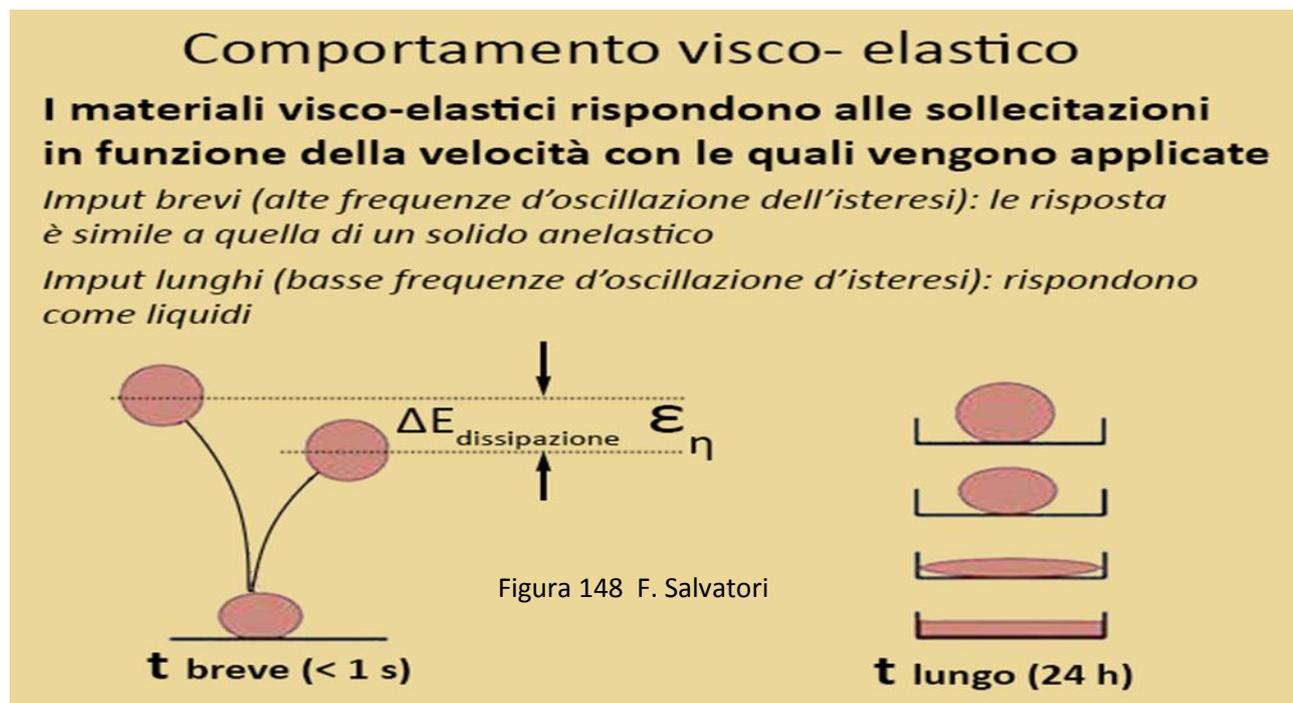
corrisponde un'evoluzione delle deformazioni ϵ come indicato dal grafico "Risposta visco-elastica", dove risulta evidente, ancora una volta, che l'allungamento massimo **non si raggiunge contestualmente** allo sforzo massimo ma con un ritardo δ_{tempo} (pag. 316, Appendici Figura O).

Analizzando nel dettaglio la “Risposta visco-elastica”, le fasi della deformazione sono:

1. contestualmente all'applicazione istantanea dello sforzo, si ha un allungamento altrettanto istantaneo ϵ_0 elastico e reversibile;
2. poi l'allungamento s'incrementa sempre sotto l'applicazione dello stesso sforzo σ finché al tempo t_0 raggiunge il valore massimo $\epsilon_{max} = \epsilon_0 + \epsilon_1 + \epsilon_\eta$;
3. appena tolto il carico, annullando lo sforzo σ , istantaneamente si ha la retrazione pari a ϵ_0 con restituzione dell'energia elastica acquisita nella fase iniziale;
4. segue un'ultima fase di accorciamento ϵ_1 , graduato nel tempo, fino a restituire l'energia reversibile acquisita con la viscosità;
5. la parte di deformazione ϵ_η non viene recuperata ed è una deformazione permanente (la cui energia non viene recuperata e dispersa in calore).

Il tempo t_0 e quello necessario per il recupero dell'allungamento ϵ_1 sono in funzione del grado di viscosità del materiale sottoposto a sollecitazione, in questo caso il Nylon.

Ma nella **Figura 148** si rende inoltre evidente, anche quantitativamente, che la misura dei tempi di ritardo, tanto in fase di carico quanto di scarico, sono funzionali non solo al **coefficiente di viscosità μ** del materiale, ma anche alla **velocità con cui viene applicata la sollecitazione** (del che è resa conferma sperimentale nelle prosegui di questa **Parte VI**). L'esempio riportato in **Figura 148** si riferisce a una paraffina ad alta viscosità ($\mu = 0,150 - 0,200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$).



01.d.c) Terzo tipo di dissipazione dell'energia: lavoro alla rottura dei fili elementari – A seguito di un'applicazione di carico, istantaneo o lento che sia, può accadere che l'energia in gioco porti alcuni fili elementari a superare il **Punto d** (pag. 178, **Figura 16bis**) e giungere al cedimento senza **poter manifestare** alcun ritardo δ_{tempo} (il tempo $t(A_0)$ non c'è). Il lavoro alla rottura dei fili elementari (o meglio lo sforzo alla rottura o $\sigma_{sr} = \text{Tenacità}$ visto che si tratta di elementi isotropi) contribuisce ad assorbire l'energia totale in gioco. Ma **senza alcuna reazione elastica** ed escludendo il calcolo del contributo energetico di questo tipo di dissipazione dalle elaborazioni quantitative legate al ritardo δ_{tempo} .

Un modo per poter valutare questo contributo alla dissipazione dell'energia è eseguire dei test - in funzione di choc in successione e con Velocità di deformazione in crescita (proprio come è avvenuto con i test contemplati in questa **Parte VI**) - per misurare i Carichi di rottura delle corde senza nodi F_r e, di conseguenza, la Sezione efficace S_e . Dalla diminuzione di questo parametro e dal valore dello Sforzo alla rottura tipico della poliammide testata si può calcolare il contributo dato alla dissipazione d'energia.

01.d.d) Quarto tipo di dissipazione dell'energia: attriti fra i componenti la struttura complessa di una corda – Durante l'applicazione di un carico è possibile che gli elementi componenti la struttura complessa di una corda (calza + trefoli + fili elementari + nodi) si allunghino, si comprimano e si strizzino con velocità relative diverse, generando quindi degli attriti, con conseguente produzione di calore e innalzamento locale della temperatura. Anche in tal modo si dissipa l'energia della caduta del peso.

La quantità di lavoro svolto dagli attriti può essere calcolata, come già indicato nel precedente **Punto 01.c** (pag. 177), dalla differenza $\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico} = \Delta L_{attrito}$.

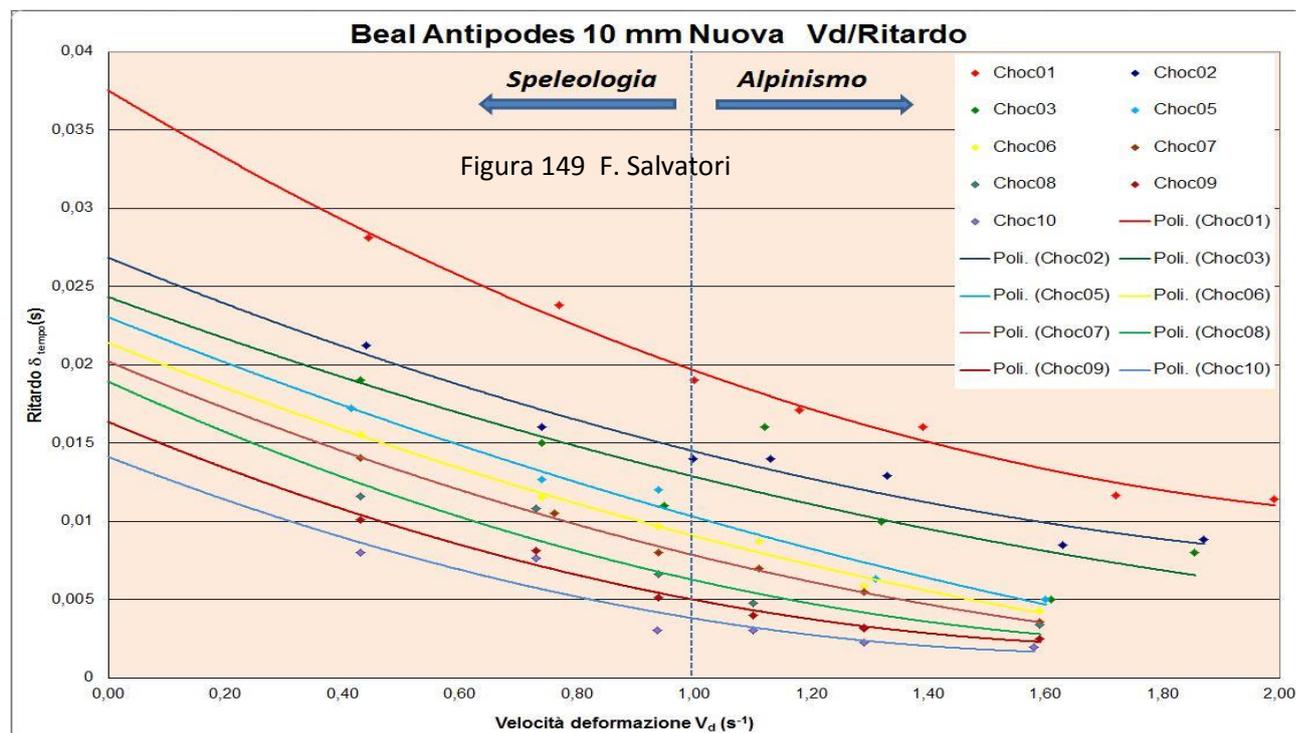
Possono essere ritenute **trascurabili le quantità d'energia dissipate** tramite fenomeni **acustici** o per **attrito con il contatto del peso cadente con l'aria**.

*Ora, per ben comprendere i meccanismi che portano al decadimento di una corda sollecitata con choc ripetuti e velocità di deformazioni crescenti, agenti questi molto attinenti ad alcuni dei principali fattori che nella realtà portano al decadimento per usura di una corda speleo-alpinistica, è necessario poter valutare separatamente i parametri che determinano le deformazioni e le collegate dissipazioni d'energia, mettendo il tutto in relazione con quanto indicato nelle quattro definizioni di cui ai soprastanti **Punti 01.d.a - 01.d.b - 01.d.c - 01.d.d.** Valutazioni che vengono elaborate nei Paragrafi che seguono.*

01.e) Variazioni del Tempo di ritardo δ_{tempo} in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d

Innanzitutto occorre ricordare quanto indicato nella **Figura 38** (pag. 177), replicata nel precedente **Paragrafo b** (pag. 177) che rappresenta i diagrammi $F = f(t)$ e $A = f(t)$ relativi ad un test di Analisi Dinamica Meccanica non – lineare relativi al primo ciclo d'isteresi.

Il ritardo δ_{tempo} è il dato più emblematico che caratterizza il materiale visco - elastico (come le poliammidi), che costituisce i fili elementari delle corde speleo-alpinistiche (ricordiamo ancora una volta: δ_{tempo} uguale all'intervallo di tempo, in secondi, che intercorre nei cicli d'isteresi fra l'avvento della Forza massima F_0 e l'avvento dell'Allungamento massimo A_0).



Già da una valutazione quantitativa di δ_{tempo} è possibile rilevare il degrado sulla parte visco-elastica di una corda (avendo come agenti “artificiali” il succedersi degli choc a velocità di deformazione crescente).

A titolo d’esempio si veda la **Figura 149** relativa alla Beal Antipodes Nuova 10 mm di diametro, dove sono riportate le curve $\delta_{tempo} = f(V_d)$ (polinomiali di 2°) per campioni di corda che hanno subito un numero crescente di choc.

La curva rossa in alto **Choc01** si riferisce a una successione di test con Velocità di deformazione V_d crescente (altezza caduta libera del peso: quasi-statico, H10 cm, H30 cm, H50 cm, H70 cm, H100 cm, H150 cm, H200 cm).

La curva blu in basso **Choc10** si riferisce a test su campioni choccati in precedenza nove volte con cadute del peso identiche a quelle sopra elencate. Le altre curve si riferiscono a n° di choc intermedi.

Il ritardo δ_{tempo} è dell’ordine di qualche millisecondo (nell’esempio da 2 a 38 ms) e va **diminuendo** con il **crescere del numero di choc** subiti e con l’**aumento di V_d** : validazione sperimentale di grande importanza pratica per valutare gli effetti della successione di choc, anche di minima entità, nel decadimento di una corda.

Quindi, con il crescere del numero di choc subiti la corda perde la deformabilità, diventa più rigida per il cambiamento progressivo della sua condizione viscosa (naturalmente, concorre all’irrigidimento anche la progressiva, irreversibile, compattazione della sua struttura complessa).

Parimenti, con l’aumento della velocità d’applicazione del carico (come a dire, Velocità di deformazione) i fili elementari di Nylon diventano più rigidi, come mostrato sperimentalmente nella soprastante **Figura 149** e nella **Figura 43** (pag. 54).

Da ricordare: nella **Figura 149** all’ascissa $V_d = 0,00 \text{ s}^{-1}$ corrisponde, di fatto, a una prova a trazione lenta (0,006 m/s) fino a 800 kgp di forza massima e **non a un test a caduta** del peso: il campione di corda è sempre annodato all’estremità e lungo 3000 mm. In questo tipo di test, quando la velocità di deformazione è la minore possibile, si ottengono i **tempi di ritardo δ_{tempo} più elevati**, a conferma di quanto esposto in **Figura 148**. Come a dire che la viscosità del Nylon è tanto più efficiente quanto è più lenta l’applicazione del carico.

I tempi di ritardo si manifestano anche con elementi di **corda molto rigidi**, come ad esempio con il Kevlar o il Dyneema.

01.f) Variazioni del Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ in funzione del Numero di choc $n^\circ \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione V_d

01.f.a.) Premessa – Utilizzando il protocollo di ricerca dell’Analisi Dinamica Meccanica non-lineare basata sul Modello di Voigt (pag. 312, **Appendici Figura M**) si calcola il parametro **Fattore di perdita $\text{tang } \delta$** , che misura il grado di **reazione alla dissipazione di energia** da parte della **solita componente visco-elastica della corda**, cioè dei fili elementari isotropi e geometricamente uniformi. **Non tiene conto** di alcun apporto dissipativo delle deformazioni della **struttura complessa della corda** o di altre forme possibili di neutralizzazione dell’energia della caduta del peso.

Si ricorda sinteticamente quanto già espresso con le **Relazioni e - f - h** in **Appendici** (pag. 313):

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta = \text{Modulo elastico o conservativo (in - fase)} \quad (\text{e})$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta = \text{Modulo viscoso o dissipativo (non - in - fase)} \quad (\text{f})$$

$$E''/E' = \text{tang } \delta = \text{Fattore di perdita} \quad (\text{h})$$

Il **Fattore di perdita** è dunque una misura del **grado di visco-elasticità** del polimero che costituisce i fili elementari, ma non in termini assoluti (per questo ci vuole il Coefficiente di viscosità $\eta = E''/\omega$ con $\omega = \text{pulsazione}$). Il suo valore infatti tiene conto della viscosità ma in rapporto all’intero contenuto viscoso e elastico ed è il fattore di **maggior rilievo per valutare** la capacità della corda di assorbire **energia** attraverso le **deformazioni visco - elastiche**.

Per dare alcuni esempi di corrispondenza fra dati ottenuti e situazione reale (sia pur al limite) e meglio precisare l'intervallo di valori entro il quale è limitato $\tan \delta$. Si consideri che:

1. se $E'' = 0$ allora $\tan \delta = 0$ e il comportamento viscoso è estinto e i fili elementari si comportano come elementi elastici che seguono, alla trazione, la Legge di Hooke (situazione del tutto teorica, perché prima di raggiungere questa condizione il proseguo della trazione porta al cedimento della corda);
2. se $E' = 0$ allora $\tan \delta = \infty$ e il comportamento elastico è eliminato e i fili elementari si comportano come elementi solamente viscosi che seguono, alla trazione, la Legge di Newton; anche questa situazione del tutto teorica;
3. se $\tan \delta$ ha un valore compreso fra 0 e ∞ allora lo stato visco-elastico è reale;
4. nel complesso, tanto minore sarà la misura di $\tan \delta$ tanto più ridotte risulteranno le capacità energeticamente dissipative dei fili elementari;
5. il Fattore di perdita (pag. 313, **Relazione h**) non tiene conto dei singoli valori del Modulo elastico e del Modulo viscoso, ma, più significativamente, dell'intero apparato visco-elastico, valutando contemporaneamente le diminuzioni/crescite sia del Modulo elastico che di quello viscoso.

Una diminuzione di $\tan \delta$ significa – o per il procedere del n° di choc o per l'aumento della Velocità di deformazione o con il concorso di entrambe le variabili indipendenti – che la capacità di assorbire energia è diminuita.

Nell'ambito dei test programmati per questo capitolo, un aumento di $\tan \delta$ è teoricamente possibile. Infatti, in base alla **Relazioni h** (pag. 313, **Appendici**):

$$\tan \delta = E''/E' = \text{Modulo viscoso dissipativo}/\text{Modulo elastico conservativo} \quad (23)$$

Infatti ciò avviene se si aumenta il Modulo viscoso o, in alternativa, si diminuisce il modulo elastico. Ma sia l'una che l'altra variazione sono poco prevedibili e giustificabili a seguito di una successione di choc, che di norma produce una diminuzione progressiva di entrambi i moduli, con un gradiente maggiore in quello viscoso. E' per questo che $\tan \delta$ nei test previsti in questo capitolo è sempre tendente a diminuire.

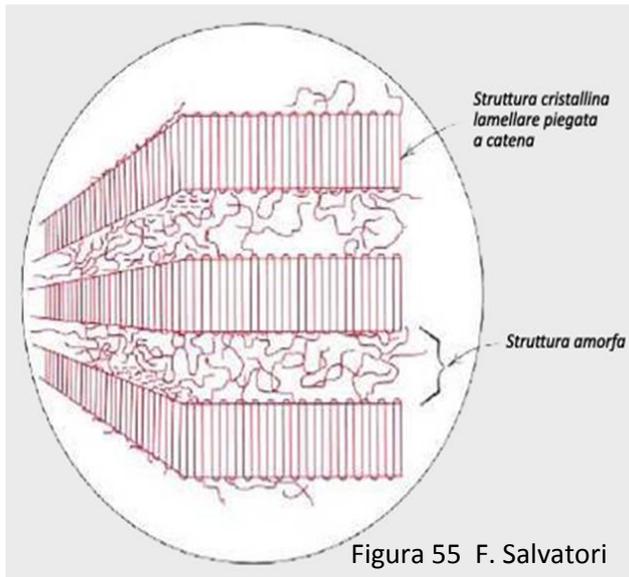
Per poter aumentare il Modulo viscoso occorre che la parte amorfa dei fili elementari si contragga invece di estendersi: cosa possibile **solo con un processo rigenerativo** (rifusione ed estrusione) dei materiali polimerico (il susseguirsi di choc porta all'opposto).

Per poter diminuire il Modulo elastico è necessario invece che la **parte cristallina** dei fili elementari perda parte della sua "organizzazione" e le catene di macromolecole si spacchettino, rompendo la struttura ordinata e compattata **dai forti legami idrogeno intermolecolari** (pag. 65, **Figura 57**).

Procedendo con il succedersi degli choc previsti in questo programma sperimentale - che di fatto equivalgono a una trazione a impulsi con velocità di trazione crescenti – l'espansione degli spazi amorfi è contrastata da legami deboli vinti da forze deboli, mentre per lo spacchettamento dei settori cristallini occorrono forze ben superiori. Dunque, con il susseguirsi degli choc le deformazioni che si producono nella disposizione delle catene polimeriche procedono con conseguenze meccaniche diverse: marcate nei settori amorfi responsabili di gran parte della viscosità, meno rilevanti nei settori cristallini responsabili delle reazioni elastiche. Così stando le cose, il Fattore di perdita $\tan \delta$ non può che decrescere, con andamento variabile a seconda della fase di disgregazione.

01.f.b.) Dinamica della disgregazione della disposizione cristallina/amorfa dei fili elementari: le fasi di spacchettamento dell'organizzazione delle catene di macromolecole

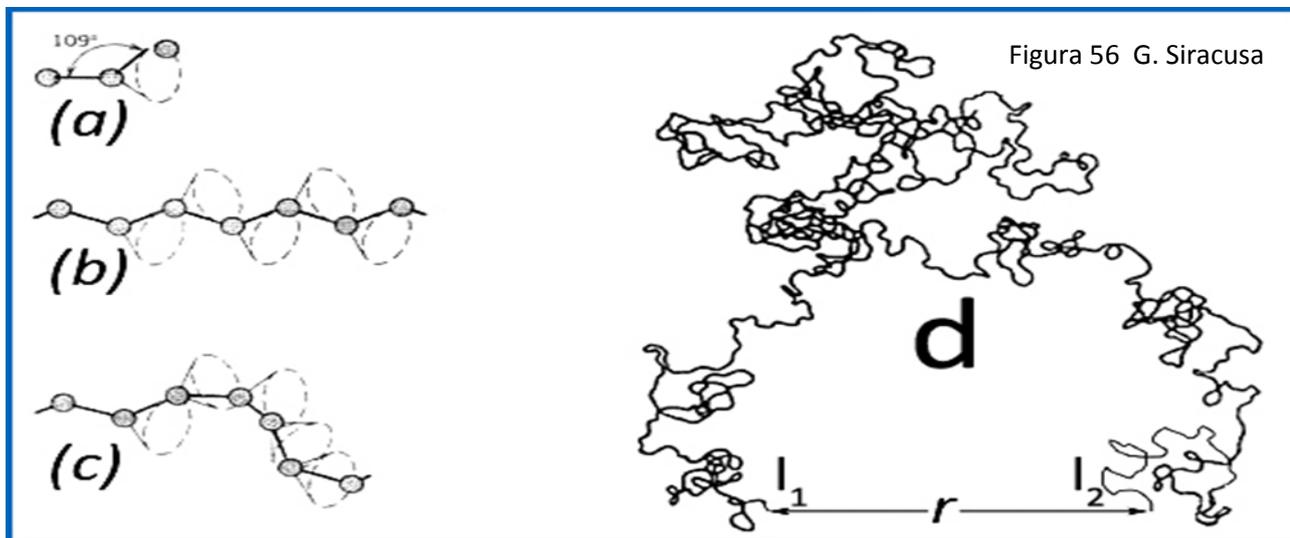
In primo luogo, per comprendere le fasi di questa dinamica occorre far riferimento alle **Figure 53 - 54 - 55 - 56 - 57** (pag. 63 e seg.) dove è presentato l'argomento "Catene di macromolecole e loro disposizione nei fili elementari". Nella **Figura 55**, che qui ripetiamo per facilitare la lettura, è mostrato un classico esempio della distribuzione e dell'organizzazione delle catene di macromolecole nelle poliammidi (ve ne sono altre possibili, ma comunque il loro comportamento sotto trazione è del tutto simile).



Se prendiamo in esame una delle catene di macromolecole ubicate nei settori amorfi indicati in **Figura 55**, la sua raffigurazione, con una proiezione in pianta, è contenuta nella **Figura 56**. Una catena di fibra polimerica può essere composta anche da decine di migliaia di monomeri. I punti l_1 e l_2 ne segnano i terminali ed r la distanza fra essi..

La catena, **rigida**, si sviluppa tridimensionalmente seguendo l'impostazione sterica stabilita per i legami dei gruppi alifatici (rotazioni possibili, ma sempre rispettando l'angolo di 109°).

Gli sviluppi possibili della concatenazione sono infiniti, casuali se derivano dal solo raffreddamento della massa fusa di Nylon nell'estrusore, come esemplificato nella **Disposizione c**.



Se invece c'è un condizionamento esterno, come ad esempio una trazione longitudinale della corda, le catene tendono ad assumere una disposizione più regolare e allungata, come indicato nella **Disposizione b**.

Nel passare da una qualunque **Disposizione c** alla **Disposizione b** occorre superare le barriere energetiche (energia d'attivazione) imposte da ogni trasformazione sterica dei legami $-C-C-$ (rotazione dei legami mantenendo l'angolo di 109°). E questo è un contributo alla dissipazione dell'energia prodotta dall'applicazione di carichi: la distanza r della **Figura d** aumenta e se l'energia della trazione è sufficiente, la catena può, al limite, rettificarsi completamente (dopo c'è solo il cedimento della catena con conseguente rottura del filo elementare).

Queste deformazioni sono proprie delle zone amorse dei fili elementari e fanno parte della natura visco-elastica delle poliammidi e, quindi, sono condizionate dai tempi d'esecuzione e concorrono a definire il valore del **Tempo di ritardo δ** .

Inoltre, sia all'interno della stessa catena, che nell'intreccio con altre (sempre posizionate nelle zone amorse), una trazione, lenta o veloce che sia, per far distendere le catene polimeriche, superando anche la resistenza opposta **dagli attriti e dagli agganci**, inserisce un ulteriore **Fattore tempo** che va anch'esso a definire il **Ritardo δ** . Nel complesso si tratta di una **specie d'inerzia che impedisce un'istantanea reazione** che porti alla **trasformazione e deformazione visco-elastica** del materiale polimerico.

Nella risposta al fenomeno "attrito" la velocità d'applicazione della forza è influente: tanto maggiore è, tanto più elevata risulta la forza d'attrito che si oppone; e il materiale diventa più rigido e capace di resistere alla rottura (come confermano i dati sperimentali esposti nella **Figura 43** della **Parte II** (pag. 54).

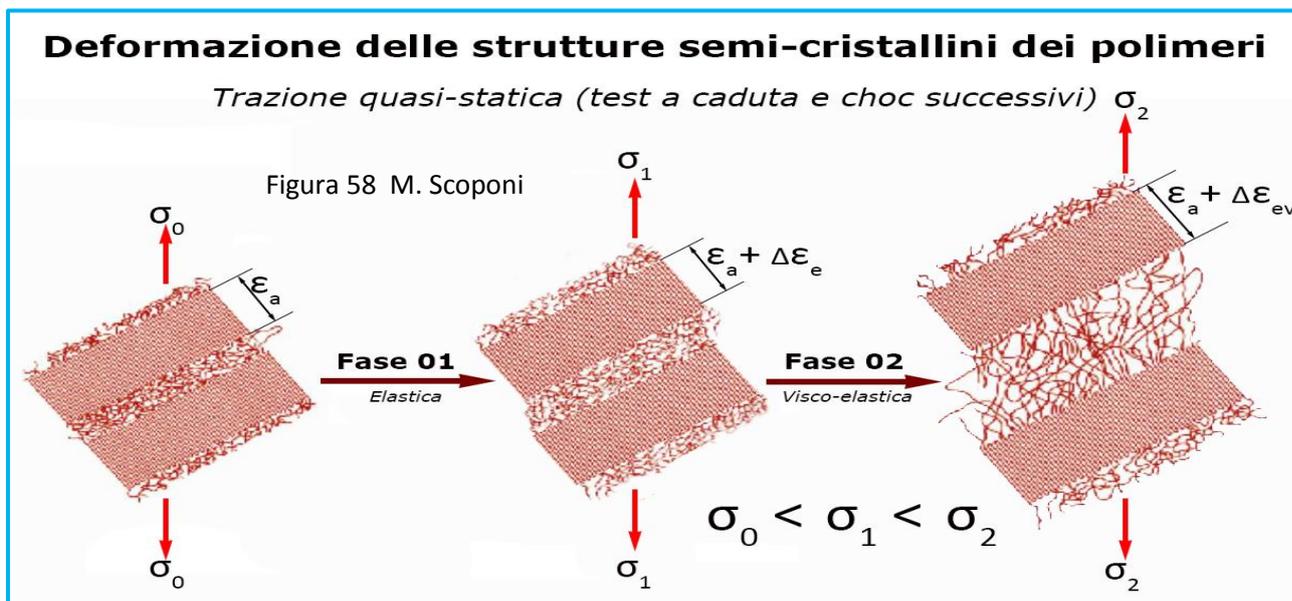
Con queste interpretazioni evolutive della strutturazione delle catene di macromolecole nei materiali polimerici semi-cristallini, ne consegue che, **quasi esclusivamente nei settori amorfi**, a ogni applicazione di carico (vedi choc in successione) o trazione continua avvengono delle deformazioni che sono:

1. in dipendenza del tempo,
2. ostacolate dall'energia d'attivazione delle modifiche steriche delle macromolecole,
3. frenate dall'attrito interno alle macromolecole stesse o nei grovigli di macromolecole,
4. capaci di dissipare energia,
5. per la quasi totalità irreversibili.

Infine - considerazione di grande rilievo per la comprensione dei risultati sperimentali contenuti e analizzati in questa **Parte VI** - a ogni choc subito dai campioni di corda esaminati, una porzione di visco-elasticità viene perduta, non è più recuperabile e il materiale che costituisce i fili elementari perde parte della sua capacità di assorbire energia. E questa situazione di decadimento delle corde va ad aggiungersi alle tante altre già esaminate in precedenza in questo lavoro.

Le deformazioni qui sopra esaminate, tutte ricadenti nella visco-elasticità del Nylon, sono confinate nelle zone amorphe dei polimeri. Questo dunque comporta che le **applicazioni di carichi a una corda** porti, nei fili elementari, a **rapporti cristallino/amorfo** più **elevati** e all'eliminazione progressiva della parte viscosa delle poliammidi.

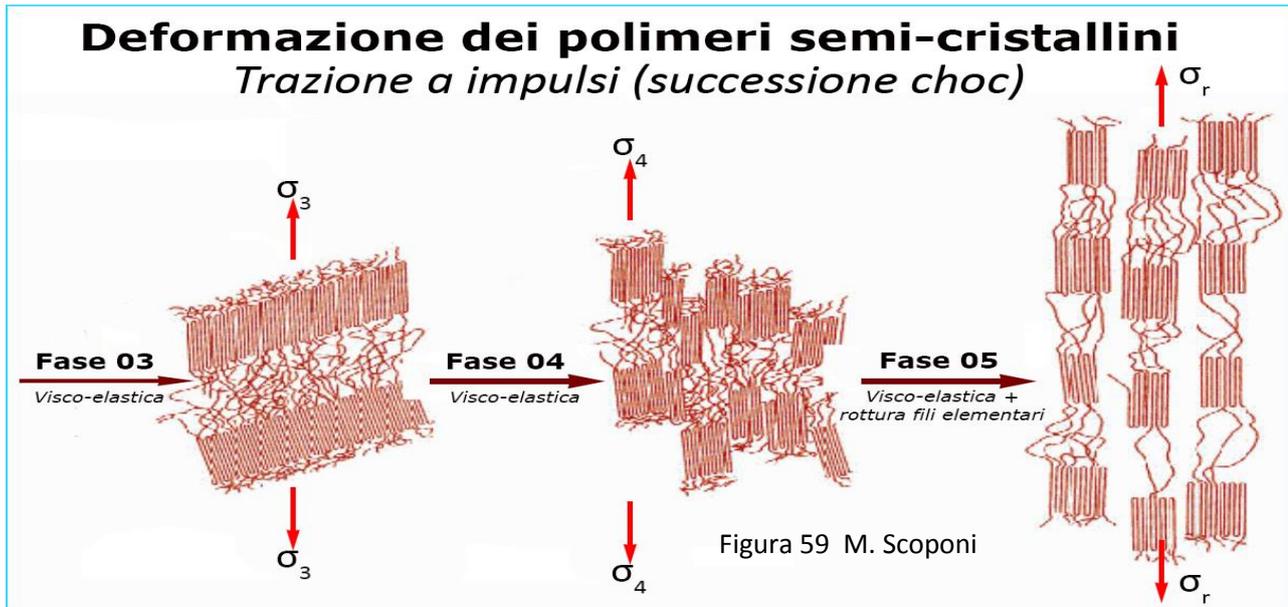
Inoltre - per capire che cosa succede nel complesso dei fenomeni degenerativi legati alla visco-elasticità dei fili elementari e definire il collegamento fra questi fenomeni e la variazione dei valori del **Fattore di perdita $\tan \delta$** - occorre ricordare quanto già esposto per la soprastante **Figura 56** e nelle **Figure 58 - 59** (pag. 68 e seg., **Parte III**), che qui sotto replichiamo per facilitare la consultazione.



Nelle suddette figure è mostrato il procedere delle Fasi che produce la successione degli choc (che equivale, come più volte ricordato, a test con trazione in continuo a velocità di deformazione crescenti).

Con il procedere del n° degli choc la struttura semicristallina iniziale (cristallino/amorfo, in rapporto variabile in funzione del tipo di poliammide e del loro stato di degradazione per usura) si va disgregando con diminuzione dell'estensione delle parti amorphe e della visco-elasticità, testimoniata da un'ineluttabile **decrescita** del Fattore di perdita **$\tan \delta$** .

I fili elementari perdono gradualmente la capacità di deformarsi - quindi d'assorbire l'energia prodotta dalla caduta del peso - e, al tempo stesso, la capacità di opporsi al cedimento; tanto che nella parte finale della successione degli choc, il materiale polimerico può diventare molto propenso alla rottura. Nei grafici **$\tan \delta = f(n^\circ \text{ choc})$** questi eventuali cedimenti vengono registrati, apparentemente, con una diminuzione improvvisa, anche molto marcata.



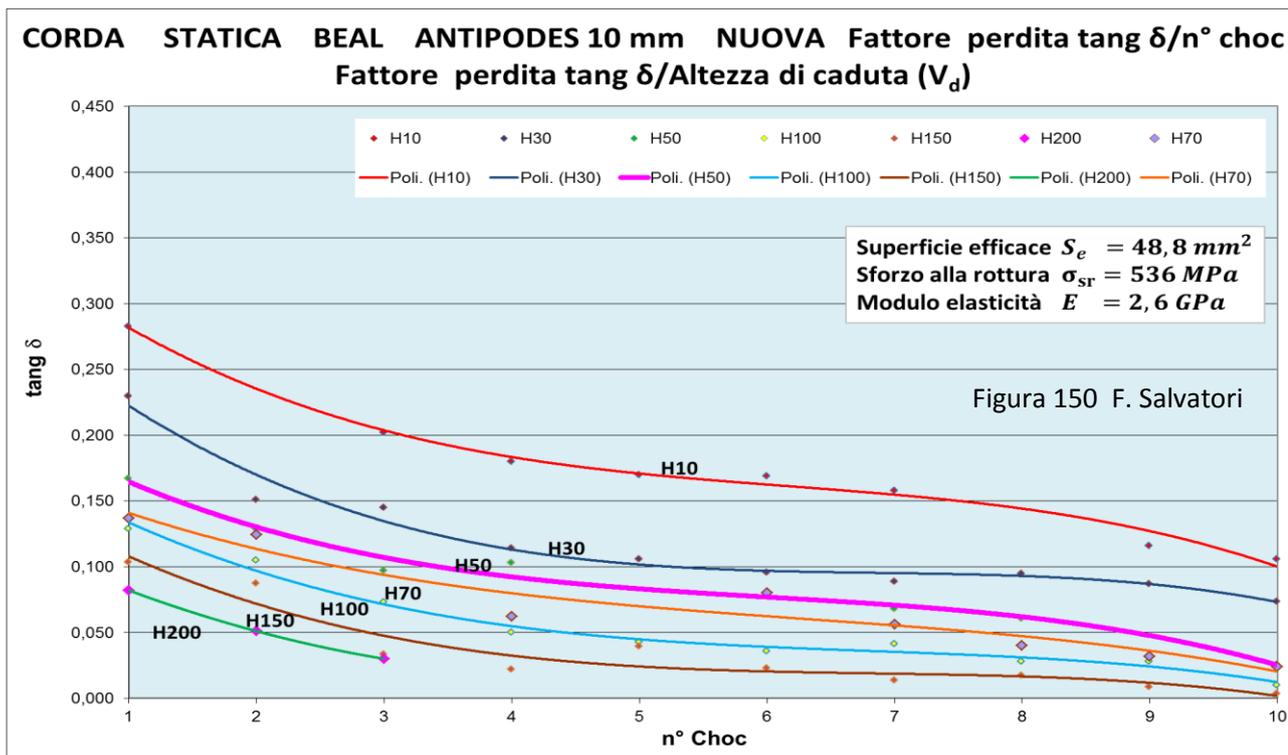
01.f.c.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova (Nylon 6)

01.f.c.1.) Premessa - Nei grafici della **Figura 150** sono diagrammati i dati relativi alla corda **nuova**, dati prelevati dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06** visibili nell'**Appendice 01** (pag. 286 e seg.).

In questi grafici sono messe in evidenza numerica, contemporaneamente, le variazioni di **tang δ** in funzione dell'aumento del **n° choc** e dell'altezza **H** di caduta del peso (determinante la Velocità di deformazione **V_d**).

Pertanto si possono fare considerazioni in relazione a qualsiasi combinazione delle due variabili.

La linea della Curva (di tendenza) **tang δ = f(n° choc)**, di color viola e più marcata, è relativa a test con altezza di caduta del peso di **50 cm (H50)**, che equivale a Velocità di deformazione **V_d = 1 s⁻¹** e segna il confine fra sollecitazioni proprie del settore "progressione speleologica" e "progressione alpinistica" come riportato in **Figura 41** (pag. 53 e seg.).



01.f.c.2.) Modalità di costruzione dei grafici - Nella **Figura 150** (corda statica **nuova**) sono riportate le curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ costruite con i valori di $\text{tang } \delta$ ottenuti con test **equivalenti** per **altezza di caduta**: la **curva rossa (Poli. H10)**, ad esempio, è definita dai valori del **Fattore di riduzione** ricavati al **succedersi dei 10 choc previsti** sullo stesso campione di corda con **altezza di caduta libera del peso di 10 cm** (equivalente a $V_d = 0,47 \text{ s}^{-1}$).

Le altre curve sono state ottenute ripetendo la successione di 10 choc sullo stesso campione di corda, ma con le altezze di caduta del peso (e quindi di velocità di deformazione) programmate in crescendo: 30 cm, 50 cm, 70 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm.

Nel caso del Fattore di riduzione non è possibile ricavare la curva relativa alla Trazione quasi-statica (QS), non potendo calcolare il **Periodo T** dei cicli d'isteresi previsti dall'Analisi Dinamica Meccanica.

Alcuni dei test effettuati hanno subito delle interferenze esterne, soprattutto nelle misurazioni degli allungamenti col sistema laser o è avvenuto il cedimento del campione di corda prima di completare il ciclo d'isteresi. Ciò ha compromesso la validità del test ed è stato necessario eliminare alcuni dei dati collegati.

Quando sono mancati un numero sufficiente di dati per garantire la dovuta validità statistica, sono state escluse alcune curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$. Tant'è che, nei grafici qui sopra esposti (e in quelli similari che seguono relativi alle altre quattro corde), non sempre sono presenti tutte le curve competenti alle otto altezze di caduta programmate.

Le curve rappresentano sinotticamente l'insieme dei punti ottenuti dai singoli test a caduta e sono curve di tendenza "**polinomiali di secondo grado**".

01.f.c.3.) Indicazioni di base per l'analisi dei grafici – Ripetiamo, lo scopo è di comprendere come la corda sotto esame vari il suo valore di $\text{tang } \delta$ in dipendenza del **numero di choc** ricevuti e, separatamente o contemporaneamente, **dell'altezza di caduta** del peso (e quindi al variare della Velocità di deformazione).

01.f.c.4.) Prima considerazione: la dislocazione ordinata delle curve – La constatazione sinottica che gli oltre 70 dati presenti nella **Figura 150** vanno a comporre un'ordinata dislocazione spaziale delle curve, con andamenti pressoché identici, denota a favore della validità statistica dei test eseguiti e della veridicità sperimentale e scientifica delle possibili conclusioni. Questo evidente risultato rende trascurabile la presenza o meno di tutte le curve e possibile l'estrapolazione/interpolazione di situazioni esterne o interne all'insieme delle curve.

01.f.c.5.) Seconda considerazione: l'andamento simile delle curve – Non considerando, per ora, i valori delle coordinate dei singoli punti, ma puntando l'attenzione sull'andamento complessivo dei diagrammi, possiamo suddividere ogni curva $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ in tre settori:

1. **iniziale di decrescita accentuata**, fra n° 1 choc e n° 3 choc, dove il Fattore di riduzione tende a diminuire con pendenza accentuata;
2. **intermedio di decrescita poco accentuata**, fra n°3 choc e n° 7 choc, dove $\text{tang } \delta$ diminuisce il suo valore con incrementi minimi;
3. **finale** con nuova diminuzione, fra n°8 choc e n° 10 choc, con misure di $\text{tang } \delta$ in calo.

Questo andamento che si ripete su tutte le curve conferma la validità dei risultati sperimentali.

01.f.c.6.) Terza considerazione: la variazione differenziata della decrescita della visco-elasticità - Ricordando che $\text{tang } \delta = E''/E' = \text{Modulo viscoso dissipativo}/\text{Modulo elastico } c$, la sua diminuzione può essere determinata sia da una decrescita del Modulo viscoso E'' come da un aumento del Modulo elastico E' . Ma la **diminuzione di $\text{tang } \delta$** può avvenire anche per una **decrecita differenziata: maggiore per il grado di viscosità, minore per quello d'elasticità**. Quest'ultima situazione è la norma, visto che è impossibile, con i test a caduta programmati, ricompattare i settori amorfi e cristallini.

Nel primo settore la **decrecita** marcata del **Fattore di riduzione** è dovuta a quanto accade all'organizzazione delle catene di macromolecole nei fili elementari, come mostrano le trasformazioni

indicate con la **Fase 1** di **Figura 58** (pag. 185) le deformazioni, sia nei settori amorfi che cristallini, sono di minima entità ma comportano una perdita di elasticità e viscosità, con, ovviamente, incrementi di perdita molto più marcati per quest'ultima.

Ne segue che la capacità di assorbire energia dei fili elementari tramite la loro visco-elasticità diminuisce in modo importante (si ricorda che **tang δ** misura in dipendenza del ritardo di tempo δ e quindi non comprende l'effetto dissipativo dovuto alle deformazioni proprie della CSCC).

Nel secondo settore il gradiente di decrescita di **tang δ** si riduce, ma comunque la visco-elasticità diminuisce, e con essa la capacità dei fili elementari di assorbire energia. Siamo nelle **Fasi 2 – 3 – 4** delle **Figure 58 – 59**.

Nel terzo settore la decrescita di **tang δ** prosegue con incrementi più accentuati: evidentemente, come nel primo settore, la diminuzione di viscosità prevale sulla diminuzione d'elasticità.

Ma potrebbe anche essere che subentri un qualche evento di rottura dei fili elementari (**Figure 151 – 152**), che appare nei diagrammi come un'ulteriore decremento del Fattore di perdita di visco-elasticità. In questo caso si verificherebbero i fenomeni indicati nella **Fase 5** di **Figura 59**.

Una perdita di visco-elasticità aggiuntiva può avvenire anche se le deformazioni nei **settori cristallini** fossero di entità **maggiore rispetto** a quelle dei **settori amorfi**. E questo caso può accadere solo quando i fili elementari dei settori amorfi hanno raggiunto la massima possibile estensione longitudinale e un'ulteriore trazione costringe a districare i pacchetti di catene ordinati e rafforzati dai legami idrogeno.

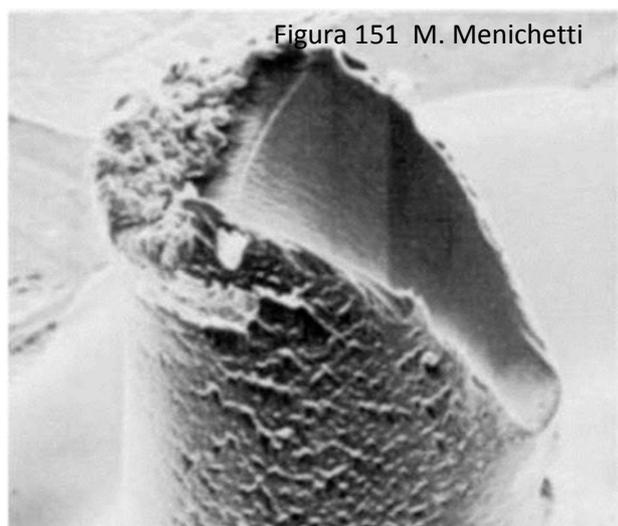


Figura 151 M. Menichetti

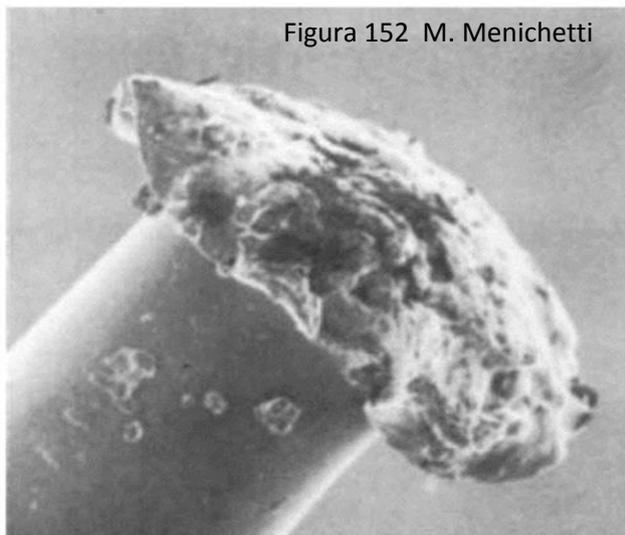


Figura 152 M. Menichetti

1 |—| 100 µm **1** |—| 10 µm

Ma siamo anche al limite di rottura dei fili elementari delle zone amorphe: se questi si rompono (anziché resistere e spaccettare i nuclei cristallini rimasti) le relative curve flettono verso il basso.

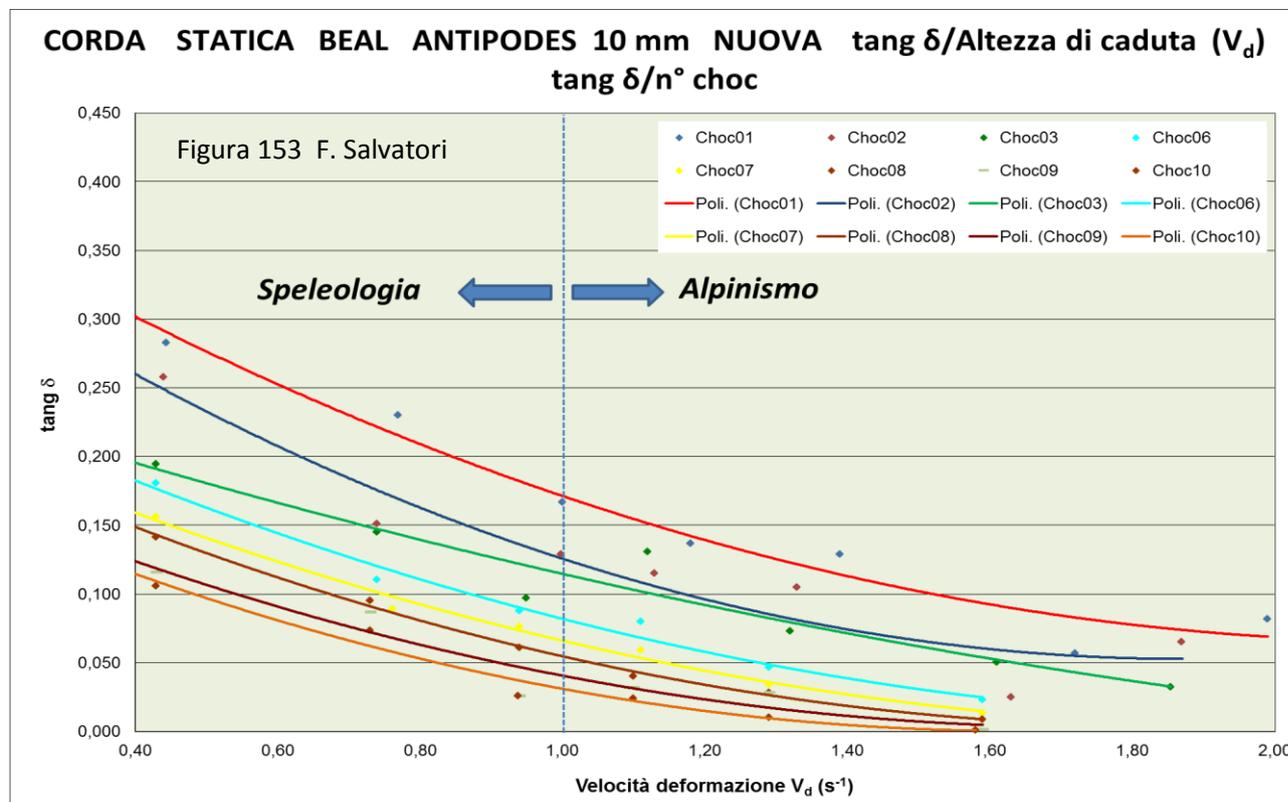
E' probabile che con catene di Nylon 6.6, il cui Sforzo alla rottura è quasi il doppio del Nylon 6, prevalga lo spaccettamento dei nuclei "cristallini" e di conseguenza, ad un successivo choc, si registri un Fattore di perdita in diminuzione, con curve che flettono verso l'alto.

01.f.c.7.) Quarta considerazione: attenuazione, al crescere dell'altezza di caduta del peso, degli effetti prodotti dalla successione degli choc – Sempre riferendoci alla **Figure 150**, è molto chiaro che con l'aumento dell'altezza di caduta del peso (e quindi della Velocità di deformazione V_d) le curve traslano verso il basso: questo significa, in sostanza, che anche l'aumento di V_d incide sulla perdita di visco-elasticità, con effetti degradanti sui fili elementari di Nylon ma di minor entità (le forze d'attrito fra le catene di macromolecole aumentano e riducono il "danno" permanente portato alla visco-elasticità: se ne avvantaggiano soprattutto i settori amorfi).

Anche in questo caso, l'omogeneità delle traslazioni delle curve e il mantenimento dello sviluppo in orizzontale, sono dei nuovi elementi che convalidano ulteriormente la validità sperimentale dei test e la veridicità delle analisi fatte.

Ovviamente, se al progredire della successione degli choc e si aggiunge la crescita di V_d , gli effetti degradanti si sommano. Ma non è facile definire se incide più l'aumento dell'uno o dell'altro fattore: dipende dalla congiuntura di più elementi condizionanti, tutti di difficile individuazione e definizione quantitativa.

Per valutare l'incidenza della *Velocità di deformazione/Altezza di caduta del peso* sulle variazioni di $\tan \delta$ è efficace diagrammare sostituendo la variabile n° choc con V_d , come appunto è stato fatto nella **Figura 153**.



I grafici di questa figura sono costituiti con gli stessi dati della **Figura 150** (Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06 visibili nell'Appendice 03) (pag. 286). Le modalità di costruzione sono le stesse dei grafici precedenti.

E' evidente che, per ogni valore di n° di choc, il Fattore di perdita $\tan \delta$ diminuisce con il progredire degli impulsi-choc: la visco-elasticità del polimero va eliminandosi. Proprio come con la variabile indipendente n° di Choc. I due fattori degradanti non agiscono in contrapposizione e gli effetti si sommano. Tanto che si può affermare che il grado di visco-elasticità dei campioni di corda sottoposti ai test a caduta programmati va diminuendo. Nella **Figura 153** c'è accennata un'indicazione che suggerisce una decrescita di $\tan \delta$ che va attenuandosi con il progredire del n° degli choc e della **Velocità di deformazione**: è verosimile ritenere che un'usura prodotta dal succedersi di choc, grandi e piccoli, porta all'eliminazione del contenuto visco-elastico delle poliammide. Ed è un decadimento delle proprietà meccaniche del Nylon, riducendone la capacità di assorbire energia con delle deformazioni, a livello catene di macromolecole, nei fili elementari.

Quanto esposto in quest'ultimo comma è riferito specificatamente alla corda **nuova statica** Beal Antipodes 10 mm. Ma considerazioni analoghe, generalizzate, possono essere fatte anche su tutti gli altri tipi di corda esaminati in questo programma di test. Nei capitoli e nei paragrafi che seguono sono precisati altri aspetti peculiari in tal senso

01.f.c.8.) Quinta considerazione: valutazione del contributo del Modulo di viscosità E'' alle variazioni del Fattore di perdita $\tan \delta = E''/E'$ – Tenendo conto della Relazione u (pag. 313, Appendici):

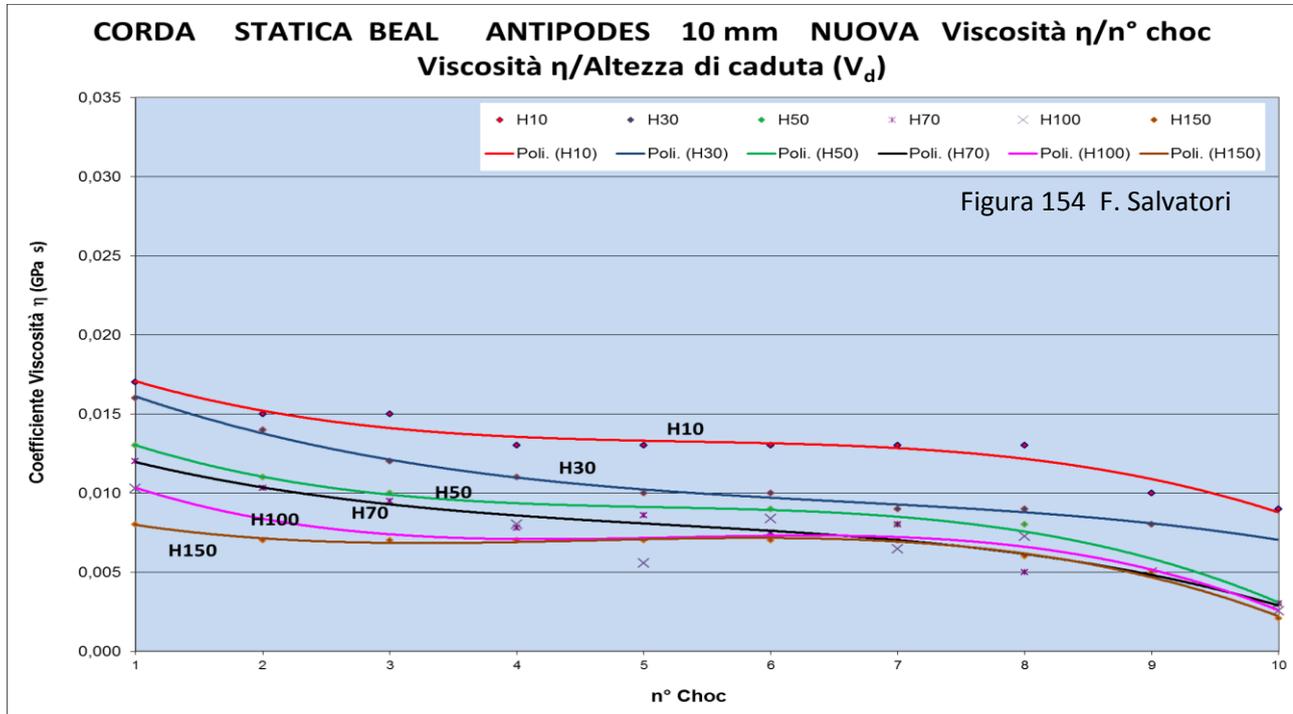
$$\eta = E'' / \omega = \text{Coefficiente di viscosità} \tag{u}$$

dove (pag. 177, **Figura 38**):

$\omega =$ pulsazione

Il **Coefficiente di viscosità** η tiene dunque conto solo della parte viscosa dei fili elementari di una corda e ne è una misura. Pertanto, confrontandolo con il Fattore di perdita che invece è il rapporto fra Modulo viscoso e Modulo elastico, possiamo avere delle indicazioni sul contributo separato dei due fattori E'' ed E' .

Allo scopo analizziamo i grafici della **Figura 154** dove sono diagrammate le curve $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ (le cui costruzioni utilizzano le stesse modalità dei grafici precedenti).



Raffrontando quest'ultima figura con la **Figura 150** viene immediata la conclusione: c'è un' **esemplare coincidenza** nell'andamento e nella dislocazione delle curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ e $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$.

Pertanto sono gli incrementi delle variazioni, in perdita, del Modulo viscoso E'' a determinare la decrescita del grado di visco-elasticità dei fili elementari di una corda, con la conseguente perdita di una parte della loro capacità di assorbire energia.

Ciò non vuol dire che in conseguenza degli choc applicati non possa diminuire anche il modulo elastico E' ; ma questa decrescita, se non è addirittura nulla, è sempre inferiore a quella riscontrata nel Modulo elastico.

Analizzando infine il problema dal punto di vista dello stato di organizzazione sterica delle catene di macromolecole nei fili elementari, si può concludere che la **successione degli choc** tende a **eliminare le zone amorfe** e a **mantenere solo le zone cristalline**, ma riducendone via via la compattezza e la tenuta. Proprio come indicato nelle precedenti **Figure 58 – 59 Fasi 1 - 2 - 3 - 4 – 5** (pagg. 185 – 196).

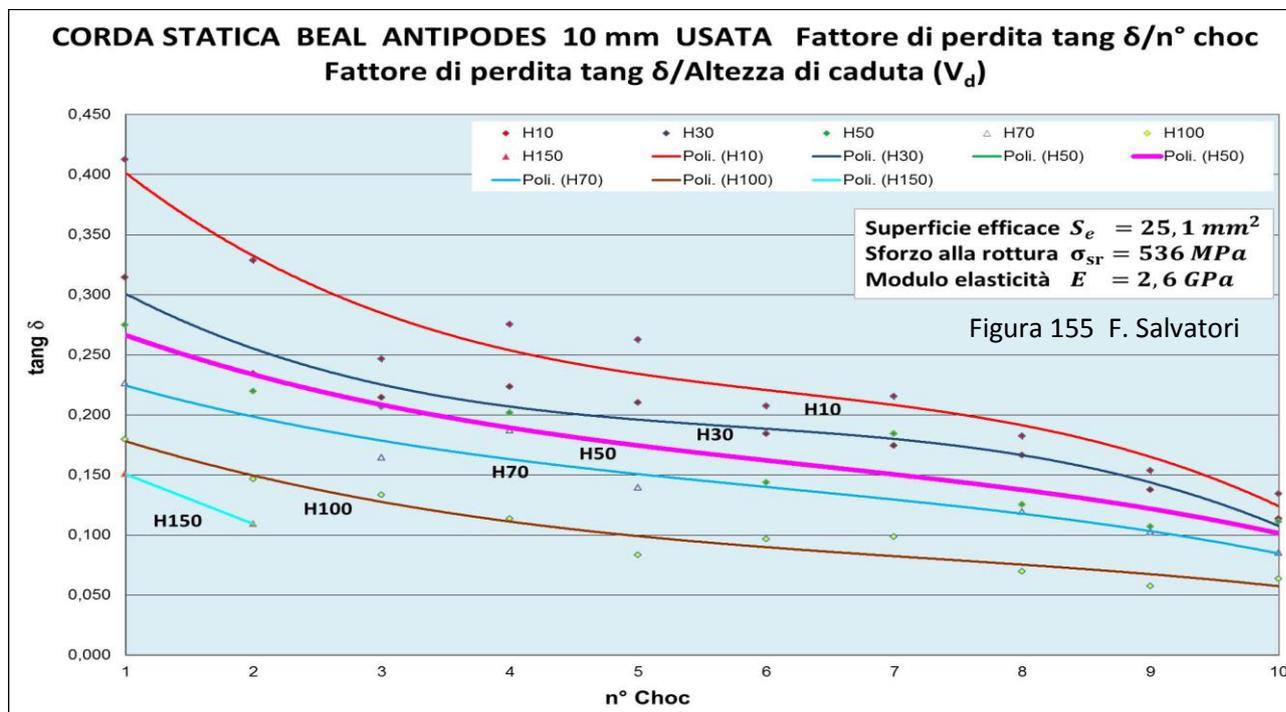
01.f.d.) Confronto fra i dati della Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e usata

I grafici relativi alla Corda **statica** Beal Antipodes 10 mm **nuova** sono rappresentati nella precedente **Figura 150**, mentre quelli relativi alla analoga corda **usata** sono inseriti nella **Figura 155**. Per il confronto le due figure sono sovrapponibili.

Anche per quest'ultimi diagrammi valgono, "mutatis mutandis", la premessa, le modalità, le indicazioni, le considerazioni espresse nel precedente **Paragrafo c** (pag. 186) e cioè:

- ✓ modalità di costruzione dei grafici,
- ✓ indicazioni di base per l'analisi dei grafici,
- ✓ prima considerazione: la disposizione univoca delle curve,
- ✓ seconda considerazione: l'andamento similare delle curve,

- ✓ terza considerazione: la variazione differenziata della decrescita della visco-elasticità,
- ✓ quarta considerazione: amplificazione, al crescere dell'altezza di caduta del peso, degli effetti prodotti dalla successione degli choc,
- ✓ quinta considerazione: valutazione del contributo del Modulo di viscosità E'' alla variazione del Fattore di perdita $\text{tang } \delta = E''/E'$.



E' molto evidente che le due serie di grafici sono simili per andamento delle curve e per la loro sequenza nella dislocazione in verticale. E' confermato il principio per cui la serie di choc con Velocità di deformazione crescente porta a una graduale diminuzione di $\text{tang } \delta$ e quindi a una sempre più ridotta capacità di deformazione dei fili elementari per effetto della visco elasticità.

01.f.d.1.) Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\text{tang } \delta$ della serie di curve – Le differenze fra corda nuova e usata si mostrano invece nei valori di $\text{tang } \delta$:

per la corda nuova	0,080 – 0,280	0,010 – 0,100
per la corda usata	0,150 – 0,400	0,065 – 0,135

Dunque per la corda usata (due anni in grotta intensamente) l'usura tipica della progressione in grotta (abrasione della calza, sollecitazioni ripetute, produzione di calore per attrito, contatto con l'acqua) fa sì che, con il primo choc al minimo di contenuto energetico (H10), il Fattore di perdita dei fili elementari aumenti del 43 % rispetto alla corda nuova (aumento di $0,400 - 0,280 = 0,120$ rispetto a $0,280$).

Pertanto con la corda usata, all'inizio del test, si manifesta una maggiore capacità d'assorbire energia, conseguente alla maggiore visco-elasticità dei fili elementari. Il che è un fatto positivo che va a diminuire, a parità delle altre condizioni, le forze massime prodotte dall'eventuale caduta di un peso.

Questo risultato di **riacquisizione** di qualità visco – elastiche, apparentemente sorprendente, è dovuto al fatto che gli agenti degradanti dovuti al contatto con l'acqua per l'azione della depolimerizzazione delle macromolecole (pag. 81, Figura 73), della degradazione idrolitica con perdita di massa (pag. 83, Figura 74) e di Peso molecolare numerico (pag. 85, Figura 75), nonché ai ripetuti conferimenti di calore per attrito (pagg. 101 - 102, Figure 84 – 85) portano a un graduale processo di diminuzione della cristallinità nei fili elementari. Di conseguenza aumenta $\text{tang } \delta = E''/E'$ perché diminuisce il denominatore E' a svantaggio del numeratore E'' . Questo spiega perché le corde usate, rispetto a quelle nuove, riacquistano con l'uso un maggiore Fattore di perdita $\text{tang } \delta$. Ma questo, nel complesso, non è positivo perché parimenti **diminuisce** il Carico di rottura F_r , e la Superficie efficace S_e della corda.

01.f.d.2.) Seconda considerazione: diminuzione della Superficie efficace nelle corde usate – Il fatto che nella corda usata il Fattore di perdita ***tang δ*** abbia un gradiente di diminuzione mediamente più elevato che nella corda nuova non deve **trarre in inganno**.

Questo è dovuto al degrado prodotto dall'uso (in grotta in questo caso) che fra le altre cose ha fatto diminuire la cristallinità dei fili elementari, e aumentare le parti amorfe. E questo non può che portare a una diminuzione delle caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche dei fili elementari e di conseguenza della corda nel suo insieme. Il Nylon tanto più è cristallino tanto più si oppone alla rottura e alle deformazioni (ricordiamo che da nuovo il Nylon 6.6, con cristallinità al 75 %, ha una Tenacità di 0,64 N/Tex; mentre il Nylon 6 nuovo, la cui cristallinità è al 50 %, ha una Tenacità pari a 0,47 N/Tex).

Ne è una dimostrazione la diminuzione della Superficie efficace S_e della corda usata che scende a **25,1 mm²**, quando da nuova è di **48,8 mm²** (diminuisce del 48,6 %).

Il valore della Superficie efficace è in funzione della quantità di materiale che si oppone alle sollecitazioni (la somma delle sezioni trasversali dei fili elementari), ma anche della sua Tenacità che, come abbiamo più volte sottolineato, varia a seconda dell'usura subita (calore, acqua, fotodegradazione, ecc) (pag. 303, **Appendici 05, Relazione f**).

01.f.d.3.) Terza considerazione: valutazione dei contributi degradanti nella corda – La diminuzione di S_e non è dovuta solo alla diminuzione della Tenacità ma anche alla **rottura per abrasione** (o percussione) **dei fili elementari della parte esterna della calza della corda**.

A tal proposito si ricorda quanto detto **Parte V** (pag. 147 e seg., **Figure 128 - 129 - 130 - 131 - 132 - 133**), dove è messo in evidenza che:

1. i trefoli della corda usata sono visivamente identici a quelli della corda nuova (**Figure 132 - 133**),
2. che la superficie esterna della calza della corda usata contiene fili elementari recisi (**Figura 131**).



Figura 133 F. Salvatori

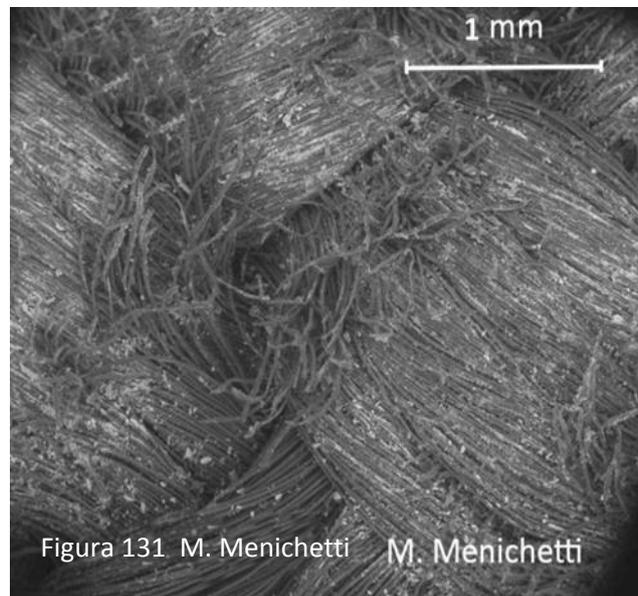


Figura 131 M. Menichetti M. Menichetti

Questo porta a concludere che sia la calza che i trefoli hanno subito lo stesso degrado dovuto al calore, all'acqua, ai cicli di sollecitazioni e all'ossidazione (tutti elementi degradanti dai quali la calza non protegge), mentre nella sola parte esterna della calza il decadimento è dovuto anche all'azione dell'abrasione che ha reciso parte dei fili elementari che la compongono (in parte anche la fotodegradazione).

Quindi solo i trefoli e la parte interna della calza sono stati sottoposti ai fenomeni di degradazione che hanno portato nella corda usata all'incremento del Fattore di perdita ***tang δ*** (con apparente aumento del grado di visco – elasticità).

Nella parte esterna della calza si è avuto anche il fenomeno della rottura per abrasione (o altro fenomeno meccanico), che ha dato un contributo alla diminuzione della Superficie efficace S_e .

Per valutare le percentuali che spettano alle diverse azioni degradanti (rottura fili elementari nella parte esterna della calza + diminuzione di cristallinità nella calza e nei trefoli) si fa riferimento ai test a trazione lenta i cui risultati sperimentali sono inseriti nella Tabella di **Figura 128** (pag. 147).

Prendendo in considerazione la corda di competenza (in questo caso **Antipodes statica 10 mm**, nuova e usata), misurando il carico di rottura senza nodi delle due corde $F_r\text{ corda}$, i carichi di rottura dei singoli trefoli $F_r\text{ trefolo}$ e della calza $F_r\text{ calza}$ (entrambi sempre senza nodi), calcolando le percentuali di perdita di carico di rottura in tutti e tre i casi, si ottiene:

Carico di rottura	Nuova (kgp)	Usata (kgp)	Diminuzione (%)
$F_r\text{ corda}$	2666	1270	49
$F_r\text{ calza}$	1046	470	55
$F_r\text{ trefolo}$	141	75	47

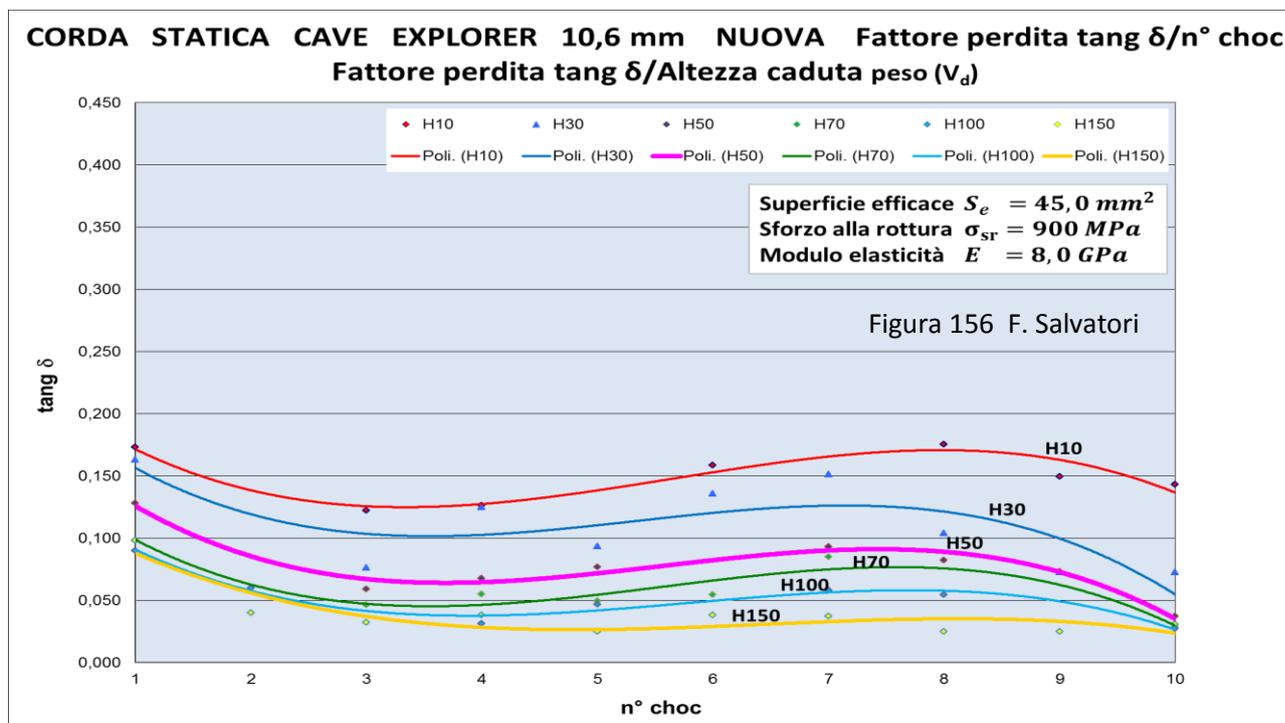
Quindi il contributo al decadimento della corda misurato con la diminuzione della Superficie efficace S_e (da 48,8 mm² a 25,1 mm²) è del **5 % circa dovuto all’abrasione** e del **95 % all’azione di tutti gli altri fattori** elencati in precedenza, tutti capaci d’incidere sul grado di cristallinità e quindi sul rapporto E''/E' e quindi sul Fattore di perdita **tang δ**.

I test a caduta (n. 10 choc in successione con Velocità di deformazione crescente H10 – H30 – H50 – H70 – H100 - H150 – H200) sulle corde usate partono sempre da questa situazione degradata.

Pertanto, considerato che lo stato di corda “usata” è quello che maggiormente corrisponde alla realtà pratica (la condizione di corda “nuova” è un’eccezione che viene quasi istantaneamente eliminata sin dalle prime battute d’utilizzo), le indicazioni per un **suo ottimale uso e migliore conservazione** debbono riferirsi **preferenzialmente** a quanto accade **sulla corda usata**. Se riferite alla corda nuova, è un esercizio puramente accademico.

01.f.e.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Cavalieri Cave Explorer nuova (Nylon 6.6)

01.f.e.1.) Premessa - Nei grafici della **Figura 156** sono diagrammati i dati relativi alla corda **nuova**, dati prelevati dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06** visibili nell’**Appendice 03** (pag. 286).



In questi grafici sono messe in evidenza numerica, contemporaneamente, le variazioni di **tang δ** in funzione dell’aumento del **n° choc** e dell’altezza **H** di caduta del peso (equivalente alla Velocità di deformazione **V_d**).

Pertanto si possono fare considerazioni in relazione a qualsiasi combinazione delle due variabili.

La linea della Curva (di tendenza) $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$, di color viola e più marcata, è relativa a test con altezza di caduta del peso di **50 cm (H50)**, che equivale a Velocità di deformazione $V_d = 1 \text{ s}^{-1}$ e segna il confine fra sollecitazioni proprie del settore “progressione speleologica” e “progressione alpinistica” (pag. 53, **Figura 41**).

Per i grafici di **Figura 156** valgono sempre, “mutatis mutandis”, la premessa, le modalità, le indicazioni, le considerazioni espresse nel precedente **Paragrafo 01.f.c.2.** (pag. 187), e cioè:

- ✓ modalità di costruzione dei grafici,
- ✓ indicazioni di base per l’analisi dei grafici,
- ✓ prima considerazione: la disposizione univoca delle curve,
- ✓ seconda considerazione: l’andamento similare delle curve,
- ✓ terza considerazione: la variazione differenziata della decrescita della visco-elasticità,
- ✓ quarta considerazione: amplificazione, al crescere dell’altezza di caduta del peso, degli effetti prodotti dalla successione degli choc,
- ✓ quinta considerazione: valutazione del contributo del Modulo di viscosità E'' alla variazione del Fattore di perdita $\text{tang } \delta = E''/E'$.

In sintesi, dall’osservazione dei grafici $\text{tang } \delta = f(V_d)$ e $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ non emerge alcuna discrepanza con quanto osservato con la Corda statica **nuova** Beal Antipodes 10 mm.

In particolare si conferma:

1. le variazioni del Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ sono quasi interamente dovute al variare del Coefficiente di viscosità η e quindi al Modulo viscoso E'' (di fatto il Modulo elastico E' rimane pressoché uguale ed è la viscosità della parte amorfa del filo elementare che va diminuendo);
2. con l’aumento dell’altezza di caduta del peso (e della V_d), il Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ decresce progressivamente.

Quindi, sia con il **Nylon 6** (Beal Antipodes) che il **Nylon 6.6** (Cavalieri Cave Explorer) le variazioni del Fattore di Perdita $\text{tang } \delta$ sono tutte in funzione delle analoghe variazioni del **Coefficiente di viscosità η** .

01.f.f.) Confronto fra i dati della Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nylon 6.6, nuova e usata

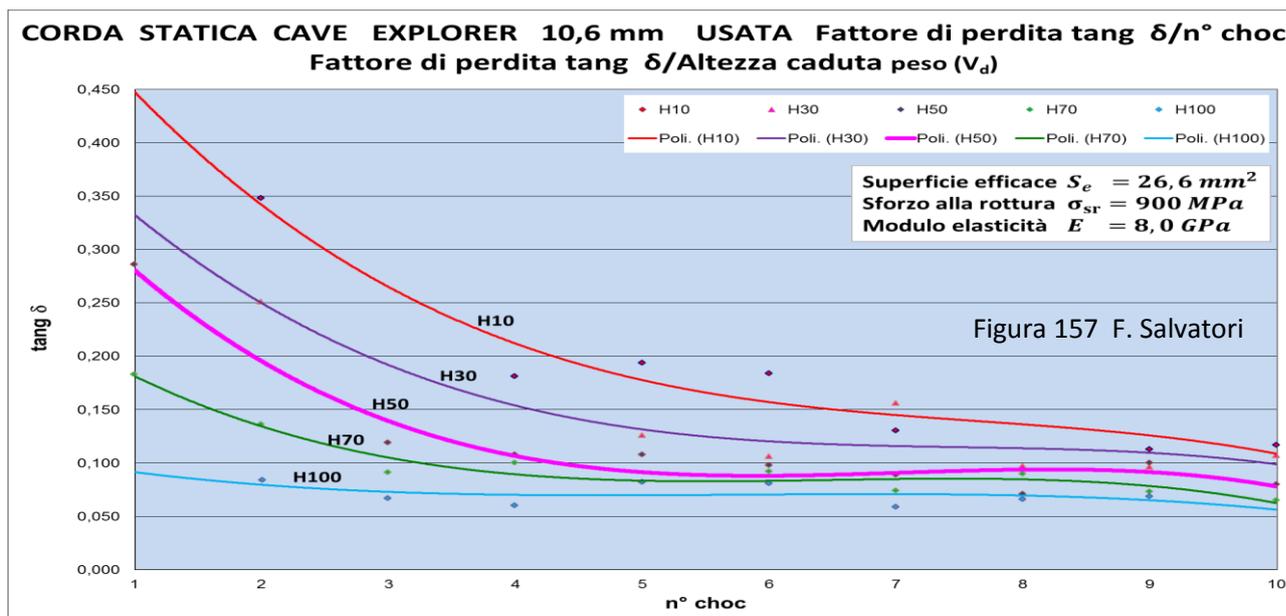
Nei grafici della **Figura 157** sono diagrammati i dati relativi alla corda **usata**, dati provenienti, come sempre, dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06** visibili nell’**Appendice 03** (pag. 286).

Per questi diagrammi valgono le modalità, le indicazioni e le considerazioni espresse nel precedente paragrafo per l’equivalente corda nuova.

Anche qui dalla valutazione dei grafici $\text{tang } \delta = f(V_d)$ e $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ non emerge alcuna discrepanza con quanto osservato con la Corda statica **nuova** Cavalieri Cave Explorer: si conferma che con l’aumento dell’altezza di caduta del peso il Fattore di perdita decresce progressivamente e che questi è quasi esclusivamente in funzione dal Coefficiente di viscosità η .

Si fa notare, ancora una volta, che, se il Modulo elastico E' diminuisce, questa decrescita è molto meno marcata di quella del Modulo viscoso E'' : quest’ultimo è legato alle deformazioni che subisce la parte amorfa del Nylon 6.6, più disponibile a deformarsi della parte cristallina, che invece è legata al Modulo elastico.

01.f.f.1.) Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\text{tang } \delta$ dell’insieme di curve – Confermando quanto è avvenuto in precedenza sulla Corda statica Antipodes con Nylon 6, anche con la Cave Explorer con Nylon 6.6 si registra che la corda usata ha subito un forte decadimento nell’organizzazione delle catene di macromolecole nei fili elementari, aumentando l’estensione delle zone amorphe (che favoriscono, sotto sollecitazione, le variazioni del Modulo viscoso E''), a svantaggio della cristallinità del polimero.



Le differenze fra corda nuova e usata nei ranges dei valori di **tang δ** :

per la corda nuova	0,080 – 0,175	0,025 – 0,140
per la corda usata	0,090 – 0,450	0,060 – 0,120

Dunque per la corda utilizzata in grotta (quasi tre anni, non continuamente) l'usura tipica della progressione speleo (abrasione della calza, sollecitazioni ripetute, produzione di calore per attrito, contatto con l'acqua) fa sì che, con il primo choc al minimo di contenuto energetico (H10), il Fattore di perdita **tang δ** dell'insieme dei fili elementari che compongono la corda usata aumenti del 157 % rispetto alla corda nuova (aumento di $0,450 - 0,175 = 0,275$ in rapporto a $0,175$).

Questo netto incremento di **tang δ** è verosimilmente dovuto al maggior grado di cristallinità di partenza del Nylon 6.6 (75 % contro il 50 % del Nylon 6), che conferisce al polimero una maggiore possibilità di degradazione delle sue proprietà meccaniche, tutte legate all'organizzazione tra le macromolecole.

Questa conclusione non attesta un buon comportamento del Nylon 6.6 rispetto al 6.0, di fronte alla degradazione, ineluttabile, che procura l'uso in grotta. Tanto più che il range finale ($0,060 - 0,120$) non è molto dissimile da quello della corda nuova.

E' vero che all'inizio della successione degli choc con V_d crescenti la risposta alle sollecitazioni è tale da essere favorevole all'assorbimento d'energia (con conseguente diminuzione delle Forze massime), ma è altrettanto evidente che questo vantaggio iniziale va rapidamente esaurendosi, con curve **tang $\delta = f(n^\circ \text{ choc})$** che, dopo una rapida decrescita, tendono a mantenersi intorno a valori vicini a quelli della corda nuova ($0,060 - 0,120$).

Anche qui vale quanto detto per la corda statica Antipodes usata: "Questo risultato di **riacquisizione** di qualità **visco – elastiche**, apparentemente sorprendente, è dovuto al fatto che gli agenti degradanti dovuti al contatto con l'acqua per l'azione della depolimerizzazione delle macromolecole (pag. 81, **Figura 73**), della degradazione idrolitica con perdita di massa (pag. 83, **Figura 74**) e di Peso molecolare numerico (pag. 85, **Figura 75**), nonché ai ripetuti conferimenti di calore per attrito (pagg. 101 - 102, **Figure 84 – 85**) portano a un graduale processo di diminuzione della cristallinità nei fili elementari. Di conseguenza aumenta **tang $\delta = E''/E'$** perché diminuisce il denominatore E' a svantaggio del numeratore E'' . Questo spiega perché le corde usate, rispetto a quelle nuove, riacquistano con l'uso un maggiore Fattore di perdita **tang δ** ."

01.f.f.2.) Seconda considerazione: diminuzione della Superficie efficace S_e nella corda usata – Se nella corda nuova la Superficie efficace è pari a $S_e = 45,0 \text{ mm}^2$, nella corda usata $S_e = 26,6 \text{ mm}^2$: c'è una diminuzione del 40 %. E come prima considerazione si rileva la grande incidenza nei polimeri di Nylon 6.6 dell'usura prodotta dalla progressione in grotta, uguale a quella rilevata nei fili elementari di Nylon 6.

E' di rilievo la considerazione che si può fare tra:

1. fattore di perdita ***tang δ***,
2. grado di cristallinità.
3. proprietà meccaniche dei fili elementari (Carico di rottura **F_r** e Modulo d'elasticità **E**) misurate dalla Superficie efficace **S_e** ,

Allo scopo è stato reso evidente dai dati sperimentali esaminati nei precedenti **Paragrafi 01.f.c., 01.f.d. e 01.f.e.** come le variazioni del Fattore di perdita **a seguito di sollecitazioni** siano legate alle conseguenti variazioni del **grado di cristallinità**. Inoltre è stato messo in chiaro il rapporto tra il **grado di cristallinità** con le **proprietà meccaniche** dei fili elementari.

Infine si sa che le proprietà meccaniche **di una corda** dipendono dalla sua struttura complessa e dalla **consistenza dei fili elementari** che la compongono.

Pertanto, le variazioni del Fattore di perdita ***tang δ*** indicano in maniera diretta i tempi e i modi dell'evoluzione del decadimento di una corda: tanto più rapidamente decresce ***tang δ*** tanto più è veloce il degrado della corda; tanto più è marcato il gradiente con cui varia ***tang δ*** tanto più è incisivo il processo d'usura della corda.

A completamento delle analisi contenute nei **Paragrafi 01.f.c., 01.f.d. e 01.f.e.** si tenga presente che i valori espressi, nelle tabelle e altrove, per la Tenacità, lo Sforzo a rottura, la Sezione efficace, il Carico di rottura senza nodi, il Grado di cristallinità sono valori propri della corda e dei fili elementari nel loro stato iniziale, nuovi o usati.

Ma con la successione degli choc i detti parametri **variano** man mano che i test a caduta procedono (nel loro ordine previsto al fine di simulare un'usura da "invecchiamento" per sollecitazione a trazione, sia pur a impulsi, e con crescente Velocità di deformazione **V_d**). Pertanto tutti i sopraindicati parametri sono sempre in divenire e i grafici utilizzati mostrano anche la loro evoluzione in funzione del n° degli choc e della Velocità di deformazione.

01.f.f.3.) Terza considerazione: valutazione dei singoli contributi degradanti nella corda – Valgono le stesse osservazioni e considerazioni esposte nel **Paragrafo 01.f.d.3.** (pag. 192).

In sintesi per la corda in Nylon 6.6:

1. c'è una diminuzione della Sezione efficace **S_e** da **$45,0 \text{ mm}^2$** a **$26,6 \text{ mm}^2$** (diminuzione 40,1 % contro il 48,6 % del Nylon 6),
2. la superficie esterna della calza mostra fili recisi e intaccati (pag. 148, **Figura 131**),
3. la parte interna della calza e i trefoli non sono abrasi e non vi si evidenzia alcun danneggiamento (pag. 148, **Figura 133**).

Anche in questo caso è verosimile ritenere che, sia la calza che i trefoli, hanno subito lo stesso degrado dovuto al calore, all'acqua, ai cicli di sollecitazioni e all'ossidazione (tutti elementi degradanti dai quali la calza non protegge), mentre nella sola parte esterna della calza il decadimento è dovuto anche all'azione dell'abrasione che ha reciso parte dei fili elementari che la compongono.

Anche qui è possibile valutare le percentuali che spettano alle diverse azioni degradanti (rottura fili elementari nella parte esterna della calza + diminuzione di cristallinità nella calza e nei trefoli), valutando i risultati dei test a trazione lenta inseriti nella Tabella di **Figura 128** (pag. 147).

Prendendo in considerazione la corda di competenza in questo caso (**Cave Explorer 10,6 mm**) nuova e usata, misurando il carico di rottura senza nodi delle due corde **$F_{r \text{ corda}}$** , i carichi di rottura dei singoli trefoli **$F_{r \text{ trefolo}}$** e della calza **$F_{r \text{ calza}}$** , calcolando le percentuali di perdita di carico di rottura in tutti e tre i casi, si ottiene:

Carico di rottura	Nuova (kgp)	Usata (kgp)	Diminuzione (%)
$F_r \text{ corda}$	3344	1533	54
$F_r \text{ calza}$	864	566	34
$F_r \text{ trefolo}$	157	116	36

Quindi il contributo al decadimento della corda misurato con la diminuzione della Sezione efficace S_e (da 45,0 mm² a 26,6 mm²) è del **9 % circa dovuto all'abrasione** e del **91 % all'azione di tutti gli altri fattori**, elencati in precedenza, tutti capaci d'incidere sul grado di cristallinità e quindi sul rapporto E''/E' e infine sul Fattore di perdita $\tan \delta$.

C'è dunque una differenza fra le percentuali misurate per la corda Antipodes Nylon 6 e la corda Cave Explorer Nylon 6.6: **5 % contro 9 % per l'incidenza dell'abrasione e 95 % contro 91 % per tutti gli altri fattori degradanti, compreso il calore.**

E' un'ipotesi plausibile supporre che la diminuzione percentuale del Carico di rottura F_r , nei trefoli di Nylon 6.6 (91 % anziché 95 %) sia dovuta alla più alta temperatura di fusione di questa poliammide (265° C contro 218° C). E' noto infatti che, in un qualsiasi materiale, una più alta temperatura di fusione diminuisce gli affetti prodotti dal calore e dalle conseguenti variazioni di temperatura. Nel caso delle poliammidi una temperatura di fusione più elevata fa diminuire gli effetti del calore sulla diminuzione della cristallinità (pag. 90, **Parte III**).

01.f.g.) Confronto fra i dati della Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 e la Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10, 6 mm Nylon 6.6 , nuove e usate

L'analisi vuole mettere in evidenza quali sono le differenze date dalla diversa natura delle poliammidi (Nylon 6 e Nylon 6.6) quando vengano sottoposte alla sperimentazione per choc ripetuti e con Velocità di deformazione crescenti.

I grafici relativi alla Corda **statica** Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 **nuova** sono rappresentati nella precedente **Figura 150** (pag. 186). I diagrammi della Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm **nuova** sono contenuti nella **Figura 156** (pag. 193).

01.f.g.1.) Prima considerazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di $\tan \delta$ dell'insieme di curve – Le **differenze** fra corda Nylon 6 e Nylon 6.6 si mostrano invece nell'entità dei valori di $\tan \delta$.

Questi sono:

per la corda Nylon 6	iniziale	0,080 – 0,280	finale	0,010 – 0,100
per la corda Nylon 6.6	iniziale	0,080 – 0,175	finale	0,025 – 0,140

L'influenza della diversa Tenacità/Sforzo alla rottura (0,47 N/Tex contro 0,64 N/Tex; 536 MPa contro 900 MPa) non determina differenze sostanziali se non:

1. un maggiore valore medio iniziale di $\tan \delta$ per il Nylon 6, specie nei test a minor contenuto energetico (choc01/H10), dovuto alla diversità della percentuale di cristallinità (50 % rispetto al 75 %); infatti nel **Nylon 6**, in queste condizioni sperimentali, data la maggiore estensione delle zone amorphe, i test a caduta favoriscono l'aumento del Modulo viscoso E'' piuttosto che l'incremento del Modulo elastico E' , incrementando in tal modo il Fattore di perdita $\tan \delta$,
2. un accenno di inversione di tendenza fra il 4° choc e il 7° choc per la corda di Nylon 6.6, verosimilmente legata al fatto che per il passaggio dalla **Fase 3** alla **Fase 5** (pag. 68, **Figura 58**) si richiede che sui fili elementari vengano conferiti dosi suppletive d'energia, il che incrementa più il Modulo elastico E' che il viscoso E'' (tutta da individuare la causa di questo fenomeno in controtendenza),
3. un maggior valore medio finale di $\tan \delta$ per il Nylon 6.6, ma solo con i test a più alto contenuto energetico (H150), perché la sua maggiore cristallinità rende più difficoltosa la trasformazione del "cristallino" in "amorfo" e quindi è più ostacolato l'aumento del Modulo viscoso E'' .

In conclusione, l'apporto alla capacità d'assorbire energia attraverso le variazioni del Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ da parte dei fili elementari di Nylon 6.6, non è significativo: da questo punto di vista le due poliammidi esaminate si comportano in maniera pressoché uguale.

01.f.g.2.) Seconda considerazione: valutazione e confronto dei valori di $\text{tang } \delta$ in funzione della Velocità di deformazione e del tipo di poliammide – Nel precedente **Paragrafo 01.f.f.2.)** (pag. 195) si è concluso che il Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ è un indicatore molto efficace dei tempi e dei modi dell'evoluzione del decadimento di una corda nella sua parte visco-elastica, decadimento che condiziona gran parte delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei fili elementari (l'altro determinante contributo è dato dalla struttura complessa con la quale la corda è stata confezionata, che però non subisce deformazioni condizionate dal "tempo" e quindi non da un apporto alla visco-elasticità).

Quindi $\text{tang } \delta$ è un punto di riferimento importante per conoscere la condizione in cui versa una corda durante il suo processo d'invecchiamento per uso e quali sono, via via, i suoi limiti di resistenza.

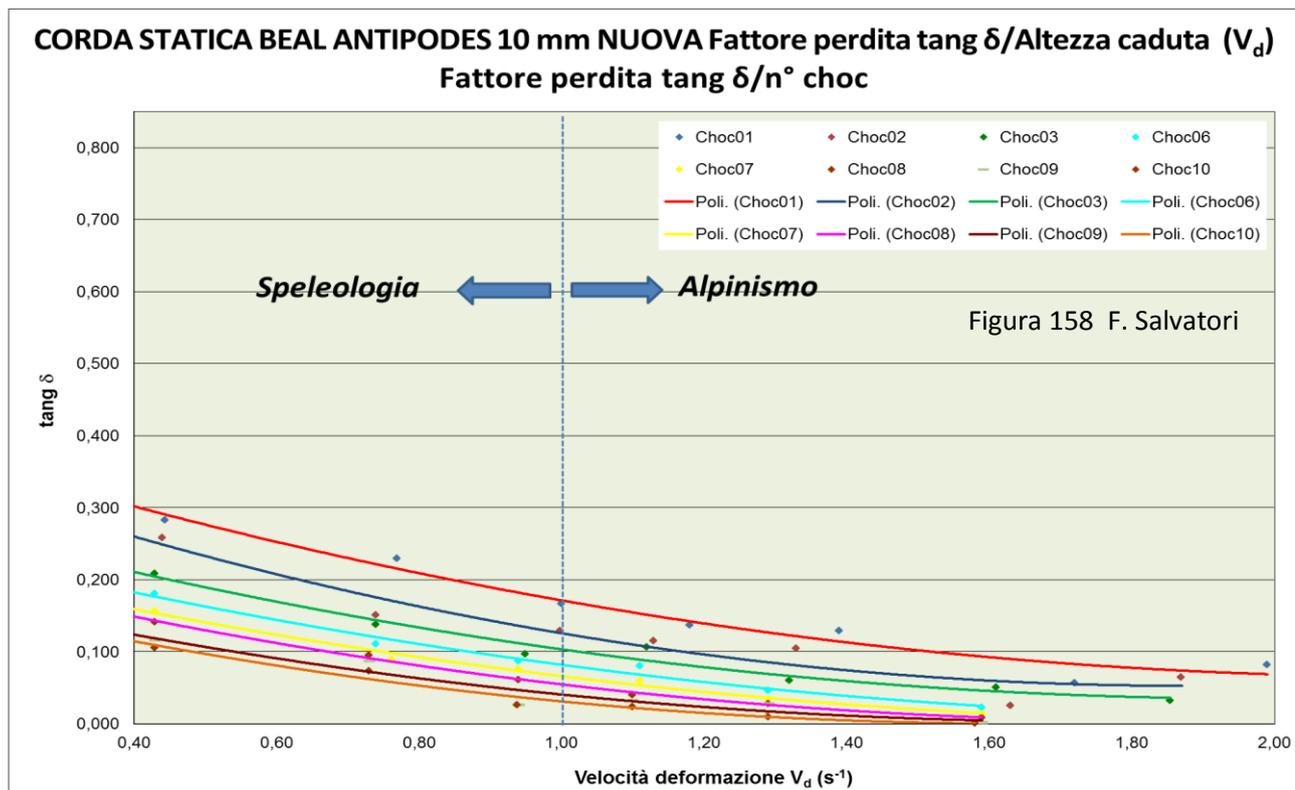
Il comportamento di $\text{tang } \delta$ ci permette di conoscere quali sono i meccanismi a livello molecolare che portano al degrado dei materiali polimerici che costituiscono una corda; e ci porta, indirettamente, a individuare i comportamenti più giusti per il suo utilizzo e conservazione.

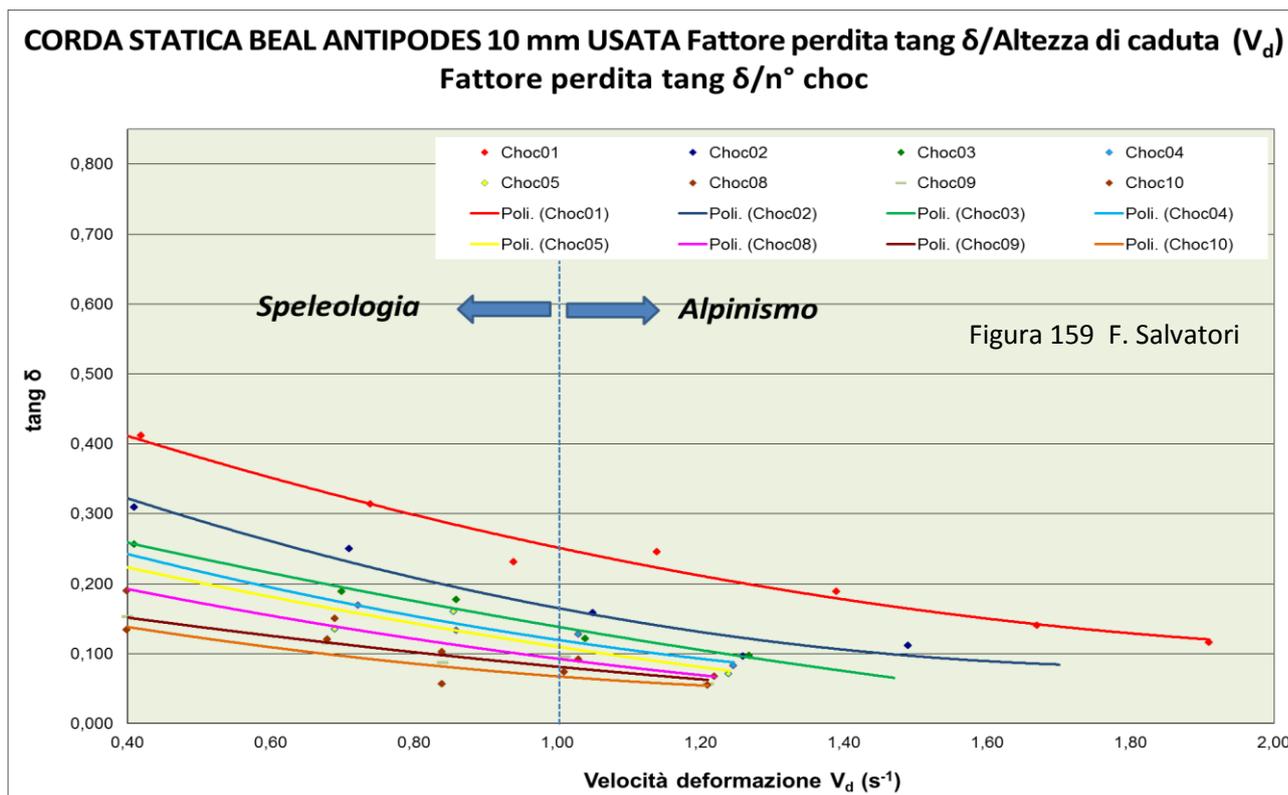
Allo scopo e a titolo dimostrativo, utilizziamo efficacemente i grafici relativi ai test a caduta della Corda statica **Beal Antipodes 10 mm Nylon 6**, nuova e usata, e della Corda statica **Cavalieri Cave Explorer 10, 6 mm Nylon 6.6**, nuova e usata.

Dalle analisi di questi diagrammi risalteranno anche aspetti di fondamentale importanza sul processo complessivo di degradazione dei fili elementari polimerici e sulle differenze date dall'utilizzo del Nylon 6 o del Nylon 6.6.

Utilizzeremo, come al solito, i dati contenuti nelle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06** (pag. 286, **Appendice 03**) con le stesse modalità seguite nei Paragrafi precedenti. E per meglio sottolineare i risultati la **variabile indipendente** è la **Velocità di deformazione** (altezza di caduta del peso).

I grafici sono sovrapponibili per facilitare la messa in evidenza delle differenze nei valori, nell'andamento e nelle dislocazioni (i grafici di **Figura 158** sono gli stessi di **Figura 153** ma con scala delle ordinate diversa).





Il **primo confronto è fra Corda Antipodes Nylon 6 nuova e usata** (Figure 158 – 159), dove risalta con facilità che l'andamento e la dislocazione delle curve $\tan \delta = f(V_d)$ sono uguali, a parte i valori dei ranges iniziale e finali.

In primo luogo, in **entrambe le figure** è chiaro che i test a caduta con 10 choc in successione e altezza di caduta del peso in crescita (H10 cm, H30 cm, H50 cm, H70 cm, H100 cm, H150 cm, H200 cm) portano a una graduale diminuzione di $\tan \delta$, senza brusche variazioni di pendenza e di traslazione verticale. Quindi l' "invecchiamento" da choc sulla visco-elasticità è presente ma il degrado procede con un moderato gradiente.

In secondo luogo, nei grafici di **Figura 159** relativi alla **corda usata** risalta che il range iniziale dei valori di $\tan \delta$ ha valori medi più elevati rispetto a quelli della corda nuova: **0,140 – 0,410** contro **0,120 – 0,300**. Questo vuol dire, come è stato precisato più volte in precedenza, che con l'uso (due anni intensamente in grotta) la corda ha subito un decadimento nella parte visco-elastica della corda, cioè nei fili elementari, tanto che come punto di partenza di $\tan \delta$ si ha il valore di **0,410** anziché **0,300**.

Non è una grande differenza, ma è pur sempre un indice che con l'uso in grotta la corda ha mutato la sua strutturazione delle catene di macromolecole, aumentando l'estensione delle zone amorphe, riducendo quindi la cristallinità e, conseguentemente, le proprietà meccaniche come, ad esempio, il Carico di rottura F_r e la Deformabilità misurata dal Modulo d'elasticità E .

Viene da concludere che la **corda con Nylon 6**, sia per l'usura imposta dai test a caduta che per l'uso in normale attività speleologica, subisce inevitabilmente un degrado, ma di moderata intensità e senza brusche accelerazioni.

In terzo luogo, sia con la corda nuova che usata, le curve $\tan \delta = f(V_d)$, man mano che aumenta la Velocità di deformazione, tendono verso un andamento orizzontale con il range finale che si restringe. Sembrerebbe che, potendo proseguire la successione dei test a caduta, tutte le curve tenderebbero a raggiungere lo stesso livello per poi mantenerlo.

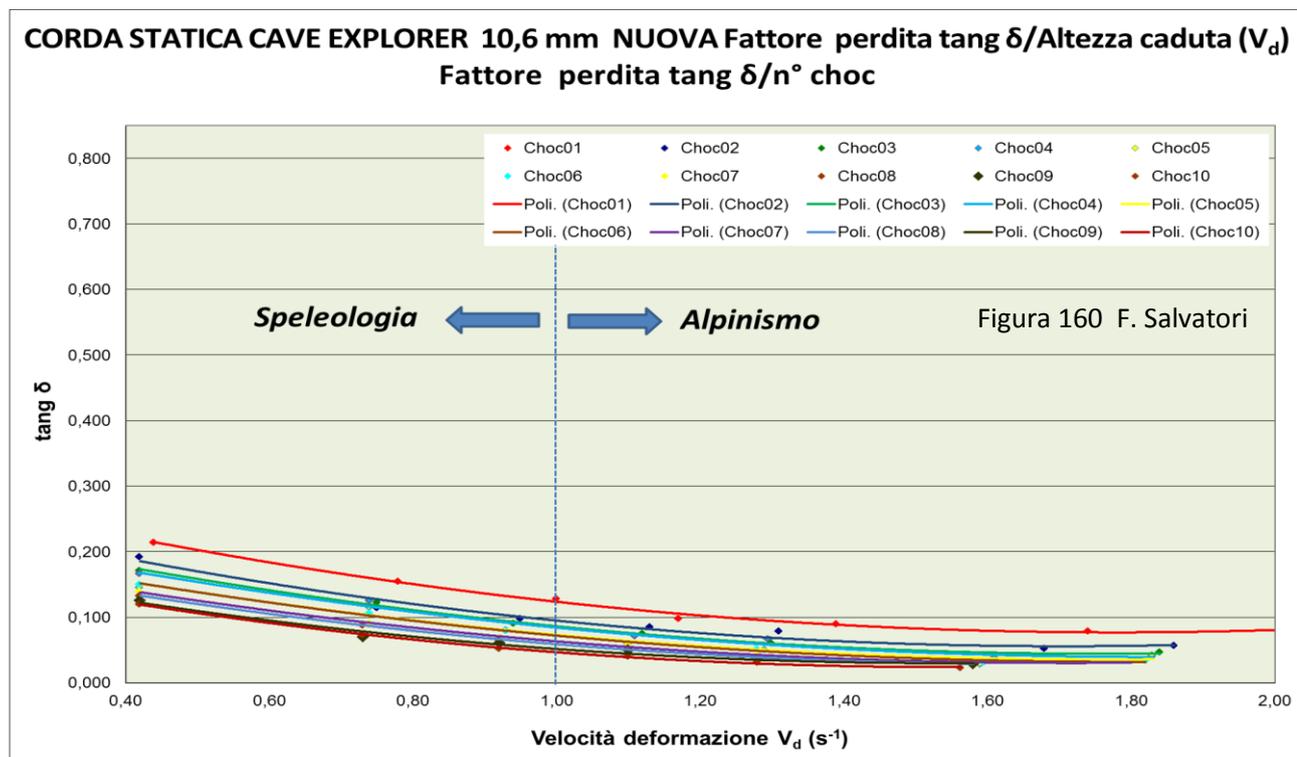
Questo comportamento è maggiormente evidente nei diagrammi della corda nuova, dove addirittura sembra che il livello di base sia quello con $\tan \delta = 0$. Il che vorrebbe dire che, a seguito dei test a caduta, la visco-elasticità è stata completamente eliminata. Teoricamente saremmo nella situazione in cui

tutte le catene di macromolecole nei fili elementari sarebbero distese e allineate una parallela all'altra; saremmo nella fase successiva alla 5° indicata nella **Figura 59** (pag. 69).

Ma a questo punto vorrebbe dire che - essendosi ridotta la capacità di resistere dei fili elementari alla rottura (F_r) in conseguenza della diminuzione della cristallinità dei filati - basterebbe una minima ulteriore sollecitazione per ottenere il loro cedimento.

E questo cedimento nelle curve $\text{tang } \delta = f(V_d)$ si rileverebbe con una flessione molto netta della curva. Ma ovviamente non sarebbe dovuta a una nuova perdita di visco-elasticità seguita a una sua, impossibile, riacquisizione.

Da notare che, in precedenza e in seguito in questo lavoro, ci sono stati accenni di flessioni verso il basso nella parte finale delle curve prese in considerazione. In tal caso sono state fatte delle considerazioni, con il beneficio del dubbio, che potessero essere imputate non a un decremento di deformabilità visco-elastica ma alla rottura di fili elementari. In seguito saranno presentati dei nuovi test che fanno luce su questo problema.



Il **secondo confronto** è fra **Corda Antipodes Nylon 6 nuova** e **Corda Cave Explorer Nylon 6.6 nuova** (Figure 158 – 160), dove si evidenzia solo qualche piccola differenziazione nei ranges iniziali e finali (0,120 – 0,210/0,030 – 0,080 contro 0,140 – 0,300/0,020 – 0,090) e una minore traslazione in verticale delle curve, che quasi tendono a sovrapporsi. Ogni altro aspetto è pressoché coincidente.

Evidentemente, partendo dalla condizione di “nuova”, i fili elementari delle due poliammidi hanno una risposta analoga alla successione di test a caduta: il Nylon 6.6 risponde come il Nylon 6 alle deformazioni visco-elastiche imposte dalle sollecitazioni choc con velocità di deformazione crescente.

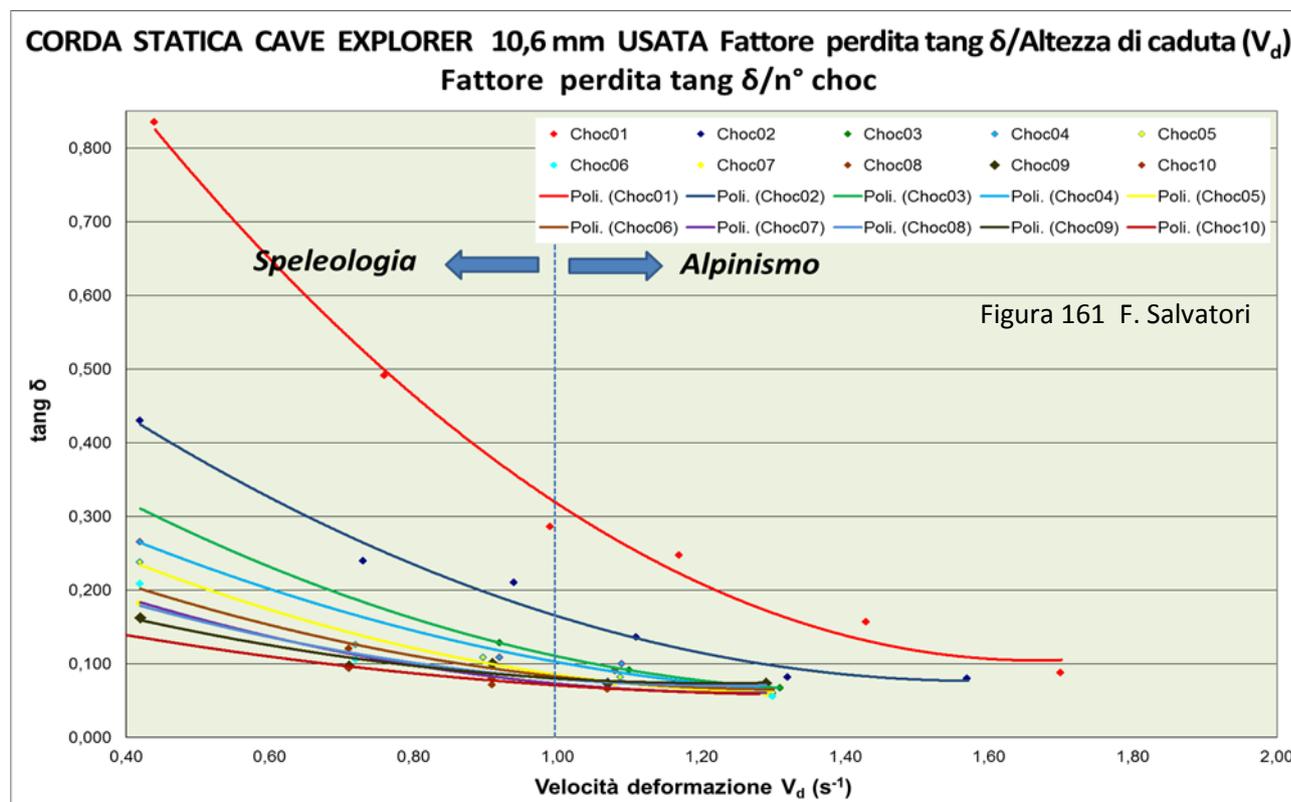
Da non dimenticare tuttavia che si parte da condizioni di cristallinità differenti (75 % contro 50 %) e il processo di decadimento non progredisce, dunque, con gli stessi valori assoluti di $\text{tang } \delta$.

Il **terzo confronto** è fra **Corda Cave Explorer Nylon 6.6 nuova e usata** (Figure 160 – 161), con il quale si mostrano con grande risalto alcune nette differenze di comportamento al succedersi degli choc.

Come prima evidenza, la più macroscopica e significativa, risalta la differenza nei ranges iniziali dei valori di $\text{tang } \delta$: 0,120 – 0,210 per la corda nuova e 0,140 – 0,840 per l'usata. Il risultato sperimentale, chiaro e di grande importanza, rileva la diversa risposta alle sollecitazioni del Nylon 6 e del Nylon 6.6: quest'ultimo polimero, nella sua parte visco-elastica, dopo un uso prolungato nell'ambiente sotterraneo, acquisisce una

grande deformabilità e quindi, specie con sollecitazioni a più basso contenuto energetico (primi choc e con velocità di deformazione bassa, settore dinamica "Speleologia"), perde rapidamente la capacità di deformarsi ancora.

In questo si distingue dal Nylon 6, il quale, invece, subisce con l'uso in grotta delle trasformazioni che favoriscono meno (più o meno riducendole alla metà) la deformabilità irreversibile del polimero.



E' facilmente ipotizzabile che questa differenziazione sia dovuta all'originaria differenza di cristallinità fra le due poliammidi (75 % contro 50 %): nel Nylon 6.6, come è stato mostrato più volte in precedenza in questo lavoro, l'azione degradatrice dell'ambiente "grotta" e del tipo di progressione speleologica produce una marcata trasformazione delle parti cristalline in amorfie, con forte diminuzione del grado di cristallinità.

Questo decadimento per usura, sempre nella parte visco-elastica della corda (cioè nei fili elementari), fa sì che al primo riscontro con i primi test sulla corda usata sia disponibile una maggiore deformabilità legata alla maggiore estensione delle zone amorfie.

Essendo necessaria una minore quantità d'energia per produrre deformazioni nei settori amorfie, sono sufficienti anche sollecitazioni modeste per ottenere grandi perdite di capacità d'assorbire energia, segnalate da marcati abbassamenti del valore del Fattore di perdita $\tan \delta$. Effetto che nel Nylon 6 è ridotto a circa la metà.

E' questo un segno che indica una maggiore deperibilità dei fili elementari di Nylon 6.6 per effetto dell'uso in grotta delle corde costituite da questo tipo di fibra.

Come seconda evidenza - in questo i grafici di **Figura 161** sono molto efficaci nel mostrarlo - sta il fatto che, con il crescere della Velocità di deformazione V_d l'effetto legato alla maggiore estensione delle parti amorfie viene ridotto perché si manifestano forze d'attrito maggiori contro lo scorrimento dei grovigli delle catene di macromolecole (si tenga presente quanto mostrato dalla sperimentazione sintetizzata nella **Figura 43** a pag. 55, che mostra come la capacità di deformazione di un materiali diminuisce con l'aumentare della velocità con cui si conferisce la sollecitazione).

Come terza evidenza, si può sottolineare e confermare quanto già detto più volte: il progredire dell'azione di decadimento da uso e per il succedersi dei test a caduta porta a diminuire il valore del Fattore di perdita $\tan \delta$ con gradienti differenziati e ad allineare le relative curve su un valore unico.

Questo, nel concreto, vorrebbe rappresentare una corda come un elemento che progressivamente elimina la sua capacità di assorbire energia per deformazioni visco-elastiche, con fili elementari senza più zone amorphe e soggetti solo a deformazioni “elastiche”.

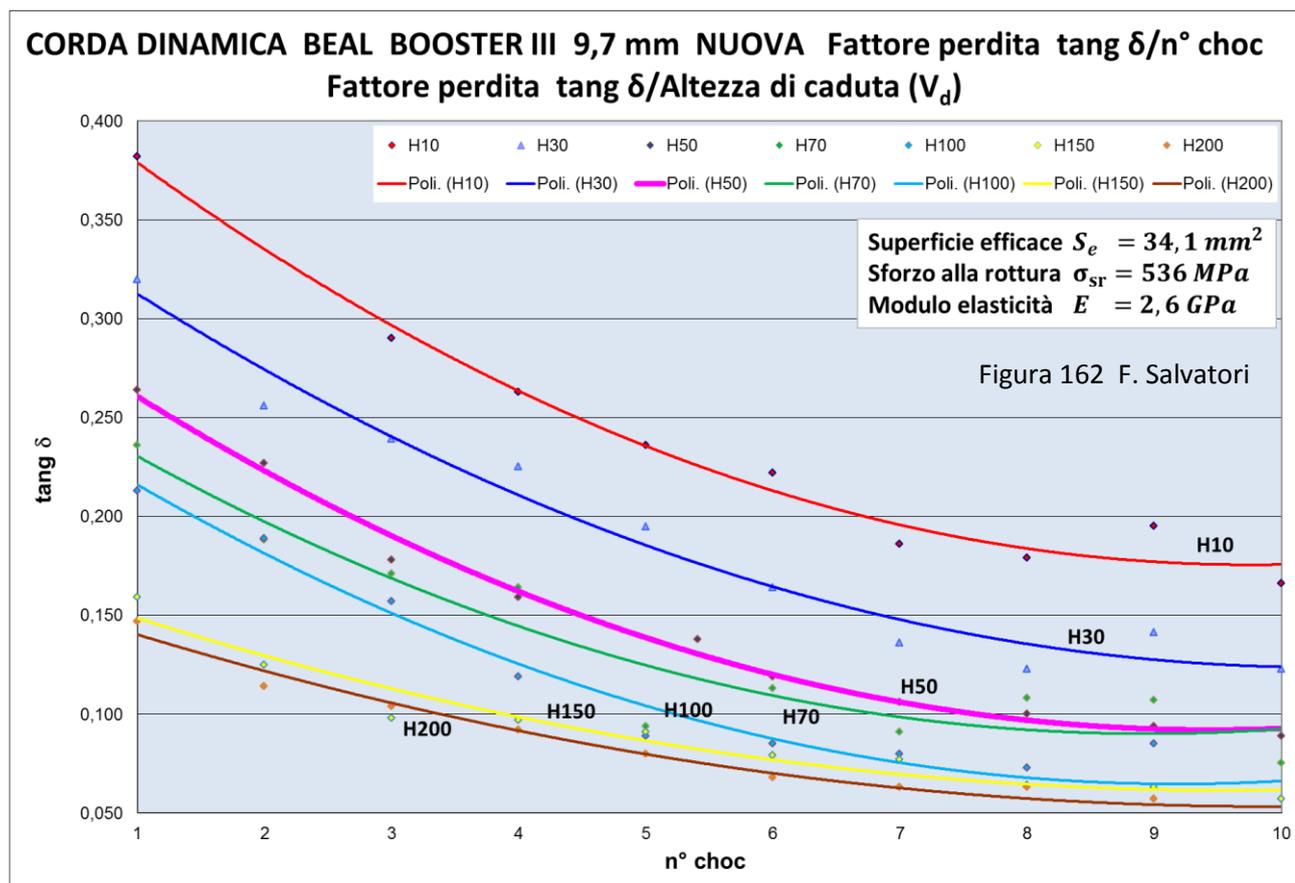
Ma questo risultato finale è puramente teorico, perché i fili elementari con le trasformazioni prima dette diminuiscono anche la loro capacità di resistere alla rottura: è sufficiente incrementarle anche di poco per portare i fili elementari al cedimento. Anche scendendo molto al di sotto del Limite Inferiore di Resistenza imposto ai componenti della Catena di sicurezza per la progressione speleologica.

01.f.h.) Valutazione dei dati sperimentali della Corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6 e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6

Le corde dinamiche, come la **Beal Booster III 9,7 mm**, sono caratterizzate da una deformabilità elevata proprio perché dedicate a sostenere attività come l'alpinismo e l'arrampicata sportiva, dove le sollecitazioni possono essere anche di grande contenuto energetico (Fattore di caduta superiore a uno) e, come nell'arrampicata sportiva, più e più volte ripetute.

Valutiamo ora se i dati qui ricavati per ***tang δ***, relativi quindi alla sola visco-elasticità, ci indicano qual è la situazione e rispondono alla domanda: all'assorbimento dell'energia prodotta dalla caduta del peso, sofferisce la sola visco-elasticità o nelle corde c'è, costituzionalmente, qualche altro fattore?

Ricordiamo che il Fattore di perdita ***tang δ*** è calcolato sulla base dei test a caduta con l'Analisi Dinamica Meccanica e valuta solamente la parte derivante dalla visco-elasticità dei fili elementari, le cui deformazioni sono determinate dal “fattore tempo”.



01.f.h.1.) Confronto corda statica con corda dinamica: solo apparentemente esistono delle differenze nell'andamento e nella dislocazione delle curve del Fattore di Perdita $\tan \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ – Le differenze fra i ranges iniziali e finali dei valori del Fattore di perdita $\tan \delta$ fra Corda dinamica Nylon 6 Booster III (Figura 162) e la Corda statica Nylon 6 Antipodes (pag. 186, Figura 150), entrambe nuove, **non sono tali da indicare, sotto il ripetersi dei test a caduta, una **grande differenza di comportamento**,**

comunque tale da giustificare un raddoppio, e oltre, della capacità di deformazione complessiva; come vedremo nel proseguo trattando delle curve relative all'Allungamento massimo $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$ e $A_0 = f(V_d)$, che non tengono conto della sola visco-elasticità ma anche di qualsiasi altro fattore che permette alla corda di allungarsi (senza condizionare il Tempo di ritardo δ_{tempo}).

Infatti sia l'andamento delle curve $tang \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ che la loro dislocazione sono quasi coincidenti: si discostano di poco quelli della corda Beal Antipodes 10 mm statica da quelli della corda Beal Booster III 9,7 mm dinamica. Lo confermano i ranges nei valori iniziali e finali del Fattore di perdita:

per la corda Nylon 6 dinamica	iniziale	0,140 – 0,380	finale	0,050 – 0,165
per la corda Nylon 6 statica	iniziale	0,080 – 0,280	finale	0,020 – 0,100

La differenza fra dinamica e statica per $tang \delta$ di 0,100 circa nei test a più basso contenuto energetico ($n^\circ \text{ choc } 01$) è in parte dovuta al margine d'errore che la metodologia sperimentata comporta.

Ma l'incremento del Fattore di perdita che si registra nei test della corda dinamica, rispetto alla statica, è di entità tale da non poter essere giustificato solamente dalle oscillazioni dell'errore strumentale; ne è dovuto a proprietà viscosive diverse, visto che in entrambi i casi si tratta di fibre di Nylon 6.

E infatti il motivo di tali incrementi va ricercato nella differenza fra le **Superfici efficaci** della **statica** e della **dinamica**, rispettivamente uguali a **48,8 mm²** e **34,1 mm²**, cioè il 30 % in meno di materiale polimerico che si oppone agli allungamenti attraverso la visco-elasticità.

Se la corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm nuova avesse tanto materiale polimerico nei fili elementari quanti ne ha la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova (come a dire la stessa Superficie efficace S_e) le curve della **Figura 150** (pag. 186) coinciderebbero per andamento e dislocazione con quelle della soprastante **Figura 162**.

Ripetiamo: quest'ultima conclusione vale per ogni curva in cui la variabile dipendente sia un fattore di degrado legato al Ritardo δ_{tempo} , cioè dalla visco-elasticità.

01.f.h.2.) Confronto corda statica con corda dinamica: nelle curve $tang \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ della corda dinamica non è presente la parte finale con gradiente negativo accentuato – Confrontando le curve di **Figura 150** (pag. 186, Beal Antipodes 10 mm nuova) con quelle di **Figura 162** (pag. 202, corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm nuova) risalta su quest'ultime la mancanza della curvatura accentuata finale.

Si ricorda che tale curvatura accentuata delle curve della corda statica è dovuta alla grande quantità d'energia messa in gioco con la serie finale di choc (test a caduta con la massima altezza H150 e H200, su campioni che hanno già subito 8 choc) che produce tre diversi meccanismi:

1. aumento del Modulo conservativo E' a seguito dello straordinario allungamento delle catene di macromolecole, con rettificazione, affiancamento e creazione di legami idrogeno intermolecolare che portano ad un aumento della parte cristallina dei fili elementari (pag. 182, **Relazione H**);
2. cedimento e/o incisione di qualche filo elementare, che porta, di fatto, a una diminuzione della Superficie efficace S_e .

Nella corda dinamica la Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC) (pag. 314 e seg., **Figure N-O**) svolge un ruolo molto rilevante nell'assorbire energia e abbassare il contenuto energetico portato dai test a caduta. Questo comporta che i test a caduta finali sulla corda dinamica non abbiano l'energia sufficiente per determinare i meccanismi sopraelencati, responsabili dell'accentuazione della decrescita delle curve di Figura 150.

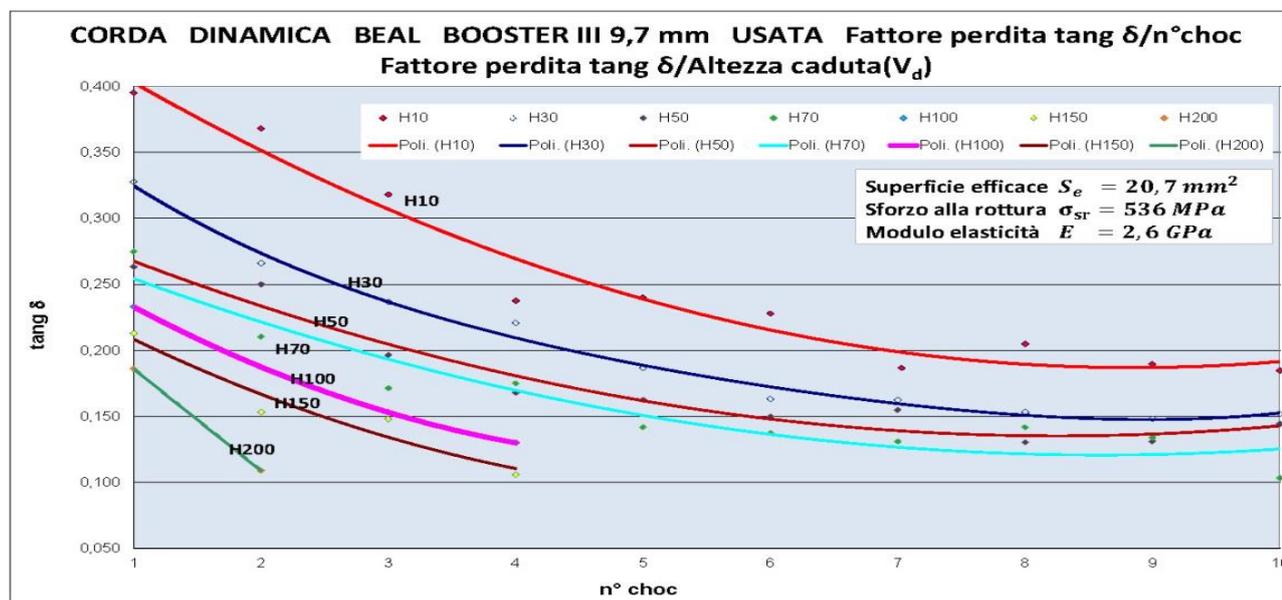
Le corde dinamiche, attraverso la CSCC mettono in atto un sistema "dissipatore" d'energia che le protegge da un degrado eccessivo della visco-elasticità per l'applicazione rapida di carichi rilevanti.

01.f.i.) Valutazione e confronto dei dati della Corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6, nuova e usata

Anche in questo caso le valutazioni dei dati per il Fattore di perdita dovrebbero essere coincidenti, visto che i fili elementari sono sempre di Nylon 6 e che il fattore aggiuntivo di deformabilità - la CSCC - è identico. Ma

questo non corrisponde con la realtà sperimentale. I dati infatti sono:

per la corda Nylon 6 dinamica nuova	iniziale 0,140 – 0,380	finale 0,050 – 0,165
per la corda Nylon 6 dinamica usata	iniziale 0,185 – 0,410	finale 0,110 – 0,185



Normalmente, abbiamo sempre registrato che l'uso in grotta, su ogni tipo di corda, fa aumentare, anche in maniera marcata, il Fattore di perdita (nei precedenti paragrafi vi è sempre la conferma di questa conclusione sperimentale).

Anche in questo caso, con una **corda dinamica** utilizzata solamente in **arrampicata sportiva** (pareti naturali e artificiali, all'esterno e all'interno, per oltre tre anni, intensamente), questo comportamento si conferma: la corda usata Booster III 9,7 mm (pag. 205, **Figura 163**) ha valori di $\tan \delta$ superiori della omologa corda nuova (pag. 202, **Figura 162**). Infatti, a parità di altezza di caduta, le curve $\tan \delta = f(n^{\circ} \text{ choc})$ della corda usata sono tutte soprastanti alle corrispondenti curve della corda nuova.

L'incremento di $\tan \delta$ è dunque abbastanza contenuto, **dell'ordine del 5 %**, mentre l'incremento del Fattore di perdita nella corda **statica Beal Antipodes 10 mm usata** (due anni in grotta, intensamente) rispetto all'analoga corda **Beal Antipodes nuova** è mediamente **pari al 43 %**.

E' pertanto indiscutibile che l'uso speleologico produce un degrado nettamente superiore rispetto al danno che l'usura in arrampicata sportiva conferisce in una corda dinamica: 5 % contro 43 %.

La spiegazione di questo comportamento è da ricercare nella grande diversità del modo d'utilizzo. In grotta la corda subisce l'incisiva azione di molteplici agenti degradanti portati dal contatto con l'acqua, dalla produzione di calore per attrito nelle discese, dalla ripetizione a fatica di sollecitazioni durante la progressione in risalita e di altri fattori minori, con forte diminuzione della cristallinità e, a catena, dell'estensione dei settori amorfi e dell'aumento della parte viscosa e del Modulo E'' (pag. 61 e seg., **Parte III**).

Nell'arrampicata sportiva il degrado della corda è legato agli choc dopo la perdita delle prese e al calore generato dai freni durante le calate (nell'alpinismo l'usura è ancora più ridotta, visto che le sollecitazioni per caduta sono o inesistenti o del tutto occasionali e le uniche occasioni di decadimento per produzione di calore sono le discese in corda doppia quando si decide di utilizzare la corda come via di progressione per il ritorno).

01.g Valutazione del contributo dissipativo del calore % Calore prodotto dagli attriti negli allungamenti differenziati fra i componenti della struttura complessa della corda in funzione del Numero di choc $n^{\circ} \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione V_d

01.g.a.) Premessa - In questo sotto-capitolo si analizza il modo con cui il **calore prodotto dagli attriti** all'interno della corda contribuisce a dissipare l'energia dovuta alla caduta del peso; infatti i vari componenti della corda si allungano in maniera differenziata producendo fra di loro attriti.

L'esame, anche quantitativo, dei grafici come, ad esempio, quelli di **Figura 37** (pag. 45) sono alla base delle considerazioni che qui vengono svolte.

Il metodo è quello che utilizza l'integrazione grafica delle curve $F = f(A)$.

Questo tipo d'analisi è possibile solo se la caduta del peso non ha prodotto la rottura del campione di corda.

In precedenza si è fatto più volte riferimento alle quattro forme attraverso le quali si dissipa l'energia conferita dall'applicazione del carico:

1. deformazioni visco-elastiche (dettagliatamente esaminate nei paragrafi soprastanti),
2. CSCC (Compattazione Struttura Complesso della Corda)
3. lavoro a rottura dei fili elementari (sommariamente e parzialmente valutato in alcuni paragrafi precedenti),
4. calore prodotto dagli attriti fra gli elementi che compongono una corda durante una sollecitazione.

In questo sotto-capitolo viene preso in esame, separatamente, il fattore **calore**, la quarta forma di dissipazione elencata; le altre due, mancanti di un'analisi adeguata, sono oggetto di valutazione nei paragrafi che seguono. L'elaborazione dei dati segue quanto indicato nella **Parte II** (pagg. 51 – 52).

Questa del Calore è una forma irreversibile che si disperde nell'ambiente e non è in alcun modo recuperabile (non essendo "energia libera"); contribuisce all'aumento dell'Entropia.

01.g.b.) Metodo di calcolo - Quest'ultima forma d'energia dissipativa si calcola attraverso la relazione:

$$\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico} = \Delta L_{attrito} \quad (24)$$

con $\Delta L_{caduta+allungamento}$ che è l'energia totale prodotta dalla caduta del peso e si misura utilizzando il principio espresso dall'energia potenziale (totalmente consumata al momento dell'arresto del peso):

$$E_{potenziale} = P \cdot (h + A_0) \quad (25)$$

dove:

P = peso (kgp)

h = altezza caduta libera del peso (m)

A_0 = Allungamento massimo (m)

Come in tutti i grafici precedenti, i dati sono ricavati dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06 Appendice 03** (pag. 286 e seg.).

Le modalità con le quali sono costruiti i grafici $\% \text{ Calore} = f(n^\circ \text{ choc})$ contenuti nelle figure che seguono sono le stesse già precisate per la composizione dei diagrammi presentati più volte nei paragrafi precedenti.

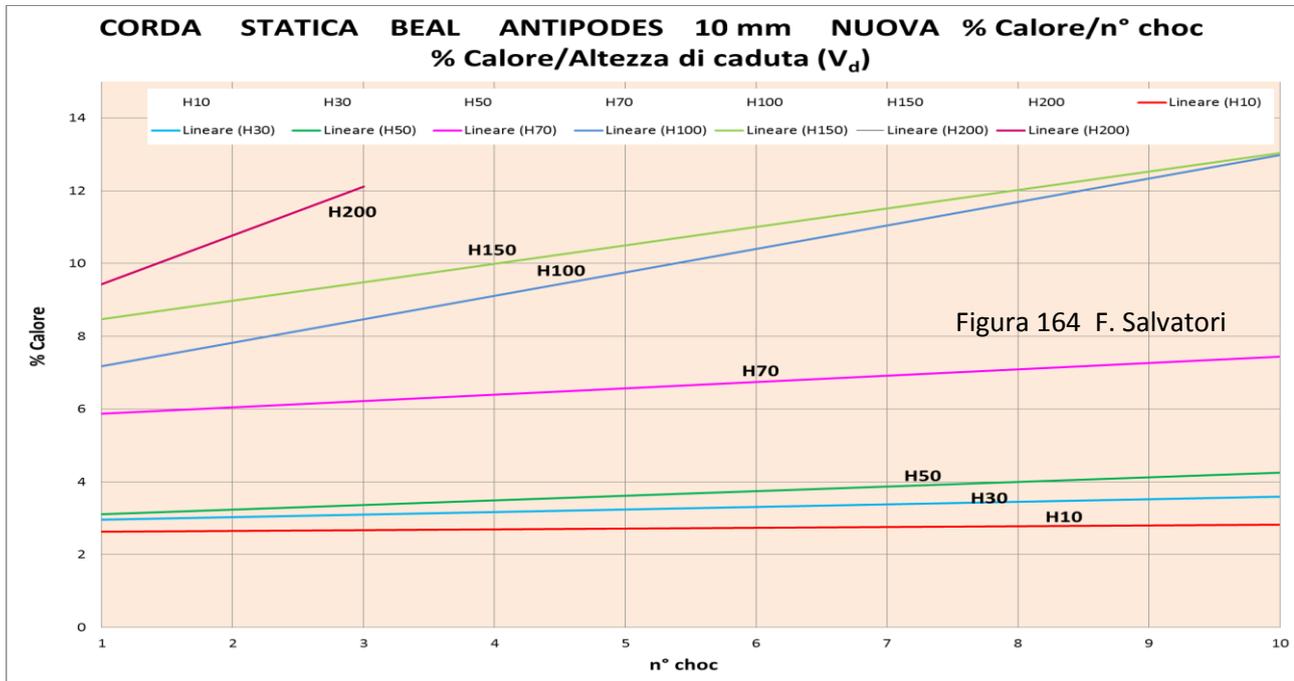
Per $\% \text{ Calore}$ s'intende la **percentuale** di lavoro (energia) dissipato sotto forma di calore (prodotto dagli attriti fra i componenti della corda a seguito dell'allungamento del campione di corda sotto la caduta del peso) rispetto alla **quantità di lavoro totale messo in gioco** ed espresso dalla **Relazione 25**.

Anche in questo caso l'andamento e la dislocazione uniforme delle varie curve $\% \text{ Calore} = f(n^\circ \text{ choc})$, al variare del n° degli choc e dell'altezza di caduta del peso, denota la validità della sperimentazione e delle considerazioni che ne scaturiscono.

Il numero di dati che costruisce ogni singola curva è limitato e, quindi, non permette analisi estremamente dettagliate. Ciò nonostante è possibile dedurre considerazioni di grande rilievo sulla quantità e la forma con cui gli attriti contribuiscono a dissipare l'energia prodotta dalla caduta del peso.

01.g.c.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova (Nylon 6)

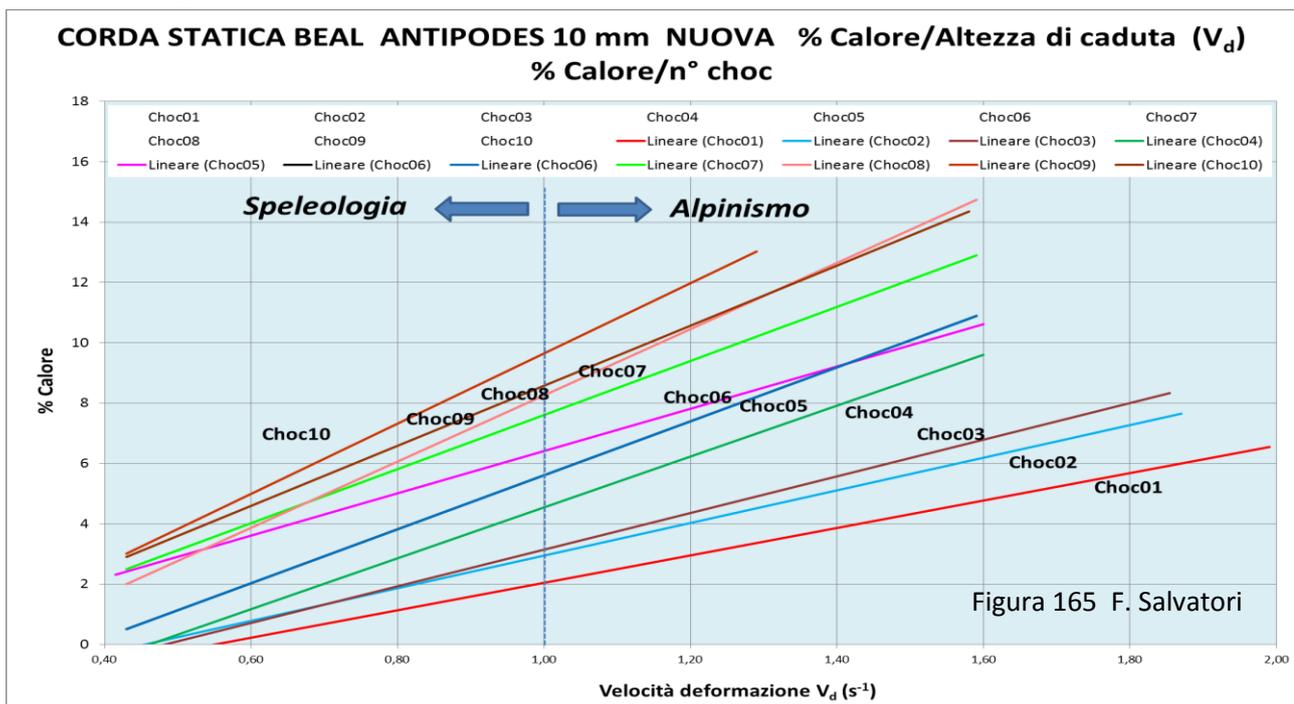
Nella **Figura 164** ci si riferisce alle Corda statica Beal Antipodes 10 mm **nuova**, dove si valutano, nei modi consueti, le variazioni di **% Calore** sia in funzione di n° choc che dell'altezza di caduta del peso.



01.g.c.1.) Prima considerazione: il contributo degli attriti alla dissipazione dell'energia in funzione del n° di choc subiti e dell'altezza di caduta del peso (V_d) - In funzione del n° degli choc, con velocità di deformazioni minime (H10 cm – H 30 cm – H50 cm), la **crescita della percentuale** è appena percettibile, e si aggira intorno al 3,0 %: un contributo praticamente trascurabile.

L'incremento della percentuale è invece più marcato con le altezze di caduta più accentuate (H100 cm – H150 cm – H200 cm), quando arriva al 10 %.

Con l'aumento dell'altezza di caduta del peso le forze d'attrito che si oppongono agli allungamenti crescono, con gradiente in accentuazione.



Per meglio rilevare il variare di **% Calore** in dipendenza della Velocità di deformazione V_d si osservi la **Figura 165** : è evidente, ed era verosimile ipotizzarlo, che gli incrementi prodotti dal variabile di V_d , rispetto a quelli legati all'aumento del **n° degli choc**, hanno una maggiore incisività sull'aumento della percentuale d'energia dissipata per calore.

Inoltre, nella stessa figura è messo in evidenza che le sollecitazioni tipiche della progressione speleologica (Fattore di caduta $F_c < 1$) hanno un'incidenza ridotta nella produzione di calore rispetto a quelle tipiche dell'alpinismo e, soprattutto, dell'arrampicata sportiva.

Questa constatazione deve essere valutata, per meglio comprendere gli effetti del calore sul decadimento delle corde, anche alla luce di quanto rilevato per le variazioni cicliche di temperatura come indicato nelle **Figure 84 - 85** (pagg. 101 – 102): il succedersi di variazioni di temperatura portano ad una progressiva diminuzione di cristallinità delle poliammidi, che di conseguenza diminuiscono le loro proprietà meccaniche.

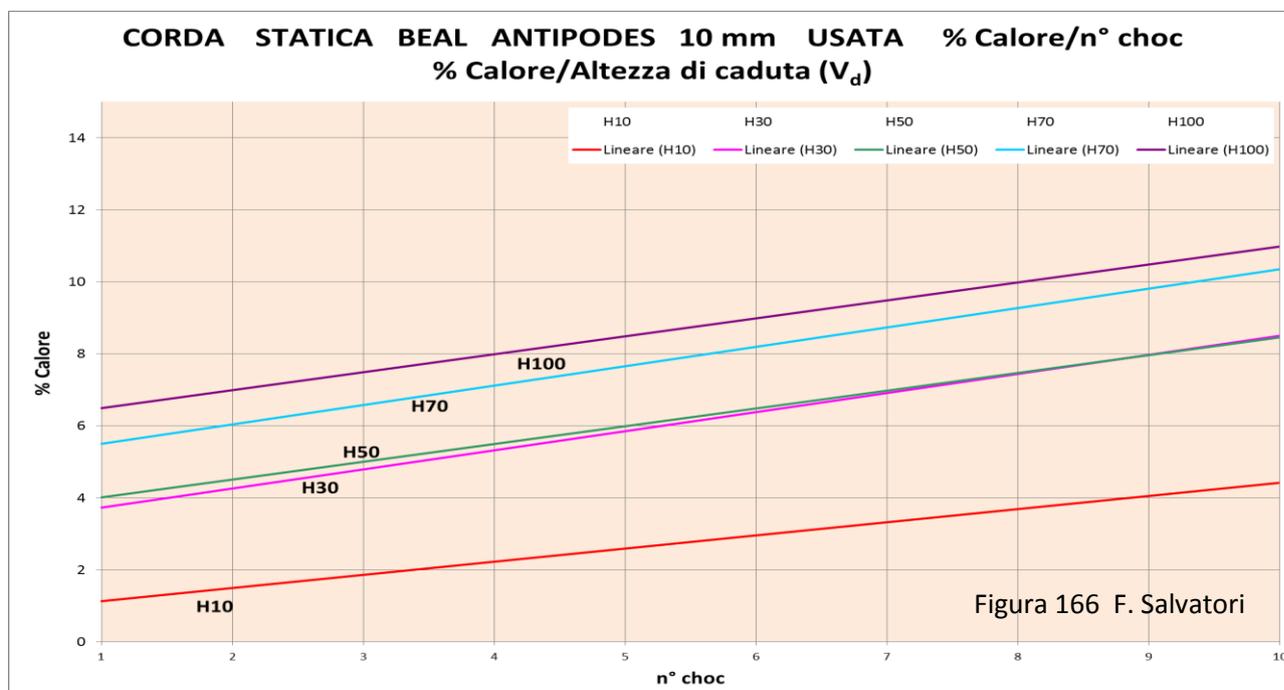
Quindi il succedersi degli choc è un fattore di degradazione delle corde per effetto del calore, che si va ad aggiungere all'effetto usurante legato alle deformazioni permanenti proprie delle deformazioni visco-elastiche e della CSCC.

Da tenere presente infine che il succedersi di "sollecitazioni a caduta" tipo "progressione speleo", comprese quelle prodotte nella risalita su corda, sono di entità minima e quindi poco efficaci. Mentre quelle di tipo "Alpinismo" sono di maggior contenuto energetico e pertanto più degradanti.

Per contro le sollecitazioni "Speleologia" sono molto numerose, mentre quelle "Alpinismo" solo occasionali. Molti incrementi minimi che si sommano eguagliano l'efficacia di pochi choc a caduta di grande intensità energetica.

Con l'**arrampicata sportiva** siamo nel caso di avere molte sollecitazioni e di rilevante contenuto energetico; e molto usuranti. Le corde usate in questo tipo di attività subiscono, infatti, un rapido deterioramento: si veda paragrafo successivo relativo alla Corda dinamica Beal Booster III (pag. 209, **Figura 168**).

01.g.d.) Confronto fra la Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6), nuova e usata



Sempre in funzione del n° degli choc, a Velocità di deformazione crescente, nella **Figura 166** sono riportati i grafici delle curve (di tendenza lineare) per la Corda statica Beal Antipodes 10 mm **usata**.

In quest'ultimo tipo di corda la dissipazione d'energia potenziale sotto forma di calore diminuisce d'entità, tanto che i ranges iniziali e finali di **% Calore** risultano:

per la corda Nylon 6 statica nuova	iniziale	3 – 9	finale	3 – 13
per la corda Nylon 6 statica usata	iniziale	1 – 6,5	finale	3 – 11

Senza alcun dubbio la Corda statica Beal Antipodes 10 mm **usata** ha una minore disponibilità a dissipare energia sotto forma di calore: le sollecitazioni subite durante l'uso in grotta hanno ridotto la visco-elasticità e la possibilità di CSCC e di conseguenza sono possibili allungamenti di misura ridotta, con minori attriti.

01.g.e.) Confronto fra la Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) e Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm (Nylon 6.6), entrambe nuove

La differenza sostanziale fra le due corde sta nel tipo di poliammide che costituisce i fili elementari: Nylon 6 nella prima e Nylon 6.6 nella seconda.

Le differenti proprietà meccaniche sono contenute nelle tabelle:

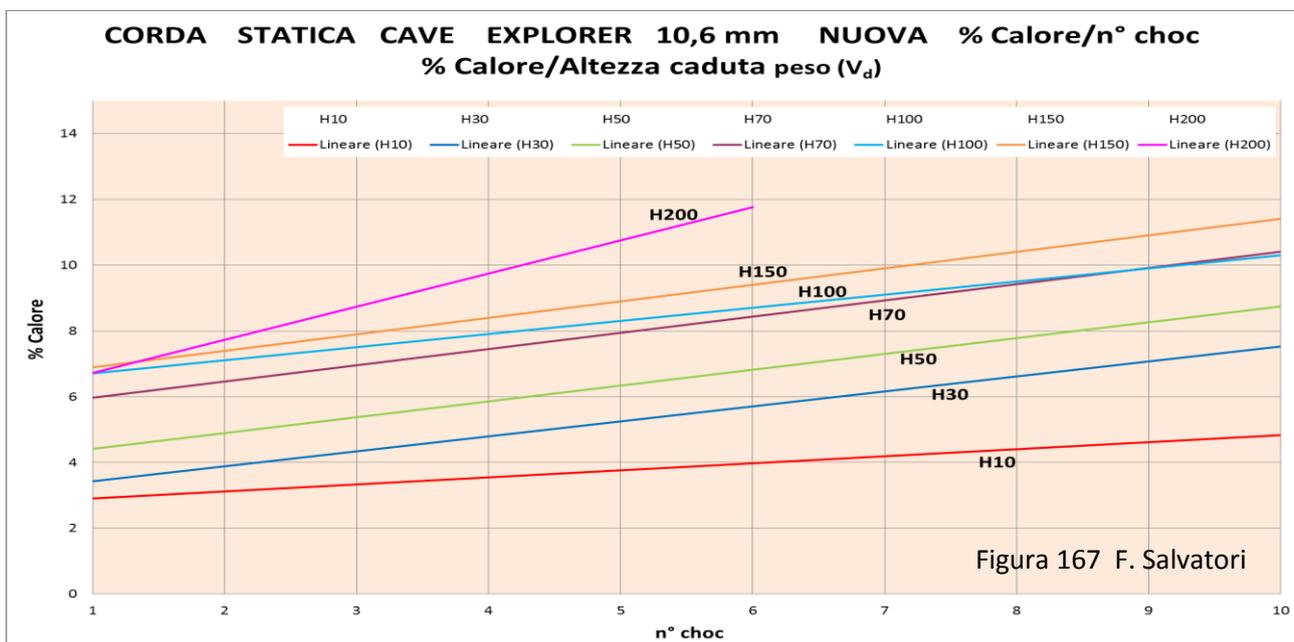
Poliammide Nylon 6.6			Poliammide Nylon 6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14		Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	265		Punto di fusione (°C)	218	
Tenacità (N/Tex)	0,64		Tenacità (N/Tex)	0,47	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	900	strength	Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	536	strength
Allungamento alla rottura (%)	16		Allungamento alla rottura (%)	26	
Modulo E (Gpa)	8,0		Modulo E (Gpa)	2,6	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	80		Lavoro alla rottura (mN/Tex)	76	

Le proprietà termiche sono:

Poliammide Nylon 6		Poliammide Nylon 6.6	
Conduttività termica W/(K · m)	0,25	Conduttività termica W/(K · m)	0,30
Capacità termica J/(g · K)	1,7	Capacità termica J/(g · K)	1,6

Confrontando i grafici di **Figura 167** (Nylon 6.6) con quelli di **Figura 164** (Nylon 6) le differenze sono modeste:

1. maggiore "effetto calore" per attrito nella corda con fili elementari di Nylon 6,
2. nella corda con fili elementari di Nylon 6.6, con sollecitazioni a basso contenuto energetico, gradiente di crescita di **%calore** più elevato.



Il primo punto si spiega con la differenza nel Modulo d'elasticità, **2,6 GPa per il Nylon 6** contro **8,0 GPa del Nylon 6,6**: avendo il primo polimero una maggiore possibilità di deformarsi, gli attriti che ne derivano sono più consistenti.

Il secondo punto, poco rilevante, è verosimilmente dovuto al diverso intreccio dei fili elementari sia nella calza sia nei trefoli (ma l'ipotesi, per ora, è difficilmente confermabile, sia sperimentalmente che in teoria).

Comunque, non sembra che fra Nylon 6 e Nylon 6.6 ci sia una significativa diversa capacità di produrre dissipazione d'energia attraverso gli attriti.

01.g.f.) Confronto fra la Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) e Corda dinamica Beal Booster 9,7 mm (Nylon 6), entrambe nuove

Sappiamo che la capacità aggiuntiva di deformarsi della corda dinamica dipende dal tipo d'intreccio fra calza e trefoli e dalla tensione con cui la corda stessa viene confezionata (pag. 327 e seg., Figure N-O).

Pertanto la corda dinamica possiede (in piccola parte anche le statiche), oltre le possibilità deformative della statica dovute alla visco-elasticità, anche una rilevante ulteriore capacità d'assorbire energia attraverso la Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC), che si manifesta longitudinalmente e in compressione tangenziale.

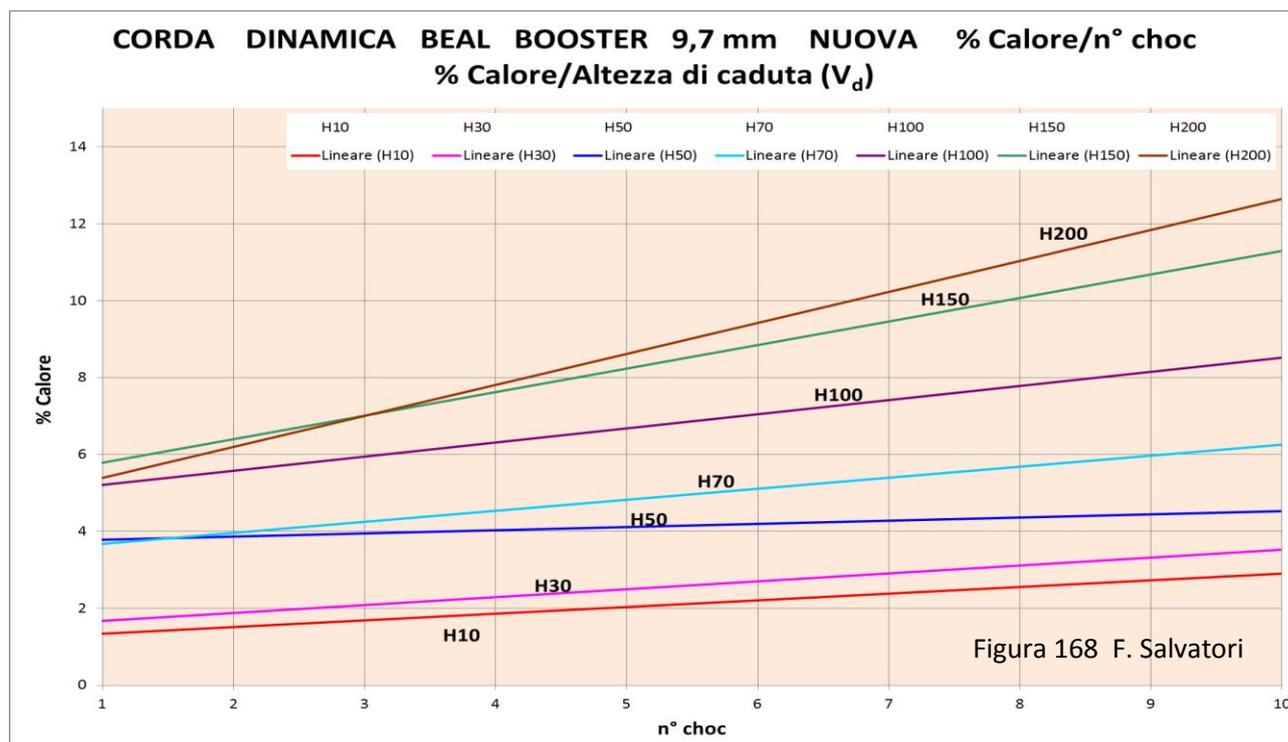
Questa grande attitudine della corda dinamica a deformarsi sotto sollecitazione fa sì che il contributo dato negli allungamenti dagli attriti producenti calore sia proporzionalmente più rilevante.

Per contro la corda statica trazionata, a parità di condizioni di sollecitazione, produce un minore allungamento e quindi forze di attrito ridotte fra gli elementi della struttura complessa che vi si oppongono.

Ma confrontando la **Figura 168**, relativa alle curve $\% \text{ Calore} = f(n^\circ \text{ choc})$ della Corda **dinamica** Beal Booster III nuova, $\% \text{ Calore}$ mostra valori molto ridotti rispetto a quelli della corda statica Beal Antipodes (pag. 206, **Figura 164**): poco più delle metà.

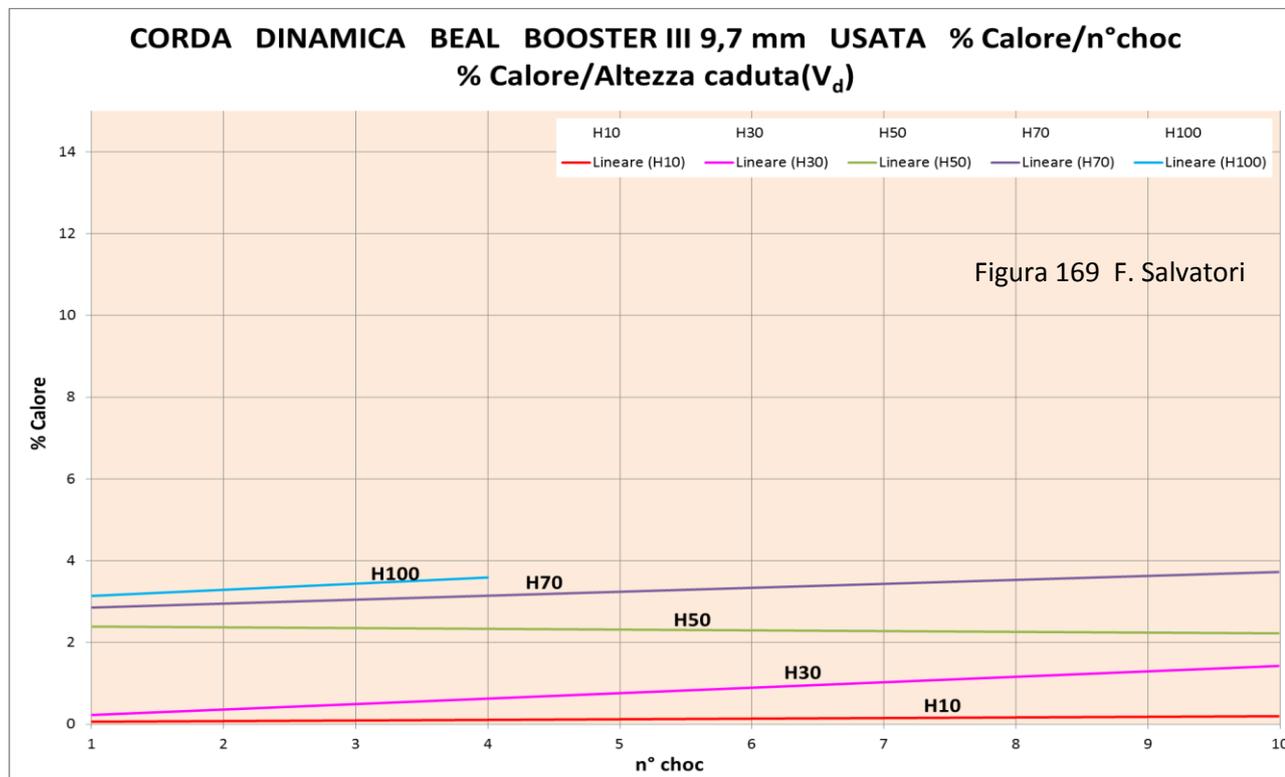
Questa netta differenza di risultati sperimentali per $\% \text{ Calore}$ è verosimilmente legata a due fattori:

1. nella corda dinamica la **Superficie efficace** è pari a **34,1 mm²** contro **48,8 mm²** della statica, quindi con il 30 % in meno di materiale che produce attriti;
2. la **pressione fra componenti** nella dinamica, per il confezionamento "rilassato" conferito, è ridotta rispetto alla pressione impartita fra i componenti della statica.



E' una conferma di quanto detto il fatto che i grafici di **Figura 169**, relativi alla stessa corda dinamica, **ma usata** (oltre tre anni in arrampicata sportiva), hanno andamenti **con valori prossimi allo zero**; e non aumentano al susseguirsi degli choc, risentendo poco del crescere della Velocità di deformazione.

Infatti l'usura subita con il succedersi di numerosissimi choc per le cadute sopportate ha ridotto le capacità deformative della corda e, di conseguenza, l'entità degli allungamenti e, quindi, degli attriti.



Con ciò, ancora una volta, si mostra il limite delle corde dinamiche per alpinismo, le quali, se usate nell'arrampicata sportiva dove gli choc ad alto contenuto energetico sono numerosi, perdono gran parte della loro "qualità speciale" di assorbire l'energia di una caduta tipo "alpinismo".

Se poi supponiamo che una **corda dinamica venga usata in grotta** - subendo quindi la profonda degradazione prodotta dalle discese con discensore e dal contatto con l'acqua - l'usura diverrebbe **così marcata e incisiva** da renderle inaffidabili e insicure dopo poco tempo d'uso.

In sintesi "l'effetto calore" nella dissipazione dell'energia prodotta dalla caduta del peso dà un contributo che può essere anche rilevante, raggiungendo **anche il 13 %** con choc ad alto contenuto energetico (n° massimo di choc e più elevate altezze di caduta).

Nel caso di **Figura 169** (corda dinamica usata) e solo con choc a basso contenuto energetico (primi choc e altezze di caduta del peso inferiori) si hanno apporti praticamente nulli.

01.h) Valutazione della Percentuale d'energia dissipata % Dissipazione in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d

01.h.a.) Premessa - Facendo sempre riferimento a quanto definito nel precedente **Paragrafo a** e nei **Paragrafi b - c (Parte V Capitolo 01)** sulle quattro possibili forme di dissipazione d'energia:

1. deformazioni visco-elastiche (dettagliatamente esaminate nei paragrafi precedenti),
2. calore prodotto dagli attriti fra gli elementi che compongono una corda (già definito e descritto),
3. CSCC,
4. lavoro a rottura dei fili elementari (sommariamente e parzialmente valutato in alcuni paragrafi precedenti),

valutiamo ora la percentuale % **Dissipazione** dell'energia assorbita dalla corda in **modo irreversibile** con la sua deformazione/allungamento, in rapporto percentuale con l'energia/lavoro che è stata necessaria per produrre, con la caduta del peso, il massimo allungamento A_0 .

Si ricorda, come specificato nel precedente **Punto 01.g** (pag. 205), che in quest'analisi della % **Dissipazione** **non vengono fatte distinzioni** fra le deformazioni legate:

1. alla natura visco-elastica dei fili elementari (valutabile separatamente con il Fattore di perdita **tang δ**),
2. alla CSCC (valutabili solo per differenza),
3. alla rottura di alcuni fili elementari (valutabile con la diminuzione della Sezione efficace della corda S_e).

Il calcolo delle energie in gioco è misurato con l'integrazione grafica delle curve d'isteresi $F = f(A)$, indicate, come esempio, nella **Figura 37** (pag. 45):

1. **Superficie di carico** (ΔL_{carico} energia reversibile + irreversibile)
2. **Superficie di scarico** (energia reversibile),
3. **Superficie di plasticità** ($\Delta L_{dissipazione}$ energia irreversibile dissipata con deformazioni permanenti visco-elastiche, con la CSCC, con il lavoro alla rottura dei fili elementari).

% **Dissipazione** è il rapporto percentuale fra Superficie di plasticità $\Delta L_{dissipazione}$ e Superficie di carico:

$$\% \text{ Dissipazione} = \left(\Delta L_{dissipazione} / \Delta L_{carico} \right) \cdot 100 \quad (26)$$

Anche in questo caso i dati sono ricavati dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06 Appendice 03**.

Importante: in quest'analisi si prendono in considerazione tutti gli effetti dissipativi conglobati, senza distinzione, ma escludendo il fattore dissipazione per attriti/calore.

Il fattore legato alla CSCC - molto rilevante in termini percentuali - si può definire sottraendo alla % **Dissipazione** l'effetto Fattore di perdita **tang δ** dovuto alla visco-elasticità e il Lavoro alla rottura dei fili elementari eventualmente recisi (valutabile dalla diminuzione della Superficie efficace della corda S_e).

Anche nei grafici analizzati in questo sotto-capitolo l'andamento e la dislocazione uniforme delle varie curve % **Dissipazione** = $f(n^\circ \text{ choc})$ denota la validità della sperimentazione e delle considerazioni che ne scaturiscono.

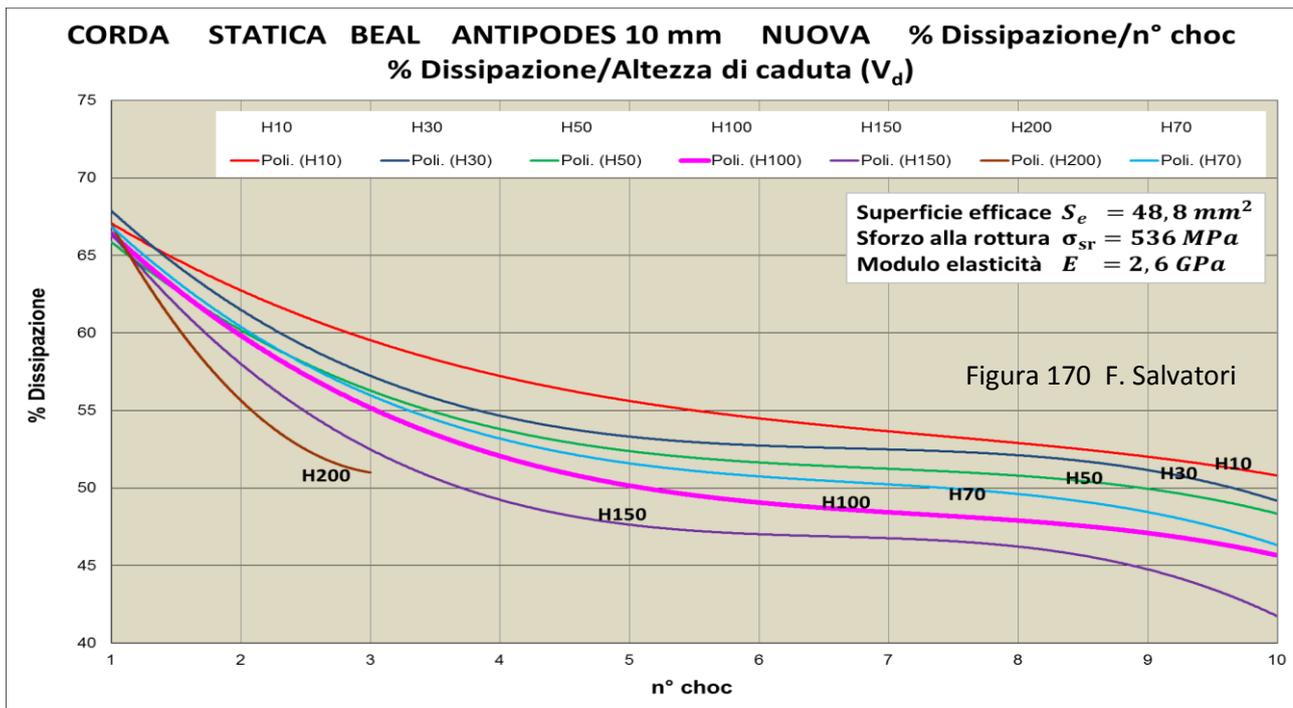
Il numero di dati che costruisce ogni singola curva è limitato e, quindi, non permette analisi estremamente dettagliate. Ciò nonostante è possibile dedurre considerazioni di grande rilievo sulla quantità e la forma con cui i vari meccanismi deformativi contribuiscono a dissipare l'energia prodotta dalla caduta del peso.

01.h.b.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) nuova

Nel grafico di **Figura 170** sono diagrammati i dati relativi alla corda statica **nuova Beal Antipodes 10 mm**, dove, con le modalità consuete, sono messe in evidenza numerica, contemporaneamente, le variazioni di % **Dissipazione** in funzione dell'aumento del **n° di choc** e di V_d (si tratta sempre di una valutazione che deriva dall'altezza di caduta del peso).

Anche qui si possono fare considerazioni in relazione a qualsiasi combinazione delle due variabili.

La curva viola H100, più marcata, corrisponde al confine fra sollecitazioni "progressione speleologica" e "progressione alpinistica".



01.h.b.1.) Prima considerazione: pendenze variabili delle curve - Il dato $n^\circ \text{ choc} = 1$ relativo al primo choc è una misura della deformabilità complessiva della corda **nuova** (per ogni altezza di caduta del peso testata, H10 – H30 – H50 – H70 – H100 – H150 – H200, in questo caso). Per sua causa la deformabilità iniziale viene modificata, in parte in modo irreversibile e quindi non più disponibile per assorbire l'energia di una successiva sollecitazione.

Il valore misurato con lo choc che segue (il secondo, $n^\circ \text{ choc} = 2$) è quindi dipendente dalla deformabilità iniziale e da quanto il primo choc ha modificato lo stato complessivo della corda, facendole raggiungere una delle cinque seguenti possibili situazioni:

1. se la deformabilità è diminuita il nuovo valore di **% Dissipazione** sarà inferiore al precedente (il che è la situazione più probabile);
2. se la deformabilità, percentualmente, è rimasta la stessa, il dato che segue sarà identico al precedente (anche questa situazione è possibile ma non altrettanto probabile);
3. se la deformabilità è aumentata, il valore cresce (situazione attuabile solo nel caso di sollecitazioni ad alto contenuto energetico, quando è possibile che lo choc porti ad aumentare l'estensione dei settori amorfi dei fili elementari);
4. se si verificano cedimenti dei fili elementari, è di fatto una situazione che determina una diminuzione di deformabilità, che va ad aggiungersi alla deformazione dei restanti fili elementari non recisi; in questo caso si ha una decrescita di **% Dissipazione** molto netta;
5. la curva s'interrompe prima del completamento della serie di choc previsti, indicando che tutte le rimanenti possibili deformazioni della corda hanno dissipato non tutta la quantità d'energia conferita dalla caduta del peso, rimanendone a sufficienza per portare alla rottura tutti i fili elementari (è questo il caso che si verifica soprattutto in corde usate, quando l'usura ne ha degradato in modo marcato i fili elementari, riducendone le proprietà meccaniche, soprattutto il Carico di rottura F_r) e in corde con bassi carichi di rottura come le dinamiche.

Per il terzo choc e tutti quelli che seguono, per le misure che scaturiscono vale quanto detto per il secondo choc, con l'acquisizione di una delle cinque possibili conformazioni sopra elencate.

Pertanto le curve **% Dissipazione = $f(n^\circ \text{ choc})$** di **Figura 170** hanno andamenti e dislocazioni che individuano e descrivono, passo a passo, l'evoluzione degradante che la successione di choc (con altezze di caduta crescenti) produce. Azione degradante creata artificialmente con test di laboratorio, ma che ben simulano quanto accade in realtà nella progressione in grotta e in arrampicata.

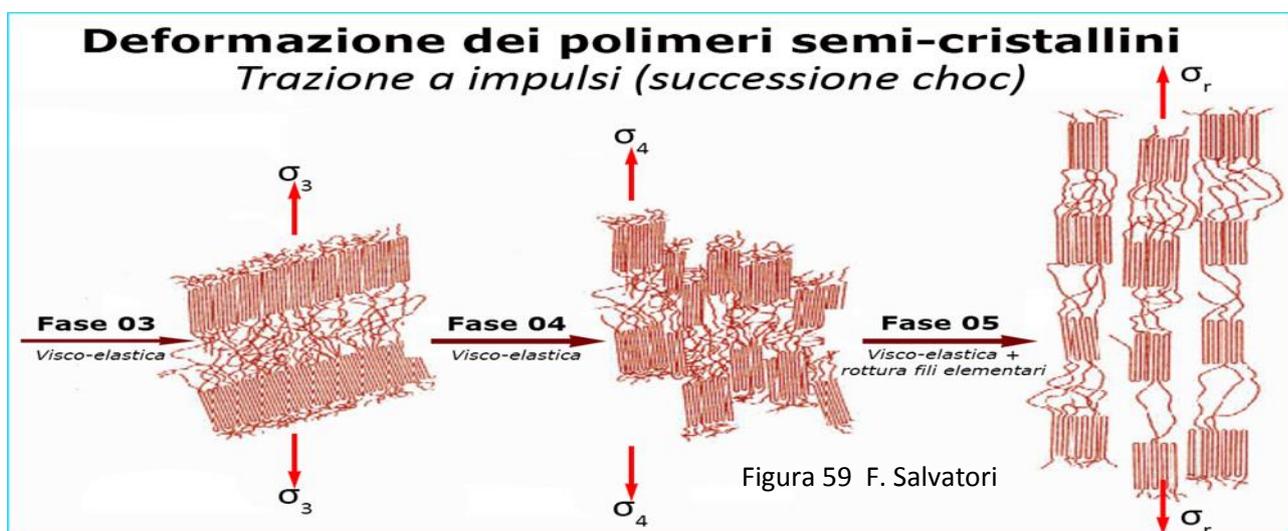
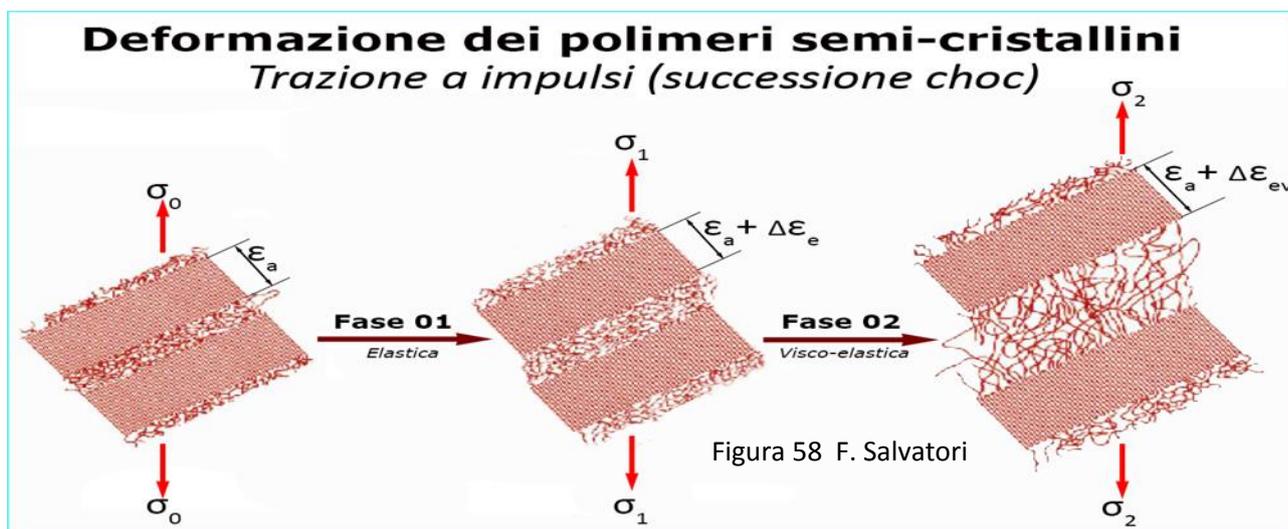
Tutte le curve inserite in **Figura 170** mostrano di **decreocere**, sia con il progredire del n° degli choc sia con il crescere dell'altezza di caduta del peso. Ma con pendenza più o meno accentuate, distinguendosi in tre settori:

1. da choc n. 1 a choc n. 3 le curve, uniformemente, decrescono in modo marcato;
2. da choc n. 4 a choc n. 7 le curve decrescono in modo meno accentuato;
3. da choc n. 8 a choc n. 10 si ha una nuova decrescita marcata delle curve.

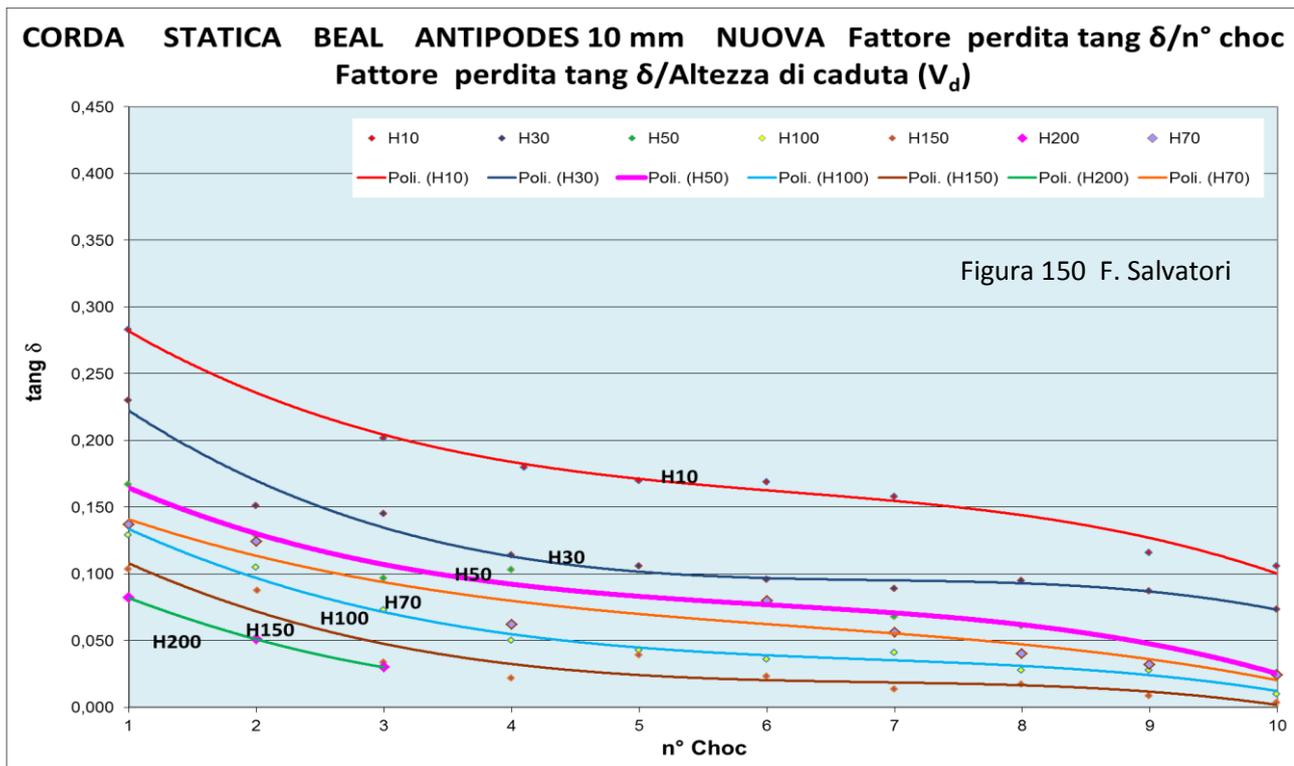
Questi comportamenti mostrano che al succedersi degli choc una parte della deformabilità della corda viene consumata irreversibilmente e ne rimane sempre una quantità minore a disposizione per la choc successivo: tanto maggiore è l'effetto dissipante di uno choc tanto maggiore risulta l'abbassamento della % **Dissipazione** al test successivo.

01.h.b.2.) Seconda considerazione: cause che portano alla diminuzione di deformabilità percentuale % Dissipazione - I meccanismi che portano a questo degrado sono due, uno legato alla visco-elasticità e l'altro alla **CSCC**.

Per ricordare quanto è dovuto al primo meccanismo ripetiamo le **Figure 58 – 59** già precedentemente mostrate (pagg. 68 - 69) con le cinque emblematiche fasi che interessano la struttura semicristallina delle poliammidi e quindi la loro visco-elasticità.



Per meglio identificare il contributo delle variazioni di visco-elasticità dei filamenti elementari (in questo caso di Nylon 6) s'inserisce qui sotto, di nuovo, la **Figura 150** (pag. 186), con le curve del Fattore di perdita **tang δ = f(n° choc)** della omologa corda statica (Beal Antipodes 10 mm nuova).



Il confronto fra le **Figure 150 e 170** mostra, sia pur con qualche differenza, delle nette analogie sia nell'andamento che nelle dislocazioni: in entrambe l'andamento al succedersi degli choc mostra le stesse variazioni di pendenza, tanto che anche nelle curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ si individuano gli stessi tre settori:

1. da choc n. 1 a choc n. 3 le curve, uniformemente, decrescono in modo evidente;
2. da choc n. 4 a choc n. 7 le curve decrescono in modo meno accentuato, quasi conservando il grado di viscosità;
3. da choc n. 8 a choc n. 10 si ha un nuovo aumento della decrescita delle curve.

E' dunque evidente che l'andamento delle curve $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$ è in concordanza con quello delle curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ e quindi le variazioni della visco-elasticità sono un **contributo concordante** alla dissipazione globale dell'energia in gioco nei test a caduta.

La sinergia della $\% \text{ Dissipazione}$ con $\text{tang } \delta$ nel determinare il decremento della deformabilità complessiva della corda **Antipodes statica 10 mm nuova** sta anche nella dislocazione delle curve: infatti il secondo fattore decresce in funzione dell'aumento della Altezza di caduta del peso (Velocità di deformazione) proprio come accade nel secondo.

L'analisi dettagliata dell'andamento delle curve $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ è descritta nel **Paragrafo 01.f.c.6** (pag. 187). Per facilitare la consultazione si ripetono le considerazioni sintetiche sugli aspetti principali.

“Ricordando che $\text{tang } \delta = E''/E' = \text{Modulo viscoso}/\text{Modulo elastico}$, la sua diminuzione può essere determinata sia da una decrescita del Modulo viscoso E'' come da un aumento del Modulo elastico E' . Ma la diminuzione di $\text{tang } \delta$ può avvenire anche per una decrescita differenziata: maggiore per il grado di viscosità, minore per quello d'elasticità. Quest'ultima situazione è di norma, visto che è impossibile, con i test a caduta programmati, ricompattare i settori amorfi e cristallini.

Nel primo settore la decrescita marcata del Fattore di riduzione è dovuta a quanto accade all'organizzazione delle catene di macromolecole nei fili elementari, come mostrano le trasformazioni indicate con la Fase 1 di Figura 58 (pag. 185): le deformazioni, sia nei settori amorfi che cristallini, sono di minima entità ma comportano una netta perdita di elasticità e viscosità, con, ovviamente, incrementi di perdita molto più marcati per quest'ultima.

La capacità di assorbire energia dei fili elementari tramite la loro visco-elasticità diminuisce in modo importante (si ricorda che $\tan \delta$ misura in dipendenza del ritardo di tempo δ e quindi non comprende l'effetto dissipativo dovuto alle deformazioni proprie della CSCC).

Nel secondo settore il gradiente di decrescita di $\tan \delta$ si riduce, ma comunque la visco-elasticità diminuisce, e con essa la capacità dei fili elementari di assorbire energia. Siamo nelle **Fasi 2 – 3 – 4** delle **Figure 58 – 59**.

Nel terzo settore la decrescita di $\tan \delta$ prosegue con incrementi più accentuati: evidentemente, come nel primo settore, la diminuzione di viscosità prevale sulla diminuzione d'elasticità.

Ma potrebbe anche essere che subentri un qualche fenomeno di rottura dei fili elementari (**Figure 151 – 152**), che appare nei diagrammi come un'ulteriore decremento del Fattore di perdita di visco-elasticità. In questo caso si verificherebbero i fenomeni indicati nella **Fase 5** di **Figura 59**.

Una perdita di visco-elasticità aggiuntiva può avvenire anche se le deformazioni nei **settori cristallini** fossero di entità **maggiore rispetto** a quelle dei **settori amorfi**. E questo caso può accadere solo quando i fili elementari dei settori amorfi hanno raggiunto la massima possibile estensione longitudinale e un'ulteriore trazione costringe a districare i pacchetti di catene ordinati e rafforzati dai legami idrogeno.

Ma siamo anche al limite di rottura dei fili elementari delle zone amorfiche: se questi si rompono (anziché resistere e spaccettare i nuclei cristallini rimasti) le relative curve flettono verso il basso.

E' probabile che con catene di Nylon 6.6, il cui Sforzo alla rottura è quasi il doppio del Nylon 6, prevalga lo spaccettamento dei nuclei "cristallini" e di conseguenza, ad un successivo choc, si registri un Fattore di perdita in diminuzione, con curve che flettono verso l'alto".

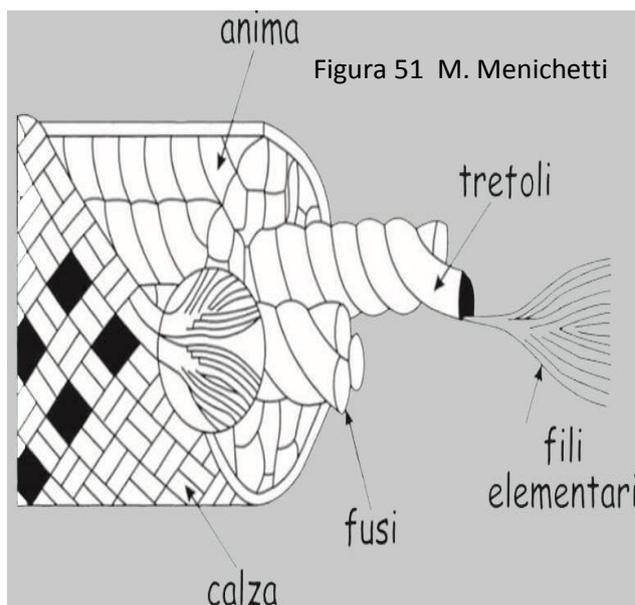


Figura 51 M. Menichetti

Ma alla % **Dissipazione** concorre anche la CSCC; deformazione di **grande rilievo nelle corde dinamiche**. Ma anche nelle statiche, sia pur con minore rilevanza, contribuisce alla dissipazione d'energia.

Si valuta che nelle **corde statiche nuove** la compattazione della struttura complessa **incida per circa il 20 %** del totale, mentre in quelle **dinamiche nuove** contribuisce alla deformabilità per **circa il 70 %**.

Nelle corde usate la deformabilità dovuta alla CSCC (pag. 62, **Figura 51**) diminuisce, anche drasticamente, a seguito dell'usura in grotta che porta a una conseguente diminuzione della "compattazione". Ma questo è esaminato dettagliatamente nel proseguo di questo lavoro.

01.h.b.3.) Terza considerazione: contributo della CSCC all'assorbimento dell'energia della caduta del peso – E' questo un argomento complesso e di difficile definizione quantitativa, che, con i dati resi disponibili dai test programmati in questa **Parte VI**, può essere definito parzialmente per via sperimentale solo con (argomenti sviluppati dettagliatamente nei paragrafi che seguono):

1. il confronto fra i risultati per le curve % **Dissipazione = f(n°choc)** prodotti da corde costituite da fili elementari di diversa natura (nel nostro caso Nylon 6 e Nylon 6.6), diversa struttura complessa (corda statica e dinamica) e diverso stato d'usura;
2. il confronto fra corde nuove e usurate;
3. la valutazione delle variazioni del valore della Sezione efficace S_e delle corde a seguito dell'usura subita;
4. l'integrazione nell'analisi delle curve $A_0 = f(n°choc)$ (dove A_0 uguale all'allungamento massimo prodottosi a ogni choc).

01.h.b.4.) Quarta considerazione: prime indicazioni sperimentali sulle modalità e quantità proprie della dissipazione d'energia dovuta alla CSCC – Una prima indicazione della presenza e dell'efficacia delle deformazioni legate alla CSCC (anche nell'Antipodes qui esaminata nonostante venga definita "statica"), viene dal confronto fra i grafici delle **Figure 170 – 150** [riportati in precedenza, i primi relativi alle curve **% Dissipazione = f(n° choc)** e i secondi alle curve **tang δ = f(n° choc)**].

Ricordando che:

1. la CSCC non è dipendente in alcun modo dal tempo di ritardo δ e quindi non incide sulle deformazioni della visco-elasticità,
2. il Fattore di perdita **tang δ** è una misura della perdita di deformabilità per la parte dovuta alla visco-elasticità,
3. **% Dissipazione** è una misura, in percentuale, della perdita di **deformabilità meccanica complessiva** (ovviamente è escluso l'effetto dissipativo degli attriti/calore), comprendente anche quella dovuta alla CSCC (e all'eventuale cedimento dei fili elementari),

confrontiamo l'andamento e la dislocazione delle curve contenute nelle predette figure.

In aggiunta a quanto già analizzato, si rileva che tutte le curve hanno un punto d'origine quasi comune (range **66 % - 68 %**); come a dire che sotto il primo choc, con qualsiasi altezza di caduta **% Dissipazione** rimane inalterato (in percentuale non in valori assoluti).

Questo contrasta con quanto accade per il Fattore di perdita della visco-elasticità **tang δ**, che sin dal primo choc si differenzia nettamente con una **decrescita** rispetto alla Velocità di deformazione che aumenta. Questo dislocamento delle curve si mantiene più o meno inalterato per tutta la serie di choc.

E' dunque evidente che le variazioni della perdita globale di deformabilità sono condizionate, per gran parte dallo sviluppo della funzione **% Dissipazione = f(n° choc)**, dal comportamento della parte visco-elastica delle deformazioni; mentre la dissipazione prodotta dalla compattazione della struttura complesso della corda va gradualmente esaurendosi.

Ma quest'ultima forma di dissipazione dell'energia della caduta del peso ha un grande rilievo percentuale con i primi test con corda nuova, rilievo percentuale che "oscura" i minimi effetti iniziali della visco-elasticità dei fili elementari (che tendono invece al dislocamento delle curve).

Queste ultime considerazioni fanno comprendere quanto la CSCC incida sulla dissipazione dall'energia globale, soprattutto dopo l'applicazione dei primissimi choc (con il succedersi degli choc la compattazione va esaurendosi, lasciando il posto all'azione della sola visco-elasticità).

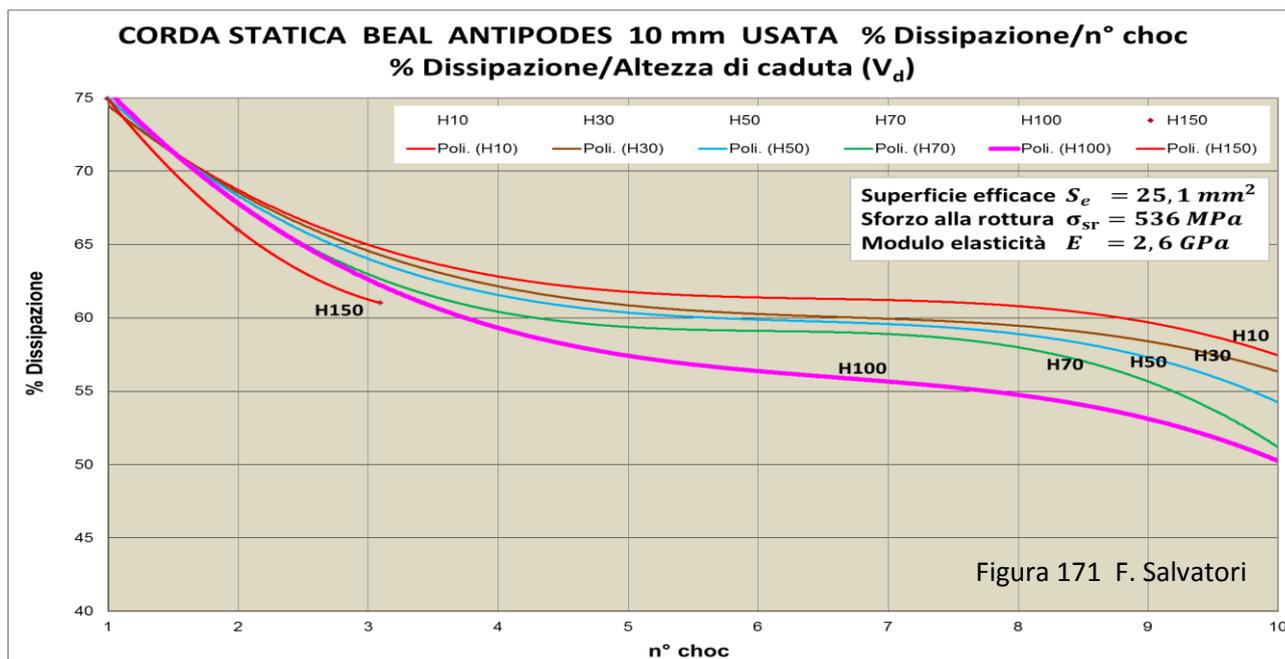
E questo vale anche per le corde cosiddette **statiche** nuove, dove s'ipotizza un contributo di circa il 20 – 30 %.

01.h.c.) Confronto fra Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6), nuova e usata - Nella **Figura 171** sono esposte le curve **% Dissipazione = f(n° choc)** per la corda usata (in grotta più di due anni).

01.h.c.1.) Prima considerazione: punto d'origine comune - Anche qui andamento e dislocazione sono simili a quelle della corda nuova. Anche in questo caso le curve hanno un punto d'origine comune (**n° choc = 1**, test su corda usata ma non choccata). Ma con una differenza nei ranges iniziali: **74 % – 77 %** per l'usata e **66 % - 67 %** per la corda nuova.

01.h.c.2.) Seconda considerazione: aumento apparente - Tale aumento è solo apparente, in quanto la deformabilità complessiva del materiale che costituisce la corda (Nylon 6) è diminuita sotto i "colpi" delle cadute del peso.

Infatti il fattore che maggiormente incide nell'aumento, **sulle corde usate**, della **% Dissipazione** è la diminuzione della Sezione efficace (**44,8 mm²** della corda nuova contro **25,1 mm²** della corda usata): il fatto che l'usura in grotta (abrasione della calza con rottura di fili elementari, contatto con l'acqua, calore, sollecitazioni, ecc.) abbia ridotto la **quantità e la qualità** del materiale polimerico che si oppone agli allungamenti fa sì che la parte d'energia che si dissipa aumenti, percentualmente, rispetto alla quantità d'energia meccanica conferita con il test a caduta.



01.h.c.3.) Terza considerazione: CSCC drasticamente ridotta - Inoltre, sempre nelle corde usate, la capacità di assorbire energia da parte della CSCC è stata drasticamente ridotta dal succedersi degli choc e dall'abrasione della parte esterna della calza, dove dei fili elementari sono stati recisi (il che contribuisce anche alla diminuzione della Sezione efficace).

01.h.c.4.) Quarta considerazione : diminuzione della capacità d'assorbire energia in aggiunta alla diminuzione della Superficie efficace - Alla fine di queste precedenti tre considerazioni sembrerebbe che non vi siano differenze rilevanti, nella capacità d'assorbire energia, fra corda nuova e usata. Ma questo non corrisponde alla realtà, perché il decadimento per uso in grotta, la successione degli choc e l'aumento della Velocità di deformazione hanno condotto la corda nuova a una condizione di grave degrado: infatti la riduzione della capacità di dissipare energia si è andata ad aggiungersi a una drastica riduzione del carico di rottura per la recisione di diversi fili elementari e la diminuzione della cristallinità della poliammide che costituisce i fili elementari.

Questo è reso evidente dal fatto che nelle corde usate è impossibile completare la serie dei dieci choc programmati a più alto contenuto energetico senza che intervenga il cedimento della corda stessa.

A ulteriore conferma sperimentale di questa affermazione si valutino i risultati riportati nella **Parte V Capitolo 01 "Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)"** (pag. 123).

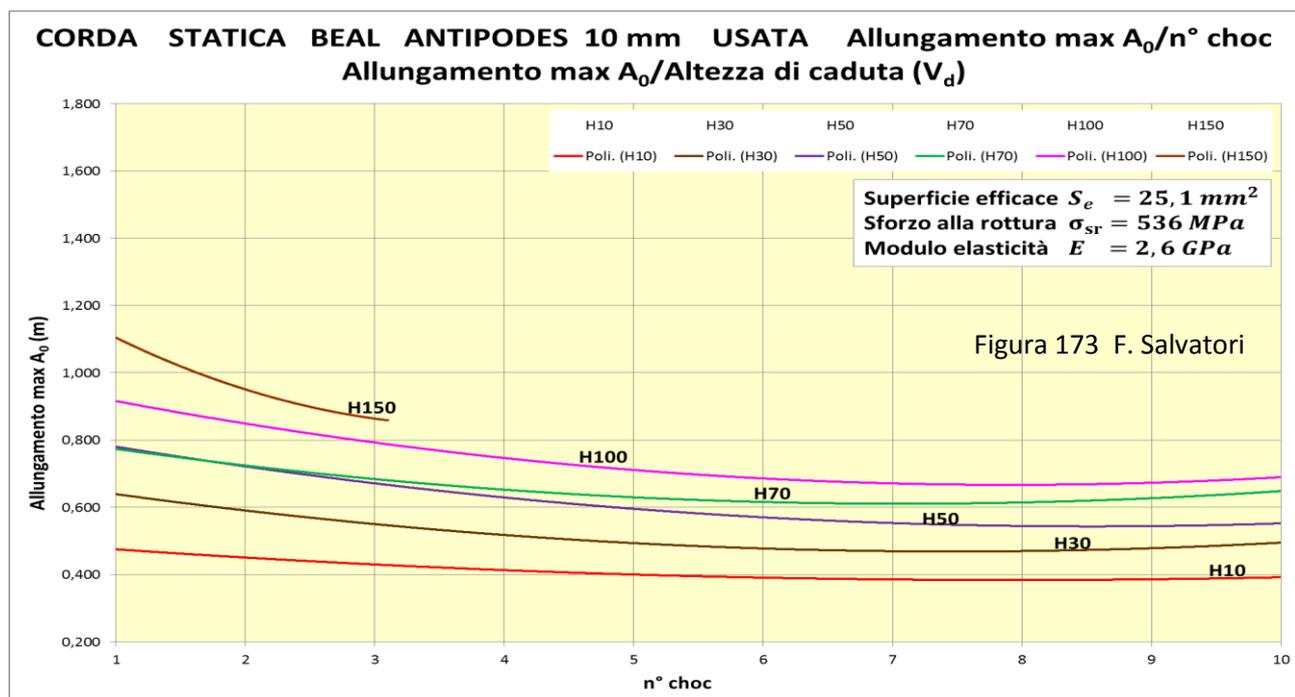
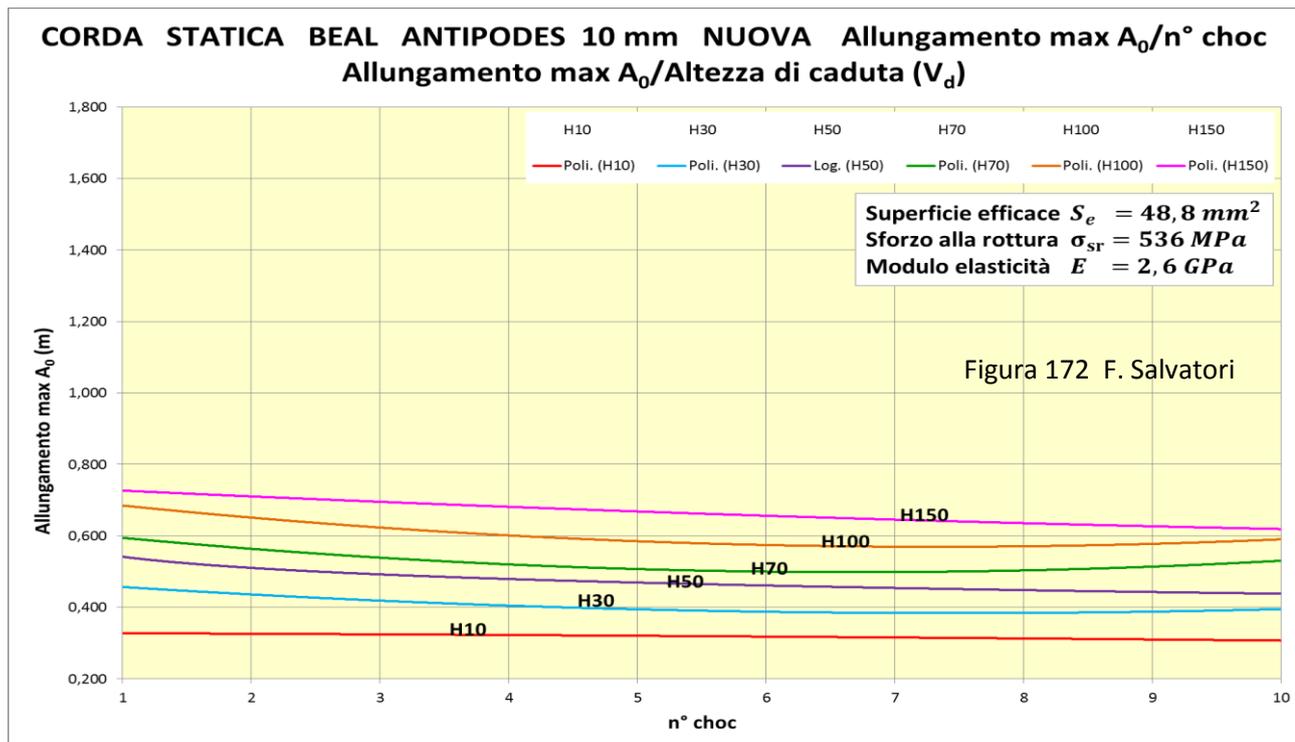
01.h.d.) Valutazione per Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) del gradiente di progressione della % Dissipazione in funzione del n° di choc e della Velocità di deformazione V_d

01.h.d.1.) Premessa - Si utilizzano anche le competenti curve $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$ della corda nuova (**Figura 172**) e usata (**Figura 173**). Si ricorda che A_0 è l'Allungamento massimo che subisce il campione di corda per effetto di uno choc a caduta. Allungamento che in parte è reversibile per effetto delle deformazioni "elastiche" ed è una misura di ΔL_{carico} , il lavoro meccanico complessivo.

Con la **corda nuova (Choc01)** si raggiunge il primo Allungamento massimo che è una misura proporzionale alla nativa deformabilità complessiva della corda stessa. Una parte della deformazione non è reversibile e, terminato l'effetto della sollecitazione, il campione di corda rimane allungato in modo stabile di un valore pari ad A_r (allungamento residuo).

Al successivo test a caduta (**Choc02**) viene raggiunto il secondo Allungamento massimo, che è in funzione della condizione di deformabilità conseguita per effetto della Choc01 (e in minima parte della maggiore lunghezza raggiunta dal campione di corda: lunghezza originale + A_r).

E così via fino al decimo choc e alla massima altezza di caduta raggiungibile, completando la serie di curve.



01.h.d.2) Prima considerazione: costanza dei valori di Allungamento massimo – La progressione degli Allungamenti massimi A_0 procede senza variazioni: a un valore di Allungamento massimo ne segue sempre un altro della stessa entità, con qualche modesta diminuzione con il crescere dell'altezza di caduta del peso.

Questo vale per tutte le altezze di caduta del peso prese in considerazione, e in particolar modo per i test con velocità di deformazione minima (H10).

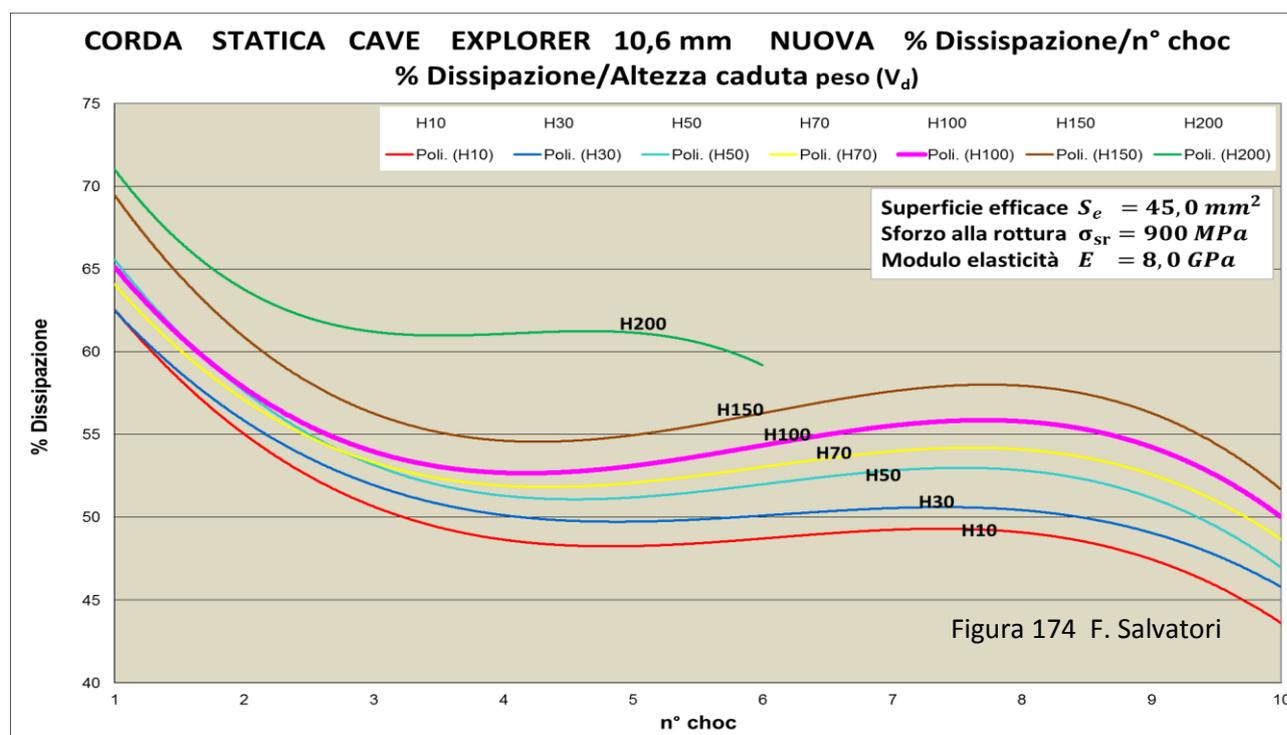
Essendo, come già detto, l'Allungamento massimo una misura della capacità complessiva di deformazione della corda, ne deriva che sotto l'effetto della successione degli choc la corda in esame perde **costantemente** la sua capacità d'assorbire energia, indistintamente da quale forma contribuisca, separatamente o in sinergia.

Con la stessa corda, **ma usata**, il risultato cambia solo per la diversità di ranges iniziali: **0,470 m – 0,720 m** per la corda nuova; **0,480 m – 1,110 m** per la corda usata. Tutto questo è ben comprensibile sulla base di

quanto detto sul decadimento, per l'uso in grotta della corda Antipodes; decadimento manifestatosi soprattutto con la drastica diminuzione della Superficie efficace S_e ($48,8 \text{ mm}^2$ contro $25,1 \text{ mm}^2$), quasi dimezzata per effetto del cedimento di alcuni fili elementari e della diminuzione della cristallinità degli altri.

01.h.e.) Valutazione per Corda statica Cavalieri Cave Explorer nuova 10,6 mm (Nylon 6.6) del gradiente di progressione della % Dissipazione in funzione del n° di choc e della Velocità di deformazione V_d

Nel grafico di **Figura 174** sono diagrammati i dati relativi alla corda statica nuova Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm.



È una corda con la stessa tessitura della struttura complessa della corda Antipodes, ma si differenzia dalla Cavalieri perché ha i fili elementari di Nylon 6.6.

Si ricorda che il Nylon 6.6 ha una **Cristallinità** del 75 % contro il 50% del Nylon 6; una **Tenacità** di 0,64 N/Tex contro 0,47 N/Tex; uno **Sforzo alla rottura** di 900 MPa contro 536 MPa; un **Modulo d'elasticità** di 8,0 GPa contro 2,6 GPa. Insomma, la poliammide 6.6 è più resistente agli allungamenti e alla rottura (di circa 1/3).

L'andamento delle curve è nel complesso decrescente in funzione del procedere degli choc, analogo a quello della corda Antipodes di Nylon 6 (pag. 212, **Figura 170**).

Ma fra le curve **% Dissipazione = $f(n^\circ \text{ choc})$** delle due corde ci sono alcune differenze, sia nell'andamento ma, soprattutto, nella dislocazione. Nella corda con fili di Nylon 6.6:

1. il **% Dissipazione** aumenta con l'aumento dell'altezza di caduta del peso, mentre col Nylon 6 avviene esattamente il contrario;
2. il range iniziale dei valori del **% Dissipazione** è più ampio (62% - 71 % contro 66 % - 67 %);
3. nel settore centrale, col succedersi degli choc, la percentuale d'energia dissipata tende a rimanere costante (anziché decrescere).

Quanto espresso nel **secondo e terzo punto** è dovuto a cause che non danno indicazioni rilevanti, ma solo marginali e quasi prive di elementi validi per esprimere valutazioni sul comportamento delle corde di fronte all'usura che comporta l'applicazione di choc successivi.

Invece il **primo punto** merita un'attenzione particolare perché aiuta a descrivere sostanzialmente le differenze di comportamento fra i fili elementari di Nylon 6.6 e Nylon 6.

01.h.f) Considerazioni in merito all'andamento e all'inversione delle dislocazioni delle curve nelle Corde statiche Cavalieri Cave Explorer Nylon 6.6 e Beal Antipodes Nylon 6

È chiaro che - ipotizzando verosimilmente che l'influenza della compattazione della CSCC sia uguale nelle due corde (essendo entrambe "statiche") - l'inversione di dislocamento delle curve % **Dissipazione** = $f(n^\circ \text{ choc})$ è legata alla differenza fra i gradi di cristallinità delle due poliammidi (75 % nel Nylon 6.6 contro il 50 % del Nylon 6), che si traduce in termini di proprietà meccaniche in una differenza fra Modulo d'elasticità (**8,0 GPa** per Nylon 6.6 contro **2,6 GPa** per il Nylon 6), fra Sforzo alla rottura (900 MPa contro 536 MPa) e Tenacità (6,4 N/Tex contro 4,7 N/Tex).

Come premessa è necessario ricordare che il fenomeno dell'inversione dei dislocamenti delle curve è verosimilmente legato alla **Relazione 26** (pag. 211):

$$\% \text{ Dissipazione} = 100 \cdot \frac{\Delta L_{\text{dissipazione}}}{\Delta L_{\text{carico}}} \quad (26)$$

e a quanto descritto nel precedente **Paragrafo 01.h.b.1 Prima considerazione** (pag. 212) dove vengono descritte le cinque possibili cause della variazione della % **Dissipazione**.

Occorre poi distinguere gli effetti del progredire del n° degli choc da quelli dell'aumento dell'altezza di caduta del peso:

1. il progredire del **n° degli choc** è influenzato principalmente dal comportamento della **visco-elasticità**; si confrontino gli andamenti della **Figura 150** (pag. 186) con quelli della **Figura 170** (pag. 212) e **Figura 171** (pag. 217);
2. il crescere **dell'Altezza di caduta del peso** (e quindi della Velocità di deformazione) amplifica le zone amorphe dei fili elementari rispetto alle cristalline, aumentandone fino ad un certo stadio la capacità a dissipare energia, diminuendola procedendo oltre; di fatto il Nylon 6.6 tende a divenire Nylon 6: il % **Dissipazione** **aumenta** con l'altezza di caduta **dal 75 % al 50 %**; **sotto il 50 %** la dissipazione **diminuisce**.

Nel caso della corda statica Antipodes Nylon 6 nuova (Figura 170) la maggiore duttilità della corda ($E = 2,6 \text{ GPa}$) e la minore Tenacità ($T = 0,47 \text{ N/Tex}$) fanno sì che ad ogni sollecitazione - con crescente altezza di caduta del peso - vengono prodotti ΔL_{carico} (equipollenti agli allungamenti massimi A_0 di **Figura 174**) e deformazioni irreversibili tali per cui $\Delta L_{\text{dissipazione}}$ cresce con **gradiente inferiore** rispetto a quello con cui aumenta ΔL_{carico} .

Questo comporta che le curve $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$ si dislochino via via in posizione **sottostante** al crescere dell'altezza di caduta del peso. Un degrado in progressivo aumento.

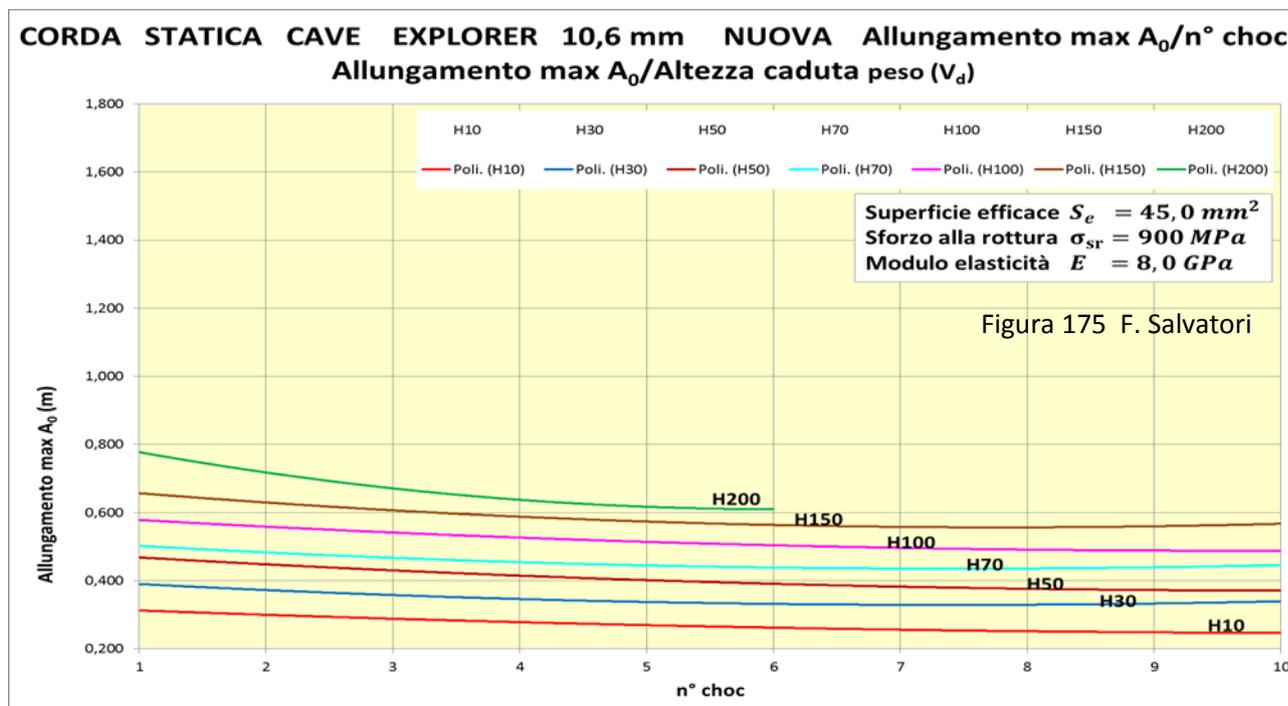
Il degrado consiste, in sostanza, di una diminuzione delle zone cristalline, ma con settori amorfi più estesi ma con minore capacità dissipativa. E tutto è definibile in base ai comportamenti sotto trazione delle catene di macromolecole, come descritti nelle **Fasi 1 - 5** delle **Figure 58 - 59** (pag. 213), difficili da decifrare nei particolari (sarebbero necessarie ulteriori verifiche sperimentali).

Facendo un'ipotesi che risiede soprattutto nel campo teorico, proseguendo la successione di sollecitazioni sempre più energetiche (con altezze di caduta ancora più elevate), si eliminerebbero i grovigli di catene di polimeri e con essi la possibilità di perdere la capacità di dissipare energia in modo irreversibile. Ma questa è, appunto, un'ipotesi puramente teorica, perché prima del suo avvento interverrebbe il cedimento dei fili elementari e la rottura della corda (vedi **Fase 5**).

Nella corda statica Cave Explorer Nylon 6.6 nuova (Figura 174), per quanto riguarda l'andamento delle curve $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$, la situazione è del tutto analoga a quella dell'Antipodes Nylon 6 ed è il Fattore di perdita della visco-elasticità **tang δ** a condizionarne grossomodo lo sviluppo spaziale. Mentre la dislocazione, che, come già specificato, ha una disposizione inversa rispetto alla corda di Nylon 6, è in dipendenza dell'alto grado di cristallinità, quindi della maggiore rigidità ($E = 8,0 \text{ GPa}$) come pure

della più elevata Tenacità ($T = 0,64 \text{ N/Tex}$), che equivale alla necessità di una maggiore quantità d'energia per portare il filo elementare, e quindi la corda, alla rottura.

I grafici $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$ sono rappresentati nella **Figura 175**, dove è chiaro che l'andamento e la dislocazione delle curve è analogo a quello della corda Nylon 6 (unica differenza, valori leggermente inferiori).



Questa diversa natura della poliammide 6.6, in base alla **Relazione 26**, rende possibile che a ogni choc, in funzione dell'aumento dell'altezza di caduta del peso, l'incremento di ΔL_{carico} (in misura di quanto indicato nella **Figura 175**) sia minore dell'incremento di $\Delta L_{dissipazione}$.

Questo comporta che le curve $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$ si dislochino via via in posizione **sopra** al crescere dell'altezza di caduta del peso.

E' ovvio che elevando l'altezza di caduta del peso per la successione degli choc si produce un degrado progressivo nella corda, anche in questo caso con una diminuzione della cristallinità della poliammide 6.6 e conseguente diminuzione delle sue proprietà meccaniche.

Ma questa contrazione della cristallinità comporta un'espansione delle zone amorphe, con crescita della capacità di dissipare energia e quindi con l'aumento della $\% \text{ Dissipazione}$.

Questa perdita va gradualmente aumentando, fino a immaginare che una successione di sollecitazioni sempre più energiche aumenti l'estensione delle zone amorphe fino al punto di raggiungere una cristallinità pari a quella iniziale del Nylon 6, dove, come si è detto in precedenza, avviene l'inversione delle dislocazioni.

Quindi il punto finale di questa, **teorica**, progressione di decadimento di una corda con fili elementari di Nylon 6.6 è che questi eliminino gradualmente ogni groviglio di catene di macromolecole, passando attraverso lo stato del Nylon 6, disponendole via via una parallela all'altra, senza più gli attriti (statici e dinamici) che producono visco-elasticità.

Ma questa, come già detto, è pura teoria, perché prima di raggiungere questo stato di disposizione "perfetta" subentrerebbe il cedimento dei fili elementari.

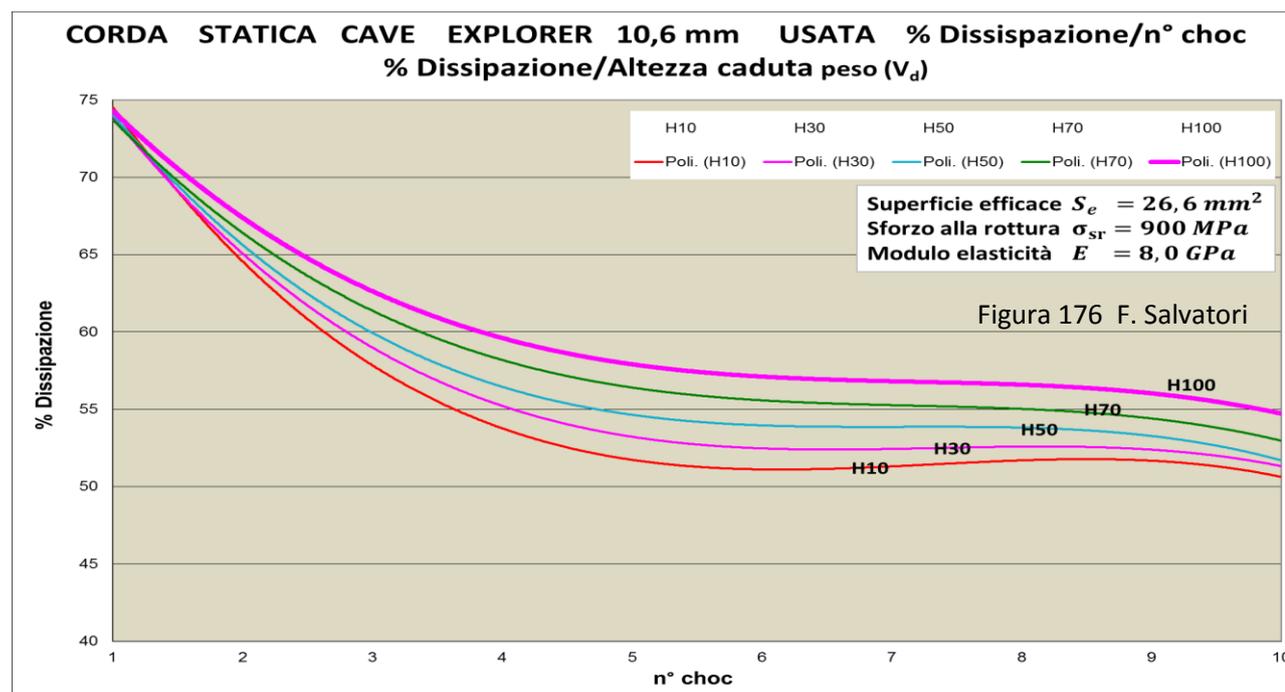
Volendo concludere questo paragrafo con un giudizio di sintesi, la corda in **Nylon 6.6 ha un comportamento migliore di quello della corda Nylon 6**, in quanto, subendo l'effetto della successioni di choc con altezza di caduta del peso crescente, procede verso l'aumento dell'estensione delle zone

amorfe, con perdita di cristallinità (e quindi perdendo Carico di rottura F_r), ma aumentando la capacità di assorbire energia.

Con le corde con fili elementari di **Nylon 6** il degrado per il succedersi di sollecitazioni con energia crescente è **più veloce e più incisivo**. Sarebbe dunque **opportuno utilizzare corde confezionate con fili elementari di Nylon 6.6**.

01.h.g.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Cavalieri Cave Explorer (Nylon 6.6) usata

Nel grafico di **Figura 176** sono diagrammati i dati relativi alla corda statica **usata** Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm **Nylon 6.6**.



È evidente, sia nell'andamento che nelle dislocazioni, che le curve sono analoghe a quelle della stessa corda nuova. Ma con due differenze:

1. il range dei valori iniziali è concentrato intorno al 74 %, proprio come per la **corda nuova statica Bel Antipodes Nylon 6** (pag. 212 e pag. 217, **Figure 170 –171**); la drastica diminuzione di cristallinità dei fili elementari - conseguente alle azioni degradanti del calore, del contatto con l'acqua, del succedersi degli choc, dell'ossidazione e della foto depolimerizzazione legate all'uso in grotta (per due anni) – ha fatto sì che i fili elementari di Nylon 6.6 divenissero simili ai fili elementari di Nylon 6;
2. l'effetto sulla dislocazione delle curve dovuto all'aumento dell'altezza di caduta del peso è meno marcato, con diagrammi più ravvicinati; proprio come accade con la corda statica **Beal Antipodes usata** (pag. 217, **Figure 171**); l'uso ha fatto decadere i fili elementari di Nylon 6.6. ben oltre lo stato delle corda **Antipodes** nuova.

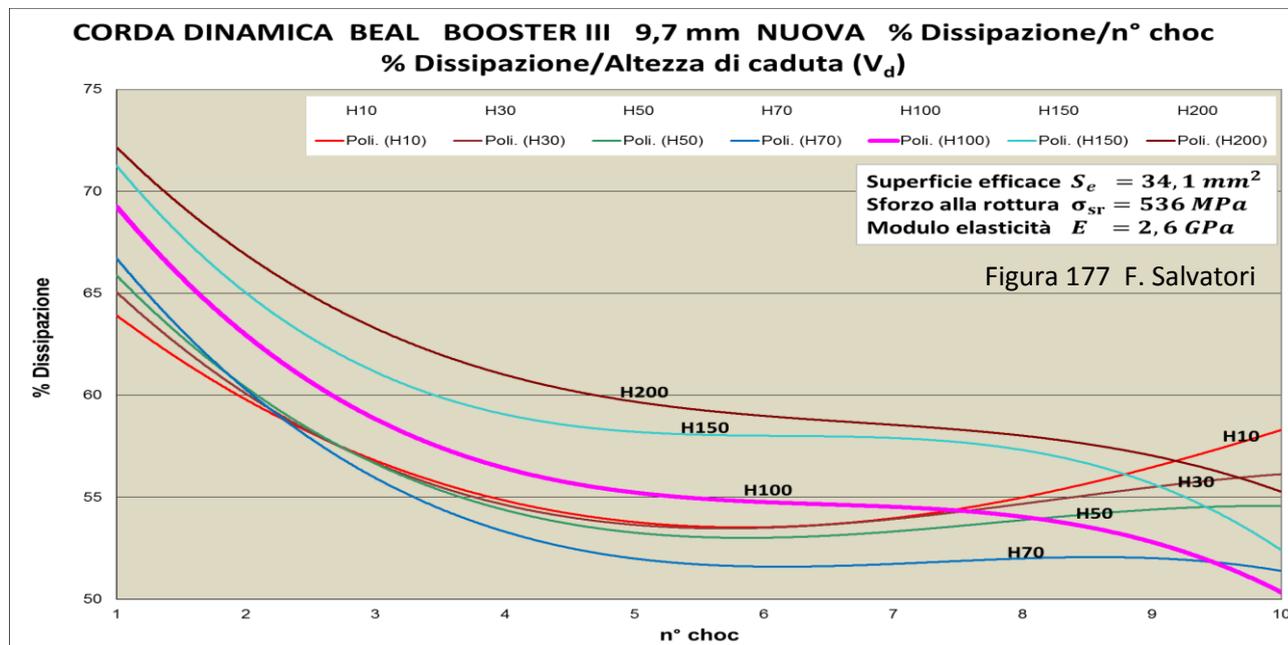
Questa è un'ulteriore conferma che le poliammidi 6.6 e 6 tendono, con l'uso, a uniformare al ribasso le proprie caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche. Ed è una nuova conferma che il Nylon 6.6 sia da preferire al Nylon 6.

01.h.h.) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda dinamica **Beal Booster III (Nylon 6) nuova**

Nei grafici di **Figura 177** sono diagrammati i dati relativi alla corda dinamica **nuova Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6**. Corda confezionata con gli stessi fili elementari della statica **Antipodes** ma con una struttura complessa diversa sia nelle trame dei fili elementari che nella tensione di confezionamento,

al fine di dare una proprietà di deformazione aggiuntiva a quella visco-elastica, propria dei soli fili elementari.

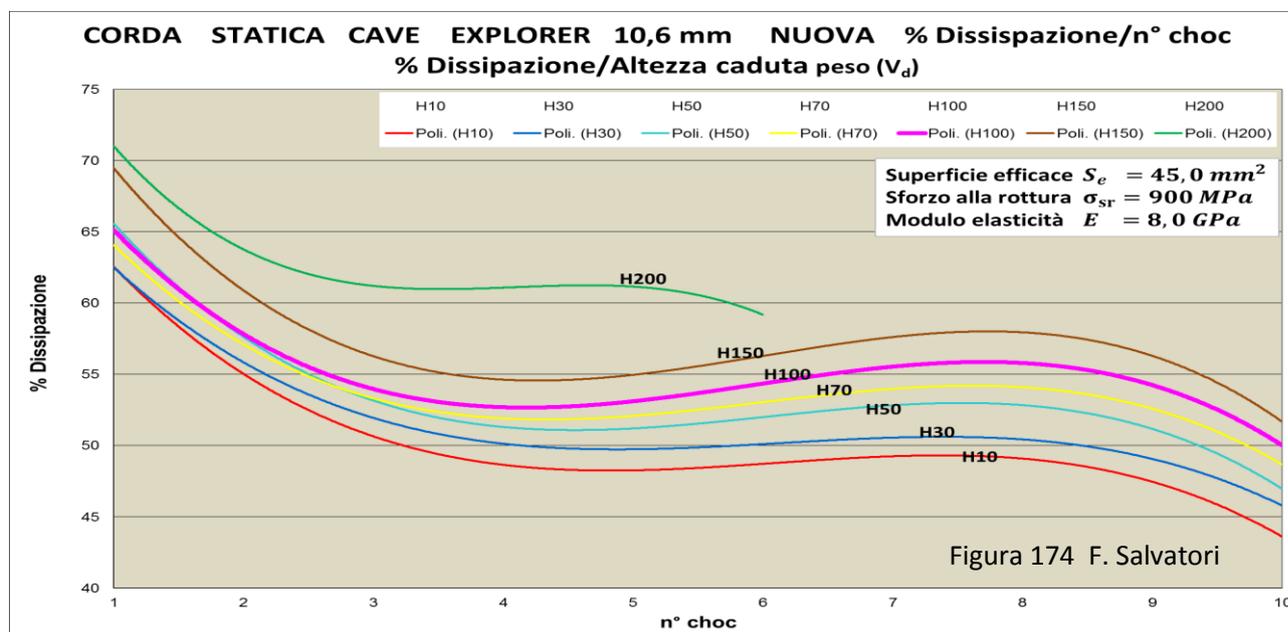
E' questa proprietà (CSCC) che caratterizza le corde cosiddette "dinamiche", rendendole adatte a sopportare le sollecitazioni estreme che può produrre la progressione in alpinismo e in arrampicata sportiva.



In questo paragrafo, soprattutto confrontando i dati relativi alla corda "dinamica" con quelli della "statica", sono sviluppate delle analisi che portano a definire, anche quantitativamente, il contributo della CSCC all'assorbimento dell'energia conseguente alla caduta di un peso.

L'analisi qui sviluppata darà anche modo di conoscere come questa notevole fonte di capacità dissipativa possa essere anche tale da rendere, apparentemente, il comportamento del Nylon 6 simile a quello del Nylon 6.6, ma solo nell'ambito dei primi choc.

01.h.h.1.) Prima considerazione: andamento e dislocazioni analoghe con la corda statica Cave Explorer Nylon 6.6 - Infatti confrontando i grafici di **Figura 177** con quelli della **Figura 174** (pag. 219, che qui sotto replichiamo per facilità di comparazione), risulta evidente che le curve **% Dissipazione = f(n° choc)** hanno andamenti, dislocazioni e valori simili. Ma solo fino al 5° - 6° choc; poi il senso delle dislocazioni s'inverte con gradualità. Questo fatto è singolare!



Evidentemente la deformabilità straordinaria apportata dalla CSCC della corda dinamica ha un effetto paragonabile alla diminuzione della cristallinità dei fili elementari Nylon 6.6 e **rende il Nylon 6 simile al Nylon 6.6** (ma non nel Modulo d'elasticità e nella Tenacità).

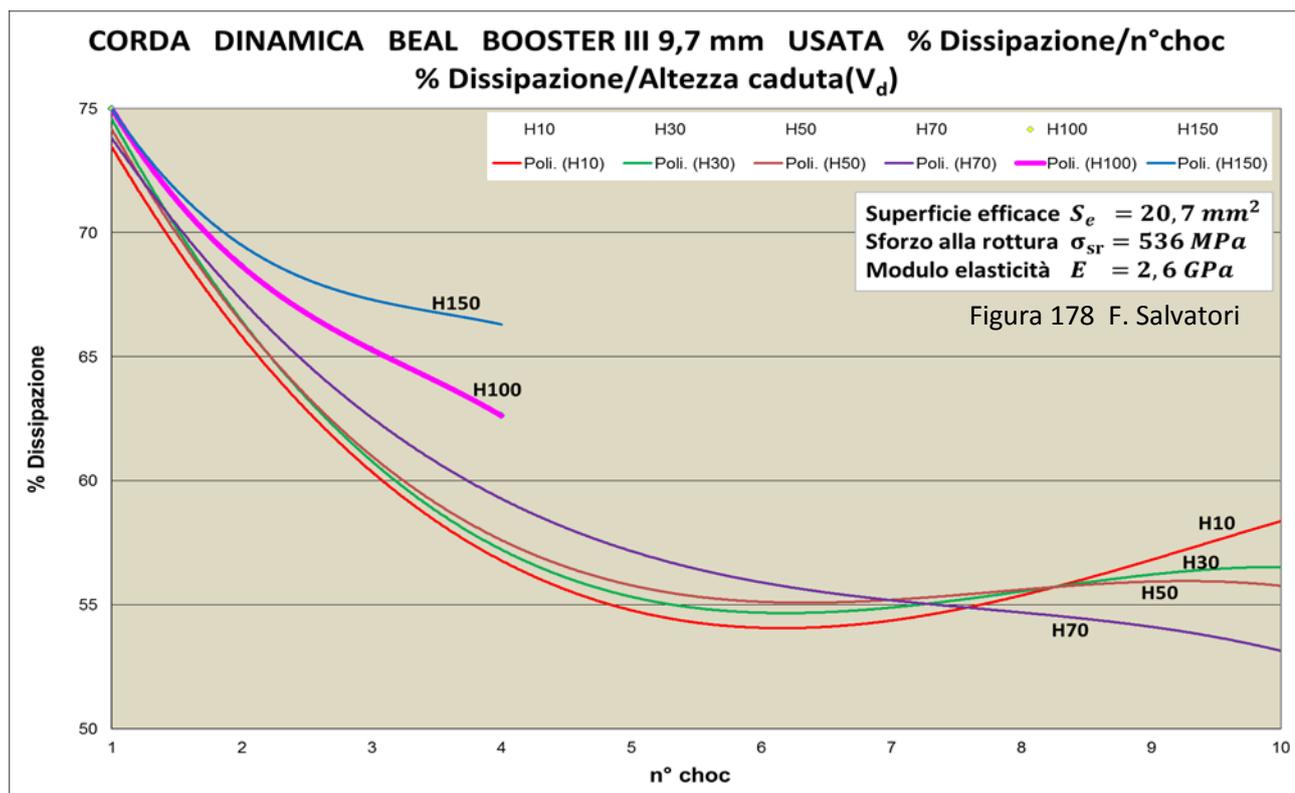
Ma questa deformabilità aggiuntiva non ha un comportamento visco-elastico e non è soggetta ad alcun Ritardo di tempo δ ; è in gran parte irreversibile e nella sua parte reversibile la restituzione dell'energia segue immediatamente l'eliminazione della sollecitazione. E' come se si aggiungesse deformabilità alla sola parte viscosa della corda, ma senza l'effetto ritardo di tempo.

Ma la **natura originaria del Nylon 6**, con la sua cristallinità al 50 %, è comunque sempre presente e **torna a manifestarsi** non appena la **CSCC si va completando**.

Infatti, raggiunto il 6° choc (**Figura 177**), la dislocazione delle curve cambia, invertendo il senso della variazione, e torna a essere simile a quello dei grafici della corda statica Beal Antipodes Nylon 6, nuova e usata (**Figure 170 – 171**, rispettivamente a pag. 212 e pag. 217).

01.h.h.2.) Seconda considerazione: andamento e dislocazioni delle curve della corda dinamica Beal Booster III Nylon 6 usata - Nei grafici di **Figura 178** sono rappresentate le curve **% Dissipazione = f(n° choc)** della **corda dinamica usata** (tre anni molto intensi in parete d'arrampicata esterna; senza contatto con acqua e altri fattori degradanti tipici della progressione in grotta).

E' evidente l'analogia di comportamento di queste curve, sia nell'andamento come nella dislocazione, con quello della analoga corda dinamica nuova.

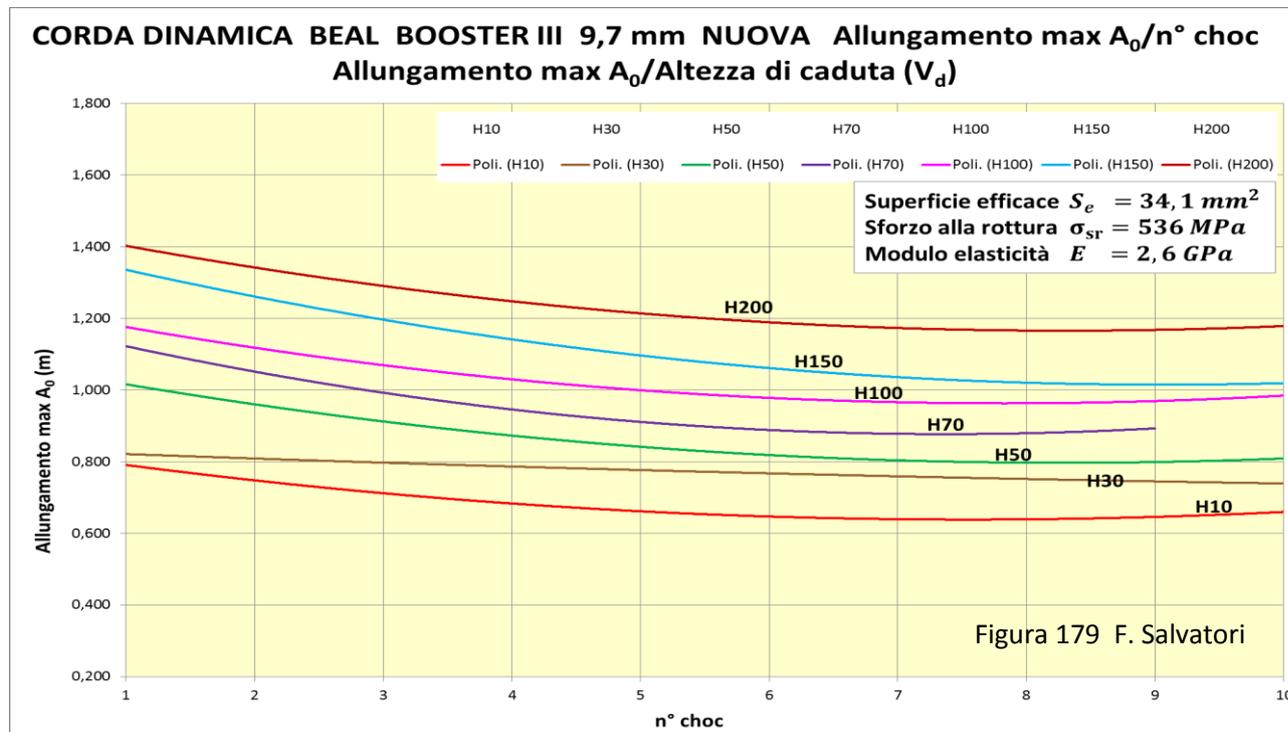


Ma la constatazione **più rilevante** sta nel fatto che la funzione di **dissipazione aggiuntiva**, dovuta alla CSCC, **permane**, sia pur in modo attenuato, anche nella corda usata.

Infatti l'inversione del senso di dislocazione avviene solo dopo il 6° choc, mostrando che l'usura prodotta dall'attività in parete d'arrampicata non portato alla completa compattazione della Struttura Complessa.

01.h.h.3.) Terza considerazione: valutazione del contributo dissipativo della CSCC – Con quanto definito con le precedenti considerazioni non emerge il contributo quantitativo della **CSCC** alla dissipazione dell'energia di caduta del peso.

Per avere delle indicazioni in tal senso, per la **corda dinamica nuova**, occorre esaminare i relativi grafici delle curve $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$, che definiscono il variare dell'Allungamento massimo in funzione della successione degli choc con altezza di caduta del peso crescente (**Figura 179**), e confrontarle con le analoghe curve della **corda Beal Antipodes statica nuova** (pag. 218, **Figura 172**), entrambe con fili di Nylon 6 ma con strutture complesse della corda differenti.



Le analogie di andamento e dislocazione sono evidenti, ma con due differenze, una d'interesse marginale e l'altra sostanziale:

1. per la prima differenza, contrariamente a quanto accade nell'Antipodes **statica**, nella Booster dinamica il **fattore n° choc** produce una evidente **diminuzione** dell'Allungamento massimo, tanto più marcato quanto maggiore è l'altezza di caduta del peso;
2. per la seconda, i **ranges iniziali e finali** dei valori di A_0 sono molto differenti, tanto che quelli della **corda dinamica** sono più che **raddoppiati** rispetto a quelli della **corda statica**.

Per definire quanto affermato con il secondo punto, ecco i dati:

per la corda Nylon 6 dinamica nuova	iniziale	0,800 – 1,400 m	finale	0,700 – 1,200 m
per la corda Nylon 6 statica nuova	iniziale	0,300 – 0,700 m	finale	0,300 – 0,700 m

Non potendo imputare il raddoppio dell'Allungamento massimo a una modifica del Fattore di perdita **tang δ** (e quindi dello stato visco-elastico dei fili elementari; si vedano la **Figura 150** a pag. 186 e la **Figura 156** a pag. 193), è consequenziale che il **raddoppio dell'allungamento massimo** è dovuto a uno, o più fattori, strettamente legati alle caratteristiche **geometriche e strutturali** della corda dinamica.

Infatti:

1. la **corda dinamica Booster III 9,7 mm nuova** ha una Superficie efficace pari a $S_e = 34,1 \text{ mm}^2$ contro una $S_e = 48,8 \text{ mm}^2$ della **corda statica Antipodes 10 mm nuova**; come a dire il **30 % in meno di materiale** polimerico a contrapporsi agli allungamenti conseguenti alle applicazioni di carico;
2. la particolare **bassa tensione** e la **tessitura particolare delle maglie e dei trefoli** che compongono la **struttura complessa della corda dinamica Booster III** fa sì che l'allungamento sia amplificato ulteriormente per il contributo della CSCC.

Pertanto è possibile affermare che - rispetto alla corda **statica** Beal Antipodes 10 mm **nuova** - la corda **dinamica** Beal Booster III 9,7 mm **nuova** riceve un contributo alla dissipazione dell'energia, che comporta la caduta del peso, pari al **70 %** (se non maggiore) dalla **CSCC** e pari al **30 %** per la ridotta Superficie efficace.

Questa constatazione sperimentale è verosimilmente estendibile per ogni altro rapporto corda statica/corda dinamica, purché i fili elementari siano costituiti dallo stesso tipo di poliammide.

Occorre sottolineare che una valutazione più precisa del contributo dissipativo della CSCC richiederebbe ulteriori analisi e test più specifici.

C'è da ricordare, infine, che la dissipazione avviene anche tramite gli **attriti e la produzione di calore** (disperso nell'ambiente circostante) per un valore percentuale pari al **13 %**, al massimo (*pag. 210*).

Da queste ultime considerazioni emerge inoltre che una porzione quantitativamente rilevante (circa il 30 %) della capacità di assorbire energia di una corda dinamica viene affidata alla diminuzione della Superficie efficace.

Ma questo comporta anche, inopinatamente, che ci sia meno materiale a opporsi alla rottura della corda e quindi un Carico di rottura F_r ridotto, come viene evidenziato nella tabella che segue:

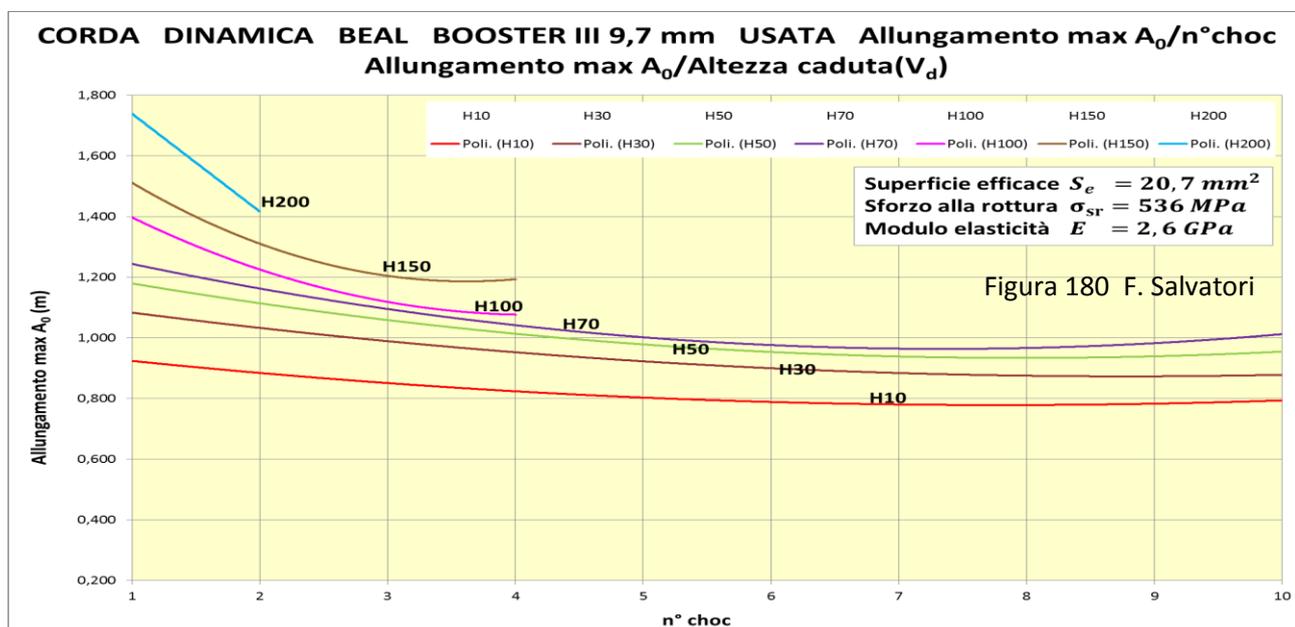
dinamica Beal Booster III 9,7 mm	nuova 1862 kgp	usata 1370 kgp
statica Beal Antipodes 10 mm	nuova 2666 kgp	usata 1370 kgp

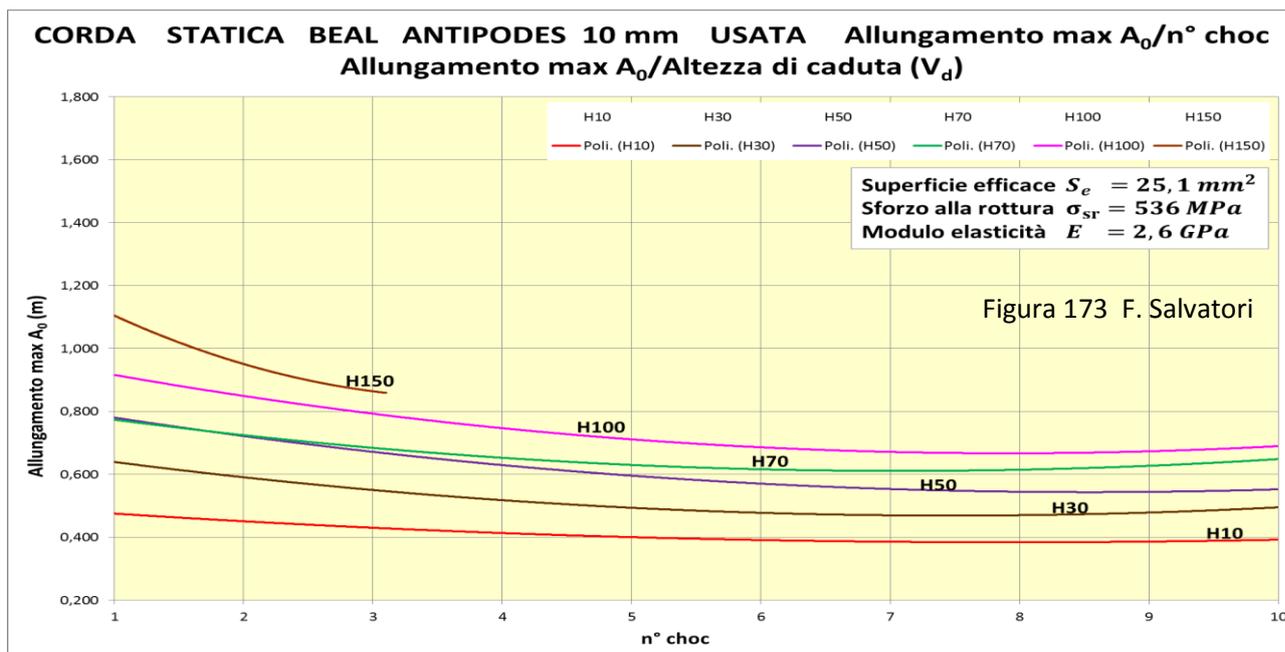
Quanto valutato indica che la **corda dinamica** è uno strumento con **ridotte capacità di tenuta**, capacità sacrificate per ottenere una maggiore deformabilità.

Si noti che le rispettive **corde usate** hanno gli stessi Carichi di rottura (1370 kgp). Questa identità di valori è conseguenza del diverso uso fattone: in grotta l'Antipodes ha subito un degrado legato a più fattori molto efficaci (acqua, calore nella discesa e abrasione, soprattutto); in parete d'arrampicata i fattori degradanti sono solamente il susseguirsi degli choc e il calore derivante dalle calate con freni.

E' ben immaginabile quale potrebbe essere il degrado della corda dinamica se fosse stata utilizzata in grotta, dove, fra l'altro, l'abrasione sulle asperità delle pareti poteva contare sulla bassa tensione della tessitura delle maglie della calza, con conseguente facilità d'appiglio e rottura dei fili elementari.

01.h.h.4.) Quarta considerazione: valutazione del contributo dissipativo della CSCC su corde usate – Considerando i risultati sperimentali ottenuti con la corda **dinamica** Beal Booster III 9,7 mm **usata** (**Figura 180**) e con la corda **statica** Beal Antipodes 10 mm **usata** (*pag. 218, Figura 173*, qui sotto replicata), i ranges dei valori iniziali e finali delle curve $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$ mostrano un aumento medio di quasi il 50 % (vedi tabella a seguire).





per la corda Nylon 6 statica usata	iniziale	0,470 – 1,120 m	finale	0,400 – 0,700 m
per la corda Nylon 6 dinamica usata	iniziale	0,930 – 1,750 m	finale	0,800 – 1,000 m

La “dinamica” ha un incremento medio dei valori di A_0 rispetto alla “statica” di quasi il 50 %, incremento che aumenta ancora con i test a caduta a maggior contenuto energetico (H200).

Questa rilevante crescita “anomala” dei valori degli Allungamenti massimi medi è dovuta agli stessi due fattori indicati per valutare il calcolo del contributo della CSCC nella corda dinamica Booster III nuova:

1. l’ulteriore diminuzione della Superficie efficace del 18 % (da 25,1 mm² a 20,7 mm²),
2. la possibile CSCC residua.

Pertanto, **rispetto alla corda statica Antipodes usata**, la **Booster dinamica mantiene ancora una condizione della struttura complessa della corda** che fornisce oltre il **70 % della dissipazione** dell’energia.

Ma questa valutazione, solo apparentemente positiva, non deve trarre in inganno: la drastica riduzione della Superficie efficace dai 48,8 mm² della corda statica nuova ai 20,7 mm² della corda dinamica usata nell’arrampicata sportiva, rende quest’ultima uno strumento quasi incapace di sopportare l’applicazione dei carichi prevedibili nella progressione alpinistica.

Se poi, ipoteticamente, si valutasse nei termini sin qui utilizzati una corda dinamica **usata in grotta**, risulterebbe verosimilmente **degradata a tal punto da non garantire alcuna sicurezza**, anche nelle manovre a minor contenuto energetico.

01.i) Valutazione delle variazioni del Modulo d’elasticità E in funzione del Numero di choc n° choc e della Velocità di deformazione V_d

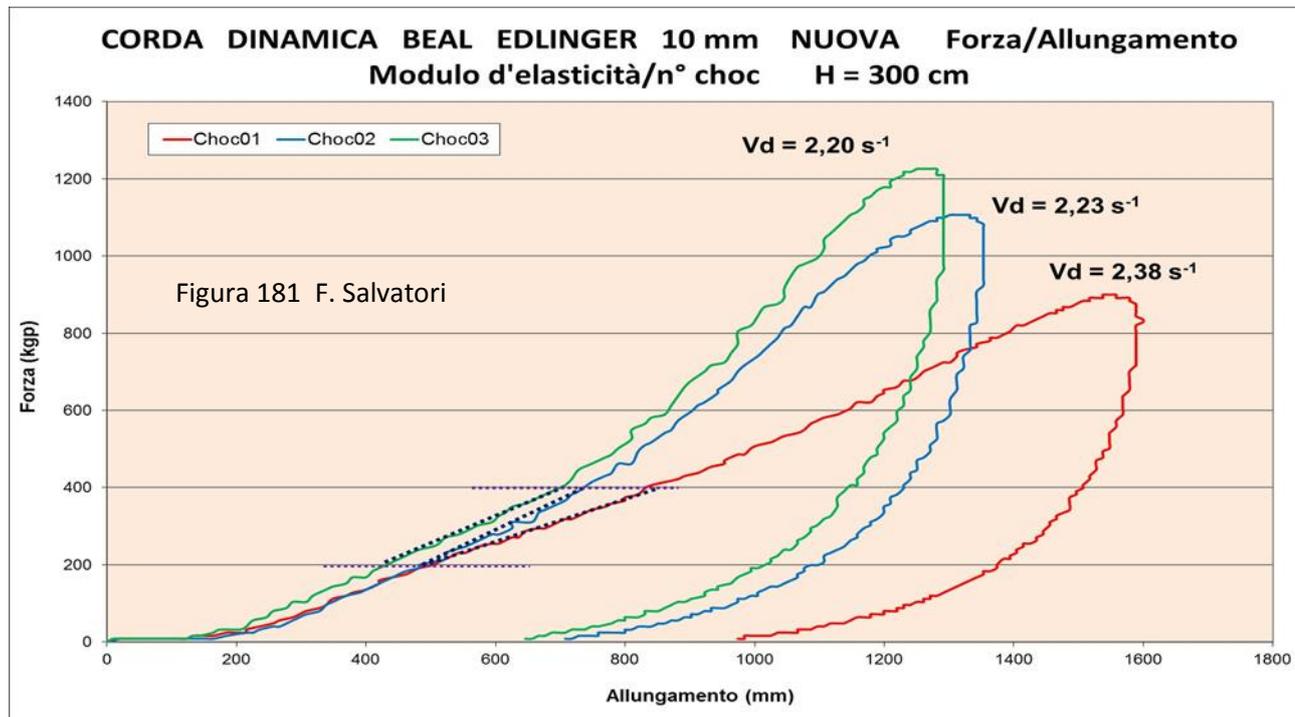
01.i.a.) Premessa - Ricordiamo che il Modulo d’elasticità della corda è ricavato - sulla base della relazione $\tan \alpha = E$ - dalla pendenza α della curva di carico $F = f(A)$ della corda stessa (linee oblique punteggiate), presa nel tratto compreso fra le ordinate $F = 200 \text{ kgp}$ e $F = 400 \text{ kgp}$. Tanto più è elevato il suo valore tanto più è rigido il campione testato.

Ricordiamo che E è un misura **indicativa** della **rigidità** del campione sottoposto a trazione, che nel caso di una **corda speleo-alpinistica** varia con la Forza di trazione F , come è reso evidente nella **Figura 21** (pag. 32) per la trazione lenta su una corda e nella **Figure 37** (pag. 45) per un test a caduta. Le curve di carico hanno una pendenza che cresce con l’incremento della forza di trazione: il Modulo d’elasticità E è variabile in funzione della Forza applicata, e cresce man mano che questa aumenta.

Questo rende comprensibile la motivazione che impone di calcolare il modulo facendo riferimento al solo tratto 200 – 400 kgp, unico in cui si può registrare un andamento pressoché **lineare**.

Lo sviluppo quasi totalmente **non - lineare** delle curve $F = f(A)$ non permette infatti di utilizzare E come rappresentativo di tutto lo sviluppo del grafico Forza/Allungamento. E' responsabile di questa situazione soprattutto la struttura molto complessa e anisotropa della corda.

Per meglio comprendere nella sostanza ciò che si va analizzando, riportiamo, a titolo d'esempio, i grafici della **Figura 181**, relativa al primo ciclo d'isteresi di un **test con caduta** libera di 300 cm di un peso (140 kgp) al variare del n° di choc: dal primo al terzo. Stesse considerazioni, mutatis mutandis, valgono per una trazione lenta.



Con il tratteggio sono stati resi evidenti i tratti di curva, compresi fra $F = 200 \text{ kgp}$ e $F = 400 \text{ kgp}$, dove, attraverso la relazione $\tan \alpha = E$, è stato calcolato il Modulo d'elasticità.

Si evidenzia, considerazione valida nel caso specifico ma anche in generale, che:

1. al crescere del n° di choc la pendenza dei tratti considerati delle curve di carico cambia e il Modulo d'elasticità di conseguenza aumenta (la corda diventa più rigida);
2. in tutte e tre le curve di carico la pendenza è in aumento col crescere della forza traente; la corda infatti perde progressivamente deformabilità con l'allungamento;
3. nel tratto iniziale, da ascissa **0 mm** ad ascissa **200 mm**, le curve avanzano con forze quasi nulle, facilitate nella trazione dalla grande deformabilità derivante soprattutto dalla strizione dei nodi; è un tratto con incidenza energetica trascurabile;
4. successivamente, aumentando le forze di trazione, entra in gioco la **CSCC** (*Compattazione della Struttura Complessa della Corda*) che richiede sollecitazioni a bassa intensità e non segue le regole dello stato visco-elastico del materiale poliammidico (nessun Tempo di ritardo δ a condizionare);
5. crescendo ancora la forza di trazione, diminuisce il contributo dissipativo della **CSCC** e subentra, sempre gradualmente, l'elongazione dei fili elementari, sottoposta alle regole della visco-elasticità (soprattutto al Tempo di ritardo δ);
6. aumentando ancora l'intensità della forza di trazione si raggiunge l'allungamento massimo, avendo dissipato tutta l'energia messa in gioco dalla caduta del peso, e inizia il rimbalzo del peso con la restituzione di tutta l'energia accumulata nelle deformazioni reversibili, sia legate alla CSCC che alla visco-elasticità (se l'energia prodotta dalla caduta del peso è superiore al lavoro alla rottura della

corda, questa cede e l'isteresi non può compiersi, annullando ogni possibilità d'Analisi Dinamica Meccanica);

7. l'effetto del primo choc (**Choc01**) sulla corda **nuova** produce delle deformazioni permanenti, misurabili nel loro complesso con l'estensione della superficie di plasticità compresa fra curva di carico e scarico;
8. le modifiche imposte con il primo choc nella CSCC e nello stato visco-elastico impongono ai dati ricavati con il secondo choc (**Choc02**) di mostrare un aumento del Modulo, cioè della rigidità della corda; la curva si disloca più eretta e la superficie di plasticità riduce la sua estensione;
9. per lo choc successivo (**Choc03**) la deformabilità disponibile è diminuita ulteriormente, ma non quanto è accaduto con il primo choc; il grafico si disloca verso l'alto per l'aumento della rigidità, ma in misura minore rispetto a quanto è accaduto con il secondo choc, e la superficie di plasticità ha ridotto ancora la sua estensione;
10. se si proseguisse nell'applicazione di altri choc la dislocazione verso l'alto proseguirebbe, ma con incrementi sempre più ridotti, finché le curve di carico andrebbero ad assumere pendenze quasi coincidenti e le superfici di plasticità vedrebbero diminuire progressivamente la loro estensione.

Attenzione: è possibile riconoscere e giustificare le dinamiche esposte nei soprastanti 10 punti in tutto quello che è stato analizzato ed elaborato in questa **Parte VI**, in particolare, e nelle altre parti, in generale.

È indubbio che il valore del **Modulo E** è in funzione di tutte le possibili deformazioni che la corda subisce sotto trazione (*pag. 178 e seg.*)

Tuttavia, dato che le **sollecitazioni che determinano E** sono di **basso contenuto energetico** (max 400 kgp), il Modulo d'elasticità è una **misura soprattutto dell'influenza della CSCC**. Infatti s'inizia a dissipare con la CSCC, per poi, gradualmente, affiancare e infine sostituire con la deformabilità legata allungamento dei fili elementari, e quindi con la visco-elasticità.

Ma quest'ultimo fenomeno dissipativo marca in modo significativo la curva quando si sorpassano i 400 kgp di forza di trazione. E quindi quanto descritto indica che le **valutazioni sul Modulo d'elasticità** sono **competenti**, in modo particolare, per la **CSCC**.

Ma i valori di **E** , visto i limiti entro i quali variano i carichi che li producono, sono anche appropriati per valutare gli effetti sul **decadimento delle corde speleo** prodotto dalle **sollecitazioni normali della progressione in grotta**, la cui entità può essere definita osservando i grafici delle **Figure 134 – 135** (*pag. 151*).

Un **particolare rilievo** riveste il fatto che il **Modulo d'elasticità E** è **indipendente** dalla **quantità di materiale polimerico** che si oppone alle deformazioni. Infatti esso è espresso dalla relazione:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

che deriva dalla **Relazione 1** (*pag. 23*).

Dove:

$$\sigma = F/S \quad (N/m^2 = Pascal = Pa)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

l_0 = lunghezza del campione a riposo

l = lunghezza del campione traziionato

E = modulo d'elasticità o di Young ($N/m^2 = Pascal = Pa$)

L'utilizzo dello Sforzo σ infatti riferisce ogni mutamento all'unità di misura (in questo caso mm^2) delle Sezione efficace S_e , permettendo di non tenere conto delle sue variazioni di valore per effetto dell'usura della corda (nell'analisi dei fattori dissipativi precedentemente presi in considerazione ciò non è stato possibile attuare).

In conclusione si può affermare che **l'esame del Modulo E** permette di **valutare**, in modo preciso, il **ruolo della CSCC nella dissipazione dell'energia** in gioco nei test, colmando una lacuna lasciata nelle speculazioni sviluppate in precedenza.

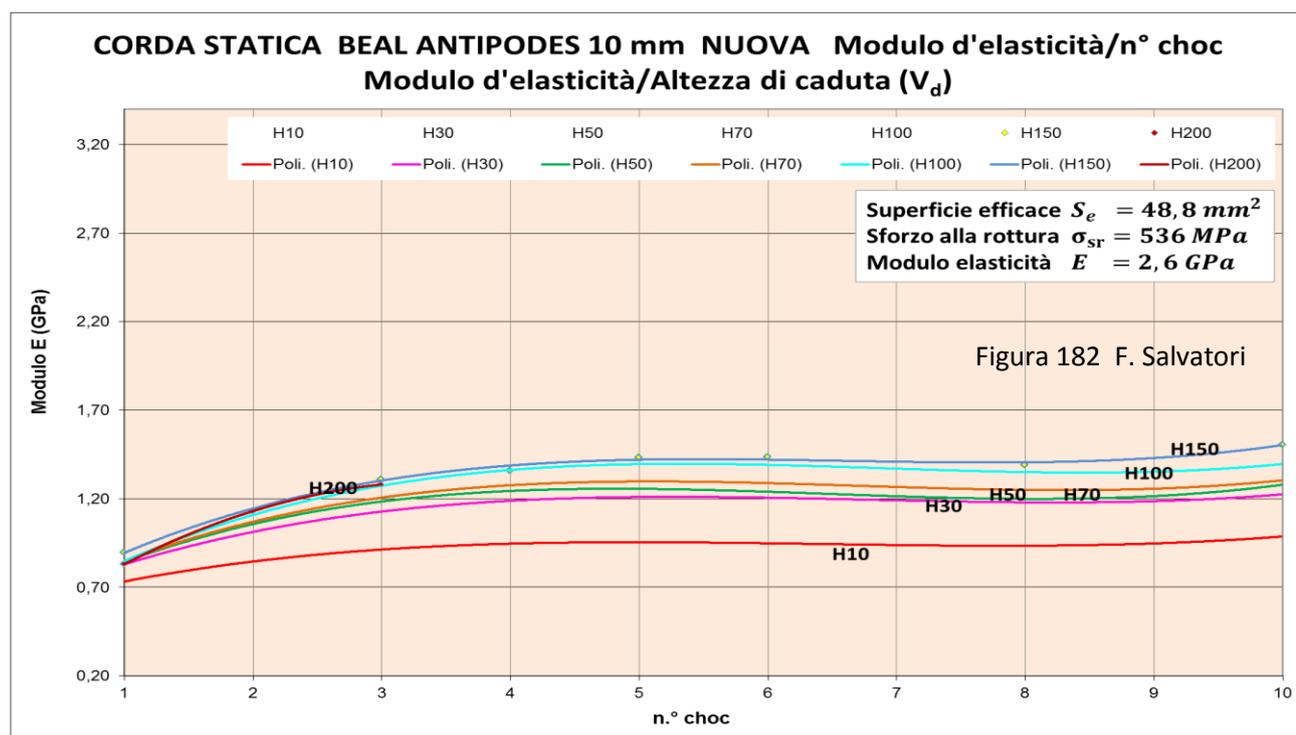
Pertanto in questo Sotto-capitolo sono sottoposte a valutazione le curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ e/o $E = f(V_d)$ con l'obiettivo di completare il quadro quantitativo delle conoscenze dei fattori che determinano il decadimento delle corde speleo-alpinistiche sottoposte a test a trazione veloce in funzione del n° di choc e della Velocità di deformazione.

I grafici qui esposti sono stati costruiti con le stesse modalità di quelli contenuti nei paragrafi precedenti. Sono confermate anche le valutazioni sulla loro validità statistica, sperimentale e d'analisi.

Sono grafici costruiti, nelle dimensioni e nelle graduazioni degli assi di riferimento, **in modo da essere sovrapponibili** per efficaci e facili confronti con sovrapposizione.

01.i.b.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Beal Antipodes 10 mm, nuova e usata Nylon 6

Nei grafici della **Figura 182** sono diagrammati i dati relativi alla corda Antipodes Nylon 6.



01.i.b.1.) Prima considerazione: progressivo aumento della rigidità con il succedersi del n° degli choc e con l'aumento dell'altezza di caduta del peso – Come è prevedibile la rigidità aumenta con il crescere del n° choc e l'Altezza H di caduta del peso: ad ogni choc la corda perde parte della sua deformabilità (l'esistenza della superficie di plasticità nei cicli d'isteresi lo dimostra) e perde progressivamente la capacità di assorbire energia. Di ciò ne risente inevitabilmente la misura del Modulo d'elasticità, che va aumentando di valore.

Occorre precisare che, sulla base di quanto indicato nella precedente Premessa (pag. 227), questo fenomeno di decadimento è legato in modo quasi esclusivo alla CSCC, che in tal modo può essere valutata sia nella sua dinamica che nella quantità del contributo.

Comunque il gradiente di questa crescita non è uniforme:

1. in un primo settore da Choc 01 a Choc 03 il valore di E aumenta in modo evidente ma attenuando via via gli incrementi;
2. a iniziare dallo Choc 04 fino Choc 08 la crescita scompare e il Modulo d'elasticità mantiene costante il suo valore;
3. nella parte finale della serie di choc (da Choc 08 a Choc 10) le curve tornano a salire.

Questo significa che la compattazione della struttura complessa della corda non reagisce sempre con la stessa intensità. Inizialmente le deformazioni che subisce sono in gran parte irreversibili (sottraendo capacità d'assorbire energia); irreversibilità che successivamente si va riducendo, fino al punto di annullarsi nel settore intermedio dove E si mantiene costante.

Nella parte finale della serie di choc, le deformazioni tendono di nuovo a essere parzialmente irreversibili e le curve tornano di nuovo a salire. Ma a questo punto occorre tenere presente che l'aumento di E potrebbe anche essere dovuto all'esaurimento della CSCC ed all'entrata in gioco di allungamenti propri dei fili elementari, come a dire la visco-elasticità (distinguere con esattezza l'eventuale confine, non è facile).

L'andamento delle curve appena descritto si ripete - fatti salvi i valori assoluti del Modulo che possono variare - in tutte le altre curve che sono esaminate in questo Paragrafo.

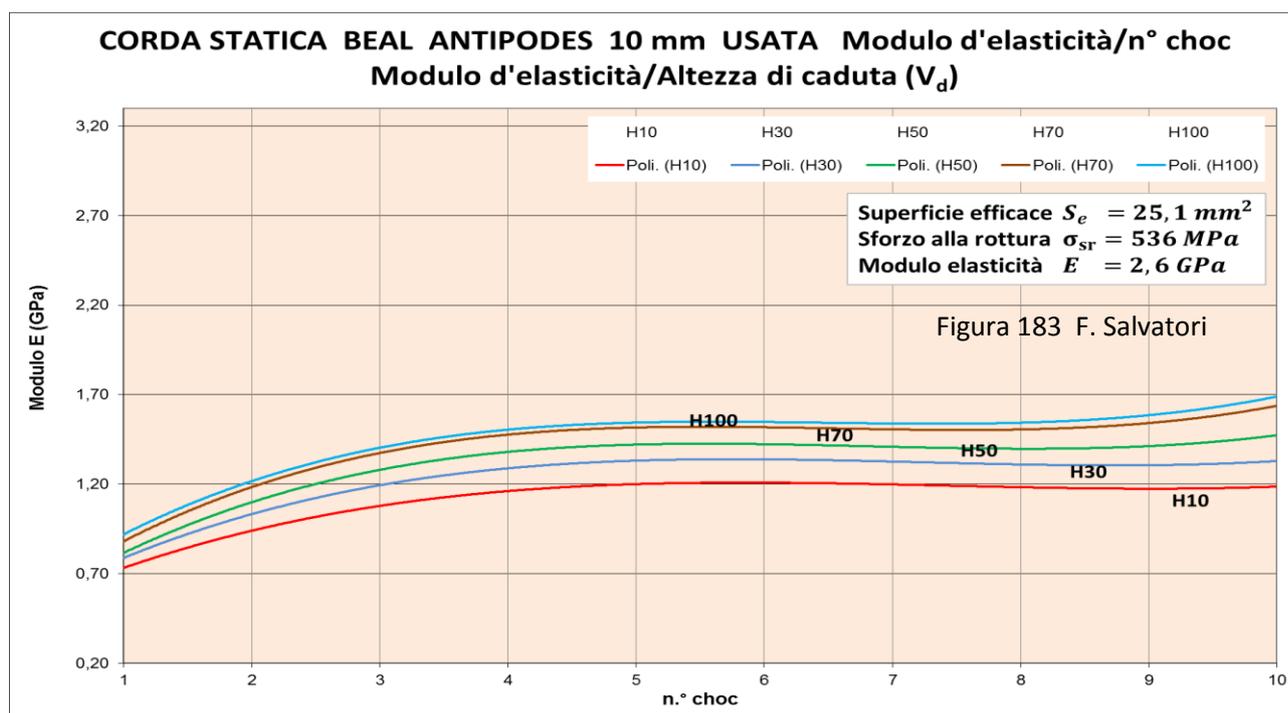
Da notare che - e non poteva essere altrimenti - l'andamento delle curve $E = f(n^{\circ}choc)$ è inverso rispetto a quello delle curve $\%Dissipazione = f(n^{\circ}choc)$, $A_0 = f(n^{\circ}choc)$, $tang \delta = f(n^{\circ}choc)$.

01.i.b.2.) Seconda considerazione: confronto con l'equivalente corda usata – Nella **Figura 183** sono diagrammati i dati sperimentali della corda statica Beal Antipodes 10 mm usata .

Data la similitudine negli andamenti, nelle dislocazioni e perfino nei valori assoluti di E con quanto accade con la l'equivalente corda nuova, possiamo concludere che la CSCC mantiene la sua funzione nella dissipazione dell'energia di caduta del peso anche con le corde usate.

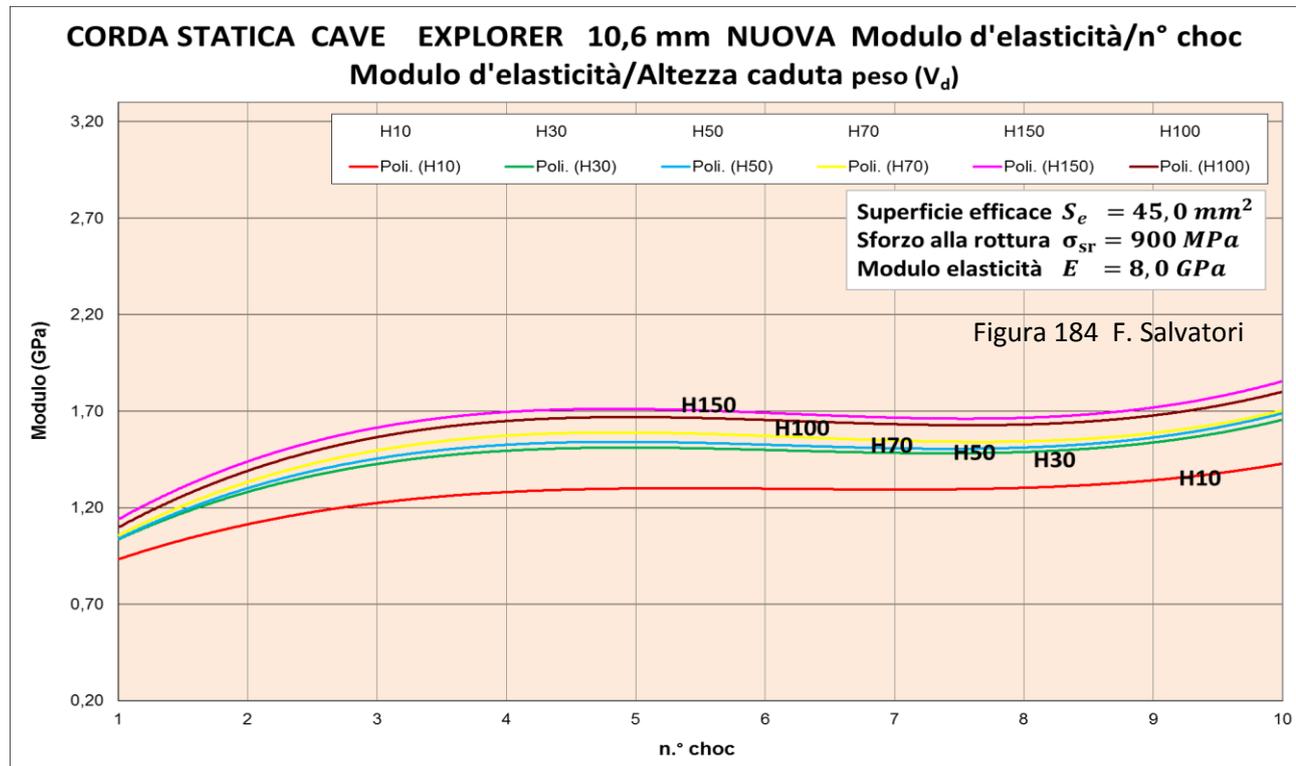
Si ripete quanto detto nella Premessa: sul valore di E non ha influenza la netta diminuzione della Superficie efficace, che invece procura l'uso. E' così confermato che il Modulo d'elasticità è dipendente solo dalla CSCC e dal comportamento della parte visco-elastica della corda, i fili elementari.

Infine, l'usura non determina una variazione consistente della deformabilità delle trame e dei trefoli della struttura complessa della corda, che mantiene i meccanismi di "allungamento" della corda nuova.



01.i.c.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm, nuova e usata Nylon 6.6

Nei grafici della **Figura 184** sono diagrammati i dati relativi alla corda Cave Explorer **Nylon 6.6**.



01.i.c.1.) Prima considerazione: identità sostanziale con quanto registrato per la corda statica Antipodes Nylon 6 – Sono evidenziabili solo qualche minima differenza nei ranges dei valori iniziali e finali di E .

Infatti, il diverso materiale polimerico che costituisce i fili elementari delle due corde non determina alcuna differenza di deformabilità.

Come pure la netta differenza del modulo d'elasticità (**8,0 GPa** contro **2,6 GPa**) dei **fili elementari** (non della corda!) non dà segno d'influenzare i valori di E .

Sono questi fatti che danno un'ulteriore forte conferma che il **Modulo d'elasticità rappresenta** compiutamente **solo la CSCC**, visto che l'opposizione agli allungamenti delle trame della calza e dello svolgimento dei trefoli non dipende dalla natura chimico-fisica dei fili elementari che s'intrecciano nella corda.

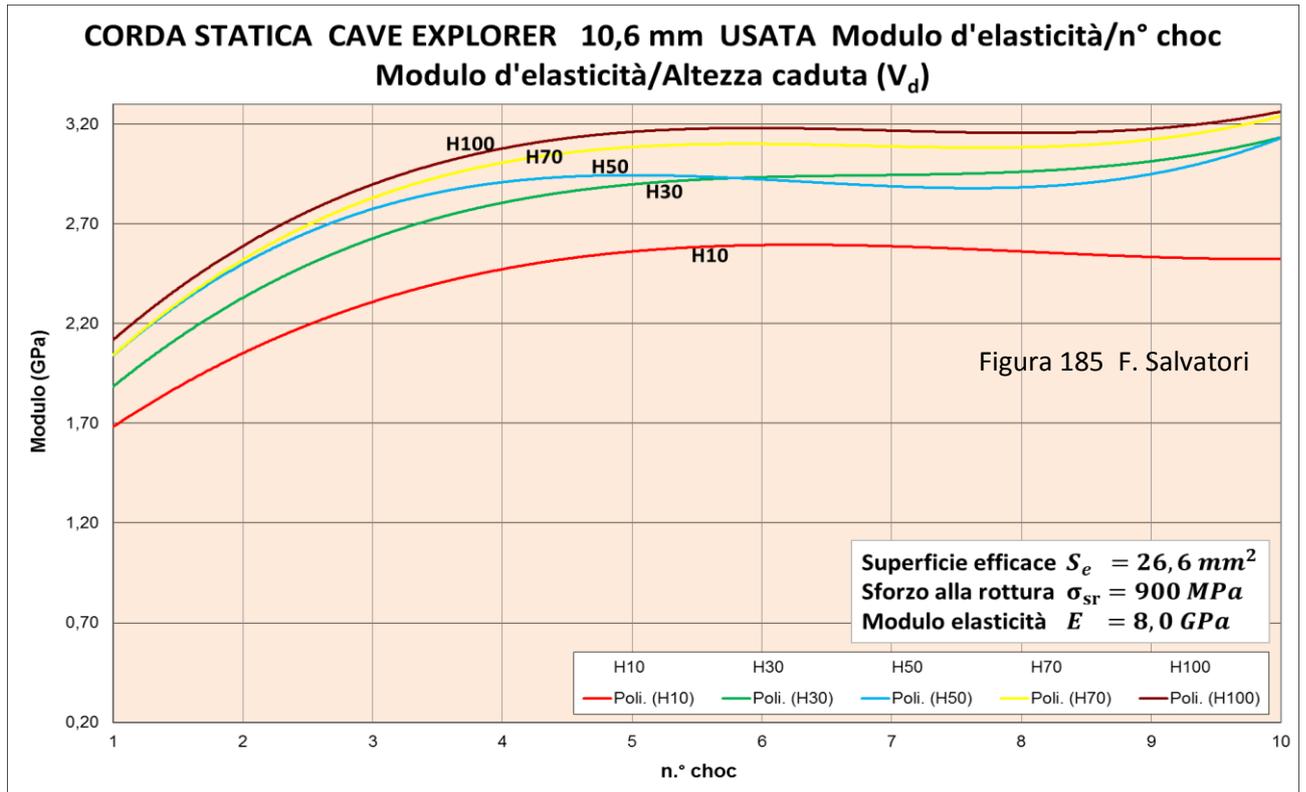
E' altrettanto evidente che il confezionamento della **struttura complessa** nelle due **corde statiche** in esame si equivale (verosimilmente questa conclusione è estendibile a tutte corde classificate "statiche").

01.i.c.2.) Seconda considerazione: confronto con l'equivalente corda usata – Nella **Figura 185** sono disposti i grafici relativi alle curve della corda statica Cave Explorer 10 mm **usata**.

Sovrapponendo i grafici della **Figura 185** con quelli della **Figura 184**, emerge con estrema chiarezza che in questo caso una differenza nella condizione nuova/usata esiste: i valori dei ranges iniziali e finali di E , sintetizzati nella tabella che segue.

per la corda Nylon 6.6 statica nuova	iniziale	0,95 – 1,10 GPa	finale	1,40 – 1,72 GPa
per la corda Nylon 6.6 statica usata	iniziale	1,70 – 2,10 GPa	finale	2,50 – 3,15 GPa

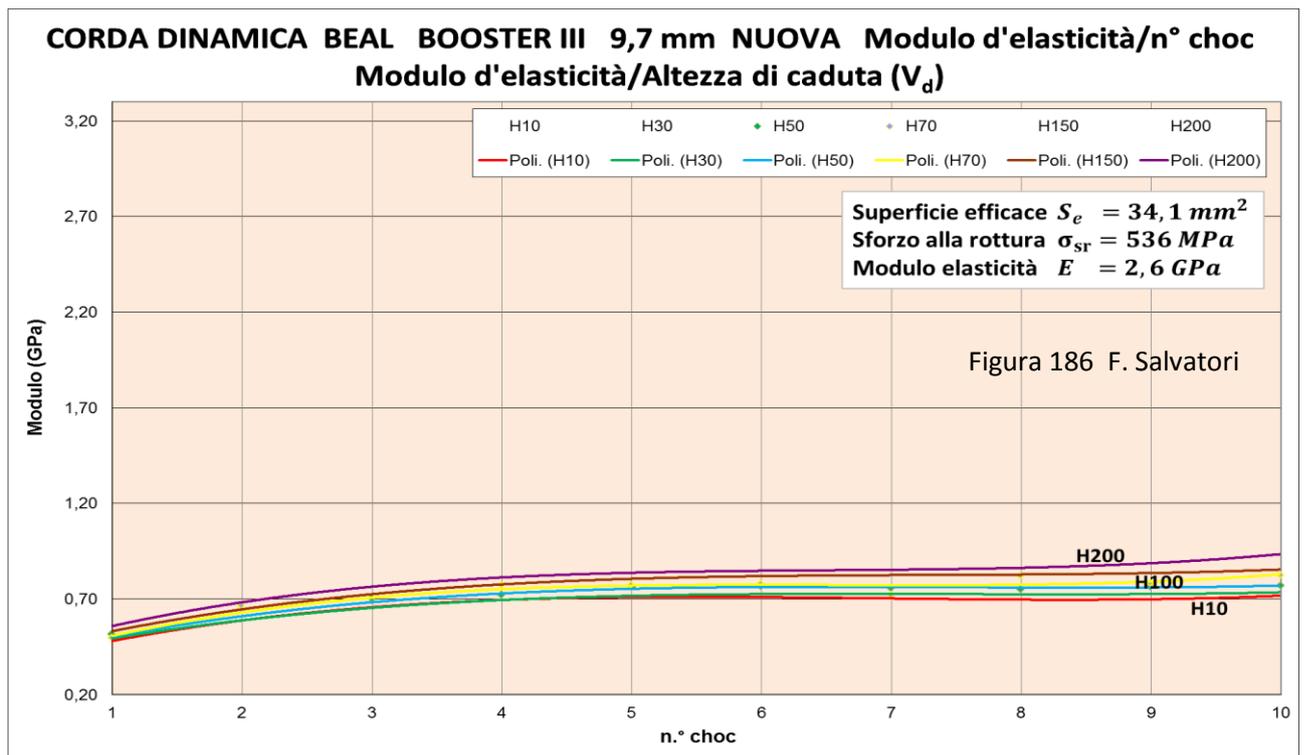
E' evidente che nella corda statica Cave Explorer l'uso in grotta ha ridotto il contributo dissipativo della CSCC; e sin dall'inizio della trazione si oppongono all'allungamento anche i fattori dissipanti propri dei fili elementari, legati alla visco-elasticità; per di più amplificati dall'elevato Modulo d'elasticità del Nylon 6.6.



L'accentuazione dell'ondulazione delle curve relative a questa corda è un altro segno che le deformazioni visco-elastiche dei fili elementari intervengono nella dissipazione d'energia anche nel settore iniziale, dove, infatti, si manifesta un andamento che ricalca, giustamente all'inverso, quello del Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ (pag. 193, Figura 156).

01.i.d.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda dinamica Beal Booster III nuova Nylon 6 e confronto con la Corda statica Beal Antipodes nuova Nylon 6

Nella Figura 186 sono riportate le curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ relative alla corda dinamica Beal Booster III nuova Nylon 6.



Sovrapponendo queste curve a quelle della **corda statica nuova**, rappresentate nella **Figura 182** (pag. 230) emerge una differenza rilevante fra i ranges iniziali e finali dei valori di E , come si evidenzia dalla tabella che segue:

per la corda Nylon 6 statica nuova	iniziale	0,70 – 0,90 GPa	finale	0,75 – 1,45 GPa
per la corda Nylon 6 dinamica nuova	iniziale	0,45 – 0,55 GPa	finale	0,70 – 0,80 GPa

01.i.d.1.) Prima considerazione: valutazione del contributo della CSCC nella dissipazione d'energia nella corda dinamica - Le differenze nei valori del Modulo d'elasticità indicate nella tabella soprastante sono, ovviamente, dovute al diverso modo di confezionare la struttura complessa della corda dinamica rispetto alla statica: E ha quasi dimezzato il suo valore e in media diminuisce di circa il 40 %, equivalente a poco meno del raddoppio della deformabilità. Percentuale, questa, propria delle corde dinamiche.

Valore percentuale, questo, compatibile con quanto calcolato sulla base delle misurazioni ottenute per gli Allungamenti massimi.

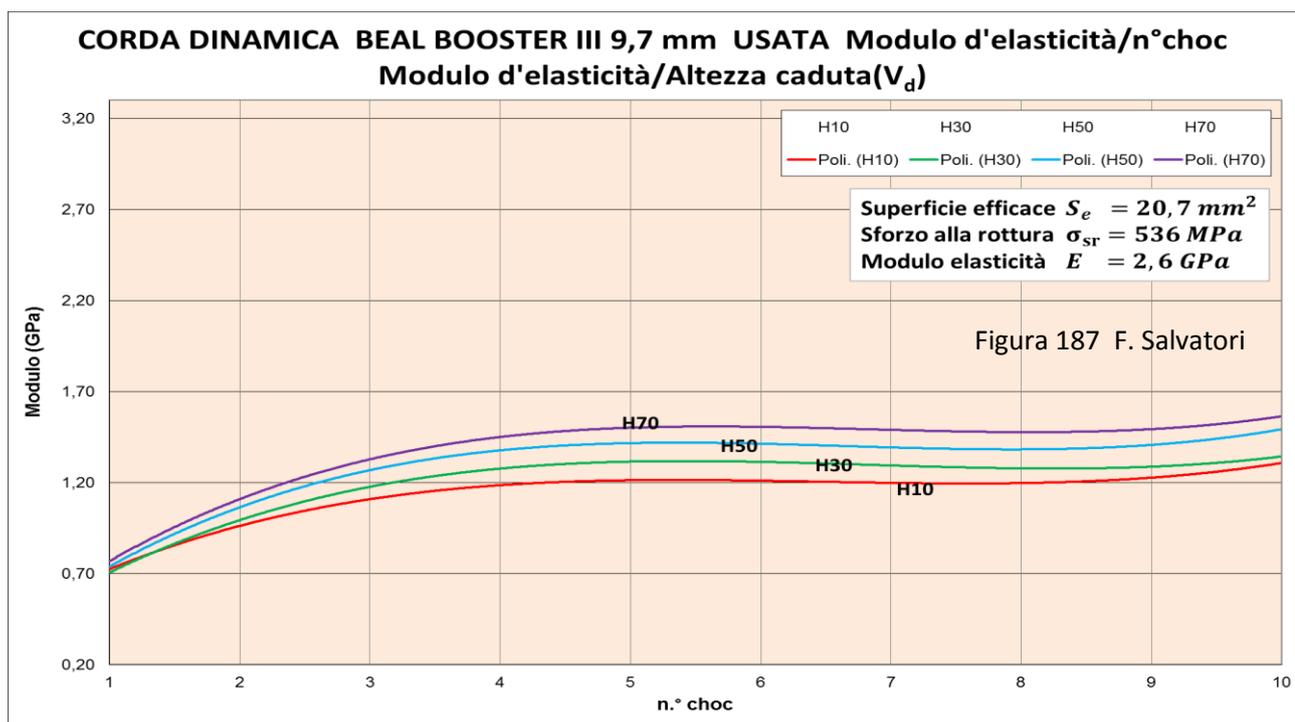
Da questo specularsi viene dunque una nuova conferma che è la CSCC il fattore distintivo delle corde dinamiche, quantizzabile in una capacità maggiorata specifica d'assorbimento d'energia del 40 % e più.

E ogni azione che elimini questa particolare strutturazione del confezionamento di una corda dinamica la fa regredire a "statica" o in una condizione di ulteriore rigidità.

01.i.d.2.) Seconda considerazione: confronto fra corda dinamica usata e corda statica nuova – Le curve della **Figura 187** (corda dinamica usata) sono coincidenti per andamento, dislocazione e valori con quelle della **Figura 182** (corda statica nuova).

Come a dire che la corda dinamica viene ridotta alla condizione "statica" dall'uso fattone in arrampicata sportiva (tre anni d'intensa attività), eliminando di fatto, fra l'altro, quasi tutta la sua strutturazione atta a permettere la CSCC.

Vale la pena di ricordare, ancora una volta, che nella **Figura 187** sono rappresentate solo le curve $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ corrispondenti alle altezze di caduta minori. L'usura infatti ha degradato a tal punto la corda dinamica (Superficie efficace pari a $20,7 \text{ mm}^2$) da abbassare il Carico di rottura F_r a valori così bassi da raggiungere il cedimento dei fili elementari e, quindi, la rottura della corda in test a maggiore contenuto energetico. Ancora una volta si mostra come le corde dinamiche, specie se utilizzate in grotta, sono pericolose.



01.j) Valutazione delle variazioni della Superficie efficace S_e in funzione del Numero di choc $n^\circ \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione V_d

01.j.a.) Premessa – Si ricorda che la Superficie efficace S_e è equivalente alla sezione trasversale “ideale” di una corda, non più confezionata dall'intreccio dei fili elementari della sua struttura complessa ma costituita invece da una “barra o tondino o altro elemento a struttura geometrica uniforme e isotropo” con sezione trasversale equivalente alla somma di tutte le sezioni trasversali dei fili elementari che compongono la corda in esame.

Si calcola, misurando il Carico di rottura senza nodi della corda stessa, attraverso la **Relazione 7** (pag. 29):

$$S_e = \frac{F_r}{10^3 \cdot T \cdot \rho} \text{ mm}^2 \quad (7)$$

dove:

F_r = carico di rottura senza nodi (N)

T = tenacità del filo elementare (N / tex)

ρ = densità del filo elementare (g/cm^3)

La Tenacità è una caratteristica meccanica (pag. 281, **Appendice01**) che misura la capacità dei fili elementari isotropi di poliammide a resistere alle sollecitazioni/allungamenti. Ogni fibra ha il suo valore, che per i tipi di Nylon che si usano nelle corde vale:

Nylon 6 $T = 0,47 \text{ N/Tex}$

Nylon 6.6 $T = 0,64 \text{ N/Tex}$

Valori per fili elementari in **corda nuove**, mai utilizzate.

Ma la condizione originaria dei fili elementari nelle corde cambia con l'uso, in grotta o parete d'arrampicata che sia, variando tanto nel numero quanto nella condizione di opporsi all'allungamento e alla rottura.

In primo luogo, la variazione del numero di fili elementari può essere conseguente, specie nella progressione speleologica, all'abrasione nella calza (pag. 148, **Figura 131**) che porta alla rottura di alcuni di essi.

In secondo luogo, il materiale polimerico che compone i fili elementari varia la sua “qualità” a causa soprattutto dell'usura prodotta dalle azioni degradanti dovute all'idrolisi, alla degradazione idrolitica, alla depolimerizzazione, ai gas ossidanti, alla fotodegradazione, al calore e al susseguirsi dell'applicazione di carichi blandi e/o intensi e lenti e/o veloci (**Parte III**). Sono queste tutte azioni che producono deformazioni permanenti tanto nella struttura complessa della corda come nella consistenza visco-elastica, facendo, di fatto, diminuire la cristallinità dei fili elementari (pag. 63 e seg., **Figure 55 – 56 – 57**).

Nella sostanza questo significa che le fibre di poliammide perdono la proprietà di resistere agli allungamenti, alla rottura, rendendosi più plastiche e la loro Tenacità diminuisce.

Pertanto, quando si va a calcolare la Superficie efficace S_e di una corda usata, risulta sempre inferiore a quella della stessa corda nuova, essendo la prima composta da un numero inferiore di fili elementari e con proprietà meccaniche degradati di qualità.

In buona sostanza, mantenendosi la stessa **Tenacità originaria** (quella dei fili elementari nella corda nuova), le variazioni della Superficie efficace S_e sono un'indicazione quantitativa importate per registrare quanto materiale si perde con l'usura. Di fatto questo rende possibile un confronto nuovo/usato che si basa su una valutazione globale degli effetti degradanti, misurata esattamente con la diminuzione della massa di materiale polimerico resistente.

01.j.b.) Condizioni sperimentali

Le corde sono state sottoposte a test del tutto uguali a quelli che hanno portato all'elaborazione di tutti i grafici prima esposti in questa **Parte VI**.

I tipi di corde sono gli stessi dei precedenti test a caduta:

1. statica Nylon 6 Beal Antipodes 10 mm **nuova**,
2. statica Nylon 6 Beal Antipodes 10 mm **usata**,
3. statica Nylon 6.6 Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm **nuova**,
4. statica Nylon 6.6 Cavaliere Cave Explorer 10,6 mm **usata**,
5. statica Nylon 6 Beal Booster III 9,7 mm **nuova**,
6. statica Nylon 6 Beal Booster III 9,7 mm **usata**.

La successione è ancora di 10 choc. Come pure è equivalente la progressione di crescita delle altezze di caduta del peso: H10 cm - H30 cm - H50 cm - H70 cm - H100 cm - H150 cm - H200 cm.

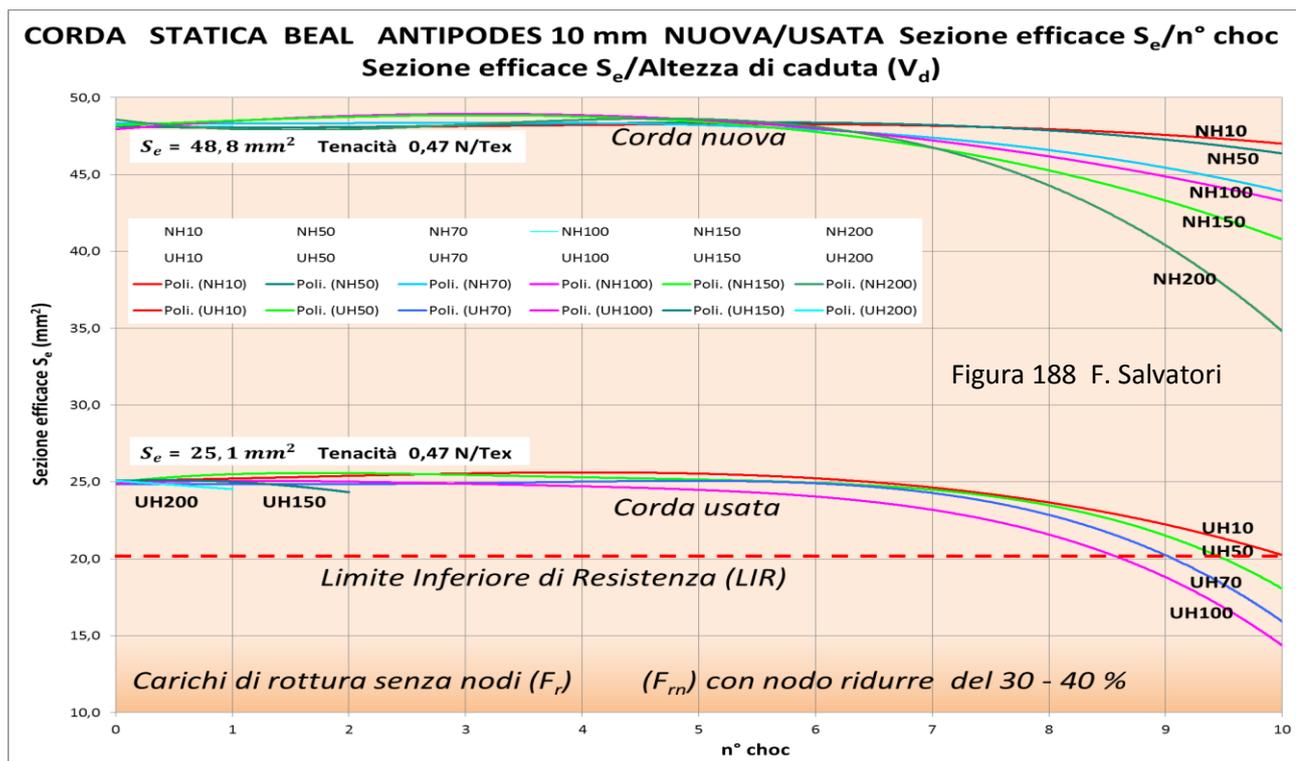
In merito alla validità statistica, sperimentale e tecnico-scientifica dell'insieme dei grafici nelle figure vale quanto espresso precedentemente in questa **Parte VI**.

Materialmente, la sperimentazione è avanzata in due fasi:

1. nella prima fase si è provveduto a choccare i campioni di corda di 3 m nella Torre di caduta (ad esempio, il campione "Choc07 H70" è stato sottoposto a una successione di n° 7 choc con altezza di caduta del peso pari a 70 cm);
2. nella seconda fase i campioni di corda choccati sono stati sottoposti a prove di rottura senza nodi, per ricavare il Carico di rottura F_r e quindi la conseguente Superficie effettiva S_e .

01.j.c.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6

Nella **Figura 188** sono esposti i diagrammi relativi a questa corda, nuova e usata, dove risulta, per prima cosa, che la corda ha perso quasi il 50 % del suo materiale polimerico per l'uso fattone in grotta (più di due anni intensi d'utilizzo).



Questa perdita è dovuta, come già detto, non solo alla rottura di alcuni fili elementari (sia per abrasione o cedimento sotto l'elongazione prodotta dai test a caduta), ma anche alla perdita delle loro proprietà meccaniche (diminuzione della cristallinità dei fili elementari) e alla diminuzione delle loro sezioni trasversali quando si verifica lo snervamento irreversibile conseguente all'allungamento oltre il limite d'elasticità (pag. 23 e seg., **Figure 11 – 15**).

Da tenere presente che la CSCC comporta solo una diminuzione apparente della sezione trasversale della corda, ma non incide in alcun modo sulla sua tenuta alla rottura.

Per quanto riguarda le variazioni di visco-elasticità (diminuzioni di cristallinità) occorre riferirsi al succedersi delle cinque Fasi presentate nelle **Figure 58 - 59** (pagg. 68 - 69). I test con applicazione di carichi a caduta possono essere interpretati come elongazioni per impulsi a contenuto energetico crescente, che di fatto corrispondono a una trazione con forza crescente. Questa trazione costringe i fili elementari ad allungarsi, snervandosi e perseguendo la successione di deformazioni, in gran parte irreversibili, indicate nelle figure sopraddette.

Nella **Figura 188** è tratteggiata anche la linea rossa che indica la Superficie efficace che corrisponde al Limite Inferiore di Resistenza (**LIR = 1100 kgp**) per le sollecitazioni proprie della progressione speleologica.

Attenzione: il valore del **LIR = 1100 kgp** è stato calcolato comprendendo anche l'effetto riduttivo della presenza di nodi, che vale circa il 30 – 40 %.

01.j.c.1.) Prima considerazione: variazione della Superficie efficace della corda nuova – Nei grafici della **corda nuova** risulta evidente che delle diminuzioni significative di S_e cominciano ad apparire solo con gli ultimi choc della serie; più marcatamente e prima con le altezze di caduta più elevate (comunque si arriva a completare il ciclo di test a caduta senza la rottura della corda).

Si può dunque concludere che la rottura dei fili elementari e la diminuzione delle loro sezioni trasversali per snervamento si manifesta solo dopo il 7° - 8° choc con carichi leggeri, e dopo il 5° - 6° con carichi pesanti.

Prima il carico di rottura non risente degli choc e si mantiene costante; ma a un valore ben al di sopra del LIR. E' quindi chiaro che l' "invecchiamento" per choc successivi, se limitato ai primi 5-6 choc comporta solo una perdita di deformabilità nella CSCC e nella visco-elasticità, ma non nella tenuta alla rottura.

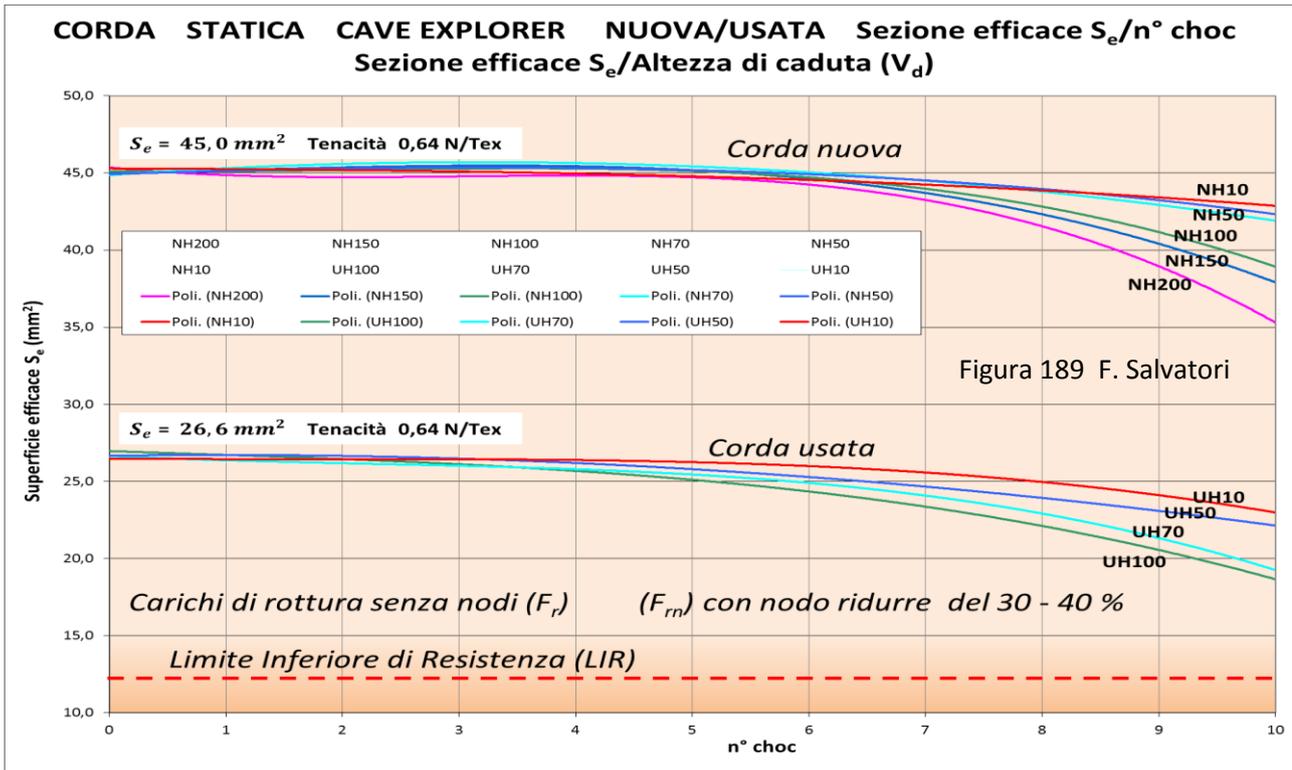
01.j.c.2.) Seconda considerazione: variazione della Superficie efficace della corda usata – Anche nei grafici della **corda usata** si mostra chiaramente che, oltre alla diminuzione del 50 % per l'usura subita in grotta, avvengono delle diminuzioni significative di S_e a partire dal 3° choc per sollecitazioni ridotte e sin dal 1° choc con sollecitazioni a maggior contenuto energetico.

Addirittura, con altezze di caduta elevate (H150 e H200) sono sufficienti due choc per portare alla rottura la corda. E' del tutto evidente, dunque, che la corda **statica Beal Antipodes 10 mm usata** ha perso una gran parte della sua capacità di deformazione (e quindi di assorbire energia) e ridotto di molto il Carico di rottura. Si è raggiunta una situazione prossima al pericolo di cedimento, anche con sollecitazioni di basso contenuto energetico, vicina al momento di dover essere eliminata dall'uso nella progressione.

01.j.d.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nylon 6.6 e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 – Nella **Figura 189** sono esposti i diagrammi relativi alla corda Nylon 6.6, nuova e usata, dove risulta, anche in questo caso, che la corda ha perso circa il 41 % del suo materiale polimerico, sempre per l'uso fattone in grotta (più di due anni d'utilizzo intenso). **Il confronto è soprattutto fra fili elementari Nylon 6 e Nylon 6.6.**

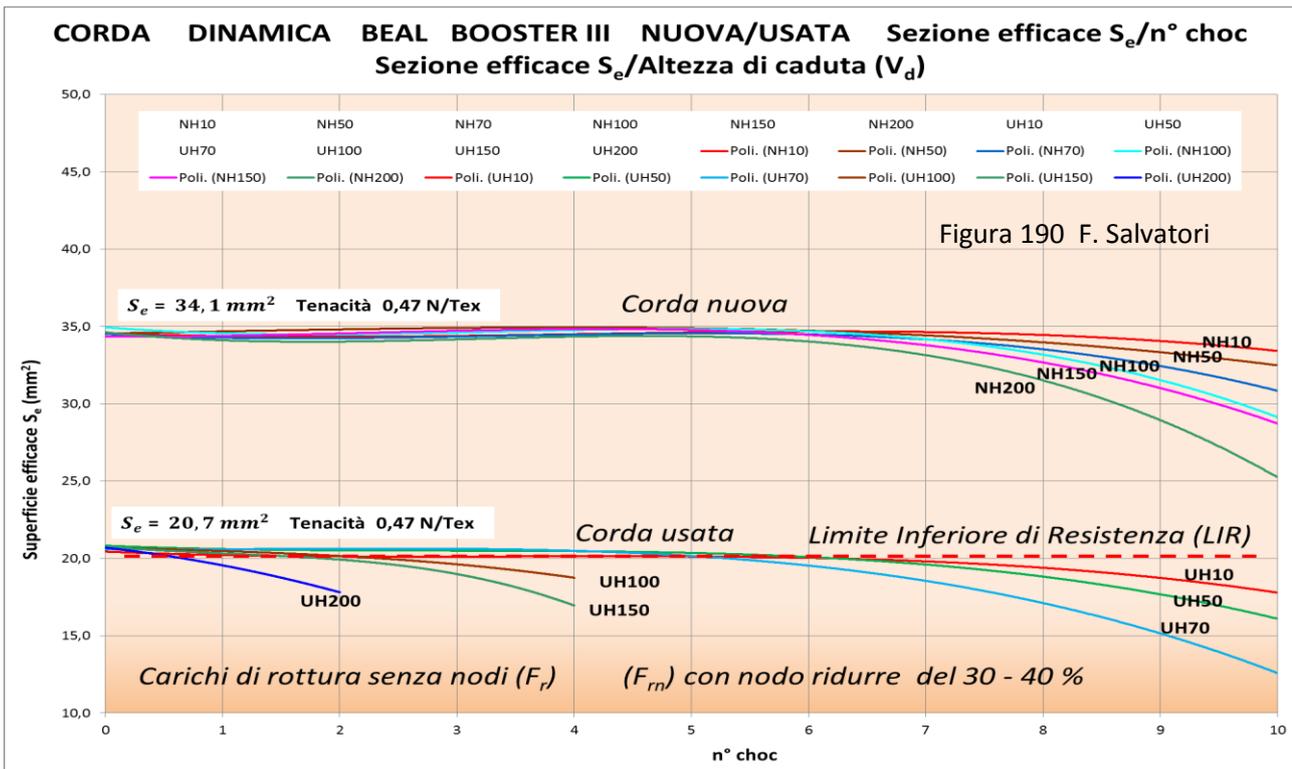
Per la costruzione e l'analisi dei grafici nulla cambia rispetto a quanto detto nel Paragrafo precedente, tranne per i valori della Superficie efficace, su cui occorre tenere in conto che la Tenacità, rispetto alla Antipodes, aumenta dal 0,47 N/Tex al 0,64 N/Tex (il 36 % circa). Questo in pratica significa che con una S_e inferiore del 36 % si ha lo stesso Carico di rottura dell'equivalente Antipodes (anche la linea tratteggiata che indica il LIR è conseguentemente impostata seguendo questa valutazione).

01.j.d.1.) Prima considerazione: il Nylon 6.6 è migliore del Nylon 6 – L'effetto di decrescita nella parte finale delle curve $S_e = f(n^{\circ}choc)$ è anche qui dovuto alla rottura di fili elementari e alla loro perdita di cristallinità. Ma con il Nylon 6.6 questo effetto è ridotto e si produce solo negli ultimi choc della serie.



Pertanto possiamo affermare che i fili in Nylon 6.6 sopportano meglio di quelli in Nylon 6 l' "invecchiamento" prodotto dal succedersi degli choc con altezza di caduta del peso crescente, denotando anche una maggior capacità di opporsi al degrado complessivo. Il suo uso può esser prolungato, in condizioni di normalità, anche ben oltre i due anni d'attività. Questa osservazione è ancora più validante se si osserva la rilevante distanza fra la linea tratteggiata del LIR e le curve della corda usata.

01.j.e.) Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm Nylon 6 e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 – Nella Figura 190 sono esposti infine i diagrammi relativi alla corda dinamica Nylon 6, nuova e usata, dove è, come più volte evidenziato, in azione dissipativa la forte deformabilità della CSCC.



01.j.e.1.) Prima considerazione: proprietà meccaniche peggiori per una Corda dinamica – Già da un'osservazione sinottica appare evidente che una corda dinamica Nylon 6, rispetto alla equivalente statica, è costituzionalmente più fragile e meno resistente alle sollecitazioni che portano alla rottura della corda statica.

Già da nuova il materiale polimerico che si oppone alla rottura è in quantità minore ($S_e = 48,8 \text{ mm}^2$ per la statica e $S_e = 34,1 \text{ mm}^2$ per la dinamica). Anche con corda nuova nella dinamica la flessione delle curve $S_e = f(n^\circ \text{choc})$ al termine della serie di choc si avvicina alla linea del LIR.

Addirittura la linea tratteggiata corrispondente al LIR coincide o è addirittura soprastante rispetto alle curve della corda dinamica **usata**. E quest'ultima ha subito un'usura ben più contenuta (palestra/parete d'arrampicata) della corda statica (grotta).

Pertanto il decadimento prodotto dalla successione degli choc a velocità di deformazione crescente porta a queste conclusioni:

1. con la corda nuova, al termine della serie di choc, con le altezze di caduta del peso più elevate, le curve $S_e = f(n^\circ \text{choc})$ si avvicinano alla linea tratteggiata del LIR;
2. con la corda usata le curve $S_e = f(n^\circ \text{choc})$ coincidono addirittura con la linea tratteggiata e verso la fine della successione scendono abbondantemente al disotto;
3. sempre con la corda usata, con le altezze di caduta del peso maggiori (UH100 – UH150 – UH200), già con i primi choc, la condizione della corda è ben al di sotto del LIR.

Le corde dinamiche, anche per renderle molto capaci di assorbire l'energia di una caduta, le hanno costruite con meno materiale polimerico e con una struttura molto complessa delle trame e dei trefoli della calza e dell'anima. Questo le rende fragili e, se usate, soggette a cedere anche a sollecitazioni di bassa energia.

Sono abbastanza sensibili all'usura tipica dell'arrampicata sportiva (calore + sollecitazioni) e se usate in grotta sarebbero soggette a un decadimento esasperato e pericoloso. Sicuramente da sconsigliare il loro uso nella progressione speleologica.

Parte VII

Cordini speleo-alpinistici

*Test a caduta in funzione del n° degli choc
e della Velocità di deformazione V_d*

Le schede con le proprietà chimico-fisiche e
meccaniche

Le deformazioni reversibili e irreversibili

Il decadimento della struttura cristallina dei fili
elementari

La depolimerizzazione delle fibre polietileniche
(Dyneema) e aramidiche (Kevlar)

L'analisi termografica della rottura sul nodo



Figura 29 F. Salvatori

Anche in questa **Parte VII** sono presentati, analizzati e commentati i risultati di prove sperimentali svoltesi nell'arco di più anni dal "Gruppo di Studio Materiali e Tecniche" della SNS CAI (GSMT).

I test sono stati eseguiti nel Centro Ricerche Attrezzature Speleo-alpinistiche Canyoning (CRASC di Costacciaro) da Istruttori della Scuola Nazionale di Speleologia del Club Alpino Italiano e da operatori del CENS. Le ricerche e i test si sono svolti nell'arco di 2 anni, dal 2013 al 2014.

Per la trazione veloce con la Torre (test a caduta del peso **Foto 29**, pag. 40), le impostazioni sperimentali, la strumentazione, i protocolli e le metodologie di ricerca sono descritte nella **Parte II** (pag. 39).

Se nella precedente **Parte VI** abbiamo analizzato con test a

caduta le corde costituite da fili elementari di poliammide (Nylon 6 e Nylon 6.6), polimeri di uso esclusivo nella costruzione di questi elementi della progressione speleo e alpinistica, in questa valuteremo i risultati sperimentali di test a caduta effettuati con cordini costituiti dalle fibre di Dyneema (monomero di Polietilene), di Kevlar (monomero aramidico), di Nylon 6 (monomero di poliammide), anch'esse di quasi esclusivo utilizzo in questi componenti della progressione.

Apparentemente, i Cordini si distinguono dalle Corde solo per i diametri ridotti (il che porta, ovviamente, a una diminuzione dei Carichi di rottura con e senza nodo e del Modulo d'elasticità solo in conseguenza di una quantità ridotta di materiale che resiste alle sollecitazioni a trazione).

Ma dalla realtà sperimentale emerge che i Cordini si differenziano anche, e soprattutto, per le reazioni che l'usura produce nella loro struttura chimica e nell'organizzazione più o meno "cristallina" delle catene di macromolecole nei fili elementari. Il Dyneema si distingue inoltre dalle altre fibre polimeriche perché non è igroscopico e quindi non subisce idrolisi

Il Dyneema e il Kevlar sono fibre ad altissima resistenza e rigidità, con Carico di rottura e Modulo d'elasticità marcatamente più elevati di quelli del Nylon:

1. per il Carico di rottura, in rapporto a quello del Nylon 6, il Dyneema e il Kevlar lo superano di cinque volte;
2. per il Coefficiente d'elasticità, sempre in rapporto al Nylon 6, il Dyneema è superiore di 54 volte, mentre il Kevlar di 27 volte.

01. Cordini di Dyneema, Kevlar o Nylon 6: caratteristiche strutturali e proprietà meccaniche, natura chimica delle fibre che li compongono

01.a) Proprietà meccaniche e termiche dei cordini

Cordino Beal Nylon 5,5 mm nuovo numero trefoli **4** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	253	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	454	
Carico rottura trefolo (kgp)	181	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	560	- 40 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	929	
Punto fusione calza (°C)	218	fibra Nylon 6
Punto fusione anima (°C)	218	fibra Nylon 6
Diametro efficace (mm)	4,7	
Temperatura nodi rottura corda (°C)	50 circa	
Peso (g/m)	23,7	

Cordino Repetto Dyneema 5,5 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	205	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	378	
Carico rottura trefolo (kgp)	1110	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	639	- 57 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	1473	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	150	fibra Dyneema
Diametro efficace (mm)	2,0 + 1,0	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

Cordino Repetto Dyneema 8,0 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	468	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	678	
Carico rottura trefolo (kgp)	2428	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1331	- 57 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	3068	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	150	fibra Dyneema
Diametro efficace (mm)	3,0 + 1,2	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

Cordino Kevlar 5,5 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	259	Rottura trefolo dopo 0,5 m scorrimento
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011

Carico rottura calza (kgp)	413	
Carico rottura trefolo (kgp)	1753	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	967	- 55 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	2142	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	> 360-500	fibra Kevlar (disgregazione)
Diametro efficace (mm)	2,8 + 0,8	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

Le caratteristiche meccaniche e termiche dei fili elementari sono elencate nelle tabelle che seguono:

Poliammide Nylon 6.6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	265	
Tenacità (N/Tex)	0,64	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	900	strength
Allungamento alla rottura (%)	16	
Modulo E (Gpa)	8,0	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	80	

Poliammide Nylon 6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	218	
Tenacità (N/Tex)	0,47	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	536	strength
Allungamento alla rottura (%)	26	
Modulo E (Gpa)	2,6	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	76	

Aramide Kevlar (48)		
Densità ρ (g/cm ³)	1,45	
Punto di fusione (°C)	500	
Tenacità (N/Tex)	2,03	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	2900	strength
Allungamento alla rottura (%)	3,6	
Modulo E (Gpa)	72	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	35	

HMPE Dyneema SK 60		
Densità ρ (g/cm ³)	0,97	
Punto di fusione (°C)	150	
Tenacità (N/Tex)	2,80	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	3000	strength
Allungamento alla rottura (%)	3,5	
Modulo E (Gpa)	142	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	55	

Come punto di riferimento per un confronto Cordini/Corde si utilizza la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 nuova, le cui caratteristiche sono contenute nella tabella di **Figura 191**.

Corda Beal Antipodes 10 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10 mm n° trefoli 12

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	587	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	1046	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	141	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	2666	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1441	<i>- 46 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	7,9	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	64	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Figura 191 F. Salvatori

01.b) Struttura chimica delle macromolecole, organizzazione delle catene polimeriche nei fili elementari, cristallinità e resistenza agli allungamenti e alla rottura

Le fibre ad **alta resistenza** come il Dyneema e il Kevlar, diffusamente utilizzate per il confezionamento dei cordini speleo-alpinistici, devono le loro caratteristiche straordinarie (anche più resistenti dell'acciaio) alla struttura chimica delle macromolecole che le costituiscono, al modo come queste formano delle catene e come queste catene si collegano fra di loro.

01.b.a) Il Dyneema, fibra di polietilene

La sua unica pecca, se così si può dire, è la temperatura di fusione, **relativamente bassa (150°C)**, che la espone negativamente a tutto ciò che è legato alla produzione di calore. Ma dato l'uso che se ne fa - senza produzione d'attriti fra i componenti della struttura complessa del cordino e con i freni per calare e discendere - il decadimento prodotto da questo fattore è del tutto trascurabile.

Per contro la bassa temperatura di fusione esaspera l'effetto riduttivo della presenza di nodi, che, rispetto a una tipica corda statica come la **Beal Antipodes, sale dal 46% al 57 %** (tabelle soprastanti).



Figura 192 F. Salvatori

Contrariamente al Nylon e al Kevlar, il Dyneema è una fibra **non igroscopica**, in cui i legami intermolecolari non vengono annullati per idrolisi; come accade invece nelle poliammidi e nelle aramidi: le corde in Dyneema sono usate per ancorare le piattaforme petrolifere (**Figura 192**), perché rigide come l'acciaio e non degradabili nel contatto con l'acqua marina.

Quindi il Dyneema è una fibra artificiale adatta all'ambiente grotta e, inoltre, resiste agli acidi (anche l'acido solforico e nitrico), alle basi e ai solventi organici.

Il Dyneema è una Poliolefina che si ottiene dalla polimerizzazione dell'Etilene, secondo la **Reazione 27**:



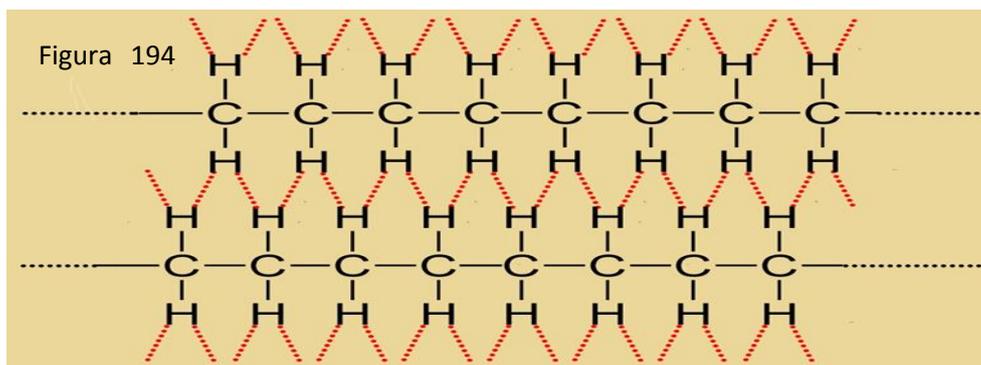
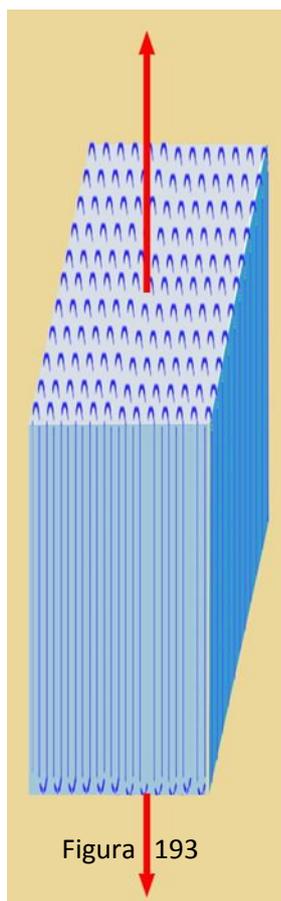
Il Polietilene ottenuto è un polimero dove **n** indica il numero di monomeri contenuti nella macromolecola, numero che può andare da 30.000 e fino a più di 100.000: **un peso molecolare enorme**.

Per questa prima caratteristica chimica i fili elementari di Dyneema acquisiscono una grande capacità di resistere alla rottura in quanto aumenta di molto la sua cristallinità (può superare il 75 % del Nylon 6.6).

Infatti, come è ben evidente dal grafico di **Figura 73** (pag. 81) dove è rappresentata la curva **Sforzo alla rottura** dei fili di Nylon 6.6 in funzione del **Peso molecolare** (numerico) della poliammide (in questo caso limitato a un massimo di 12.000). La curva è valida anche per il Dyneema e, se estrapolata fino all'ascissa 100.000, suggerisce a quale valore di σ_r si può arrivare.

In aggiunta, accade che dopo l'estrusione i fili elementari di Polietilene sono sottoposti al processo di "stiro" che porta le catene di macromolecole a distendersi (pag. 69, **Figura 58**), disponendosi parallelamente fra di loro, secondo l'asse di trazione (una porzione parallelepipedica rettangola in **Figura 193**, F. Salvatori). Questa operazione di ristrutturazione può arrivare a coinvolgere anche il 95 % delle catene di macromolecole e rende le catene di polimeri meglio disposte a sostenere le sollecitazioni a trazione.

Ma soprattutto rende statisticamente molto probabile che gli atomi d'idrogeno del Polietilene di una catena si dispongano a contatto con quelli di un'altra catena (**Figura 194**, F. Salvatori), favorendo la formazione di legami intermolecolari tipo Van der Waals (non "idrogeno" come nel Nylon).



Questi sono i legami più deboli fra gli interatomici, ma la disposizione spaziale delle catene è tale da permetterne la formazione di una quantità rilevante.

Da ciò, ecco derivare le straordinarie caratteristiche meccaniche del Dyneema, con rigidità che si avvicina all'acciaio e ancor più resistente alla rottura e allo snervamento.

01.b.b) Il Kevlar, fibra aramidica

È una fibra artificiale che, al contrario del Dyneema, sopporta bene le alte temperature (degrada decomponendosi intorno ai 500°C) (tanto da venire usata come scheletro per pneumatici).

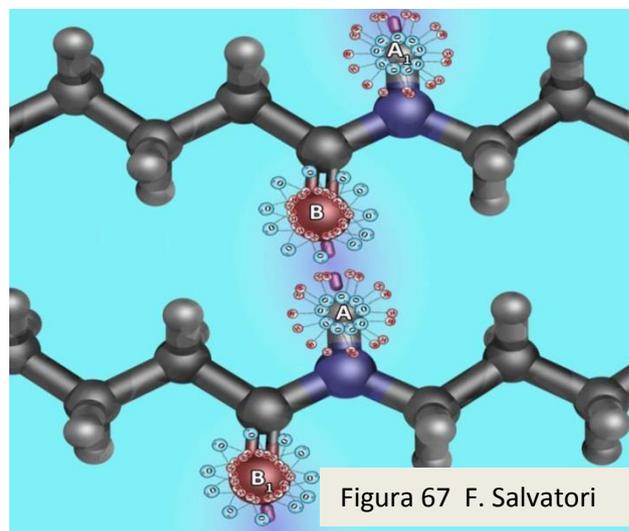
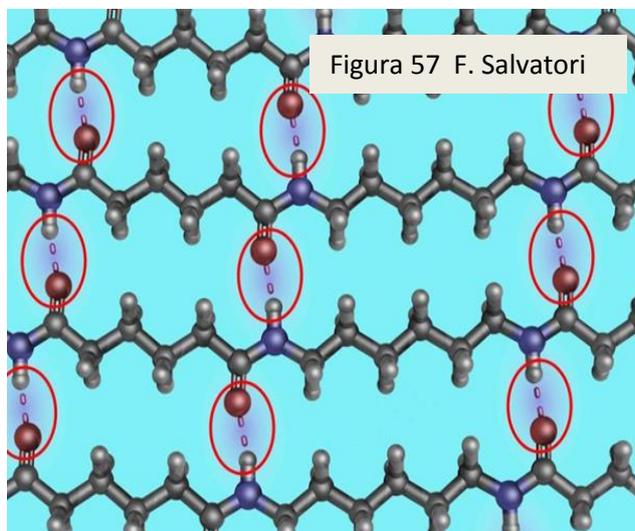
Il Kevlar ha un carico di rottura leggermente inferiore al Dyneema (la Tenacità del primo è **2,03 N/Tex**, del secondo **2,80 N/Tex**; mentre quella del Nylon 6 è **0,47 N/Tex**). Il Dyneema è molto più rigido, con un Modulo d'elasticità pari a **142 GPa** contro **72 GPa** del Kevlar.

La fibra aramidica è sensibile alle variazioni di pH e alle radiazioni UV: nell'attività in grotta e in montagna il primo fattore incide in modo trascurabile; mentre il secondo, i raggi UV, richiede di mettere in atto delle protezioni e degli accorgimenti, pena un degrado pericoloso per la tenuta alla rottura, specie in presenza di nodi. Cordini di Kevlar non debbono essere abbandonati per lungo tempo in parete d'arrampicata esterna.

Di particolare rilievo è il fatto che il **Kevlar è igroscopico**, e quindi subisce un processo di aumento della viscosità, assorbendo acqua fino al 3 % in peso con U.R. al 55 % (nel Nylon 6, più igroscopico del Nylon 6.6 perché con zone amorphe più estese, la percentuale è del 5 % in peso con lo stesso tasso di U.R.).

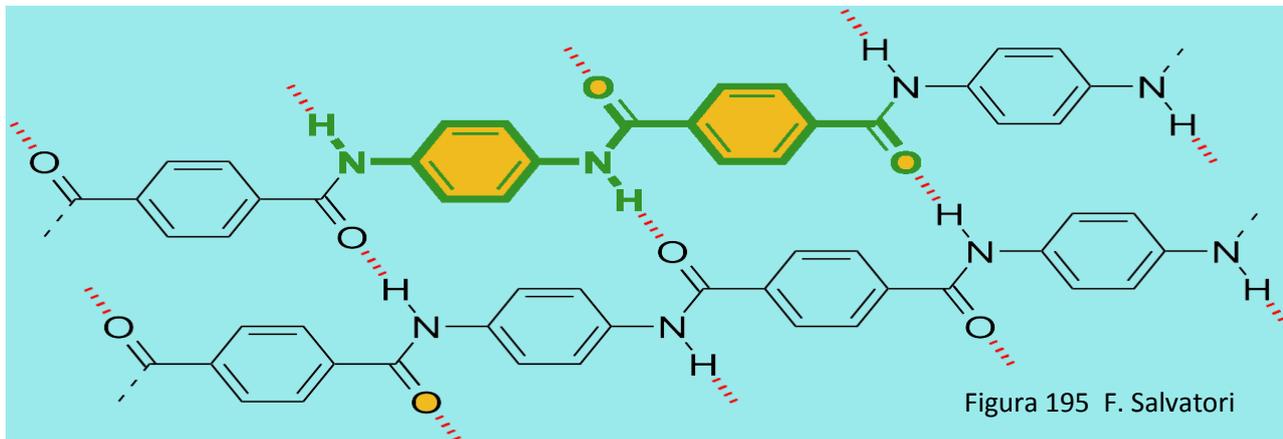
Con l'immersione in acqua o all'interno delle grotte con U.R. pari al 100% (le due situazioni si equivalgono dal punto di vista quantitativo) l'assorbimento d'acqua può raggiungere il 9 % in peso.

Dunque, in presenza di aria umida (praticamente, sempre), delle molecole d'acqua s'inseriscono fra le catene di macromolecole aramidiche ed eliminano e/o indeboliscono gli eventuali legami idrogeno esistenti, con una riduzione dello Sforzo alla rottura del filo elementare anche del 30 %.



La situazione è del tutto analoga a quella rappresentata in **Figura 57** (pag. 65) e **Figura 67** (pag. 75) relativa alle catene di polimeri nei **filì elementari di Nylon**: nella prima figura, la situazione prima dell'idratazione, con tutti i legami idrogeno attivi in azione sinergica; nella seconda, con l'inserimento igroscopico delle molecole d'acqua fra le catene e l'annullamento dei legami idrogeno per idratazione degli atomi **A** (Idrogeno) e **B** (Ossigeno).

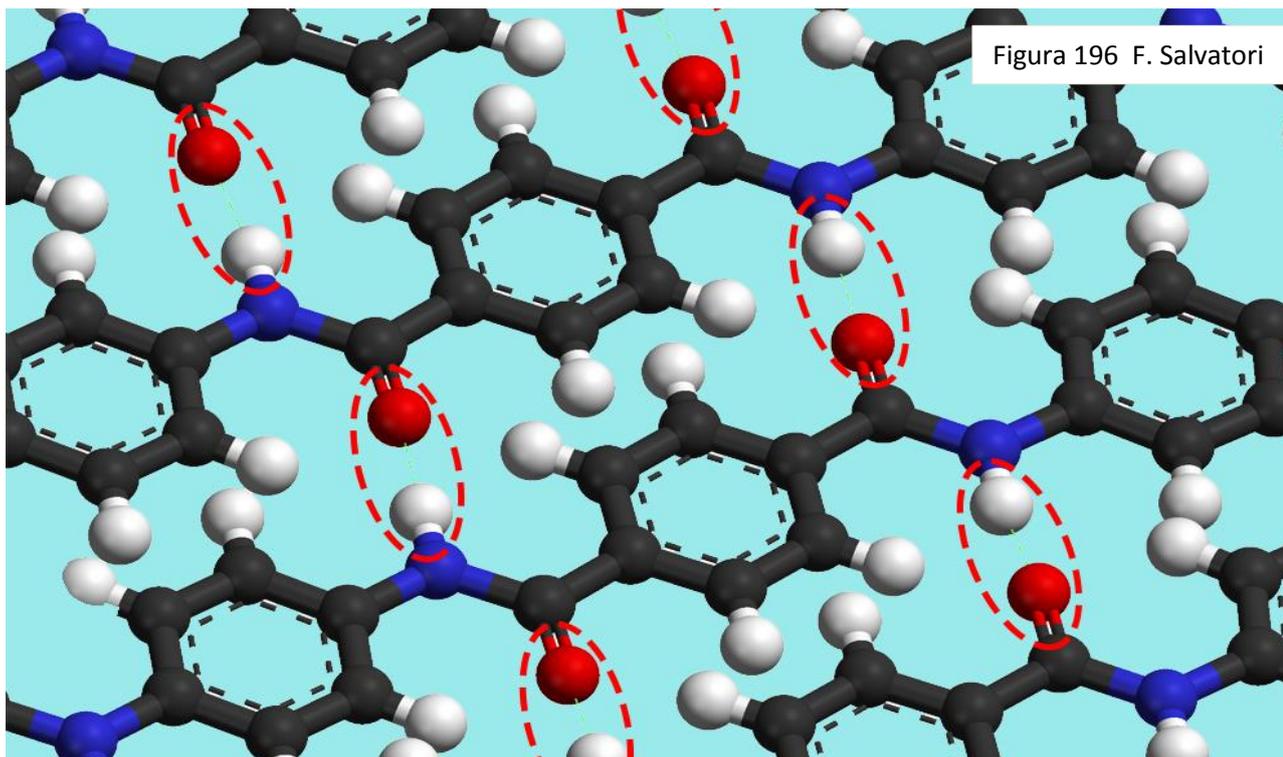
Infatti la struttura del Kevlar (**Figure 195 – 196**) ripete nelle caratteristiche principali quanto riscontrabile nelle catene dei filì elementari di Nylon: anche nelle strutture polimeriche dei filì elementari aramidici si riscontra l'affiancamento delle catene, con frequenti collegamenti intermolecolari con legami idrogeno.



Ma la struttura molecolare e la disposizione ordinata delle catene di polimeri del Kevlar hanno però degli elementi rafforzativi in più rispetto al Nylon:

1. gli anelli aromatici (raggruppamenti atomici esagonali), con la loro efficace sovrapposizione degli orbitali, creano dei legami molto forti che vanno a irrobustire tutta la struttura a maglie delle macro catene;
2. l'affiancamento ordinato della macromolecole crea una situazione sterica che favorisce numericamente la formazione di legami idrogeno intermolecolari.

E' dunque ovvio che il Kevlar è sensibile al contatto con l'acqua, sia immergendolo in essa, sia esponendolo nell'aria umida. Infatti, essendo la fibra igroscopica, le molecole d'acqua penetrano fra le catene polimeriche e vanno ad annullare i legami idrogeno: il filo elementare, con l'immersione in acqua (o con



l'esposizione equivalente in aria con U.R. 100 %), cattura H_2O e rompe i legami idrogeno fino a far diminuirne il Carico di rottura (del 30 %) e il Modulo d'elasticità (dimezzandolo).

I materiali in Kevlar subiscono in ambienti tipo grotta un decadimento molto marcato, superiore a quello che si produce, nelle stesse condizioni, nelle corde in Nylon.

In più, oltre al degrado portato dai raggi UV (esposizione al sole), l'estrema rigidità del Kevlar (27 volte superiore a quella del Nylon 6) lo rende fragile e particolarmente sensibile, in senso negativo, alla presenza di nodi; come si evidenzia nei paragrafi che seguono.

02. Cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6: analisi dei risultati sperimentali e confronto con la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova

02.a) Condizioni sperimentali

Anche questa è una sperimentazione mai realizzata in precedenza, con rilevanti aspetti d'innovazione strumentale e analitica.

I Cordini sottoposti a esame sono (scelta determinata dalla prevalente presenza nel commercio):

1. Repetto HMPE Dyneema SK60 8 mm,
2. Repetto HMPE Dyneema SK 60 5,5 mm,
3. Courant Aramide Kevlar (48) 5,5 mm,
4. Beal Nylon 6 5,5 mm;

tutti, al momento dei test, erano nuovi (mai usati) e asciutti (U.R 50 % circa). La temperatura ambiente ha variato dai 13°C ai 23°C.

Per i test a trazione lenta (quasi-statica) e veloce (a caduta sulla la Torre), le impostazioni sperimentali, la strumentazione, i protocolli e le metodologie di ricerca occorre **far riferimento a quanto esposto nella Parte I e nella Parte II.**

Vengono utilizzati molti dati ricavati precedentemente a trazione quasi-statica; ma sotto esame sono le trasformazioni degradanti che subiscono per effetto di test sulla Torre di Caduta (*pag. 40, Figura 28*), con lo scopo di rilevare le variazioni delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei cordini in esame in funzione di una **successione di choc (cinque** per i cordini Dyneema 8 mm e il Kevlar 5,5 mm; **tre** per i cordini Dyneema 5,5 mm e Nylon 6).

I test a caduta sono stati effettuati in funzione:

1. del n° degli choc applicati,
2. del tipo di materiale che compone i fili elementari (aramide, polietilene, poliammide),
3. del diametro degli stessi cordini.

Le modalità sperimentali sono analoghe, mutatis mutandis, a quelle descritte nella **Parte VI** a proposito delle corde (*pag. 174*). In particolare, si ricorda, che sono stati usati campioni **lunghi 3 m** (f.t), con **nodi Guida** alle estremità e **pretirati a 140 kgp**.

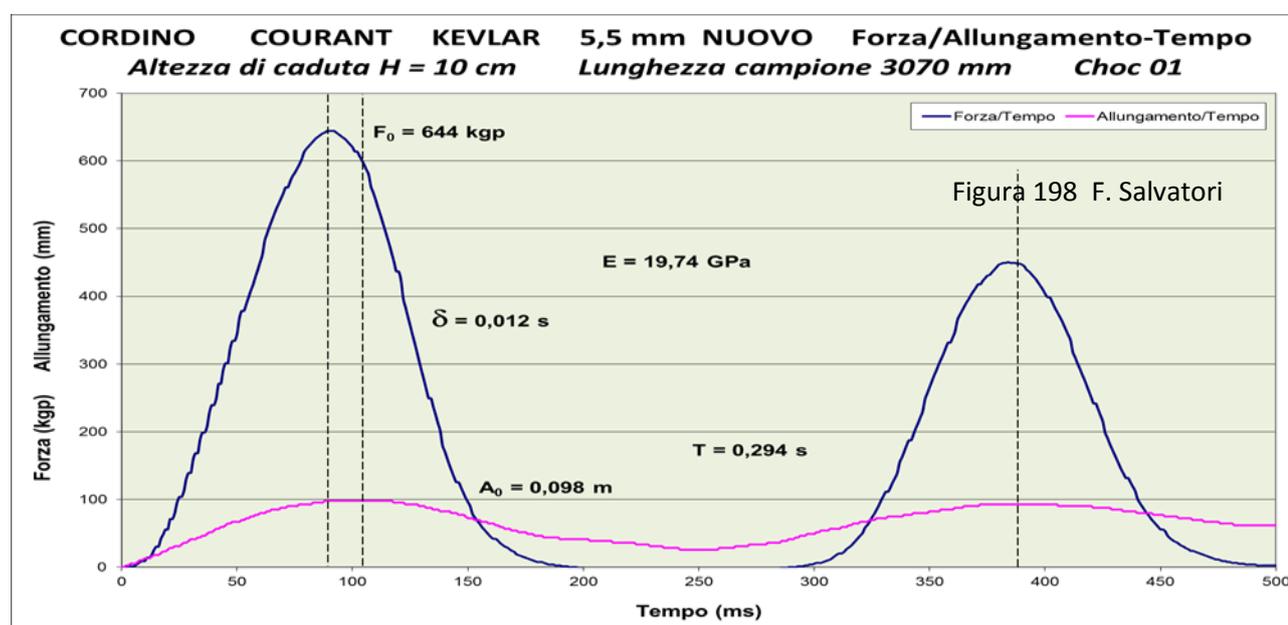
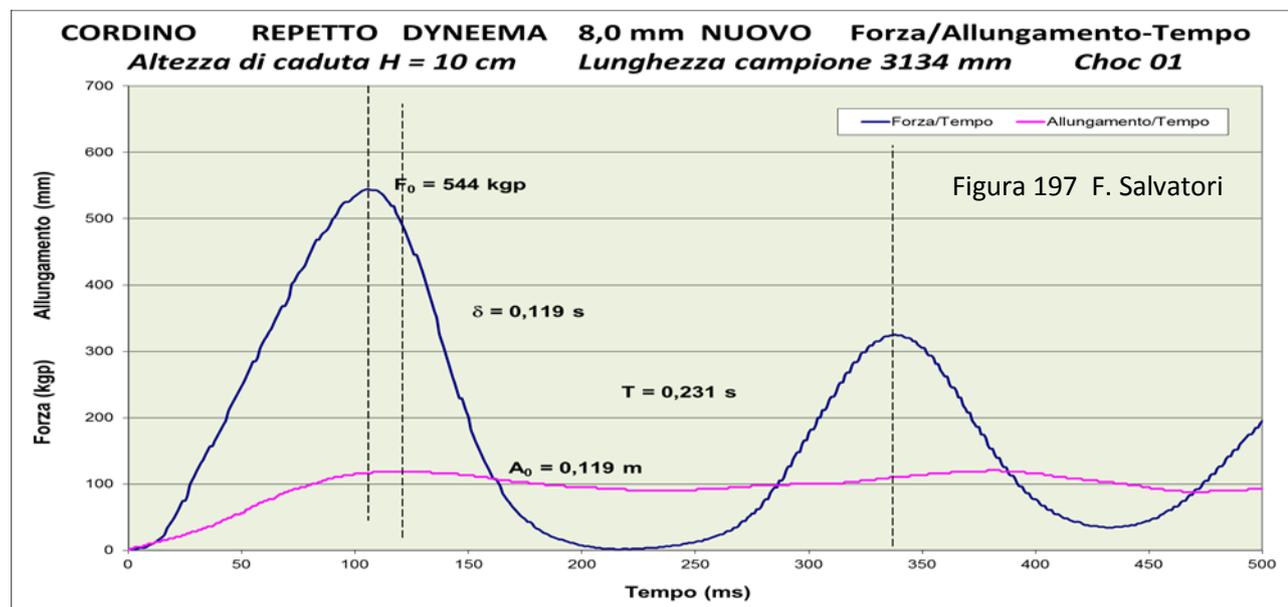
Coi dati raccolti (*pag. 299, Appendici 03*) sono stati costruiti i grafici, seguendo i metodi utilizzati per le corde (*pagg. 176 – 177, Figure 37 - 38*). In particolare per le due nuove fibre in esame – Kevlar e Dyneema – sono stati elaborati grafici come quello di **Figura 38**, con le misurazioni possibili sulle superfici di carico, di scarico e di passività, e diagrammi per la valutazione dell'influenza della visco-elasticità nella capacità di assorbire energia (in particolare il Ritardo di tempo δ).

Infatti sono stati costruiti i grafici riportati nelle **Figure 197 – 198**, che mostrano una costituzione sostanzialmente identica a quella prodotta dai test sulle corde in Nylon, a dimostrazione che **la visco-elasticità**

è presente anche nelle fibre ad alta resistenza come il Dyneema e il Kevlar, su cui è dunque possibile applicare l'Analisi Dinamica Meccanica (MDA).

E' importante ricordare le possibili vie di dissipazione dell'energia prodotta dalla caduta del peso:

1. compattazione della struttura complessa della corda (CSCC), in questo caso del "cordino",
2. reazione visco-elastica dei fili elementari,
3. lavoro alla rottura e/o deformazione dei fili elementari,
4. attriti fra i componenti della struttura complessa del cordino.



Nei grafici delle **Figure 197 – 198** sono evidenti tutti gli elementi tipici della visco-elasticità, soprattutto il ritardo δ fra il tempo relativo all'avvento della Forza massima F_0 e il tempo collegato con l'Allungamento massimo A_0 .

A titolo d'esempio per mostrare l'efficacia della DMA, si noti la differenza nei valori di δ fra Dyneema 8 mm e Kevlar 5,5 mm ($\delta = 0,119$ s contro $\delta = 0,012$ s) dovuta, innanzitutto, alla quantità di massa che si oppone alla trazione: essendo la visco-elasticità il frutto degli attriti che si oppongono all'allungamento e al districamento delle catene di macromolecole, è verosimile ritenere che tanto maggiore è la quantità di materiale sottoposto a sollecitazione, tanto maggiore sarà il tempo di ritardo necessario a concludere la deformazione.

Di fatto il Tempo di ritardo è una misura del grado di viscosità complessivo che – rapportato opportunamente, secondo quanto impone la DMA, con il Periodo T , l'Allungamento massimo A_0 , la Superficie efficace S_e e la lunghezza a riposo del campione di corda - porta al Fattore di perdita $\tan \delta$ e al Coefficiente di viscosità η .

Il Tempo di ritardo δ è anche legato alla quantità di legami in azione fra le catene di macromolecole.

Replichiamo qui l'elencazione dei parametri che possono essere ricavati e utilizzati per le analisi, validi per le corde come per i cordini:

1. Caratteristiche meccaniche e geometriche

- 1.1. Forza alla rottura senza nodi F_r
- 1.2. Tenacità δ_{sr} (o Sforzo a rottura)
- 1.3. Superficie efficace S_e

2. Parametri elasticità

- 2.1. Modulo d'elasticità E

3. Parametri velocità di trazione

- 3.1. Velocità di deformazione V_d

4. Parametri forme d'energia

- 4.1. Energia prodotta dalla caduta fino al massimo allungamento ΔL_{carico}
- 4.2. Energia restituita per effetto della reazione alle deformazioni elastiche reversibili $\Delta L_{scarico}$
- 4.3. Energia dissipata $\Delta L_{dissipazione}$ ($\Delta L_{carico} - \Delta L_{scarico}$)
- 4.4. Percentuale di dissipazione $\%_{dissipazione}$ $[(\Delta L_{dissipazione}/\Delta L_{carico}) \times 100]$
- 4.5. Energia dissipata in calore per attrito $\Delta L_{attrito}$ ($\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico}$)

5. Parametri decadimento visco-elastico (Analisi Dinamica Meccanica)

- 5.1. Tempo di ritardo δ_{tempo}
- 5.2. Periodo T
- 5.3. Modulo complesso E^*
- 5.4. Modulo elastico E'
- 5.5. Modulo viscoso E''
- 5.6. Rapporto di dissipazione viscoso $\tan \delta = E'/E''$
- 5.7. Coefficiente di viscosità $\eta = E''/\omega$

La descrizione analitica dei parametri qui sopra elencati è nella **Parte II** (pag. 49 e seg.).

02.b) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 8 mm nuovo

I grafici che riportiamo sono stati costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza con le Corde. Statisticamente hanno una validità minore, visto che il numero di test effettuati è inferiore (3-5 anziché 10).

Comunque viene mantenuta una sufficiente attendibilità delle considerazioni e delle conclusioni tecnico-scientifiche tratte.

Tutte le considerazioni vengono poi rapportate in un confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova, presa come rappresentativa delle corde speleo in genere.

02.b.a) Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova

02.b.a.1) Premessa - S'inizia valutando il Modulo E , una proprietà "meccanica" del cordino Dyneema 8 mm, che dipende da tutte le possibili deformazioni che può subire sotto le sollecitazioni a trazione, a impulsi, prodotte dal **succedersi del n° degli choc**. Un effetto conglobato, senza possibilità di distinguervi, per qualità e quantità, il contributo dissipativo e degradante di ogni diversa deformazione.

Questa distinzione emerge invece con l'analisi dei risultati sugli altri fattori esaminati qui di seguito: % **Dissipazione**, **Fattore di perdita $\tan \delta$** , **Coefficiente di viscosità η** , **Modulo Elastico E'** , **Modulo Viscoso E''** e **Superficie efficace S_e** . Risultati ottenuti con l'integrazione grafica sulle curve di carico/scarico (pag. 45, **Figura 37**) e con l'Analisi Dinamica Meccanica (DMA) sulla base di grafici delle **Figure 197 – 198** (pag. 248)

Si ricorda che i Cordini con fibre ad alta tenacità sono costituiti, in genere, da un solo trefolo protetto da una calza (come indicato nelle schede esposte nelle *pagg. 242 - 243*) e le deformazioni che possono subire sono:

1. la CSCC, che qui ovviamente si riferisce a un Cordino, e coinvolge un solo trefolo e la calza,
2. le deformazioni legate alla visco-elasticità dei fili elementari di Dyneema, che sottostanno nei loro movimenti agli **attriti** fra catene di macromolecole e sono presenti tanto nei settori amorfi quanto nei cristallini,
3. lo snervamento e la rottura dei fili elementari.

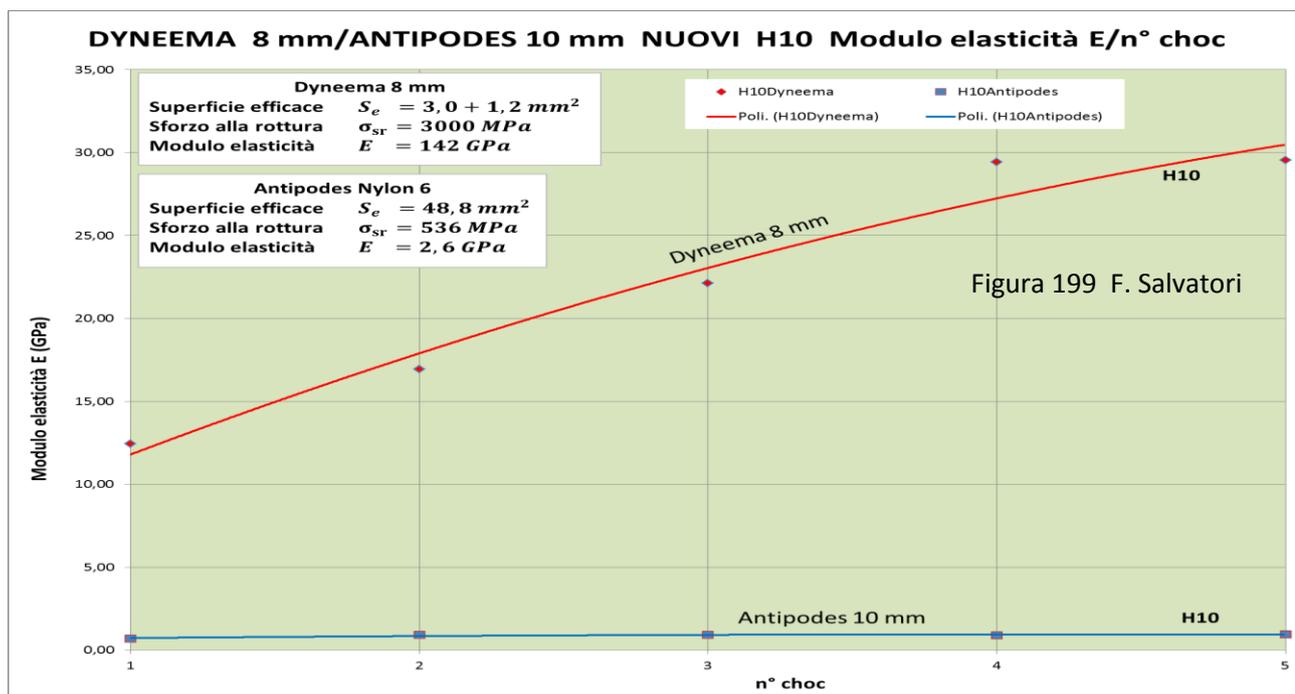
Essendo il Modulo d'elasticità definito solo con la pendenza delle curve $F = f(A)$, non contribuisce a stabilirne il valore della quota dovuta alla dissipazione dell'energia (della caduta del peso) con gli attriti fra le componenti del cordino (calza + trefolo+ fili elementari). Del resto tale quota risulta, sperimentalmente, per i cordini ad altissima tenacità, del tutto trascurabile.

Se a un certo punto della successione degli choc si verificassero condizioni che possono portare a una modifica dello stato chimico-fisico dei fili elementari (ad esempio, degradazione idrolitica e depolimerizzazione, fotodegradazione, ossidazione, ecc.), l'andamento della curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ ne risentirebbe, mostrando delle brusche flessioni in corrispondenza dello choc successivo all'evento degradante chimico-fisico.

02.b.a.2) Condizioni sperimentali - I test a caduta previsti per questo cordino sono limitati a una successione di cinque cadute del peso con altezza fissa a $H = 10 \text{ cm}$ (cadute superiori hanno portato al cedimento del campione sul nodo, e quindi impedendo la DNA). Ogni campione era **lungo 3000 mm**, compresi i due nodi Guida all'estremità, ed è stato pretirato a 140 kgp.

La pendenza, quindi E , è calcolata nel tratto della curva $F = f(A)$ compresa fra le ordinate $F = 100 \text{ kgp}$ e $F = 200 \text{ kgp}$, con ciò volendo escludere il "disturbo" dato dalla strizione dei nodi ma, al tempo stesso, includendo tutto l'effetto della deformazione propria della CSCC.

Nella **Figura 199** è disegnato il grafico relativo alla curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del cordino Dyneema 8 mm in oggetto, insieme al diagramma della omologa curva della corda statica di riferimento Beal Antipodes 10 mm nuova.



02.b.a.3) Prima considerazione: diversità nel valore del Modulo d'elasticità – Quello che occorre innanzitutto spiegare è la motivazione per cui il Modulo d'elasticità di un Cordino di Dyneema è di diversi ordini di grandezza più elevato di quello della Corda Nylon 6 (differenza che aumenta con il procedere della serie di choc).

In prima battuta, la spiegazione sta nella diversità dei valori delle proprietà meccaniche (calcolate con trazione quasi-statica) (valori che discendono, come si vedrà in seguito, dalle caratteristiche chimico-fisiche delle due fibre):

Fibra	Tenacità (N/Tex)	Sforzo rottura (kgp)	Modulo elasticità (GPa)
Dyneema	2,80	3000	142
Nylon 6	0,47	536	2,6

Per quello che riguarda la costituzione chimico-fisica della Corda Antipodes Nylon 6 le descrizioni si trovano, dettagliate, nella **Parte III** di questo lavoro (*pag. 62 e seg.*): ricordiamo, il materiale di base delle catene polimeriche sono delle poliammidi, con legami idrogeno intermolecolari (una struttura a nido d'ape, soggetta all'idrolisi, *pag.65, Figura 57*).

I cinque choc a basso contenuto energetico (**H10**) non producono nella **Corda Antipodes** trasformazioni permanenti tali da modificarne la deformabilità in modo significativo, soprattutto in considerazione del grande **effetto tampone portato dalla CSCC** (sempre consistente anche se la corda non è dinamica).

Tuttavia il **ripetersi delle sollecitazioni a caduta** produce un graduale incremento del Modulo d'elasticità (data la scala delle ordinate, non percettibile nel grafico di **Figura 199**), con una pendenza maggiore all'inizio (per la CSCC) e alla fine della serie di choc, quando subentra la necessità di una maggiore Potenza per disgregare le zone cristalline (*pagg. 185 – 186, Figure 58 - 59*). Comunque, in una qualsiasi Corda speleo alpinistica - in conseguenza del **decadimento prodotto da una trazione** (a qualsiasi velocità di deformazione) o/e da una **successione di choc** - si manifesta sempre, più o meno accentuato, un **aumento di rigidità** (e quindi di degrado).

Per comprendere invece la sorprendente rigidità e tenuta del Cordino Dyneema 8 mm occorre far riferimento a quanto presentato nelle **Figura 193 – 194** contenute nel precedente paragrafo (*pag. 245*).

Nella strutturazione semi-cristallina dei fili elementari di Dyneema, le catene di polietilene sono allungate e affiancate, seguendo l'asse longitudinale delle fibre e andando a costituire pacchetti ordinati, cristallini anche oltre il 75 %, come rappresenta la **Figura 193** sopra menzionata.

In aggiunta, e non è fatto di poco conto, la disposizione ordinata, parallela e ravvicinata delle catene di polietilene permette la costituzione di un reticolo di legami di Van der Waals intermolecolari talmente esteso e articolato da rafforzare ulteriormente la struttura chimica del Dyneema (**Figura 194**) (si tenga presente, come già detto, che il **Dyneema non è igroscopico** e quindi il contatto con l'acqua non provoca l'idrolisi dei legami intramolecolari e, tantomeno, etilenici).

02.b.a.4) Seconda considerazione: confronto fra la dislocazione delle curve $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ della Corda e del Cordino - E' evidente che la curva del Dyneema 8 mm è nettamente soprastante a quella del Antipodes, con il Modulo d'elasticità compreso **fra le 18 e le 41 volte superiore**. E ciò era già stato previsto analizzando i valori delle rispettive proprietà meccaniche.

Questo risultato sperimentale è la conseguenza di due fattori:

1. la differenza di **Superficie efficace** fra Corda e Cordino,
2. la differenza fra i **Moduli d'elasticità** dei fili elementari di Dyneema e Nylon 6.

Per il 1° punto, solo sulla base della quantità di materiale che si oppone all'allungamento e quindi al rapporto fra **Superficie efficace** del Cordino (**12 mm²**) e della Corda (**48,8 mm²**), il Modulo **E** del primo dovrebbe essere di **circa 16 volte più piccolo**.

Ma questo sarebbe vero solo se **Corda e Cordino** fossero dello **stesso materiale polimerico**, quando la proporzionalità diretta nella tenuta all'allungamento è dettata solo dalla quantità di materiale che si oppone.

Ma i fili elementari di **Dyneema** hanno un Modulo pari a $E = 142 \text{ GPa}$ mentre quelli del **Nylon 6** è $E = 2,6 \text{ GPa}$, cioè **55 volte inferiore**.

Questa esorbitante differenza di rigidità fa sì che nella **Figura 199** la curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del Dyneema 8 mm sia dislocata abbondantemente al di sopra di quella della Corda di riferimento Antipodes, a dimostrazione di una rigidità pari all'acciaio (quindi inadatta all'applicazione di carichi impulsivi d'energia, come accade soprattutto nell'alpinismo e nell'arrampicata sportiva).

In sintesi se valutiamo l'opportunità o meno dell'utilizzo del Cordino Dyneema 8 mm nella progressione speleologica, dove è ritenuto convenzionalmente proprio non applicare carichi superiori al $LIR = 1100 \text{ kgp}$.

Il Cordino Dyneema 8 mm è di gran lunga più leggero e meno ingombrante di una qualsiasi corda statica usata in grotta. Inoltre, essendo la fibra non igroscopica, non subisce le influenze degradanti del contatto con l'acqua dell'ambiente sotterraneo; ed ha un carico di rottura "senza nodi" $F_r = 3068 \text{ kgp}$ addirittura superiore a quello della corda speleo-alpinistica dell'Antipodes $F_r = 2666 \text{ kgp}$ (inferiore di 1/5 al precedente). Tutte caratteristiche (ingombro, leggerezza e idro repulsione) e valori ben accettabili nell'uso speleologico. Ma la **sostituzione non è consigliabile** per i motivi qui di seguito elencati.

In primo luogo, la rigidità del Cordino Dyneema 8 mm è tale da produrre delle Forze massime F_0 elevate anche con le sollecitazioni di minor intensità: valutando i dati ottenuti con il test rappresentato nella precedente **Figura 199**, con una caduta di **0,1 m** su un campione lungo **3,134 m**, equivalente a un Fattore di caduta $F_c = 0,03$ (poco più della spinta di una "pedalata" in risalita su corda), si è ottenuta una Forza massima $F_0 = 544 \text{ kgp}$.

Per contro, in un'analoga prova a caduta sulla Corda Beal Antipodes 10 mm nuova, la Forza massima è risultata pari a $F_0 = 348 \text{ kgp}$, il 36 % in meno del cordino.

Data la **Relazione 13** (pag. 42), che permette il calcolo della Forza massima conoscendo la forza del peso cadente P , il Coefficiente di elasticità X (inverso del Modulo d'elasticità) e il Fattore di caduta F_c :

$$F_0 = P + \sqrt{P^2 + \frac{2P}{X} \cdot F_c} \quad (13)$$

si calcola che con la corda statica Beal Antipodes 10 mm occorre una **Fattore di caduta pari a 0,65** (pari a una **caduta di 2 m**) per raggiungere un Forza massima pari ai **1100 kgp del LIR**.

Invece per **superare i 1100 kgp del LIR** con il **Cordino Dyneema 8 mm** è sufficiente un Fattore di caduta pari a $F_c = 0,1$ equivalente ad una **caduta di circa 0,5 m** (50 cm). In pratica anche una modesta caduta o anche una semplice "scivolata" potrebbe mettere in crisi la Catena di sicurezza della progressione speleologica.

In secondo luogo, si deve aggiungere un'ultima ancor più dissuasiva considerazione: nei cordini con fibra rigida come il Dyneema l'effetto nodo è fortemente influenzato dalle variazioni di Velocità di deformazione V_d : più è elevata più l'effetto riduttivo del nodo aumenta. Ma questo è un argomento trattato specificatamente nei paragrafi che seguono e a questi si rimanda.

02.b.a.5) Terza considerazione: valutazione dell'andamento delle curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del Cordino Dyneema 8 mm e della Corda Antipodes - E' anche evidente che la curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ del Dyneema 8 mm, contrariamente a quanto accade all'omologa curva della Corda statica, mostra (**Figura 199**) una crescita costante **ad alto gradiente**, con una tendenza a diminuirlo (e poi renderlo una costante?).

Che il Modulo d'elasticità cresca col procedere della serie di choc è una norma per corde e cordini; ma che la pendenza sia inizialmente così accentuata è una caratteristica peculiare delle funi con **fibre ad altissima tenacità**, dove la struttura a colonne parallele è fortemente consolidata da un numero molto elevato di legami intermolecolari (pag. 245, **Figure 193 – 194**).

Prima di procedere all'analisi delle variazioni del Modulo E , in funzione del succedersi degli choc a caduta programmati, occorre ricordare che al 1° choc testiamo la condizione del cordino nuovo, mai usato, con la sua struttura complessa (calza + trefolo + fili elementari) e le condizioni chimico-fisiche dei fili elementari conferite in fabbrica. Il valore del Modulo è in funzione di queste caratteristiche iniziali.

Ma questa situazione viene in parte modificata, **in modo irreversibile**, con l'energia dissipata con la caduta del peso al 1° choc, parte nella struttura complessa della corda e parte nella disposizione delle catene polimeriche nei fili elementari.

Al 2° choc, quindi, si testa un cordino "diverso", con le modifiche strutturali (ed eventualmente chimico-fisiche) apportate dal 1° choc; il che conduce a un nuovo risultato, in genere diverso da quello ottenuto con il 1° choc, perché si sono verificate tutte e tre le possibili deformazioni (le prime due in parte reversibili e influenti sulla parte elastica dei fili elementari):

1. Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC), che qui ovviamente si riferisce a un Cordino,
2. deformazioni legate alla visco-elasticità dei fili elementari (variazioni degli attriti fra le catene),
3. snervamento e rottura dei fili elementari.

Tuttavia, comunque si distribuisca l'assorbimento dell'energia, le deformazioni permanenti avvengono e la capacità di dissipazione diminuisce: il Cordino aumenta la rigidità e il Modulo d'elasticità.

Al 3° choc si testa il campione di Cordino modificato in modo permanente dall'energia dissipata nel 2° choc; che porterà a un del valore di E ancora differente, ma sempre più elevato del precedente.

E così via al proseguire dei test a caduta. La curva risulterà nel complesso ascendente ma con possibili variazioni di pendenza. Sia la pendenza che le sue variazioni sono indicative di quanto succede sotto gli impulsi delle sollecitazioni a caduta nella CSCC e nella disposizione sterica delle catene di macromolecole nei fili elementari.

Ma per comprendere le interazioni fra i possibili aspetti di deformabilità e del mutare del Modulo d'elasticità occorre innanzitutto descrivere nel dettaglio qual è l'evoluzione della CSCC e dell'organizzazione delle catene di macromolecole delle fibre sotto i colpi dei test a caduta.

Per la CSCC l'analisi è presto fatta: esaurisce la sua influenza sin dai primissimi choc, avendo una rilevanza del tutto marginale nel comportamento dissipativo di un cordino con fibre ad altissima tenacità. Al massimo, con una sperimentazione più risolutiva, si nota un inizio della curva $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ con una pendenza meno accentuata.

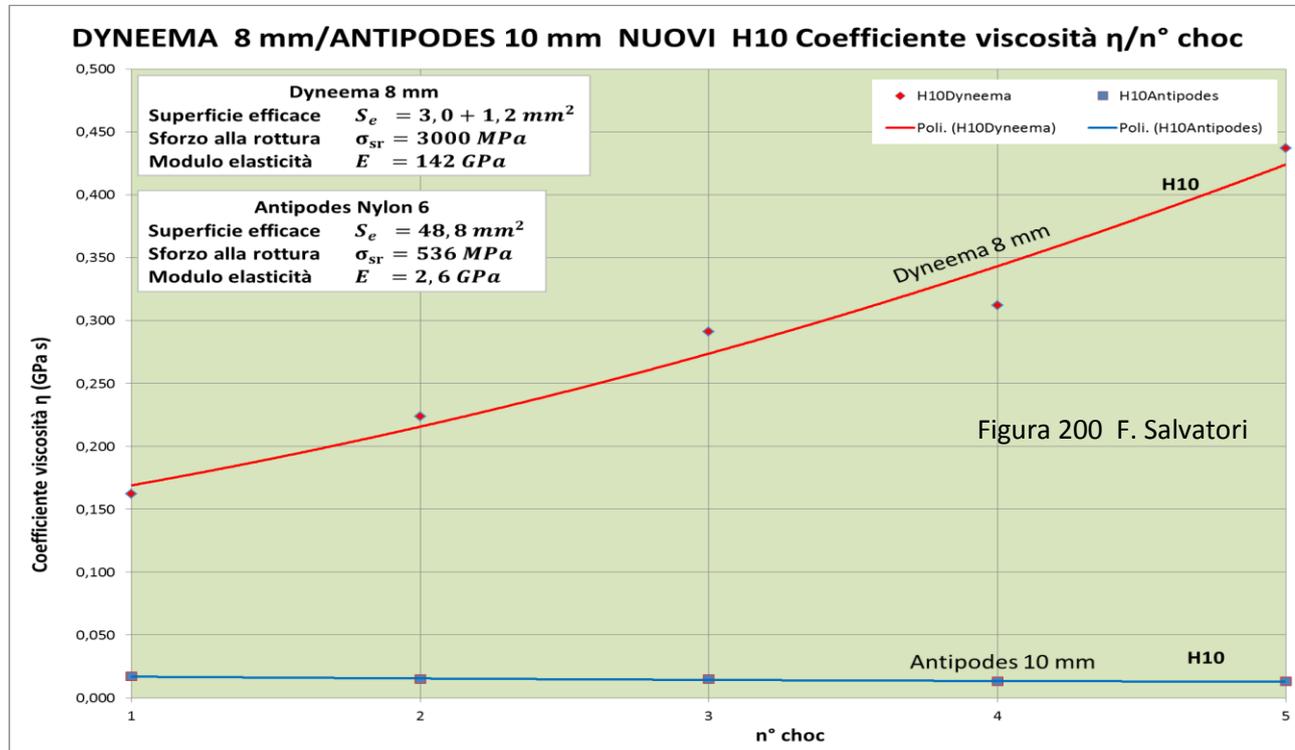
Per quanto accade invece nei fili elementari è utile fare riferimento a quanto descritto nelle **Figure 58 – 59** (pagg. 68 – 69) a proposito delle **5 Fasi** che produce la trazione nelle fibre di Nylon. Far riferimento si, ma con le dovute modifiche per la diversità strutturale iniziale del Nylon e del Dyneema (**Figure 193– 194**) e la diversa forza del complesso dei legami intermolecolari, molto più elevata nel Dyneema, dove occorre una quantità d'energia rilevante per realizzare la disgregazione dei pacchetti cristallini.

Infatti con il succedersi degli choc (che può equivalere a una trazione con forza crescente) la struttura molto cristallina del Dyneema subisce delle deformazioni, in parte irreversibili, che vanno a modificare il rapporto cristallino/amorfo iniziale:

1. inizialmente si possono "stirare", con attriti, i filamenti della parte amorfa, che così riduce la sua deformabilità ed estensione;
2. si può disgregare la parte con catene polimeriche parallele, rompendo dapprima i legami di Van der Waals e poi la dislocazione del parallelismo delle catene, andando ad aumentare l'estensione della parte amorfa e quindi diminuendo la cristallinità del filato;
3. il processo descritto nel 2° punto fa aumentare, contestualmente, l'estensione delle zone amorfiche dei fili elementari;
4. quanto raffigurato nel 3° punto aumenta la viscosità del materiale e, al tempo stesso, diminuisce la sua risposta elastica alle sollecitazioni.

In primo luogo, per procedere all'analisi delle correlazioni fra andamento della curva $E = f(n^\circ \text{ choc})$ e quanto accade nella strutturazione delle catene polimeriche dei fili elementari, visto che la successione di sollecitazioni impulsive conduce, in via di principio, a ridurre l'estensione dei settori cristallini e aumentare quelli amorfi, è opportuno valutare l'andamento della viscosità del materiale polimerico esaminando la curva $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ (Figura 200).

E' evidente che il Coefficiente di viscosità η aumenta in modo costante.



Il fenomeno che conta è soprattutto la modifica del rapporto fra l'estensione dei settori cristallini e amorfi, non dimenticando di valutare anche le modifiche nelle strutturazioni delle catene polimeriche, sia nella parte cristallina che amorfa, tanto in senso sterico, quanto energetico, come nella consistenza degli attriti che si oppongono al districarsi delle catene.

Come principio analitico di base, si tenga presente che la viscosità (irreversibile) compete **soprattutto ai settori amorfi** (come già più volte ricordato, le forze d'attrito che si oppongono al movimento caotico delle catene di polimeri sta alla base del comportamento viscoso dei materiali), mentre le risposte elastiche reversibili fanno riferimento in gran parte alle zone cristalline. Ma gli attriti possono manifestarsi anche nei settori cristallini e così contribuire alle risposte viscoso elastiche alle sollecitazioni.

Dal confronto fra le due Figure 199 e 200, vista la quasi coincidenza fra le curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ e $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$, si può concludere che il contributo principale alla variazione di deformabilità complessiva del Cordino Dyneema 8 mm è dato dalle variazioni della viscosità del materiale: la crescita del coefficiente η coincide con la crescita del Modulo E .

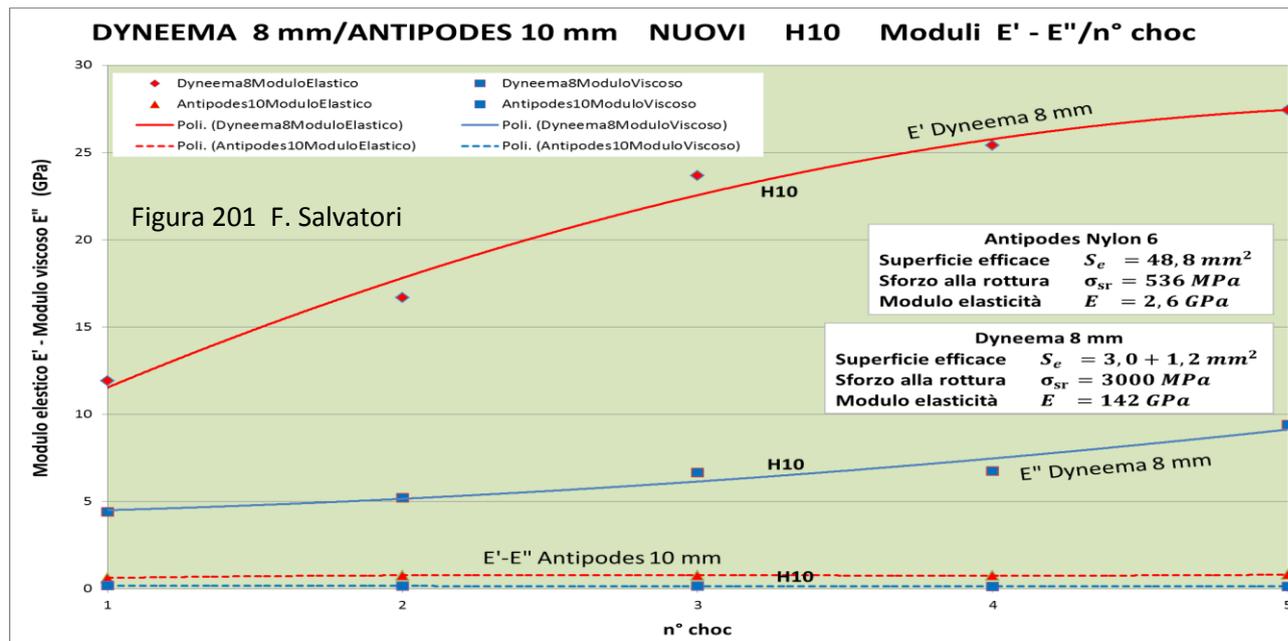
Più precisamente, l'aumento del Coefficiente di viscosità η nei fili elementari del Cordino Dyneema 8 mm indica che le sollecitazioni, tutte, producono nei fili elementari delle modifiche nella suddivisione spaziale "cristallino/amorfo" delle catene di macromolecole, per cui al successivo choc le forze d'attrito che si oppongono al districarsi delle catene polimeriche sono di maggiore intensità; e la deformabilità diminuisce.

Di fatto, la successione degli choc porta a una variazione del rapporto "cristallino/amorfo" nei fili elementari, facendogli acquisire un grado di visco-elasticità più tendente al viscoso che all'elastico.

Un tale comportamento, raffrontato con quello della Corda Antipodes, ci suggerisce come nel Cordino di Dyneema gli effetti del succedersi delle sollecitazioni, **anche di bassa intensità**, producano **un marcato e accelerato decadimento delle fibre**, non tanto nel carico di rottura quanto **nell'aumento della rigidità**.

Anche per questo motivo, una fune del tipo cordino Dyneema 8 mm è **sconsigliabile** sia per la **progressione in grotta** che per la **progressione alpinistica**: nella prima progressione per alto numero di sollecitazioni, sia pur di bassa intensità (pedalate per la risalita su corda, paragonabili a quelle applicate in questo test a caduta); nel secondo tipo di progressione per le sollecitazioni con maggiore carico energetico, anche se meno numerose.

02.b.a.6) Quarta considerazione: valutazione del rapporto fra le variazioni irreversibili di natura viscosa ed elastica – In questo comma si esaminano i dati sperimentali che permettono di definire, anche quantitativamente, come la successione di choc **modifichi lo stato cristallino/amorfo** dei fili elementari e ripartisca il **decadimento fra risposta elastica e viscosa**. Questa analisi dà indicazioni anche sul decadimento generale del Cordino Dyneema 8 mm. Come in precedenza, l’analisi è sviluppata attraverso il confronto con quanto di analogo accade nella Corda Statica Antipodes 10 mm.



Nella **Figura 201** sono riportate le curve $E' = f(n^\circ \text{ choc})$ ed $E'' = f(n^\circ \text{ choc})$ per il Cordino Dyneema 8 mm e la Corda Antipodes 10 mm: linea continua il primo, linea tratteggiata la seconda.

Si ricorda che con l’Analisi Dinamica Meccanica (DMA) (pag. 312 e seg., **Appendici 06**) è possibile sviluppare dei calcoli che permettono di valutare, separatamente, le variazioni che subiscono le strutture cristalline/elastiche e amorge/viscose dei fili elementari (responsabili per la quasi totalità del comportamento dissipativo dell’intera struttura complessa del cordino, visto che l’apporto degli attriti e la CSCC partecipano in maniera irrilevante e trascurabile; a contrario di quanto accade nella Corda).

In particolare occorre tenere presente che:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta = \text{Modulo elastico conservativo reversibile} \quad e$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta = \text{Modulo viscoso dissipativo irreversibile} \quad f$$

$$E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita} \quad h$$

$$\eta = E''/\omega = \text{Coefficiente di viscosità} \quad u$$

Il **Modulo elastico E'** (o conservativo) e misura il contributo dato dalle deformazioni elastiche-reversibili all’assorbimento dell’energia prodotta dalla caduta del peso (per la maggior parte legate ai settori cristallini dei fili elementari).

Il **Modulo viscoso E''** f (o dissipativo) valuta quanta parte hanno avuto le deformazioni irreversibili-plastiche nell’assorbire l’energia prodotta dal test a caduta (quasi esclusivamente concentrate nelle zone amorge delle fibre di Dyneema).

Il **Coefficiente di viscosità η** è una misura del grado di viscosità del materiale ed è in stretta sincronia con il Modulo dissipativo E'' .

Ritornando alla **Figura 201**, dall'andamento e dalla dislocazione delle curve $E' = f(n^{\circ} \text{ choc})$ ed $E'' = f(n^{\circ} \text{ choc})$ del **Cordino Dyneema 8 mm**, si evidenzia che il contributo del **Modulo elastico** è ben **più rilevante** del contributo del **Modulo viscoso**: la curva di E' è ben al di sopra della curva di E'' .

Inoltre, dalla diversità di pendenza delle due curve del Dyneema risalta quanto sia più incidente la parte elastica cristallina nell'assorbire l'energia della caduta del peso.

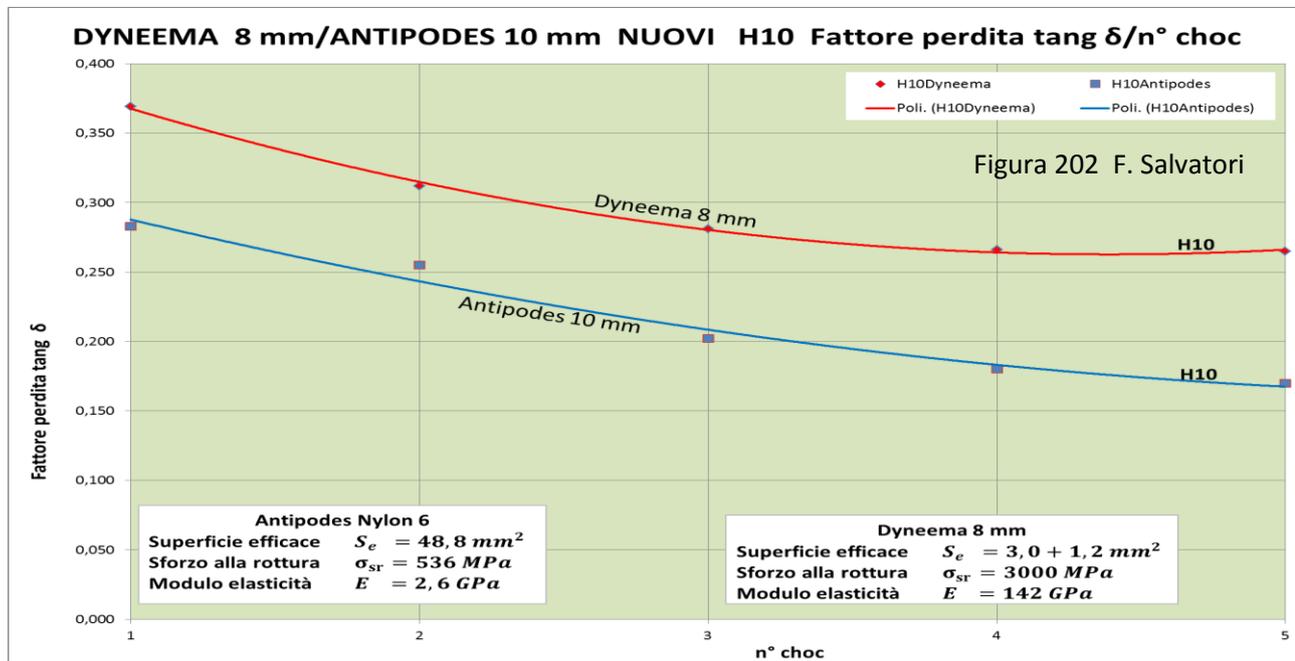
E questo conduce la parte elastica ha subire il maggior carico d'energia, con conseguente maggiore processo di trasformazione da cristallino ad amorfo, fatto estremamente dannoso nel processo di degradazione del Cordino Dyneema.

A tal proposito si ricorda come, nell'esaminare i risultati sperimentali a caduta sulle Corde (pagg. 68 - 69, **Figure 58 - 59**), si rende evidente che la successione degli choc (alla pari di una trazione a velocità costante) porti prima a trasformare la cristallinità in stato amorfo e poi a eliminare gradualmente anche questi settori.

Esaminando infine, sempre nella **Figura 201**, il comportamento delle analoghe curve della Corda **Antipodes 10 mm** si rileva come, per andamento e dislocazione, l'incidenza dei due Moduli E' ed E'' è minimale rispetto a quella prodotta dai Moduli del Cordino. Per la Corda i due Moduli praticamente si equivalgono e mantengono valori costanti al succedersi dei test a caduta.

Quest'ultima considerazione è di grande rilievo per definire i limiti sull'uso di cordini con fibre ad altissima tenacità nella progressione speleo o alpinistica: quelle sollecitazioni che in un Cordino Dyneema 8 mm portano a un rapido e consistente degrado, in una Corda speleo (e alpinistica) producono effetti degradanti contenuti nel tempo e non di pari consistenza negativa. Nell'ambito della **valutazione sull'uso di fibre ad altissima tenacità** (come il Dyneema appunto) nel confezionamento di funi da utilizzare nella normale **progressione speleo e alpinistica**, il giudizio non può essere **che negativo**.

Per completare l'analisi dei risultati sperimentali e definire ulteriormente il contributo della visco-elasticità nel degradare il Cordino Dyneema 8 mm, esaminiamo la **Figura 202** dove sono contenute le curve $\text{tang } \delta = f(n^{\circ} \text{ choc})$ del Dyneema 8 mm e dell'Antipodes 10 mm.



Il **Fattore di perdita** $E''/E' = \text{tang } \delta$ h indica quale parte fra viscosità ed elasticità prende il sopravvento nelle assorbire la deformazione:

1. se i valori della curva $\text{tang } \delta = f(n^{\circ} \text{ choc})$ discendono, tendono a prevalere la deformazioni irreversibili ($\Delta E''/\Delta n^{\circ} \text{ choc} > \Delta E'/\Delta n^{\circ} \text{ choc}$);
2. se i valori della curva $\text{tang } \delta = f(n^{\circ} \text{ choc})$ crescono, tendono a prevalere la deformazioni reversibili ($\Delta E''/\Delta n^{\circ} \text{ choc} < \Delta E'/\Delta n^{\circ} \text{ choc}$);

3. se i valori della curva $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ rimangono costanti, i due settori hanno uguale influenza ($\Delta E''/\Delta n^\circ \text{ choc} = \Delta E'/\Delta n^\circ \text{ choc}$).

In **primo luogo**, osserviamo che siamo nel caso descritto al punto 1: la pendenza a decrescere di entrambe le curve attesta che l'**incidenza dissipativa della parte viscosa dei filati è quella con il maggior peso**.

Attenzione, in ogni caso, a ogni choc, **una parte della deformabilità dei fili elementari si perde in modo permanente** e la loro capacità di assorbire energia diminuisce, ma con un decadimento diversificato: nel **1° caso**, dato che a prevalere sono gli allungamenti irreversibili, in maniera **più dannosa e degradante** che nel 2° e 3; e **maggiore è la pendenza a discendere maggiore è il danno**.

Come **prima osservazione** sui grafici di **Figura 202** risalta la grande differenza fra i valori della curva del Dyneema 8 mm rispetto alla Corda statica: il Fattore dissipativo, e quindi di degrado, è molto più elevato nel Cordino. Il che conferma ancora una volta quanto detto nella precedente osservazione.

Infine, esaminiamo i dati ottenuti per il fattore **% Dissipazione (Figura 203)**, il quale, si ricorda, è una valutazione, senza distinzione fra i vari contributi, di quanta energia è stata utilizzata (rispetto alla quantità totale fornita dalla caduta del peso) per produrre trasformazioni irreversibili: è un elemento di grande significato sintetico per comprendere l'andamento e la consistenza della perdita di deformabilità; in un unico dato la somma dei contributi di tutte le deformazione permanenti.

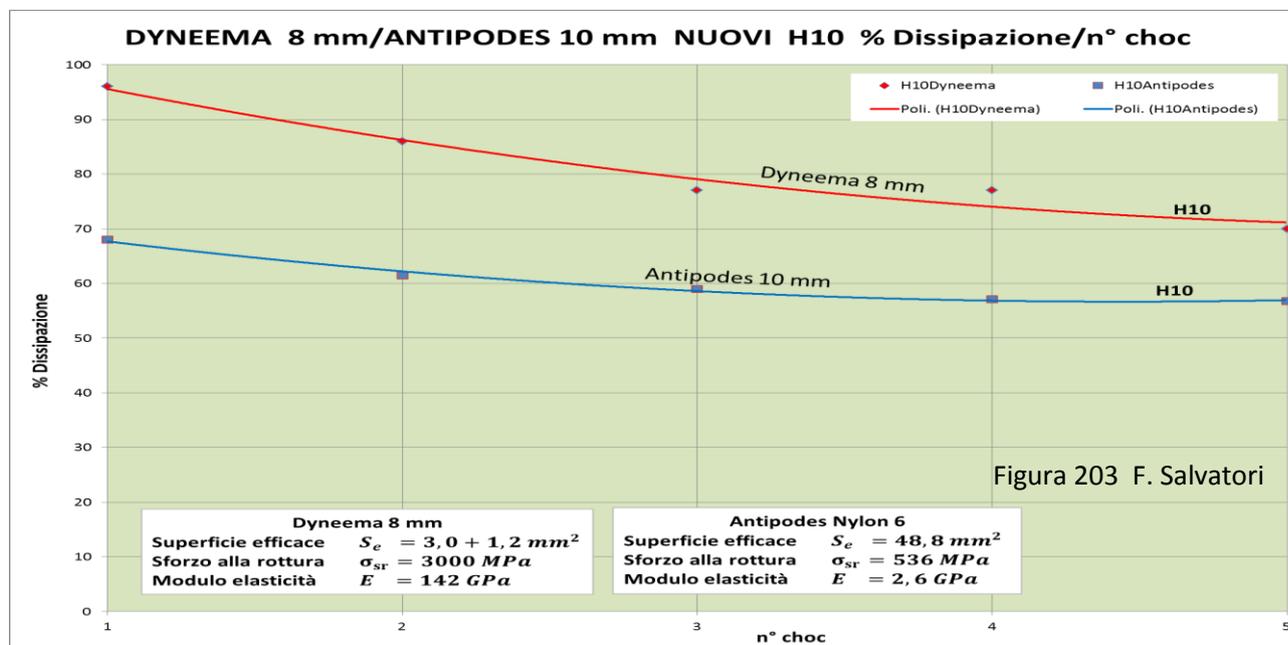


Figura 203 F. Salvatori

Innanzitutto si osserva che le due curve hanno una pendenza maggiore sotto l'effetto dei primissimi choc (pendenza che va diminuendo sotto le sollecitazioni dei successivi test a caduta). Questo è dovuto al contributo della parte irreversibile della CSCC, la quale esaurisce rapidamente il suo compito di deformabilità aggiunta a quella visco-elastica.

Poi, è altrettanto evidente che il degrado derivante dalla diminuzione della capacità di assorbire energia e dalla trasformazione delle parti cristalline in amorphe è nettamente più elevato nel Cordino Dyneema 8 mm che nella Corda statica.

I valori iniziali e finali delle curve sono:

Fibra	% Dissipazione iniziale	% Dissipazione finale
Dyneema	95	81
Nylon 6	68	57

E' dunque ben evidente che il Cordino Dyneema 8 mm inizia con una dissipazione pressoché vicina al 100 % di energia assorbita irreversibilmente (praticamente la quasi totalità dell'energia conferita dalla caduta del peso è dissipata in deformazioni irreversibili, e solo il 5 % viene restituita con un rimbalzo del peso), proseguendo poi con percentuali sempre al di sopra del 70%.

La corda statica Antipodes invece esordisce con un 68 % per terminare con il 57 %: valori ben al di sotto di quelli riscontrati per il Cordino.

L'insieme di queste due ultime considerazioni porta a concludere, ancora una volta, che il cordino Dyneema 8 mm con fili elementari ad altissima tenacità non è proponibile per la progressione speleologica (e alpinistica): il degrado prodotto dalla successione delle sollecitazioni è troppo accentuato.

Si conferma anche il principio che **le fibre più rigide e cristalline abbassano il proprio grado di cristallinità molto rapidamente**, anche con una successione di **choc a basso contenuto energetico**.

Questo comporta, sulla base di quanto affermato dai grafici delle **Figure 69 – 70 – 71** (pagg. 77 - 78), che, di conserva, si abbassi anche lo Sforzo alla rottura e allo snervamento dei fili elementari, facendo così **convergere** l'azione di due potenti fattori degradanti: la **rigidità del materiale polimerico** e l'**abbassamento del carico di rottura** dei fili elementari.

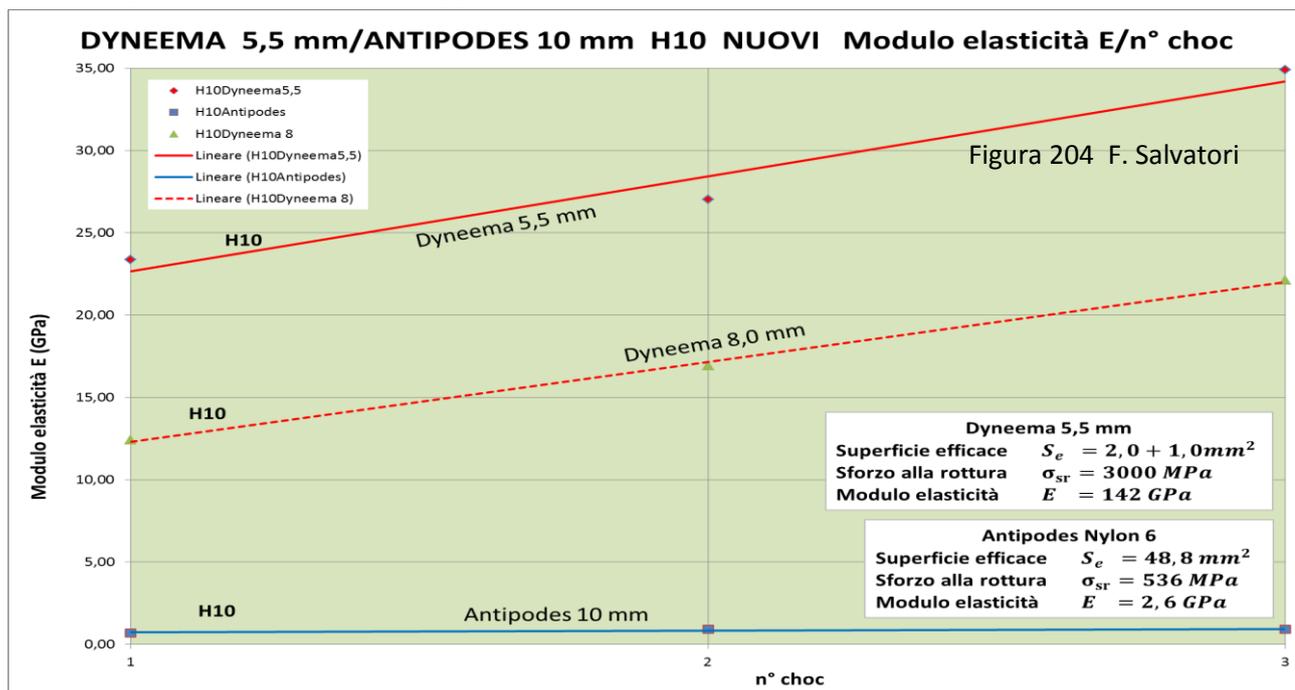
02.c) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 5,5 mm nuovo: inaspettata maggiore rigidità, più rapido gradiente di decadimento e ruolo della CSCC e della visco-elasticità

I grafici che riportiamo sono stati costruiti con le stesse modalità utilizzate nel Paragrafo precedente e la loro validità statistica e analitica è paragonabile. I dati per costruire i diagrammi sono ricavati da **Appendici 03** (pag. 299). Anche in questo caso fa da riferimento la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova.

02.c.a) Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con il cordino Dyneema 8,0 mm e con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova

02.c.a.1) Premessa – Valgono le considerazioni e le impostazioni sperimentali indicate nella Premessa del precedente Paragrafo dedicato al Cordino Dyneema 8 mm. Le differenze con questo Cordino stanno nel n° di choc effettuati (**tre** anziché **cinque**) e nel Diametro efficace del trefolo interno (**2 mm** anziché **3 mm**). Si tenga inoltre presente che la calza è di Nylon 6.6 e il suo contributo al Diametro efficace scende da **1,2 mm** a **1,0 mm** del Cordino 5,5 mm.

Nella **Figura 204** è disegnato il grafico relativo alla curva $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ del cordino Dyneema 5,5 mm, insieme al diagramma della omologa curva della corda statica di riferimento Beal Antipodes 10 mm e del Cordino Dyneema 8 mm (linea tratteggiata).



02.c.a.2 Prima considerazione: ulteriore aumento del Modulo d'elasticità – Con il Cordino Dyneema 5,5 mm la rigidità aumenta ancora. Se elenchiamo in crescendo i risultati per il Modulo d'elasticità ottenuto al 1° choc e al 3° choc si ricava:

per la corda Antipodes 10 mm	0,70 GPa iniziale	1,60 GPa finale
per il cordino Dyneema 8,0 mm	12,5 GPa iniziale	22,0 GPa finale
per il cordino Dyneema 5,5 mm	22,5 GPa iniziale	35,0 GPa finale

Risalta in modo eclatante la **maggiore rigidità dei cordini in Dyneema** rispetto alle corde in Nylon.

Ma appare **ancora più straordinaria** la diversità dei valori di E nei cordini di Dyneema con differente diametro, riscontrata sperimentalmente con test a caduta (**Figura 204**): il Modulo elastico del cordino Dyneema 5,5 mm è superiore a quello del Dyneema 8 mm dell'80 % al primo choc e del 59 % al terzo choc.

Non potendo giustificare che le deformazioni visco-elastiche mutino al variare del diametro (sono calcolate utilizzando la Sforzo massimo σ_0 e la Deformazione massima ϵ_0 , misure che esulano dalla lunghezza e dall'estensione della sezione del campione), non si può che far riferimento alla diversità nella CSCC: nel Cordino 8 mm la strutturazione fra calza/trefoli/fili elementari è molto più elaborata, tale da modificare marcatamente la risposta all'allungamento prodotto dalla caduta del peso, fino a renderlo più deformabile del Cordino da 5,5 mm.

Pertanto è la Compattazione della Struttura Complessa del "Cordino" ha determinare la maggiore straordinaria "elasticità" del cordino Dyneema con maggiore diametro; tanto più che la CSCC aumenta la sua efficienza dissipativa con l'aumento del diametro apparente della corda.

Ricordiamo, per una completezza del quadro dei valori in campo, che quelli del Modulo d'elasticità dei fili elementari (elementi isotropi, senza CSCC) sono (in raffronto con i fili d'acciaio):

fili elementari Nylon 6 (corda Antipodes)	2,60 GPa
fili elementari Dyneema	142,0 GPa
fili elementari acciaio	100,0 GPa

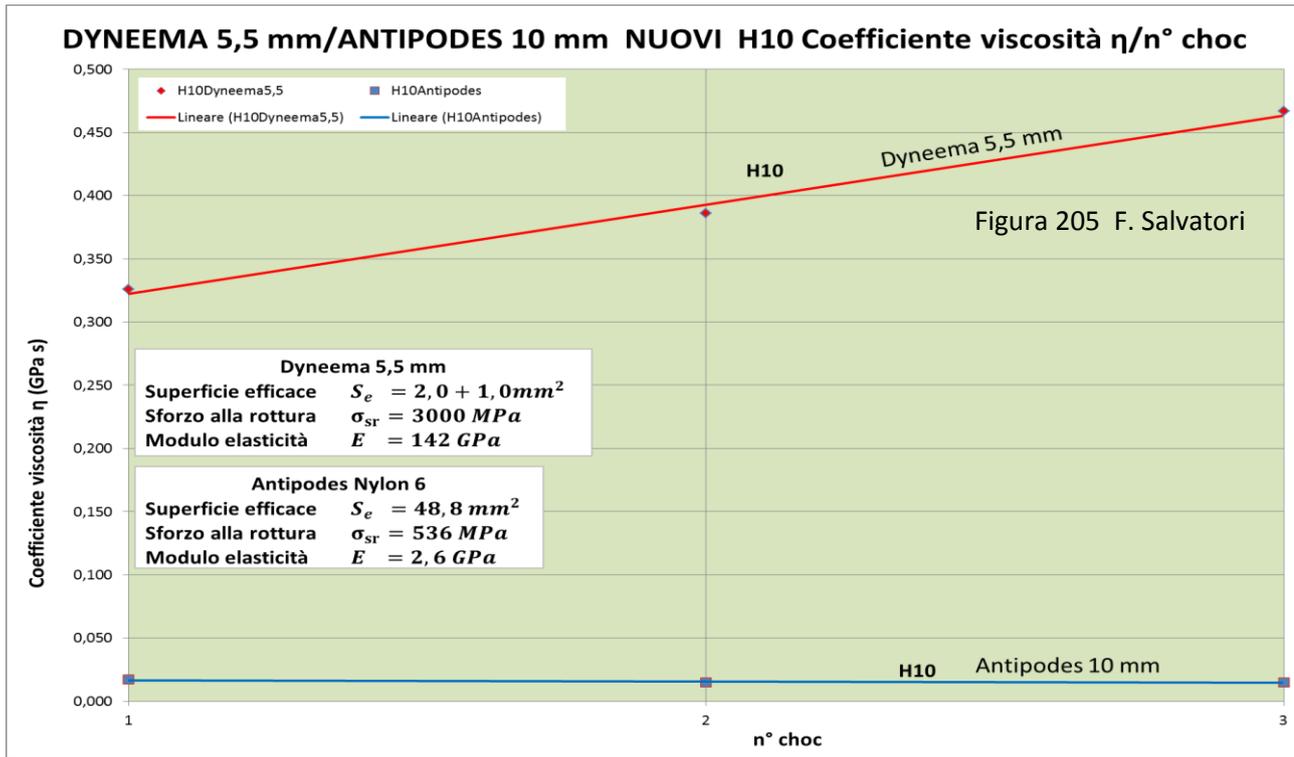
E' evidente che nei fili elementari, mancando la CSCC, la rigidità aumenta a dismisura, fino addirittura a superare quella dell'acciaio.

Pertanto quanto detto nel **Paragrafo 02.b** (pag. 249) è trasponibile, mutatis mutandis, al Cordino 5,5 mm, ma facendo attenzione alla situazione peggiorativa che ne consegue.

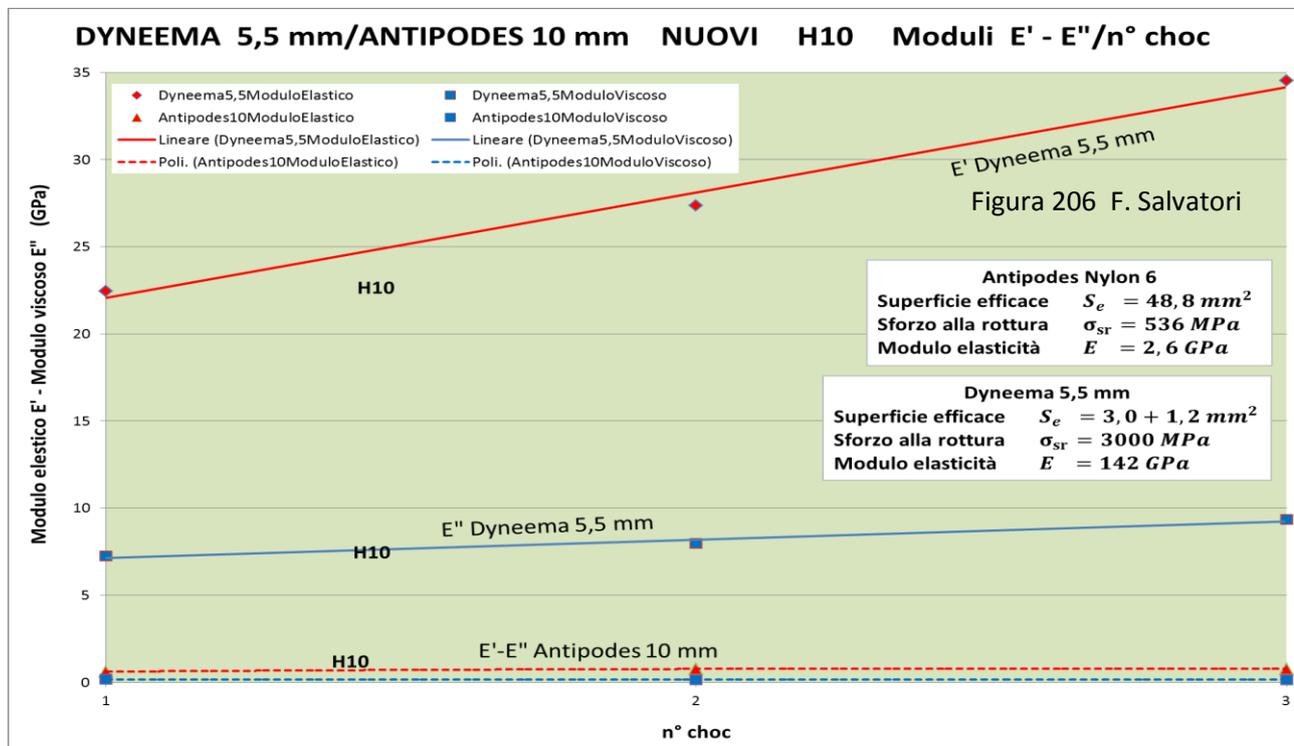
Per esempio, soprattutto, occorre fare attenzione al problema che l'aumento della rigidità fa crescere le forze massime conseguenti alle sollecitazioni a caduta. Infatti, secondo quanto indica la **Relazione 13** (pag. 252), se nel Dyneema 8 mm occorre un Fattore di caduta $F_c = 0,1$ (una caduta libera del peso 10 volte più piccola della lunghezza del cordino sollecitato) per **superare i 1100 kgp del LIR**, con il Dyneema 5,5 è sufficiente un $F_c = 0,05$ per raggiungere lo stesso risultato di forza massima.

Infine, sintetizzando il significato di queste ultime considerazione, risalta il ruolo della CSCC nel determinare la deformabilità di un Cordino (e ancor più di una Corda), sia pur **limitato all'effetto dei primissimi choc** (in questo caso solo tre), **entro i quali si esaurisce** la sua compattazione irreversibile.

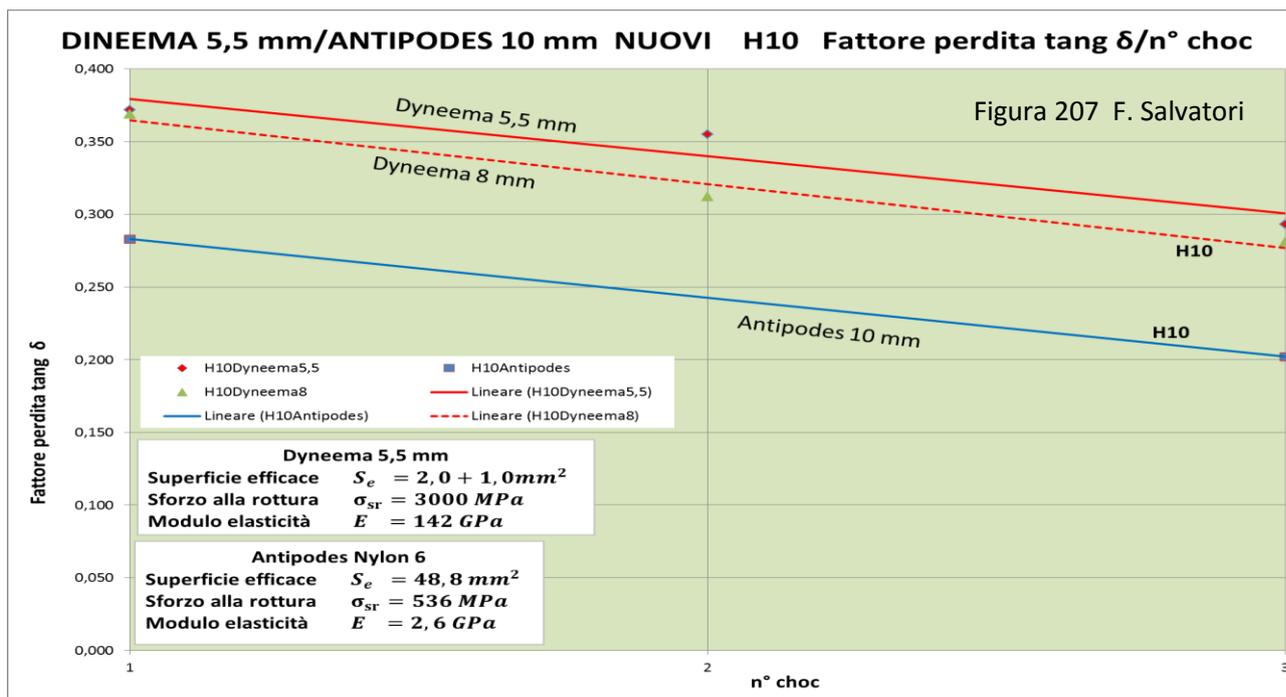
02.c.a.3) Seconda considerazione: coincidenza fra gli andamenti delle curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ e $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ – Anche qui è evidente che la curva del Dyneema 5,5 mm, contrariamente a quanto accade all'omologa curva della Corda statica Antipodes, mostra una crescita costante ad alto gradiente, pari a quello del Cordino 8 mm. Anche quanto affermato nella **considerazione 02.b.a.5** (pag. 252) per il Dyneema 8 mm è trasponibile per lo stesso cordino da 5,5 mm. Infatti la curva $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ di **Figura 205** conferma che la **deformabilità del cordino** è legata in particolar modo alla **variazione di viscosità del Dyneema**: tanta coincidenza nell'andamento non può dipendere solo da una casualità.



02.c.a.4) Terza considerazione: valutazione del rapporto fra le variazioni irreversibili di natura viscosa ed elastica – Ora vengono valutati separatamente i contributi all'assorbimento d'energia forniti dalla viscosità e dalla elasticità. Nella **Figura 206** ci sono i grafici delle curve $E' = f(n^\circ choc)$ ed $E'' = f(n^\circ choc)$, rispettivamente Modulo elastico e Modulo viscoso, sia del Cordino che della Corda (in un confronto con l'analoga **Figura 201** occorre tenere presente che in questo caso i test a caduta sono limitati a tre, la definizione è minore, con curva di tendenza lineare piuttosto che polinomiale; l'attendibilità statistica è ridotta).



I risultati comunque non si discostano da quelli del Dyneema 8 mm, con il Modulo elastico con gradiente di crescita maggiore rispetto a quello viscoso. Come a dire che il contributo dissipativo delle deformazioni elastiche è superiore a quello delle deformazioni viscoso. Però i valori sono leggermente superiori: questo Cordino, di minor diametro, degrada come il Dyneema 8 mm, **ma in modo più marcato e veloce.**

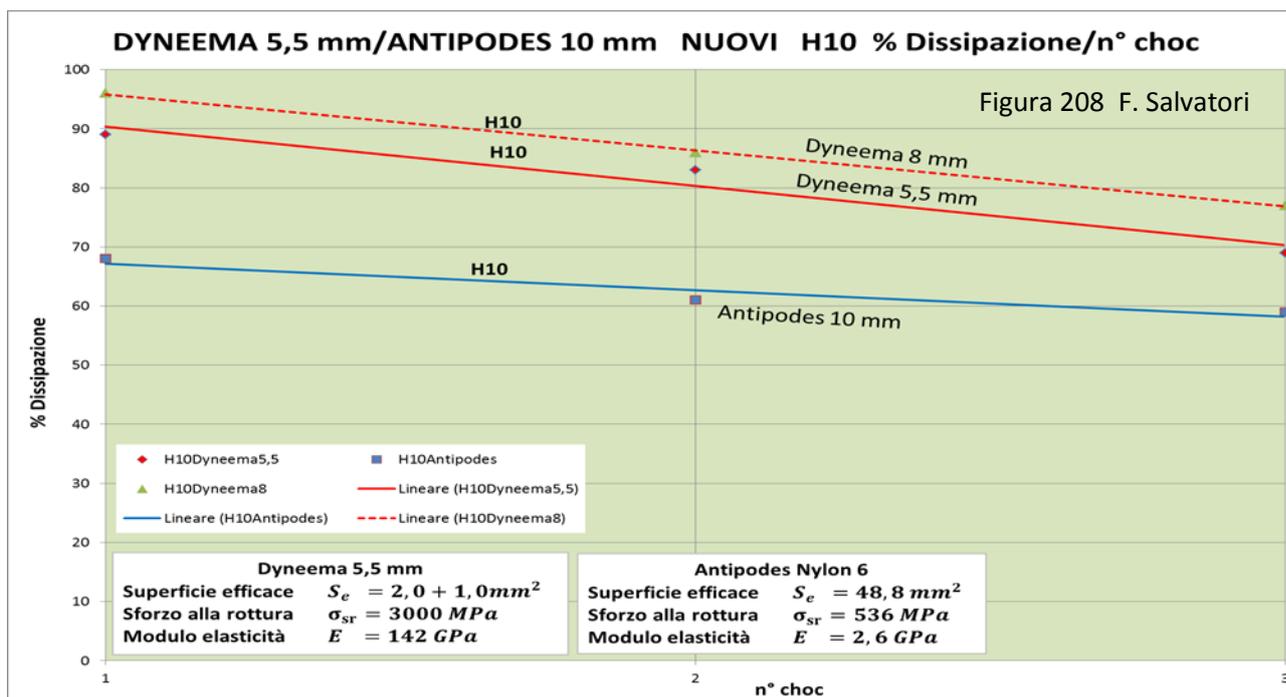


Nella **Figura 207** è descritto l'andamento del Fattore di perdita **tang δ** , che valuta, per la sola parte visco-elastica, la perdita dell'efficacia dissipativa totale. E' subito evidente che nel Cordino a minor diametro il degrado è più rilevante.

Comunque, entrambi i Cordini subiscono una perdita nel campo delle deformazioni visco-elastiche nettamente superiore a quella che patisce la Corda statica.

Altro nuovo motivo per **sconsigliare** l'uso di funi di piccolissimo diametro, anche se fornite di carichi di rottura senza nodi elevati, come nel caso del Dyneema in esame ($F_r = 1473 kgp$).

02.c.a.5) Quarta considerazione: coincidenza dell'andamento e della dislocazione delle curve tang $\delta = f(n^\circ choc)$ e % Dissipazione = f(n° choc) – Ricordando che **% Dissipazione** esprime percentualmente la quantità totale d'energia assorbita in modo permanente dai Cordini e dalla Corda, senza alcuna distinzione fra CSCC e visco-elasticità, nel confronto fra le **Figure 207 – 208**, risalta chiaramente la coincidenza fra andamento e dislocazione delle curve.



Anche con questa considerazione si conferma che nei Cordini di Dyneema, di qualsiasi diametro, la CSCC ha un ruolo poco rilevante e **limitato ai primi choc**. Si conferma dunque, una volta ancora, che i danni irreversibili più consistenti li subisce la natura visco-elastica dei fili elementari.

A sopportare l'intero carico dissipativo sono le deformazioni legate alla visco-elasticità, rivolgendosi soprattutto alle deformazioni elastiche; il che porta a una diminuzione di cristallinità, **con tutte le conseguenze negative per le caratteristiche meccaniche dei fili elementari** e, quindi, dei Cordini.

Ne consegue un degrado molto rapido e incisivo della fibra polimerica, che porta molto presto a ridurre i parametri fondamentali sotto il LIR. Con inevitabili conseguenze operative pericolose.

02.d) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Courant Kevlar 5,5 mm nuovo e confronto fra fibre ad altissima tenacità

I grafici che riportiamo sono stati costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza e la loro validità statistica e analitica è confermata. Nei grafici fanno da riferimento le curve della Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e, quando necessario, dei Cordini Dyneema. I dati sono ricavati, come sempre, dalle Tabelle di **Appendici 03** (pag. 299).

02.d.a) Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e il Cordino Dyneema 5,5 mm

02.d.a.1) Premessa – Valgono le considerazioni e le impostazioni sperimentali indicate nella Premessa dei precedenti **Paragrafi** dedicati ai Cordini Dyneema 8 mm e 5,5 mm.

Anche in questo caso gli choc in successione applicati sono stati cinque, come per il Dyneema 8 mm (sono tre per il Cordino Dyneema 5,5 mm).

Da ricordare, nel confronto con il Cordino Dyneema 5,5 mm, che il Diametro efficace del trefolo interno è di **2,8 mm** (anziché **2,0 mm**). Per la calza esterna (di Nylon 6.6), sempre rispetto al Dyneema 5,5 mm, si passa da **0,8 mm a 1,0 mm**.

Per quanto riguarda la rigidità delle fibre in Kevlar occorre far riferimento alla sua struttura a nido d'ape delle catene di macromolecole, **rafforzata dagli anelli aromatici e dai legami idrogeno intermolecolari** (più forti dei legami di Van der Waals del Dyneema) (pag. 246, **Figure 195 – 196**), che determina una "compattazione" della struttura delle catene di macromolecole nei fili elementari superiore a tutte le altre sopra elencate, creando dei settori cristallini ad alta energia "reticolare" e difficili da deformare (modifiche elastiche non permanenti) e disgregare (modifiche plastiche permanenti).

Ma il Kevlar si distingue dal Dyneema per le sue caratteristiche chimico-fisiche, soprattutto perché è un **materiale igroscopico**, potendo assorbire molecole d'acqua che vanno a inserirsi negli spazi fra gli elementi atomici delle catene polimeriche, **dove annullano i legami idrogeno intermolecolari**: con un'UR al 100 % in grotta o in immersione completa in acqua (le due condizioni si equivalgono) può assorbirne fino al 30 % in peso (il Nylon di acqua ne può assorbire igroscopicamente non più del 10 %).

In questo caso un filo elementare di Kevlar **riduce il suo Carico di rottura senza nodi F_r** di 2/3. E questa riduzione di **F_r** in grotta, dove l'UR è costante al 100 %, è sempre effettiva!

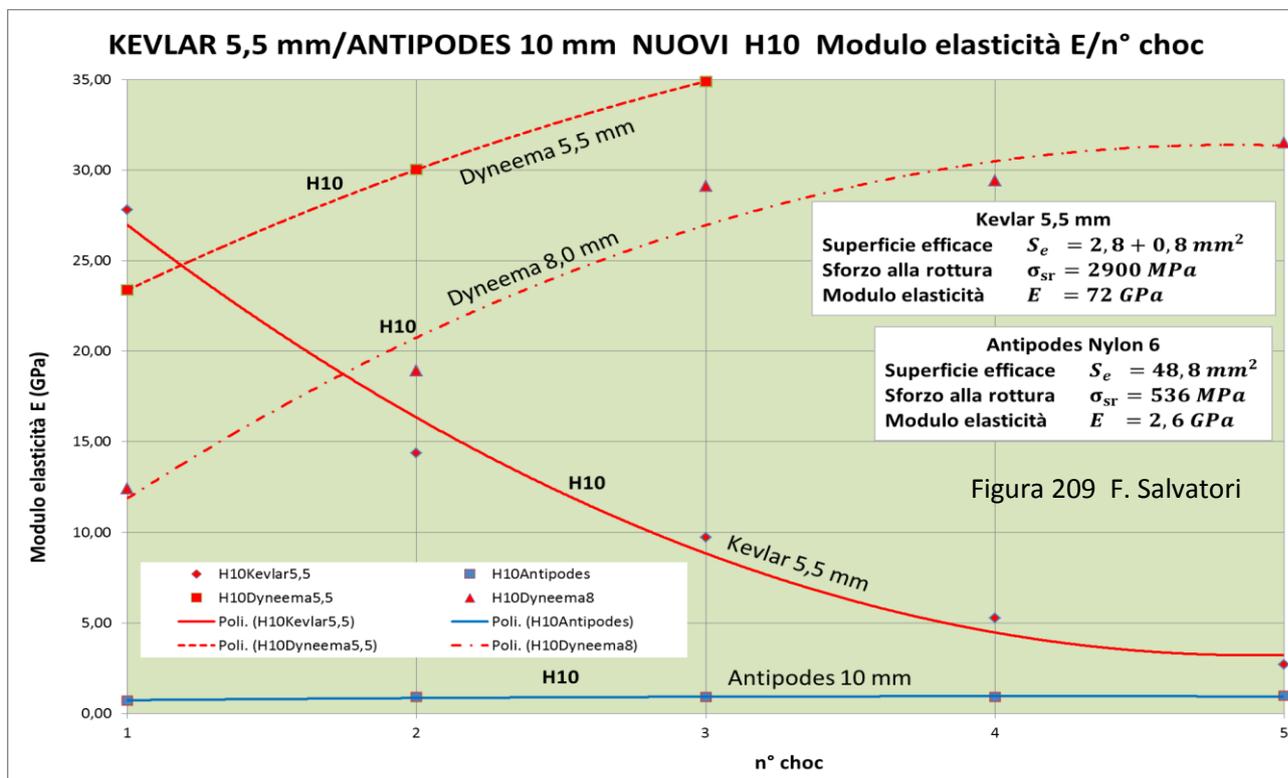
Altro aspetto che compromette la possibilità d'uso del Kevlar nella normale **progressione su corda in grotta** è la sua sensibilità alle variazioni del **pH**, variazioni sia al di sopra (basiche) che al di sotto (acide) dello zero, che portano comunque a una depolimerizzazione delle macromolecole e, quindi, a una diminuzione di rigidità e del Carico di rottura (pag. 81, **Figura 73**).

Il Kevlar è anche fotosensibile (sempre con depolimerizzazione) e in maniera superiore al Nylon.

Per contro, subendo una **disgregazione a 500°C**, è molto **resistente al calore** (tanto che è utilizzato per costruire le carcasse degli pneumatici delle auto).

02.d.a.2) Prima considerazione: ulteriore aumento iniziale del Modulo d'elasticità del Cordino – Il Cordino Kevlar 5,5 mm (linea rossa continua) al **1° choc**, mostra una rigidità superiore, come si può vedere in **Figura 209**.

Il suo Modulo d'elasticità (dopo quello del Dyneema è il più elevato fra tutti i cordini e le corde sinora testate) configura un uso che non prevede la possibilità di applicarvi carichi istantanei (a caduta) di un certo rilievo. Infatti è sufficiente una caduta del peso (140 kgp) di **10 cm** su un campione lungo **300 cm** ($F_c = 0,03$) per raggiungere una forza massima $F_0 = 644 \text{ kgp}$. Si supera il LIR con una caduta di **appena 25 cm**.



Infatti, anche replicando per confronto gli analoghi valori già ottenuti sugli altri cordini e corde, si può elencare in ordine crescente:

per la corda Antipodes 10 mm	0,70 GPa	per il cordino Dyneema 5,5 mm	25,5 GPa
per il cordino Dyneema 8,0 mm	12,0 GPa	per il cordino Kevlar 5,5 mm	28,5 GPa

Ricordiamo, anche qui per una completezza del quadro dei valori in campo, che il Modulo d'elasticità dei **fili elementari** delle diverse fibre sono:

fili elementari Nylon 6 (corda Antipodes)	2,60 GPa
fili elementari Dyneema	142,0 GPa
fili elementari Kevlar	72,0 GPa
fili elementari acciaio	100,0 GPa

E' evidente, come più volte detto in precedenza, che nei fili elementari (**isotropi**) delle fibre polimeriche, mancando la CSCC, la rigidità aumenta a dismisura, fino addirittura a superare quella dell'acciaio.

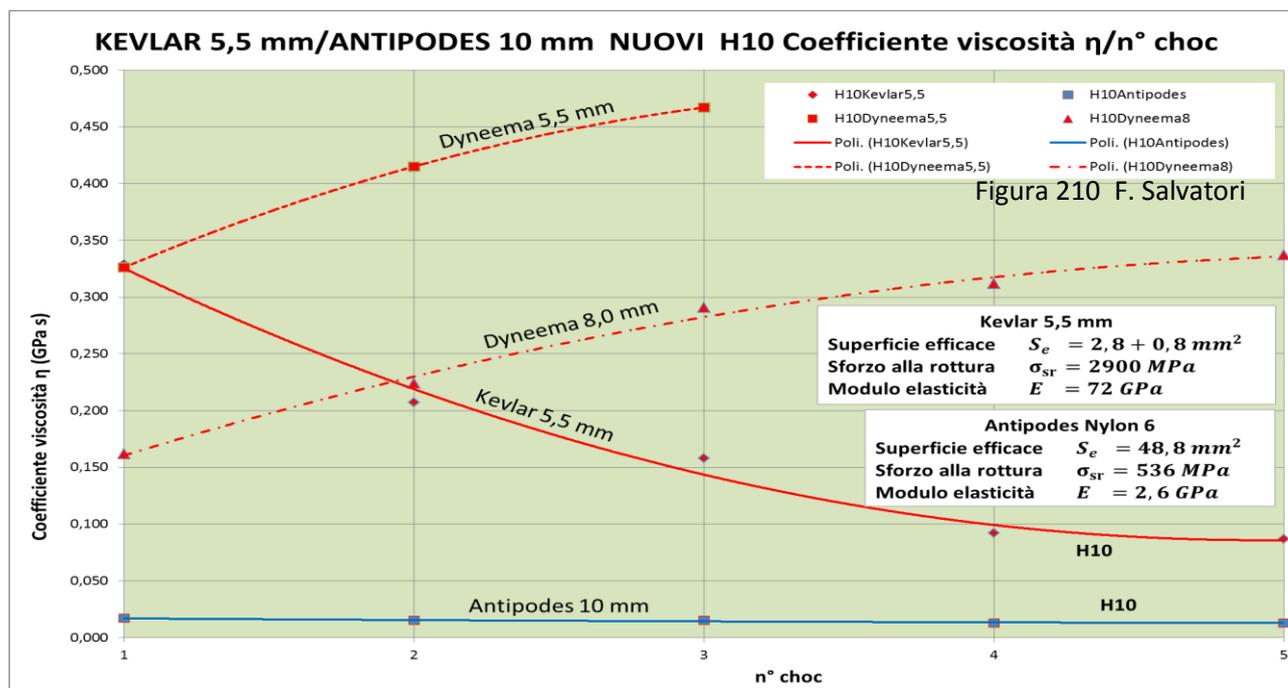
Inoltre, è di notevole rilievo, **e da spiegare**, perché il cordino Kevlar 5,5 mm è **più rigido del suo omologo in Dyneema**, quanto invece il filo elementare del primo è molto meno rigido del filo elementare del secondo (**72 GPa** contro **142 GPa**).

La spiegazione dell'anomala classificazione del Modulo d'elasticità del cordino di Kevlar - visto che questo parametro si calcola con la pendenza della curva $F = f(A)$ ed è in funzione sia della CSCC che delle deformazioni visco elastiche - sta verosimilmente in un contributo dissipativo straordinariamente basso della Compattazione della sua Struttura Complessa.

E non può essere altro, visto che la calza - in entrambi i cordini dello stesso materiale (Nylon 6.6) e con una configurazione geometrica simile - da sola non può essere responsabile di tanto capovolgimento dell'ordine di rigidità dei cordini. Ecco un'altra testimonianza numerica dell'importanza della CSCC nel determinare la deformabilità complessiva delle funi; anche dei cordini con fibre ad alta Tenacità.

02.d.a.3) Seconda considerazione: al contrario di quanto accade per i Cordini Dyneema la curva $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$ del Cordino Kevlar è discendente - Sempre nella **Figura 209** è reso evidente che il succedersi degli choc rende i fili elementari di Kevlar **più duttili** (Modulo E va verso valori inferiori), con una tendenza a ridurre il gradiente discendente (probabilmente anche a stabilizzarsi, se la serie di choc venisse proseguita). Si noti, per contro, la costanza del Modulo della Corda Antipodes (dove l'elevato effetto CSCC che fa da tampone).

Per trovare una spiegazione a questo comportamento (*in generale vale il principio per cui, sotto l'effetto di una successione di choc, una fune di fibre sintetiche aumenta il suo Modulo d'elasticità, in conseguenza del fatto che a ogni choc compromette una parte della sua deformabilità complessiva*) analizziamo i grafici di **Figura 210**.



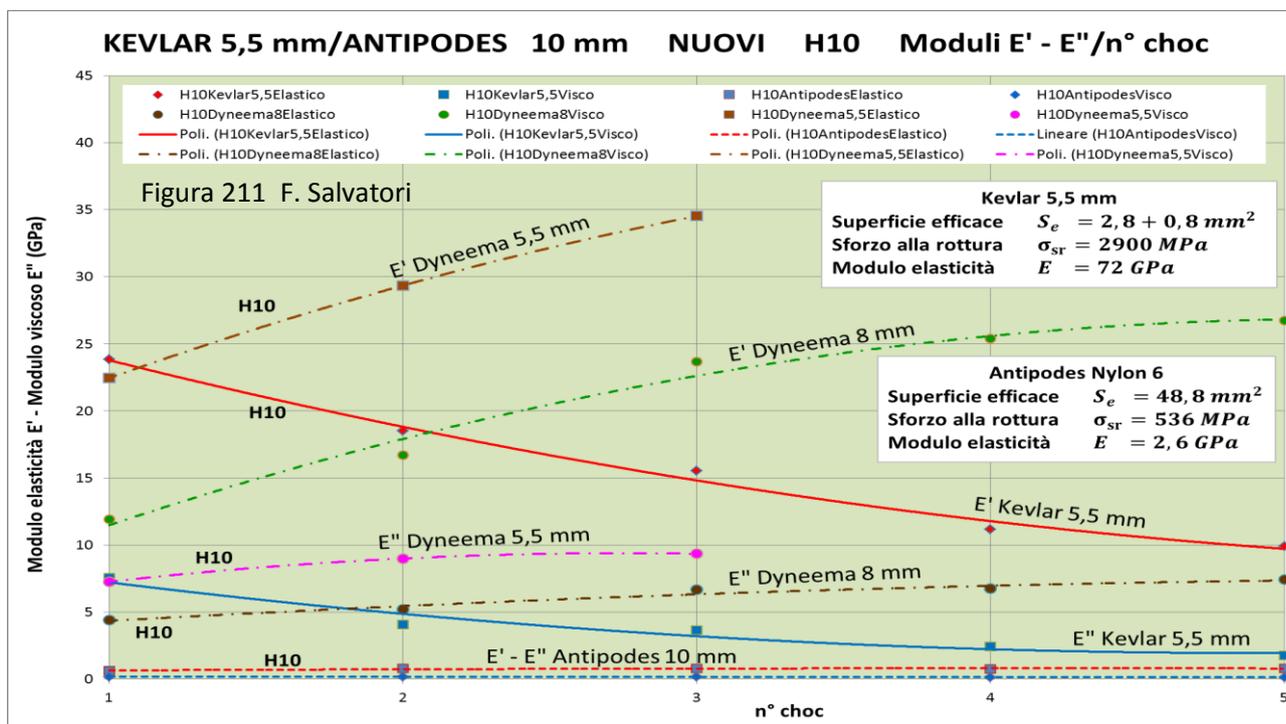
E' dunque evidente che il Modulo E segue l'andamento del Coefficiente di viscosità η . Ne discende che, non potendo imputare alcun contributo alla CSCC del Cordino Kevlar, ciò che determina la deformabilità complessiva è solo conseguenza di quanto accade alla visco-elasticità; e in questo caso alle variazioni di viscosità che prevalgono nettamente su quelle legate all'elasticità (si ricordi che accade la stessa cosa anche nei Cordini in Dyneema, ma in quei casi, con il susseguirsi degli choc, la viscosità aumenta e così pure il Modulo d'elasticità).

Il perché di questa diversità di comportamento fra fibre di Dyneema e di Kevlar - entrambe ad altissima tenacità e con delle catene di macromolecole che si organizzano nei fili elementari con strutture altamente cristalline rinforzate da legami intermolecolari, Van der Waals o Idrogeno che sia - è verosimilmente dovuto a quanto accade nel **momento dell'applicazione della sollecitazione impulsiva** con la caduta del peso.

La viscosità, che si manifesta anche in funzione del tempo di ritardo δ , è un fenomeno provocato dalle **forze d'attrito che contrastano i movimenti fra catene polimeriche sollecitate** a distendersi e districarsi: maggiore è la somma di queste forze d'attrito maggiore è il grado di viscosità.

Gli attriti suddetti si **manifestano tanto nelle zone cristalline quanto nelle amorfie**. In entrambi i luoghi si attuano delle deformazioni permanenti che fanno comunque ridurre la capacità complessiva di dissipare energia. Dal rapporto fra le deformazioni permanenti nei settori amorfi e cristallini, ma soprattutto dalle differenze nelle variazioni di deformabilità fra cristallino e amorfo si riesce a distinguere fra i contributi dati alla dissipazione dai diversi apporti quantitativi. I grafici che seguono distinguono fra interventi del Modulo elastico E' e il Modulo viscoso E'' . I meccanismi di deformazione sono resi correlabili alla successione degli choc.

02.d.a.4) Terza considerazione: dislocazione uguale ma andamento opposto delle curve $E' = f(n^\circ \text{ choc})$ ed $E'' = f(n^\circ \text{ choc})$ rispetto ai Cordini Dyneema - Nella Figura 211 è diagrammato l'andamento e la dislocazione delle curve del Cordino Kevlar 5,5 (linee continue) $E' = f(n^\circ \text{ choc})$ ed $E'' = f(n^\circ \text{ choc})$, rispettivamente Modulo elastico e Modulo viscoso.

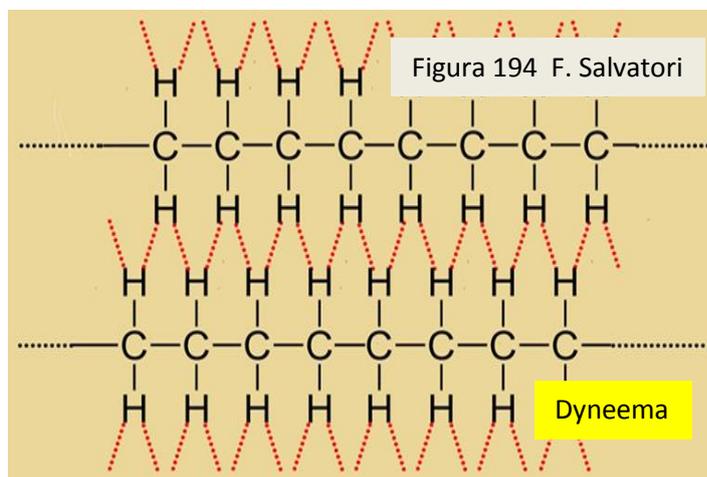
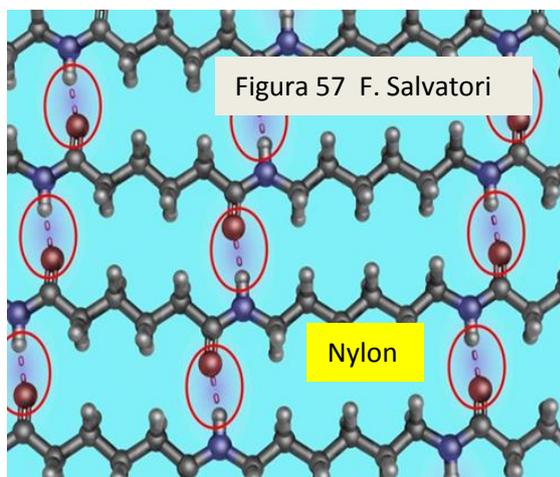


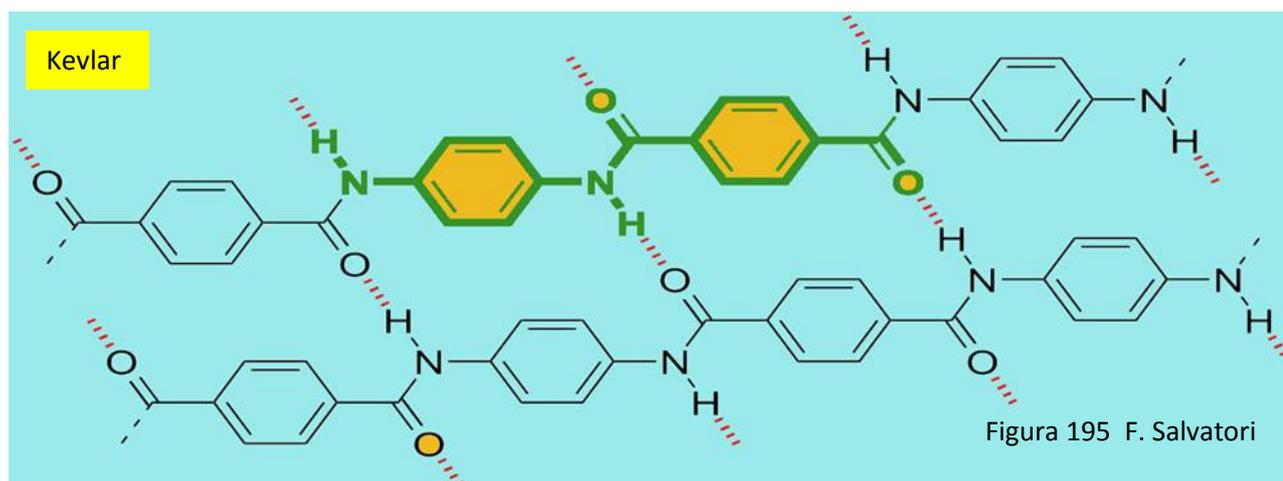
Al fine di individuare le diversità di comportamento fra fili elementari di Kevlar e Dyneema per effetto degli choc a caduta, sono disegnate, con linee variamente tratteggiate, anche le analoghe curve dei Cordini Dyneema 5,5 mm e Dyneema 8,0 mm

E' evidente che le **dislocazioni** si differenziano, anche di molto, in funzione del tipo di fibra e dei diametri e in rispetto dell'ordine espresso nella Tabella dei Moduli d'elasticità del precedente **Paragrafo 02.d.a.2** (pag. 262): seguendo l'ordine di grandezza dei valori del Modulo d'elasticità al **1° choc**, più in alto il Cordino Kevlar 5,5 mm, più sotto il Dyneema 5,5 mm, più sotto ancora il Dyneema 8,0 mm, infine la Corda Antipodes.

Per quanto riguarda gli **andamenti**, c'è una netta differenziazione fra i cordini di Dyneema e Kevlar: per i primi le **curve sono ascendenti**, per il secondo **discendenti**. Diversità d'andamento omogenea a quanto riscontrato per i fattori E e η .

02.d.a.4.1. - **Proprietà meccaniche delle fibre polimeriche e struttura delle catene di macromolecole** – Che l'ordine sia quello mostrato nella **Figura 211** è strettamente dipendente dalla conformazione delle fibre polimeriche nei fili elementari. Nella **Figure 57 - 194 - 195** (pagg. 245 - 246):





sono rappresentate le disposizione e i collegamenti intermolecolari delle tre strutture molecolari che costituiscono le zone cristalline (per la parte amorfa si faccia riferimento alle **Figure 58 – 59**, pag. 68 - 69).

La struttura del Nylon (pag. 65, **Figura 57**) è la meno compattata, con catene allineate e parallele collegate da distanziati legami idrogeno (la cristallinità di queste poliammidi può variare dal 50 % per il Nylon 6 al 70 % del Nylon 6.6).

Il Kevlar (pag. 246, **Figura 195**) ha una disposizione sterica che facilita la formazione di molteplici **legami idrogeno**, ancor più efficaci per la risonanza prodotta dagli anelli aromatici. La cristallinità può anche superare l'70 %.

La disposizione sterica del Dyneema (pag. 245, **Figura 194**), a catene polimeriche allungate nei fili elementari parallelamente l'una all'altra, la più forte costituzionalmente, si avvale di legami **intermolecolari di Van der Waals**, più deboli dei **legami idrogeno** ma molto più numerosi. La cristallinità del Dyneema può arrivare a superare il 75 %.

Queste situazioni strutturali sono rispecchiate dai valori del Modulo d'elasticità espressi nella **Figura 210** e nella tabella contenuta nel precedente **Paragrafo 02.c.a.2** (pag. 258), nonché dalla graduatoria delle Tenacità e dello Sforzo specifico alla rottura:

	Fibra	Modulo elasticità E (GPa)	Sforzo spec. rottura σ_{sr} (N/mm²)	Tenacità T (N/Tex)
1°	Dyneema	142	3000	2,80
2°	Kevlar	72	2900	2,03
3°	Nylon 6.6	8	900	0,64
4°	Nylon 6	2,6	536	0,47

Queste sono le proprietà meccaniche dei campioni nuovi. Ma con la successione degli choc le strutturazioni molecolari cristalline e l'intrico di catene delle zone amorfe si modificano, sia con deformazioni reversibili elastiche che con deformazioni permanenti plastiche (pagg. 68 -69, **Figure 58 – 59**; pagg. 63 - 64 - 65, **Figure 55 – 56 - 57**).

A ogni sollecitazioni a caduta, l'energia in gioco viene assorbita tanto dalla parte cristallina quanto dall'amorfa: i settori cristallini rispondono soprattutto con deformazioni elastiche, quelli amorfi soprattutto con reazioni viscosi. Possiamo valutare quantitativamente i diversi contributi analizzando la **Figura 211**.

02.d.a.4.2. - Dislocazione delle curve E' ed E'', struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nella Corda Antipodes 10 mm – Per quello che riguarda la Corda Antipodes 10 mm è chiaro che i contributi elastici e viscosi quasi si equivalgono (con una leggera prevalenza per il Modulo elastico E') e le deformazioni permanenti pure (**Figura 211**).

Il mantenersi costate dei valori è anche una conseguenza del comportamento della CSCC della Corda, che ha un ruolo importante nei test a caduta, con un effetto tampone che rende poco visibili gli effetti della visco-elasticità. A ciò contribuisce anche il test, che contempla solo un numero limitato di choc a basso contenuto energetico.

Il decadimento della corda che ne consegue si distribuisce equamente fra parti cristalline e amorfe, con gradienti molto contenuti.

02.d.a.4.3. - Dislocazione delle curve E' e E'' , struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nei Cordini Dyneema 5,5 mm e 8 mm – Ben diverso, rispetto alla Corda Antipodes, è il comportamento delle curve che descrivono i Moduli elastici e viscosi E' e E'' dei Cordini Dyneema (Figura 200):

1. pendenze e valori assoluti di entrambi i Moduli molto più elevati di diversi ordini di grandezza;
2. pendenze e valori assoluti nettamente **superiori per il Cordino Dyneema di minor diametro** (5,5 mm).

L'andamento di dette curve è **in risalita**, con pendenze superiori per il Modulo elastico E' .

Esprimendo il tutto con le dovute notazioni matematiche, per le curve relative ai Cordini Dyneema si ha:

Dyneema 5,5 mm	Dyneema 8,0 mm	Dyneema 5,5 mm/ Dyneema 8,0 mm
$d(E')/d(n^{\circ}choc) \gg 0$	$d(E')/d(n^{\circ}choc) \gg 0$	$d(E')/d(n^{\circ}choc) \gg d(E')/d(n^{\circ}choc)$
$d(E'')/d(n^{\circ}choc) > 0$	$d(E'')/d(n^{\circ}choc) > 0$	$d(E'')/d(n^{\circ}choc) > d(E'')/d(n^{\circ}choc)$

In sintesi:

1. il contributo dissipativo delle **deformazioni elastiche** è di diversi ordini di grandezza superiore a quello delle **deformazioni viscosi**; sono dunque soprattutto le zone cristalline dei fili elementari a sopportare il peso delle sollecitazioni impulsive;
2. il contributo dissipativo delle deformazioni, sia elastiche che viscosi, è superiore nel Cordino Dyneema di **minor diametro** (5,5 mm): le cui curve si **dislocano ben al di sopra di quelle relative al Cordino Dyneema 8 mm**.

Da questa prima analisi, tenuto presente che le deformazioni elastiche competono soprattutto ai settori cristallini, si evidenzia che le modifiche degradanti si accentrano soprattutto in questi settori; molto meno nei settori amorfi (ma comunque presenti).

Ne segue anche che la fune a minor diametro è quella che, a parità di condizioni sperimentali, maggiormente risente del degrado prodotto dalla successione degli choc. E' questa un'ulteriore conferma che i diametri più sono ridotti, più rapido e marcato è il decadimento per l'usura (che, si ricorda, equivale a una trazione costante con forza crescente).

Attenzione, il fatto che le curve siano in crescita non significa che aumentano i settori cristallini a scapito degli amorfi o viceversa. Vuol dire invece che tanto nei settori cristallini come nelle zone amorfiche, a seguito di un test a caduta, si crea una nuova situazione strutturale complessiva per cui al successivo test (con energia in gioco di poco superiore a quella del test a caduta precedente, dovuta alla maggiore lunghezza del campione) il contributo dissipativo elastico e viscoso aumentano ancora, con netta prevalenza del primo.

Da tener presente, per ben inquadrare il significato delle analisi che seguono, che si tratta di test con un numero limitato di sollecitazioni, e per di più a basso contenuto energetico: non è facile ipotizzare cosa possa accadere con un numero elevato di choc e con altezze di caduta del peso più elevate.

02.d.a.4.4. - Le deformazioni permanenti nei settori cristallini a seguito della successione degli choc e l'aumento dei Moduli elastici E' – Quanto qui viene analizzato è un esempio illuminante di come possono variare le caratteristiche meccaniche dei fili elementari (e quindi delle corde/cordini) e il degrado che ne consegue in funzioni delle modifiche strutturali nelle catene di macromolecole che i test a caduta comportano.

Occorre innanzitutto richiamare la **Figura 56 (pag. 64)**, dove viene visualizzata la conformazione di una catena di macromolecole polimeriche (che possono superare anche le 100.000 unità), rigida ma estremamente contorta e avviluppata (**Immagine d**). Una conformazione tipica dei settori amorfi dei fili elementari [l'immagine è riferita alle catene di poliammide (Nylon), ma è trasferibile, con valori angolari diversi anche alle catene di polietilene del Dyneema].

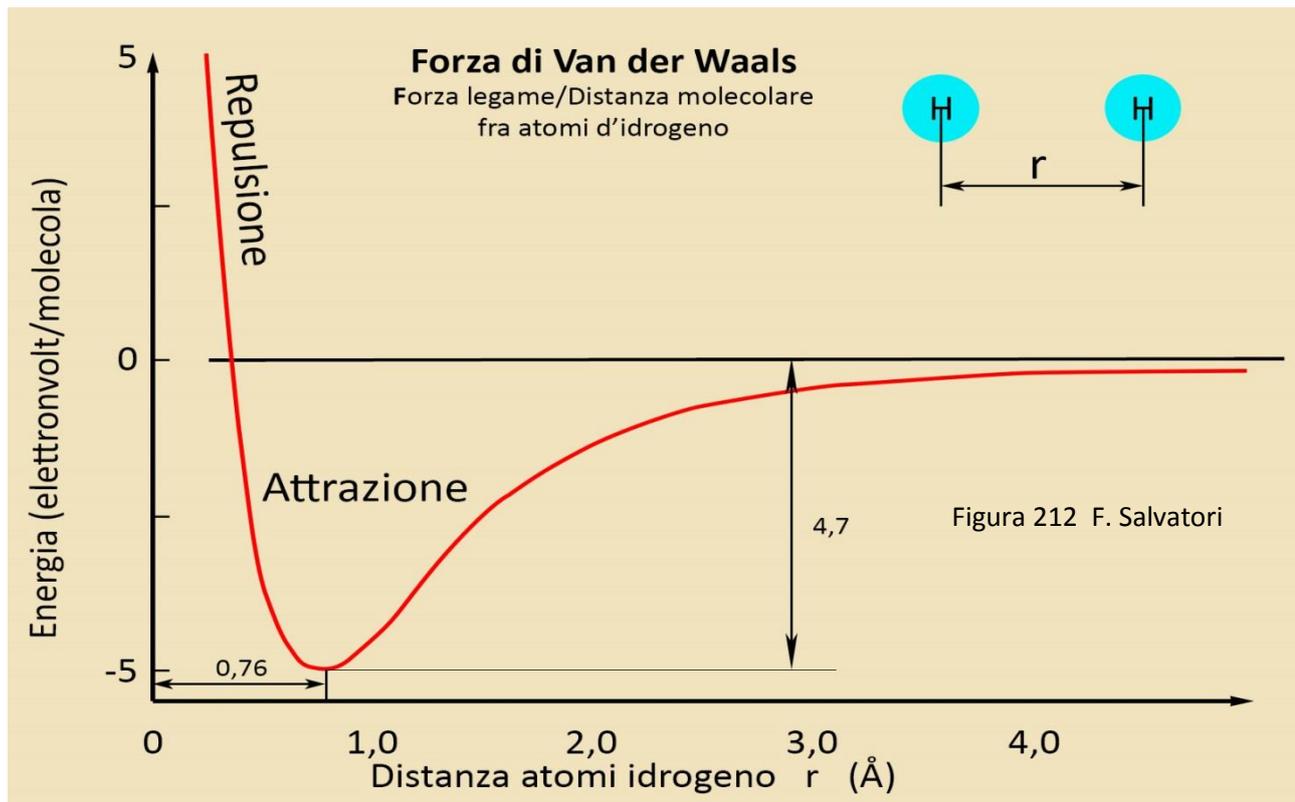
Si noti che le pieghe possono avvenire in ogni direzione, ma sempre secondo quanto impone l'angolazione specifica del caso (**Immagine a**).

Se si trazona un filo elementare la catena tende ad allungarsi facendo scattare i nodi di piegamento, disponendosi in modo meno caotico, come rappresentato nell'**Immagine c**, ancora non perfettamente allineata.

Se si continua a trazionare (o sollecitare a caduta) la struttura della catena diverrà sempre più simile a quella rappresentata nell'**Immagine b**, ben più distesa

Nel Dyneema, già all'inizio, con cordino nuovo, le parti cristalline sono come rappresentato con catene allineate e parallele l'una all'altra e con molteplici legami intermolecolari di Van der Waals (pag. 245, **Figura 194**), in acronimo VDW.

Dunque **l'allineamento iniziale** può sempre essere suscettibile di un **miglioramento** se si trazona o si sottopongono a choc a caduta i fili elementari. E questo comporta che le catene, avendo più allineamento e minor ingombro sterico, possono avere un contatto più intimo, ridurre la distanza fra di loro e, quindi, fra gli atomi d'idrogeno responsabili delle forze di VDW.



Ridurre la distanza fra gli atomi d'idrogeno del polimero polietilene vuol dire rafforzare i legami delle forze di VDW. Infatti, come descritto nella **Figura 212**, dove, con linea rossa, s'indica la curva **Forza VDW = $f(\text{Distanza interatomica } r)$** , variando la distanza r fra gli atomi d'idrogeno delle catene adiacenti varia l'intensità delle forze intermolecolari, che addirittura con impercettibili variazioni di frazioni di \AA può anche invertire il senso, passando da attrattiva a repulsiva.

Il punto di massima forza attrattiva è in corrispondenza di una distanza interatomica $r = 0,76 \text{ \AA}$: aumentando tale distanza, l'interazione $H - - - H$ decresce fino a quasi annullarsi; diminuendo sotto $0,76 \text{ \AA}$ l'attrazione si riduce, fino ad annullarsi per poi divenire repulsiva. Pertanto ogni sollecitazione che permetta di avvicinare gli atomi d'idrogeno alla distanza $r = 0,76 \text{ \AA}$ rende la strutturazione delle catene di macromolecole più compatta.

E' dunque verosimile che sollecitazioni, anche con un piccolo contenuto energetico (come i test a caduta qui utilizzati), possano aumentare la cristallinità della fibra e quindi, al successivo choc, il Fattore elastico E' . Il che è confermato sperimentalmente da quanto accade nella curva di **Figura 211**.

Anche in questo caso, si è tentati di estrapolare i risultati ottenibili con un numero di choc superiore a cinque e con altezze di caduta del peso più elevate di 10 cm. In tal modo si può ipotizzare che la compattazione della

struttura a catene parallele viene sempre più migliorata con aumento delle forze di VDW; e i fili elementari di Dyneema acquisiscono proprietà meccaniche superiori per la tenuta alla rottura, ma inferiori per la capacità di assorbire energia. Infatti nella **Figura 209** il Modulo d'elasticità E aumenta (come pure il Coefficiente di viscosità η).

Ma questo processo che aumenta la cristallinità dei fili elementari non può proseguire oltre un certo limite, perché con l'aumentare dell'energia in gioco le catene di macromolecole tendono a depolimerizzare/rompersi e a far aumentare l'estensione delle zone amorfe. Con ciò il degrado prodotto dalla successione degli choc nei Cordini di Dyneema, iniziato con l'aumento della rigidità, proseguirebbe più celermente con marcate riduzioni del carico di rottura F_r .

02.d.a.4.5. - Dislocazione delle curve E' e E'' , struttura delle catene di macromolecole e ripartizione nell'assorbimento dell'energia della caduta del peso nel Cordino Kevlar 5,5 mm – Contrariamente a quanto accade con le fibre di Dyneema, con i cordini in Kevlar tutte le curve relative alle variabili E , η , E' , E'' sono discendenti (pag. precedenti, **Figure 209 – 210 – 211**): è evidente che le deformazioni prodotte dalla successione degli choc nella struttura a nido d'ape del Kevlar (**Figura 195**) conducono a ridurvi la forza dei legami idrogeno ($O - -H$) e alla disgregazione delle parti cristalline che riducono la loro estensione.

Ne segue che al successivo choc la risposta elastica è ridotta e la curva $E' = f(n^{\circ}choc)$ decresce.

Esprimendo il tutto con le dovute notazioni matematiche, anche confrontando i risultati con l'analogo cordino Dyneema si ha:

Kevlar 5,5 mm	Dyneema 5,5 mm	Kevlar 5,5 mm/ Dyneema 5,5 mm
$d(E')/d(n^{\circ}choc) \ll 0$	$d(E')/d(n^{\circ}choc) \gg 0$	$d(E')/d(n^{\circ}choc) \ll d(E')/d(n^{\circ}choc)$
$d(E'')/d(n^{\circ}choc) < 0$	$d(E'')/d(n^{\circ}choc) > 0$	$d(E'')/d(n^{\circ}choc) < d(E'')/d(n^{\circ}choc)$

In sintesi:

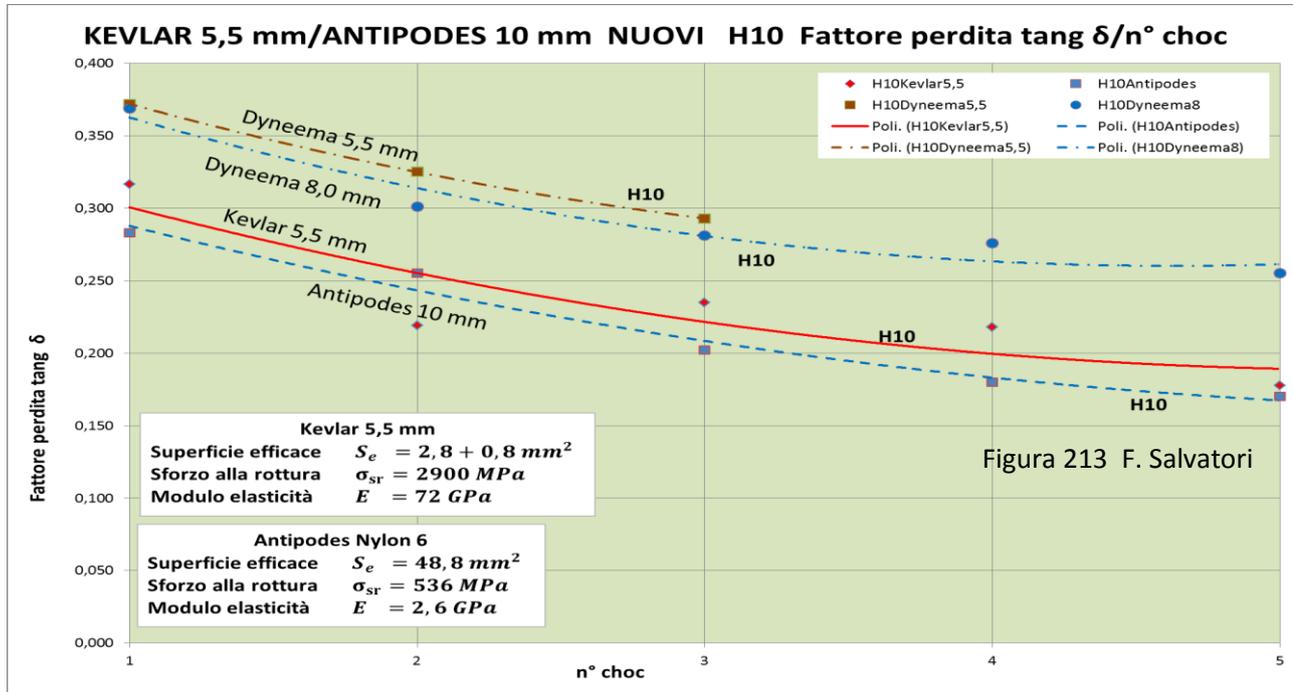
1. il contributo dissipativo delle **deformazioni elastiche** del Cordino Kevlar 5,5 mm è di diversi ordini di grandezza superiore a quello delle **deformazioni viscosi**; sono dunque soprattutto le zone cristalline dei fili elementari di Kevlar ha sopportare il peso delle sollecitazioni impulsive (come accade per il Dyneema);
2. diversamente dal Dyneema, la capacità di risposta elastica E' diminuisce, con un gradiente che va a ridursi (ma rimane sempre nettamente superiore a quello della Corda Antipodes);
3. anche la risposta viscosa E'' diminuisce al succedersi degli choc, con un gradiente che, estrapolando, sembra vada a esaurirsi;
4. il Modulo viscoso E'' si avvicina al comportamento dei Moduli della Corda Antipodes, rendendo la viscosità del Kevlar simile a quella del Nylon e quindi meno disponibile del Dyneema ad assorbire energia con questo tipo di deformazioni.

Si rende quindi evidente che la fibra Kevlar, nonostante le sue proprietà meccaniche iniziali corrispondenti a quelle di un materiale polimerico ad altissima tenacità (addirittura superiori al Dyneema), subisce un decadimento prodotto dal succedersi delle sollecitazioni impulsive (o da una trazione con forza crescente) molto incisivo. Il che rende le fibre in polietilene ancora meno adatte alla progressione speleo-alpinistica.

Questo aspetto negativo del Kevlar di fronte all'usura va a sommarsi, si ricorda, all'altro ugualmente negativo derivante dall'igroscopia del materiale, molto accentuata, valutata fino al 30 % in peso. Che nella progressione in grotta, dove c'è il contatto con l'acqua e l'UR al 100 %, riduce le caratteristiche meccaniche del filato fino al 40 %, sia nella tenuta alla rottura che nella capacità d'assorbire energia.

D'altro canto, si ricordi che il Kevlar, data la sua alta temperatura di fusione (in realtà disgregazione), è molto più adatto a sopportare condizioni con temperatura elevata (500°C contro i 218°C del Nylon 6 e i 150°C del Dyneema).

02.d.a.5) Quarta considerazione: analisi delle curve del Fattore di perdita $\tan \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ - Ricordato e premesso che il Fattore di perdita $\tan \delta = E''/E'$ è una misura della capacità complessiva del cordino (o corda) d'assorbire energia attraverso le **deformazioni visco elastiche** (non comprende la CSCC), visto l'andamento della curva di **Figura 213** (linea rossa continua), si può affermare che il cordino di Kevlar perde progressivamente questa capacità, con un gradiente che va esaurendosi.



Da rilevare che tutte le curve rappresentate nella **Figura 213** hanno lo stesso andamento discendente, con attenuazione della pendenza al progredire del n° degli choc. Andamento simile per tutte le curve, che conferma il principio per cui una successione di choc porta, in ogni tipo di cordino (o corda), un progressivo degrado dissipativo, con tendenza a equiparare il contributo delle reazioni elastiche con quello delle reazioni viscosi.

Nelle considerazioni precedenti abbiamo visto che le **risposte elastiche** sono sempre **più marcate** rispetto a quelle **viscose** e questo vale soprattutto per i cordini di minor diametro confezionati con fibre ad altissima tenacità come il Dyneema 5,5 mm. Di conseguenza il Fattore di perdita $\tan \delta$ decresce, indicando che il degrado è imputabile prevalentemente a quanto accade nei settori cristallini dei fili elementari, dove si concentrano la maggior parte delle deformazioni reversibili elastiche.

Da un altro punto di vista si può affermare, sintetizzando, che l'usura da choc ripetuti porta soprattutto a un degrado delle proprietà meccaniche dei fili elementari polimerici a seguito di una diminuzione del rapporto cristallino/amorfo nelle fibre.

Analizzando invece la dislocazione delle curve nella **Figura 213** si conferma l'altro principio per cui la perdita di capacità dissipativa dovuta alla visco-elasticità (non al Coefficiente di viscosità) è tanto più marcata quanto più è elevato il Modulo d'elasticità E della fibra (**142 GPa** per il Dyneema; **72 GPa** per il Kevlar; **2,6 GPa** per il Nylon 6) e ridotto il diametro apparente (per il cordino Dyneema, 5,5 mm contro 8,0 mm).

02.d.a.6) Quinta considerazione: analisi delle curve della percentuale di dissipazione $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$ - Ricordato e premesso che **% Dissipazione** è una misura della capacità complessiva del cordino (o corda) d'assorbire energia attraverso tutte le deformazioni possibili (visco-elasticità + CSCC) a esclusione degli attriti fra i componenti delle funi, nella **Figura 214** è mostrato come questo parametro abbia curve e andamenti e dislocazioni praticamente coincidenti con quelli delle curve relative al Fattore di perdita di **Figura 213**.

Questa similitudine vale anche per la tendenza a smorzare i gradienti di decrescita delle curve, tanto da poter ipotizzare, estrapolando un aumento del n° degli choc, il raggiungimento di un valore costante.

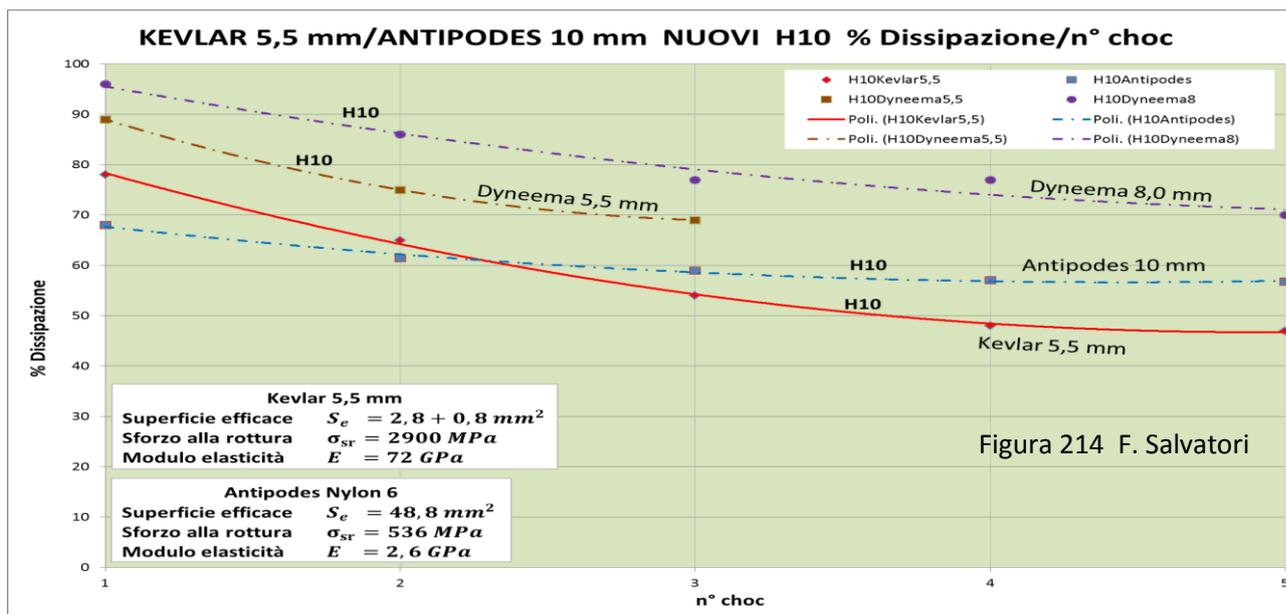


Figura 214 F. Salvatori

In primo luogo, vista la coincidenza delle curve di **Figura 213** e **Figura 214**, si può concludere che la perdita di capacità d'assorbimento dell'energia è quasi interamente sopportata dalle deformazioni visco-elastiche, con un ruolo marginale o trascurabile della CSCC (maggiore, come è ovvio, nel cordino Dyneema di diametro apparente più elevato).

In secondo luogo, il cordino Dyneema 8,0 mm al 1° choc produce deformazioni che dissipano l'energia per il 96 % in modo irreversibile. A conferma che le funi composte da fibre ad altissima tenacità subiscono in modo più incisivo l'usura legata al ripetersi delle sollecitazioni.

Al procedere degli impulsi a caduta, il gradiente di decrescita delle curve diminuisce a tende ad annullarsi; il che conferma il principio, più volte verificato nella **Parte VI** dedicata alle corde speleo-alpinistiche, che il degrado di un cordino è molto più incisivo da nuovo e minore quando usato.

Infine, la pendenza della curva della corda Antipodes è meno elevata di quelle dei cordini ad altissima tenacità: è un'ulteriore conferma del principio che le fibre più rigide e i diametri ridotti accelerano il processo di decadimento per usura delle funi speleo-alpinistiche.

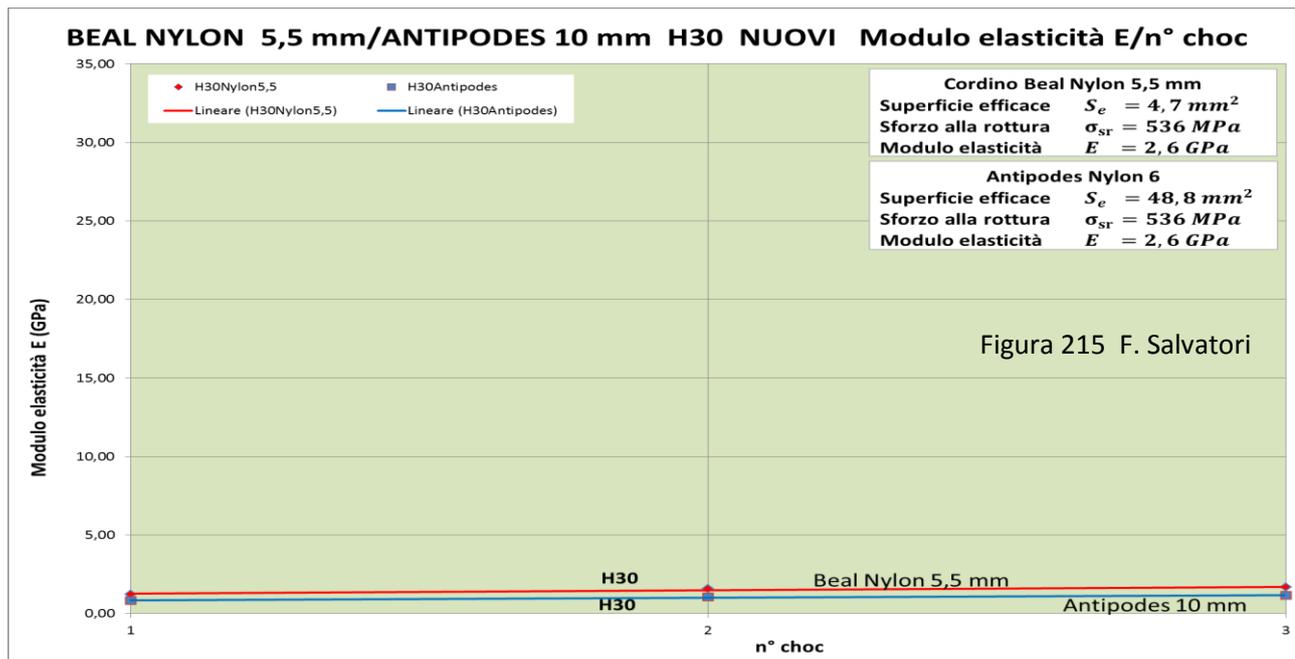
02.e) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Beal Nylon 6 5,5 mm nuovo

I grafici che riportiamo sono stati costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza e la loro validità statistica e analitica è confermata. Variano solo il n° degli choc (tre anziché cinque) e le altezze di caduta del peso (30 cm anziché 10 cm). Nei grafici fanno da riferimento le curve della Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova.

02.e.a) Prima considerazione: evidenza del ruolo dissipativo preponderante della CSCC – Come risulta dalle sottostanti **Figure 215 – 216 – 217 – 218** il Cordino a bassa tenacità in Nylon 6 (anima e calza), 5,5 mm di diametro apparente, produce delle curve $E = f(n^\circ \text{ choc})$ $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$ $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$ quasi coincidenti alle analoghe curve della Corda Antipodes 10 mm.

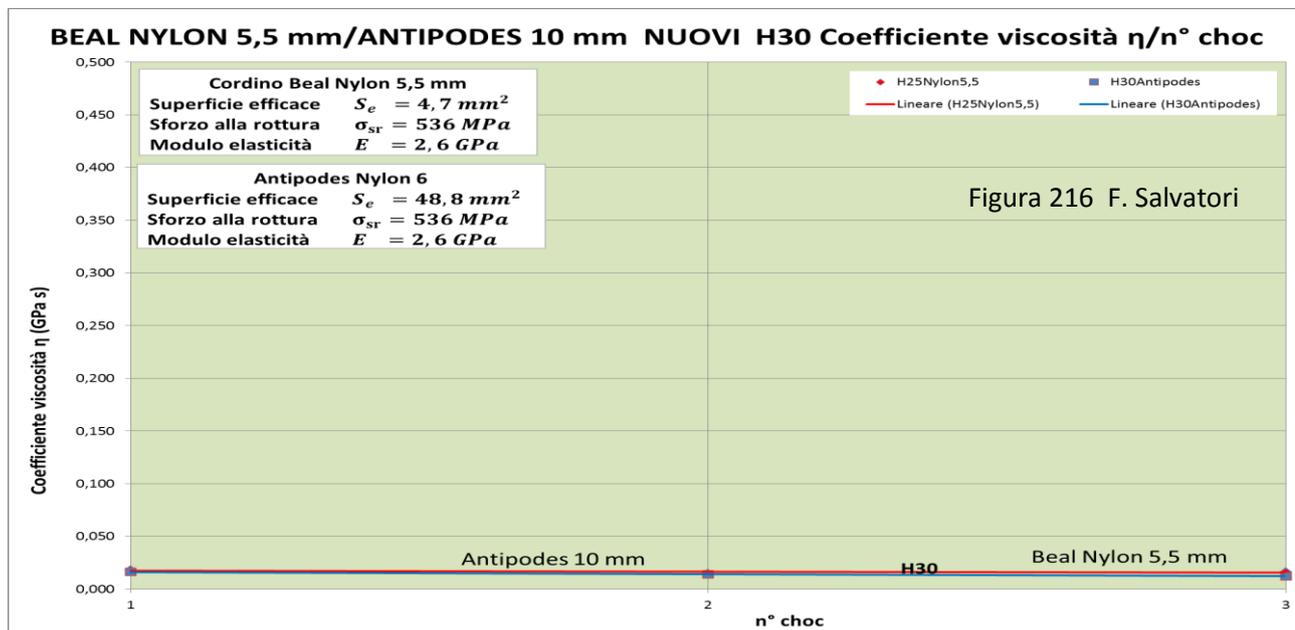
Il che è del tutto plausibile per il Coefficiente di viscosità η e il Fattore di perdita $\text{tang } \delta$ valutati con la DMA che utilizza gli Sforzi; come pure per il Modulo d'elasticità E . Ma necessita di analisi specifiche nel caso del $\% \text{ Dissipazione}$, che invece fanno riferimento alla Superficie efficace S_e .

Infatti la quasi coincidenza fra le curve relative al Modulo d'elasticità del Cordino e della Corda di Nylon 6 (**Figura 215**) è coerente al fatto che non deve esserci proporzionalità diretta fra quantità di materiale polimerico che si oppone alla trazione ed E . Nella fattispecie, il Modulo d'elasticità della Corda, data la sua $S_e = 48,8 \text{ mm}^2$ circa 10 volte superiore a quello del Cordino (con $S_e = 4,7 \text{ mm}^2$), non porta ad alcuna diversificazione nell'andamento (e anche nella dislocazione visto che si tratta sempre di Nylon 6).



Se ciò accade significa che nella Corda non esiste un fattore aggiuntivo di deformabilità (per esempio la CSCC) che addirittura potrebbe farle assumere una “elasticità” più elevata di quella riscontrata nel cordino.

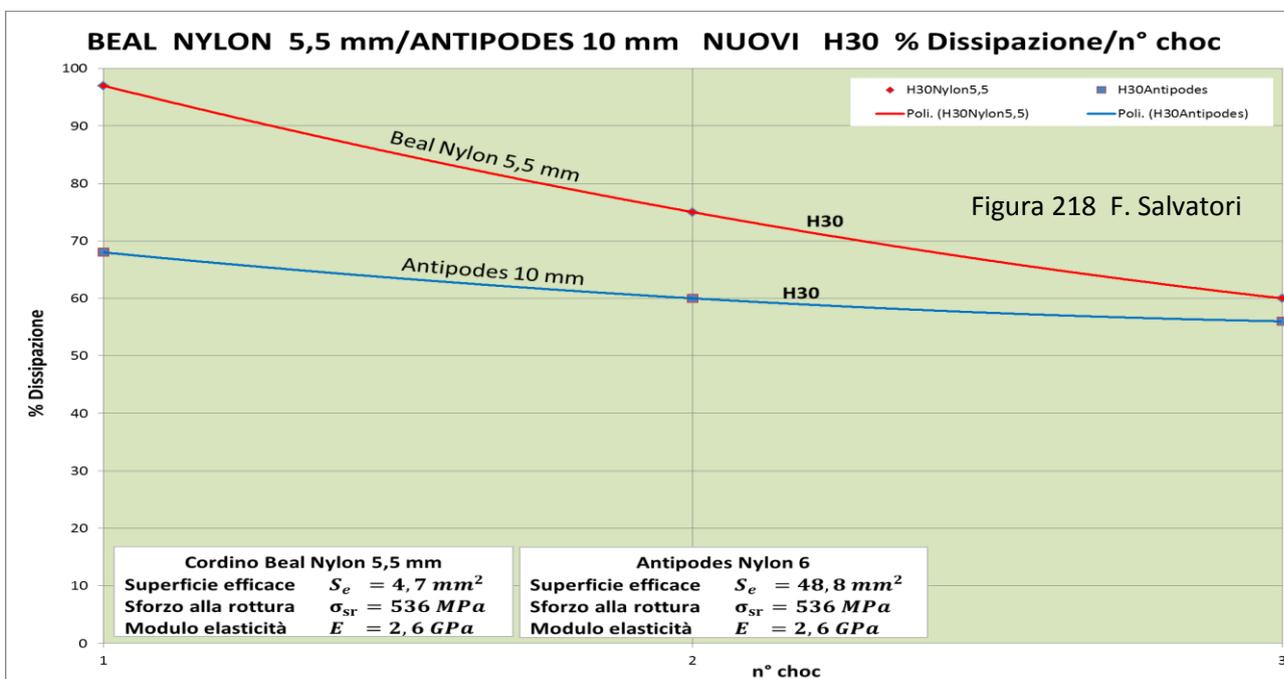
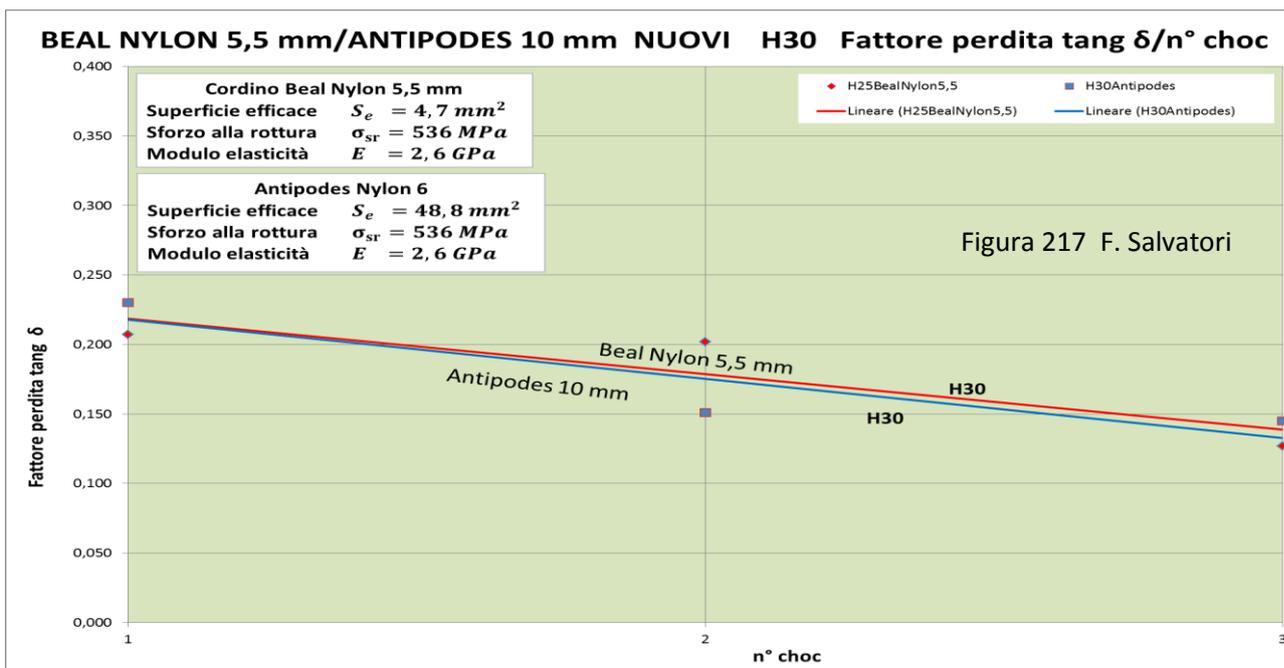
Come già detto, la coincidenza fra Cordino e Corda delle curve relative al Coefficiente di viscosità (Figura 216), trattandosi dello stesso tipo di fibra, è pienamente giustificabile.



Identica valutazione deve essere fatta per le curve della Figura 217, relative al Fattore di perdita $\text{tang } \delta$.

Per contro, nella Figura 218 le curve relative al parametro % Dissipazione sono dipendenti anche dalle due diverse Superfici efficaci: la quantità d’energia conferita con la caduta del peso ai campioni di Corda e Cordino è uguale per la parte relativa alla caduta libera, ma maggiore nel Cordino per quanto compete all’Allungamento massimo (0,590 m contro 0,445 m).

Pertanto la quantità d’energia che il primo choc conferisce al Cordino è superiore a quella trasmessa alla Corda (1154 J contro 954 J). Inoltre la quantità ridotta d’energia trasmessa alla Corda, considerando che il rapporto fra le Superfici efficaci è di circa 1:10 (4,7 mm² contro 48,8 mm²), si distribuisce su una quantità maggiore dello stesso materiale polimerico (Nylon 6). In definitiva sul Cordino si applicano 246 J/mm² mentre sulla Corda agiscono solo 20 J/mm². Al tutto si aggiunge l’effetto dissipativo aggiuntivo della CSCC delle Corda.



Nella **Figura 218** è dimostrato sperimentalmente quanto “l’effetto cordino” prodotto dalla riduzione del diametro apparente sia incisivo nel degradare le proprietà meccaniche di una fune di materiale polimerico.

La concentrazione d’energia di ben **246 J/mm²** fa sì che il Cordino venga trazonato in modo esorbitante rispetto alla Corda (**20 J/mm²**), andando a produrre deformazioni permanenti marcate soprattutto nella parte cristallina dei fili elementari (aumenta l’estensione delle zone amorphe).

Infine, la pendenza molto accentuata della curva **% Dissipazione = f(n° choc)** del Cordino Nylon 6 esplicita come il degrado di una fune di piccolo diametro sia ad alto gradiente e rapido, confermando per l’ennesima volta l’inopportunità di utilizzare corde di piccolo diametro per la progressione, sia speleologica che alpinistica.

Quanto espresso sperimentalmente nella Figura 218 rende evidente, una volta ancora, l’entità del ruolo dissipativo della Compattazione della Struttura Complessa della Corda, specie sotto gli effetti dei primi choc. E l’Antipodes è una corda qualificata “statica”; possiamo ben immaginare quale ulteriore supplemento di deformabilità possa dare una corda “dinamica”.

03. Cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6: valutazione della riduzione del Carico di rottura con nodi (F_{rn}) in funzione della Velocità di deformazione (V_d)

03.a) Condizioni sperimentali

Anche questa è una sperimentazione mai realizzata precedentemente, con rilevanti aspetti d'innovazione strumentale e analitica.

I Cordini sottoposti a esame sono gli stessi utilizzati nei test descritti in precedenza (pag. 247 e seg.):

- | | |
|--------------------------------|---------|
| 1. Repetto HMPE Dyneema SK60 | 8 mm, |
| 2. Repetto HMPE Dyneema SK 60 | 5,5 mm, |
| 3. Courant Aramide Kevlar (48) | 5,5 mm, |
| 4. Beal Nylon 6 | 5,5 mm; |

nuovi, mai usati e con condizioni ambientali simili a quanto indicato in precedenza per analoghi test a caduta.

Anche in questo caso i test a trazione lenta (quasi-statica) e veloce (a caduta sulla Torre) le impostazioni sperimentali, la strumentazione, i protocolli e le metodologie di ricerca fanno riferimento a quanto esposto nella Parte I (pag. 21 e seg.) e nella Parte II (pag. 39 e seg.).

Per i valori del Carico di rottura con e senza nodi a trazione lenta (quasi statica con $V = 0,006$ m/s) si fa riferimento a quanto già calcolato e inserito nelle tabelle riportate in precedenza (pag. 242 e seg.)

Per valutare gli effetti della variazione della Velocità di deformazione sono stati effettuati dei test, ripetuti due volte, con altezza crescente della caduta del peso. Per questi test le modalità sperimentali sono analoghe, mutatis mutandis, a quelle descritte nella Parte VI a proposito delle corde (pag. 174 e seg.). In particolare, si ricorda, che sono stati usati campioni lunghi 3 m (f.t), con nodi Guida alle estremità e pretirati a 140 kgp.

I test a caduta sono stati effettuati in funzione:

1. del tipo di materiale che compone i fili elementari (Kevlar, Dyneema, Nylon 6),
2. del diametro degli stessi cordini.

Coi dati raccolti (pag. 299, Appendici 03) sono stati costruiti i grafici dove sono messi in evidenza la variazione del Carico di rottura con nodo F_{rn} rispetto al crescere della Velocità di deformazione V_d .

03.b) Analisi dei grafici delle curve $F_{rm} = f(V_d)$ anche in confronto con quanto accade con la Corda Antipodes 10 mm

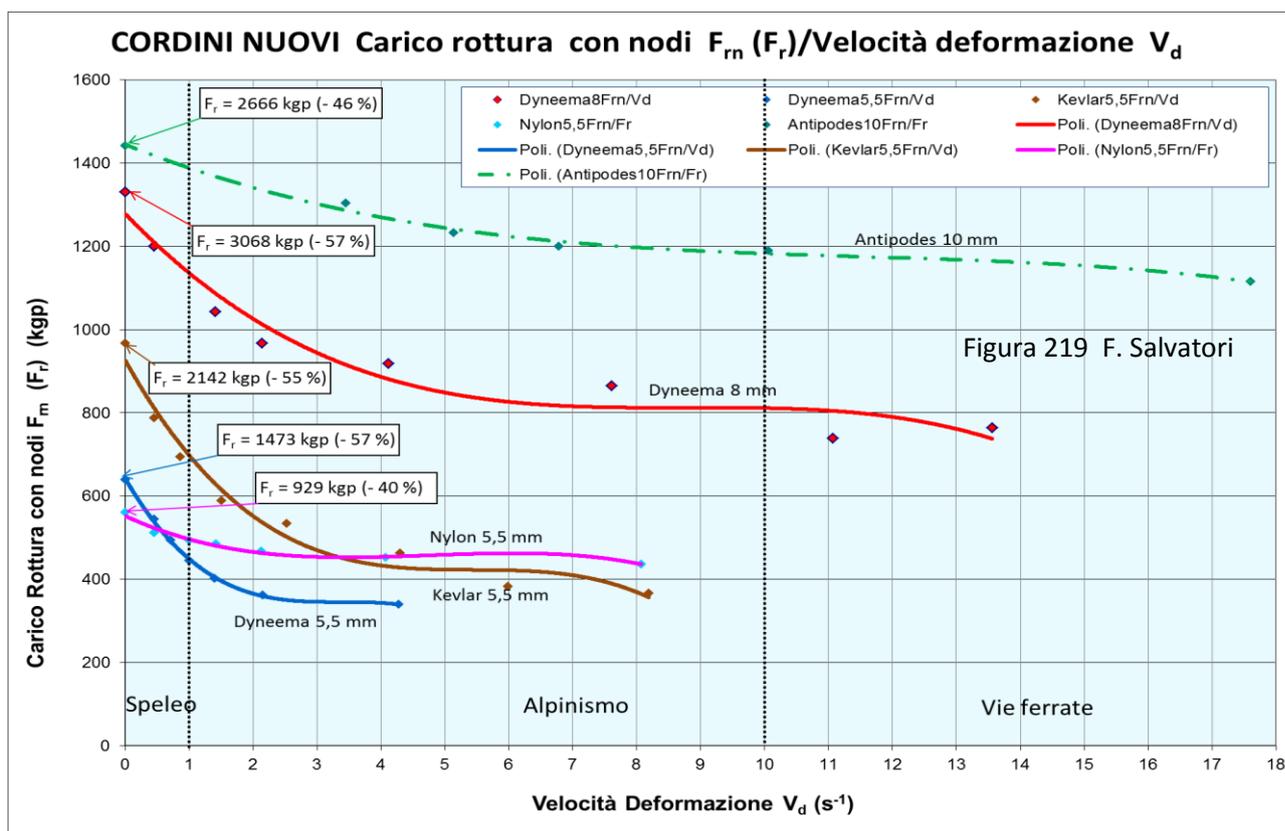
Nella Figura 219 è rappresentato l'insieme delle curve relative ai cordini elencati e alla Corda Beal Antipodes statica 10 mm, tutte funi mai utilizzate, nuove e asciutte.

In questi grafici viene anche indicata la riduzione percentuale del carico di rottura che la presenza del nodo impone ai Cordini e alla Corda; carichi di rottura ottenuti in condizioni quasi-statiche (trazione lenta).

Inoltre, in Figura 209 sono delimitati i settori di Velocità di deformazione che competono ai diversi tipi di progressione: Speleologica, Alpinistica e Vie Ferrate (pag. 53, Figura 41). Con ciò è possibile valutare il comportamento dei Cordini e delle Corde in relazione al tipo di attività che svolgono.

03.b.a) Prima considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r a trazione lenta ($V_d = 0$) - In corrispondenza dell'ascissa $V_d = 0$ sono riportati i valori di F_{rn} a trazione lenta ($V = 0,006$ m/s).

Come era prevedibile (pag. 95 e seg.) la presenza di un nodo all'estremità dei Campioni dei cordini (Guida semplice) riduce marcatamente il Carico di rottura F_r senza nodi. La riduzione è intorno al 40 % per le corde Speleo (Beal Antipodes in Nylon 10 mm statica) e per il Cordino Beal in Nylon 5.5 mm.



Ma per i Cordini con Fibre ad altissima tenacità (Dyneema e Kevlar) la riduzione è ancora più accentuata e può arrivare anche al 60 %.

03.b.b) Seconda considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r in funzione della Velocità di deformazione V_d - Ma con l'aumento della Velocità di deformazione, come risulta nei grafici di **Figura 219**, l'effetto nodo è ancora più incisivo (negativamente), soprattutto quando si tratta di Cordini di Dyneema e Kevlar:

1. il Cordino **Dyneema 8 mm** nuovo, con sollecitazioni contenute nel settore di competenza della progressione **speleologica** ($0 \leq V_d \leq 1$), diminuisce il **Carico di rottura del 64 %**; mentre con sollecitazioni a caduta nel campo alpinistico ($1 \leq V_d \leq 10$) la **contrazione del carico di rottura è del 74 %**;
2. nel Cordino **Dyneema 5,5 mm** nuovo, con sollecitazioni competenti al settore **speleologico** ($0 \leq V_d \leq 1$), la diminuzione del **Carico di rottura arriva al 71 %**; nel campo **alpinistico** si arriva **al 77 %**: come era prevedibile la riduzione del diametro apparente, e quindi della Superficie efficace esaspera ancor più l'effetto riduttivo del nodo;
3. per il Cordino in **Kevlar 5,5 mm** nuovo, il Carico di rottura si riduce al **68 % nel settore speleo** e dell'**81 % nel campo alpinistico**.

Pertanto, è di grande evidenza che l'aumento della Velocità di deformazione influenza negativamente, **in maniera decisa**, i Cordini con fili elementari ad altissima tenacità, il cui uso deve essere attentamente valutato e limitato a casi di indubitabile necessità e peculiarità.

Si consideri poi che le fibre in Kevlar, **igroscopiche**, in grotta perdono in aggiunta circa il **30 % del loro carico di rottura** per l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari.

Nel complesso, considerati gli effetti degradanti delle successione di choc e dell'effetto nodo, l'uso di Cordini con fibre in Dyneema e Kevlar (e altre similari) deve essere sconsigliato, a meno di non raddoppiare o triplicare gli ancoraggi utilizzandoli formando anelli.

Molto diversa è la situazione qualora le fibre ad altissima tenacità vengano utilizzate per confezionare delle **fettucce con cuciture e senza nodi**, come accade frequentemente con imbracature e longe.

03.b.c) Terza considerazione: effetto-nodo sulla riduzione di F_r in funzione della Velocità di deformazione V_d per Corde e Cordini in Nylon 6 - Ma nella **Figura 219** si evidenzia anche che una fibra a bassa tenacità come il Nylon 6 (sia la corda che il cordino) **subisce in modo meno marcato l'influenza del crescere della Velocità di deformazione**.

Infine, la Corda Antipodes speleo **annodata** sopporta in modo soddisfacente l'aumento della Velocità di deformazione. E questo contrappone nettamente le corde speleo ai cordini con fibre ad alta tenacità nell'uso nella progressione speleologica.

04. Cordini nuovi di Dyneema e Kevlar: valutazione termografica delle temperature durante la trazione quasi-statica fino alla rottura nel nodo

04.a) Premessa

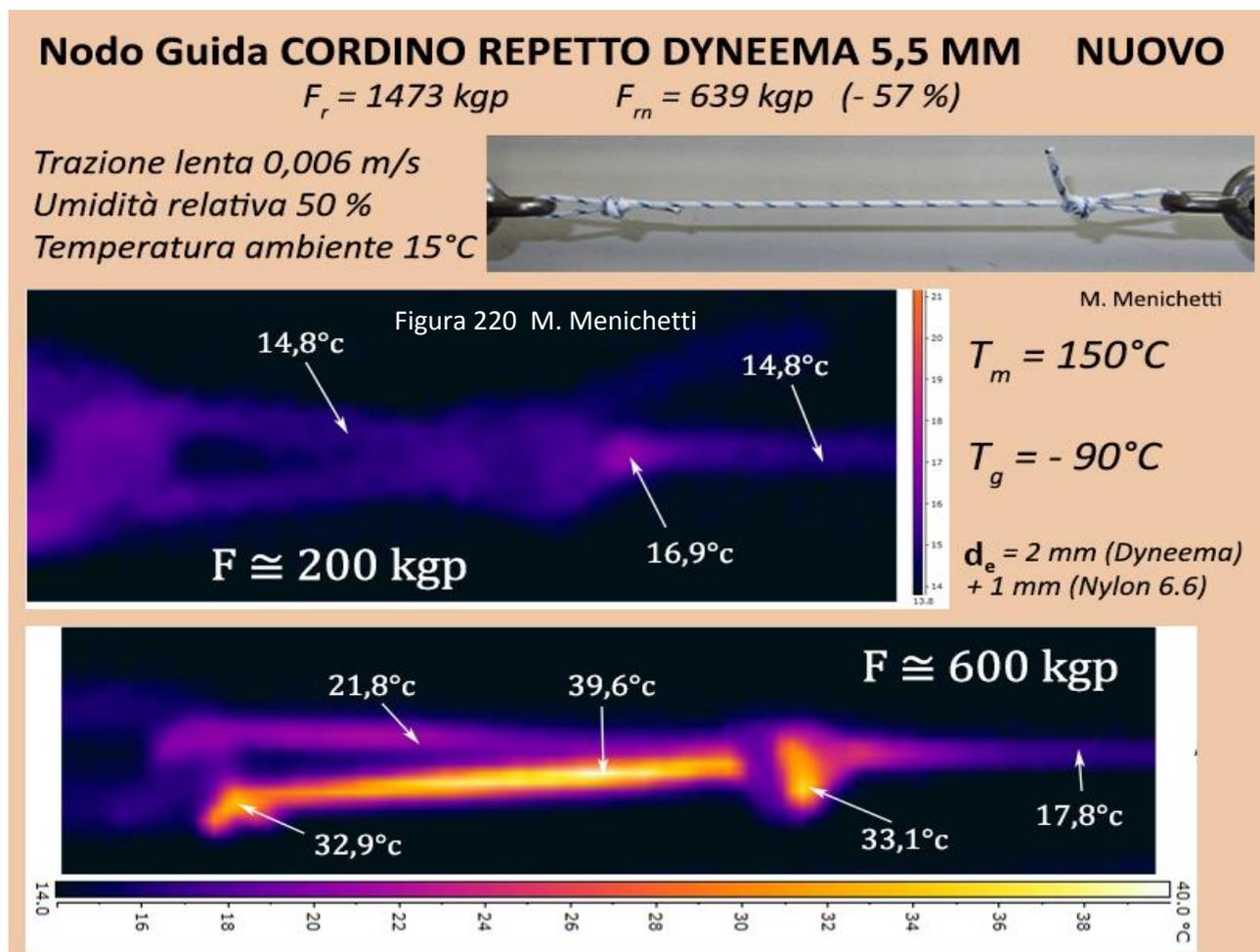
Questi test rientrano nella Parte dedicata ai Cordini, ma, per difficoltà sperimentali al momento insuperabili, riguardano solamente i risultati ottenuti **a trazione lenta**. Quindi si riferiscono solo al valore "zero" per le ascisse dei grafici precedentemente esposti in **Figura 219**.

04.b) Condizioni sperimentali

I Cordini sottoposti a esame sono:

1. Repetto HMPE Dyneema SK 60 5,5 mm,
2. Courant Aramide Kevlar (48) 5,5 mm,

I campioni erano lunghi (f.t.) 50 cm con nodi Guida semplici alle estremità. La trazione è avvenuta a velocità costante ($V = 0,006 \text{ m/s}$).



04.c) Analisi dei risultati sperimentali per il cordino Dyneema 5,5 mm

Nella **Figura 220** sono espresse tutte le condizioni sperimentali e i risultati ottenuti. Nella foto il campione con l'aggancio al dinamometro tramite le due gasse con i nodi guida.

Nelle due immagini della termocamera, la prima riporta i risultati all'inizio della trazione (circa 200 kgp), con una temperatura sul cordino pressoché coincidente con la temperatura ambiente (circa 15°C).

L'immagine sottostante fotografa la situazione immediatamente prima che avvenga la rottura del cordino sul nodo (circa 600 kgp): la temperatura più elevata si riscontra nel tratto di cordino, costituente la gassa d'ancoraggio, che fuoriesce dal nodo (circa 40°C) (*pag. 96, Figura 79*). Qui, infatti, si registra la maggior produzione di calore per attrito.

04.c.a) Prima considerazione: fattori che determinano la rottura del Cordino sul nodo – La presenza del nodo su un cordino determina, sotto trazione quasi-statica (e a caduta), la rottura sul nodo a un carico F_{rn} inferiore di circa il 60 % rispetto al Carico di rottura senza nodi F_r . È un effetto riduttivo molto marcato, molto più elevato rispetto a quello di una corda, sempre annodata, di Nylon 6 come la Beal Antipodes di diametro di 10 mm.

Questa più accentuata riduzione di F_{rn} non può essere dovuta al passaggio della Temperatura di Transizione Vetrosa T_g per il calore prodotto con l'attrito: T_g per il Dyneema è -90°C, molto bassa come per tutti i polimeri altamente cristallini (si ricorda che il passaggio della T_g modifica le caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche solo nella parte amorfa del polimero: se il polimero è quasi totalmente cristallino, come nel caso del Dyneema, la T_g ha un'influenza limitata). E questo risultato sperimentale ne è una piena conferma, sostenuta anche dall'analogo risultato ottenuto con la Corda Beal Antipodes 10 mm Nylon 6 (semi-cristallino) (*pag. 93, Figura 77; pagg. 97 - 98, Figure 81 - 82*), dove la $T_g = 47°C$.

Pertanto la più accentuata riduzione di F_{rn} per Cordini di Dyneema può essere dovuta a tre distinti fattori:

1. le dimensioni ridotte della Superficie efficace,
2. la calza, costituita con una fibra semi-cristallina come il Nylon 6.6, e quindi con
3. il tipo di materiale, una fibra polimerica ad alta cristallinità come il Polietilene (Dyneema).

04.c.a.1) Dimensioni ridotte della Superficie efficace - In merito al primo punto, è un dato sperimentale ricorrente che la diminuzione in una fune speleo-alpinistica del diametro apparente (e quindi della Superficie efficace) porta a un'accentuazione dell'effetto nodo, con una diminuzione percentuale più marcata del Carico di rottura F_{rn} . Ma questo fenomeno sembra accentuarsi ancor di più con Cordini costituiti da fibre polimeriche **ad altissima tenacità**, come appunto il Dyneema.

La causa è verosimilmente legata alle **maggiori pressioni** che, a parità di condizione di forza di trazione, si manifestano sulle superfici dei fili elementari: a parità di forza la superficie sulle quali si esercita è minore.

04.c.a.2) Sulla calza di Nylon 6.6 il superamento della Temperatura di transizione vetrosa modifica bruscamente le proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle fibre polimeriche - Visto che nella parte più calda della gassa sono stati raggiunti i 40°C con una forza inferiore al Carico di rottura F_{rn} (**Figura 220**), è facile supporre che al momento del cedimento la temperatura abbia raggiunto i 50°C, cioè la T_g del Nylon 6.6, facendo lacerare la calza. Questo cedimento, sia pur parziale, ha fatto ridurre bruscamente la sezione effettiva che si opponeva alla rottura, facendo innescare il cedimento di tutto il cordino.

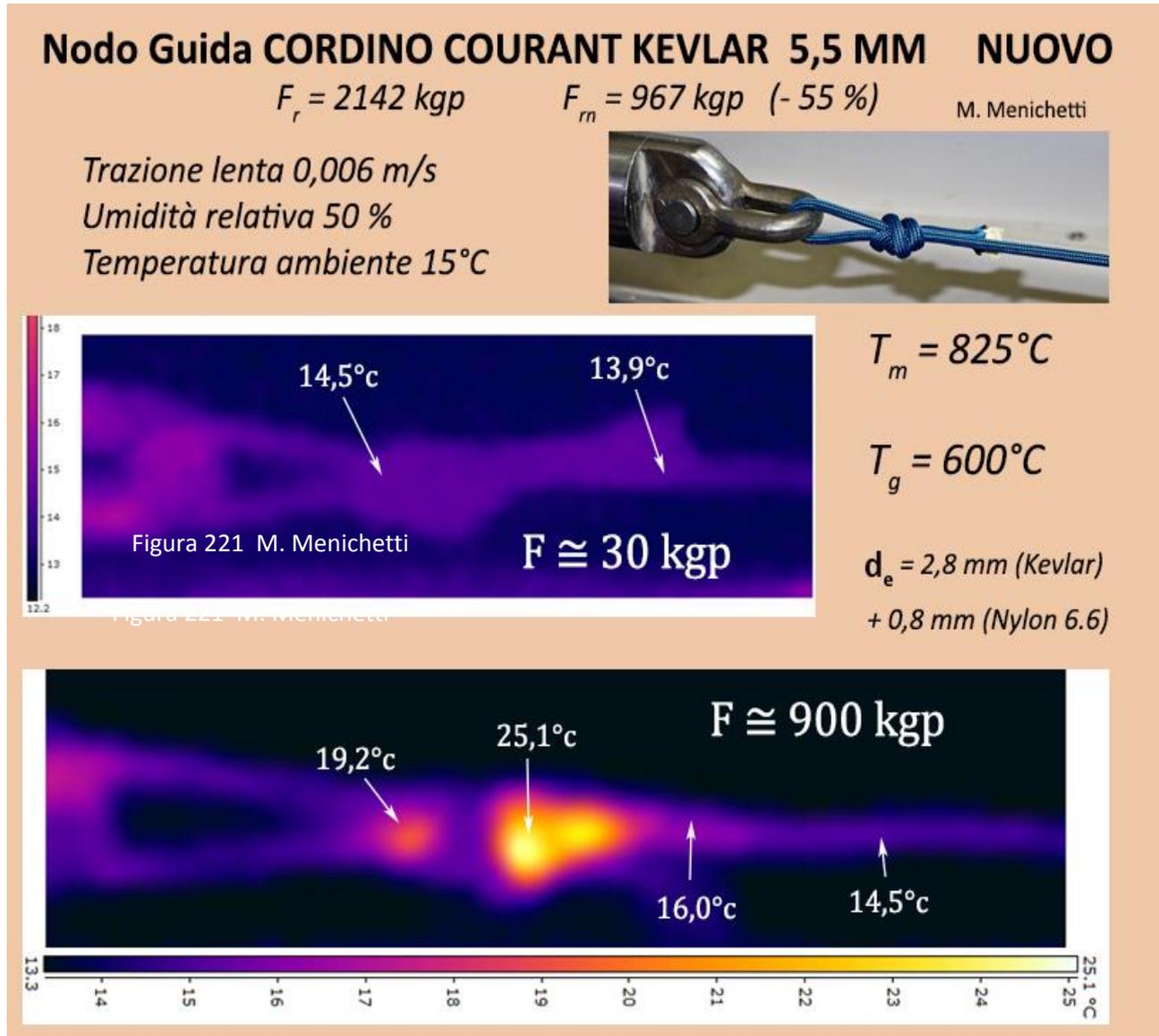
04.c.a.3) L'alta cristallinità del Dyneema con catene ripiegate disposte parallelamente all'asse longitudinale dei fili elementari - Sembrerebbe che la disposizione ordinata delle catene "ripiegate", disposte lineari e parallele nei fili elementari, responsabile dell'altissima tenacità del Dyneema (*pag. 245, Figure 193 - 194*), mal sopporta le strette piegature imposte ai fili elementari con la strizione esasperata dei nodi.

04.d) Analisi dei risultati sperimentali per il cordino Kevlar 5,5 mm

Nella **Figura 221** sono riportati i risultati termografici della rottura sul nodo del Cordino Courant Kevlar 5,5 mm. Nella foto il campione con l'aggancio al dinamometro tramite la gassa con il nodo guida.

Nelle due immagini della termocamera, la prima riporta i risultati prima della trazione (circa 30 kgp), con una temperatura sul cordino pressoché coincidente con la temperatura ambiente (circa 14°C).

L'immagine sottostante fotografa la situazione immediatamente prima che avvenga la rottura del cordino sul nodo (circa 900 kgp): la temperatura più elevata si riscontra nel nodo e nel tratto di cordino che ne fuoriesce, dove si producono le forze d'attrito di maggiore intensità (pag. 96, **Figura 79**). Ma la temperatura è di appena 25°C mentre quella di transizione vetrosa è di ben 600°C.



04.d.a) Prima considerazione: fattori che determinano la rottura del Cordino sul nodo con Effetto-nodo esorbitante – Vale quanto detto nel precedente **Paragrafo** (pag. 277), con l'unica differenza che la riduzione apportata dall'effetto nodo è del 55% e la Temperatura di transizione vetrosa del Kevlar è di ben 600°C.

Quest'ultimo dato fa escludere in modo indubitabile, anche con questo tipo di fibra ad altissima tenacità, che sia il superamento della T_g responsabile del drastico abbassamento del valore di F_{rm} .

Pertanto è necessario rivolgersi in altre direzioni per giustificare un effetto-nodo così elevato del Cordino Courant Kevlar 5,5 mm di diametro apparente.

Ci si può rivolgere verso gli stessi fattori ipotizzati per il Cordino in Dyneema:

1. le dimensioni ridotte della Superficie efficace,
2. la calza, costituita con una fibra semi-cristallina come il Nylon 6.6, a contatto con il rigido Kevlar,
3. il tipo di materiale, una fibra polimerica ad alta cristallinità come il Polietilene (Dyneema).

04.d.a.1) Dimensioni ridotte della Superficie efficace – Valgono le stesse considerazioni espresse per il Cordino Dyneema (pag. 277).

04.d.a.2) Il contatto fra calza di Nylon 6.6 e l'anima di Kevlar è un punto di debolezza - Il riscaldamento per attrito, sia pur con temperature contenute (25°C), provoca comunque una diminuzione della cristallinità della calza, con conseguente diminuzione delle proprietà meccaniche e del valore di F_{rn} .

Ma a contribuire all'aumento straordinario dell'effetto nodo nel cordino ad altissima tenacità è verosimile indicare il fattore più incisivo: il contatto fra una fibra semi-cristallina come il Nylon 6.6 (elemento plastico) e i fili elementari del trefolo interno di Aramide (elemento cristallino rigido).

E' noto infatti che, quando si mette sotto trazione un campione di corda o cordino, è sufficiente che un qualsiasi elemento esterno rigido provochi anche una minima lesione alla calza per portare alla rottura totale, con valori di forza molto più bassi del previsto.

E' dunque corretto ipotizzare che fra le spire del nodo sotto strizione il contatto fra fibre di diversa rigidità possa provocare un forte aumento dell'Effetto-nodo, portandolo in certi casi a superare anche il 70 %.

04.d.a.3) Legami molecolari e intermolecolari e variazioni di cristallinità - La fibra di Aramide (Kevlar) ha un alto grado di cristallinità (tanto da poter essere definita un polimero "cristallino") (pag. 246, Figura 195– 196) e non si può escludere che l'applicazione di forze non longitudinali ma trasversali (come avviene nei nodi, specie con curvature molto accentuate) possa comportare modifiche nella disposizione ordinata delle catene e nei legami intermolecolari (idrogeno), con conseguente decrescita delle proprietà meccaniche.

04.e) Conclusioni e richiami per ulteriori ricerche

I dati sperimentali sul rapporto fra calore e carichi di rottura di cordini annodati non danno indicazioni sufficienti su quali siano le cause della crescita esorbitante dell'Effetto-nodo nei cordini costituiti da fibre polimeriche ad altissima tenacità.

Quello che si può escludere è che in questo fenomeno di netta decrescita della capacità di tenuta dei cordini in Dyneema e Kevlar, per la presenza di un nodo d'aggancio, sia attribuibile al superamento della Temperatura di Transizione Vetrosa delle due fibre:

1. per il Dyneema siamo sempre al di sopra, essendo $T_g = -90^\circ\text{C}$,
2. per il Kevlar siamo sempre abbondantemente al di sotto, essendo $T_g = 600^\circ\text{C}$.

E' questo un campo di ricerca ancora aperto a interpretazioni, che richiede un ulteriore contributo di ricerca teorico-sperimentale. Forse le indagini con Spettrografia a Raggi X sul grado di cristallinità delle fibre polimeriche potrebbero essere risolutive.

Parte VIII

Appendici

Proprietà meccaniche e chimico-fisiche
delle fibre polimeriche

Tabelle di sintesi dei dati relativi ai test a
trazione quasi-statica e a caduta,

Grafici dei processi d'asciugatura delle
corde sottoposte ai test di valutazione
dell'effetto idrolisi

01) Tabelle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle fibre polimeriche usate nel confezionamento delle corde e dei cordini speleo-alpinistiche (test a trazione quasi-statica)

Poliammide Nylon 6.6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	265	
Tenacità (N/Tex)	0,64	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	900	strength
Allungamento alla rottura (%)	16	
Modulo E (Gpa)	8,0	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	80	

Poliammide Nylon 6		
Densità ρ (g/cm ³)	1,14	
Punto di fusione (°C)	218	
Tenacità (N/Tex)	0,47	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	536	strength
Allungamento alla rottura (%)	26	
Modulo E (Gpa)	2,6	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	76	

Aramide Kevlar (48)		
Densità ρ (g/cm ³)	1,45	
Punto di fusione (°C)	500	
Tenacità (N/Tex)	2,03	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	2900	strength
Allungamento alla rottura (%)	3,6	
Modulo E (Gpa)	72	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	35	

HMPE Dyneema SK 60		
Densità ρ (g/cm ³)	0,97	
Punto di fusione (°C)	150	
Tenacità (N/Tex)	2,80	
Sforzo alla rottura (N/mm ² =MPa)	3000	strength
Allungamento alla rottura (%)	3,5	
Modulo E (Gpa)	142	
Lavoro alla rottura (mN/Tex)	55	

02) Tabelle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle Corde e dei Cordini utilizzati nelle sperimentazioni a trazione quasi-statica e a caduta (test a trazione quasi-statica)

Corda Beal Antipodes 10 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10 mm n° trefoli 12

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	587	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	1046	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	141	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	2666	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1441	<i>- 46 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	7,9	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	64	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Beal Antipodes 10 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 10 mm n° trefoli 12

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	862	<i>tutti trefoli rotti (*)</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	470	<i>- 55 % (**)</i>
carico rottura trefolo (kgp)	75	<i>- 47 % (**) (***)</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	1370	<i>- 49 % (**)</i>
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1059	<i>- 26 % (**)</i>
punto fusione calza (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
punto fusione anima (°C)	218	<i>fibra nylon 6</i>
diametro efficace (mm)	5,7	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	72	

(*) La stessa corda usata ma bagnata ha visto la rottura di soli 4 trefoli

(**) Rispetto alla corda nuova

(***) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Corda Beal Booster III 9,7 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n°trefoli 9

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	542	2 trefoli rotti (*)
tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
carico rottura calza (kgp)	764	senza nodi
carico rottura trefolo (kgp)	120	senza nodi
carico rottura senza nodi (kgp)	1862	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1257	- 32 % (*)
punto fusione calza (°C)	218	fibra nylon 6
punto fusione anima (°C)	218	fibra nylon 6
diametro efficace (mm)	6,6	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	Termo camera
peso (g/m)	70	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Beal Booster III 9,7 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n°trefoli 9

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	474	nessun trefolo rotto
tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
carico rottura calza (kgp)	372	- 51 % (*)
carico rottura trefolo (kgp)	98	- 18 % (*) (**)
carico rottura senza nodi (kgp)	1370	- 36 % (*)
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1059	- 36 % (*)
punto fusione calza (°C)	218	fibra nylon 6
punto fusione anima (°C)	218	fibra nylon 6
diametro efficace (mm)	5,1	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	Termo camera
peso (g/m)	67	

(*) Rispetto alla corda nuova

(**) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm

Nuova Umidità relativa 50 % diametro apparente 10,7 mm n°trefoli 16

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	589	<i>nessun trefolo rotto</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	864	<i>senza nodi</i>
carico rottura trefolo (kgp)	157	<i>senza nodi</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	3344	
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1840	<i>- 45 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
punto fusione anima (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
diametro efficace (mm)	7,6	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	74	

(*) Rispetto stesso test senza nodi

Corda Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm

Usata Umidità relativa 50 % diametro apparente 11,6 mm n°trefoli 16

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,005 m/s	
carico rottura calza con bloccante (kgp)	843	<i>tutti i trefoli rotti</i>
tipo bloccante	Croll Petzl	<i>Modello 2011</i>
carico rottura calza (kgp)	566	<i>- 36 % (*)</i>
carico rottura trefolo (kgp)	116	<i>- 26 % (*) (**)</i>
carico rottura senza nodi (kgp)	1533	<i>- 54 % (*)</i>
carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1222	<i>- 34 % (*)</i>
punto fusione calza (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
punto fusione anima (°C)	265	<i>fibra nylon 6.6</i>
diametro efficace (mm)	5,1	
temperatura nodi rottura corda (°C)	circa 50	<i>Termo camera</i>
peso (g/m)	83	

(*) Rispetto alla corda nuova

(**) I trefoli sono apparentemente come nuovi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	253	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	454	
Carico rottura trefolo (kgp)	181	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	560	- 40 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	929	
Punto fusione calza (°C)	218	fibra Nylon 6
Punto fusione anima (°C)	218	fibra Nylon 6
Diametro efficace (mm)	4,7	
Temperatura nodi rottura corda (°C)	50 circa	
Peso (g/m)	23,7	

Cordino Repetto Dyneema 5,5 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	205	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	378	
Carico rottura trefolo (kgp)	1110	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	639	- 57 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	1473	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	150	fibra Dyneema
Diametro efficace (mm)	2,0 + 1,0	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

Cordino Repetto Dyneema 8,0 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	468	Scorrimento con nessun trefolo rotto
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	678	
Carico rottura trefolo (kgp)	2428	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	1331	- 57 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	3068	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	150	fibra Dyneema
Diametro efficace (mm)	3,0 + 1,2	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

Cordino Kevlar 5,5 mm nuovo numero trefoli **1** (*) rispetto cordino senza nodi

Test "quasi-statici"	velocità di trazione 0,006 m/s	
Carico rottura calza con bloccante (kgp)	259	Rottura trefolo dopo 0,5 m scorrimento
Tipo bloccante	Croll Petzl	Modello 2011
Carico rottura calza (kgp)	413	
Carico rottura trefolo (kgp)	1753	
Carico rottura con nodi (guida semplice) (kgp)	967	- 55 % (*)
Carico rottura senza nodi (kgp)	2142	
Punto fusione calza (°C)	265	fibra Nylon 6.6
Punto fusione anima (°C)	> 360-500	fibra Kevlar (disgregazione)
Diametro efficace (mm)	2,8 + 0,8	diametro anima + spessore calza
Temperatura nodi rottura corda (°C)		
Peso (g/m)		

03) Tabelle di sintesi dei test a caduta delle Corde e Cordini

03.a) Legenda - Con riferimento a *Parte II (Capitolo 01 Paragrafo h)* *Parte V Parte VI*

d_e (mm)	Diametro efficace, come definito nella Parte I Capitolo 01 Paragrafo e
S_e (mm ²)	Superficie efficace, come definita nella Parte I Capitolo 01 Paragrafo e
H (m)	Altezza in metri di caduta del peso P di 140 kgp (quando uguale a 0,00 è una trazione quasi-statica, con velocità di trazione di 0,006 mm/s, sulla torre di caduta con campione annodato alle estremità lungo 300 cm); è un indice dell'energia in gioco nel test calcolabile con la relazione $E = (H + A_0) \cdot P$
n° Choc	Numero di choc con altezza di caduta H che ha subito il campione di corda
V_d (s ⁻¹)	Velocità di deformazione relativa a ogni choc
E (GPa)	Modulo d'elasticità della corda relativo al tratto di curva compreso fra e $F = 200$ kg e $F = 400$ kgp
A_0 (m)	Allungamento massimo prodotto per ogni test a caduta (Figura 43 Parte II Capitolo 01 Paragrafo g); nel caso di trazione quasi-statica l'allungamento massimo è quello prodotto con una forza traente massima di 800 kgp
ΔL_{tot} (J)	Quantità totale d'energia conferita dalla caduta del peso in relazione anche all'allungamento massimo A₀
% <i>e. diss.</i>	Percentuale d'energia totale ΔL_{tot} dissipata in trasformazioni irreversibili
% <i>c. attrit.</i>	Percentuale d'energia totale ΔL_{tot} dissipata in calore per attriti interni alla corda
δ_{tempo} (s)	Ritardo in secondi fra avvento della forza massima F₀ e dell'allungamento massimo A₀ (ritardo che si manifesta anche con test a trazione quasi-statica ma con margini d'errore superiore)
δ_{gradi} (°)	Ritardo in gradi sessagesimali fra avvento della forza massima F₀ e dell'allungamento massimo A₀ ; ritardo che non può essere ricavato con test a trazione quasi-statica in quanto non si produce un'isteresi con due cicli e quindi non è possibile ricavare il periodo T (Figura 43 Parte II Capitolo 01 Paragrafo g)
$\tan \delta$	Indice del rapporto fra trasformazioni elastiche e viscosi subite durante il test (non calcolabile nei test quasi-statici per l'impossibilità di calcolare il periodo T)
μ (Pa · s)	Coefficiente di viscosità che misura la capacità di deformazione del campione sottoposto a test di deformarsi secondo la Legge di Newton (Relazione 14 Figura 39 Parte II Capitolo 01 Paragrafo f) (non calcolabile nei test quasi-statici per l'impossibilità di calcolare il periodo T)

L'elevato numero di test (480), ognuno dei quali ha permesso di calcolare 10 misure significative, per un totale di 4800 dati rende statisticamente molto valida la base sperimentale di questa ricerca sulla viscoelasticità delle corde. In media, in ogni grafico dove sono diagrammate almeno 6 curve, sono utilizzati più di 50 dati: il confronto fra le curve di tendenza è, dunque, molto validato.

03.b		Corda: Beal Antipodes 10 mm Nuova							d _e = 7,9 mm			
		Rottura		QS		Acquisire						
H (m)	n° Choc	V _d (s ⁻¹)	E _{GPa}	%c.attr.	ΔI _{tot} (J)	%e.diss	A ₀ (m)	δ _{tempo} (s)	δ _{gradi}	tan δ	η	
0,00	1	0,00	0,70		1983	69	0,647	0,600				
0,00	2	0,00	0,82		1425		0,451	1,000				
0,00	3	0,00	0,90		1552	58	0,450	0,600				
0,00	4	0,00	0,85		1352	56	0,457	0,800				
0,00	5	0,00	0,83		1407	56	0,452	0,600				
0,00	6	0,00	0,96		1341	54	0,407	0,300				
0,00	7	0,00			1334	53	0,422	1,000				
0,00	8	0,00	0,85		1338	53	0,433	1,300				
0,00	9	0,00	0,87		1332	53	0,407	1,300				
0,00	10	0,00	0,93		1279	52	0,402	0,800				
0,10	1	0,44	0,70	4	607	68	0,342	0,026	15,8	0,283	0,017	
0,10	2	0,44	0,91	5	560	61	0,308	0,019	11,5		0,015	
0,10	3	0,43	0,91	0	575	59	0,319	0,019	11,4	0,202	0,015	
0,10	4,1	0,43	0,90	1	589	57	0,329	0,017	10,2	0,180	0,013	
0,10	5	0,43	0,96	4	567	57	0,313	0,016	9,7	0,170	0,013	
0,10	6	0,43	0,95	0	592	55	0,331	0,016	9,6	0,169	0,013	
0,10	7	0,43		5	560	52	0,308	0,015	9,0	0,158	0,013	
0,10	8	0,43	0,95	1	575	54	0,319	0,016	9,7		0,013	
0,10	9	0,43		5	526	50	0,313	0,011	6,6	0,116	0,010	
0,10	10	0,43	0,98	3	542	52	0,301	0,010	6,1	0,106	0,009	
0,30	1	0,77	0,81	3	1023	68	0,445	0,023	13,0	0,230	0,016	
0,30	2	0,74	1,04	2	1012	62	0,437	0,016	8,6	0,151	0,014	
0,30	3	0,74	1,15	2	1023	56	0,445	0,015	8,2	0,145	0,012	
0,30	4	0,74	1,16	4	970		0,406	0,012	6,5	0,114	0,011	
0,30	5	0,74	1,19	5	941	53	0,385	0,011	6,0	0,106	0,010	
0,30	6	0,74	1,21	2	931	55	0,378	0,010	5,5	0,096	0,010	
0,30	7	0,73		5	924	52	0,373	0,009	5,1	0,089	0,009	
0,30	8	0,73	1,20	4	949	51	0,391	0,010	5,4	0,095	0,009	
0,30	9	0,73	1,18	3	959		0,398	0,009	5,0	0,087	0,008	
0,30	10	0,73	1,22	2	949	50	0,391	0,009	5,0	0,074		
0,50	1	1,00	0,85	4	1420	68	0,534	0,018	9,5	0,167	0,013	
0,50	2	0,96	1,04	4	1424	58	0,537	0,014	7,4	0,129	0,011	
0,50	3	0,95	1,20	3	1343	54	0,478	0,011	5,6	0,097	0,010	
0,50	4	0,94		4	1318	56	0,460	0,012	5,9	0,103		
0,50	5	0,94	1,24	2	1329	54	0,468	0,012	5,9			
0,50	6	0,94		2	1346	52	0,480	0,009	4,5	0,078	0,009	
0,50	7	0,94	1,24	4	1312	51	0,455	0,008	3,9	0,068	0,008	
0,50	8	0,94	1,18	5	1294	49	0,442	0,007	3,5	0,061	0,008	
0,50	8,96	0,94		2	1305	50	0,450	0,003	1,5			
0,50	10	0,93	1,28	7	1280	49	0,432	0,003	1,5	0,026	0,003	
0,70	1	1,18	0,85	5	1818	67	0,624	0,016	7,8	0,137	0,012	
0,70	2	1,13		6	1710		0,545	0,014	6,6	0,124	0,010	
0,70	3	1,12	1,20	8	1663	55	0,511	0,016	7,5		0,009	
0,70	4	1,11	1,27	4	1678	56	0,522	0,016	7,3	0,062	0,008	
0,70	5	1,11	1,33	11	1645	51	0,498	0,015	7,0		0,009	
0,70	6	1,11		6	1663	51	0,511	0,010	4,6	0,080	0,008	
0,70	7	1,11	1,23	5	1654	49	0,504	0,007	3,2	0,056	0,008	
0,70	8	1,10		6	1692	51	0,532	0,005	2,3	0,040	0,005	
0,70	9	1,10	1,29	7	1660	48	0,509	0,004	1,8	0,032	0,005	
0,70	10	1,10	1,29	8	1667		0,514	0,003	1,4	0,024	0,003	

1,00	1	1,39	0,83	8	2365	68	0,722	0,016	7,3	0,129	0,010
1,00	2	1,33	1,16	7	2228	58	0,622	0,014	6,0	0,105	
1,00	3	1,32	1,23	10	2171	53	0,581	0,010	4,2	0,073	
1,00	4	1,31	1,37	8	2203	53	0,604	0,007	2,9	0,050	0,008
1,00	5	1,31		8	2192	55	0,596	0,006	2,5	0,043	0,006
1,00	6	1,29	1,39	12	2217	47	0,614	0,005	2,1	0,036	0,008
1,00	7	1,29	1,37	11	2153	47	0,568	0,004	1,6	0,041	0,006
1,00	8	1,29	1,37	12	2125		0,547	0,004	1,6	0,028	0,007
1,00	9	1,29	1,33	11	2188		0,593	0,004	1,6	0,028	0,005
1,00	10	1,29	1,40	14	2171	46	0,581	0,003	1,0	0,010	0,003
1,50	1	1,72	0,90	6	3023	67	0,701	0,008	3,3	0,104	0,008
1,50	2,01	1,63		8	3097	57	0,755	0,005	1,8	0,088	0,007
1,50	3	1,61	1,31	13	3027		0,704	0,005	1,8	0,034	0,007
1,50	4	1,60	1,36	14	2946	49	0,645	0,005	1,7	0,022	0,007
1,50	5	1,60	1,43	9	2984	49	0,673	0,005	1,7	0,039	0,007
1,50	6	1,59	1,44	8	2946	46	0,645	0,005	1,7	0,023	0,007
1,50	7	1,59		14	2971	48	0,663	0,005	1,7	0,014	0,007
1,50	8	1,59	1,39	10	2924	45	0,629	0,005	1,4	0,017	0,006
1,50	9	1,59		12	2932		0,635	0,003	1,0	0,009	0,005
1,50	10	1,58	1,51	14	2903	42	0,614	0,004	0,7	0,004	0,002
2,00	1	1,99	0,83	10	3922	63	0,856	0,013	4,7	0,082	0,013
2,00	2	1,87	1,13	9	3777	56	0,750	0,011	3,7	0,051	0,015
2,00	3	1,85	1,28	13	3777	51	0,750	0,008	2,6	0,030	0,011
2,00	4	1,82	1,38								
2,00	5										
2,00	6										
2,00	7										
2,00	8										
2,00	9										
2,00	10										

Nel test **H200 Choc4** il campione si è rotto (nel nodo).

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del $\pm 20\%$. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

03.c		Corda: Beal Antipodes 10 mm Usata							d _e = 5,7 mm		
		Rottura		QS		Acquisire					
H (m)	n° Choc	V _d (s ⁻¹)	E _{GPa}	%c.attr.	ΔI _{tot} (J)	%e.diss	A ₀ (m)	δ _{tempo} (s)	δ _{gradi}	tan δ	η
0,00	1	0,00	0,58		3242	71	1,045	0,900			
0,00	2	0,00			2160	56	0,646	0,900			
0,00	3	0,00	1,07		1917	52	0,644	1,500			
0,00	4	0,00	1,06		1776	51	0,554	1,500			
0,00	5	0,00	1,07		1775	51	0,554	1,400			
0,00	6	0,00	1,13		1784	49	0,543	1,300			
0,00	7	0,00	1,17		1731	45	0,518	1,100			
0,00	8	0,00	1,10		1783	47	0,570	1,200			
0,00	9	0,00	1,14		1732	46	0,534	0,900			
0,00	10	0,00	1,10		1702	49	0,538	0,700			
0,10	1	0,42	0,70	1	832	76	0,506	0,040	22,4	0,412	0,030
0,10	2	0,41	0,97	3	706	67	0,414	0,033	18,1	0,328	0,032
0,10	3	0,41	1,14	1	713	62	0,419	0,021	11,4	0,246	0,028
0,10	4	0,40	1,12	1	727	65	0,429	0,027	14,9	0,275	0,028
0,10	5	0,40	1,16	2	681	63	0,396	0,035	19,4	0,262	0,028
0,10	6	0,40		4	666	63	0,385	0,018	9,9	0,207	0,024
0,10	7	0,40	1,19	5	666	60	0,385	0,022	12,1	0,215	0,022
0,10	8	0,40	1,19	3	691	59	0,403	0,019	10,3	0,182	0,020
0,10	9	0,40	1,23	3	691	60	0,403	0,016	8,7	0,153	0,019
0,10	10	0,40	1,15	5	645	58	0,370	0,014	7,6	0,134	0,018
0,30	1	0,74	0,79	2	1336	75	0,673	0,034	17,4	0,314	0,026
0,30	2	0,71	1,03	4	1156	67	0,542	0,026	13,1	0,234	0,028
0,30	3	0,70	1,19	5	1167	66	0,550	0,020	10,1	0,214	0,025
0,30	4	0,70	1,31	6	1136	61	0,527	0,018	9,0	0,223	0,023
0,30	5	0,69	1,33	7	1096	63	0,498	0,014	7,1	0,210	0,020
0,30	6	0,69	1,32	6	1058	59	0,470	0,020	10,0	0,184	0,019
0,30	7	0,69	1,34	10	1064	59	0,475	0,023	11,5	0,174	0,017
0,30	8	0,69	1,32	6	1089	60	0,493	0,019	9,4	0,166	0,014
0,30	9	0,68	1,30	9	1051	59	0,465	0,013	6,5	0,137	0,018
0,30	10	0,68	1,33	6	1086	56	0,491	0,017	8,5	0,113	0,012
0,50	1	0,94	0,78	4	1802	76	0,812	0,026	12,7	0,274	0,022
0,50	2	0,87	1,14							0,219	
0,50	2,96	0,86	1,31	7	1509	62	0,599	0,021	9,9	0,206	0,022
0,50	4	0,86	1,38	4	1566	59	0,640	0,016	7,5	0,201	0,019
0,50	5	0,85	1,38	5	1544	62	0,624	0,032	14,9		
0,50	6	0,85	1,42							0,143	
0,50	7	0,84	1,37							0,184	
0,50	8	0,84	1,42	8	1456	58	0,560	0,013	6,1	0,125	0,011
0,50	9	0,84	1,49	7	1445	54	0,552	0,013	5,8	0,107	0,008
0,50	10	0,84	1,43	10	1420	52	0,534	0,012	5,8	0,111	0,008
0,70	1	1,14	0,83	5	2153	76	0,868	0,036	17,4	0,226	0,021
0,70	2	1,05	1,29	6	1816	66	0,622	0,018	8,4		0,024
0,70	3	1,04	1,34	8	1840	65	0,640	0,014	6,5	0,164	0,021
0,70	4	1,03	1,46	8	1875	62	0,665	0,022	10,3	0,187	0,018
0,70	5	1,02	1,50							0,139	
0,70	6	1,02		9	1833	61	0,635	0,021	9,9		0,013
0,70	7	1,02	1,49	8	1840	59	0,640	0,019	8,7		0,011
0,70	8	1,02	1,52	10	1847	57	0,645	0,018	8,2	0,119	0,007
0,70	9	1,01	1,58	9	1805	59	0,614	0,012	5,4	0,102	0,009
0,70	10	1,01	1,61	10	1818	54	0,624	0,012	5,5	0,085	0,006

1,00	1	1,39	0,83	6	2739	77	0,994	0,027	12,5	0,179	0,023
1,00	2	1,26	1,38	7	2432	65	0,771	0,013	5,5	0,146	0,018
1,00	3	1,25	1,42	8	2428	63	0,768	0,016	6,8	0,133	0,021
1,00	4	1,24	1,42	7	2365	59	0,722	0,018	7,4	0,113	0,018
1,00	5	1,24	1,49	9	2358	59	0,717	0,011	4,5	0,083	0,017
1,00	6	1,23	1,55	10	2361	58	0,719	0,007	2,8	0,096	0,009
1,00	7	1,22	1,54	9	2261	54	0,668	0,007	2,9	0,098	0,010
1,00	8	1,22	1,62	9	2351	54	0,712	0,012	4,9	0,069	0,007
1,00	9	1,21	1,57	10	2311	53	0,683	0,008	3,3	0,057	0,007
1,00	10	1,21	1,67	11	2266	51	0,650	0,009	3,6	0,063	0,007
1,50	1	1,67	0,61	3	3578	73	1,105	0,017	7,0	0,151	0,015
1,50	2	1,49	1,32	4	3299	66	0,951	0,012	4,5	0,109	0,018
1,50	3,1	1,47	1,36			61	0,859				
1,50	4										
1,50	5										
1,50	6										
1,50	7										
1,50	8										
1,50	9										
1,50	10										
2,00	1	1,91	0,80	2	4458	72	1,264	0,013	4,8	0,085	0,013
2,00	2	1,70	1,41								
2,00	3										
2,00	4										
2,00	5										
2,00	6										
2,00	7										
2,00	8										
2,00	9										
2,00	10										

Nei test **H150 Choc3** e **H200 Choc2** i campioni si sono rotti (nel nodo).

Nei test **H50 Choc2** **H50 Choc6** **H50 Choc7** **H70 Choc5** c'è stata un'interferenza esterna e i dati non sono stati ritenuti validi.

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del $\pm 20\%$. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

03.d		Corda: Beal Booster III 9,7 mm Nuova							d _e = 6,6 mm		
		Rottura		QS		Acquisire					
H (m)	n° Choc	V _d (s ⁻¹)	E _{GPa}	%c.attr.	ΔI _{tot} (J)	%e.diss	A ₀ (m)	δ _{tempo} (s)	δ _{gradi}	tan δ	η
0,00	1	0,00	0,37		4354	62	1,525	1,600			
0,00	2	0,00	0,49		2586	47	1,037	0,700			
0,00	3	0,00	0,58		2244	42	0,888	1,000			
0,00	4	0,00	0,58		2231	42	0,902	0,900			
0,00	5	0,00	0,59		2163	41	0,892	0,500			
0,00	6	0,00	0,60		2219	40	0,907	1,400			
0,00	7	0,00									
0,00	8	0,00	0,66		2061	39	0,831	0,900			
0,00	9	0,00	0,64		2042	40	0,867	0,900			
0,00	10	0,00	0,66		1994	39	0,844	1,600			
0,10	1	0,44	0,48	1	1242	64	0,804	0,052	20,9	0,382	0,019
0,10	2	0,42									
0,10	3	0,41	0,65	1	1084	58	0,689	0,040	16,2	0,290	0,019
0,10	4	0,41	0,71	2	1062	54	0,673	0,037	14,8	0,263	0,019
0,10	5	0,41	0,72	2	1062	54	0,673	0,033	13,3	0,236	0,017
0,10	6	0,41	0,68	2	1012		0,637	0,031	12,5	0,222	0,016
0,10	7	0,40		3	1044	54	0,660	0,026	10,6	0,186	0,013
0,10	8	0,40	0,73	2	1037		0,655	0,025	10,1	0,179	0,013
0,10	9	0,40	0,68	4	998	57	0,627	0,027	11,0	0,195	0,015
0,10	10	0,40	0,72	2	1041	58	0,658	0,023	9,4	0,166	0,013
0,30	1	0,73	0,49	3	1559	65	0,835	0,045	17,7	0,320	0,020
0,30	2	0,70		5	1478	60	0,776	0,037	14,4	0,256	0,020
0,30	3	0,70	0,68	0	1498	56	0,791	0,035	13,4	0,239	0,019
0,30	4	0,70	0,66	0	1518	56	0,805	0,033	12,7	0,225	0,018
0,30	5	0,70		-1	1534		0,817	0,036	14,2	0,195	0,019
0,30	6	0,69	0,77	1	1442	51	0,750	0,031	12,3	0,164	0,018
0,30	7	0,69	0,68	6	1431	56	0,742	0,031	12,1	0,136	0,018
0,30	8	0,68		5	1424		0,737	0,024	9,5	0,123	0,014
0,30	9	0,68	0,75	6	1439		0,748	0,017	6,6	0,141	0,010
0,30	10	0,68	0,73	1	1439	56	0,748	0,015	6,0	0,123	0,009
0,50	1	0,98	0,52	1	2204	66	1,105	0,040	14,8	0,264	0,016
0,50	2	0,90	0,58	4	1890	59	0,876	0,034	12,8	0,227	0,019
0,50	3	0,89	0,701	6	1862	58	0,856	0,027	10,1	0,178	0,017
0,50	4	0,89	0,72	3	1894	57	0,879	0,024	9,0	0,159	0,016
0,50	5,01	0,89	0,76	6	1851	51	0,848	0,021	7,9	0,138	0,014
0,50	6	0,88	0,768	5	1805	51	0,814	0,018	6,8	0,119	0,015
0,50	7	0,87	0,76		1851		0,848	0,016	6,0	0,106	0,013
0,50	8	0,87	0,75	5	1809	56	0,817	0,015	5,7	0,100	0,012
0,50	9	0,87	0,77	4	1816		0,822	0,014	5,4	0,094	0,012
0,50	10	0,87	0,77	3	1732	54	0,761	0,013	5,1	0,089	0,013
0,70	1	1,17	0,50	1	2612	68	1,202	0,037	13,3	0,236	0,015
0,70	2	1,05	0,66	6	2281	59	0,961	0,030	10,6	0,188	0,018
0,70	3	1,04	0,67	8	2284	53	0,963	0,027	9,7	0,171	0,014
0,70	4	1,03	0,77	3	2239	56	0,930	0,026	9,3	0,164	0,018
0,70	5	1,02	0,77	2	2225	53	0,920	0,020	7,2	0,094	0,014
0,70	6	1,02	0,78	5	2263	51	0,948	0,018	6,5	0,113	0,012
0,70	7	1,02	0,723	7	2169	52	0,879	0,017	6,1	0,091	0,012
0,70	8	1,01	0,82	6	2196	52	0,899	0,017	6,1	0,108	0,013
0,70	9	1,00	0,78	5	2137	50	0,856	0,017	6,1	0,107	0,014
0,70	10	0,99	0,83	6	2133	53	0,853	0,016	5,9	0,075	0,011

1,00	1	1,38		6	3096	71	1,254	0,034	12,0	0,213	0,014
1,00	2	1,27	0,77	6	2802	60	1,040	0,031	10,7	0,189	0,016
1,00	3	1,25	0,62	5	2795	59	1,035	0,026	8,9	0,157	0,016
1,00	4	1,23	0,77	7	2761	56	1,010	0,020	6,8	0,119	0,015
1,00	5	1,21	0,82	6	2774	57	1,020	0,015	5,1	0,089	0,013
1,00	6	1,20	0,77	6	2745	56	0,999	0,014	4,9	0,085	0,011
1,00	7	1,19	0,77	7	2671	55	0,945	0,013	4,6	0,080	0,012
1,00	8	1,18	0,57	8	2795	53	1,035	0,012	4,2	0,073	0,010
1,00	9	1,18	0,56	7	2696	51	0,963	0,014	4,9	0,085	0,010
1,00	10	1,18	0,84	10	2675	52	0,948	0,008	2,8	0,049	0,010
1,50	1	1,69	0,53	6	3962	72	1,395	0,028	9,1	0,159	0,012
1,50	2	1,54	0,66	7	3690	64	1,187	0,021	7,1	0,125	0,014
1,50	3	1,49		7	3668	61	1,171	0,017	5,6	0,098	0,012
1,50	4	1,47	0,75	6	3641	59	1,151	0,017	5,5	0,097	0,013
1,50	5	1,45	0,82	9	3580	58	1,107	0,016	5,2	0,091	0,013
1,50	6	1,43	0,83	9	3571	58	1,100	0,014	4,5	0,079	0,010
1,50	7	1,42		9	3457	61	1,017	0,013	4,4	0,077	0,011
1,50	8	1,41	0,84	9	3440	56	1,005	0,011	3,7	0,064	0,008
1,50	9	1,40	0,81	12	3504	53	1,051	0,011	3,6	0,063	0,008
1,50	10	1,40	0,87	12	3425	54	0,994	0,010	3,3	0,057	0,010
2,00	1	1,96	0,51	2	4779	72	1,480	0,026	8,4	0,147	0,010
2,00	2	1,73	0,76	8	4447	67	1,238	0,021	6,5	0,114	0,013
2,00	3	1,69	0,78	9	4494	63	1,272	0,020	6,0	0,104	0,012
2,00	4	1,64	0,80	7	4483	63	1,264	0,018	5,2	0,092	0,010
2,00	5	1,63	0,79	10	4444	59	1,236	0,016	4,6	0,080	0,011
2,00	6	1,62	0,83	8	4359	58	1,174	0,014	3,9	0,068	0,009
2,00	7	1,60	0,85	12	4388	59	1,195	0,013	3,6	0,063	0,009
2,00	8	1,59	0,89	12	4359	59	1,174	0,013	3,6	0,063	0,009
2,00	9	1,58	0,93	10	4366	57	1,179	0,012	3,3	0,057	0,006
2,00	10	1,57	0,90	13	4332	55	1,154	0,010	2,7	0,048	0,007

Nei test **H0 Choc7** **H10 Choc2** **H50 Choc7** c'è stata un'interferenza esterna e i dati non sono stati ritenuti validi.

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del $\pm 20\%$. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

03.e		Corda: Beal Booster III 9,7 mm Usata							d _e = 5,1 mm			
		Rottura		QS		Acquisire						
H (m)	n° Choc	V _d (s ⁻¹)	E _{GPa}	%c.attr.	ΔI _{tot} (J)	%e.diss	A ₀ (m)	δ _{tempo} (s)	δ _{gradi}	tan δ	η	
0,00	1	0,00	0,28		5513	74	1,730	0,900				
0,00	2	0,00	0,86		2765	51	1,126	1,200				
0,00	3	0,00	0,93		2408	47	1,018	0,600				
0,00	4	0,00	0,94		2381	46	1,006	1,400				
0,00	5	0,00	1,06		2427	44	0,999	0,700				
0,00	6	0,00	0,98		2356	44	0,971	1,500				
0,00	7	0,00	0,97		2361	44	0,941	0,600				
0,00	8	0,00	1,12		2333	46	0,959	0,400				
0,00	9	0,00	1,05		2357	42	0,964	1,300				
0,00	10	0,00	0,97		2357	42	0,971	1,800				
0,10	1	0,44	0,68	0	1453	75	0,958	0,046	18,4	0,395	0,024	
0,10	2	0,42	1,02	-2	1313	63	0,856	0,039	15,6	0,368	0,028	
0,10	3	0,41	1,18	-1	1284	59	0,835	0,031	0,5	0,318	0,023	
0,10	4	0,40	1,11	3	1239	59	0,802	0,028	11,1	0,238	0,021	
0,10	5	0,40	1,16	-1	1255	55	0,814	0,027	10,7	0,240	0,021	
0,10	6	0,40	1,22	5	1210	55	0,781	0,024	9,6	0,228	0,019	
0,10	7,03	0,40	1,19	-2	1246	54	0,807	0,027	10,8	0,187	0,021	
0,10	8	0,40	1,29	0	1224	55	0,791	0,024	9,6	0,205	0,019	
0,10	9	0,40	1,17	-2	1221	56	0,789	0,024	9,5	0,190	0,018	
0,10	10	0,40	1,31	1	1196	59	0,771	0,025	10,0	0,185	0,022	
0,30	1	0,76	0,65	-1	1950	75	1,120	0,045	17,0	0,328	0,024	
0,30	2	0,71	1,09	0	1802	65	1,012	0,037	13,7	0,266	0,026	
0,30	3	0,69	1,19	2	1718	61	0,951	0,031	11,4	0,237	0,024	
0,30	4	0,68	1,23	0	1707	58	0,943	0,030	11,1	0,221	0,025	
0,30	5	0,67	1,30	1	1682	56	0,925	0,029	10,7	0,187	0,025	
0,30	6	0,67	1,29	2	1647	52	0,899	0,029	10,7	0,163	0,026	
0,30	7	0,66	1,27	0	1682	55	0,925	0,028	10,4	0,163	0,025	
0,30	8	0,66	1,35	2	1611	56	0,873	0,030	11,2	0,153	0,028	
0,30	9	0,66	1,29	2	1622	57	0,881	0,026	9,8	0,148	0,024	
0,30	10	0,66	1,32	0	1588	56	0,856	0,023	8,7	0,152	0,022	
0,50	1	0,98	0,69	2	2436	75	1,217	0,048	17,7	0,263	0,022	
0,50	2	0,89	1,13	1	2173	65	1,082	0,039	14,0	0,250	0,025	
0,50	3	0,85	1,33	3	2126	60	1,048	0,026	9,3	0,197	0,024	
0,50	4	0,84	1,32	3	2031	59	0,979	0,024	8,6	0,168	0,019	
0,50	5	0,83	1,36	3	2042	56	0,987	0,019	6,9	0,162	0,017	
0,50	6	0,83	1,40	2	2009	56	0,963	0,018	6,5	0,150	0,016	
0,50	7	0,83	1,41	3	2007	55	0,961	0,020	7,2	0,155	0,018	
0,50	8	0,82	1,44	3	1989	55	0,948	0,018	6,5	0,130	0,018	
0,50	9	0,82	1,39	2	1975	56	0,938	0,019	6,9	0,131	0,018	
0,50	10	0,82	1,48	1	1971	56	0,935	0,020	7,3	0,144	0,019	
0,70	1	1,71	0,76	2	2708	76	1,272	0,040	14,5	0,275	0,021	
0,70	2	1,06	1,10	3	2464	64	1,164	0,035	12,5	0,210	0,022	
0,70	3	1,03	1,42	1	2387	62	1,038	0,025	8,9	0,172	0,021	
0,70	4	1,01	1,33	5	2299	61	1,023	0,024	8,9	0,175	0,018	
0,70	5	1,01	1,57	3	2387	58	1,038	0,021	7,6	0,142	0,018	
0,70	6	1,00	1,44	6	2295	57	0,971	0,019	6,8	0,138	0,015	
0,70	7	1,00	1,55	5	2288	54	0,966	0,019	6,9	0,131	0,016	
0,70	8	0,99	1,41	3	2349	53	1,010	0,020	7,3	0,142	0,016	
0,70	9	0,99	1,56	2	2277	55	0,958	0,021	7,6	0,134	0,019	
0,70	10	0,98	1,54	3	2338	53	1,002	0,020	7,2	0,103	0,018	

1,00	1	1,39	0,65	3	3440	75	1,397	0,037	13,1	0,233	0,021
1,00	2	1,21	1,28	3	3042	69	1,225	0,024	8,3	0,188	0,021
1,00	3	1,16	1,49	4	2909	65	1,118	0,023	7,8	0,153	0,017
1,00	4	1,15	1,35	3	2954	63	1,076	0,022	7,4	0,130	0,016
1,00	5	1,13	1,39								
1,00	6	1,11	1,43								
1,00	7										
1,00	8										
1,00	9										
1,00	10										
1,50	1	1,75	0,73	1	4142	75	1,516	0,035	12,0	0,213	0,019
1,50	2	1,50	1,18	0	3792	70	1,296	0,028	9,2	0,153	0,020
1,50	3	1,45	1,31	3	3733	67	1,218	0,026	8,4	0,148	0,016
1,50	4	1,42	1,26	5	3767	66	1,188	0,019	6,1	0,106	0,014
1,50	5	1,41	1,21								
1,50	6										
1,50	7										
1,50	8										
1,50	9										
1,50	10										
2,00	1	1,98	0,72	2	5135	77	1,739	0,032	10,5	0,186	0,018
2,00	2	1,67	1,14	4	4692	67	1,416	0,020	6,2	0,109	0,015
2,00	3	1,62	1,21								
2,00	4										
2,00	5										
2,00	6										
2,00	7										
2,00	8										
2,00	9										
2,00	10										

Nei test **H100 Choc5** **H100 Choc6** **H150 Choc5** e **H200 Choc3** i campioni si sono rotti (nel nodo).

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del ± 20 %. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

03.f

Corda: Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Nuova $d_e = 7,6$ mm

		Rottura			QS		Acquisire				
H (m)	n° Choc	V_d (s ⁻¹)	E_{GPa}	%c.attr.	$\Delta I_{tot}(J)$	%e.diss	$A_0(m)$	δ_{tempo} (s)	δ_{gradi}	$\tan \delta$	η
0,00	1	0,00	0,85		1943	60	0,581	1,000			
0,00	2	0,00	1,02		1487	47	0,404	0,800			
0,00	3	0,00	1,14		1221	35	0,346	1,100			
0,00	4	0,00	0,96		1233	41	0,332	1,000			
0,00	5	0,00	1,12		1151	44	0,322	1,500			
0,00	6	0,00	1,07		1157	40	0,321	1,800			
0,00	7	0,00	1,24		1109	48	0,311	1,300			
0,00	8	0,00	1,19		1130	45	0,317	1,200			
0,00	9	0,00	1,06		1138	40	0,313	1,100			
0,00	10	0,00	1,32		1098	38	0,316	1,800			
0,10	1	0,44	0,93	2	621	64	0,352	0,015	9,8	0,173	0,011
0,10	2	0,42	1,14	5	490	53	0,257	0,009	6,0		0,011
0,10	3	0,42	1,21	6	490	51	0,257	0,011	6,9	0,122	0,012
0,10	4	0,42	1,24	2	558	49	0,306	0,011	7,0	0,126	0,014
0,10	5	0,42	1,26	2	504	49	0,267	0,018	11,9		0,018
0,10	6	0,42	1,45	6	508	48	0,270	0,014	9,2	0,158	0,017
0,10	7	0,42	1,23	3	483	51	0,252	0,018	11,8		0,019
0,10	8	0,42	1,29	2	518	49	0,277	0,016	10,5	0,176	0,018
0,10	9	0,42	1,32	4	461	45	0,236	0,012	8,0	0,149	0,016
0,10	10	0,42	1,45	8	441	45	0,240	0,012	8,2	0,143	0,013
0,30	1	0,78	0,97	3	981	63	0,414	0,010	6,1	0,163	0,011
0,30	2	0,75	1,46	3	909	54	0,362	0,007	4,1		0,012
0,30	3	0,75	1,33	4	871	54	0,334	0,011	6,6	0,076	0,011
0,30	4	0,74	1,41	3	895	51	0,352	0,012	7,1	0,125	0,013
0,30	5	0,74	1,60	7	821	48	0,298	0,013	7,7	0,093	0,015
0,30	6	0,74	1,40	10	857	50	0,365	0,013	7,7	0,136	0,015
0,30	7	0,74	1,60	6	884	52	0,344	0,012	7,1	0,152	0,018
0,30	8	0,73	1,51	7	882	51	0,342	0,010	6,0	0,104	0,018
0,30	9	0,73	1,44	6	871	48	0,334	0,004	2,4	0,073	0,015
0,30	10	0,73	1,69	6	891	46	0,323	0,004	2,4	0,073	0,011
0,50	1	1,00	1,00	6	1382	67	0,506	0,013	7,3	0,128	0,011
0,50	2	0,95	1,38	2	1262	54	0,419	0,004	2,1		0,009
0,50	3	0,94	1,41	6	1251	53	0,401	0,005	2,7	0,059	0,010
0,50	4	0,93	1,55	8	1240	51	0,403	0,006	3,2	0,068	0,014
0,50	5	0,93	1,56	8	1248	58	0,409	0,007	3,7	0,077	0,013
0,50	6	0,93	1,49	8	1244	49	0,406	0,012	6,3		0,016
0,50	7	0,92	1,43	5	1258	49	0,416	0,010	5,3	0,093	0,017
0,50	8	0,92	1,55	6	1191	53	0,367	0,009	4,7	0,082	0,014
0,50	9	0,92	1,66	9	1188	54	0,365	0,008	4,2	0,073	0,014
0,50	10	0,92	1,63	10	1188	46	0,365	0,004	2,1	0,037	0,011
0,70	1	1,17	0,94	7	1692	66	0,532	0,010	5,6	0,098	0,010
0,70	2	1,13	1,53	7	1575	54	0,447	0,005	2,5		0,007
0,70	3	1,12	1,46	6	1611	52	0,473	0,007	3,3	0,046	0,011
0,70	4	1,11	1,60	7	1564	57	0,439	0,008	3,8	0,055	0,014
0,70	5	1,10	1,53	9	1555	51	0,432	0,008	3,8	0,050	0,012
0,70	6	1,10	1,50	7	1586	52	0,455	0,009	4,3	0,055	0,012
0,70	7	1,10	1,50	10	1600	53	0,465	0,011	5,2	0,085	0,015
0,70	8	1,10	1,55	8	1562	55	0,437	0,012	5,6		0,016
0,70	9	1,10	1,80	11	1544	53	0,424	0,011	2,8		0,011
0,70	10	1,10	1,58	11	1571	49	0,444	0,007	3,3	0,029	0,010

1,00	1	1,39	1,06	6	2199	67	0,601	0,011	5,1	0,090	0,010
1,00	2	1,31	1,46	8	2125	55	0,547	0,008	3,7	0,060	0,008
1,00	3	1,30	1,58	8	2082	53	0,516	0,008	3,5		0,009
1,00	4	1,30	1,60	8	2093	55	0,524	0,009	3,8	0,031	0,010
1,00	5	1,29	1,67	9	2093	52	0,524	0,009	3,8	0,047	0,013
1,00	6	1,28	1,60	8	2057	56	0,498	0,011	4,6		0,018
1,00	7	1,28	1,70	9	2061	57	0,501	0,008	3,3	0,058	0,013
1,00	8	1,28	1,64	11	2061	55	0,501	0,007	2,9	0,055	0,013
1,00	9	1,28	1,66	8	2079	51	0,514	0,005	2,1		0,010
1,00	10	1,28	1,80	11	2008	52	0,462	0,005	2,1	0,027	0,010
1,50	1	1,74	1,11	6	3054	70	0,724	0,014	5,6	0,098	0,009
1,50	2	1,68	1,44	5	2822	59	0,555	0,006	2,3	0,040	0,009
1,50	3	1,61	1,74	10	2861	57	0,583	0,005	1,8	0,032	0,008
1,50	4	1,61	1,62	9	2861	56	0,583	0,006	2,2	0,038	0,012
1,50	5	1,59	1,72	10	2868	55	0,588	0,004	1,4	0,025	0,011
1,50	6	1,58	1,58	11	2850	55	0,575	0,006	2,2	0,038	0,014
1,50	7	1,58	1,70	8	2840	55	0,568	0,006	2,1	0,037	0,013
1,50	8	1,58	1,74	10	2843	60	0,570	0,004	1,4	0,025	0,014
1,50	9	1,58	1,72	12	2854	57	0,578	0,004	1,4	0,025	0,013
1,50	10	1,58	1,83	10	2798	51	0,537	0,005	1,8	0,031	0,008
2,00	1	2,01	1,14	5	3833	72	0,791	0,011	4,0	0,069	0,013
2,00	2	1,86	1,71	6	3635	62	0,697	0,008	2,7	0,047	0,014
2,00	3	1,84	1,49	14	3657	61	0,663	0,006	2,0	0,034	0,011
2,00	4	1,83	1,72	10	3558	65	0,653	0,005	1,6	0,028	0,010
2,00	5	1,83	1,61	10	3608	57	0,627	0,006	1,9	0,033	0,012
2,00	6	1,82	1,63	10	3682	60	0,600	0,013	4,1	0,072	0,024
2,00	7	1,80	1,68								
2,00	8										
2,00	9										
2,00	10										

Nel test **H200 Choc7** il campione si è rotto (nel nodo).

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del $\pm 20\%$. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

03.g Corda: Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm Usata $d_e = 5,1$ mm

		Rottura		QS		Acquisire					
H (m)	n° Choc	V _d (s ⁻¹)	E _{GPa}	%c.attr.	ΔI _{tot} (J)	%e.diss	A ₀ (m)	δ _{tempo} (s)	δ _{gradi}	tan δ	η
0,00	1	0,00	1,32		2297	73	0,665	1,700			
0,00	2	0,00			1394	63	0,430	0,700			
0,00	3	0,00	2,19		1335	58	0,405	1,100			
0,00	4	0,00	2,32		1302	53	0,385	1,900			
0,00	5	0,00	2,45		1276	55	0,381	0,900			
0,00	6	0,00	2,48		1266	53	0,369	0,500			
0,00	7	0,00	2,53		1237	52	0,355	0,600			
0,00	8	0,00	2,54		1192	51	0,362	0,700			
0,00	9	0,00	2,37		1324	54	0,397	0,600			
0,00	10	0,00	2,44		1250	51	0,368	0,900			
0,10	1	0,44	1,57	1							
0,10	2	0,42	2,25	4	574	65	0,318	0,027	16,5	0,348	0,051
0,10	3	0,42									
0,10	4	0,42		2	600	53	0,337	0,024	14,7	0,181	0,037
0,10	5	0,42	2,44	4	553	53	0,303	0,022	13,4	0,194	0,039
0,10	6	0,42	2,46	4	558	50	0,306	0,018	11,0	0,184	0,033
0,10	7	0,42	2,72	1	564	51	0,311	0,015	9,1	0,130	0,030
0,10	8	0,42	2,70								
0,10	9	0,42	2,44	2	588	53	0,328	0,010	6,1	0,113	0,027
0,10	10	0,41	2,52	4	597	50	0,335	0,011	6,7	0,117	0,022
0,30	1	0,76	1,83			75					
0,30	2	0,73	2,40	3	1040	63	0,457	0,016	8,9	0,251	0,042
0,30	3	0,72	2,78								
0,30	4	0,72	2,57								
0,30	5	0,72	2,81	4	987	55	0,419	0,013	7,2	0,126	0,030
0,30	6	0,72	3,17	8	963	51	0,401	0,011	6,1	0,106	0,025
0,30	7	0,71	2,86	8	941	53	0,385	0,016	8,9	0,156	0,031
0,30	8	0,71	2,98	7	970	51	0,406	0,010	5,5	0,097	0,028
0,30	9	0,71	2,99	5	970	53	0,406	0,010	5,5	0,096	0,022
0,30	10	0,71	3,14	8	966	51	0,403	0,011	6,1	0,107	0,024
0,50	1	0,99	2,05	4	1530	74	0,583	0,029	16,0	0,286	0,039
0,50	2	0,94	2,53								
0,50	3	0,92	2,63	6	1325	61	0,465	0,013	6,8	0,119	0,029
0,50	4	0,92	2,99	8	1312	56	0,455	0,012	6,2	0,108	0,028
0,50	5	0,92	3,01	6	1312	57	0,487	0,012	6,2	0,108	0,028
0,50	6	0,91	3,04	8	1258	50	0,416	0,011	5,6	0,098	0,029
0,50	7	0,91	2,66	6	1329	54	0,468	0,010	5,1	0,089	0,023
0,50	8	0,91	2,81	8	1301	54	0,447	0,008	4,1	0,071	0,020
0,50	9	0,91	3,17	7	1307	56	0,452	0,011	5,7	0,100	0,027
0,50	10	0,91	3,05	6	1325	50	0,465	0,009	4,6	0,080	0,020
0,70	1	1,17	1,93	5	1812	74	0,619	0,020	10,3	0,183	0,032
0,70	2	1,11	2,75	5	1685	66	0,527	0,016	7,8	0,136	0,026
0,70	3	1,10	2,76	8	1688	59	0,529	0,011	5,2	0,091	0,026
0,70	4	1,09	2,95	8	1724	61	0,555	0,012	5,7	0,100	0,027
0,70	5	1,09	3,17	9	1688	55	0,529	0,010	4,7	0,082	0,021
0,70	6	1,08	2,88	8	1638	55	0,493	0,011	5,2	0,092	0,024
0,70	7	1,08	3,24	3	1688	57	0,529	0,009	4,2	0,074	0,018
0,70	8	1,08	3,03	5	1663	53	0,511	0,011	5,1	0,090	0,025
0,70	9	1,07	3,23	12	1678	55	0,522	0,009	4,2	0,073	0,023
0,70	10	1,07	3,18	9	1678	53	0,522	0,008	3,7	0,065	0,020

1,00	1	1,43	1,96	7		74	0,658				
1,00	2,01	1,32	2,90	11	2213	70	0,611	0,011	4,8	0,084	0,024
1,00	3	1,31	2,86	10	2185	59	0,591	0,009	3,8	0,067	0,024
1,00	4	1,30	3,08	7	2163	59	0,575	0,008	3,4	0,060	0,023
1,00	5	1,30	2,91	7	2210	61	0,609	0,011	4,7	0,082	0,018
1,00	6	1,30	3,12	8	2192	57	0,596	0,011	4,6	0,081	0,022
1,00	7	1,29	3,42	11	2156	59	0,570	0,008	3,4	0,059	0,024
1,00	8	1,29	3,17	11	2174	52	0,583	0,009	3,8	0,066	0,020
1,00	9	1,29	3,11	8	2149	58	0,565	0,010	4,2	0,069	0,022
1,00	10	1,28	3,26								
1,50	1	1,70	1,70	4	3245	69	0,863	0,012	5,1	0,089	0,020
1,50	2	1,57	2,84								
1,50	3										
1,50	4										
1,50	5										
1,50	6										
1,50	7										
1,50	8										
1,50	9										
1,50	10										
2,00	1										
2,00	2										
2,00	3										
2,00	4										
2,00	5										
2,00	6										
2,00	7										
2,00	8										
2,00	9										
2,00	10										

Nel test **H100 Choc10** **H150 Choc2** i campioni si sono rotti (nel nodo).

Nei test **H10 Choc1** **H10 Choc3** **H10 Choc8** **H30 Choc1** **H30 Choc3** **H30 Choc4** **H50 Choc2** **H100 Choc1** c'è stata un'interferenza esterna e i dati non sono stati ritenuti validi.

I valori di δ_{tempo} per test con $H = 0,00$ (equivalente di fatto a trazione quasi-statica 0,006 mm/s), a causa della trazione non costante (manuale con verricello), contengono un potenziale errore del ± 20 %. Valori più coerenti con la realtà si ricavano estrapolando ad ascissa 0 (zero) la curva di tendenza ricavata con gli altri valori di δ_{tempo} con $H > 0$.

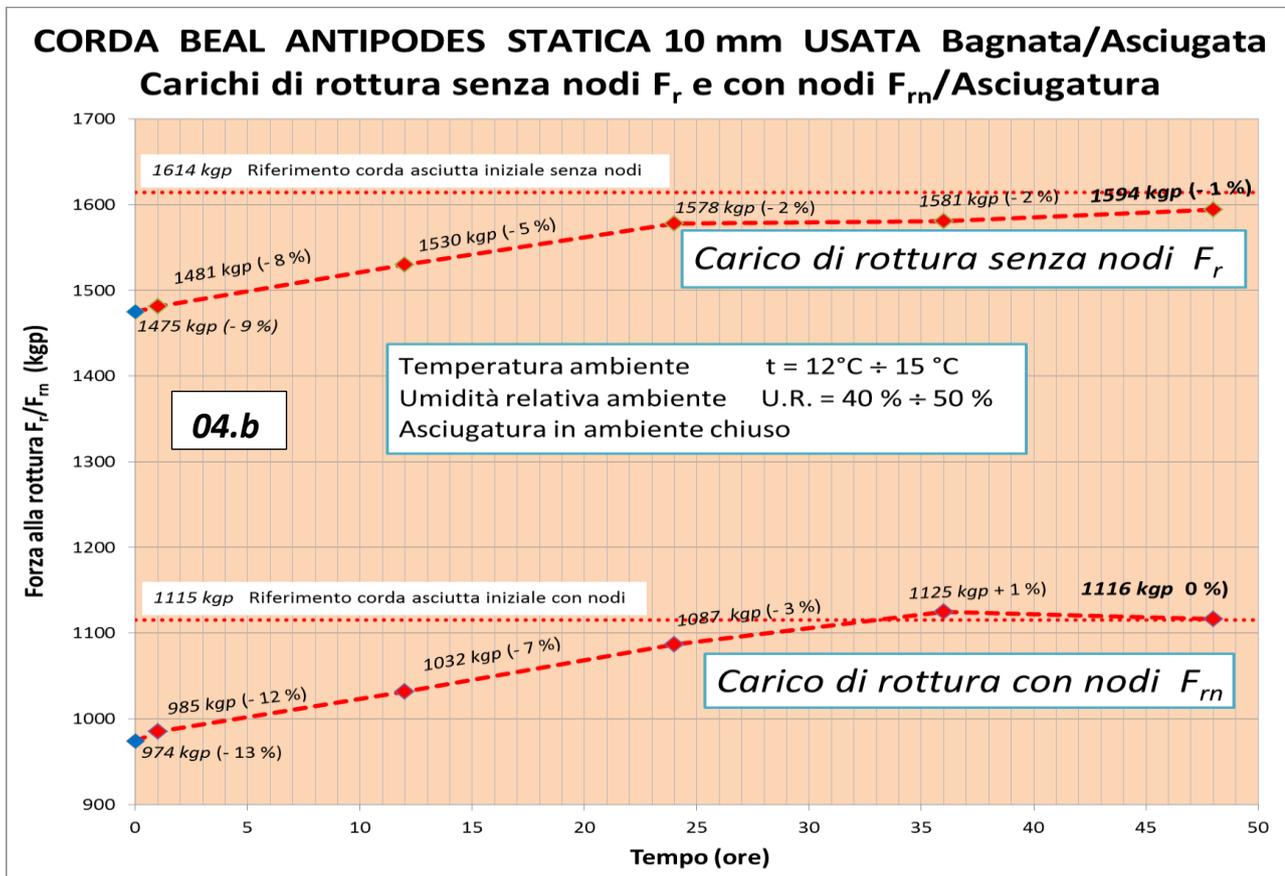
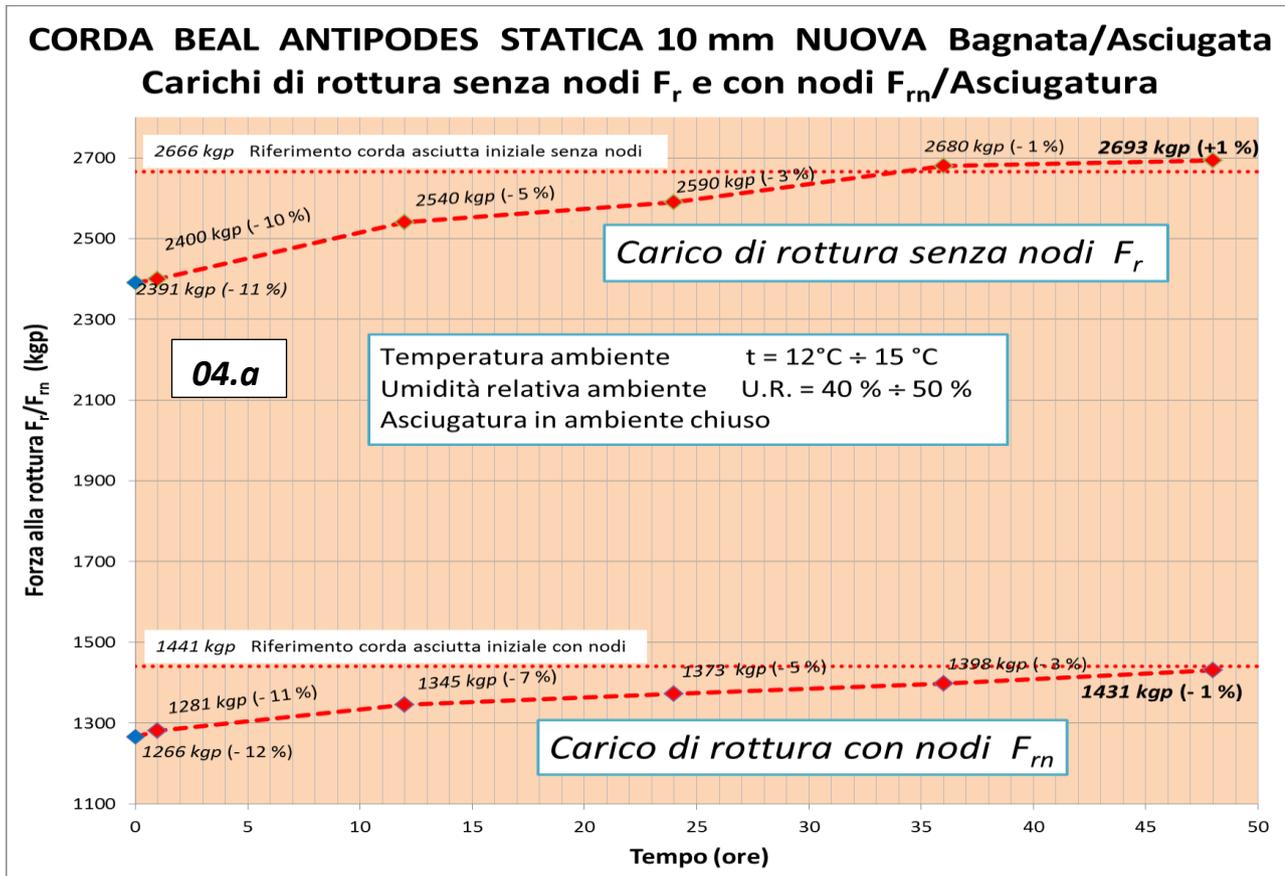
03.h		Cordino: Beal Nylon 5,5 mm Nuovo						Nylon 6 $d_e = 4,7$ mm					
$H_{(m)}$	n° Choc	$V_d (s^{-1})$	E_{GPa}	%c.attr.	$\Delta I_{tot(J)}$	%e.diss	$A_{0(m)}$	$\delta_{tempo (s)}$	δ_{gradi}	$\tan \delta$	η		
0,10	1	0,44	1,22	0	742,00	65	0,470	0,014	7,2	0,127	0,220		
0,25	1	0,70	1,22	0	1196	97	0,590	0,024	11,7	0,207	0,018		
0,25	2	0,68	1,57	0	1140	75	0,518	0,023	11,4	0,202	0,015		
0,25	3	0,67	1,66	0	1057	60	0,505	0,015	7,3	0,127	0,016		

03.i		Cordino: Courant Kevlar 5,5 mm Nuovo						Kevlar + Nylon 6.6 $d_e = 2,8 + 0,8$ mm						
$H_{(m)}$	n° Choc	$V_d (s^{-1})$	E_{GPa}	%c.attr.	$\Delta I_{tot(J)}$	%e.diss	$A_{0(m)}$	$\delta_{tempo (s)}$	δ_{gradi}	$\tan \delta$	η	$E' (GPa)$	$E'' (GPa)$	
0,10	1	0,46	27,79	0	246	78	0,098	0,012	14,7	0,317	0,329	23,816	7,54	
0,10	2	0,45	14,38	0	369	65	0,134	0,013	16,7	0,219	0,207	18,500	4,05	
0,10	3	0,44	9,72	0	378	54	0,153	0,012	17,8	0,235	0,158	15,510	3,65	
0,10	4	0,44	5,25	0	398	48	0,165	0,011	17,9	0,218	0,0922	11,150	2,43	
0,10	5	0,44	2,69	0	391	47	0,171	0,009	16,9	0,178	0,087	9,900	1,76	

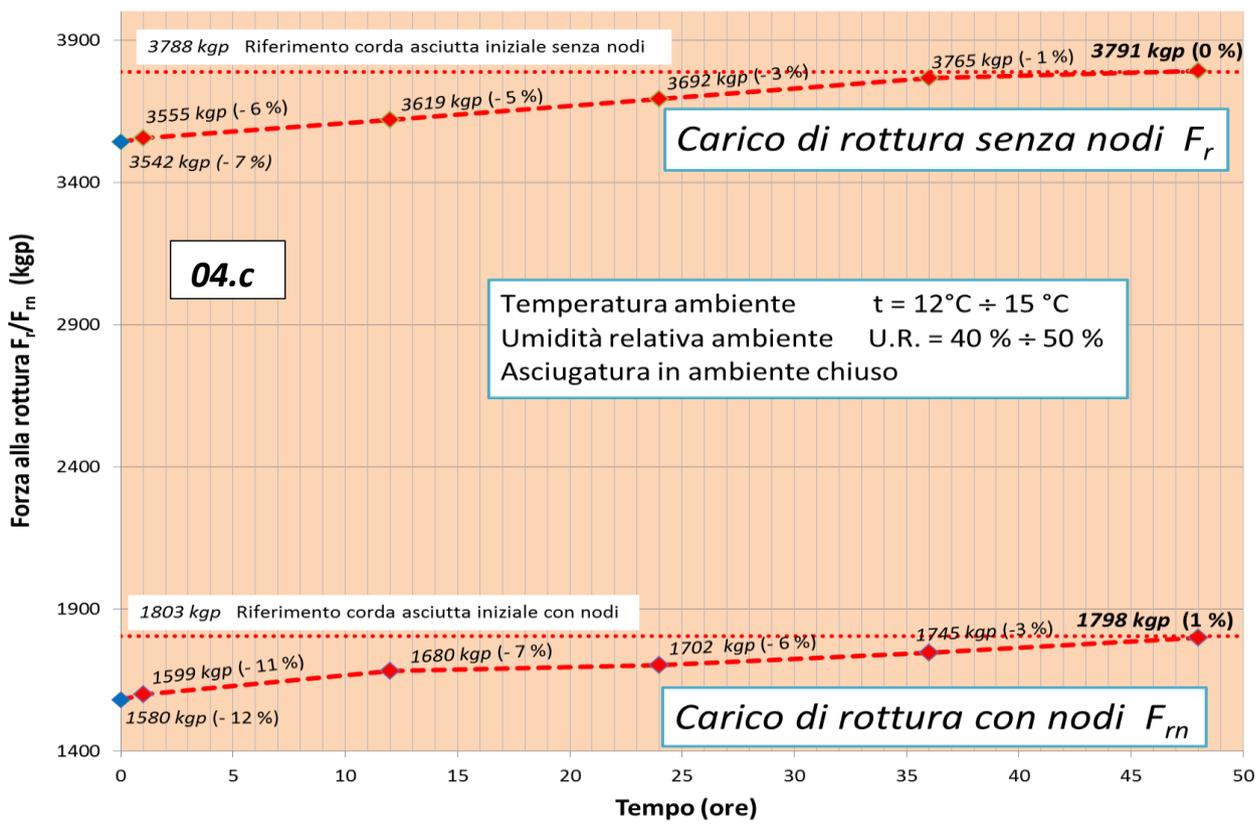
03.l		Cordino: Repetto Dyneema 5,5 mm Nuovo						Dyneema + Nylon 6.6 $d_e = 2,0 + 1,0$ mm						
$H_{(m)}$	n° Choc	$V_d (s^{-1})$	E_{GPa}	%c.attr.	$\Delta I_{tot(J)}$	%e.diss	$A_{0(m)}$	$\delta_{tempo (s)}$	δ_{gradi}	$\tan \delta$	η	$E' (GPa)$	$E'' (GPa)$	
0,10	1	0,45	23,38	0	321	89	0,134	0,014	17,9	0,372	0,326	22,449	7,255	
0,10	2	0,44	27,03	0	301	83	0,139	0,013		0,355	0,386	27,345	7,989	
0,10	3	0,44	34,89	0	289	69	0,141	0,012		0,293	0,467	34,534	9,345	

03.m		Cordino: Repetto Dyneema 8 mm Nuovo						Dyneema + Nylon 6.6 $d_e = 3 + 1,2$ mm						
$H_{(m)}$	n° Choc	$V_d (s^{-1})$	E_{GPa}	%c.attr.	$\Delta I_{tot(J)}$	%e.diss	$A_{0(m)}$	$\delta_{tempo (s)}$	δ_{gradi}	$\tan \delta$	η	$E' (GPa)$	$E'' (GPa)$	
0,10	1	0,45	12,43	5	301	96	0,119	0,013	20,3	0,369	0,162	11,902	4,393	
0,10	2	0,44	16,94	2	253	86	0,088	0,013	17,3	0,312	0,224	16,691	5,209	
0,10	3	0,44	22,11	0	256	77	0,085	0,012	15,7	0,281	0,291	23,665	6,656	
0,10	4	0,44	29,43	0	256	77	0,085	0,012	14,9	0,266	0,312	25,386	6,735	
0,10	5	0,44	29,53	0	228	70	0,067	0,013	16,0	0,265	0,437	27,435	9,406	

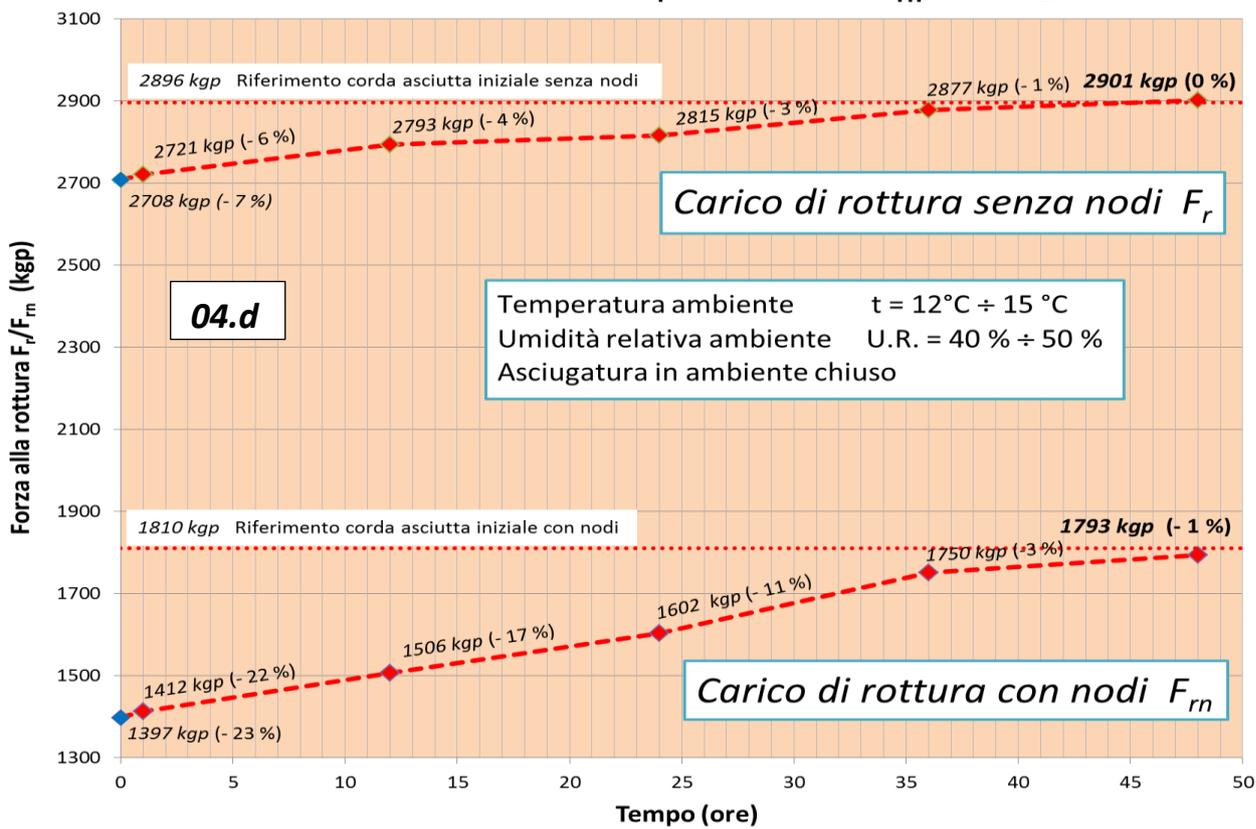
04) Grafici dei processi d'asciugatura delle corde sottoposte ai test di valutazione dell'effetto idrolisi



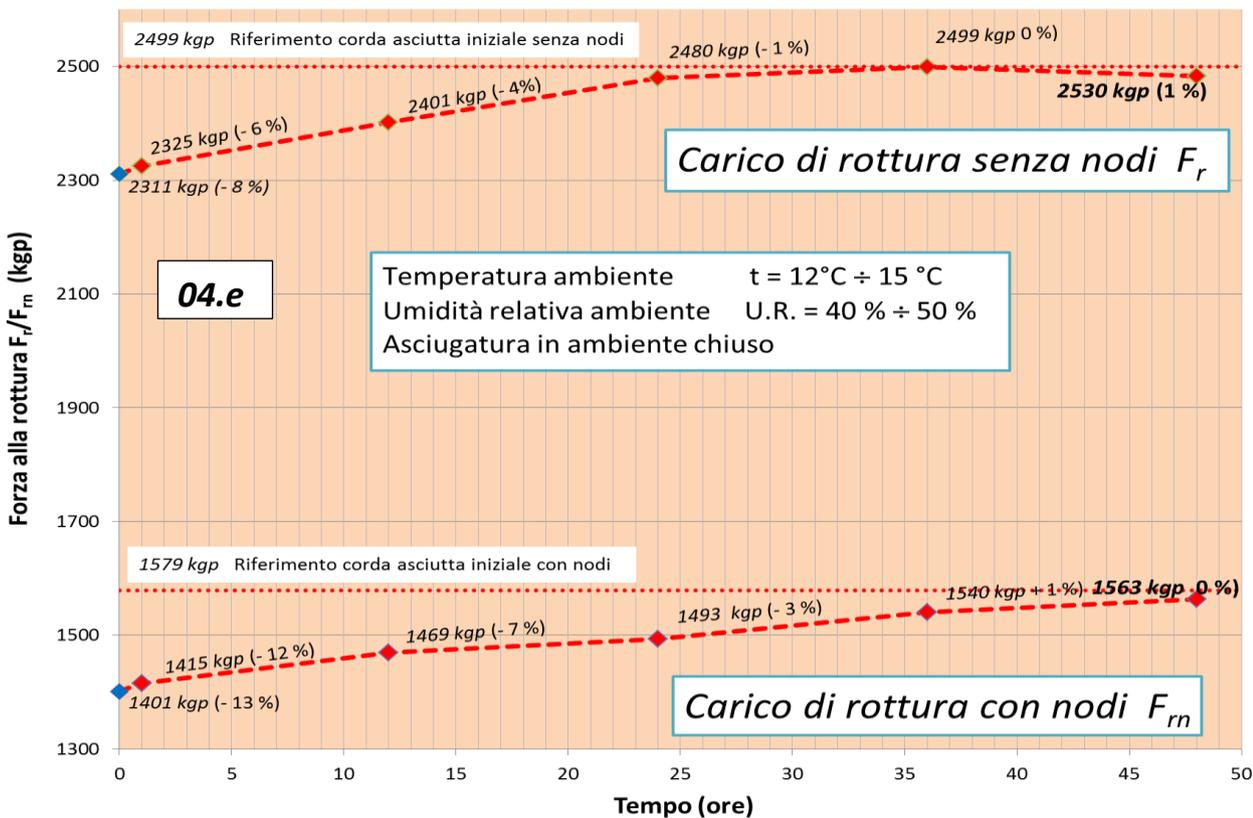
CORDA EDELRID STATIC LOW STRETCH 10,5 mm NUOVA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Asciugatura



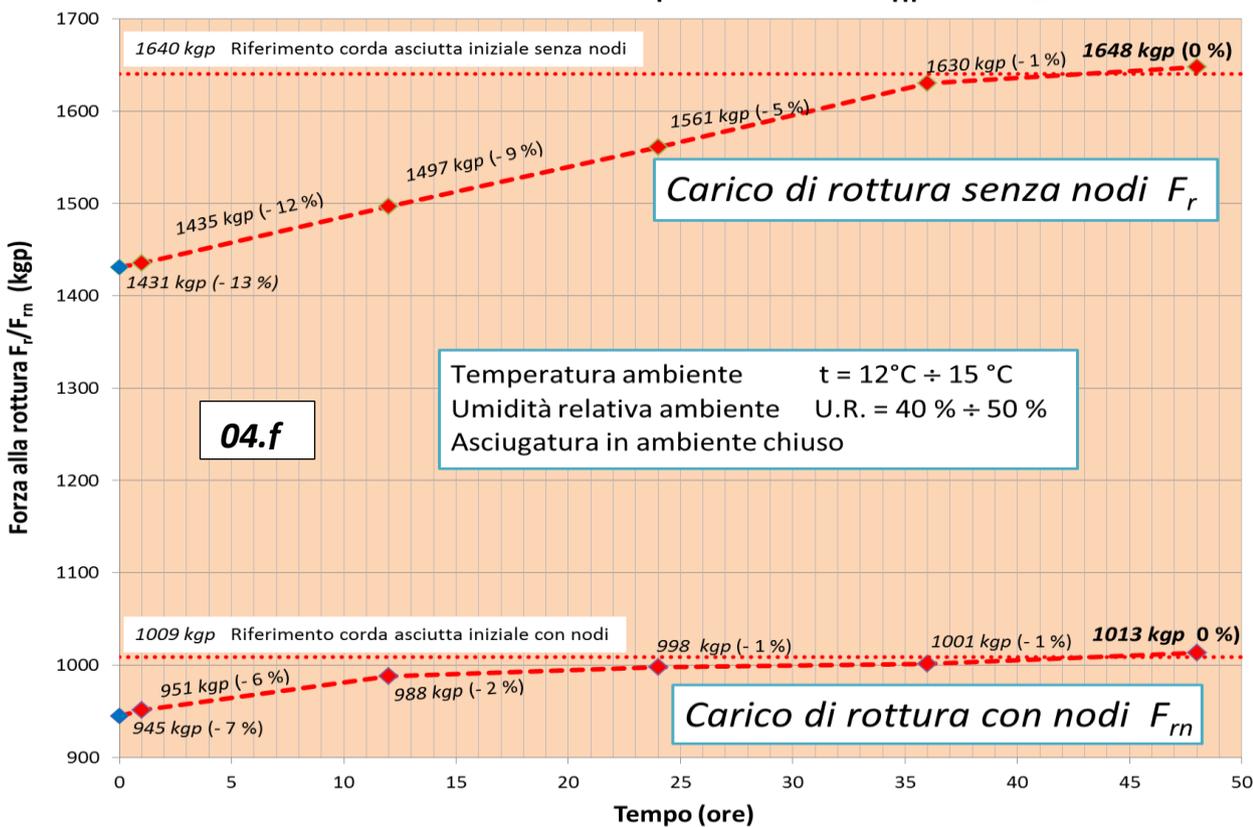
CORDA COUSIN TESTEC 10 mm NUOVA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Asciugatura



CORDA BEAL EDLINGER DINAMICA 9,8 mm NUOVA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Asciugatura



CORDA BEAL EDLINGER DINAMICA 9,8 mm USATA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi F_r e con nodi F_{rn} /Asciugatura



05) Calcolo della Superficie efficace S_e di una corda

Per diverse elaborazioni dei dati ottenuti nei test descritti in questo lavoro, in particolar modo per la valutazione della visco-elasticità dei materiali polimerici attraverso **l'Analisi Dinamico Meccanica non lineare**, occorre conoscere la **sezione trasversale effettiva** delle corde: la Sezione efficace S_e .

Calcolarla sulla base del diametro dichiarato dal costruttore è impossibile per l'anisotropia della Struttura Complessa della Corda (composta con la tessitura di circa 60.000 – 70.000 fili elementari a sezione circolare con diametro di circa 30 μm). Fra filo e filo molto spazio è vuoto, che non oppone alcuna resistenza alle sollecitazioni. Occorre misurare quindi la sezione, ideale, derivante dalla somma di tutte le sezioni trasversali dei fili elementari, sulla quale misurare le caratteristiche meccaniche della corda.

Quest'operazione non può essere eseguita materialmente per ovvie ragioni. Occorre determinare S_e attraverso relazioni che possano mettere a confronto caratteristiche numeriche ricavate su elementi isotropi del materiale polimerico che costituisce la corda con valori quantitativi ottenibili con l'intera struttura complessa della corda.

Questo collegamento è possibile fra il Carico di rottura senza nodi F_r della corda - evidentemente legato con **proporzionalità diretta** alla sola quantità di materiale polimerico che vi si oppone al cedimento, (**indipendentemente dal diametro e dal tipo d'intreccio dei fili elementari**) – e la Tenacità T caratteristica propria del filo elementare isotropo, detta anche Sforzo specifico alla rottura σ_{sr} .

Il primo è una Forza, la seconda è uno Sforzo che definisce una caratteristica meccanica per unità di misura della sezione trasversale del filo elementare: il collegamento base che permette di misurare la S_e attraverso il Carico di rottura senza nodi F_r . Da notare che entrambi i valori sono ricavati con trazione quasi-statica, senza interferenze derivanti dal tipo d'aggancio nel dinamometro (*pag. 22, Figura 9*) (*pag. 29, Figura 18*) e alla stessa velocità di trazione. La Tenacità è una caratteristica dei filati polimerici reperibile nei manuali specifici.

Per elaborare un metodo di calcolo della Superficie efficace S_e si trazione una corda, con agganci senza nodi, fino ad arrivare alla rottura con un valore di forza pari a F_r . Questo valore, come già detto, è direttamente proporzionale alla quantità di materiale polimerico che si oppone alla trazione (allungandosi), che numericamente può essere indicato dalla **somma di tutte le sezioni trasversali** dei fili elementari che compongono la struttura complessa (anisotropa) della corda, cioè la Superficie efficace S_e .

Alla rottura, dunque, vale la relazione[20] [29] [31]:

$$\sigma_r = F_r / S_e \quad (a)$$

dove:

$$\sigma_r = \text{Sforzo alla rottura (N/m}^2\text{)}$$

$$F_r = \text{Forza alla rottura (N)}$$

$$S_e = \text{Superficie efficace (m}^2\text{)}$$

Pertanto la Superficie efficace vale:

$$S_e = F_r / \sigma_r \quad (b)$$

Ma vale anche la relazione:

$$\sigma_s = \sigma / \rho \quad (c)$$

dove:

$\sigma_s =$ Sforzo specifico (Nm/g)

$\sigma =$ Sforzo (N/m²)

$\rho =$ Densità (g/m³)

Alla rottura della corda la **Relazione c** diventa:

$$\sigma_{sr} = \sigma_r / \rho \quad (d)$$

e quindi:

$$\sigma_r = \sigma_{sr} \cdot \rho \quad (e)$$

dove:

$\sigma_{sr} =$ Sforzo specifico alla rottura = Tenacità (N/Tex)

Dalla **Relazioni b** e dalla **Relazione e** si ottiene infine:

$$S_e = \frac{F_r}{\rho \cdot \sigma_{sr}} \quad (f)$$

La Tenacità σ_{sr} è una delle proprietà fondamentali che distingue i filati polimerici come il Nylon e può essere definita anche come la quantità di lavoro necessaria per portare alla rottura l'unità di massa del materiale isotropo testato:

$$\sigma_{sr} [N \cdot m \cdot g^{-1}] = \sigma_{sr} [J \cdot g^{-1}]$$

I suoi valori sono reperibili in letteratura e per il **Nylon 6** è uguale a **0,47 N/Tex**, per il **Nylon 6.6** è **0,64 N/Tex**, per il **Dyneema** è **2,80 N/Tex**, per il **Kevlar** è **2,03 N/Tex**.

Per poter esprimere la Superficie efficace in mm² occorre compilare la **Relazione f** con le seguenti unità di misura:

$$S_e = \frac{9,81 \cdot F_r (kgp)}{10^3 \cdot \rho (g/cm^3) \cdot \sigma_{sr} (N/Tex)}$$

Per il Diametro efficace, eseguiti i necessari sviluppi per trasformare la S_e in d_e , la compilazione è:

$$d_e = 2 \sqrt{\frac{9,81 \cdot F_r (kgp)}{10^3 \cdot \pi \cdot \rho (g/cm^3) \cdot \sigma_{sr} (N/Tex)}}$$

06) Valutazione della visco-elasticità e delle sue variazioni in un materiale polimerico isotropo: Esperimento di Creep, Analisi Dinamico Meccanica (DMA) Lineare e Non-lineare

06.a) Premessa - Per misurare il comportamento dei materiali polimerici isotropi nella composizione del materiale e nella geometria rispetto alla **visco-elasticità** (quindi **per ora, non una corda**) si possono utilizzare diversi metodi e strumenti; i più utilizzati sono quelli elencati nell'intestazione di questo Capitolo.



Figura A F. Salvatori

I campioni da utilizzare devono essere barre a sezione trasversale uniforme, tondini con diametro fisso e altri elementi dove sia possibile ricavare gli Sforzi σ ($\sigma = F/S$).

Il campione di materiale da testare deve essere del tipo rappresentato in **Figura A**, delle dimensioni che si vuole, purché isotropo, con Sezione **S** misurabile.

Anche un filo elementare di Nylon (**Figura B**), componente isotropo fondamentale, con diametro di alcuni micrometri μm , della Struttura Complessa di una corda speleo-alpinistica (**Figura C**).

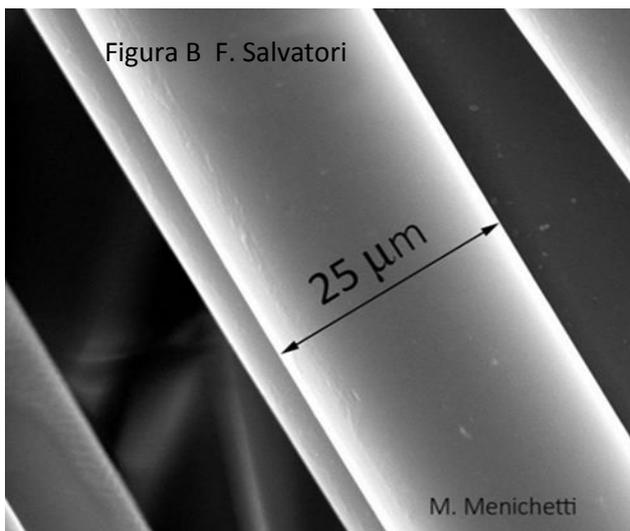


Figura B F. Salvatori

M. Menichetti

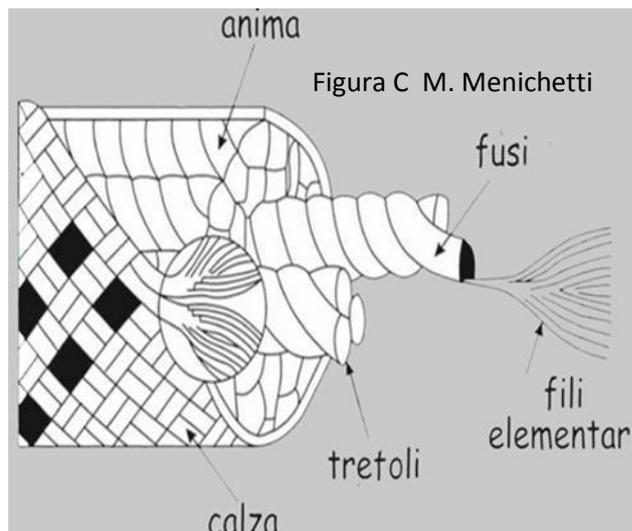


Figura C M. Menichetti

Nella **Figura D** la rappresentazione microscopica della distribuzione e conformazione delle catene di macromolecole nei fili elementari di Nylon: una loro porzione di sezione trasversale ne mostra l'organizzazione.

Le catene di macromolecole si dispongono a formare settori ben diversificati:

1. zone "cristalline", con una disposizione a file parallele regolari, dove agiscono legami intermolecolari forti a formare una struttura compatta predisposta a sopportare le deformazioni elastiche;
2. zone "amorfe", dove la sistemazione delle catene di macromolecole è più caotica e più atta a scorrimenti con attriti viscosi.

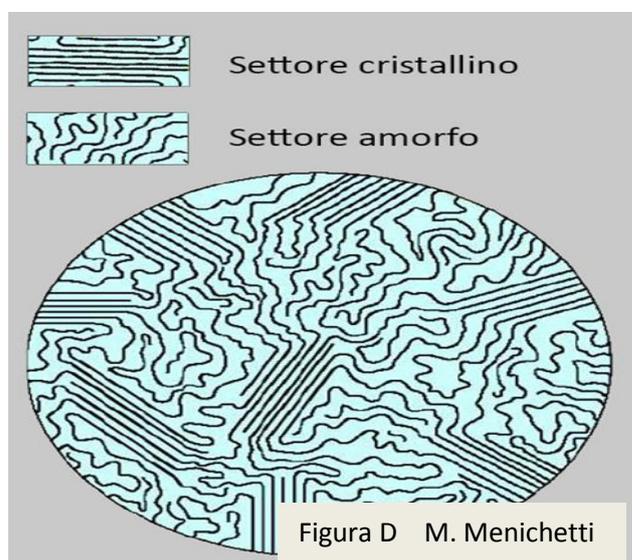


Figura D M. Menichetti

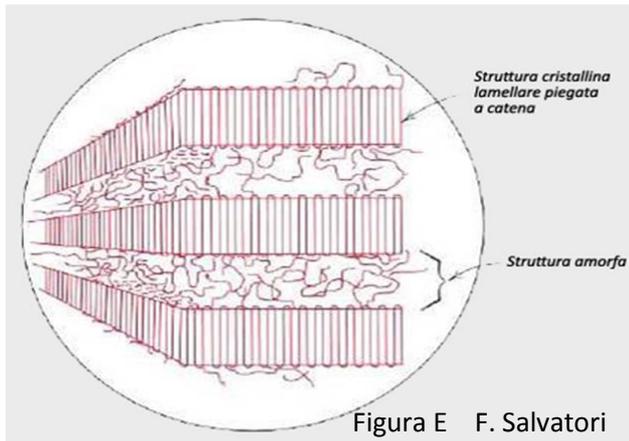


Figura E F. Salvatori

Nella **Figura E** è mostrata un'altra possibile configurazione (fra le tante individuate nei diversi tipi di polimeri) della disposizione delle catene polimeriche: struttura semi-cristallina a "biscotto", con livelli sovrapposti alternati di settori "cristallini" (dove prevalgono le deformazioni "elastiche") e "amorfi" (dove invece hanno il sopravvento le deformazioni "viscose").

Infatti la disposizione ordinata a "struttura cristallina lamellare piegata" favorisce la formazione di legami intermolecolari che rafforzano la struttura, predisponendola a deformazioni reversibili.

Mentre nei livelli "amorfi" l'agrovigliarsi caotico delle catene di macromolecole rende improbabile la formazione di legami intermolecolari e quindi le reazioni "elastiche". Sotto trazione infatti prevalgono le deformazioni permanenti (plastiche) legate alle modifiche dello sviluppo delle catene di macromolecole e allo scorrimento delle une sulle altre con attriti che dissipano energia in calore. Da qui l'origine della natura anche viscosa dei materiali polimerici.

Nella **Figura F** la rappresentazione di una catena di macromolecole (possono essere composte anche da un numero di monomeri superiore a 100.000), disposta a groviglio. Su questa struttura estremamente complessa (e difficilmente definibile) le sollecitazioni, veloci o lente che siano, producono uno stiramento reversibile, ma soprattutto irreversibile (si modificano gli orientamenti dei legami interatomici passando dalla **Posizione a** alla **Posizione c** e quindi alla **Posizione b**) e molti attriti responsabili di deformazioni viscose.

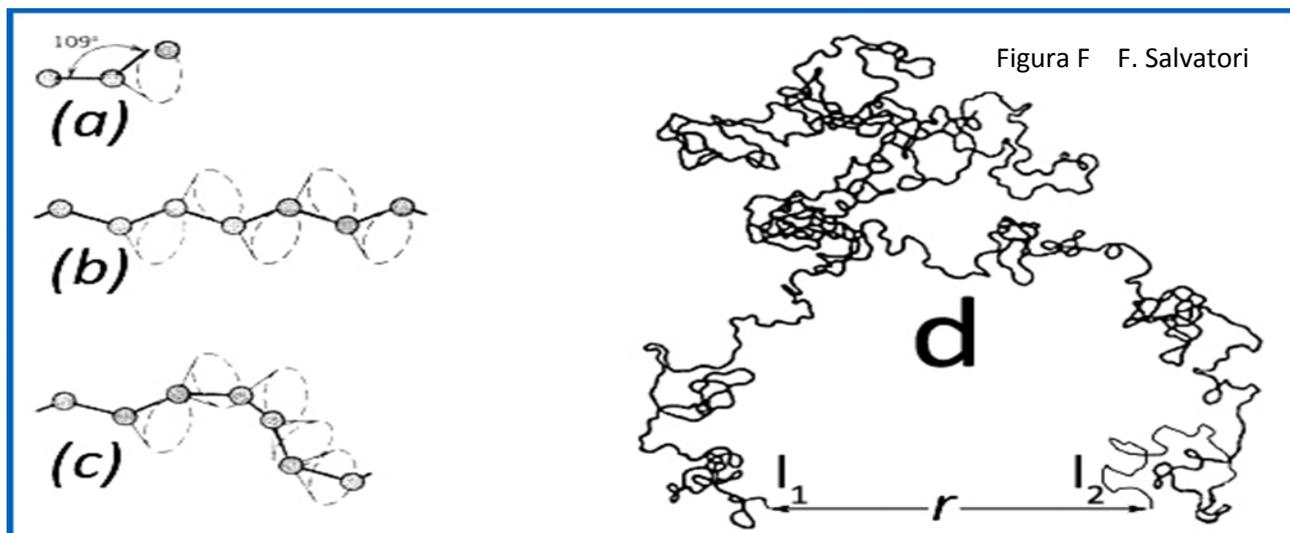


Figura F F. Salvatori

Questi sono solo alcuni esempi delle molteplici configurazioni che è possibile riscontrare nei materiali polimerici; comunque, in tutte sono presenti disposizioni che, sottoposte a sollecitazione, si modificano essenzialmente in due modi:

1. variano le lunghezze dei legami interatomici e intermolecolari, ma senza deformazioni permanenti, incidendo unicamente sulla **componente conservativa** elastica della visco-elasticità ;
2. si modificano gli sviluppi spaziali delle catene di macromolecole, con scorrimenti delle une sulle altre, con attriti e inerzie, andando a causare deformazioni permanenti viscose che provocano ritardi e dissipazione d'energia, andando a determinare la **componente dissipativa** viscosa.

Attraverso l'**Esperimento di Creep** (ma anche con l'**Analisi Dinamica Meccanica Lineare e Non-lineare**, esposte a seguire) è possibile misurare la visco-elasticità di un materiale polimerico e le sue variazioni al succedersi delle sollecitazioni. Valutazioni, anche quantitative, che danno un contributo importante nella conoscenza dei processi che portano al decadimento dei materiali polimerici come il Nylon e quindi alla decadenza delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche delle corde speleo-alpinistiche.

06.b) Teoria e sviluppo dell'Esperimento "Creep" su un materiale isotropo visco-elastico

- E' una sperimentazione di facile realizzazione, meno complessa della DMA: all'elemento da testare si applica una sola sollecitazione istantanea con Sforzo massimo σ_0 , mantenuto costante per un dato intervallo di tempo e poi annullato istantaneamente e portato di nuovo a Sforzo "zero" [1] [20] [21].

In pratica si tratta di appendere un dato Peso al campione in esame e misurarne poi le Deformazioni $\epsilon(t)$ in funzione del tempo (Figura G).

Dopo un certo tempo, togliere il peso, ma continuando a registrare le variazioni della Deformazione ϵ , che tende a diminuire fino ad assestarsi su un certo valore ϵ_{dp} (Deformazione permanente).

In tal modo si evidenziano le varie deformazioni della viscoelasticità in funzione del tempo (e i loro collegamenti con quanto accade con le variazioni dei legami fra atomi e fra molecole e con la dislocazione dei grovigli di catene polimeriche).

Con questo fenomeno di Creep la deformazione complessiva può essere considerata come la somma di tre componenti:

1. deformazione elastica istantanea ϵ_e , dovuta essenzialmente alla **distorsione dei legami** e/o alle **variazioni delle distanze intermolecolari** (questi meccanismi deformativi sono comuni a tutti i solidi, perché tutti i materiali esibiscono una componente elastica come risposta a una sollecitazione);
2. deformazione plastica differita nel tempo (o viscosa) in risposta all'applicazione del Peso, $\epsilon_v(t)$, dovuta a riarrangiamenti conformazionali a breve e medio raggio di segmenti della catena polimerica che possono aver luogo in presenza di altre macromolecole nel solido circostante; a causa degli attriti intermolecolari questi meccanismi non sono istantanei; la velocità con cui si attuano dipende dallo stato di aggregazione del materiale; essi comportano modifiche nella conformazione delle molecole e di conseguenza nel contenuto di entropia del sistema (produzione di calore), il cui valore è determinato dal livello della sollecitazione applicata e dalla struttura del materiale (il materiale deformato tende a orientarsi: per questo motivo la deformazione, inversa, $\epsilon_{rv}(t \rightarrow \infty)$ tende asintoticamente a un valore costante che equivale alla deformazione permanente);
3. deformazione plastica o viscosa, $\epsilon_{pl}(t)$, dovuta ad un riarrangiamento conformazionale delle macromolecole a lungo raggio, associato anche a moti diffusivi nello spazio circostante, tipici di questi processi; una peculiarità di questa componente della risposta è che essa non si instaura immediatamente ma solo a partire dal superamento di una certa soglia; la sua esatta natura è tutt'ora argomento di ricerca, anche se nella pratica si ritiene che essa possa essere descritta in termini di deformazione applicata; dal momento in cui questo meccanismo di deformazione si attiva esso dà luogo ad un contributo che, nel caso di sforzo costante, s'incrementa con velocità costante.

In Figura H è illustrato un grafico, tipico esempio di comportamento di un polimero isotropo al quale sia stato applicato un Esperimento Creep.

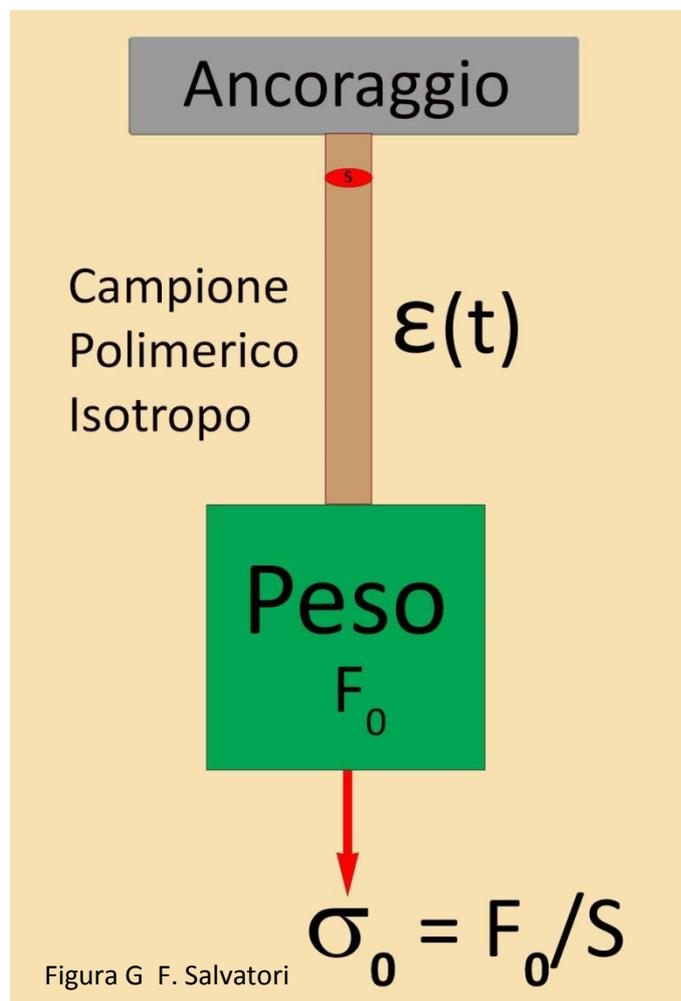
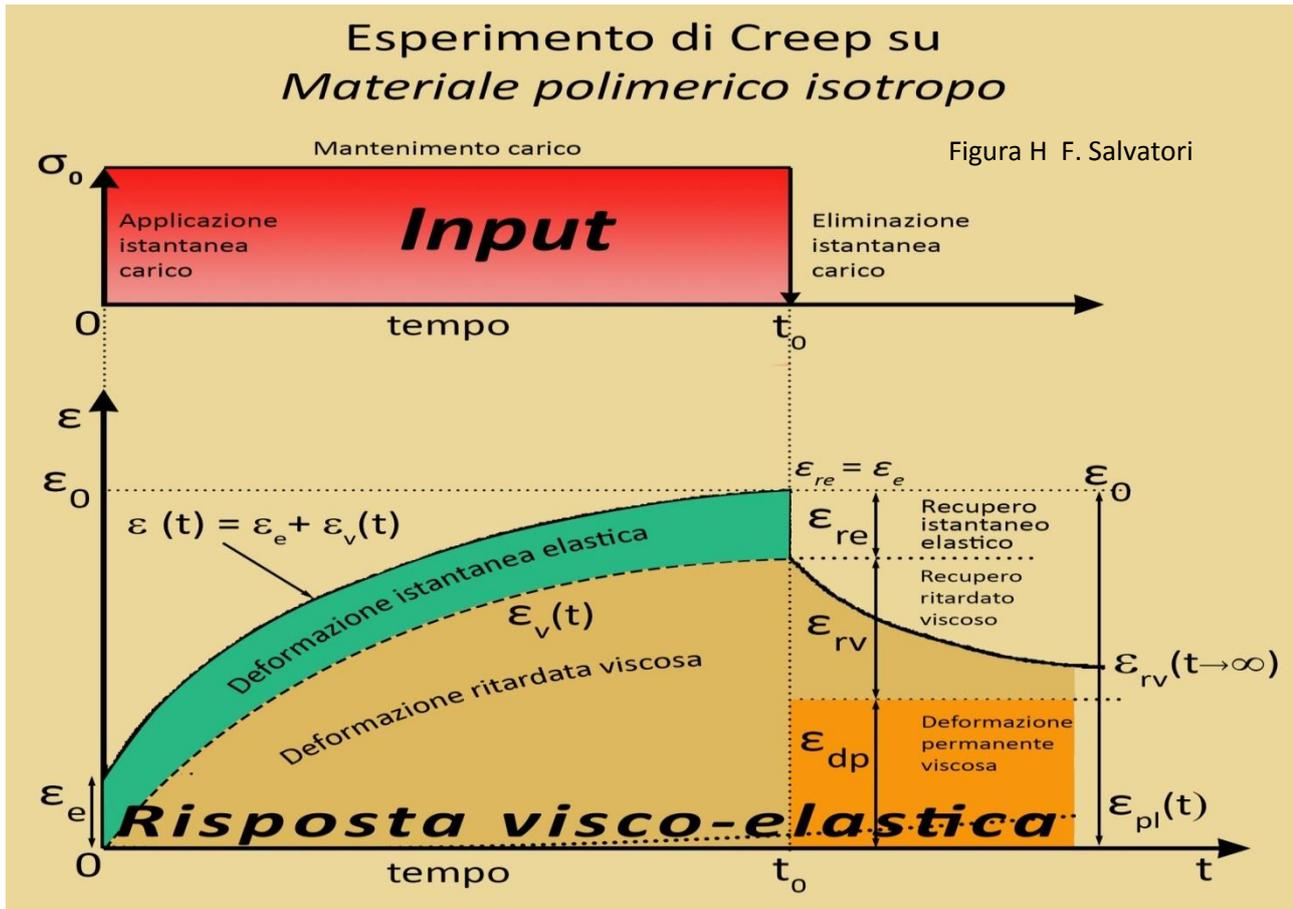


Figura G F. Salvatori



06.b.a) Primo passo - All'applicazione istantanea del carico σ_0 (Figura sovrastante) il Campione polimerico isotropo si allunga, sempre istantaneamente, fino a Deformazione ϵ_e , condizionato dai meccanismi atomico-molecolari indicati nel soprastante **Punto 1**. In questo tratto la curva $\sigma = E \cdot \epsilon$ è lineare e segue la Legge di Hook. Non c'è condizionamento dovuto al Tempo t .

06.b.b) Secondo passo - La Deformazione non ha più una progressione lineare ed entrano in gioco i movimenti fra macromolecole e catene di macromolecole, con produzione d'attriti e dissipazione d'energia sotto forma di calore: viene seguita la curva $\epsilon_v(t)$. La deformazione complessiva è data dalla curva $\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_v(t)$.

Al culmine della trazione quando si raggiunge la Deformazione massima ϵ_0 al tempo t_0 , si elimina il carico e immediatamente lo Sforzo si annulla. Il Tempo t_0 è una funzione delle caratteristiche delle catene di macromolecole e del loro modo di aggrovigliarsi (composizione chimica, massa molecolare, grado di reticolazione, cristallinità, ecc.), come a dire del tipo e del grado di viscosità.

06.b.c) Terzo passo - Tolto completamente, in modo istantaneo, il carico σ_0 , viene recuperata immediatamente la Deformazione elastica iniziale ϵ_e e comincia, senza soluzione di continuità, anche il recupero della Deformazione ritardata viscosa ϵ_{rv} , seguendo il percorso $\epsilon_{rv}(t \rightarrow \infty)$: è una curva che si avvicina asintoticamente al valore della Deformazione permanente viscosa ϵ_{dp} che è la parte di Deformazione ritardata viscosa legata agli attriti fra catene di macromolecole non più recuperabile, con l'energia irreversibilmente dissipata in calore. Anche questo passo è condizionato dalle caratteristiche atomico-molecolari delle catene polimeriche e del loro modo di rettificare i grovigli. Interviene anche la composizione chimica, la massa molecolare, il grado di reticolazione, la cristallinità, ecc. Come a dire l'insieme delle caratteristiche che costituiscono il tipo e il grado di viscosità.

Pertanto, in sintesi, fornito l'impulso, se poi si **rimuove il carico applicato**, la componente **plastica** della deformazione totale $\epsilon(t) = \epsilon_0$, non viene in alcun modo recuperata ed ha quindi carattere permanente.

Le deformazioni ϵ_e ed ϵ_{rv} , possono al contrario essere completamente recuperate, anche se in tempi diversi: **istantaneamente** quella elastica, **nel tempo** quella viscoelastica.

Per queste due componenti vi è dunque una reversibilità, almeno dal punto di vista meccanico. La reversibilità in senso termodinamico si ha invece per la sola componente elastica, per la quale si ha una completa restituzione dell'energia immagazzinata durante la sollecitazione.

06.c) Teoria e sviluppo dell'Analisi Dinamico Meccanica Lineare su un materiale isotropo visco-elastico – Un diverso, e più incisivo, metodo d'analisi per valutare gli effetti visco-elastici e le loro variazioni nel materiale polimerico si utilizza l'**Analisi Dinamico Meccanica Lineare**, nell'ipotesi che l'elemento sottoposto a test sia una barra isotropa con qualsiasi sezione trasversale uniforme [1] [20] [21] (quindi, per ora, non una corda, ma solo una sua componente).

A questa barra si applicano, tramite un apposito meccanismo dinamico motorizzato, degli impulsi a trazione con frequenza angolare costante ω e deformazione massima ε_0 : **ciclo d'isteresi imposto**.

L'impulso ritmico motorizzato in entrata è sinusoidale:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t) \quad a$$

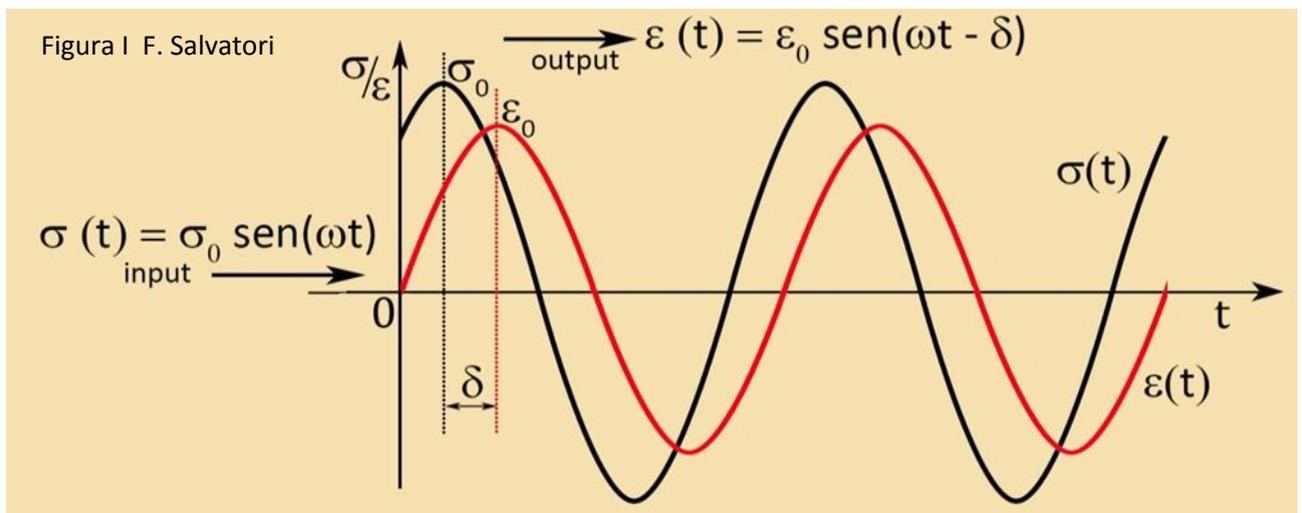
mentre la **risposta** sullo Sforzo σ applicato alla barra è:

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad b$$

cioè ancora una sinusoide con **Sforzo** massimo pari a σ_0 , la stessa **Frequenza angolare** ω e un **Ritardo di fase** δ ($0 \leq \delta \leq \pi / 2$) . Graficamente il **test DMA** lineare può essere rappresentato come in **Figura I**.

La presenza di uno **sfasamento** δ fra Sforzo massimo σ_0 e Deformazione massima ε_0 ha conseguenze molto importanti dal punto di vista energetico: una parte dell'energia immagazzinata con la sollecitazione "input" (**Relazione a**) durante ogni ciclo non viene restituita, ma è invece **dissipata** per effetto degli **atritti intermacomolecolari** tipici dei materiali visco-elastici.

Con $0 < \delta < \pi / 2$ si ha un comportamento intermedio tra quello di un solido isotropo **elastico**, per il quale la risposta sarebbe perfettamente "in fase" con $\delta = 0$, e quella di un materiale completamente viscoso, per cui si avrebbe una risposta puramente dissipativa, in quadratura di fase, caratterizzata da $\delta = \pi / 2$.



06.c.a) Modulo complesso, Modulo conservativo, Modulo dissipativo e Fattore di perdita – L'ultima osservazione del Comma precedente permette di rappresentare lo **Sforzo a trazione come somma di due componenti**, una elastica e l'altra viscosa. A tal scopo la **Relazione b** si può riscrivere, sfruttando la formula d'addizione del seno, come:

$$\sigma = \sigma_0 \cos\delta \text{sen}\omega t + \sigma_0 \text{sen}\delta \cos\omega t \quad c$$

o anche dividendo per la Deformazione massima ε_0 :

$$\sigma/\varepsilon_0 = E' \text{sen}\omega t + E'' \cos\omega t \quad d$$

dove E' ed E'' hanno le dimensioni di un Modulo e sono detti, rispettivamente, **Modulo elastico** (o conservativo) e **Modulo dissipativo** (o viscoso) e sono definiti dalle relazioni:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta = \text{Modulo elastico o conservativo} \quad e$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta = \text{Modulo dissipativo o viscoso} \quad f$$

dove:

$$\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = E^* = \text{Modulo complesso} \quad g$$

La **Relazione g** definisce il **Modulo complesso**, cioè la base su cui impostare la suddivisione delle deformazioni elastiche (conservative) e dissipative (viscose) ed è una caratteristica dipendente dalle proprietà meccaniche del materiale in esame e dai parametri sperimentali iniziali.

La **Relazione e** indica quale parte dell'energia fornita dall'input (**Relazione a**) viene accumulata nel campione testato per poi essere restituita in forma cinetica (deformazioni reversibili). E' legata alle deformazioni elastiche dei legami fra atomi e molecole delle catene di polimeri dei fili elementari.

La **Relazione f** quantifica la parte d'energia che viene dissipata per gli attriti che si sviluppano contro la sollecitazione data dall'input (**Relazione a**), perdendosi in calore (aumenta l'Entropia del sistema), e/o attraverso le deformazioni permanenti nei fili elementari.

Di significato rilevante è il rapporto:

$$E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita} \quad h$$

che misura, al succedersi dei cicli d'isteresi, la prevalenza della variazione della componente dissipativa viscosa nel materiale in rapporto alla variazione della componente elastica conservativa. La sua importanza risiede nel fatto che quantizza una delle cause preponderanti dell'usura dei materiali polimerici (i fili elementari che compongono le corde speleo-alpinistiche).

In altri termini, la conoscenza della sua entità, ciclo dopo ciclo, permette di valutare l'energia dissipata dall'unità di volume di materiale durante un ciclo dell'isteresi.

06.c.b) Cedevolezza complessa, Cedevolezza conservativa, Cedevolezza dissipativa e Fattore di perdita - Se la DMA viene interpretata simmetricamente, partendo dall'input dato dallo Sforzo σ anziché dalla Deformazione ε , lo sviluppo porta alla quantificazione di un nuovo parametro: la **Cedevolezza** (o duttilità o deformabilità).

Il nuovo sviluppo parte, dunque, da:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad i$$

e la risposta avviene in termini di Deformazione ε della barra:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad l$$

Anche in questo caso, il nuovo presupposto permette di rappresentare lo **Sforzo a trazione come somma di due componenti**, una elastica e l'altra viscosa. Con questa ottica la **Relazione b** si può riscrivere, sfruttando la formula d'addizione del seno, come:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \delta \sin \omega t + \varepsilon_0 \sin \delta \cos \omega t \quad m$$

o anche, dividendo per la Deformazione massima ε_0 :

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = D' \sin \omega t + D'' \cos \omega t \quad n$$

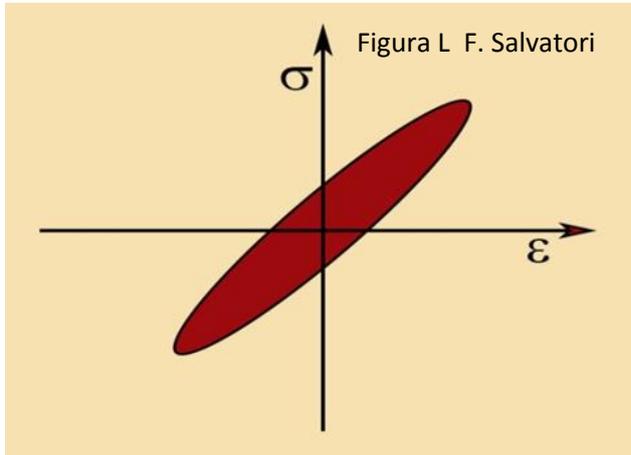
dove D' ed D'' hanno le dimensioni di un Modulo e sono detti, rispettivamente, **Cedevolezza conservativa** (elastica) e **Cedevolezza dissipativa** (viscosa) e sono definiti dalle relazioni:

$$D' = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \cos \delta = \text{Cedevolezza conservativa} \quad o$$

$$D'' = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \sin \delta = \text{Cedevolezza dissipativa} \quad p$$

dove:

$$\frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} = D^* = \text{Cedevolezza complessa} \quad q$$



Come in precedenza per la **Relazione g**, l'equivalente **Relazione q** definisce la base su cui impostare la suddivisione delle deformazioni elastiche (conservative) e dissipative (viscose) ed è una caratteristica del materiale polimerico sottoposto a test e dei parametri sperimentali iniziali.

La **Relazione o** indica, in termini inversi rispetto al Modulo d'elasticità, quanta parte dell'energia fornita dall'input (**Relazione i**) viene data al fine di aumentare la Cedevolezza conservativa nel campione testato. È legata alle deformazioni elastiche dei legami fra atomi e molecole delle catene di polimeri dei fili elementari.

La **Relazione p** quantifica la parte d'energia data dall'input (**Relazione i**) utilizzata per ridurre la Cedevolezza dissipativa.

Mentre la **Relazione o** misura la parte d'energia data dall'input (**Relazione i**) utilizzata per produrre la Cedevolezza conservativa.

Fra **Moduli di elasticità** e **Cedevolezze** vale la relazione:

$$D''/D' = E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita} \quad r$$

Un elevato valore di **tan δ** indica la presenza di una componente dissipativa importante nella risposta del materiale. La conoscenza della sua entità permette di valutare **l'energia dissipata dall'unità di volume di materiale durante un ciclo d'isteresi**, per una data sollecitazione applicata, indicata con $\Delta E_{\text{dissipazione}}$ (valore che di fatto può essere correlato al decadimento di una corda speleo-alpinistica per **perdita di deformabilità**).

06.c.c) Energia (e potenza) in gioco nei cicli d'isteresi - Quest'energia (lavoro) $\Delta E_{\text{dissipazione}}$ è calcolabile attraverso la relazione:

$$\Delta E_{\text{dissipazione}} = \pi \sigma_0^2 D'' = \pi \varepsilon_0^2 E'' \quad s$$

Questo valore, è proporzionale alla componente dissipativa della funzione visco-elastica che descrive la risposta ed è equivalente all'area indicata in **Figura L**, dove è mostrato l'andamento di Sforzo e Deformazione durante un singolo ciclo d'isteresi in presenza di una sollecitazione di tipo sinusoidale.

L'area ellittica evidenziata rappresenta, come già detto, l'energia dissipata per unità di volume del materiale testato ed è espressa in Pascal (**Pa**) (unità di pressione).

Per ottenere la quantità totale d'energia dissipata occorre moltiplicare per il Volume totale del campione, ottenendo in tal modo un valore espresso in **Joule (J)**.

Dalla **Relazione s**, moltiplicando per la Frequenza d'oscillazione angolare ω si ottiene la Potenza dissipata, sempre per unità di volume:

$$P_{\text{dissipazione}} = \frac{1}{2} \omega \sigma_0^2 D'' = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0^2 E'' \quad t$$

06.c.d) Coefficiente di viscosità η del materiale polimerico - E' un valore che misura il grado di viscosità del materiale polimerico isotropo sottoposto a test e si ricava dalla relazione:

$$\eta = E'' \cdot \omega = \text{coefficiente di viscosità} \quad u$$

Il coefficiente di viscosità è espresso in **Pa · s** (Pascal per secondi).

E' un parametro di notevole rilievo, attraverso il quale è possibile valutare la **viscosità pura** del materiale, quella che produce una deformabilità che, unica fra tutte, si attua in funzione del tempo. Conoscerlo permette, indirettamente, di valutare la deformabilità legata alla sola elasticità reversibile.

06.d) Teoria e sviluppo dell'Analisi Dinamico Meccanica Non-lineare su un materiale visco-elastico con test a caduta di un peso – In questo caso [20] l'input è un'unica sollecitazione (pag. 44 e seg.) e la risposta visco-elastica sono sempre delle **curve con andamento sinusoidale** (pag. 46, **Figura 38**) sia per la funzione della variazione degli Sforzi $\sigma = f(t)$ che per quella del progredire delle deformazioni $\varepsilon = f(t)$, come impone la teoria **dell'Oscillazioni Armoniche Semplici** [35].

Il fatto che la dinamicità del test provenga da un solo impulso dovuto alla trasformazione d'energia potenziale in energia cinetica (per esempio, test a caduta di un peso):

$$\Delta E_{\text{potenziale}} = \Delta E_{\text{cinetica}} = (h + A^0) \cdot P$$

dove:

P = peso in caduta libera (kgp)

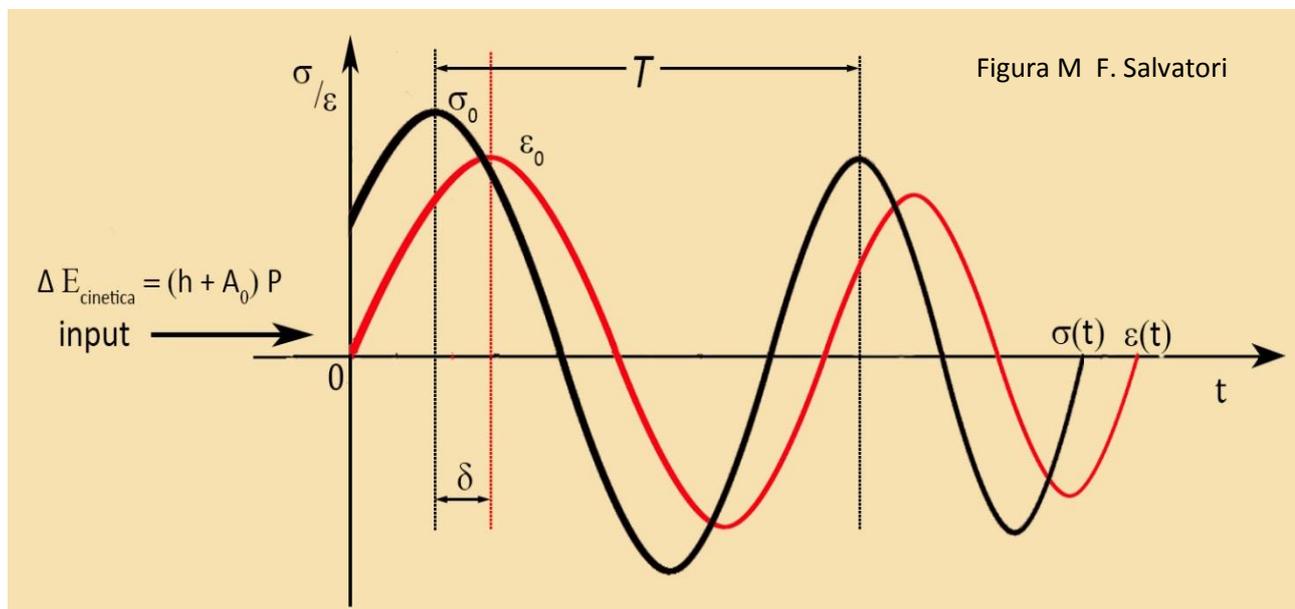
h = altezza di caduta libera del peso

A^0 = allungamento massimo del campione

non permette di produrre una serie di cicli uguali, ma piuttosto una successione di cicli con input che vanno esaurendo l'energia: a ogni allungamento il campione riduce la sua deformabilità, per le modifiche permanenti che via via accumula, e le porzioni d'energia che vengano dissipate.

Si verifica uno sviluppo, definito test d'**Analisi Dinamico Meccanica Non – lineare**, la cui rappresentazione grafica è riportata in **Figura M**: le ampiezze massime σ_0 e ε_0 vanno gradualmente riducendosi. La Frequenza angolare ω (e quindi il Periodo T) sono comunque rilevabili utilizzando i primi due cicli d'isteresi

Nella **Figura I** è rilevabile anche il ritardo di tempo δ , parametro fondamentale per misurare il grado di viscosità e le sue variazioni per effetto dei vari tipi di usura, come descritte nel precedente **Paragrafo 06.c** (pag. 309) [1] [20] [21].



06.d.a) Impostazioni teoriche ed elaborazioni matematiche analoghe a quelle della DMA Lineare – Evidenze sperimentali e correttivi teorici [21] [22] mostrano che quanto impostato ed elaborato per la **DMA Lineare** può essere utilizzato anche per la **DMA Non-lineare**: le **indicazioni sostanziali** che ne scaturiscono sono **valide in entrambi i casi**, ma le **valutazioni quantitative** peccano di **un'impresione di minima** entità che **non inficia la validità delle conclusioni tratte** sulla visco-elasticità dei materiali testati e le sue variazioni in funzione delle sollecitazioni e delle condizioni esterne applicate.

I dati ricavati con la **DMA Non-lineare** devono essere utilizzati con la consapevolezza che possono contenere un minimo grado di approssimazione quantitativa, ma mantengono integralmente la validità delle conclusioni tratte sull'andamento e la dislocazione dei diagrammi ottenuti.

06.d.b) Sintesi dell'elaborazione dei Moduli, del Fattore di perdita e delle Relazioni per il calcolo dell'Energia e della Potenza in gioco nella DMA Non-lineare – Quanto è stato ricavato nei precedenti **Commi 06.c.a – 06.c.b. – 06.c.c. – 06.c.d** (*pag. 309 e seg.*), ancora valido per la DMA Non-lineare, è:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta = \text{Modulo elastico o conservativo} \quad e$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta = \text{Modulo dissipativo o viscoso} \quad f$$

dove:

$$\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = E^* = \text{Modulo complesso} \quad g$$

$$E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita} \quad h$$

$$\Delta E_{\text{dissipazione}} = \pi \sigma_0^2 D'' = \pi \varepsilon_0^2 E'' \quad s$$

$$P_{\text{dissipazione}} = \frac{1}{2} \omega \sigma_0^2 D'' = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0^2 E'' \quad t$$

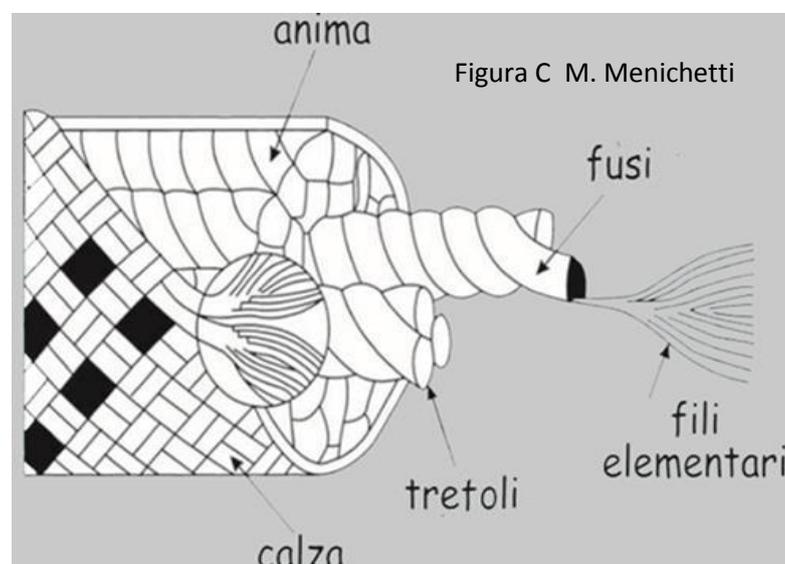
$$\eta = E'' \cdot \omega = \text{coefficiente di viscosità} \quad u$$

07) L'Esperimento di Creep su una Corda speleo-alpinistica: valutazione dei diversi aspetti della sua deformabilità

07.a) Premessa - Se nel precedente Capitolo sono stati trattati aspetti legati a situazioni più teoriche che reali, difficilmente riferibili alla situazione di una corda per speleologia e alpinismo, ora si scende più nel concreto, all'esame di una vera e propria corda speleo-alpinistica: un materiale anisotropo dal punto di vista della sua struttura geometrica, con molti spazi vuoti fra gli elementi isotropi – i fili elementari di poliammide – che la compongono. In ciò si differenzia nettamente dai materiali isotropi trattati nei precedenti paragrafi.

07.b) Le corde speleo-alpinistiche sono elementi anisotropi geometricamente - Una corda per speleologia e alpinismo (e torrentismo) è raffigurabile come in **Figura C** (già presentata in precedenza a pag. 28).

Il loro confezionamento utilizza dei fili elementari di poliammide (in genere) che vengono intrecciati a formare dei **fusi**, poi dei **trefoli** inglobati in una **calza** tessuta intrecciando fasci di fibre.



Nell'insieme di una corda possono essere interessati fino a 70.000 fili elementari uguali del diametro di circa **30 μm** , a costituire un elemento anisotropo geometricamente, con molti spazi vuoti al suo interno e nella stessa calza.

Ad aumentare la complessità della struttura delle corde speleo-alpinistiche concorre anche il fatto che le configurazioni complessive possibili possono essere le più disparate e che la tensione con cui vengono confezionate può essere più o meno elevata.

Di conseguenza la deformabilità sotto sollecitazione di queste corde è

condizionata anche dalla disposizione delle varie componenti, dal loro modo d'intreccio e dalla tensione con cui sono state confezionate.

Pertanto, per giungere ad acquisire le necessarie conoscenze sulle **corde speleo-alpinistiche** (l'attrezzo più importante e al tempo stesso più delicato della "catena di sicurezza" della progressione speleologica) occorre elaborare un'analisi specifica che, basandosi su quanto descritto nei precedenti **Paragrafi 06.b – 06.c – 06.d** (pag. 307 e seg.), tenga conto di ogni loro tipo di deformabilità, tanto legata alla struttura complessa della tessitura (anisotropa) che alla viscoelasticità del materiale (in genere poliammide, Nylon 6 e Nylon 66, isotropa).

Si valuta soprattutto la visco-elasticità (e le sue variazioni) legata ai fili elementari che confezionano le corde, ma, indirettamente, si quantizza anche l'apporto della Compattazione della sua Struttura Complessa (CSCC). Il tutto in funzione dell'entità energetica dell'impulso dato; ma soprattutto della velocità con cui si sviluppa la conseguente trazione, definita come **Velocità di deformazione V_d** (pag. 40, **Figura 30**; pag. 52, **Figura 41**).

07.c) La deformabilità complessiva di una corda speleo-alpinistica - Una corda speleo-alpinistica ha dunque una deformabilità, sotto sollecitazioni a caduta o trazione, continua o ciclica, che è in funzione della:

1. **Compattazione** della sua **Struttura Complessa (CSCC)**, **indipendente** dal tempo **t** ,
2. **Visco-elasticità del materiale isotropo polimerico che costituisce i fili elementari** con i quali è stata confezionata, in **gran parte dipendente** dal tempo **t** .

07.d) Esperimento di Creep su corda speleo-alpinistica - Le modalità di sperimentazione sono le stesse applicate nel test analogo descritto nel precedente **Paragrafo 06.b** (pag. 307 e seg.); unica differenza è che il campione è costituito da una corda speleo-alpinistica, agganciata all'ancoraggio e al peso **senza la presenza di nodi** (ipotesi teorica non applicabile in pratica ma comunque realizzabile sulla base di quanto definito a pag. 42 e seg.).

Anche qui si applica all'elemento da testare una sola sollecitazione, istantanea, con Sforzo massimo σ_0 . Carico che viene mantenuto costante per un dato intervallo di tempo e poi rilasciarlo istantaneamente e portato di nuovo a Sforzo "zero" [1] [20] [21].

In pratica si tratta di appendere un dato Peso al campione in esame e misurarne poi le Deformazioni $\epsilon(t)$ in funzione del tempo (**Figura N**).

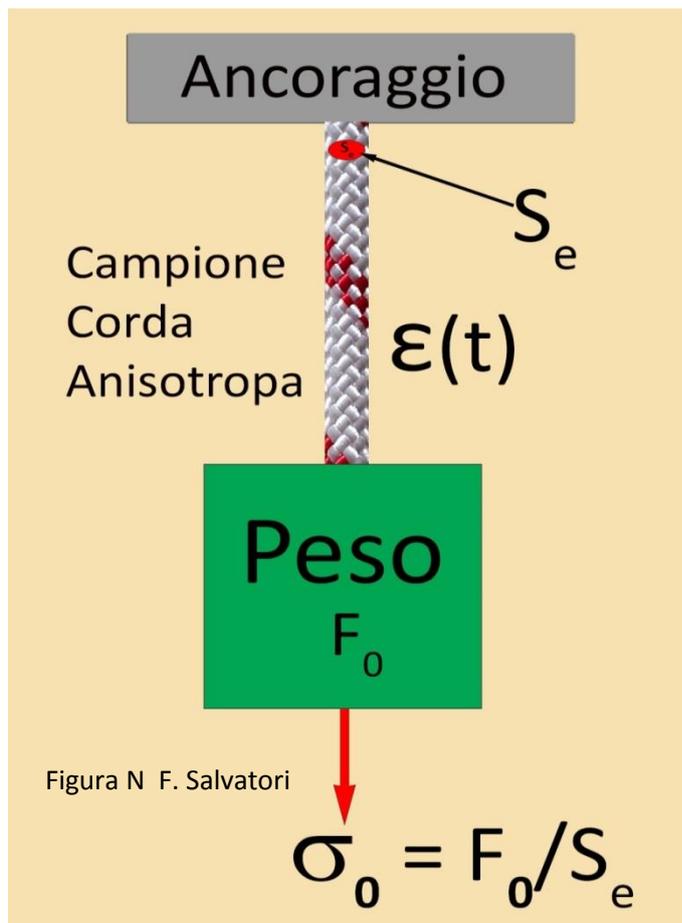


Figura N F. Salvatori

Dopo un certo tempo, togliere il peso, ma continuando a registrare le variazioni della Deformazione ϵ , finché la Deformazione non s'assesta su un valore (che in teoria dovrebbe raggiungersi solo a un Tempo infinito T_∞).

In tal modo si evidenziano le varie deformazioni dovute alla Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC) e alla Visco-elasticità (e ai suoi collegamenti con quanto accade con le variazioni dei legami fra atomi e fra molecole e con la dislocazione dei grovigli di catene polimeriche) in funzione del tempo.

Quanto accade alla Deformazione complessiva ϵ è la somma di varie deformazioni, alcune legate alla CSCC, altre alla Visco-elasticità dei fili elementari. Le prime si manifestano istantaneamente, non essendo soggette a ritardi di Tempo; le seconde sono in parte istantanee (elastiche) e in parte con ritardi nel Tempo d'attuazione causati da attriti nel districarsi dei grovigli di catene di macromolecole polimeriche (viscosità, con energia dissipata in calore).

Di fatto, siamo in una situazione del tutto simile a quella presentata in **Figura H** (pag. 308), con la

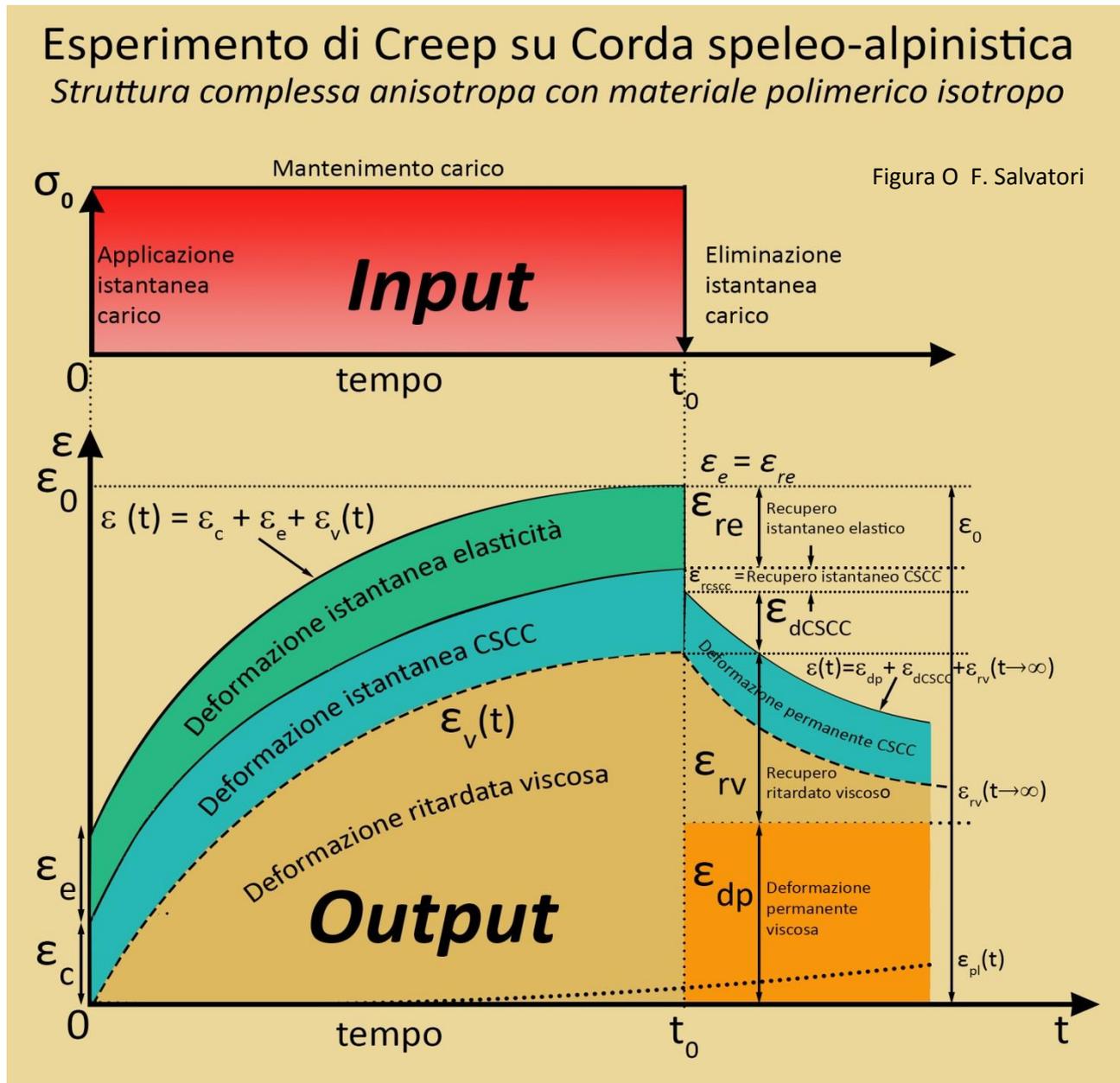
sola diversità che occorre aggiungere le deformazioni proprie della CSCC.

Nella **Figura O** sono rappresentati tutti i passi della curva $\epsilon = f(t)$, dal momento della sospensione del carico a quando questi viene tolto, ma continuando a rilevare anche dopo, fino al completamento dei recuperi viscosi. Ora, quindi, esaminiamo, passo a passo, l'evolversi del fenomeno di Creep, indicando le diverse componenti della deformazione totale e le relazioni con quanto avviene a livello atomico-molecolare nei fili elementari.

07.d.a) Primo passo - All'applicazione istantanea del carico σ_0 (**Figura N**) la Corda s'allunga, istantaneamente, fino alla Deformazione $\epsilon_c + \epsilon_e$, conseguenza della CSCC e ai legami interatomici e intermolecolari delle catene di macromolecole polimeriche che sotto sollecitazione si flettono e s'allungano, dando origine a deformazioni elastiche reversibili (tolto il carico, tornano esattamente nella posizione occupata in precedenza).

Per la CSCC la situazione è diversa. La compattazione sotto carico è da ritenersi immediata, senza ritardi, dato il livello trascurabile di attriti che comporta (fatto verificato sperimentalmente attraverso la valutazione della produzione di calore, che risulta irrisoria). Ma non è una **deformabilità completamente irreversibile**: la

compattazione della strutturazione di calza + anima, che si manifesta soprattutto in termini di pressione piuttosto che di forze d'attrito che si oppongono, permette un recupero dell'allungamento solo parziale. Recupero che però avviene sempre senza ritardi di tempo, contestualmente alla sottrazione totale istantanea del carico σ_0 al tempo $T_0 = 0$. Resta dunque una deformazione permanente della CSCC (alla successiva sollecitazione un'altra porzione di deformabilità dovuta alla CSCC si perde, e così via se si verificano altre sollecitazioni; la CSCC è una deformabilità che si esaurisce rapidamente con le prime fasi dell'applicazione dei carichi).



Nel tratto iniziale la curva $\sigma = E \cdot \epsilon$ è lineare e segue la Legge di Hook. Non c'è, quindi, condizionamento dovuto al Tempo t .

07.d.b) Secondo passo - La Deformazione non ha più una progressione lineare ed entrano in gioco i movimenti fra macromolecole e catene di macromolecole, con produzione d'attriti e dissipazione d'energia sotto forma di calore: viene seguita la curva $\epsilon_v(t)$ e la deformazione complessiva è data dalla curva $\epsilon(t) = \epsilon_c + \epsilon_e + \epsilon_v(t)$, dove:

ϵ_c = deformazione istantanea iniziale dovuta alla CSCC

ϵ_e = deformazione istantanea elastica iniziale dovuta al materiale polimerico

$\epsilon_v(t)$ = funzione della deformazione viscosa che aumenta di valore in dipendenza di T_0 .

07.d.c) Terzo passo - Al culmine della trazione - prodotta con la sospensione del Peso e raggiungendo la Deformazione massima ϵ_0 al tempo t_0 - si elimina in modo subitaneo il carico e immediatamente lo Sforzo si annulla e il campione di **corda si ritrae**: in parte immediatamente e in parte in dipendenza del Tempo (come sotto trazione gli attriti creano un ritardo nell'allungamento, così accade in contrazione: è la viscosità).

La contrazione immediata è la somma di due effetti:

1. il recupero istantaneo elastico della visco-elasticità dei fili elementari ϵ_{re} ,
2. il recupero istantaneo della Compattazione della Struttura Complessa della corda ϵ_{csc} .

Quest'ultimo recupero è solo parziale rispetto a quanto la CSCC ha contribuito ad assorbire l'energia della trazione: una parte di questa deformazione ϵ_{dcsc} è permanente, prodottasi contestualmente alla trazione istantanea.

La contrazione ritardata ϵ_{rv} legata alla viscosità del materiale polimerico è una funzione del Tempo $\epsilon_{rv} = f(t)$ con $t_0 \geq t \geq \infty$. Naturalmente il raggiungimento del punto all'infinito è un'ipotesi teorica: oltre un certo tempo (in genere, con le corde speleo-alpinistiche, di poche decine di minuti) la contrazione diviene impercettibile e trascurabile.

Anche in questo caso, come per la CSCC, la Deformazione ritardata viscosa ne produce una porzione permanente, irreversibile ϵ_{dp} (Deformazione permanente viscosa).

07.d.d) Quarto passo - Dal tempo t_0 in avanti la Curva che descrive la contrazione in funzione del tempo è data da:

$$\epsilon(t) = \epsilon_{dp} + \epsilon_{dcsc} + \epsilon_{rv}(t \rightarrow \infty) \quad v$$

L'avvicinamento all'annullamento di ϵ_{rv} è asintotico.

Anche questo passo è condizionato dalle caratteristiche atomico-molecolari delle catene polimeriche e del loro modo di modificare l'aggrovigliamento delle catene polimeriche (interviene anche la composizione chimica, la massa molecolare, il grado di reticolazione, la cristallinità, ecc.). Come a dire l'insieme delle caratteristiche che costituiscono il tipo e il grado di viscosità. Ma con l'aggiunta delle deformazioni aggiuntive dovute alla Compattazione della Struttura Complessa della Corda.

Se si ripettesse l'Esperimento di Creep sullo stesso campione di corda si ripeterebbe lo stesso andamento della Curva $\epsilon(t)$. Ma tutti i tipi di deformazioni, reversibili e permanenti, risulterebbero di minor entità. Soprattutto per la CSCC l'evoluzione verso l'annullamento sarebbe più repentino.

Ripetendo ulteriormente l'applicazione del carico, la corda tenderebbe ad annullare ogni tipo di deformabilità e la sua Sezione efficace eguaglierebbe la Sezione apparente(!).

In una **Corda speleo-alpinistica** i vari tipi di deformabilità e la loro dipendenza dal tempo t (la **Compattazione della Struttura Complessa della Corda** CSCC con **risposte immediate** rispetto applicazione del carico; la risposta visco-elastica del materiale polimerico condizionata dal tempo t e con ritardi fra Sforzo e Deformazione) stanno alla base della dissipazione e dell'accumulo reversibile dell'energia prodotta dall'applicazione di un carico. Contribuisce sia la CSCC che la Visco-elasticità. Per valutarne separatamente i contributi non è sufficiente utilizzare la DMA, ma occorre mettere **in atto un'analisi più estesa dei dati sperimentali**. L'Analisi Dinamico Meccanica Lineare o Non-lineare su un materiale isotropo o anisotropo **punta soprattutto a valutare gli effetti legati alla Viscosità**, come dire quelli dovuti agli attriti prodotti dallo sgrovigliarsi delle catene di macromolecole e dipendenti dal tempo t .

Il contributo dato dalla CSCC, non dipendendo dal fattore temporale, non viene rilevato. Tuttavia questo dato molto importante, soprattutto per le corde alpinistiche, può essere comunque valutato, sia pur **in modo solo sufficientemente preciso**, attraverso il confronto fra l'andamento e le dislocazioni delle curve dei parametri **tang δ** (Fattore di perdita), **E''** (Componente viscosa), **E'** (componente elastica), **η** (coefficiente di viscosità) in funzione del n° degli **choc** e della **Velocità di deformazione V_d** e le equivalenti curve rappresentanti le variazioni dell'Allungamento massimo **A_0** .

Parte IX: Bibliografia

1. Aglietto M., Bongiovanni R., Filippini Fantoni R. (2016) – *Caratterizzazione di materiali polimerici. Tecniche per polimeri fusi e allo stato solido*. Nuova Cultura
2. Ambrogio E. (2012) - *Studio del fenomeno di rottura delle corde da arrampicata*. Tesi di Laurea Magistrale Università degli Studi di Torino Corso di Laurea in Scienze M. F. N., Relatore Prof.ssa M. P. Luda, Correlatori Prof. L. Costa, Prof.ssa D. Marabello Controrelatore Prof. M. Baricco
3. Anghileri M., Castelletti L. M. L., Milanese A., Moretti G. (2009)- *Sviluppo di una macchina per prove di trazione veloce*. La metallurgia italiana, febbraio 2009
4. Bedogni V. (2013) - *Computer mathematical models in belaying techniques*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club
5. Bedogni V., Manes A. (2011) - *A constitutive equation for the behaviour of a mountaineering rope under stretching during a climber's fall*. Elsevier, Procedia Engineering, Science Direct
6. Bernardin F. (2010) – *La fisica dell'alpinista*. Centro Studi Materiali e Tecniche, Club Alpino Italiano
7. Biordi F. (2013) - *Sintesi e caratterizzazione di nuovi copoliesteri alifatici multiblocco per applicazioni biomedicali*. Tesi di Laurea Università degli Studi di Bologna Corso di Laurea in Ingegneria biomedica, Campus di Cesena, Relatori Prof.ssa Nadia Lotti, Correlatori Ing. Matteo Gigli, Dott.ssa Martina Fabbri
8. Bjoern E., Wolfram V. (2008) - *Determination of the redistribution shock load in climbing double rope systems*. Elsevier, Engineering Failure Analysis 16 (2009) 751–764
9. Bressan G. (2000) - *Rope wear in climbing and in laboratory, decay in dynamic performance of ropes due to wear*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club
10. Casavola P. and Zanantoni C. (1987) - *Rope testing and wear: equipment of the CMT Mechanical features*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club
11. Celesti S., Guerriero G., Salvatori F. (1984) – *Sollecitazioni dinamiche e statiche nelle attrezzature speleologiche. Teoria e sperimentazione*. Speleologia Umbra, Perugia 1984
12. Celesti S., Salvatori F. (1984) – *Prove sperimentali con dinamometro elettronico su attrezzature per la progressione in grotta*. Atti IV Conv. Naz. SS CNSA, Trieste 1984
13. Corso di laurea in ingegneria dei materiali –laurea specialistica Biomateriali Lezione IV (2013) – *Biomateriali polimerici*.
14. Cotugno S., Mensitieri G., Musto P. and Nicolais L. (2004) - *Water sorption and transport in polymers*. Dept. of Materials and Production Engineering, University of Naples Federico II, Naples Italy.
15. Emri I., Nikonov A., Zupancic B. and Florjancic U. (2008)- *Time-dependent behavior of ropes under impact loading: a dynamic analysis*. John Wiley and Sons Asia Pte Ltd, Sports Technol. 2008, 1, No. 4–5
16. Favaro G. (2010) - *Caratterizzazione meccanica sperimentale di materiali polimerici: confronto tra polimeri e bio-polimeri*. Tesi di Laurea Università degli Studi di Padova Corso di Laurea in Ingegneria, Relatore Prof. Arturo N. Natali, Correlatore Ing. Chiara Venturato
17. Feodosov V. I. (1977) – *Resistenza dei materiali*. Editori Riuniti, Roma 1977
18. Feyrer K. (2007) – *Wire rope, Tension Endurance, Reliability*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
19. Galluzzi R., Feraco S., Zenerino E. C., Tonoli A., Bonfitto A., e Hegde S. – *Fatigue monitoring of climbing ropes*. Journal of Sports Engineering and Technology, 2020
20. Grizzuti N. (2012) – *Reologia dei materiali polimerici: scienza ed ingegneria*. Edizioni Nuova Cultura, Roma
21. Hearle J.W.S., Lomas B., Cooke W.D. (1998) - *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*. Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, England

22. Indelicato F., Leotta D. (2007) – *I materiali polimerici*. Tesi di Laurea Università degli Studi di Catania, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica, Tecnologie di Chimica Applicata, Relatore Prof. G. Siracusa, a.a. 2006 - 2007
23. Kurzbö E. (2002) - *Materials for mountaineering ropes, from the past to new ideas*. Nylon and Ropes, Conference Turin, March 8/9 2002
24. LATI (2021) – *Poliammidi Assorbimento di umidità*. Industria Termoplastici High Performance, Vedano Olona (VA)
25. LATI (2021) – *Sostituzione del metallo Compound strutturali*. Industria Termoplastici High Performance, Vedano Olona (VA)
26. Leuthäusser U. (2010) – *Viscoelastic Theory of Climbing Ropes*. Leuthäusser systemanalysen, Schwoich Österreich
27. Licciulli A. (2019) – *Scienza e ingegneria dei materiali Le proprietà meccaniche dei materiali*. Home Page Università del Salento
28. Manes A. (2002) - *Analysis of a textile rope with analytical models*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club
29. Marin M. (2012) - *Caratterizzazione delle proprietà fisico-meccaniche in funzione dell'umidità residua di polimeri trattati in sistemi di deumidificazione innovativi ad alto contenuto tecnologico*. Tesi di Laurea Magistrale Università degli Studi di Padova Corso di Laurea in ingegneria dei materiali, Relatore Prof. Michele Modesti, Correlatori Ing. Stefano Trabacchin, Ing. Stefano Besco
30. McKenna H.A., Hearle J.W. S and O'Hear N. (2004) - *Handbook of fibre rope technology*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, Abington Cambridge CB1 6AH, England
31. McLaren A.J. (2006) - *Design and performance of ropes for climbing and sailing*. Proc. IMechE Vol. 220 Part L: J. Materials: Design and Applications
32. Morton W. E. and Hearle J. W. S. (2008) - *Physical properties of textile fibres*. Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, England
33. Peroni M., Avalle M., Peroni L. (2007) - *Caratterizzazione dell'influenza della velocità di deformazione sul comportamento meccanico di materiali polimerici*. XXXVI Convegno Nazionale AIAS, Settembre 2007 Napoli
34. Roylance D. (2001) - *Engineering viscoelasticity*. Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139
35. Roques H. (1961). *Eléments pour une cinétique des phénomènes karstochimiques*. Annales de Spéléologie, 14, 4.
36. Salvatori F. (1988) – *Teoria delle percussioni elastiche applicata alle sollecitazioni impulsive sulle attrezzature speleo-alpinistiche. Effetti della caduta di un peso vincolato all'estremità di una corda. Alcuni casi di applicazioni sperimentali*. Bollettino C.A.I. n. 89, Milano
37. Salvatori F., Guerriero G., Celesti S., Lambri F., Nanetti P., Menichetti M., Sconfienza S., Continenza A. (1989) – *Resistenza dei materiali speleo-alpinistici*. Centro Nazionale di Speleologia M. Cucco, Costacciaro (PG)
38. Salvatori F., Menichetti M., Celesti S., Poderini L., Bocchio D. – *La Torre CRASC: un nuovo strumento per valutare gli effetti delle sollecitazioni dinamiche sulle attrezzature speleo- alpinistiche e canyoning*. Atti XXI Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste giugno 2011, Commissione Grotte "E. Boegan", Società Alpina delle Giulie
39. Santulli C. (2020) – *Degradazione dei polimeri*. Home page C. Santulli
40. Scoponi M. (2011) – *Chimica dei materiali polimerici*. Università degli Studi di Ferrara Facoltà di Scienze Fisiche Matematiche e Naturali Corso di Laurea in Chimica Dispense 3° anno

41. Signoretti G. (2001) - *The influence of water, ice and sunlight on the dynamic performance of mountaineering ropes*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club
42. Ward I. M., Sweeney J. (2004) - *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0471 49625 1 (HB); 0471 49626 X (PB)
43. Zanantoni C. (1998) - *Sharp-edge rope testing. Status and prospects*. Commission for Materials and Technique, Italian Alpine Club



Scuola Nazionale di Speleologia CAI
direttore@sns-cai.it (Stefano Nicolini)
www.sns-cai.it

segretario@sns-cai.it (Patrizia Diani)

CENS – Centro Escursionistico Naturalistico Speleologico – Loc. Calcinaro 7/A 06021
Costacciaro PG
075 9170548 corrispondenza@cens.it www.cens.it

