



**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

## **Parte X**

*Testo semplificato e di sintesi*

113 figure

*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**

## **Parte X**

*Testo semplificato e di sintesi*

Indicazioni sull'uso affidabile e la corretta conservazione

**113 figure**

© Copyright 2021 - CENS (PG)

ISBN 978-88-941344-2-1

**Prima edizione**

*Hanno collaborato alla sperimentazione e all'elaborazione del testo:*

Domenico Bocchio (INS Sez. CAI Bolzaneto)

Francesco Poderini (Sez. CAI Sansepolcro-CENS)

Roberto Silvestrini (CENS)

Sergio Celesti (ELTON – CENS)

Luca Poderini (INS Sez. CAI Sansepolcro-CENS)

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

## Premessa

*In quest'ultima **Parte X** si espone - sinteticamente e in forma semplificata – il contenuto delle otto Parti che precedono (esclusa dunque la nona parte Appendici), allo scopo di fornire una comunicazione adatta più alla divulgazione, senza il rispetto dei canoni, talvolta criptici, della comunicazione scientifica.*

*Lo scopo è di far cogliere la sostanza dei problemi e le indicazioni che possano permettere di operare correttamente nella progressione speleo-alpinistica nell'uso fattivo delle corda, in grotta e in arrampica, rispettando i limiti di sicurezza e con comportamenti che permettano un uso il più conservativo possibile.*

*La necessità di predisporre questa Lettura Semplificata, infatti, è legata alla complessità espositiva dei risultati e delle interpretazioni, dove non è sempre facile cogliere i concetti basilari e, soprattutto, le indicazioni per un uso corretto dello strumento fondamentale della progressione speleologica, la **Corda** (e i Cordini).*

*In tal modo ci si riferisce all'insieme del vasto e variegato mondo speleologico (e alpinistico) per renderlo comunque edotto e indirizzarlo verso un modo d'uso delle Corde il più affidabile possibile. La lettura, impegnativa, delle otto Parti precedenti può essere lasciata a chi interessa l'esposizione scientificamente corretta, completa e con una dettagliata descrizione dei protocolli di sperimentazione.*

## Elenco degli argomenti trattati

### Le Corde

<b>X.01.</b>	<b>Caratteristiche, proprietà e funzioni di una corda speleo-alpinistica</b>	324
X.01.a.	Composizione di una corda	324
X.01.b.	Carico di rottura della corda senza nodi $F_r$ e Superficie efficace $S_e$	324
X.01.c.	Valutazione della perdita di tenuta alla rottura di una corda usata per 2 anni in attività speleologica; calcolo del contributo degenerativo dato dalla rottura per abrasione dei fili elementari della calza	326
X.01.d.	Funzione di una corda nella progressione speleologica	327
<b>X.02.</b>	<b>Meccanismi utilizzati da una corda per assorbire/dissipare l'energia conferitale da una sollecitazione (trazione lenta/test a caduta)</b>	327
X.02.a.	Assorbimento/dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione attraverso la Compattazione della Struttura Complessa della corda (CSCC) con corde nuove e usate	328
X.02.b.	Dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazioni con produzione di calore per attriti	330
X.02.c.	Dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione per cedimento dei fili elementari della calza della corda	331
X.02.d.	Assorbimento/dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione attraverso le deformazioni (reversibili e no) dei <u>fili elementari</u> di una corda (isotropi) attraverso i meccanismi imposti dalla visco-elasticità dei materiali polimerici	331

<b>X.03.</b>	<b>Come utilizzare per l'Analisi Dinamico Meccanica non-lineare i dati ottenuti con test a caduta su una <u>corda</u></b>	333
<b>X.04.</b>	<b>L'origine della visco-elasticità nelle fibre polimeriche</b>	335
X.04.a.	La macromolecola: struttura	335
X.04.b.	La macromolecola: deformabilità reversibile e irreversibile	336
X.04.c.	L'insieme delle macromolecole nei fili elementari e l'applicazione di carichi: l'energia d'attivazione per modificare la struttura molecolare di base; la sovrapposizioni, gli attorcigliamenti e gli annodamenti delle fibre; gli attriti e i ritardi di tempo nell'attuazione delle deformazioni	336
X.04.d.	La viscosità delle fibre polimeriche è la conseguenza delle forze di attrito che si manifestano fra le catene di macromolecole contenute in un filo elementare	337
X.04.e.	La capacità di dissipazione dell'energia da parte dei fili elementari dipende anche dall'estensione dei settori dei fili elementari occupati da insiemi di catene di macromolecole che generano viscosità	338
<b>X.05.</b>	<b>La struttura semi-cristallina delle fibre polimeriche nuove (mai sottoposte a usura); grado di cristallinità</b>	338
<b>X.06.</b>	<b>La struttura semi-cristallina di fibre polimeriche nuove e la risposta visco-elastica</b>	340
<b>X.07.</b>	<b>Evoluzione della struttura semi-cristallina delle fibre polimeriche nuove a seguito dell'applicazione di un carico o della successione di sollecitazioni</b>	341
<b>X.08.</b>	<b>Evoluzione della struttura semi-cristallina dei fili elementari nuovi che compongono le corde speleo-alpinistiche a causa dell'uso in grotta e montagna</b>	344
<b>X.09.</b>	<b>TEST A TRAZIONE LENTA: altri riscontri sperimentali del decadimento delle corde speleo-alpinistiche prodotto dall'uso in grotta e in montagna; valutazioni rispetto alle modifiche della struttura semi-cristallina dei fili elementari; contributo dell'abrasione meccanica della calza</b>	376
<b>X.10.</b>	<b>TEST A TRAZIONE VELOCE: prove a caduta su corde per valutarne il decadimento in funzione del n° degli choc e della velocità di deformazione <math>V_d</math>; valutazione della visco-elasticità e delle sue variazioni nei fili elementari attraverso l'Analisi dinamico Meccanica non-lineare; calcolo del contributo individuale dei meccanismi che concorrono alla dissipazione dell'energia conferita alla corda dalla caduta del peso (<i>reazione visco-elastica dei fili elementari, Compattazione delle Struttura Complessa della Corda CSCC, lavoro alla rottura dei fili elementari, attriti fra i componenti la struttura complessa della corda</i>)</b>	403

## I Cordini

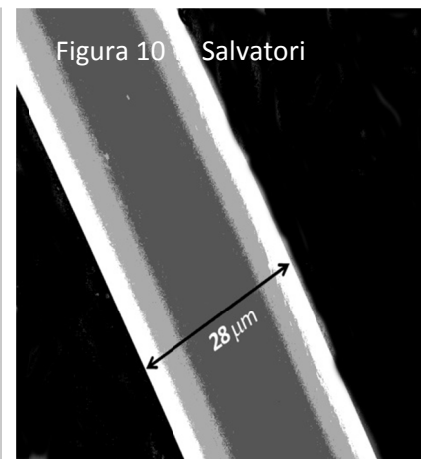
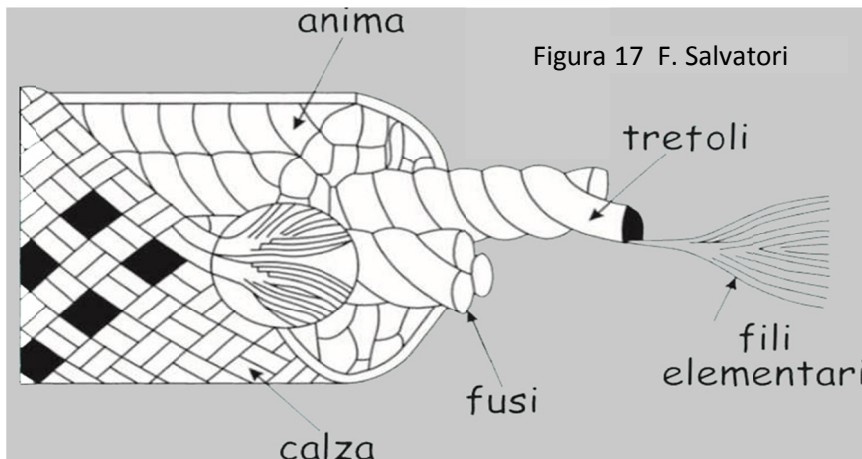
<b>X.11.</b>	<b>Caratteristiche, proprietà e funzioni di un cordino speleo-alpinistico</b>	447
<b>X.12.</b>	<b>TEST QUASI-STATICI E A CADUTA: Cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6; analisi dei risultati sperimentali e confronto con la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova</b>	450
<b>X.13.</b>	<b>TEST QUASI-STATICI E A CADUTA: cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6; valutazione della riduzione del Carico di rottura con nodi (<math>F_{rn}</math>) in funzione della Velocità di deformazione (<math>V_d</math>)</b>	474
<b>X.14.</b>	<b>TEST QUASI-STATICI E A CADUTA: cordini nuovi di Dyneema e Kevlar; valutazione termografica delle temperature durante la trazione quasi-statica fino alla rottura nel nodo</b>	476

# LE CORDE

## 01. Caratteristiche, proprietà e funzioni di una corda speleo-alpinistica

### 01.a) Composizione di una corda

La corda è una struttura complessa **anisotropa** composta da vari elementi: calza + trefoli + fusi + fili elementari (Figura 17, pag. 28). Nel complesso una corda da 10 – 11 mm di diametro apparente contiene dai 60.000 ai 70.000 fili elementari **isotropi** (con diametro di circa 28  $\mu\text{m}$ , Figura 10, pag. 23) avviluppati e intrecciati in strutture complesse diverse da costruttore a costruttore (i cordini, in genere, sono strutturati in una calza contenente un solo trefolo).



In una corda speleo-alpinistica **la calza contribuisce a opporsi agli allungamenti e alla rottura** con percentuali che variano **dal 39 % al 41 %**. In casi particolari (Corda Cavaliere Cave Explorer statica 10,5 mm statica Nylon 6.6) la percentuale di questo contributo scende al 26 % (pag. 147, Figura 128).

### 01.b) Carico di rottura della corda senza nodi $F_r$ e Superficie efficace $S_e$

Il Carico di rottura  $F_r$  si ottiene trazionando in condizioni quasi-statiche (0,006 m/s) senza nodi d'aggancio al dinamometro (pagg. 28-29, Figura 18); è uno dei valori che meglio caratterizza le proprietà meccaniche di una corda, qualunque essa sia.

Il suo valore non dipende dal modo come viene confezionata la corda (calza + anima, Figura 17).  $F_r$  è direttamente dipendente dalla quantità di materiale polimerico dell'insieme dei fili elementari (Figura 10) che costituiscono la Struttura Complessa della Corda e dalla sua qualità espressa dalle caratteristiche chimico-fisiche del polimero, con il tipo e la disposizione delle catene di macromolecole (pag. 62 e seg., Figure 53-54-55-56).

La qualità del materiale polimerico è espressa dalla Tenacità, valore noto per ogni tipo di polimero, espresso come **Sforzo specifico alla rottura**  $\sigma_{sr}$  di un filo elementare isotropo.



Lo Sforzo specifico  $\sigma_s$  equivale allo Sforzo  $\sigma$  diviso la densità  $\rho$  del materiale polimerico; pertanto  $\sigma_s = \sigma/\rho$ , che portato alla rottura del filo dà lo Sforzo specifico alla rottura  $\sigma_{sr} = \text{Tenacità}$  (pag. 29). I valori raccolti in letteratura per la Tenacità e le altre principali proprietà delle fibre utilizzate per corde e cordini speleo-alpinistici (e fettucce) sono (pag. 30):

Polimero	Tenacità (N/Tex)	Modulo (GPa)	Cristallinità (%)	Temp. fusione °C	Densità g/cm <sup>3</sup>
Poliammide Nylon 6	0,47	2,6	50	218	1,14
Poliammide Nylon 6.6	0,64	8,0	70	265	1,14
Kevlar Aramide 48	2,03	72	<80	360-500	1,45
Dyneema Polietilene	2,80	142	<80	150	0,97

Le fibre polimeriche sono **strutture semicristalline**. Alcuni esempi sono riportati nelle **Figure 53-54-55** (pag. 63) con rappresentazioni schematiche di sezioni trasversali o porzioni microscopiche di fili elementari (isotropi).

I riferimenti sono: per il Nylon 6, pag. 61; per il Nylon 6.6, pag. 61, **Figura 49**; per il Dyneema, pagg. 244-245, **Figure 193-194**; per il Kevlar, pagg. 245-246, **Figura 195**.

Pertanto, ricavando sperimentalmente il valore del Carico di rottura  $F_r$ , si valuta, **perché direttamente proporzionali**, la **quantità** di materiale polimerico presente nella corda che si oppone all'allungamento e alla rottura e la sua **qualità**, espressa dalla Tenacità. Se si conosce il valore di questa caratteristica delle fibre si può ricavare, infine, la **Superficie efficace**  $S_e$ , attraverso la relazione (pag. 29):

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

dove:

$F_r$  = carico di rottura senza nodi (N)

$\sigma_{sr}$  = Sforzo specifico alla rottura del filo elementare = Tenacità (N / tex)

$\rho$  = densità del filo elementare (g/cm<sup>3</sup>)

Con questa operazione di conversione, in concreto, si trasforma la Struttura anisotropa Complessa (pag. 324, **Figura 17**) di una Corda in un campione isotropo, del materiale che compone i fili elementari, con sezione trasversale  $S_e$ . Di fatto si ottiene la trasformazione dell'insieme di fili elementari di una corda in un unico elemento omogeneo in ogni direzione dello spazio (appunto, isotropo).

Per meglio semplificare, la Sezione efficace equivale alla somma di tutte le sezioni trasversali dei fili elementari presenti nella corda (anche se queste fossero di dimensioni diverse, ma comunque costituite da materiale con identica Tenacità).

Con l'inserimento della Superficie efficace  $S_e$  di una corda s'inserisce un elemento d'analisi di fondamentale importanza:

1. è la misura della quantità del materiale polimerico isotropo che costituisce una corda, determinandone le sue proprietà meccaniche e eliminando il problema della varietà delle sue tessiture e del suo confezionamento anisotropo;
2. permette di calcolare lo Sforzo, conoscendo la Forza applicata prodotta dalla sollecitazione, attraverso la relazione  $\sigma = F/S_e$ ; valore assolutamente indispensabile per elaborare i dati sperimentali ottenuti con le prove a caduta (pag. 174 e seg., **Figure 37-38**) per conoscere il **comportamento visco-elastico** delle fibre polimeriche (utilizzando l'Analisi Dinamico Meccanica DMA non-lineare; pag. 312 e seg., **Figura M**).

**Annotazione importante 01.** I valori di Tenacità riportati nella tabella soprastante si riferiscono a materiale polimerico nuovo, appena uscito di fabbrica, prodotto nelle migliori condizioni possibili e quindi con il grado di cristallinità indicato accanto (pag. 61, **Figura 49-50**).

**Annotazione importante 02.** Nelle corde usate, con l'uso in grotta e in arrampicata sportiva, la quantità e la qualità dei materiali polimerici di una corda variano, **sempre in diminuzione**: varia la cristallinità e si rompono i fili elementari soprattutto con l'azione meccanica di abrasione sulla calza. Di conseguenza la Superficie efficace decresce di valore: è un indice importante di quanto decadano le proprietà meccaniche di una corda. Ma il suo valore **non distingue fra rotture e perdita di qualità** dei fili elementari. Infatti la perdita di qualità delle fibre, che si manifesta soprattutto con una diminuzione di cristallinità, comporta una perdita di Carico di rottura  $F_r$  e, quindi, di Tenacità dei fili elementari (pag. 81, **Figura 73**). In ultima analisi il decadimento per uso (pag. 70 e seg.: contato con l'acqua; pag. 90 e seg.: calore; pag. 174 e seg.: successione di choc; pag. 86 e seg.: contato con gas, esposizione a raggi UV) viene registrata quantitativamente come se i fili elementari coinvolti diminuissero la loro sezione trasversale, ma mantenessero lo stesso valore di Tenacità.

Con una semplice elaborazione di geometria si calcola anche il Diametro efficace  $d_e$  (pag. 29) :

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

da contrapporre al Diametro apparente indicato dai costruttori. Questa equivalenza si basa sull'ipotesi che la Struttura Complessa di una Corda sia divenuta un unico elemento isotropo con sezione trasversale circolare.

### **01.c) Valutazione della perdita di tenuta alla rottura di una corda usata per 2 anni in attività speleologica; calcolo del contributo degenerativo dato dalla rottura per abrasione dei fili elementari della calza**

Sulla base dei test sull'usura di una serie di corde statiche usate in grotta per due anni (pag.122 e seg.) e dei risultati per la diminuzione della Superficie efficace (pag. 136, **Figura 118**; pag. 138, **Figura 120**) si evidenzia che nelle 16 corde testate si riscontra una **diminuzione** di  $S_e$  che varia **dal 47 % al 60 %** .

Questo significa che una corda speleo - a causa della rottura di fili elementari e dell'abbassamento delle sue caratteristiche chimico fisiche (soprattutto il grado di cristallinità) - **perde in media il 50 %** del suo Carico di rottura  $F_r$  **in tre anni d'attività normale in grotta**.

A questa situazione di degrado delle proprietà meccaniche e chimico-fisiche si deve aggiungere il fatto che, come ineluttabilmente accade nella progressione speleologica, la corde deve essere comunque annodata. Ebbene questo aggiunge un'ulteriore fattore di riduzione del Carico di rottura per "effetto nodo" che in una corda usata due anni è in media del 12 % (pag. 139, **Figura 122**).

A tal punto la valutazione del grado d'usura porta a concludere che manca poco a raggiungere valori di  $F_{rm}$  inferiori ai 1100 kgp del Limite Inferiore di Resistenza (LIR) [37] e quindi a entrare nel campo della insufficiente affidabilità delle corde.

Volendo rilevare il contributo dell'abrasione della calza (per la calza della corda nuova, pag. 148, **Figura 130**; per la calza della corda usata, pag. 148, **Figura 131**) per contatto con pareti, pavimenti e altre situazioni similari con materiali solidi (tipo freni per la risalita su corda), si deve far riferimento ai risultati sperimentali contenuti nella **Figura 128** (pag. 147), dove sono esposti i risultati di test a trazione quasi-statica per sei tipi di corde:

1. Beal Antipodes 10 mm **statica** (Nylon 6), nuova
2. Beal Antipodes 10 mm **statica** (Nylon 6), usata 2 anni in grotta
3. Beal Booster III 9,7 mm **dinamica** (Nylon 6), nuova
4. Beal Booster III 9,7 mm **dinamica** (Nylon 6), usata 3 anni in arrampicata sportiva
5. Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm **statica** (Nylon 6.6), nuova
6. Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm **statica** (Nylon 6.6), usata 2 anni in grotta

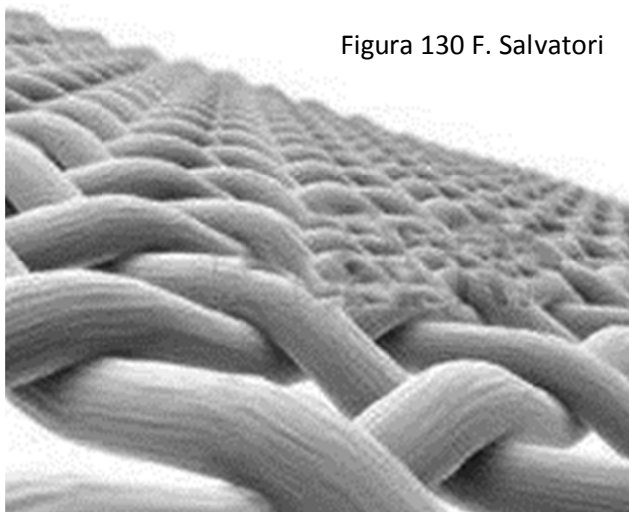


Figura 130 F. Salvatori

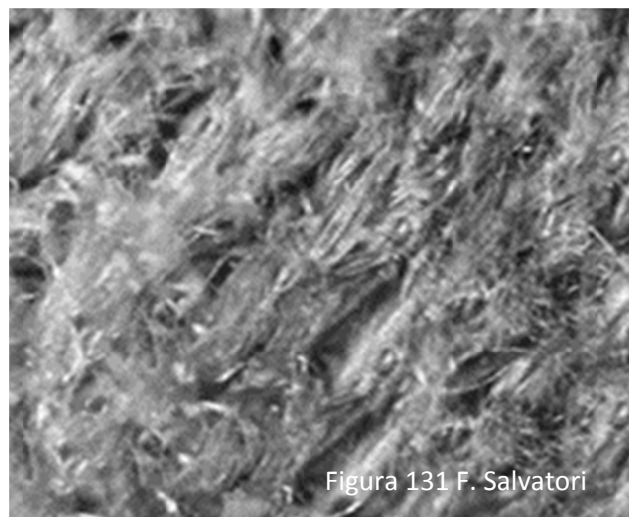


Figura 131 F. Salvatori

Per la **Beal Antipodes 10 mm statica** e la **Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm statica**, in due anni d'attività in grotta, l'abrasione sulla calza con rottura dei fili elementari che la compongono contribuisce alla **riduzione del Carico di rottura  $F_r$** , per circa l'**8 %**.

Per la **Beal Booster III 9,7 mm dinamica** si rileva una differenza di decadimento fra trefoli e calza **addirittura del 33 %**. Ma in questo caso, visto che nell'arrampicata sportiva non si verifica un tipo di contatto con i solidi che possa portare all'abrasione con conseguente recisione dei fili elementari, il decadimento differenziato fra calza e anima va ricercato in altri agenti. Verosimilmente nel contatto con i freni utilizzati per le ripetute calate, in un misto d'erosione meccanica del materiale polimerico (asportazione di materiale senza recisione, ma comunque diminuzione della Superficie efficace) e di decadimento della qualità della fibra per ripetute produzioni di "ondate di calore" per attrito. Questo stato di ciclico superamento della Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  (pag. 91 e seg., **Figure 76a-76b**) porta infatti a un progressiva diminuzione di cristallinità e resistenza alla rottura (pag. 100 e seg., **Figure 84-85**).

### **01.d) Funzione di una corda nella progressione speleologica**

Due sono i compiti di una corda statica per speleologia:

1. resistere alla rottura fino ai **1100 kgp** di trazione stabiliti dal LIR (Limite Inferiore di Resistenza) [37];
2. assorbire l'energia prodotta dalla caduta di un peso - attraverso compattazioni, allungamenti e produzione di calore per attrito - impedendo che si raggiunga una forza di trazione che superi i **1100 kgp** del LIR e, quindi, un possibile cedimento (pag. 42, **Relazione 13**) [36] [37].

## **02. Meccanismi utilizzati da una corda per assorbire/dissipare l'energia conferitale da una sollecitazione (trazione lenta/test a caduta)**

Quando una corda viene sollecitata ad allungarsi da una forza (trazione lenta, pag. 29, **Figura 18**; trazione veloce con test a caduta di un peso, pagg. 39-40-41, **Figure 28-29-30**) l'energia conferita sulla corda viene dissipata attraverso quattro modalità:

- a. la Compattazione della sua Struttura Complessa CSCC (anisotropa) (pag. 28, **Figura 17**), reversibile solo in parte;
- b. la produzione di calore per gli attriti creatisi fra i diversi componenti che costituiscono una corda speleo-alpinistica (fibre intessute nelle maglie della calza e nei trefoli, singoli fili elementari) che si distendono e compattano con velocità differenziate;
- c. cedimento dei fili elementari per abrasione sulla calza della corda a contatto con elementi solidi esterni (pareti, pavimenti, protuberanze, attrezzi per la progressione);

- d. le deformazioni (reversibili e no) dei fili elementari (isotropi) attraverso i meccanismi imposti dalla visco-elasticità dei materiali polimerici (Nylon 6 e Nylon 66, poliammine, pag. 61, **Figura 49**; Kevlar, polietilene, pagg. 244-245, **Figure 193-194**; Dyneema, fibra aramidica, pagg. 245-246, **Figura 195**); Esperimenti di Creep e Analisi Dinamico Meccanica non-lineare.

## 02.a) Assorbimento/dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione attraverso la Compattazione della Struttura Complessa della corda (CSCC) con corde nuove e usate

Con questo meccanismo la corda (di cui al precedente **Punto a.**), con il suo insieme anisotropo di componenti (maglie della calza, foli, trefoli, singoli fili elementari), attraverso deformazioni longitudinali e compattazioni trasversali, assorbe l'energia conferita dall'applicazione di una sollecitazione. Da intendere come un insieme di deformazioni, non unidirezionali, di un complesso concatenato di "molle" di dimensioni compatibili con quelle dei fili elementari (pag. 324, **Figura 10**), espresse in  $\mu\text{m}$  (micrometri). Un insieme difficilmente "modellabile", con effetti quantizzabili solo per differenza fra le porzioni d'energia assorbita/dissipata dai differenti meccanismi deformativi di una corda.

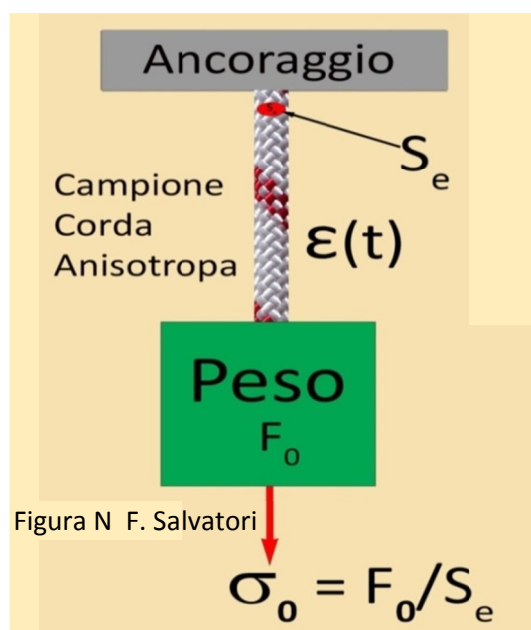
**Attenzione:** queste deformazioni proprie della CSCC nulla hanno a che fare con le catene di macromolecole che costituiscono i fili elementari (che hanno dimensioni compatibili con quelle atomiche e molecolari espresse in  $\text{Å}$ , Ångström), elementi base responsabili della visco-elasticità dei polimeri indicata al Punto d. (pagg. 63-64, **Figure 53-54-55-56**).

Le deformazioni proprie della CSCC rispondono immediatamente all'applicazione di forze e quindi non sono caratterizzate da ritardi fra raggiungimento della forza massima e dell'allungamento massimo, come accade con il materiale polimerico visco-elastico (pagg. 176-177, **Figure 37-38**).

La CSCC è una deformazione complessa parzialmente reversibile (parzialmente "elastica"), che con il succedersi delle applicazioni dei carichi si riduce d'efficacia nell'assorbire l'energia immessa dall'applicazione di un peso.

Effettuando un esperimento di Creep come rappresentato in **Figura N** (pag. 315), la reazione nella CSCC è immediata e in funzione del valore del Peso  $P$  (anch'esso immediatamente applicato), e va a sommarsi alla deformazione visco-elastica propria del solo materiale polimerico dei fili elementari. Togliendo il peso con immediatezza, la CSCC recupera solo una parte della sua deformabilità (pagg. 314-315-316-317, **Figura O**).

Procedendo con una successione d'identiche sollecitazioni la porzione di recupero istantaneo di CSCC diminuisce e la corda è sempre meno predisposta ad assorbire l'energia di un'eventuale caduta di un Peso.



L'entità del contributo che la CSCC può dare alla deformabilità complessiva di una corda è variabile, dipendendo dalla sua classificazione data all'origine dal suo costruttore (statica, semi-statica, dinamica), in funzione soprattutto dall'intreccio delle maglie della calza, dell'involuppo delle foli e dei trefoli e dalla tensione con cui si confeziona la corda stessa (minor tensione = maggiore efficienza della CSCC).

In base alle esperienze fatte si valuta che il contributo all'assorbimento dell'energia nei test a caduta di un peso tramite la CSCC è di circa il **70 % per le corde dinamiche nuove** e del **20 % circa per le corde statiche nuove** (pag. 215; pag. 226).

Per le analoghe **corde usate** (due anni in grotta per la Beal Antipodes statica 10 mm e tre anni in arrampicata sportiva per Beal Booster III dinamica 9,7 mm) le percentuali di assorbimento dell'energia dovute alla CSCC **si mantengono sempre intorno al 70 %**, se non su valori superiori.



A pag. 81 (**Figura 73**) il grafico rende quantitativamente la dipendenza della cristallinità con il Carico di rottura (in questo caso, trattandosi di un filo elementare isotropo, si utilizza lo Sforzo alla rottura  $\sigma_r$ ) dal Peso molecolare medio. Infatti il grado di polimerizzazione delle macromolecole (pag. 64, **Figura 56**) è anche dipendente dal grado di cristallinità della poliammide: tanto maggiormente è ordinata la disposizione delle macromolecole tanto maggiore è la possibilità di legami intermolecolari e quindi di aumento del Peso molecolare medio, anche detto Peso molecolare numerico  $M_n$  (pag. 81).

Nelle corde dinamiche, generalmente utilizzate non in ambiente-grotta, per valutare il Carico di rottura effettivo nella progressione deve essere considerato  $F_{rn}$ , cioè sommando anche l'Effetto nodo, che comporta una diminuzione **per la corda usata** il **56 %** (pag. 139, **Figura 122**). Se anche queste corde venissero utilizzate in ambiente-grotta (U.R. 100 % = immersione in acqua) per effetto dell'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari delle catene poliammidiche si dovrebbe ridurre  $F_r$  di un altro 10 – 15 % (pag. 111, **Figura 87**; pag. 116, **Figura 92**; pag. 117, **Figura 94**). Considerando anche la Degradazione idrolitica per Perdita di Peso e/o per diminuzione del Peso molecolare numerico si avrebbe **un'ulteriore decremento di circa 0,5 kgp/giorno di permanenza sotterranea**.

Nel complesso si determinerebbe una situazione per cui il Carico di rottura scenderebbe molto al di sotto del LIR, con diminuzione netta dell'affidabilità delle corde.

## **02.b) Dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazioni con produzione di calore per attriti**

Il secondo meccanismo indicato nell'elenco del **Punto 0.3** fa riferimento al movimento con velocità differenziate dei componenti la Struttura Complessa di una Corda (**Figura 17**). In base ai risultati sperimentali sono stati ottenuti i dati qui di seguito esposti (pagg. 204-205, **Relazioni 24-25**).

Per una **corda statica nuova** (pag. 206, **Figura 164**) con Velocità di deformazione  $V_d$  (pagg. 52-53, **Figura 41**) bassa (H10, H30, H50), paragonabili alle sollecitazioni proprie della progressione in grotta (risalita con bloccanti o discesa con discensore, in condizioni normali, pag. 151, **Figure 134-135**) la dissipazione d'energia per calore dovuto agli attriti (unica forma d'assorbimento d'energia non recuperabile totalmente: va aumentare il grado d'Entropia della corda e dell'aria che la circonda) è d'entità trascurabile, cioè circa il **3 %** del totale (pag. 206, **Figura 164**).

Invece con  $V_d$  più elevate (H100 – H150 – H200) **% Calore** varia fra il **7 % e il 12 %**.

Questa forma di dissipazione oltre ad aumentare con la Velocità di deformazione, cresce in modo marcato anche al progredire del **n° degli choc**, arrivando anche a **superare il 14 %** (pag. 206, **Figura 165**).

In sintesi, nelle corde statiche, il **% Calore** è un fattore poco incidente con sollecitazioni a basso contenuto energetico (come quelle, numerosissime, di una progressione speleologica normale); mentre può **aumentare fino a cinque volte** con sollecitazioni tipo **progressione arrampicata sportiva** dove il Fattore di caduta può essere compreso fra 1 e 2 (pagg. 42-43, **Relazione 13**; pag. 53, **Relazione 16**). Considerando che nella tecnica dell'arrampicata sportiva è normale l'uso ripetuto di freni per le calate, il calore prodotto dagli choc ad alto contenuto energetico si va a sommare al calore prodotto dall'attrito nei freni: si sommano i due fattori di degrado, con un meccanismo indicato a pag. 102 (**Figura 85**), come già in parte indicato nel **Punto 05**. precedente.

Ancora una volta risalta, nell'arrampicata sportiva, l'effetto degradante dei freni in calata e del calore prodotto dal ripetersi degli choc: probabilmente la fonte di decadimento più importante di una corda impiegata nell'arrampicata sportiva.

Per una **corda statica usata** (pag. 207, **Figura 166**) i valore di **% Calore** diminuisce di poco, ma gli andamenti e le dislocazioni delle curve sono analoghe a quelle delle corde nuove.

Nelle corde statiche ma composte da fili di **Nylon 6.6** (pag. 208, **Figura 167**) la situazione resta pressoché identica.

Nelle corde dinamiche nuove (pag. 209, **Figura 168**) la situazione generale non cambia: i valori di % **Calore** non sono dissimili dalle corde statiche nuove; mentre per le dinamiche usate la capacità dissipativa attraverso gli attriti decade fortemente e per sollecitazioni a basso contenuto energetico risulta quasi annullata.

### **02.c) Dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione per cedimento dei fili elementari della calza della corda**

Come è stato rilevato nel precedente **Punto 01.c** (pagg. 130-131), la rottura dei fili elementari della calza di una corda porta a un abbassamento del Carico di rottura  $F_r$  e, di conseguenza della Sezione efficace  $S_e$  (pag. 324 e seg.). Per produrre queste rotture è stato necessario un "lavoro" (quindi energia), in questo caso, **meccanico**, proprio dell'abrasione fra calza e pareti.

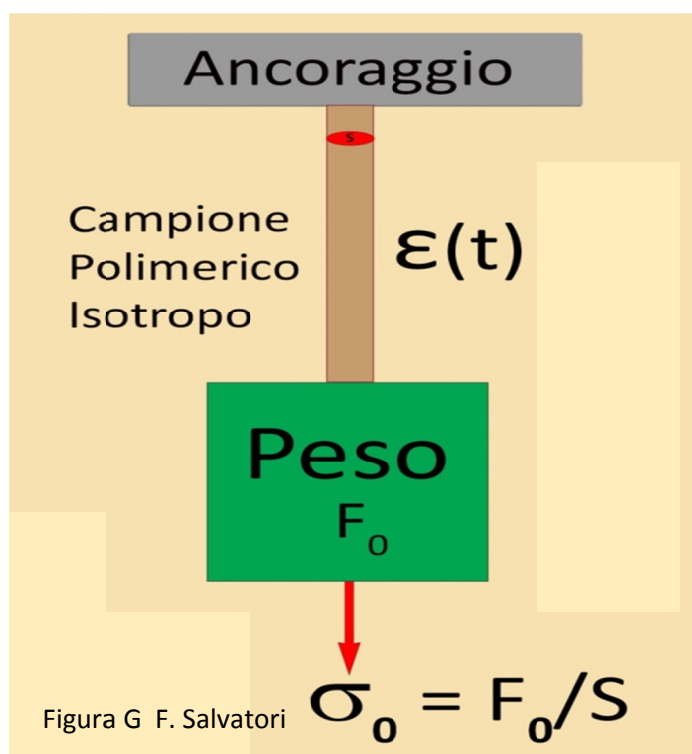
Ma può accadere anche che, durante una sollecitazione lenta o una prova a caduta di un peso (sollecitazione veloce), alcuni fili elementari, con dimensioni e/o qualità polimeriche inferiori, raggiungano il punto di rottura (pag. 67, **Figura 11**) prima di altri. Con questa situazione, facendo riferimento indicativo alla **Figura 20** (pag. 66), l'analogia superficie sottesa alla curva  $\sigma = f(\varepsilon)$  di **Figura 11** rappresenta il lavoro alla rottura di un filo elementare durante una trazione lenta o test a caduta.

Questi  $\Delta L_{rottura}$  devono essere considerati fra le forme d'energia che concorrono a dissipare (perché non c'è reversibilità) l'energia prodotta dall'applicazione di un carico.

Sono apporti non quantizzabili facilmente a priori, fortemente dipendenti dall'usura prodottasi nella corda, rilevabili nei grafici di varia composizione con **repentini abbassamenti dei valori** in ordinata (Forza, Sforzo, Modulo elastico, ecc.). Sono rilevabili soprattutto valutando le variazioni di Superficie efficace  $S_e$ .

### **02.d) Assorbimento/dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione attraverso le deformazioni (reversibili e no) dei fili elementari di una corda (isotropi) attraverso i meccanismi imposti dalla visco-elasticità dei materiali polimerici**

In questo caso si prende in considerazione solo la deformabilità dell'insieme dei fili elementari costituenti una corda: tutti elementi isotropi i cui allungamenti, sotto l'applicazione di un carico, sono governati dai



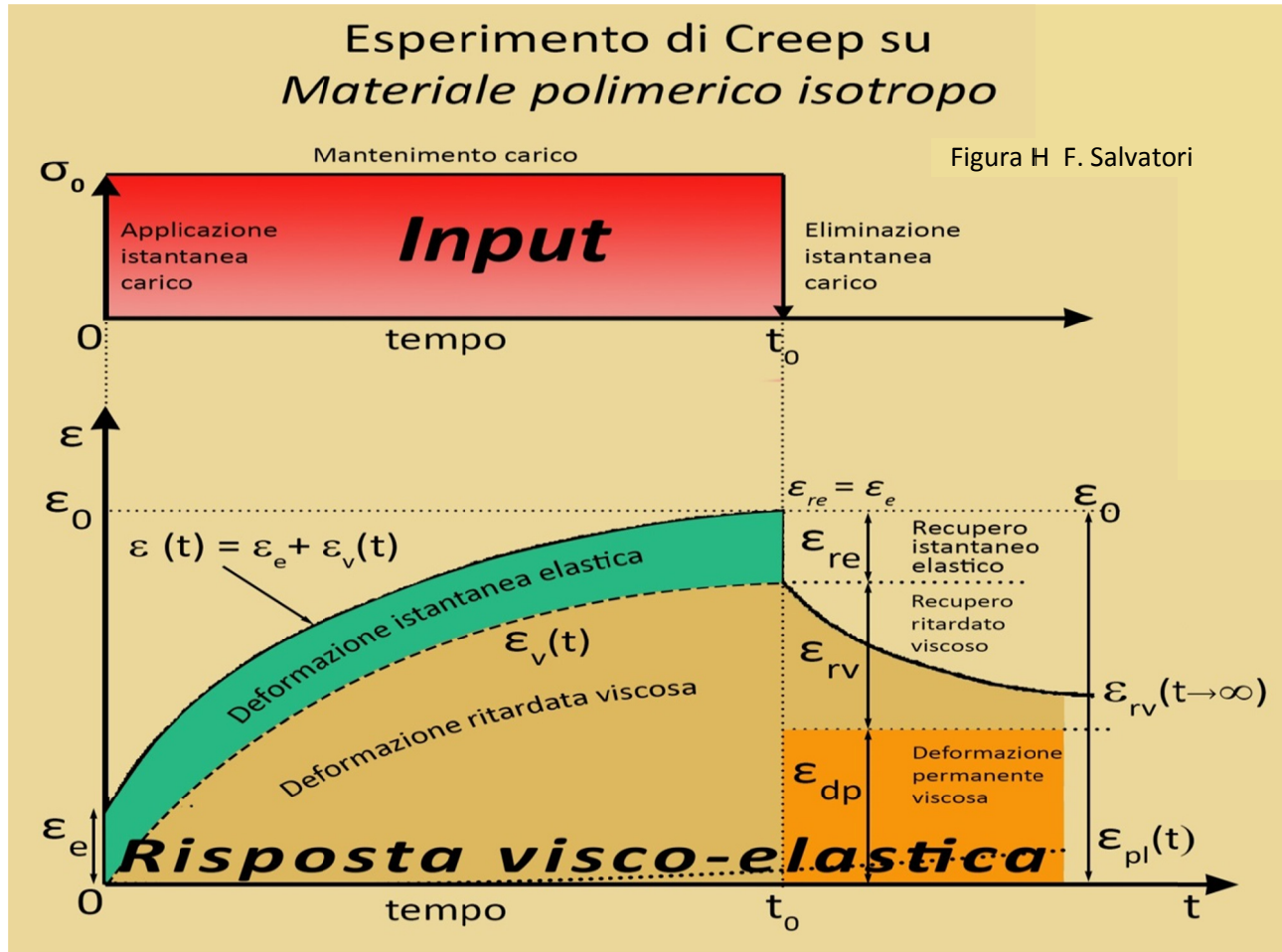
meccanismi propri della visco-elasticità polimerica, quindi anche in dipendenza del tempo d'attuazione  $t$ .

In **primo luogo**, occorre far riferimento a quanto descritto a pag. 307 e seg. sulle **esperimenti di Creep** su un **materiale isotropo visco-elastico** come le Poliammidi (Nylon 6 e Nylon 6.6).

Nella **Figura G** c'è lo schema d'applicazione del carico (si confronti con la **Figura N** di pag. 328: si differenzia perché al posto della corda anisotropa c'è un elemento di materiale polimerico isotropo, come i fili elementari).

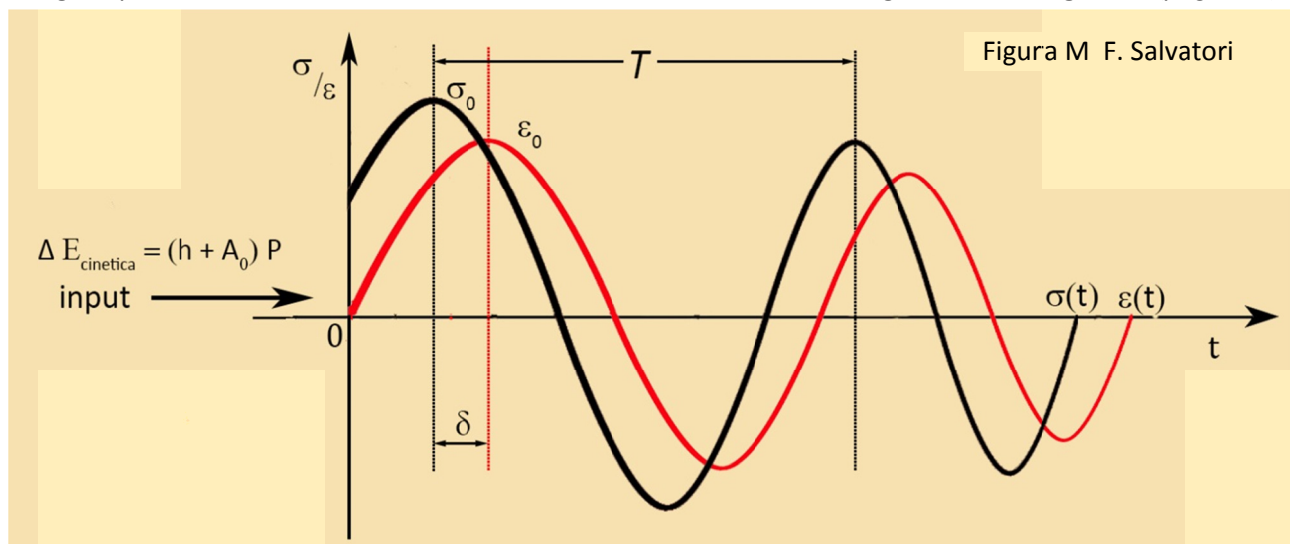
Nella **Figura H** è riportato l'intero evolversi degli allungamenti, dall'applicazione istantanea del carico alla sua rimozione altrettanto istantanea, e a quanto succede dopo, con le deformazioni che vengono solo in parte recuperate immediatamente (parte "elastica") e in parte progressivamente nel tempo (parte "viscosa").

Le deformazioni e il loro parziale recupero sono condizionati dal tempo  $t$ , essendo il materiale oltre che elastico anche viscoso (invece, la parte elastica del materiale polimerico risponde istantaneamente all'applicazione e alla rimozione del carico).



Trattandosi solo dei fili elementari isotropi non è calcolato l'apporto agli allungamenti dato dalla CSCC (come invece è rappresentato nell'analogia **Figura O**, pag. 329).

**In secondo luogo**, occorre anche tener presente e rappresentare schematicamente il comportamento della visco-elasticità dei fili elementari per assorbire/dissipare l'energia prodotta in un **test con caduta di un peso**, con variazioni cicliche delle forze in funzione del tempo  $t$  o delle deformazioni  $\epsilon$ : contrariamente all'esperimento di Creep, che comporta un solo ciclo d'applicazione di carico/scarico, il test a caduta si svolge in più cicli di carico/scarico, senza soluzioni di continuità, come diagrammato in **Figura M** (pag. 312).



Le curve  $\sigma = f(t)$  e  $\varepsilon = f(t)$  sono **sinusoidi a smorzamento** (a ogni elongazione **parte dell'energia** conferita **viene dissipata dalla viscosità** del materiale polimerico e viene restituita solo l'energia legata alla parte elastica reversibile), sfasate di un tempo  $\delta$  in conseguenza del comportamento visco-elastico dei fili elementari, che impone tempi più lunghi per completare gli allungamenti. La **successione di cicli di carico/scarico viene definita anche come "isteresi"**.

Dai diagrammi di **Figura M**, rilevando i parametri  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\delta$  e  $T$  si può sviluppare l'**Analisi Dinamico Meccanica (DMA) non-lineare** (pag. 312 e seg.) per valutare il grado visco-elastico del materiale polimerico dei fili elementari e le sue variazioni sotto l'azione degradatrice dei fattori che portano all'usura delle corde.

Con la DMA non-lineare, praticabile solo a seguito di test a caduta, è dunque **possibile definire**, anche quantitativamente, il **contributo della sola visco-elasticità all'assorbimento/dissipazione dell'energia**, come richiesto dal **Punto d.** di pag. 328.

I parametri caratterizzanti la visco-elasticità dei fili elementari ottenibili con la DMA non-lineare sono (pag. 312):

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

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

dove:

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

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

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

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

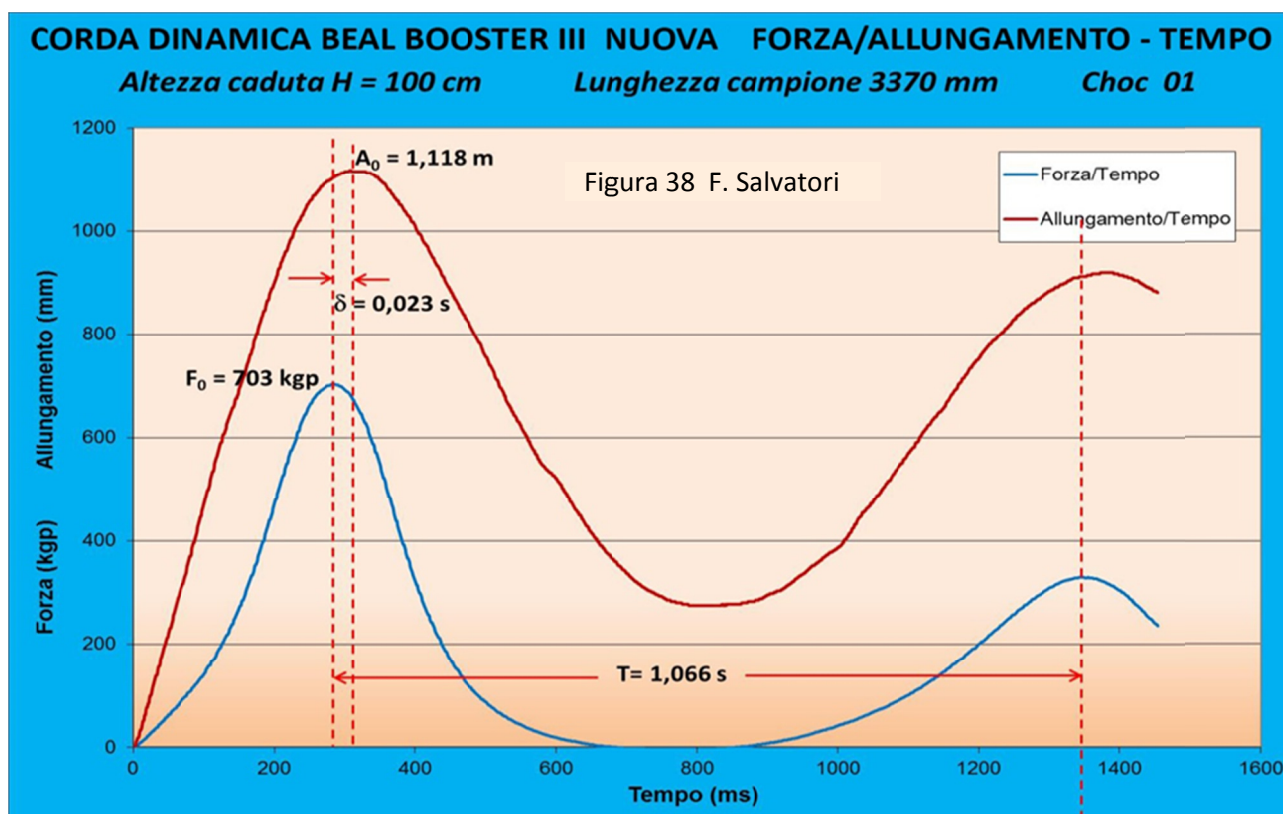
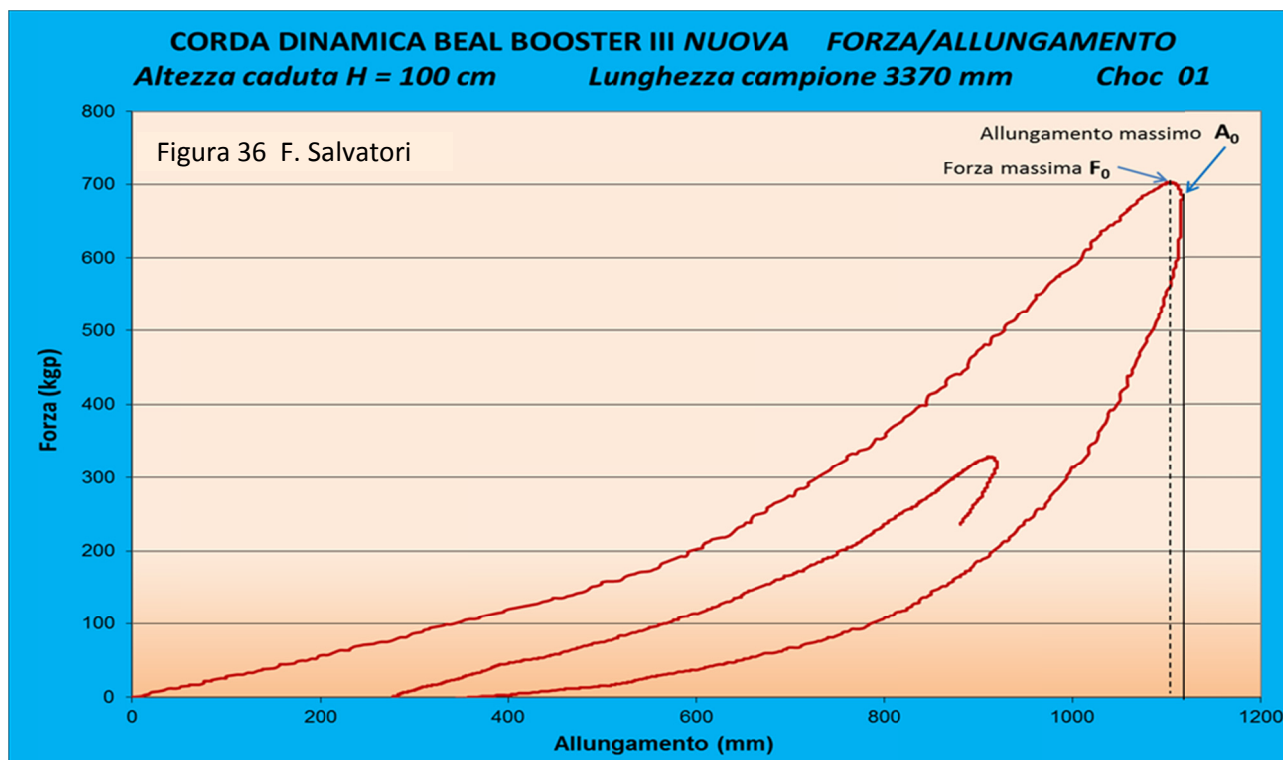
$$\eta = E'' \cdot \omega = \text{coefficiente di viscosità} \quad u$$

I parametri evidenziati sono i più significativi e rappresentano:

01.  $E' = \text{Modulo elastico o conservativo}$  la misura del contributo "elastico reversibile";
02.  $E'' = \text{Modulo dissipativo o viscoso}$  la misura del contributo "viscoso non reversibile" e quindi dissipato;
03.  $\tan \delta = \text{Fattore di perdita}$  la misura di quanta deformabilità visco-elastica viene persa a seguito dell'azione di un fattore degradante;
04.  $\eta = \text{coefficiente di viscosità}$  una misura del grado di viscosità del materiale che costituisce i fili elementari.

### 03. Come utilizzare per l'Analisi Dinamico Meccanica non-lineare i dati ottenuti con test a caduta su una corda

Con i test a caduta su una corda (ad esempio una Beal Booster III 9,7 mm dinamica nuova) si ottengono dei grafici come quelli delle **Figure 36-38** (pag. 45 e seg.), dove è possibile ricavare i parametri  $F_0$  (Forza massima),  $A_0$  (Allungamento massimo),  $\delta$  (Ritardo di tempo) e  $T$  (Periodo). Quando, invece, la DMA richiede, al posto dei primi due dati, lo  $\sigma_0$  (Sforzo massimo) e la  $\varepsilon_0$  (Deformazione massima).



Per quanto riguarda la trasformazione di **Forza massima**  $F_0$  in **Sforzo massimo**  $\sigma_0$  si utilizza la relazione che dà la Superficie efficace  $S_e$  della corda, conoscendone il Carico di rottura senza nodi  $F_r$  (pag. 325):

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

che rappresenta la Sezione trasversale della corda trasformata, “matematicamente”, in elemento isotropo.

Da cui discende:

$$\sigma_0 = F_0/S_e$$

Infatti la corda ha una natura anisotropa (pag. 324, **Figura 17**) dove il diametro dichiarato dal costruttore è solo “apparente” e non può essere utilizzato per calcolare la Sezione trasversale **effettiva** della corda e poi lo Sforzo  $\sigma = F/\text{Sezione trasversale corda}$ .

Per quanto riguarda invece la conversione dell'**Allungamento massimo**  $A_0$  in **Deformazione massima**  $\epsilon_0$  la relazione da utilizzare è (pag. 49 e seg.):

$$\epsilon_0 = A_0/l_0$$

A questo punto si hanno tutti dati necessari per sviluppare la DMA non-lineare e calcolare i parametri ottenuti con le **Relazioni e-f-h-u** (pag. 333), specifici per valutare le deformazioni proprie della visco-elasticità dei fili elementari (senza interferenze con le altre forme d'assorbimento/dissipazione d'energia elencate ai **Punti a.- b.- c.** di pag. 327).

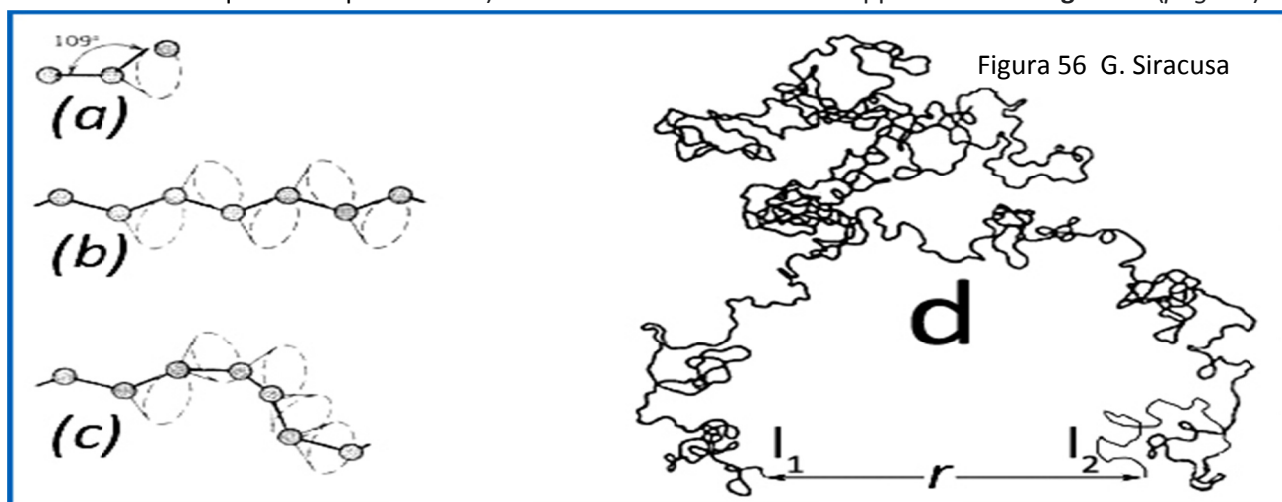
## 04. L'origine della visco-elasticità nelle fibre polimeriche

Il comportamento visco-elastico dei fili elementari, che costituiscono le corde e i cordini utilizzati in speleologia e alpinismo, deriva dalla loro struttura “semi-cristallina” che le catene di macromolecole polimeriche le conferiscono.

### 04.a) La macromolecola: struttura

Derivano da un processo di **polimerizzazione** (aggancio all'estremità di più monomeri) come descritto in **Figura 49** (pag. 61), anche attraverso la filatura a caldo (con estrusione a freddo) descritta nella **Figura 50** (pag. 61). Il numero di monomeri che vanno a comporre il filamento può superare anche le 100.000-150.000 unità base, se le condizioni sono favorevoli, come ad esempio il raffreddamento lento.

Una macromolecola può raggiungere, e superare, anche i 100 Å (Angstrom) di estensione (le dimensioni di una molecola d'acqua non superano i 2 Å) e assumere una forma come rappresentata in **Figura 56** (pag. 64).



È una **struttura rigida** più o meno aggrovigliata come rappresentata dall'**Immagine d**. Ma l'apparenza caotica non corrisponde completamente al vero in quanto la macromolecola può assumere infinite configurazioni, ma sempre rispettando, come indicato nella **Immagine (a)**, una **determinata angolazione** fra i legami fra degli atomi di base (nella fattispecie di 109° per il Nylon). Il legame atomico può ruotare, ma deve sempre mantenersi l'angolo stabilito che caratterizza ogni diverso polimero.

Questa caratteristica permette alla fibra qualsiasi configurazione sterica, dall'intensamente aggrovigliato e caotico al perfettamente allungato e lineare, come indicato **nell'Immagine (b)**.

Trazionando fra due diversi punti del filamento, anche nei Punti terminali  $l_1$  e  $l_2$ , la disposizione sterica è dunque forzata ad allungarsi e si modifica sempre **mantenendo gli stessi angoli fra i legami degli atomi che formano la catena di base**.

Più si trazona con forza crescente più la macromolecola si distende, assumendo, al limite, la **Configurazione (b)**. E' questa una strutturazione "stirata", con macromolecole distese, magari parallele le une alle altre, che favorisce la formazione di legami fra le macromolecole come nel caso del **Nylon** (pag. 65, **Figura 57**), del **Dyneema** (pag. 245, **Figura 194**) e del **Kevlar** (pag. 246, **Figura 195**).

I legami intermolecolari creano delle struttura molecolari a "nido d'ape" che conferiscono ai materiali polimerici proprietà meccaniche straordinarie, come si può vedere nella Tabella di pag. 325.

**Da notare:** nella **Figura 50** (pag. 61) che schematizza la filatura dei fili elementari di Nylon, l'ultima fase è la "trafilatura", come a dire un'azione meccanica che porta ad allungare e distendere le macromolecole per favorire la formazione di legami trasversali fra le catene.

#### **04.b) La macromolecola: deformabilità reversibile e irreversibile**

Se dopo l'applicazione di un carico la macromolecola **non si recide**, annullando la trazione che ha prodotto l'aumento della distanza  $r$  fra i terminali  $l_1$  e  $l_2$ , avviene il processo inverso: **la contrazione**.

Ma non si ritorna mai la configurazione di partenza e il "groviglio" di **Figura 56** rimane parzialmente deformato: una parte dell'energia fornita dalla applicazione del carico viene restituita "elasticamente" mentre un'altra parte è assorbita con il lavoro meccanico esercitato per produrre la deformazione permanente (di fatto lo spostamento di una forza  $\Delta L = F \times s = \text{Forza} \times \text{Spostamento}$ ).

Se invece la macromolecola viene rotta (di fatto una depolimerizzazione), allora l'energia assorbita della sollecitazione è pari al lavoro che è stato necessario produrre per portarla al cedimento (la deformazione è permanente al 100 %).

Il comportamento delle macromolecole sotto sollecitazione assorbe/dissipa energia deformandosi in modo elastico (reversibile) e plastico (irreversibile) (il che va ad aggiungersi, **in una corda**, alla CSCC e alla dissipazione per attriti/calore).

#### **04.c) L'insieme delle macromolecole nei fili elementari e l'applicazione di carichi: l'energia d'attivazione per modificare la struttura molecolare di base; la sovrapposizioni, gli attorcigliamenti e gli annodamenti delle fibre; gli attriti e i ritardi di tempo nell'attuazione delle deformazioni**

##### **04.c.a) Il superamento con inerzia della barriera dovuta all'energia d'attivazione -**

Nel momento che un carico viene applicato a un filo elementare, questi inizia ad allungarsi. Le macromolecole al suo interno sono costrette ad allungarsi di conserva e la distanza  $r$  fra i terminali  $l_1$  e  $l_2$  (**Figura 56**) aumenta. Lo stiramento di una macromolecola la costringe, come prima reazione, a cambiare la disposizione sterica, passando dalla **Configurazione c** alla **Configurazione b**. Questo passaggio comporta il superamento di una **soglia d'energia attivazione**, che implica un intervallo di tempo fra applicazione del carico e raggiungimento della configurazione finale.

##### **04.c.b) Gli attriti fra le catene di macromolecole; lo sfasamento fra il raggiungimento del culmine della forza applicata e il completamento dell'elongazione**

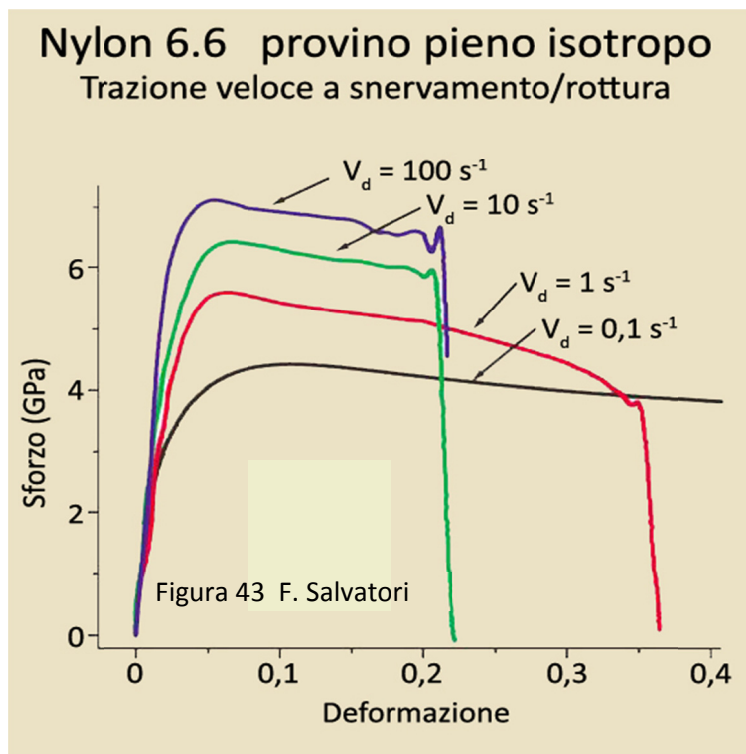
– La deformazione di un filo elementare porta inevitabilmente a movimenti con velocità differenziate delle fibre polimeriche che contiene e quindi alla produzione di attriti, che impongono una dissipazione d'energia prolungata nel tempo che crea, anche in questo caso, uno sfasamento fra i tempi di applicazione della forza e il conseguente allungamento.

Queste forze d'attrito che si oppongono allo stiramento delle catene di macromolecole sono tanto più intense quanto maggiore è il livello di sovrapposizione, intreccio e annodatura. Anche il tempo di sfasamento aumenta di conseguenza.

#### 04.c.c) Velocità di deformazione, attriti e variazioni delle caratteristiche meccaniche delle fibre polimeriche

– È uno dei principi fondamentali del comportamento dei materiali che in una sollecitazione, aumentando la Velocità di deformazione  $V_d$  (la velocità con cui si allunga un campione di lunghezza unitaria quando è sottoposto a trazione, pag. 52 e seg., **Relazione 15**, **Figura 41**), un materiale isotropo come l'acciaio, il Nylon, il Dyneema, il Kevlar (quindi **non una corda** che è un elemento anisotropo) risulti più capace di resistere al cedimento e aumenti la sua rigidità: aumenta sia lo Sforzo di rottura  $\sigma_r$ , che il Modulo d'elasticità  $E$  (pag. 21, **Relazione 1**; pag. 23, **Figura 11**).

Meglio rende il concetto la **Figura 43** (pag. 54) dove sono riportate le curve Sforzo/Deformazione  $\sigma = E(\epsilon)$  per test a  $V_d$  variabile su un provino di Nylon 6.6: si conferma chiaramente che aumentando  $V_d$  cresce anche la capacità di resistere allo snervamento/rottura e la pendenza delle curve è più ripida, indice di un aumento del Modulo d'elasticità.



Questo comportamento nelle fibre polimeriche è dovuto agli attriti che si creano nel groviglio delle catene di macromolecole (pag. 64, **Figura 56**), soprattutto nelle parti amorfe (pag. 63, **Figura 55**). Infatti, aumentando la velocità con cui si allunga l'elemento sottoposto a test, le forze d'attrito che si oppongono al districarsi del groviglio aumentano, con conseguente aumento della rigidità e la richiesta di una quantità maggiore d'energia per produrre il cedimento.

**Da notare:** questo principio non vale se la sollecitazione si applica a una corda, perché questa assorbe energia anche con altri meccanismi (CSCC, calore prodotto dagli attriti dei vari elementi di una corda, cedimento eventuale di fili elementari). Accade infatti che questi altri meccanismi,

aggiungendo "duttilità", annullino e sopravanzino l'effetto prima ricordato. Si fa presente che la sola CSCC aggiunge "deformabilità" dal 20 % (corda statica) a oltre il 50 % (corda dinamica).

#### 04.d) La viscosità delle fibre polimeriche è la conseguenza delle forze di attrito che si manifestano fra le catene di macromolecole contenute in un filo elementare

Dunque il **comportamento viscoso** che si rileva con l'Esperimento di Creep (pag. 332, **Figura H**) e nei test a caduta (pag. 334, **Figure 36-38**), caratterizzato dal fatto che parte delle deformazioni subite per l'applicazione di un carico **non si attuano in sintonia** con la manifestazione della forza, è dovuto alla difficoltà di districare e allungare, con una trazione dei fili elementari, l'inviluppo delle catene di macromolecole.

Tanto maggiore è il grado di sovrapposizione, di attorcigliamento e di annodamento tanto maggiore risulterà il grado di viscosità del materiale, che è misurato dal Coefficiente di viscosità  $\eta$  (pag. 333, **Relazione u**). Più elevato il valore di  $\eta$  maggiore risulterà la capacità di assorbire energia.

**Da notare:** se applicando un carico le catene di macromolecole tendono a distendersi, assumendo una struttura più ordinata e libera d'attriti, è evidente che a una successiva applicazione di un carico il grado e il coefficiente di viscosità risulterà minore. Pertanto una successione di sollecitazioni (come avviene nei test a caduta; pag. 174 e seg.) conduce a una graduale eliminazione della viscosità e della capacità dei materiali polimerici di assorbire/dissipare energia con le deformazioni.

### 04.e) La capacità di dissipazione dell'energia da parte dei fili elementari dipende anche dall'estensione dei settori dei fili elementari occupati da insiemi di catene di macromolecole che generano viscosità

Nei fili elementari polimerici (com'è esposto nel dettaglio qui di seguito nel Prontuario) i settori dove sono presenti insiemi di catene di macromolecole che provocano fenomeni di viscosità sono più o meno estesi: la risposta viscosa è in dipendenza diretta anche della misura di questi settori.

Infatti, tanto maggiore è lo spazio occupato l'aggrovigliamento caotico delle macromolecole tanto più elevata risulterà la capacità del materiale polimerico d'assorbire/dissipare energia. Una misura di questo fatto è data dal valore di (pag. 333):

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

ricavato attraverso la DMA non-lineare (pag. 312 e seg.)

## 05. La struttura semi-cristallina delle fibre polimeriche nuove (mai sottoposte a usura); grado di cristallinità

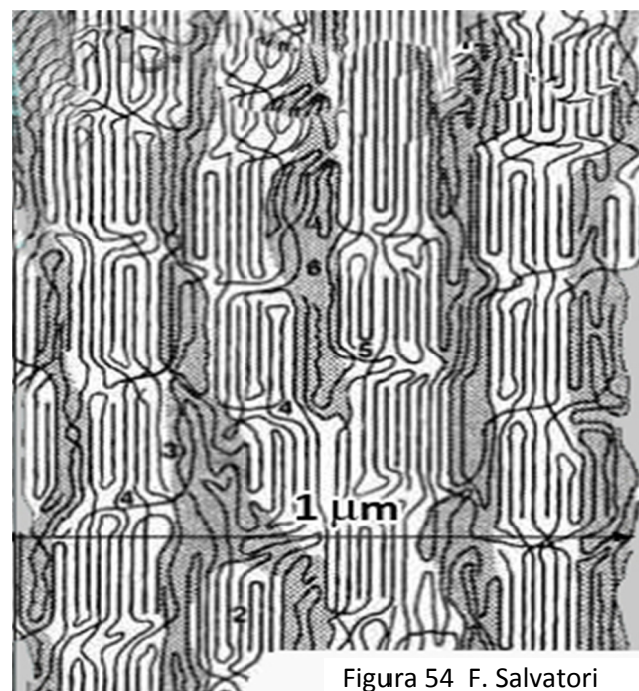
### 05.a) La semi cristallinità del materiale polimerico

Attraverso la **Diffrazione dei raggi X** è possibile rilevare la distribuzione e la conformazione delle catene di macromolecole nei vari polimeri.

Analizzando la costituzione interna di un filo elementare (pag. 324, **Figura 10**) si mostra la **strutturazione semi-cristallina** dei polimeri (pag. 63, **Figure 53-54**) (esempi che si riferiscono al Nylon). Le catene di macromolecole assumono delle **disposizioni ordinate** in certi settori, con allineamenti paralleli; mentre in altre zone la disposizione è aggrovigliata in modo caotico.

Una disposizione riscontrata di frequente è quella rappresentata in **Figura 55**: stratificazioni che alternano settori cristallini a settori amorfi.

### 05.b) Il grado (o rapporto) di cristallinità



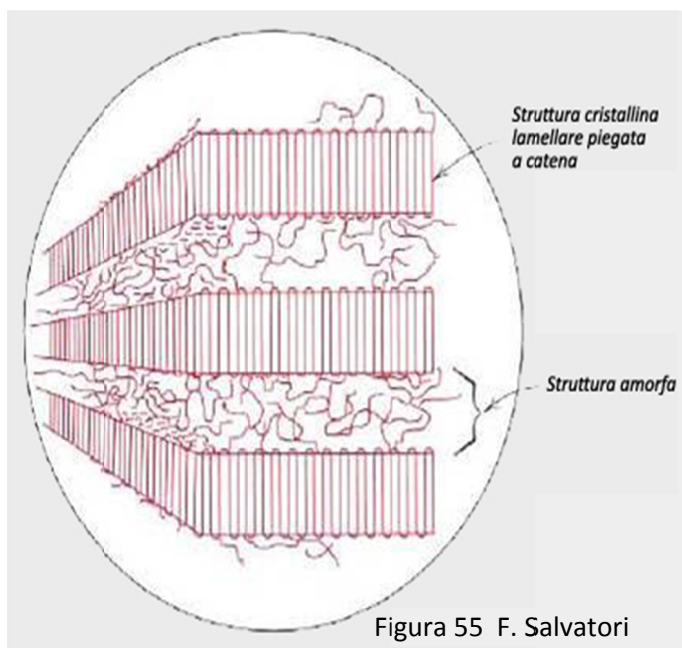


Figura 55 F. Salvatori

Di grande rilievo è il **Grado (o Rapporto) di cristallinità**, ricavabile percentualmente in base all'estensione complessiva delle due conformazioni (**Figure 53-54-55**).

Ogni polimero è caratterizzato da un **Grado di cristallinità**, che raggiunge dopo aver completato correttamente il processo di filatura (*pag. 61, Figure 49-50*).

Nella Tabella sottostante (*pag. 325*) sono riportati i Gradi di cristallinità standard delle fibre più utilizzate nelle corde speleo-alpinistiche.

Ma è sufficiente che il contenuto d'umidità nella materia prima sia più elevato del dovuto per ridurre il Rapporto di cristallinità a favore delle zone amorphe.

Polimero	Tenacità (N/Tex)	Modulo (GPa)	Cristallinità (%)	Temp. fusione °C	Densità g/cm <sup>3</sup>
Poliammide Nylon 6	0,47	2,6	50	218	1,14
Poliammide Nylon 6.6	0,64	8,0	70	265	1,14
Kevlar Aramide 48	2,03	72	<80	360-500	1,45
Dyneema Polietilene	2,80	142	<80	150	0,97

Inoltre, se la velocità di raffreddamento non è quella stabilita, l'estensione delle zone amorphe varia: tanto più il raffreddamento è lento tanto maggiore sarà l'estensione dei settori cristallini.

Il Grado di cristallinità varia in un dato polimero (in genere diminuisce) sotto l'azione dei fattori usuranti che agiscono nella progressione speleo-alpinistica (acqua, calore, successione di sollecitazioni, ossidazione, ozonizzazione, ecc.). Argomento, questo, trattato dettagliatamente nel proseguo del Prontuario.

### **05.d) Rafforzamento delle Strutture cristalline con legami intermolecolari; crescita della capacità di resistere alla rottura ( $\sigma_T$ ) e agli allungamenti ( $E$ )**

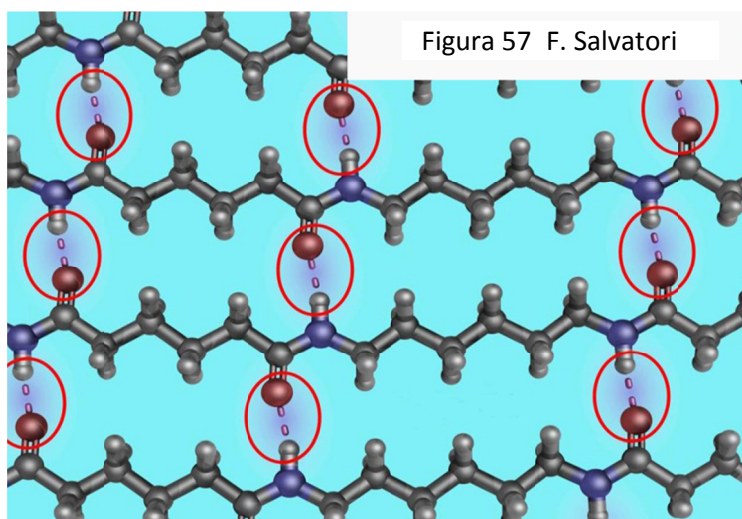


Figura 57 F. Salvatori

La disposizione con catene parallele tipica dei settori cristallini permette che atomi di una catena polimerica siano prospicienti ad altri atomi, di polarità diversa, di una catena polimerica adiacente e parallela, come accade per il Nylon 6 (*pag. 65, Figura 57*).

In questo caso gli atomi d'Idrogeno di una catena sono opportunamente (distanza ridotta) prospicienti agli atomi d'Ossigeno della catena accanto, da tutti i lati. In tal modo viene costruita una struttura tridimensionale a "nido d'ape" che rafforza le zone cristalline, conferendo una maggiore resistenza al cedimento e alle deformazioni.

I collegamenti che si formano sono dei Legami idrogeno, con attrazione elettrostatica e senza sovrapposizione d'orbitali, quindi deboli.

Una situazione analoga si attua nei settori cristallini del Dyneema (pag. 245, **Figure 193-194**) e del Kevlar (pag. 246, **Figura 195-196**). Nel Dyneema i collegamenti intermolecolari sono Legami di Van der Waals, mentre nel Kevlar sono di nuovo "idrogeno". Questo spiega la straordinaria rigidità di questa fibra aramidica.

**Da notare:** le fibre come il Nylon sono igroscopiche (assorbono acqua facilmente) e pertanto i legami idrogeno prima descritti, **in grotta**, dove l'Umidità relativa è costantemente al 100 % (che equivale all'immersione totale in acqua), vengono eliminati e la fibra perde il rafforzamento a "nido d'ape" e il Carico di rottura diminuisce fino al 10 % e più (pag. 105 e seg.). Con la presenza d'acqua il polimero "plastifica", come a dire fa aumentare, di fatto, le zone amorfe e diminuire la capacità d'assorbire energia.

## 06. La struttura semi-cristallina di fibre polimeriche nuove e la risposta visco-elastica

Nella **Figura H** (pag.332) i grafici che rappresentano l'esperimento di Creep si evidenzia che nei fili elementari la **risposta visco-elastica** all'applicazione di un carico è composta da due diversi tipi di deformazione:

1. una "**elastica**" che risponde immediatamente sia all'applicazione del carico che alla sua eliminazione ed è completamente reversibile;
2. un'altra "**viscosa**" che procede superando gli attriti fra le catene di macromolecole e richiede un certo tempo per potersi completare, creando dunque uno sfasamento fra avvento di  $F_0$  e di  $A_0$ .

La **risposta elastica** fa riferimento ai **settori cristallini della fibra polimerica**, i quali sotto sollecitazione, proprio come in un cristallo, si allungano, facendo flettere i legami chimici; ma senza modificarne la posizione in modo permanente (ne tantomeno romperli).

Appena tolta la forza traente, i legami riacquistano le posizioni iniziali, la struttura cristallina riassume la configurazione di partenza e viene **restituata tutta l'energia assorbita**.

D'altro canto la **risposta viscosa** fa riferimento ai settori amorfi con catene di macromolecole aggrovigliate, sovrapposte, attorcigliate, annodate (pag. 335, **Figura 56**) e quindi con **gli attriti** che oppongono forze all'allungamento del materiale e **ritardano il compimento** della Deformazione massima. L'energia viene **dissipata** (non assorbita) in maniera irrecuperabile **in calore** (cresce l'entropia nella corda e nell'ambiente circostante).

Tolto il carico, il **groviglio di catene di macromolecole non recupera la posizione iniziale** se non **parzialmente** e sempre in **funzione del tempo**. E' questo un modo di assorbire l'energia che si va ad **aggiungere** a quello legato alla **deformazione elastica**.

Da ciò discende che l'Analisi Dinamico Meccanica a seguito di un test d'isteresi a caduta abbia come equazioni costitutive (pag. 309 e seg.):

$$\sigma = \sigma_0 \cos\delta \sin\omega t + \sigma_0 \sin\delta \cos\omega t$$

$$\sigma/\varepsilon_0 = E' \sin\omega t + E'' \cos\omega t$$

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

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

il primo fattore  $E'$  rappresenta la capacità delle **zone elastiche** delle fibre di assorbire energia, restituendola poi; il secondo  $E''$  è relativo alle **zone amorfe** dove l'energia viene dissipata. In sintesi la **viscosità è generata dalle zone amorfe**, mentre l'**elasticità nasce nei settori cristallini**.

Se si vuole invece valutare il grado di visco-elasticità nel suo insieme e le sue variazioni il parametro adeguato, sempre ottenuto tramite la DMA, è il Fattore di perdita (pag. 313):

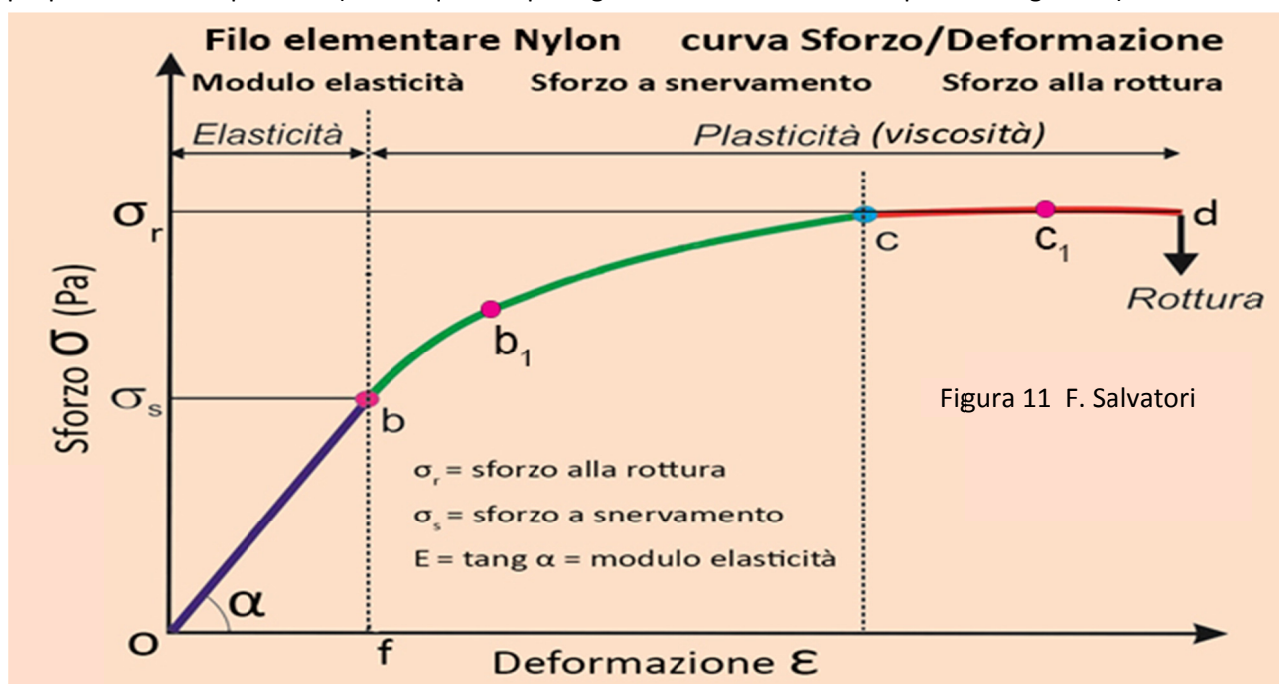
$$E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita}$$

## 07. Evoluzione della struttura semi-cristallina delle fibre polimeriche nuove a seguito dell'applicazione di un carico o della successione di sollecitazioni

Se sottoponiamo una corda speleo-alpinistica (o un cordino) ad allungamento tramite trazione con forza crescente o con una successione di choc a caduta di un peso, l'energia trasmessa viene assorbita/dissipata tramite i meccanismi elencati alle pagg. 328-328.

Rispetto al meccanismo indicato al **Punto d** (la natura visco-elastica dei fili elementari) l'allungamento tramite trazione con forza crescente cambia progressivamente la struttura semi-cristallina delle fibre, modificando l'organizzazione d'insieme delle catene di macromolecole, sia nelle zone cristalline che in quelle amorfe. I cambiamenti sono più marcati soprattutto in quest'ultimi settori, dove le deformazioni richiedono quantità d'energia inferiori rispetto a quelle richieste per nelle zone cristalline.

Per meglio evidenziare il fenomeno della "disgregazione" delle strutture semi-cristalline dei polimeri prendiamo, in partenza, quella indicata a pag. 338 (**Figura 55**), una delle più comuni fra le tante che sono proprie dei diversi polimeri (comunque si equivalgono nella sostanza delle quote energetiche).



Sottoponendo dunque 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 in quanto si conosce 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, attriti e rotture non considerati).

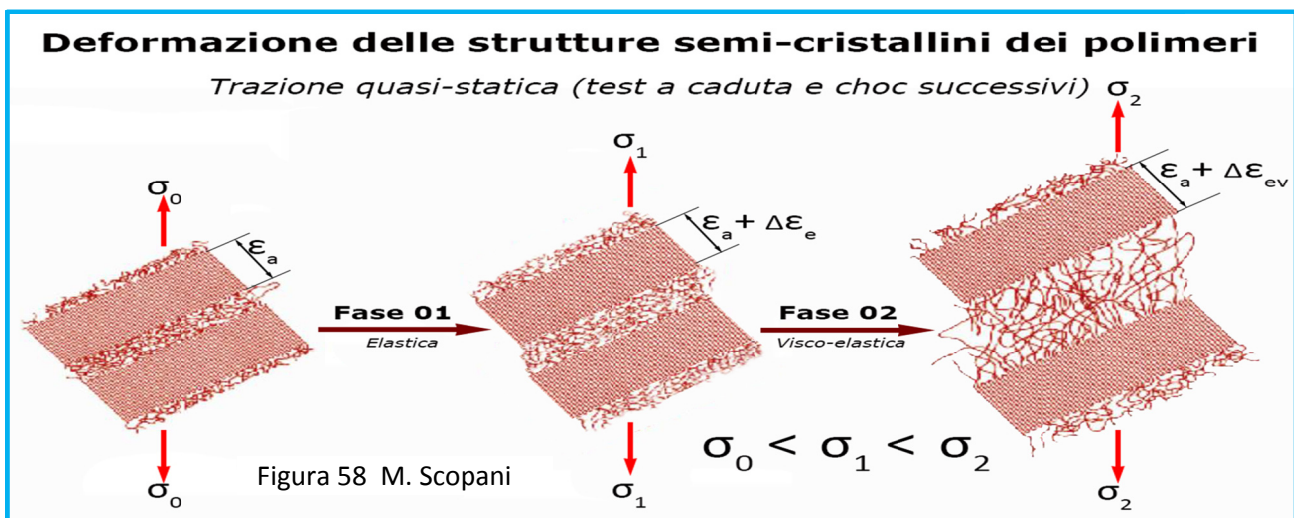
In questo grafico è possibile distinguere i vari tratti della curva, collegandoli con quanto accade nelle catene di macromolecole che costituiscono il materiale semi-cristallino dei fili elementari, sia nei settori cristallini che in quelli amorfi.

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 (pag. 68, **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  $\epsilon_a$  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.



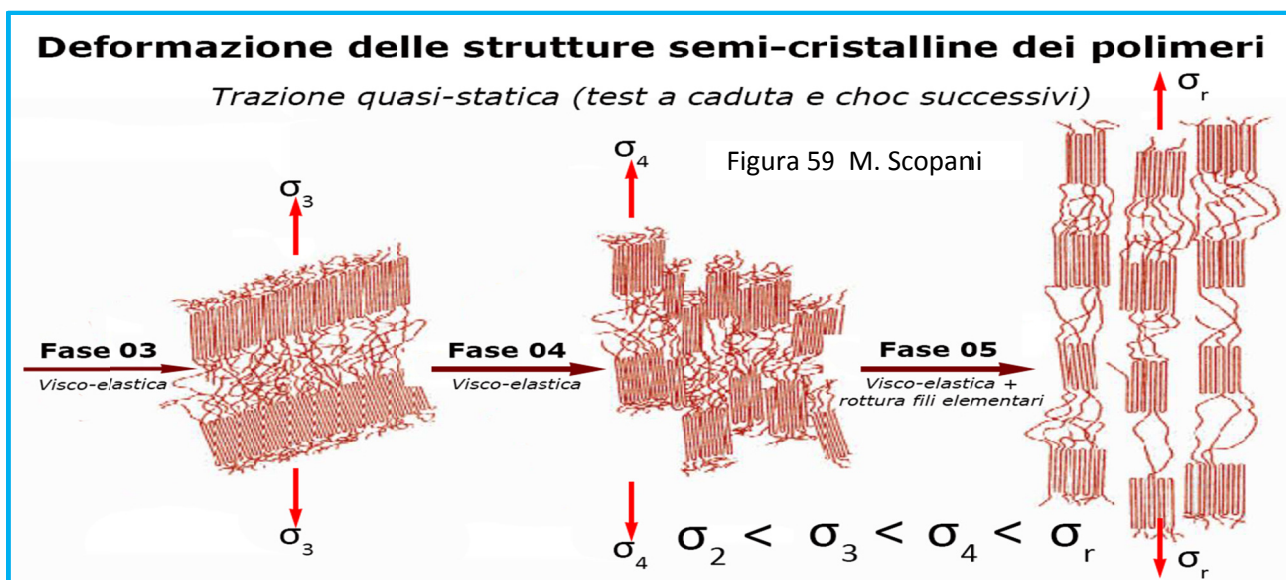
Per la parte amorfa, osservando la **Figura 56** (pag. 335), si comprende quanto avviene nella realtà delle catene polimeriche, se prese singolarmente: la **Catena d**, per effetto della trazione, i capi  $l_1$  e  $l_2$  si allontanano e la distanza  $r$  aumenta. Ma questa crescita di  $r$  è ancora 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 – b<sub>1</sub>** della curva di **Figura 11** le deformazioni sono in parte **elastiche** e in parte **plastiche** irreversibili: nella **Catena d** (pag. 335, **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<sub>1</sub> – c** della curva di **Figura 11** lo Sforzo di trazione  $\sigma_3$  produce deformazioni sempre crescenti e si attua la **Fase 3** della **Figura 59**): nelle lamelle le catene ripiegate ordinatamente scrono 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 ( $\sigma_4$ ), 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 amorfici prendono il sopravvento.

Anche la possibilità che i blocchi cristallini si affianchino opportunamente per creare legami idrogeno (o di Van der Waals) intermolecolari diminuisce drasticamente: il filo elementare non oppone più resistenza di un fluido altamente viscoso.

Proseguendo con l'applicazione di carichi oltre la **Fase 05** può accadere, al limite, che l'insieme di agglomerati di catene di macromolecole raggiunga una resistenza contro la rottura così bassa da provocare il cedimento dei fili elementari (e quindi la rottura della corda che compongono). Ed è l'ipotesi più probabile.

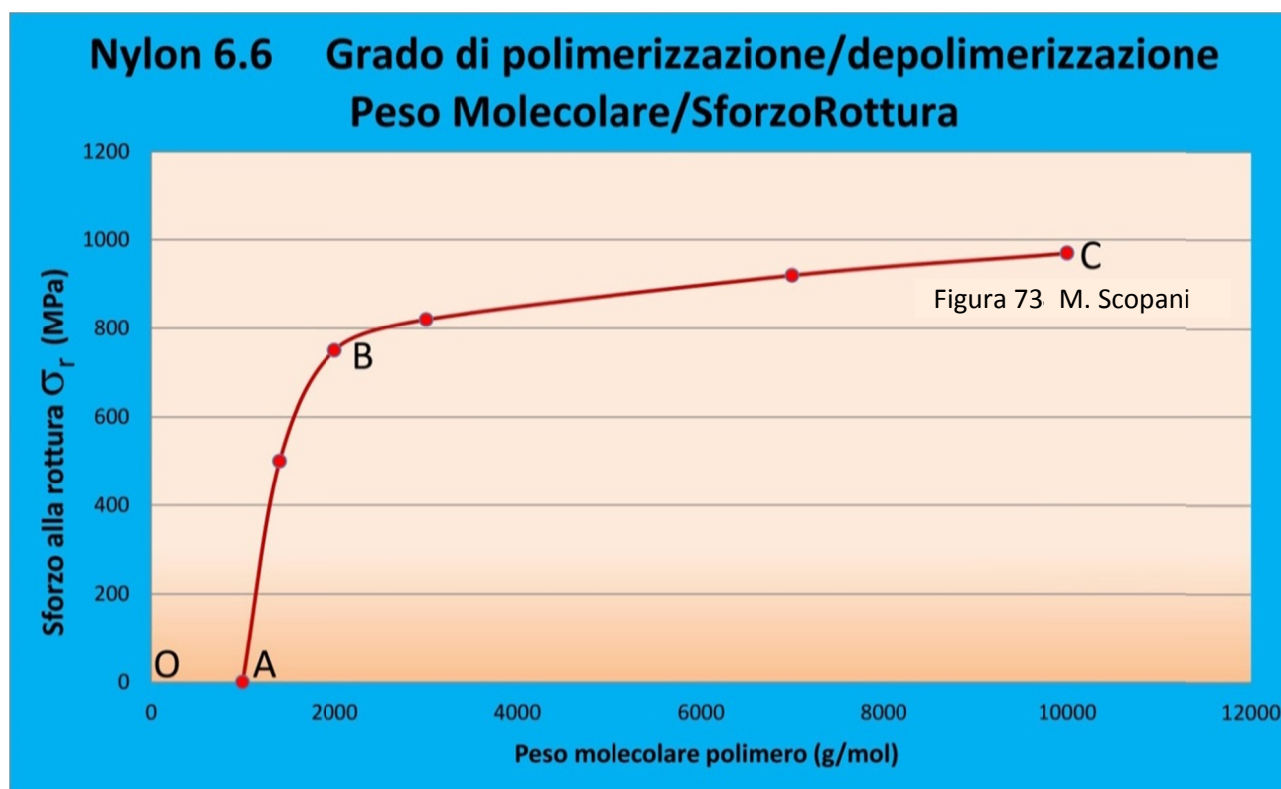
Altrimenti, il passo successivo è lo spaccettamento dei settori cristallini rimasti, per trasformarli in settori amorfi. Ma questo è verosimilmente un processo che richiede forze di trazione così elevate, rendendolo, quindi, impossibile rispetto al cedimento dei fili elementari.

Da quanto detto s'intravede che le fibre polimeriche, sottoposte a trazione continua o con applicazione ripetute, tende a perdere viscosità; al limite annullandola. Ma questa è solo teoria, perché, come già detto, sopravviene prima il cedimento.

A tal proposito, è da costatare che l'applicazione di carichi sulle fibre polimeriche (non le corde, dunque) porta alla rottura di legami, fra atomi ma soprattutto intermolecolari, e quindi, di fatto, a una depolimerizzazione, con diminuzione del Peso molecolare medio o numerico  $M_n$ .

Questa depolimerizzazione fa ridurre il valore dello Sforzo alla rottura  $\sigma_r$  come indicato dal grafico di **Figura 73** (*pag. 82*).

Nel tratto **C - B** della curva  $\sigma_r = f(M_n)$ , passando da 10.000 a 2.000 in ascissa, si ha una lenta diminuzione dello Sforzo alla rottura di circa **200 MPa**. Da 2.000 a 1.000 il valore di  $\sigma_r$  crolla, annullandosi.



## 08. Evoluzione della struttura semi-cristallina dei fili elementari nuovi che compongono le corde speleo-alpinistiche a causa dell'uso in grotta e montagna

Le corde speleo-alpinistiche, con l'uso in grotta e in montagna, perdono progressivamente le proprie **caratteristiche meccaniche**, come ad esempio il Carico di rottura  $F_r$  e il Modulo d'elasticità  $E$ . Il che significa compromettere caratteristiche fondamentali, e cioè la capacità delle corde di assorbire l'energia di un'ipotetica caduta e di resistere alla rottura.

Questo decadimento è dovuto alla riduzione dell'effetto prodotto dalla **CSCC** (pag. 328), all'eventuale **cedimento di fili elementari** (pag. 331) e alla **degradazione**, per vari fattori, del **materiale dei fili elementari**.

Questi fattori, di diversa natura, derivano dal contatto con l'acqua e fonti di calore, nonché da azioni come da elenco indicato nella **Tabella** di pag. 89.

Questi fattori usuranti, singolarmente o in sinergia, vanno a modificare, com'è possibile verificare con la DMA (pag. 312 e seg.), o i **settori cristallini** (e quindi la risposta elastica rappresentata dal **Modulo conservativo  $E'$** ) o le **zone amorphe** (e quindi la risposta plastica viscosa rappresentata dal **Modulo dissipativo  $E''$** ) o **l'insieme della struttura semi-cristallina** (e quindi la risposta visco-elastica rappresentata dal **Fattore di perdita  $E''/E' = \tan \delta$** ).

### 08.a) Le fibre polimeriche nuove: evoluzioni delle caratteristiche meccaniche a contatto con l'acqua per immersione o esposizione all'aria umidificata (Umidità Relativa, U.R.)

I fili elementari costituiti da materiale polimerico sono generalmente igroscopici, cioè assorbono molecole d'acqua in quantità variabile che si distribuiscono all'interno dell'insieme di macromolecole, seguendo leggi ben precise in funzioni delle caratteristiche del materiale e delle condizioni dell'ambiente circostante esterno. Fra le fibre più comuni alle corde speleo e cordini speleo-alpinistici il **Dyneema non è igroscopica**.

**Premessa importante:** per le fibre di Nylon 6, Nylon 6.6 e il Kevlar, tutte igroscopiche, l'esposizione in una atmosfera con U.R. al 100 % equivale all'immersione completa in acqua. Pertanto ogni volta che una corda entra in grotta, dove l'U.R. è al 100 % costante, subisce l'azione della presenza di molecole d'acqua all'interno dei fili elementari con conseguenti azioni di degrado (come nel proseguo di questo Prontuario è spiegato nei particolari).

Questo processo d'idratazione avviene in pochissime ore, in quanto le ridotte dimensioni dei fili elementari (circa **28  $\mu\text{m}$** ) permettono una penetrazione delle molecole d'acqua a una velocità tale da produrre una diffusione omogenea nella fibra in poche decine di minuti.

**08.a.a) Acqua e Nylon: igroscopia, leggi che regolano l'assorbimento di molecole d'acqua, quantità massima assorbita, velocità d'assorbimento, dipendenza dalla temperatura-ambiente e dal diametro dei fili elementari** - I grafici riprodotti qui di seguito sono il frutto di una ricerca sperimentale "Poliammidi Assorbimento di umidità" della LATI [24] [29].

I fili elementari di Nylon, e quindi le corde da questi composte, variano marcatamente le loro caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche in funzione della quantità d'**acqua** assorbita, che può raggiungere fino al 10 % in peso.

**08.a.a.1) Teoria della diffusione igroscopica, legge di Fick e quantità massima assorbita** - 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]

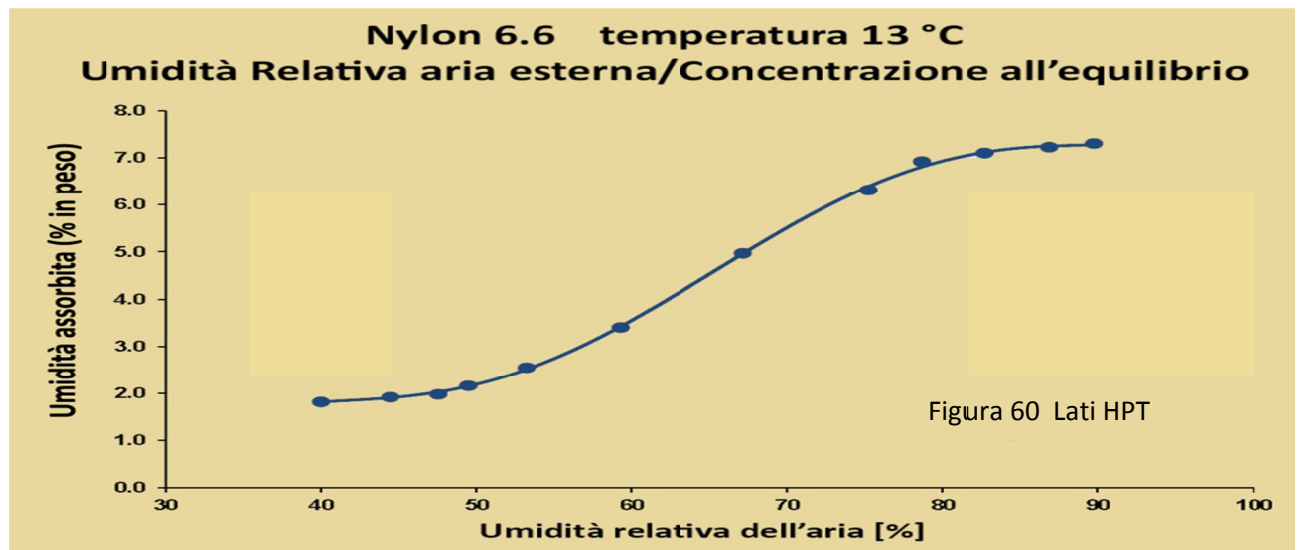
$t$  = tempo [s]

$x$  = penetrazione elemento poliammide [mm]

$D$  = coefficiente di diffusione [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]

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

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

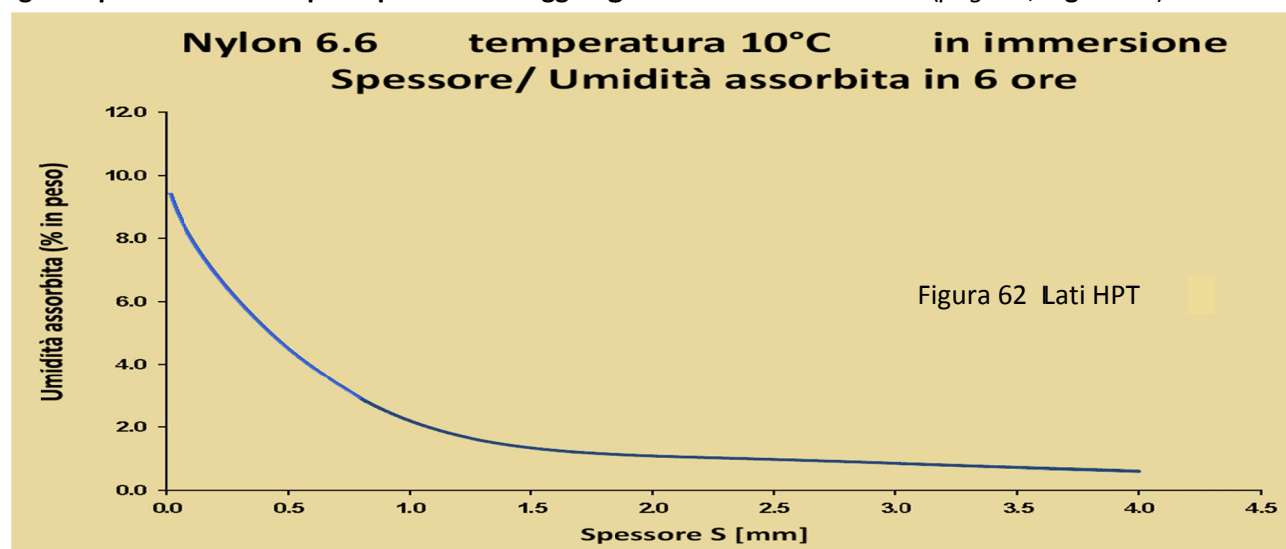


In forza della **Relazione 17**, il fenomeno della penetrazione igroscopica delle molecole d'acqua nei fili elementari di Nylon **si esaurisce** quando al loro interno viene, uniformemente, **raggiunta la concentrazione d'equilibrio  $C_{eq}$** .

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** (pag. 71). Se le corde sono immerse totalmente in acqua la condizione è equivalente a quella prodotta con una umidità relativa pari al 100 % [29].

La quantità d'acqua igroscopica assorbita varia con la temperatura-ambiente (pag. 71, **Figura 61**): il valore del Coefficiente di diffusione  $D$  aumenta con la temperatura, sensibilmente, e a temperatura superiore ai 23°C e U.R. 100 % si può raggiungere, con il Nylon 6.6 il 9 – 10 % di concentrazione all'equilibrio [14].

**08.a.a.2) Velocità d'idratazione e dimensioni fili elementari** - Nella **Figura 62** (pag. 72) è diagrammata, in funzione dello spessore, la percentuale di **umidità assorbita in 6 ore** da un campione isotropo di Nylon 6.6 **introdotto in grotta o immerso in acqua: tanto minore è lo spessore da penetrare igroscopicamente tanto più rapido sarà il raggiungimento della saturazione** (pag. 72, **Figura 63**).



E' evidente che con diametri dei fili elementari di **28  $\mu\text{m}$**  si raggiunge quasi la saturazione in meno di 6 ore.

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

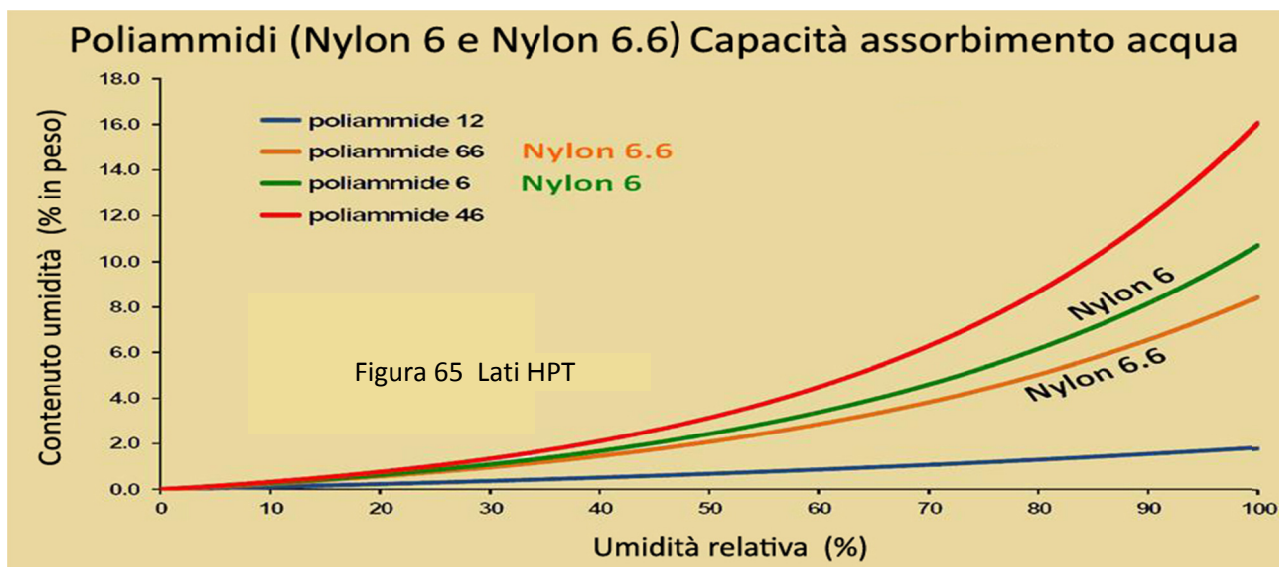
1. **umidità relativa dell'aria** (nel caso d'immersione totale equivale al 100 %): più è alta, maggiore è la quantità d'acqua assorbita;
2. **limite massimo d'acqua assorbibile** a temperatura ambiente: 10 % in peso;
3. **temperatura dell'ambiente**: il suo aumento favorisce l'incremento del coefficiente 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  $\mu\text{m}$ ) 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**.

**08.a.a.3) Grado di cristallinità dei fili elementari e assorbimento d'acqua** - Facendo riferimento alla **Figura 65** (pag. 73) è dimostrato sperimentalmente che le fibre con settori amorfi percentualmente più estesi (pag. 63, **Figure 53-54-55**), a parità delle altre condizioni, assorbono una quantità maggiore d'acqua.

Nella **Figura 65** (pag. 73) infatti, è reso ben evidente quanto la realtà sperimentale confermi quest'ultima considerazione: quattro campioni isotropi di Nylon a diverso grado di cristallinità (pag. 62 e seg.), esposti in a condizioni di U.R. crescente, assorbono quantità di molecole d'acqua igroscopica in funzione inversa al

grado di cristallinità. Infatti la **Poliammide 46** ha un grado di cristallinità pari al **30 % - 35 %**; nella **Poliammide 6** (Nylon 6.6) il grado sale al **50 % - 55 %**; nella **Poliammide 6** (Nylon 6) cresce ancora al **70 % - 75 %**; infine, nella **Poliammide 12** il grado di cristallinità aumenta al **di sopra dell' 80 %**.

Questo fenomeno è dovuto al fatto che nelle zone amorfe lo spazio fra le macromolecole è maggiore, permettendo alle molecole d'acqua di penetrare in maggiore quantità.



Sempre dai grafici di **Figura 65** si ricava anche che con l'U.R. al 100 % (come in grotta o in immersione totale in acqua) il massimo dell'assorbimento d'acqua igroscopica nel **Nylon 6** è **del 10 %**, mentre nel **Nylon 6.6**, più cristallino, è **dell'8 %**. Data la maggiore cristallinità, quest'ultima fibra è meno sensibile alla "plasticizzazione" prodotta dalla presenza d'acqua; ciò indica che il Nylon 6.6 è più adatto agli ambienti umidi tipo grotta o forra.

**08.a.b) Acqua e Nylon: la quantità assorbita è in funzione dell'Umidità Relativa dell'ambiente esterno** – Dalla precedente **Figura 60** (pag. 345) risalta con chiarezza che il grado d'idratazione igroscopico dipende dall'U.R. dell'ambiente esterno, con un massimo dell' 8 % - 10 % quando le condizioni sono quelle dell'ambiente ipogeo. Questo è confermato anche dai grafici delle soprastante **Figura 65**.

**08.a.c) Acqua e Nylon: idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari** - Da quanto esplicitato nella **Figura 57** (pag. 64 e seg.) (pag. 339, Punto 05.d), 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 maggiore 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 Prontuario). Ricordiamo ancora una volta che **i legami idrogeno agiscono in tutte e tre le dimensioni dello spazio** e possono collegare le catene polimeriche adiacenti in ogni direzione.

**Da notare:** quanto detto per il Nylon vale anche per il Kevlar, sempre igroscopico e con situazioni analoghe nel coordinamento fra le catene di macromolecole (pag. 245, **Figura 194**). **Non vale invece per le fibre di Dyneema, non essendo igroscopiche** (e questo dovrebbe essere un **punto a favore della scelta di questo tipo di polimero per l'uso in grotta**).

E' dunque evidente che ogni fattore che porti a eliminare o ridurre l'effetto idrolisi, cioè il numero di Legami idrogeno intermolecolari, influenza negativamente le proprietà meccaniche del Nylon.

L'idrolisi dei legami idrogeno avviene per idratazione polarizzata degli atomi di **Ossigeno (B)** e di **Idrogeno (A)**, come indicato nella **Figura 67** (pag. 75). Quest'azione rompe i legami che costituiscono la base della struttura "a nido d'ape", rendendo il filo elementare più cedevole e più propenso alla rottura. Si dice che il polimero viene "plasticizzato" dalla presenza di umidità al suo interno (tranne il Dyneema, non igroscopico).

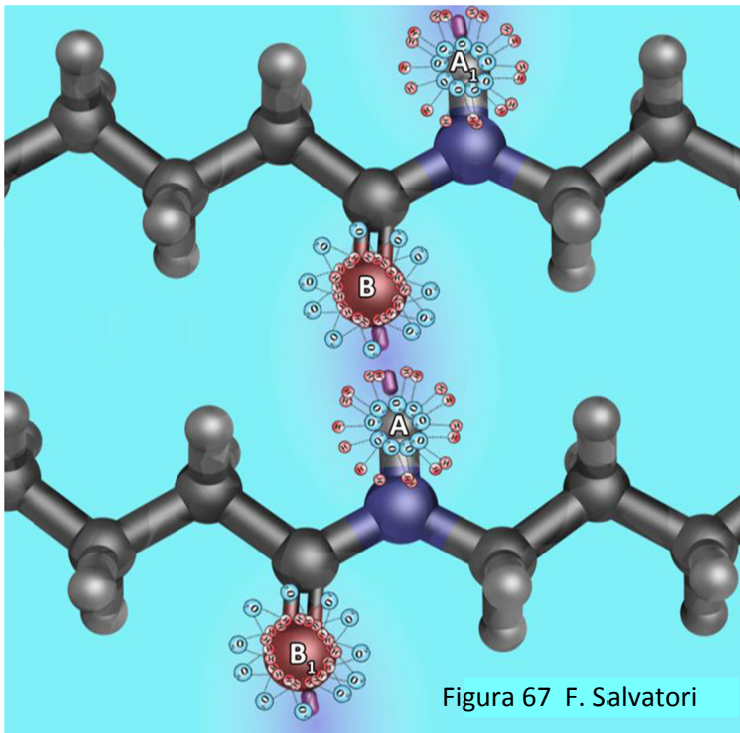


Figura 67 F. Salvatori

Il fenomeno dell'idratazione e la conseguente azione di rottura dei legami intermolecolari si attuano, date le ridottissime dimensioni dei fili elementari, in tempi relativamente brevi (pag. 346, Punto 07.a.a.2, Figura 65). In qualche ora si completa l'assorbimento di molecole d'acqua e contestualmente si rompono i legami idrogeno intermolecolari.

### 08.a.d) Acqua e Nylon: "effetto idrolisi" e riduzione delle caratteristiche meccaniche della fibra polimerica

– Dalla Figura 69 (pag. 77) si ha un'indicazione importante sulla dipendenza delle proprietà meccaniche di una fibra polimerica (Nylon 6 e Nylon 6.6) dal grado d'idratazione: tanto maggiore è il

contenuto di molecole d'acqua, tanto più marcata è la diminuzione della Sforzo a snervamento e del Modulo d'elasticità.

Dalle caratteristiche in condizioni ambiente chiuso "magazzino" ( $U.R. = 40\%$ ) a quelle in condizione "Grotta" ( $U.R. = 100\%$ ) la Sforzo a snervamento diminuisce **del 40% nel Nylon 6.6 e del 57% per il Nylon 6**. Il Carico di rottura  $F_r$  diminuisce e il Modulo d'elasticità  $E$  s'innalza. Dunque l'effetto idrolisi incide, negativamente, in maniera rilevante.

### 08.b) Le corde speleo-alpinistiche nuove e usate: valutazioni sperimentali dell'effetto idrolisi

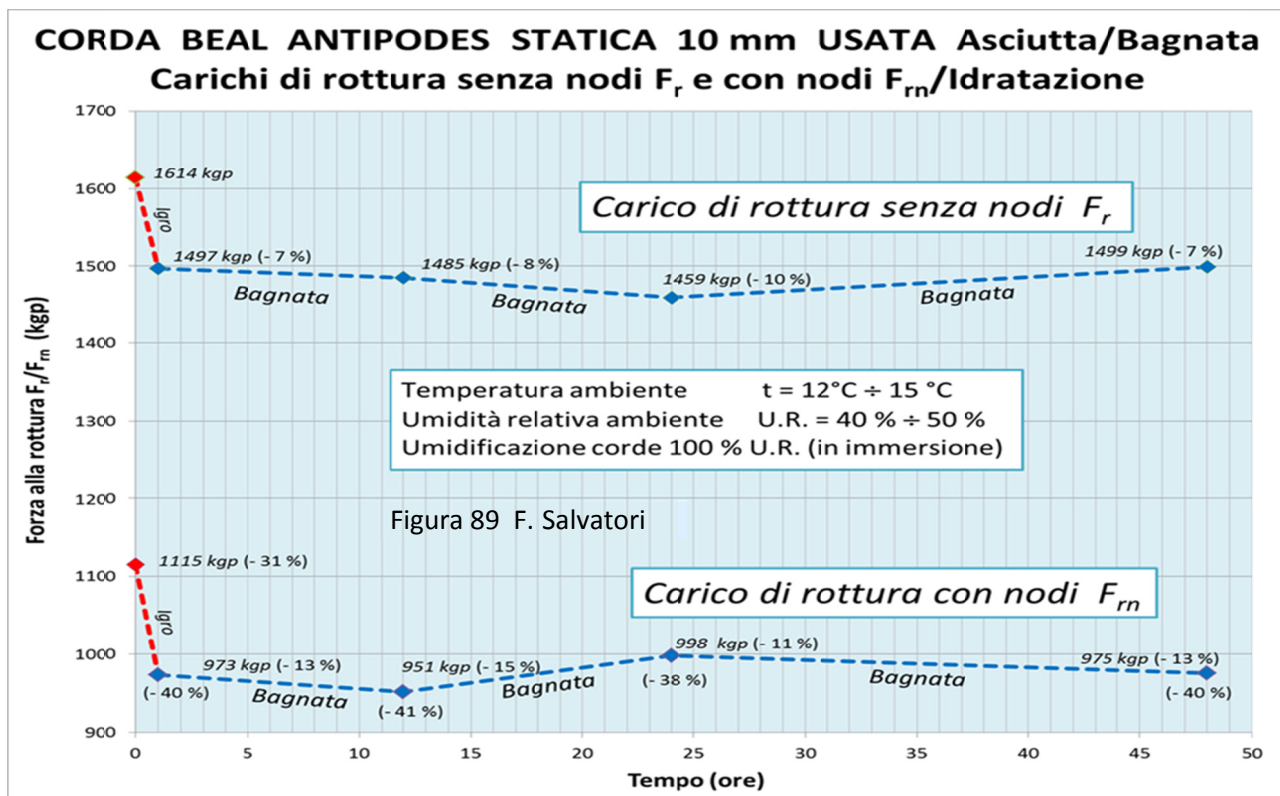
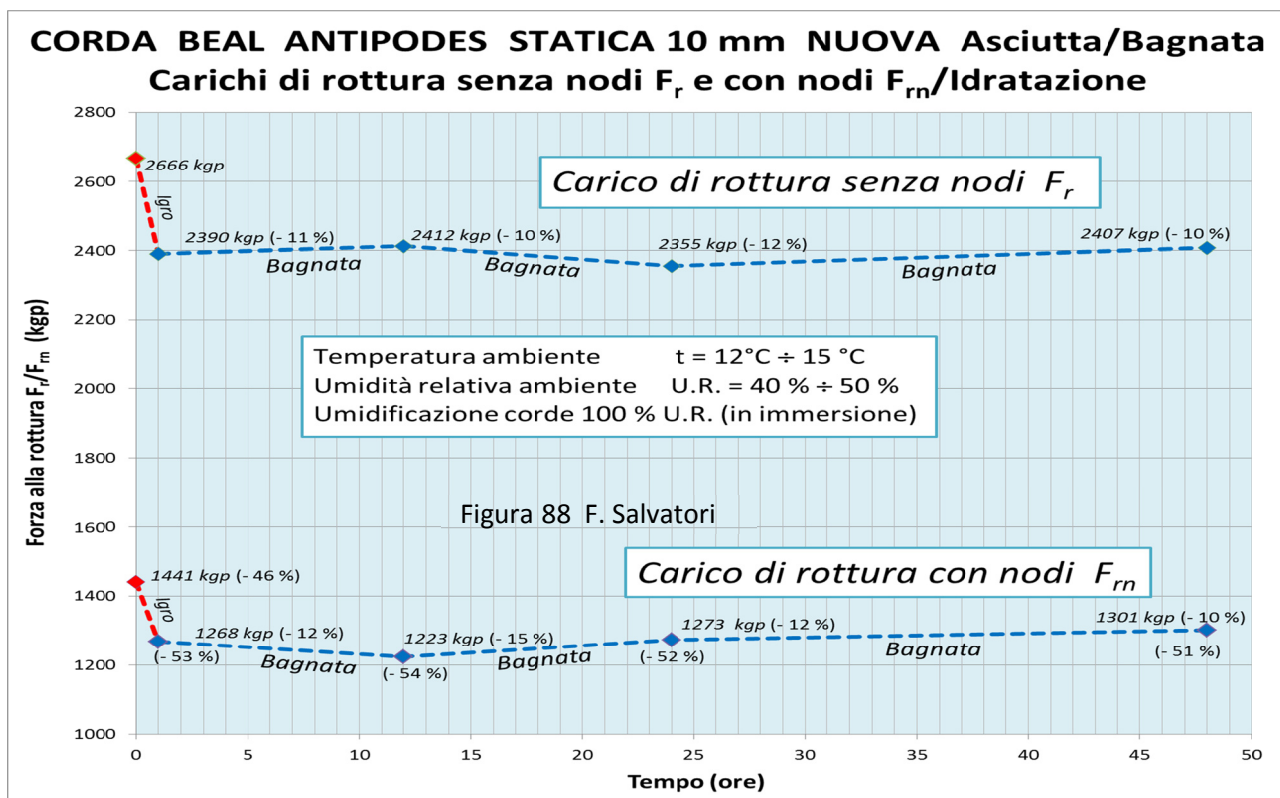
Quanto descritto nel precedente **Paragrafo 07.a** per le conseguenze prodotte dal contatto con l'acqua sui fili elementari si trasferisce, ovviamente, anche sulle corde da questi composte, sia pur con le differenze che introduce la loro Struttura Complessa. La valutazione che l'**effetto idrolisi** produce su una corda è di grande rilevanza, specie se si effettua anche un confronto corda nuovo/corda usata.

A tal proposito sono stati effettuati del test a trazione lenta (pag. 29, **Figura 18**) su corde nuove/usate e asciutte/bagnate come descritto nella **Parte IV** dalla pag. 105 alla pag. 118. Le corde testate sono elencate a pag. 108.

A titolo d'esempio generalizzabile si valutino i grafici contenuti nella **Figura 88** (pag. 112) relativi alla corda statica **Beal Antipodes 10 mm nuova**. Vi è riportato l'andamento del Carico di rottura senza nodi  $F_r$  e con nodi  $F_{rn}$  in dipendenza del tempo trascorso in immersione in acqua: al **tempo zero** è stato effettuato il test con la **corda nuova asciutta** (2666 kgp), che, immediatamente dopo, viene immersa in acqua.

Dopo **un'ora d'immersione** è stato prelevato un campione di corda ed effettuato un test con corda "**bagnata**" (2390 kgp). Poi i test sono ripetuti su campioni prelevati dall'immersione dopo 12 ore, 24 ore e 48 ore. I risultati sono riportati nei grafici con accanto la diminuzione percentuale rispetto alla corda asciutta.

La prima considerazione rilevabile è che l'effetto idrolisi si manifesta **interamente dopo appena un'ora d'immersione in acqua** (forse anche prima, ma non sono stati fatti i test opportuni). Infatti, dopo la prima rilevazione da bagnata la corda dà risultati pressoché uguali (le piccole differenze di Carico di rottura sono dovute verosimilmente ad errori strumentali, valutabili intorno all'1%).



La riduzione di  $F_r$  per effetto idrolisi con immersione in acqua (U.R. 100 %), partendo da una corda nuova condizionata in ambiente a 18 °C di temperatura e U.R. 45 %, è dell'11 %.

La riduzione di  $F_{rn}$  registrata sotto le stesse condizioni sperimentali del caso precedente è del 12 %, praticamente uguale ai test con corda senza nodi.

Per la stessa corda usata i grafici sono contenuti nella Figura 89 (pag. 113). Nel comportamento generale nulla cambia: l'effetto idrolisi si manifesta completamente nel giro di un'ora (o meno), sia con corda senza nodo che con nodo.

Le riduzioni percentuali medie sono **dell'8 % per la corda senza nodi** e **del 13 % per la corda trazionata con nodi** d'aggancio al dinamometro.

Semberebbe, dunque, che nella corda usata l'effetto idrolisi si manifesti in modo leggermente inferiore quando la corda è testata senza nodi. Ma dato che nella pratica della progressione speleologica non si possa in alcun modo fare a meno di annodare la corda possiamo affermare che, in entrambi i casi, l'effetto idrolisi si manifesta con identiche riduzioni percentuali nella tenuta alla rottura (e indirettamente nella riduzione della rigidità del materiale; e di conseguenza della corda).

Nella Tabella della **Figura 94** (pag. 117) sono esposti, in modo sintetico, tutti i risultati dei test effettuati sull'effetto idrolisi e analizzati nella **Parte IV** (pag. 109 e seg.).

### Legenda Effetto Idrolisi, Effetto Nodo ed Effetto Idrolisi + Effetto Nodo

- (A) *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 % ÷ 50 %.*
- (B) *Corda umidificata con immersione in acqua (equivalente a condizionamento con U.R. al 100 %)*

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 %

L'idrolisi su corda senza nodi varia la riduzione **dal 16 % al 7 %**. Mentre con corda annodata la variazione va **dal 29 % al 7 %**: evidentemente, visto che il materiale dei fili elementari è sempre Nylon 6, la Struttura complessa della corda gioca un suo ruolo, ma solo con l'Edelrid Static nuova e la Cousin Testec nuova. Data la difficoltà d'interpretare l'influenza dell'intreccio della calza e dei trefoli sull'effetto idrolisi ci si astiene di commentare il fatto, invitando comunque a tenere presente che la presenza d'acqua nei fili elementari ha un'influenza negativa sulle proprietà meccaniche delle corde che non può essere sottovalutata.

Non può essere sottovaluto l'effetto idrolisi soprattutto nella progressione speleologica, dove l'ambiente ha una U.R. al 100 % e l'idratazione delle fibre polimeriche è la massima possibile.

Se poi si tiene in conto che le corde in grotta debbono comunque essere annodate per utilizzarle nell'armo dei pozzi, si deve tenere presente che una corda speleologica nuova subisce **sempre e comunque** una riduzione complessiva come indicato per le corde statiche nell'ultima colonna a destra della **Figura 94**.

Con la **riduzione del 52 %**, una **corda statica nuova**, con carico di rottura iniziale di 3000 kgp, di fatto ne ha **disponibili solo 1440 kgp**.

Con **corde statiche usate** (due anni intensamente) l'effetto idrolisi + effetto nodo riduce la tenuta alla rottura **del 41 %**. Ma qui si parte da un **valore iniziale** di  $F_r$  pari a **1614 kgp**, che, ridotto del 41 %, porta ad appena 662 kgp. Un valore troppo basso rispetto al **Limite Inferiore di Resistenza LIR** (1100 kgp), che avverte

di una condizione di usura della corda troppo accentuata: questa non garantisce più affidabilità in caso di sollecitazione con caduta di un peso e quando la Forza massima (pag. 42, **Relazione 13**) troppo elevata potrebbe portare al cedimento.

Infine, valutando le ultime due righe della Tabella di **Figura 94**, relativi alla corda dinamica Beal Edlinger nuova e usata (tre anni intensamente in arrampicata sportiva), si deve **tener conto della sola riduzione per effetto nodo: non ha avuto contatti sistematici con l'acqua come accade in grotta.**

Pertanto, verificandosi una **perdita delle proprietà meccaniche del 37-38 %**, nella realtà operativa alla **corda dinamica nuova rimane un Carico di rottura pari a 1574 kgp**. Nella **corda dinamica usata** il Carico di rottura **restante è pari a 1017 kgp**.

In conclusione, l'effetto idrolisi da un contributo del 10 % nella riduzione delle caratteristiche meccaniche dei fili elementari e quindi delle **corde speleo** che da questi sono composte; un apporto rilevante che, se sommato all'effetto- nodo, **dimezza la capacità di tenuta alla rottura.**

Se la corda speleo è usata, il degrado prodotto dall'usura sommato all'effetto idrolisi e all'effetto nodo è così rilevante che dopo due anni d'uso la corda deve essere eliminata decisamente.

Per la corda dinamica usata, tre anni d'attività intensa in parete d'arrampicata l'hanno portata vicina all'inaffidabilità.

***Da notare.** Dal confronto fra i dati ottenuti con corde speleo nuove e usate (due anni), asciutte e bagnate, riportati nella seconda colonna da sinistra della **Figura 94** nelle prime due righe dall'alto, emerge che **l'effetto idrolisi è maggiore nelle corde nuove**, nonostante che il materiale polimerico sia sempre lo stesso (Nylon 6). Questo significa che, a parità di massa, i **legami idrogeno** presenti nella **corda usata** sono in **numero minore** rispetto a quelli presenti nella **corda nuova**. Ne deriva che i **fattori usuranti propri della progressione speleologica** (degradazione idrolitica, gas, ossidanti, raggi UV, successione di sollecitazioni, calore) portano a una **diminuzione dell'estensione dei settori cristallini** a vantaggio di quelli amorfi, dove la situazione della disposizione delle catene di macromolecole è meno favorevole alla formazione di legami idrogeno intermolecolari. Per questo, sembrerebbe **possibile valutare il Grado di cristallinità** di una corda, nuova o usata che sia, **dall'entità dell'effetto idrolisi** (rimane sempre che il metodo d'analisi corretto è la Diffrazione a Raggi X).*

### **08.c) Le corde speleo-alpinistiche nuove e usate: valutazioni sperimentali degli effetti del processo di disidratazione e sul recupero delle proprietà meccaniche**

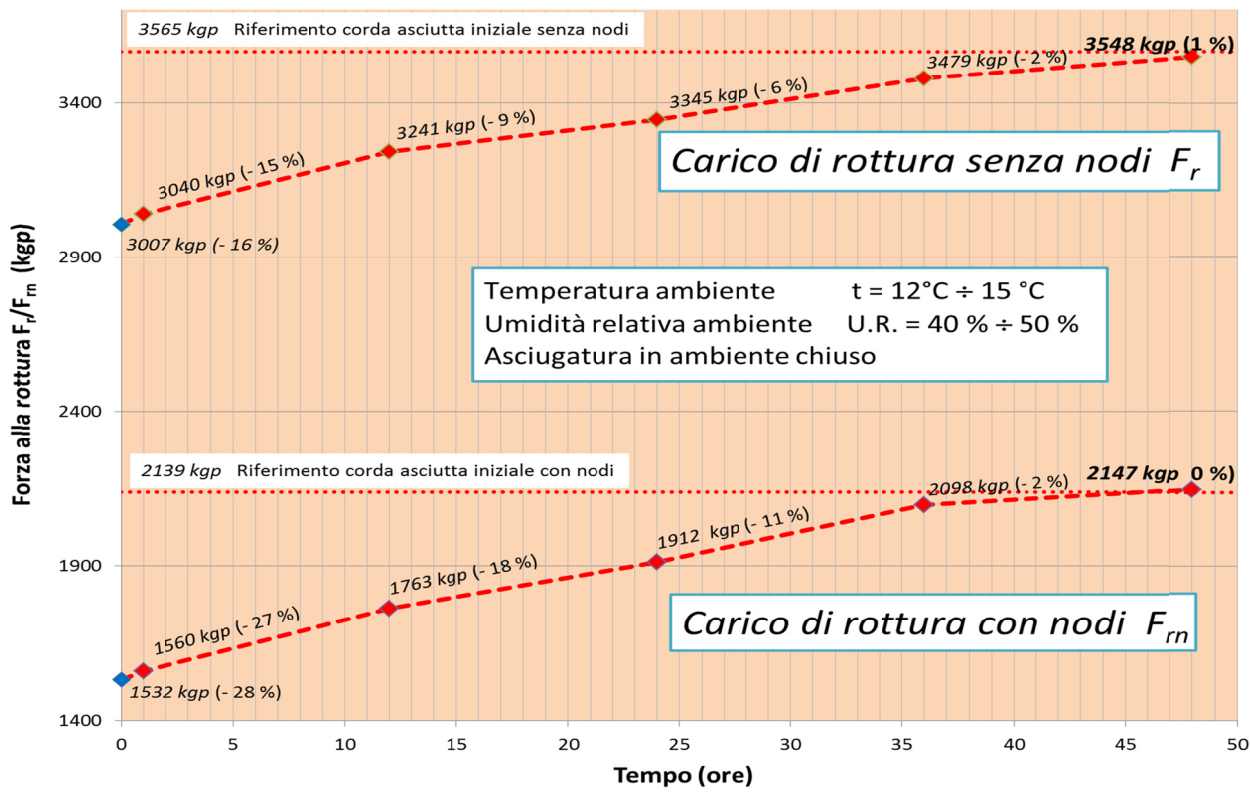
IL fenomeno dell'idrolisi dei legami idrogeno è **totalmente reversibile**: tolta l'acqua a contatto dei fili elementari, questi si disidratano e recuperano interamente le proprietà meccaniche originarie.

Nella **Figura 68** (pag. 76) i grafici indicano l'evolversi nel tempo dell'asciugatura **dei fili elementari**, a diverse temperature: tanto maggiore è la temperatura-ambiente tanto più rapida è l'eliminazione dell'acqua igroscopica. Per portare all'essiccazione massima occorre che il materiale polimerico sia colpito da un flusso d'aria secca e riscaldata: a 90°C l'essiccazione massima si ottiene in circa 6 ore (si noti che comunque rimane una minima quantità d'acqua nei fili elementari).

Per **una corda** tolta dall'immersione e messa ad asciugare in condizioni "magazzino" speleo, **sono comunque necessarie alcune ore prima che riacquisti le sue caratteristiche di tenuta e rigidità** (fino a 24 ore e oltre). E l'asciugatura non sarà mai completa, ma invece rapportata all'U.R. del "magazzino" (circa il 40 % – 50 %), che in ogni caso è pari alla condizione della corda prima di essere immersa in acqua.

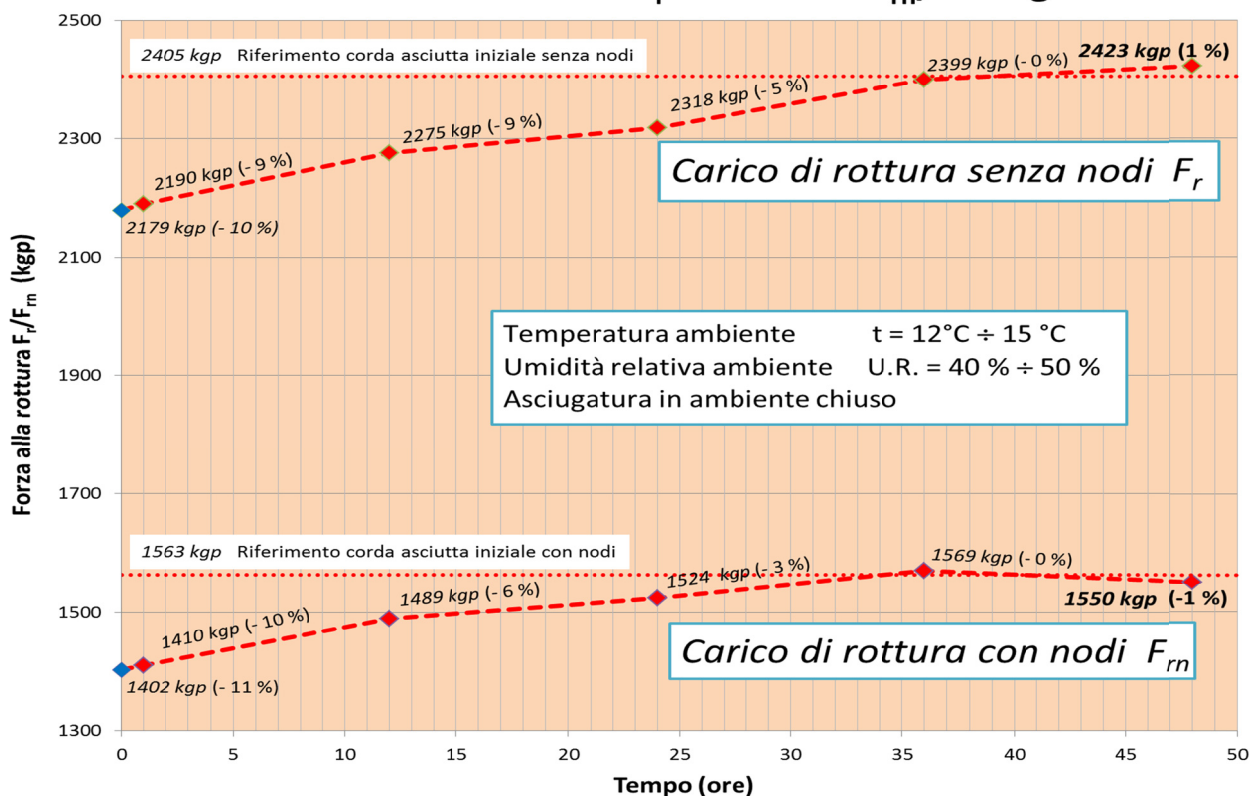
Per avere ulteriori indicazioni quantitative **sul processo inverso all'idratazione igroscopica e all'idrolisi nelle corde**, sono stati fatti dei test sulle stesse corde elencate a pag. 108, utilizzando come valore iniziale dei Carichi di rottura  $F_r$  e  $F_{rn}$  quelli già ricavati con le corde in immersione (punti blu) i cui risultati sono esposti nelle **Figure 86-87-88-89-90-91-92-93** (pag. 109 e seg.).

### CORDA EDELRID STATIC 10 mm NUOVA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi $F_r$ e con nodi $F_{rn}$ /Asciugatura



Nelle Figure 95-96 sono espressi i risultati del processo d'asciugatura per la Corda Edelrid statica 10 mm, nuova e usata (gli altri analoghi grafici sono consultabili nelle Appendici a pag. 300 e seg.).

### CORDA EDELRID STATIC 10 mm USATA Bagnata/Asciugata Carichi di rottura senza nodi $F_r$ e con nodi $F_{rn}$ /Asciugatura



Il risultato è chiarissimo: nel giro di 48 ore l'asciugatura tipo "magazzino speleo" (40 % - 50 % U.R.) riporta la condizione delle corde, rispetto alle proprietà meccaniche, a quella sperimentalmente verificata prima dell'immersione in acqua. Come a dire che il processo d'idrolisi è totalmente reversibile e non produce alcuna modifica chimico-fisica permanente.

L'unica differenza sta nel fatto che l'idratazione dei fili elementari raggiunge il massimo possibile in meno di un'ora. Mentre l'asciugatura, nelle condizioni precedentemente descritte, richiede anche più di 36 ore.

Nel complesso e in sintesi il fenomeno "idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari delle catene polimeriche" produce un "danno" (riduzione di circa il 10 %) che si manifesta interamente appena l'acqua entra in contatto con le fibre che costituiscono la Struttura complessa di una corda e si mantiene finché la corda rimane in grotta (U.R. 100 %) (stessa condizione dell'immersione in acqua).

IL danno però viene interamente recuperato togliendo la corda dalla grotta e mettendola ad asciugare in magazzino per almeno 48 ore. Sul tempo d'asciugatura verosimilmente interagisce la variegata conformazione della calza e dell'anima.

### **08.d) Le fibre polimeriche nuove: evoluzioni delle caratteristiche meccaniche per degradazione idrolitica**

Sempre a causa della presenza d'acqua, all'interno e all'esterno dei fili elementari, oltre il decadimento per effetto idrolisi, del tutto recuperabile, le loro proprietà meccaniche si perdono attraverso il processo della **Degradazione idrolitica**. Un processo che richiede tempi lunghi e che vede come causa principale **l'asportazione di materiale polimerico** ("erosione meccanica") e la rottura di legami che portano, di fatto, a una **Depolimerizzazione**.

La **degradazione idrolitica** produce modifiche nella **massa** e nella **struttura chimica dei fili elementari**. Le prime in nessun modo recuperabili; le seconde solo in parte reversibili.

#### **08.d.a) Acqua e polimeri: 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). Piuttosto si creano delle interazioni con **H<sub>2</sub>O** 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 (calcolo iniziale della massa con materiale nuovo asciutto); a seguire **rilevazioni dopo 21 – 50 – 90 – 120 giorni**, prelevando campioni di polimero immerso e misurazioni dopo asciugatura.

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 (al tempo di rilevazione)

Ai test di degradazione idrolitica sono stati sottoposti cinque tipi diversi di polimeri alifatici (con gruppi **-CH<sub>2</sub>-**, 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 grado di cristallinità (pag. 63, Figure 53-54-55) decrescente, che ha dato i risultati diagrammati in **Figura 74**.

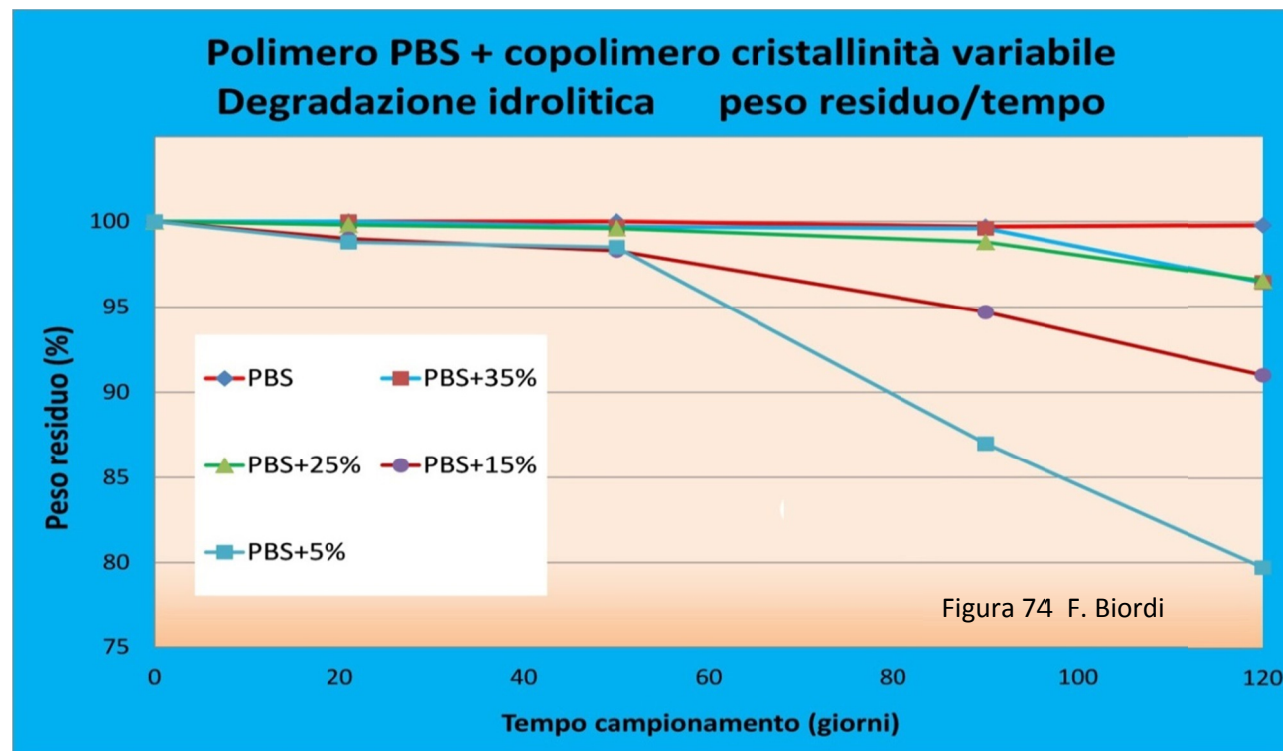


Figura 74 F. Biordi

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

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. Con un'altra ottica, si può concludere che più estese sono le zone amorfe, maggiore è il fenomeno dell' "erosione" per degradazione idrolitica.

Si può anche affermare che questo tipo di degradazione idrolitica non compete ai polimeri di maggior "qualità", dove il grado di cristallinità è uguale e superiore al 50 %. Questo esclude il Nylon 6 (50 %), il Nylon 6.6 (70 %), il Dyneema (80 %) e il Kevlar (80 %).

Tuttavia occorre precisare che l'esperimento non si è protratto oltre i 120 giorni: si può anche ipotizzare che la degradazione idrolitica per perdita di massa possa avvenire anche in polimeri con cristallinità al 50 % e superiore se i tempi di osservazione fossero più lunghi.

Test con immersioni in acqua di corde prolungatisi per anni sono stati fatti, ma senza valutazione delle variazioni di massa (pag. 155, **Figura 136**; pag. 158, **Figura 137**; pag. 161 e seg., **Figura 142**).

In detti test si è rilevato invece l'effetto riduttivo delle proprietà meccaniche delle corde speleo-alpinistiche attraverso la **Degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare medio o numerico  $M_n$**  (come esposto nel Paragrafo successivo), ma non è detto che in questo degrado non possa essere presente anche la Degradazione idrolitica per perdita di massa.

### 08.d.b) Acqua e polimeri: degradazione idrolitica con perdita di massa e riduzione dello Sforzo alla rottura $\sigma_r$ – Sulla base della relazione (pag. 84, Relazione 20):

$$\sigma_r = 10^3 \cdot T \cdot \rho \quad (20)$$

con:

$T$  = tenacità del filo elementare (N / tex)

$\rho$  = densità del filo elementare (g/cm<sup>3</sup>)

La tenacità  $T$  è una Costante caratteristica del polimero, mentre la densità  $\rho$  è il rapporto fra **massa** e **volume**, che nel caso di Degradazione idrolitica per perdita di peso (o l'equivalente perdita di massa), 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.**

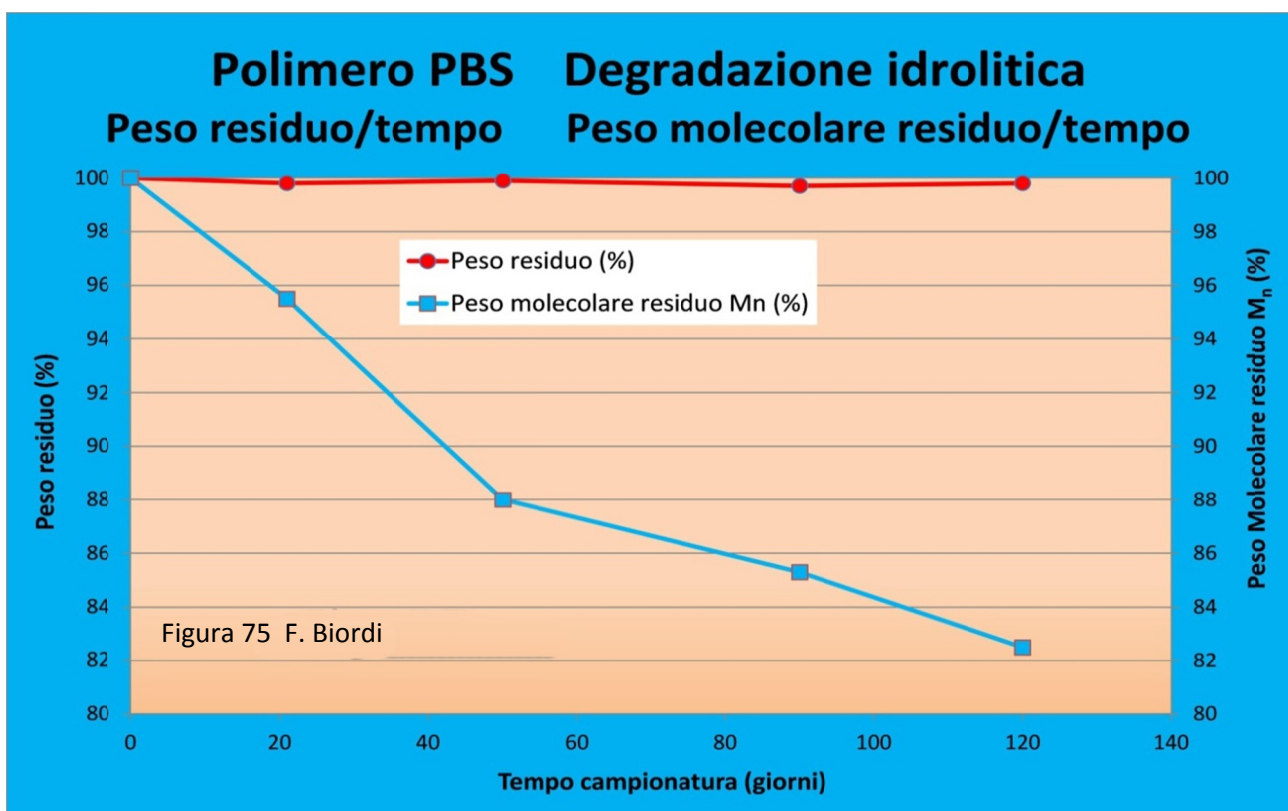
Ecco perché la Degradazione idrolitica con perdita di peso, di fatto, rende il polimero meno capace di resistere alla rottura ( $\sigma_r$  decresce) e più disponibile ad allungarsi a parità di forza applicata per la trazione ( $E$  diminuisce).

Testando una corda speleo-alpinistica, la diminuzione di  $\sigma_r$  comporta una diminuzione del Carico di rottura  $F_r$  in quanto (pag. 303, Appendice 04):

$$F_r = \sigma_r \cdot S_e$$

### 08.d.c) Acqua e polimeri: degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare medio o numerico $M_n$ – Come abbiamo visto in Figura 74, la degradazione idrolitica può - con polimeri semicristallini come il PBS (50 % cristallinità) o le poliammidi (Nylon 70 % cristallinità) - **non produrre perdita di peso** e quindi decadimento delle proprietà meccaniche.

Ma, al tempo stesso, può invece 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** [7] 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 (50 %)** e misurando nell'arco di 140 giorni sia la **diminuzione di peso** e che la variazione del **Peso molecolare numerico  $M_n$**  (pag. 85), si registra l'andamento riportato nella Figura soprastante.

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 per cristallinità e struttura molecolare) ha una **diminuzione del Peso molecolare numerico del 20 %**. E' questo un effetto degradante di rilievo, che incide sul decadimento del materiale polimerico (e quindi sulle corde speleo-alpinistiche).

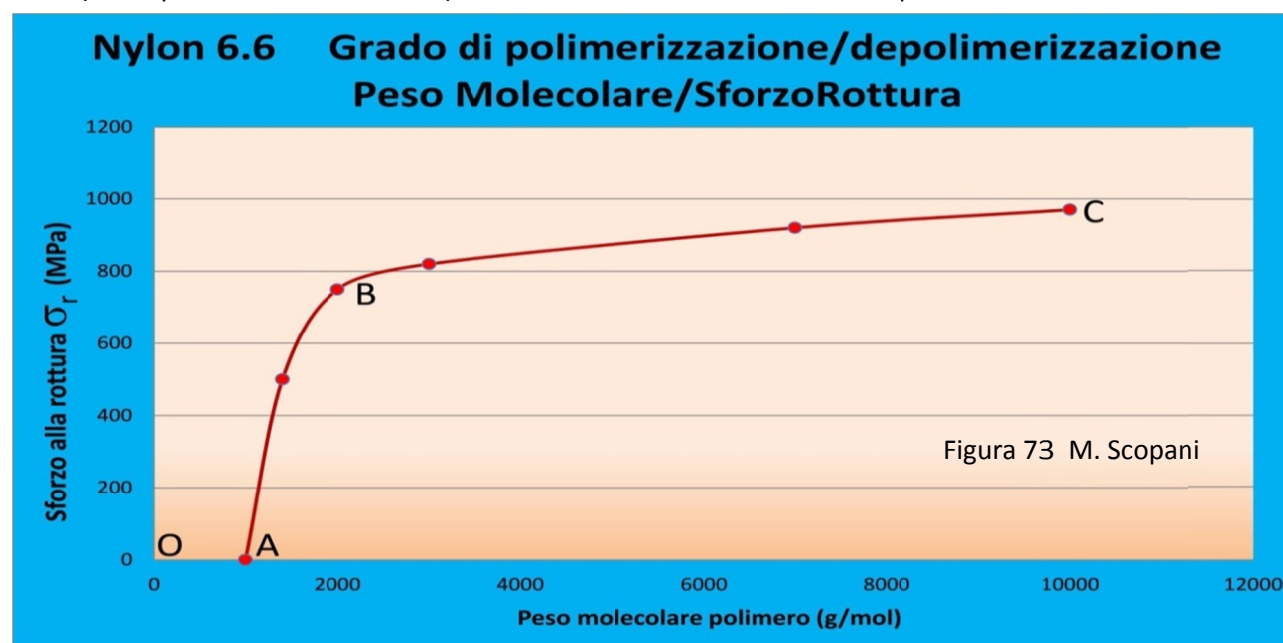
#### 08.d.d) Acqua e polimeri: degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare medio o numerico $M_n$ e diminuzione dello sforzo alla rottura $\sigma_r$ –

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  $\sigma_r$  e il modulo d'elasticità  $E$ . (riduzione che va a sommarsi a quella prodotta dalla degradazione idrolitica per perdita di massa, se questa è presente).

La spiegazione di questo comportamento dei fili elementari 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 simili).

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.



Dall'andamento della curva sovrastante  $\sigma_r = f(M_n)$  si constata che la depolimerizzazione determina variazioni dello Sforza a rottura poco marcate se agisce su macromolecole ad alto o altissimo Peso molecolare medio. Se la depolimerizzazione è di questo tipo occorrono tempi lunghi, anche di anni, perché si manifesti un calo della resistenza alla rottura e una diminuzione di  $E$ .

Invece, se il materiale polimerico è costituito con macromolecole a basso  $M_n$  anche sue piccole variazioni portano a una drastica riduzione di tenuta contro il cedimento. Siccome un alto valore di  $M_n$  è indice di maggiore cristallinità dei fili elementari, è conseguente che, per evitare una marcata efficacia della Degradazione idrolitica per diminuzione di peso molecolare numerico, si debbano utilizzare per il confezionamento delle corde speleo-alpinistiche materiale polimerico ad cristallinità.

Se il polimero non è igroscopico, come il Dyneema, la Degradazione idrolitica non si manifesta, se non in maniera trascurabile [7].

**08.d.e) Acqua e polimeri: velocità e reversibilità della degradazione idrolitica per diminuzione di Peso molecolare numerico  $M_n$**  - 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.

**08.d.f) Acqua e polimeri: polimerizzazione, depolimerizzazione e degradazione idrolitica** - Come si è visto nei precedenti Paragrafi, il meccanismo della Polimerizzazione/Depolimerizzazione è alla base della Degradazione idrolitica, importante fattore di decadimento delle corde usate in grotta o in ambienti esterni molto bagnati.

Ma non solo. Ad esempio l'idrolisi dei legami idrogeno (pag. 74) può essere interpretata anche come un fenomeno di depolimerizzazione: si rompono i legami intermolecolari fra le catene di macromolecole, di fatto aumenta il numero di macromolecole a minor peso molecolare e quindi diminuisce il Peso molecolare medio  $M_n$ .

Pertanto, per meglio comprendere questi fenomeni di degrado delle fibre polimeriche a contatto con l'acqua è opportuno, sia pur sinteticamente, un richiamo agli aspetti fondamentali di questo importante fenomeno chimico peculiare delle macromolecole polimeriche. Qui di seguito si riportano le questioni più pregnanti.

**08.d.f.1) Macromolecole e Polimerizzazione/Depolimerizzazione** - Le fibre polimeriche nascono attraverso un processo chiamato **polimerizzazione**, cioè dell'unione di più molecole di base dette monomeri (anche diverse fra loro) come indicato nella **Figura 46** (pag. 61) per la formazione del Nylon 6.6.

In questo caso, come in tanti altri, si uniscono le molecole agganciandosi all'estremità ed espellendo molecole d'acqua: si forma una catena di molecole, la macromolecola, che può essere composta anche da oltre centomila monomeri (pag. 64, **Figura 56**). Il meccanismo di polimerizzazione è una policondensazione **con espulsione di molecole d'acqua**.

**Da notare.** Secondo i principi della chimica, se una reazione avviene in una certa direzione sotto certe condizioni, la reazione inversa avviene invertendo le condizioni: ad esempio, se la polimerizzazione avviene

con espulsioni di molecole d'acqua, quindi preferibilmente con ambiente disidratato, è verosimile ritenere che con un'idratazione spinta al massimo, come può essere quella prodotta dall'immersione in acqua (pag. 70, **Relazione 17, Seconda Legge di Fick [14]**), avvenga la reazione inversa, cioè la depolimerizzazione. E così è per la Degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare numerico  $M_n$  delle macromolecole.

Una forma di polimerizzazione è anche la formazione di legami intermolecolari fra catene di macromolecole, come nel caso del Nylon (pag. 64, **Figura 57**) e il Kevlar (pag. 246, **Figure 195-196**).

Ma anche in questa situazione la presenza d'acqua all'interno dei polimeri genera una "depolimerizzazione" e porta alla rottura dei legami "idrogeno" intermolecolari (pag. 74 e seg., **Figura 67**) e Van der Waals (pag. 246, **Figura 195**) con modalità analoghe.

Comunque, in generale, in presenza d'acqua, le corde - anche se escluse dall'uso tipico della progressione con bloccanti e discensori - man mano che passa il tempo sono gradualmente "modificate", in senso peggiorativo; e perdono gran parte delle caratteristiche di tenuta alla rottura e di rigidità che avevano da nuove (caratteristiche per le quali vengono così tanto utilizzate, proficuamente e in maniera affidabile).

### **08.e) Le corde speleo-alpinistiche nuove e usate: valutazioni sperimentali delle variazioni delle loro caratteristiche meccaniche per degradazione idrolitica**

Nel precedente **Capitolo 08.d** si valutano gli effetti della Degradazione idrolitica sulle fibre polimeriche. Ora, attraverso la realizzazione di serie organiche di test a trazione lenta su corde speleo-alpinistiche, protrattisi anche per decine di anni, sono stati presi in esame gli effetti della Degradazione idrolitica non sui componenti isotropi delle corde, ma sulle corde stesse prese come Strutture complesse anisotrope.

Risulterà evidente la stretta **dipendenza fra caratteristiche delle fibre e delle corde**, con il variare delle une in conseguenza delle altre.

**08.e.a) Degradazione idrolitica e recupero parziale di corde speleo nuove immerse continuativamente in acqua per 5 anni e poi conservate in magazzino, al buio e asciugate, per 13 anni; le variazioni del Carico di rottura senza nodi  $F_r$**  – 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.

#### **08.e.a.1) 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-Trestec** 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**: per ogni diametro di corda, tre test uguali per calcolare il carico di rottura senza nodo  $F_r$ .

**Primo giorno d'immersione** delle corde: **18/06/2003**.

Durata programma di prove: **17 anni (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 ( $F_r$ ).

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:

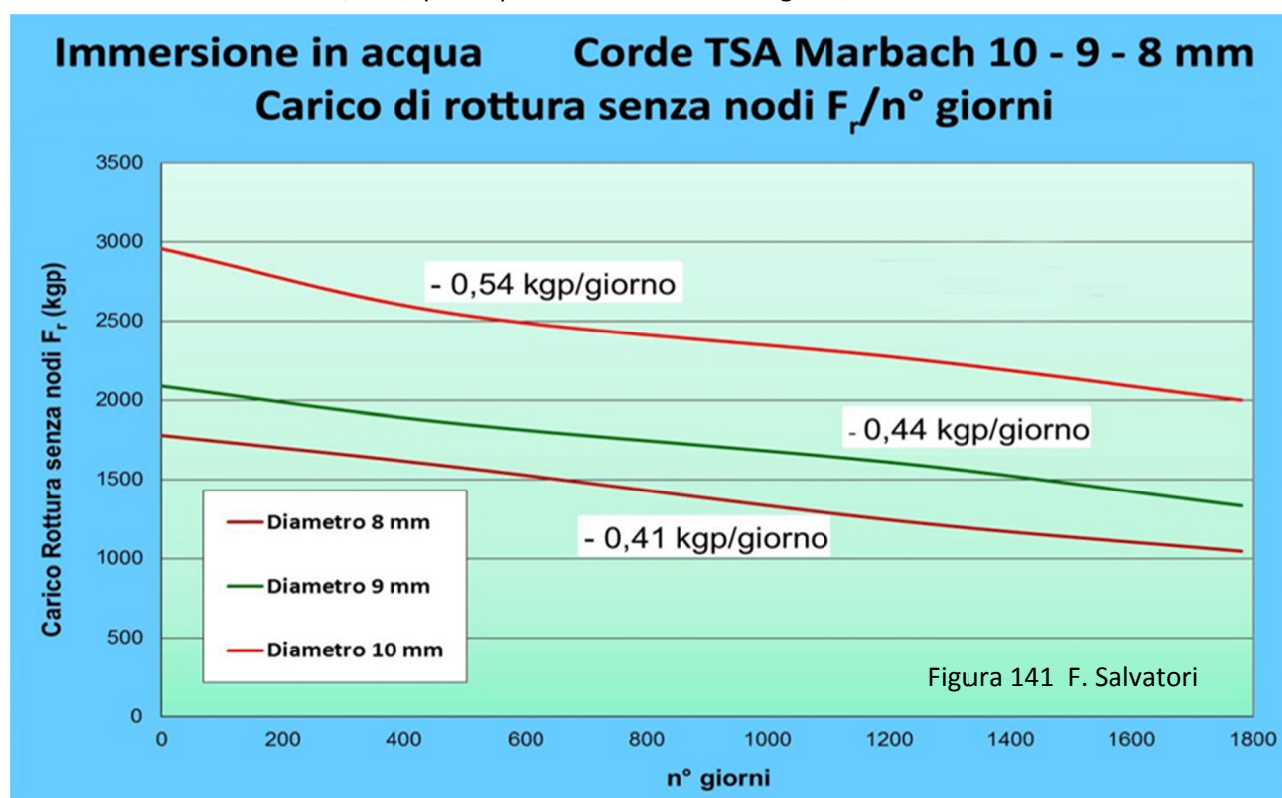
**24/08/2019                      14/06/2020                      21/12/2020                      01/05/2021**

con lo scopo di valutarne il Carico di rottura senza nodi  $F_r$ , sempre a trazione lenta (0,006 m/s) e con le stesse condizioni sperimentali indicate in precedenza.

In sintesi, lo scopo è mettere in evidenza se **l'immersione in acqua** (o l'equivalente esposizione in aria con U.R. al 100 %) procura un **decadimento delle proprietà meccaniche** delle corde e se, tolto il 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. 119, Figure 95-96), 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 (infatti, i campioni di corda qui menzionati sono stati testati dopo essersi asciugati in condizione "magazzino", con l'effetto idrolisi completamente recuperato).

**08.e.a.2) Grafici della diminuzione del Carico di rottura senza nodi  $F_r$  delle corde asciutte e asciugate in funzione del tempo trascorso immerse in acqua** – Innanzitutto, si ricorda anche 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.



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** (poco meno di cinque anni) 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 per la spedizione postale + tre giorni nel laboratorio, libero di asciugarsi con U.R. pari a circa il 40 % e temperatura ambiente di 12°C. In tal modo l'effetto idrolisi è annullato (*pag. 169, Figure 95-96*) e il decadimento delle proprietà meccaniche delle corde registrato può essere dovuto **solo alla Degradazione idrolitica.**

Pertanto i fattori che determinano questo decadimento del Carico di rottura senza nodi delle corde testate sono la **Degradazione idrolitica per perdita di massa** (erosione meccanica irreversibile, *pag. 83, Figura 74*) e la **Degradazione idrolitica per diminuzione del Peso molecolare numerico  $M_n$**  (meccanismo chimico parzialmente reversibile con Ordine di reazione  $n = 0$  con nessuna concentrazione di specie chimica coinvolta nell'equazione di velocità, *pag.84, Figura 75*). A *pag. 164 e seg. (Riferimenti 07.c.a; 07.c.b; 07.c.c)* sono esposte le argomentazioni che sostengono queste affermazioni.

In sintesi, le due Degradazioni indicate, conseguenti a una immersione in acqua continuativa di quasi cinque anni, portano a un graduale deterioramento delle proprietà meccaniche delle corde (il Modulo d'elasticità  **$E$**  e il Carico di rottura  **$F_r$** ) con decrementi in proporzione diretta in dipendenza del tempo.

E' un'azione che si manifesta lentamente nel tempo, ma con effetti potenzialmente pericolosi in caso d'immersione in acqua (o al 100 % di U.R. in grotta) senza soluzione di continuità, **per lunghi periodi.**

**Da ricordare:** sempre, nella realtà operativa, si deve aggiungere l'effetto riduttivo dell'idrolisi, in media intorno al 10 %.

**08.e.a.3) Raffronto fra sperimentazioni similari su corde con immersione prolungata in acqua o esposizione nell'ambiente - grotta** – In altri due casi, oltre quello descritto nel precedente **Punto 08.g.a.2**, sono stati fatti dei test che contengono aspetti sperimentali simili, confrontabili in quanto le condizioni sono compatibili. Il primo si riferisce al tratto di **corda utilizzata nel Pozzo Pataton** come "Bambolina" (matassa finale) (*pag. 151, Figura 136*). Il secondo test al tratto di corda finale, non utilizzato per la progressione, della **corda dell'armo del Pozzo della Scala Celeste** (*pag. 158, Figura 137, Tratto n. 8*).

**08.e.a.3.1) Matassa ("Bambolina") al fondo della corda nel Pozzo Pataton** - La "Bambolina" di corda (matassa) 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:

$$1903 \text{ kgp}/3955 \text{ giorni} = 0,48 \text{ kgp/giorno}$$

**08.e.a.3.2) Tratto di corda finale inutilizzato nel Pozzo della Scala Celeste** - La parte finale della corda rimasta per sei anni (1199 giorni) nel primo salto della **Scala Celeste** dell'Abisso Schiaparelli senza sopportare sollecitazioni, attriti e abrasione della calza ("usura senza uso"), ha subito un decadimento per degradazione idrolitica di:

$$1199 \text{ kgp}/2190 \text{ giorni} = 0,55 \text{ kgp}/\text{giorno}$$

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'ammattamento non ha permesso.

**08.e.a.3.3) Corda nuova rimasta in immersione per 1781 giorni** - La corda nuova da 10 mm di diametro apparente utilizzata nella Vasca di Chorance (**Punto 08.g.a.2**), di dimensioni e fattura compatibili per un confronto con le corde indicate nei due precedenti punti, ha dato il seguente risultato (*pag. 164*):

$$961 \text{ kgp}/1781 \text{ giorni} = 0,54 \text{ kgp}/\text{giorno}$$

**08.e.a.3.4) 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:

$$0,52 \text{ kgp}/\text{giorno}$$

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. Anche mettendo in evidenza ulteriormente che l'immersione in acqua equivale all'esposizione nell'ambiente grotta, dove l'U.R. è pari al 100 %.

**08.e.a.3.5) Valori di decadimenti decrescenti in funzione della diminuzione del diametro apparente della corda** - Ricordando quanto ottenuto dai test per immersione in acqua nella Vasca di Chorance (*pag. 141*):

1.  $F_r = 0,54 \text{ kgp}/\text{giorno}$  per la corda di diametro 10 mm,
2.  $F_r = 0,44 \text{ kgp}/\text{giorno}$  per la corda di diametro 9 mm,
3.  $F_r = 0,41 \text{ kgp}/\text{giorno}$  per la corda di diametro 8 mm,

appare 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*) sembrerebbe giustificare questo risultato, in quanto la velocità di degrado  $F_d$  diminuisce con il rapporto  $S/\tau$ : con la diminuzione del diametro apparente la **superficie di separazione S diminuisce** con gradiente superiore a quello con cui diminuisce il **volume  $\tau$** .

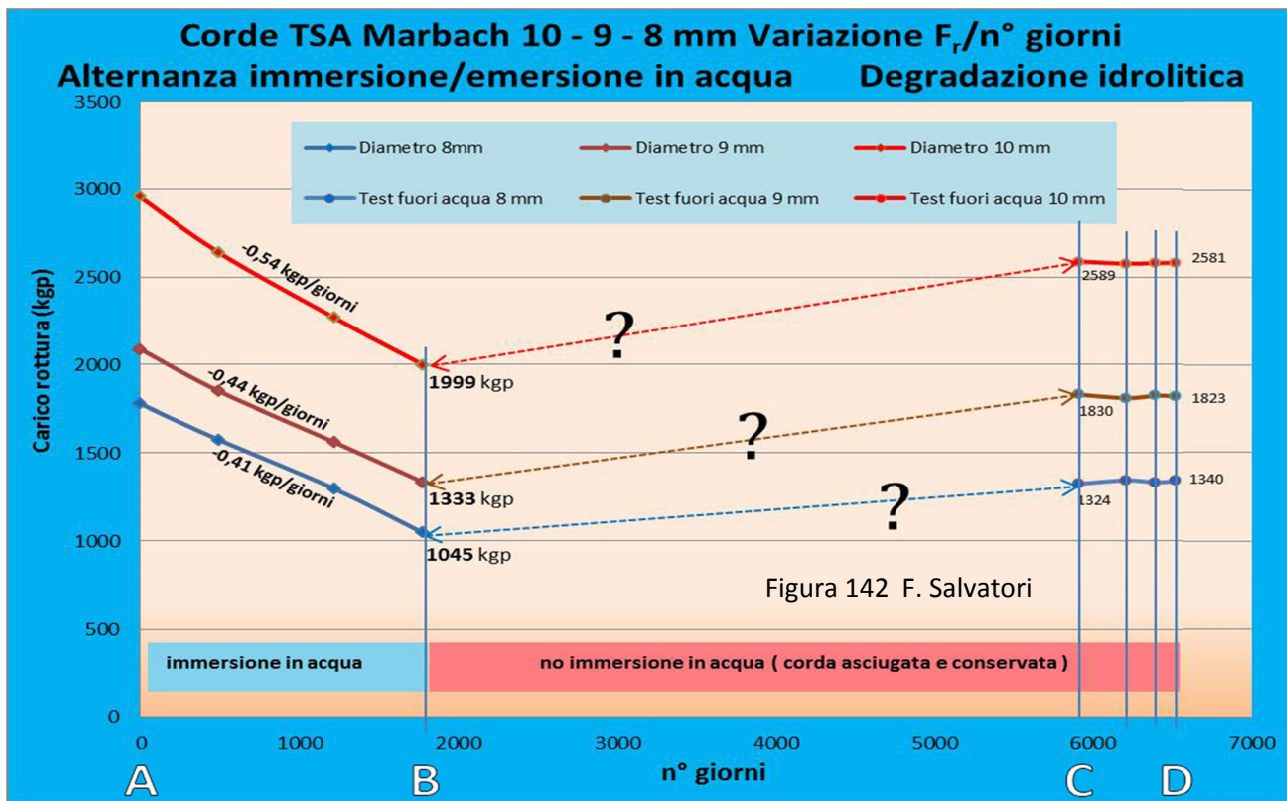
**08.e.a.4) Interruzione dell'immersione in acqua, asciugatura e conservazione in magazzino, reversibilità degli effetti dovuti all'immersione in acqua e recupero del Carico di rottura  $F_r$**  - Dopo i **1781 giorni** d'immersione nella Vasca di Chorance le corde sono state tolte dall'immersione. Alcuni campioni sono stati asciugati e utilizzati per effettuare gli **ultimi test** per misurare il Carico di rottura  $F_r$  in conseguenza dell'immersione prolungata.

Le restanti quantità di 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 della conservazione) sono stati effettuati altri test per misurare ancora i Carichi di rottura  $F_r$ .

La stessa cosa è stata fatta il **14/06/2020** (4425 giorni), il **21/12/2020** (4615 giorni) e l' **01/05/2021** (4746 giorni).

Ne è scaturito l'insieme di grafici di **Figura 142** (*pag. 168*) dove sono raccolti e diagrammati tutti i dati raccolti dall'inizio della sperimentazione (18/06/2003), **nel complesso 6727 giorni** (più di 17 anni) di cui **1781 in immersione in acqua e 4746 in conservazione in magazzino**.



Da una vista sinottica risulta un andamento iniziale condizionato dall'immersione in acqua (pag. 359, **Figura 141**), seguito da un ben più lungo periodo di mantenimento e conservazione in "magazzino" fuori dall'acqua.

Quest'ultimo periodo di 4746 giorni è a sua volta diviso in un periodo di 4130 giorni senza alcun rilevamento del Carico di rottura  $F_r$  (questo è il motivo per cui sono stati messi i punti interrogativi) e da un periodo finale di 321 giorni con tre rilevazioni di  $F_r$ . Quest'ultimi test mostrano che la corda conservata in magazzino dopo il periodo d'immersione in acqua ha recuperato, in modo marcato, capacità di tenuta alla rottura.

Gli **ultimi tre test**, con valori pressoché identici, considerato l'errore strumentale, mostrano che quanto è stato recuperato, se non mutano le condizioni d'idratazione, **si mantiene nel tempo**.

Il problema sta nel valutare le modalità e tempi con cui questo recupero è avvenuto: in pochi giorni o in tempi più lunghi, e con quale andamento della curva  $F_r = f(n^\circ \text{ giorni})$ . Una risposta può venire solo a seguito di una nuova sperimentazione ad hoc.

Come risultati quantitativi in percentuale si hanno i seguenti risultati.

Nel **tratto A – B**, legato all'immersione in acqua senza soluzione di continuità, quando agisce sia la **Degradazione idrolitica per perdita di Peso molecolare numerico  $M_n$**  che la **Degradazione idrolitica per perdita di massa**, si registra una **riduzione complessiva**:

- del **33 %** per il diametro **10 mm**,
- del **37 %** per il diametro **9 mm**,
- del **41 %** per il diametro **8 mm**.

Nel **tratto B – C**, corrispondente al periodo con le corde fuori dalla Vasca di Chorance, asciugate e mantenute in condizione conservativa, avviene il **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)

Nel **tratto C - D** le corde, nella condizione descritta nel punto precedente, sono state di nuovo testate per ottenere  $F_r$ , rilevando che queste hanno raggiunto una stabilità di condizione e mantengono 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**.

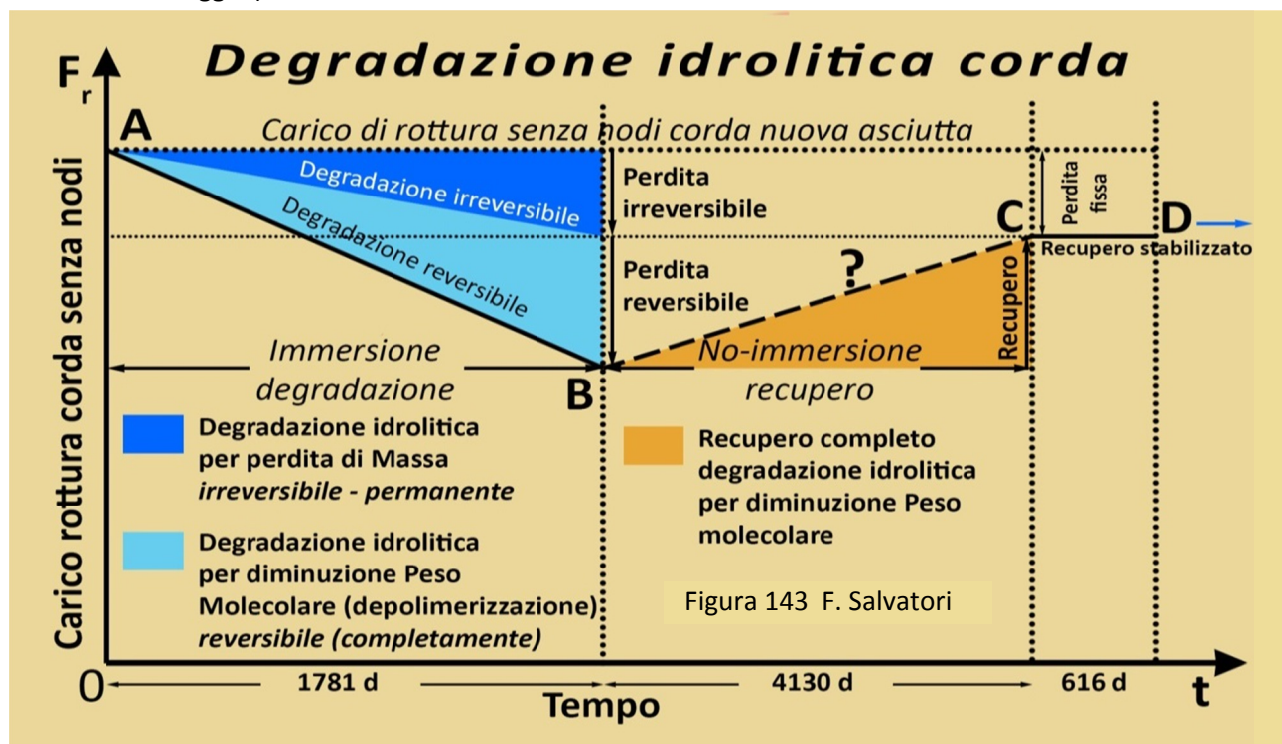
Questi ultimi dati relativi al **Tratto C – D** sono i **più significativi** dal punto di vista operativo: significa che una **corda speleo** dopo essere rimasta **immersa in acqua per cinque anni**, se tolta da questa condizione di idratazione estrema e asciugata in condizioni di magazzino, **perde una parte del Carico di rottura senza nodi  $F_r$**  con **percentuali che variano dal 13 %**, per il diametro 10 mm, **al 25 %**, per il diametro 8 mm.

Ancora una volta **si conferma il principio** che le **corde di minor diametro** apparente **subiscono in modo più marcato l'azione degli agenti degradanti**.

**Da tenere presente:** nel momento in cui queste corde entrassero in uso nella progressione in grotta, al decadimento per Degradazione idrolitica si deve **aggiungere l'effetto nodo (30-50 %)**, **effetto idrolisi (8-13 %)** e il degrado derivante da **tutte le altre forme di usura**, che è tanto maggiore quanto più lungo è stato il periodo d'uso.

**08.e.a.5) Interpretazione dell'azione della Degradazione idrolitica su una corda e del recupero delle proprietà meccaniche** – Volendo sintetizzare il contributo dei diversi fattori che hanno inciso sul Carico di rottura senza nodi  $F_r$  nell'arco dell'intera esperienza di **6527 giorni** - 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, come sopra specificato).

Nel **Periodo A – B** (immersione) ha agito sia la Degradazione **reversibile** che quella **irreversibile**. Verosimilmente la quasi totalità di quella **irreversibile è dovuta** alla Degradazione idrolitica **con perdita di massa**: è evidente che la cristallinità del Nylon 6 si è ridotta durante la fase d'immersione al di sotto del 50 % (pag. 83, **Figura 74**; pag. 85, **Figura 75**), anche di poco ma per tempi prolungati (sembra verosimile ipotizzare che il contatto prolungato con l'acqua abbia portato il polimero alla depolimerizzazione e al contempo alla diminuzione di cristallinità; sarebbe necessario confermare sperimentalmente il tutto con la Diffrazione ai raggi X).



La Degradazione idrolitica per **diminuzione di Peso molecolare numerico**  $M_n$  ha dato il suo **contributo alla fondamentale alla degradazione reversibile** (anche in questo caso sarebbe necessaria un'ulteriore indagine per verificare se quest'ultimo tipo di degradazione può avere una porzione irreversibile).

Nel **Periodo B – C**, con la **disidratazione** è stato **recuperato completamente quest'ultimo tipo di degradazione**: la mancanza di contatto con l'acqua ha permesso infatti il fenomeno inverso alla depolimerizzazione, cioè la polimerizzazione per policondensazione di monomeri ed espulsione di molecole d'acqua (*pag. 49, Figura 51*) o meccanismi chimici simili (sempre difficili da definire nel mondo complesso delle catene di macromolecole). Occorre tuttavia ricordare ancora una volta che non si conoscono i modi e i tempi di questo recupero.

Nel **Periodo C – D**, avendo **precedentemente** le corde **recuperato tutte le deformazioni reversibili**, mantengono a ogni test lo stesso Carico di rottura senza nodi. Che manterranno fintanto che non intervenga una nuova idratazione (che produce idrolisi e idratazione idrolitica) e o altri fattori di decadimento da uso (calore, contatto con gas, successione di sollecitazioni).

### **08.f) Le fibre polimeriche nuove: la foto degradazione**

La **foto degradazione** nei polimeri è promossa dalle **radiazioni UV** (lunghezza d'onda  $\lambda$  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. Neanche l'usura della progressione speleo riesce a togliere l'effetto degli opacizzanti.

### **08.g) Le fibre polimeriche nuove: la 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/m<sup>3</sup>** e gli **80 mg/m<sup>3</sup>**. Questo tipo di decadimento, pur non essendo di grande rilievo nell'insieme delle variegate 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).

### **08.h) Le fibre polimeriche nuove: la 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).

### **08.i) Le fibre polimeriche nuove: la 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 si può verificare il processo inverso** (lo stesso che si produce in presenza di un forte grado d'umidificazione (pag.

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

### **08.j) Le fibre polimeriche nuove: quadro d'insieme sintetico della perdita delle proprietà meccaniche per effetto della degradazione idrolitica, per contatto con gas e per pirolisi**

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, che contemplano la presenza o meno di legami chimici, in genere definiti "deboli".

L'esistenza o meno di questi legami può avere però riscontri importanti sulle caratteristiche chimico-fisico-meccaniche del materiale polimerico. 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 oltre **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; azioni di difficile valutazione, singolarmente.

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**.

Da non dimenticare, come più volte specificato, che alle azioni degradanti elencate nell'intestazione di questo **Paragrafo 08.k** e contenute anche nella Tabella, devono, sempre e comunque, aggiungersi:

1. il fattore di decadimento reversibile prodotto dall'idrolisi dei legami idrogeno (pag. 74-75, **Figura 67**),
2. gli effetti solo parzialmente reversibili apportati dal calore (pag. 90 e seg.),
3. le conseguenze derivanti dalla successione di choc con test a caduta di un peso (pag. 174 e seg.),
4. la riduzione della capacità di assorbire/dissipare energia a seguito dell'applicazione quasi-statica di carichi (pag. 366, Punto 08.l).

**Legenda tabella:** 1) la terzultima colonna "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 SNS CAI* su quanto la specifica azione degradante debba essere presa in considerazione nell'uso normale di una corda in ambito speleologico. Questi 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 - 85 Figure 75	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	Calore $H_2O$	Temperatura Umidità	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare $M_n$	Diminuzione $F_r$ ed $E$	Reversibile	Pag. 86 Figura 75	Rilevante
Ossidazione	Ossigeno $O_2$	% $O_2$ atmosfera	Depolimerizzazione	Diminuzione peso molecolare $M_n$	Diminuzione $F_r$ ed $E$	Irreversibile	Pag. 86 Figura 75	Irrilevante

### 08.k) Le fibre polimeriche nuove: la degradazione per applicazione quasi-statica di carichi

L'applicazione a bassa velocità (anche ripetuta) di carichi al **materiale polimerico isotropo** concorre a modificarne le proprietà meccaniche, soprattutto la deformabilità plastica (viscosa), irreversibile. Questo comporta un decadimento dei fili elementari nel senso che perdono la capacità d'assorbire e dissipare l'energia prodotta da un'eventuale choc di caduta.

Applicare un carico di massa contenuta (quella di uno speleo con il sacco e l'attrezzatura) a bassa velocità di deformazione (pag. 52, **Relazione 15**) è un fatto consueto e fortemente ripetitivo nella progressione speleologica.

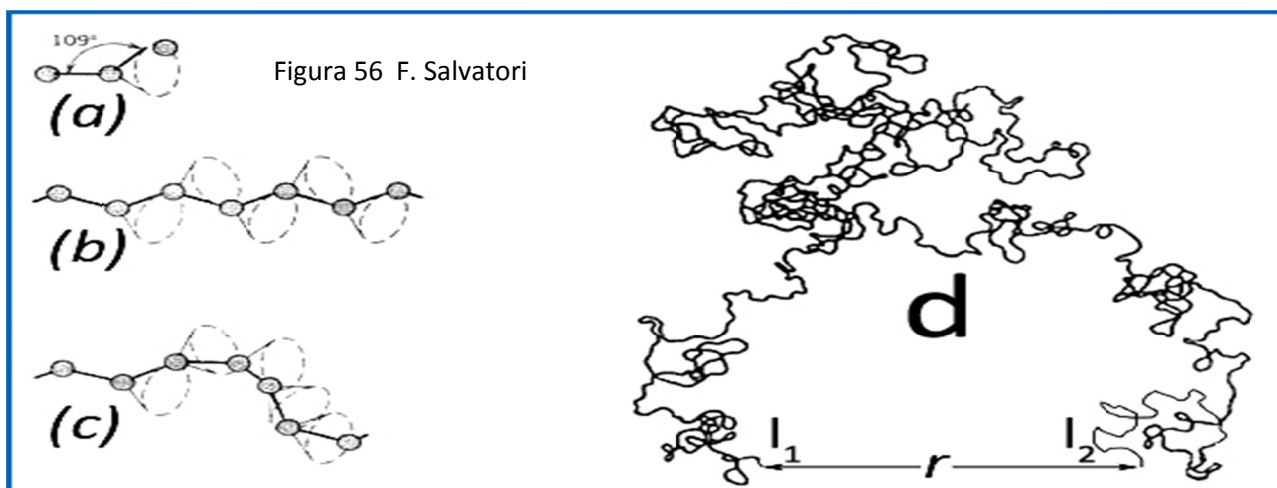
Si pensi alla discesa con discensore, alla risalita su bloccanti e alle altre tante manovre simili effettuate in una normale discesa in grotta (pag. 151, **Figure 134-135**).

Si tenga in conto quante volte queste semplici manovre vengono ripetute, producendo ogni volta una elongazione delle fibre polimeriche (oltre della corda che compongono), magari in misura quantitativamente ridotta. Ogni volta, comunque, una parte di questi allungamenti non è recuperabile perché produttore delle deformazioni permanenti.

Ognuna di queste lascia un segno di decadimento all'interno dei fili elementari di una corda speleo-alpinistica, con assestamenti nella struttura nell'ammasso di catene di macromolecole e effetti deformanti irreversibili che si sommano.

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 originario non è più ripetibile e una successiva sollecitazione non potrà godere della capacità di prima d'assorbire energia. Elementi di compressione ulteriore possono essere tratti, *mutatis mutandis*, dal ciclo d'isteresi di **Figura 16bis** (pag. 27) e dall'Esperimento di Creep delle **Figure G-H** (pag.307).



I fili elementari saranno dunque meno deformabili (a parità di forza si allungheranno 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 (pag. 29, **Relazione 7**).

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.

Comunque, col succedersi di queste sollecitazioni, gli effetti si sommano e le proprietà meccaniche della fibra si modificano in senso peggiorativo: aumenta soprattutto il Modulo d'elasticità  $E$  e il Nylon s'irrigidisce.

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** possa accumulare una **degradazione rilevante**.

Considerato il tipo d'utilizzo di una corda speleo, dove la normalità è sostenere carichi statici e ciclici (si pensi, come già segnalato, alla risalita con bloccanti e alla discesa su discensore a velocità variabile, pag. 151, **Figure 134 - 135**), 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 normalmente, senza traumi e choc eccessivi, inutilizzabile nel giro di pochi anni.

**Da notare.** Molto più incisivo nel decadimento delle corde è una **successione di choc (test a caduta di un peso, pag. 39 e seg.)** con rilevanti quantità d'energia in gioco, quando oltre agli effetti sopra descritti si può aggiungere la depolimerizzazione prodotta dagli choc stessi. Ma di quest'ultimo argomento che valuta la **visco-elasticità** dei polimeri, **di fondamentale rilevanza**, si occupa la **Parte VI** di questo lavoro (pag. 174 e seg.). A questa rimandiamo per ogni considerazione più approfondita.

### **08.1) Calore nelle corde: variazione delle caratteristiche chimico-fisiche nei fili elementari, del grado di cristallinità e decadimento delle loro proprietà meccaniche**

Oltre al contatto con **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).

**08.1.a) Misurazione del calore prodotto sulla corda durante la progressione verticale in grotta 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** (1875 calorie) 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  **$0,23 \text{ W} / (\text{K} \cdot \text{m})$** , non è troppo elevata, ma - date le ridottissime dimensioni dei fili elementari ( $0,28 \mu\text{m}$ ) - 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  $100^\circ\text{C}$  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).

## **08.I.b) Rapporto cristallino/amorfo dei polimeri, fattori che ne determinano le variazioni e influenza sulle proprietà meccaniche; temperatura di transizione vetrosa $T_g$**

**08.I.b.1) Grado di cristallinità e visco-elasticità** - Nel **Figure 53 - 54 - 55** (pag. 63) è trattato l'argomento che descrive la struttura atomico-molecolare dei materiali polimerici semi-cristallini nella **disposizione delle catene di macromolecole** nel corpo dei fili elementari **Figura 52** (pag. 62).

In particolare si definisce una delle principali caratteristiche dei **materiali polimerici**: il **grado di cristallinità** che esprime il **rapporto percentuale in peso** (o volume) **fra materiale amorfo e cristallino**, senza fare distinzioni nel tipo di strutturazione ordinata è presente nei settori cristallini (lamelle, sferule, stratificati).

La struttura molecolare **semi-cristallina** è anche alla base del **comportamento visco- elastico dei polimeri** (pag. 178 e seg., **Figura 147**): la viscosità legata agli attriti fra le catene di macromolecole nei settori amorfi (quasi esclusivamente) e l'elasticità alle deformazioni reversibili nei settori cristallini (quasi esclusivamente).

Il grado di Cristallinità determina anche le proprietà dei materiali visco-elastici, fra cui i ritardi delle Deformazioni  $\epsilon$  rispetto agli Sforzi  $\sigma$ , la capacità di resistere alla rottura e la deformabilità.

Questo parametro può variare dal 5 % (pag. 83, **Figura 74**) all'75 % (pag. 244) e oltre (Dyneema, Kevlar) e dipende:

1. all'origine, dal tipo di polimero e dal modo e dai tempi con cui viene confezionato il filo elementare (pag. 61, **Figura 50**);
2. successivamente, con l'uso nella **progressione speleo-alpinistica**, il grado di cristallinità dei fili elementari diminuisce per l'azione dei fattori degradanti propri dell'usura (acqua, gas, raggi UV, pirolisi, choc successivi).

Ma è **soprattutto il calore conferito alle corde** - durante la progressione in discesa con i freni - a determinare la diminuzione della cristallinità nei fili elementari, con conseguenti importanti **riduzioni delle loro della proprietà meccaniche**. In particolare decresce lo Sforzo alla rottura  $\sigma_r$  e il Modulo d'elasticità  $E$ ; come a dire una minore capacità di resistere alla rottura e una duttilità che facilita lo snervamento e poi il cedimento.

**08.I.b.2) Grado di cristallinità e proprietà meccaniche** – Tre sono i modi per individuare il rapporto fra cristallinità dei polimeri (e sue variazioni) e qualità meccaniche dei fili elementari (e delle corde che di questi sono composte).

**08.I.b.2.1) Sforzo alla rottura  $\sigma_r$ , Tenacità, Modulo d'elasticità e grado di cristallinità** – Consultando le tabelle sulle caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche dei principali polimeri utilizzati per il confezionamento delle corde speleo-alpinistiche (pag. 30, **Figura 19**) e poi riferendosi al loro grado di Cristallinità conosciuto, ne risulta quanto segue:

Polimero	Grado cristallinità (%)	Sforzo alla rottura (MPa)	Tenacità (N/Tex)	Modulo E (GPa)
Nylon 6	50	536	0,47	2,6
Nylon 6.6	70	900	0,64	8,0
Kevlar	80	2900	2,03	72
Dyneema	> 80	3000	2,80	142

Lo **Sforzo alla rottura** è una misura della forza necessaria per portare **al cedimento un filo elementare con sezione trasversale unitaria**. Tanto maggiore è il suo valore tanto più il filo elementare resiste alla rottura.

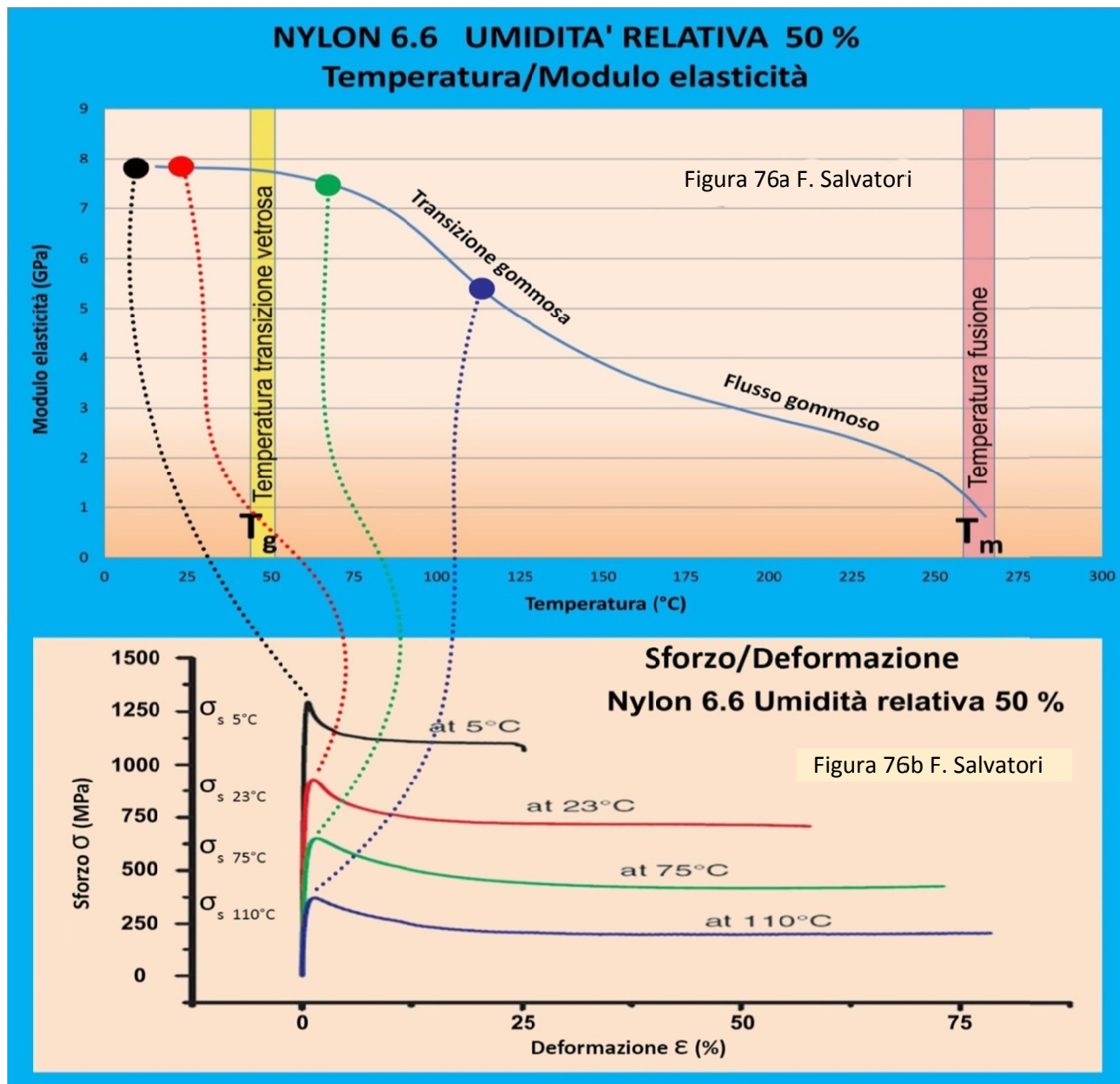
La **Tenacità** è la quantità di **lavoro necessario** per portare alla **rottura un filo elementare di massa unitaria**: più è elevata, più è grande il lavoro necessario - a parità delle altre condizioni - per raggiungere il cedimento del materiale polimerico.

Il **Modulo** (d'elasticità) è la misura della proprietà di deformarsi dei polimeri: più è alto il suo valore, maggiore è la rigidità.

Dunque, risalta evidente che i **polimeri a più alto Grado di cristallinità** sono quelli che **maggiormente si oppongono alla rottura e alle deformazioni**, presentando caratteristiche meccaniche migliori per confezionare le corde speleo-alpinistiche [fa eccezione il Dyneema e il Kevlar, che con la loro estrema rigidità creano problemi nell'assorbire/dissipare energia (sotto choc da caduta risultano forze massime molto elevate, come indicato a pag. 42 con la **Relazione 13**) ed esasperano l'effetto nodo (pag. 275, **Figura 219**)].

**08.I.b.2.2) Variazione del Modulo d'elasticità di un polimero in funzione della temperatura e Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$**  – Se si riscalda un polimero il grafico che rappresenta la curva  $E = f(T)$  è quella rappresentata in **Figura 76a** (pag. 92) relativa al Nylon 6.6, dove è evidente che il Modulo d'elasticità decresce ma mano che aumenta la temperatura, ma non in maniera uniforme: dopo un tratto iniziale con incrementi negativi di poca entità, **intorno ai 50°C**, inizia un brusco abbassamento di  $E$  e il materiale polimerico decade rapidamente a materiale gommoso, plastico.

Parimenti al Modulo d'elasticità decresce anche lo **Sforzo alla rottura**, com'è reso evidente dai grafici di **Figura 76b** (pag. 92): più bassa è la temperatura, e superiore alla Temperatura di transizione vetrosa, più il materiale è rigido e resistente alla rottura.



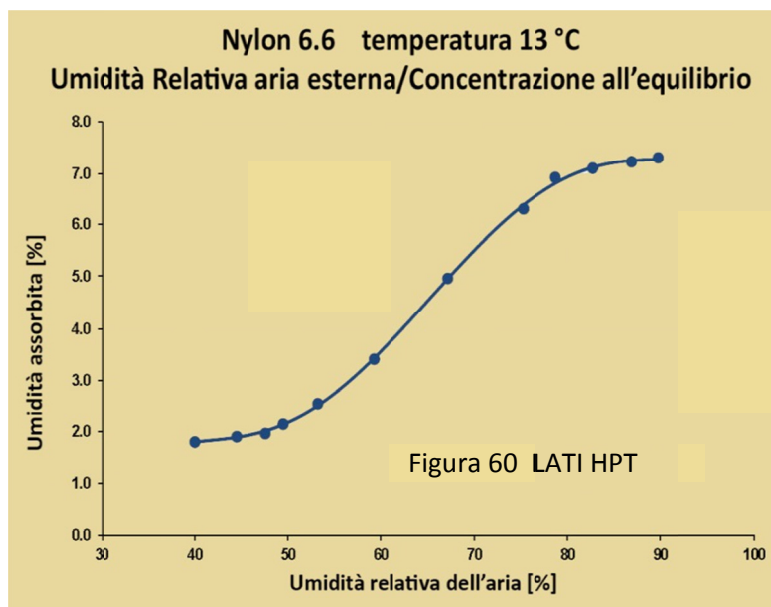
Per contro, se si continua a riscaldare, il polimero diventa sempre più malleabile fino ad avvicinarsi alla condizione di “flusso” gommoso (estrema viscosità, poco superiore alla paraffina, con capacità nulla di resistere alla rottura e agli allungamenti) per poi raggiungere la Temperatura di fusione  $T_m$  a  $260^\circ\text{C}$ .

Andando ad analizzare la struttura semi-cristallina dei fili elementari, si vede che il polimero mantiene il suo Grado di cristallinità iniziale (nella fattispecie del Nylon 6.6 pari al 70%) fintanto che rimane sopra la  $T_g$ . Dopo la cristallinità diminuisce bruscamente, come pure la proprietà di opporsi alla rottura, e questo processo di degrado continua fintanto che in prossimità della  $T_m$  **tutto il materiale polimerico ritorna completamente allo stato amorfo**. E' dunque evidente il ruolo del calore (e dei conseguenti innalzamenti di temperatura) nel diminuire il Grado di cristallinità e dello Sforzo alla rottura.

Se si analizzano anche i grafici di **Figura 77** (pag. 93) si evidenzia come il Grado di cristallinità iniziale del polimero influenzi anche l'andamento delle curve  $E = f(T)$ : tanto minore è la cristallinità iniziale, tanto più brusco e netto è il calo delle proprietà meccaniche dei polimeri approssimandosi alla  $T_g$ . Anche la Temperatura di transizione vetrosa diminuisce di valore con l'abbassarsi della cristallinità ( $45^\circ\text{C}$  per il Nylon 6 e  $50^\circ\text{C}$  per il Nylon 6.6).

Anche con queste considerazioni è dunque molto evidente l'influenza del calore sulla cristallinità e, di conseguenza, sulla proprietà meccaniche dei materiali polimerici.

**08.I.b.2.3) Umidità Relativa ambiente, Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$ , Grado di cristallinità e proprietà meccaniche dei polimeri** – Il Grado di cristallinità e, di conseguenza, la capacità di resistere alla rottura e agli allungamenti di un filo elementare è dipendente anche dal Grado d'idratazione del materiale polimerico che lo costituisce.



Questo grado d'idratazione per il materiale che compone le corde è determinato dall'U.R. dell'ambiente che le circonda; come definisce la **Figura 60** (pag. 94) per il Nylon 6.6.

L'Umidità Relativa dell'ambiente che dove opera la corda speleo varia da meno del 40 % (standard, per un magazzino) al 100 % tipica dell'ambiente ipogeo (si ricorda che, l'immersione in acqua equivale comunque ad al 100 % di U.R.).

Con U.R. al 100 % la percentuale in peso d'acqua assorbita igroscopicamente raggiunge al massimo il 10 %; mentre con U.R. tipo magazzino scende a meno del 2 %.

Con l'Analisi Dinamico Meccanica (pag. 309 e seg., **Figura 1**) si riesce sperimentalmente a stabilire per un polimero (in questo caso il Nylon 6.6) una relazione fra contenuto d'acqua e  $T_g$ , come rappresentato nella **Figura 72** (pag. 94), dove, variando la U.R. dalla condizione "magazzino" (40 %) a quella "grotta" (100 %) la Temperatura di transizione vetrosa scende da 60°C a 43°C. Di fatto, con l'idratazione diminuisce la cristallinità dei fili elementari e, di conserva, lo Sforzo alla rottura  $\sigma_r$  e il Modulo  $E$ . D'altro canto, a parità delle altre condizioni, i **fili elementari della corda** passano allo **stato gommoso** (plastico) a **temperature più basse**.

In sintesi anche questo è un fatto che condiziona al ribasso la cristallinità del polimero, decretando al tempo stesso un decadimento delle sue proprietà meccaniche.

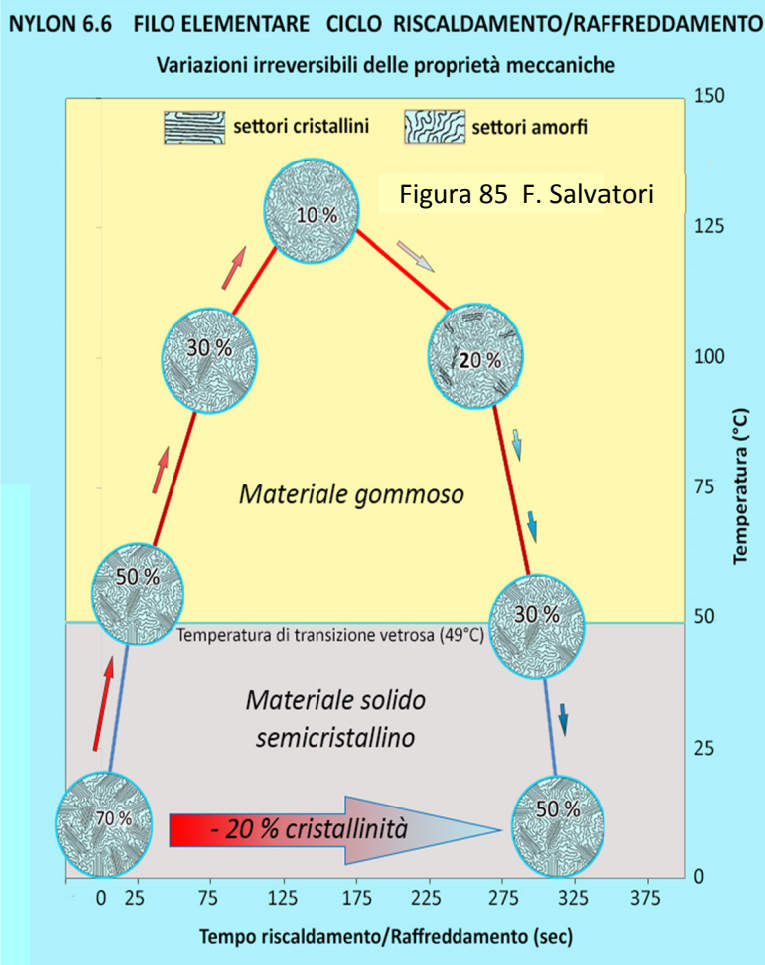
### **08.I.c) Irreversibilità delle trasformazioni cristallino/amorfo dovute alle variazioni di temperatura: decadimento delle proprietà meccaniche dei fili elementari**

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**). Ad esempio, 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. Una situazione non dissimile accade con corde dinamiche nell'arrampicata sportiva.

Pertanto, durante la progressione in discesa o nelle calate con freni, tutte le sezioni trasversali della corda subiscono un **riscaldamento momentaneo**, anche con netto **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 decina di secondi) 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.

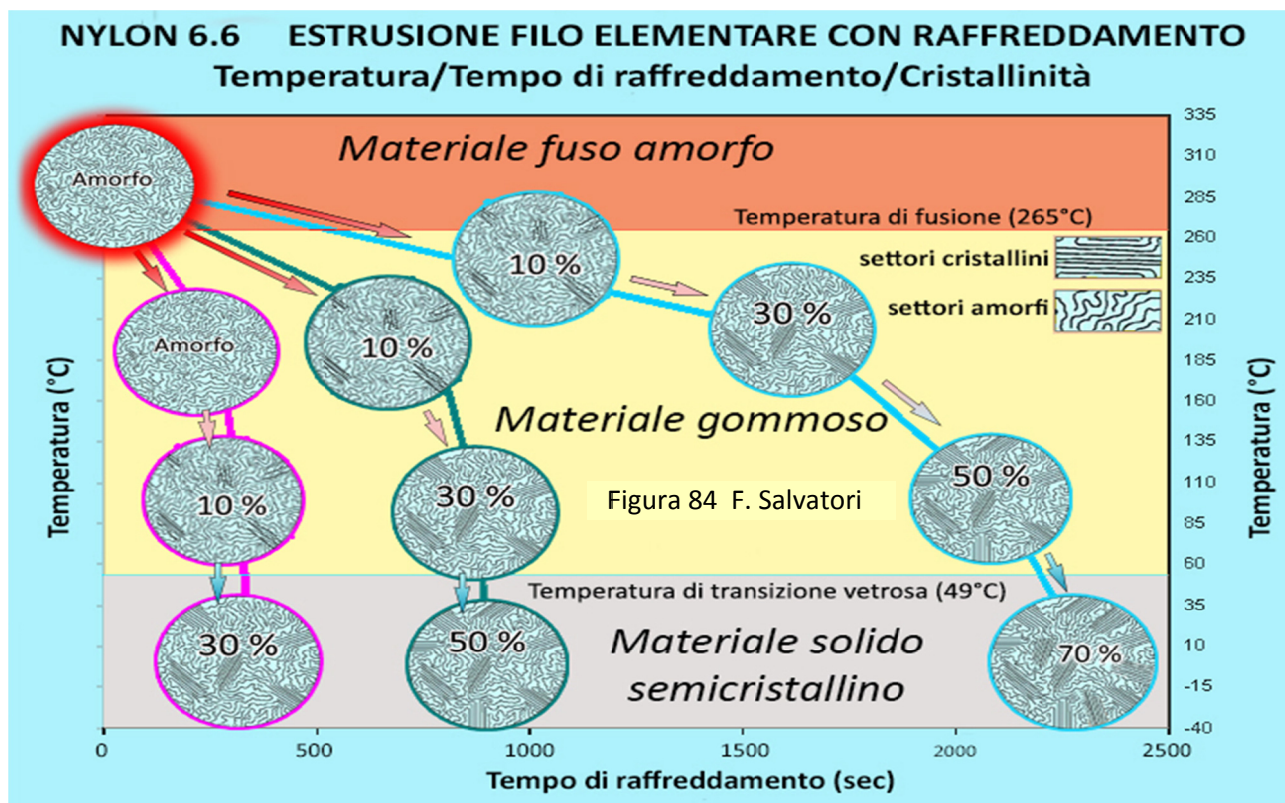


Inoltre, il recupero della cristallinità risulterà tanto più ridotto quanto più elevata sarà la temperatura massima raggiunta.

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.

**08.l.d) Formazione dei fili elementari: tempo di raffreddamento e grado di cristallinità finale**



Nella **Figura 84** c'è l'esposizione sinottica di tre possibili vie di produzione delle fibre di poliammide 6.6 (pag. 61, **Figura 50**) 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 anche **dai tempi** che portano alla filatura finale della fibra: 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.

In grotta, date le basse temperature ambientali, i raffreddamenti sono molto veloci, e questo contribuisce a diminuire ulteriormente la cristallinità dei fili elementari e le loro proprietà meccaniche.

### **08.m) Rottura di una corda con trazione su gassa annodata, effetto nodo e temperatura di transizione vetrosa $T_g$**



Figura 79 F. Salvatori

Applicando un carico o una trazione a una corda annodata (pag. 95, **Figura 78**), al momento del cedimento si determina una rottura con valore  $F_{rn}$  che è sempre **inferiore al valore  $F_r$**  della corda sollecitata senza nodi (pag. 29, **Figura 18**).

La riduzione percentuale di forza è **definita "effetto nodo"** e può variare dal **30 % al 60 % e oltre** (tabella di pag. 95) [37]. Questo vale per ogni tipo di corda composta da fili elementari di materiale polimerico, nuova o usata, tanto asciutta come bagnata. E' **una presenza ineludibile** in ogni tipo di progressione speleo-alpinistica, con la quale bisogna far conto **per valutare la capacità effettiva di resistere alla rottura**.

Anche in questo caso è il **calore prodotto per attrito a causare il cedimento**, sempre sul nodo, come indica la freccia in **Figura 79** (pag. 96).

Proprio nel tratto di corda indicato dalla freccia, dove durante la trazione e la conseguente strizione del nodo si concentrano contestualmente la massima pressione fra le spire e la massima velocità di scorrimento, l'attrito produce la maggior quantità di calore e si manifesta il maggior innalzamento di temperatura.

Realizzando un test come rappresentato nella **Figura 80** (pag. 96), trazione con forza crescente fino alla rottura e registrazione delle temperature nel nodo con termocamera, si ottengono i risultati rappresentati in **Figura 81** (pag. 97). La corda in esame è una Courant Ultima 10,5 mm nuova (Nylon 6).

Vi si mostra evoluzione fino alla rottura (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  $16^\circ\text{C}$ );
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  $23,7^\circ\text{C}$ , nel nodo ha raggiunto  $25,3^\circ\text{C}$ , all'uscita dal nodo, proprio dove avverrà il cedimento brusco e totale, è  $31,2^\circ\text{C}$ ;
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  $18,5^\circ\text{C}$  e i  $34,2^\circ\text{C}$ , ben al di sotto della Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  (circa  $45^\circ\text{C}$ ); **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  $52,1^\circ\text{C}$  (è da immaginare che prima di ottenere la rottura della corda questa temperatura limite salga ancora).

### CORDA COURANT ULTIMA 10,5 MM NUOVA NYLON 6

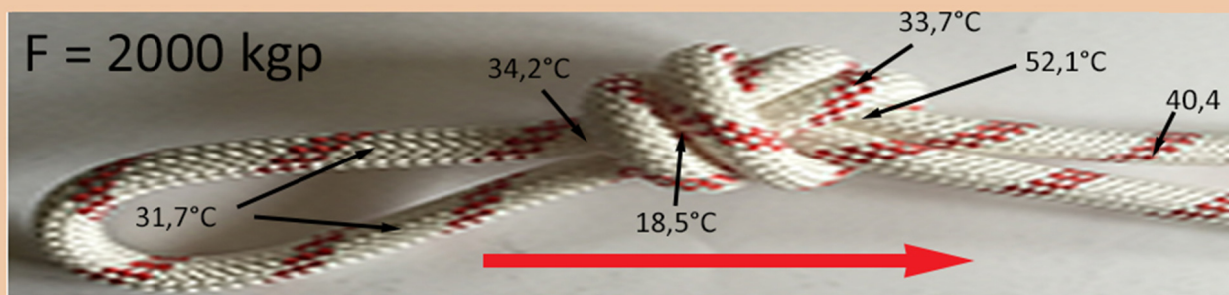
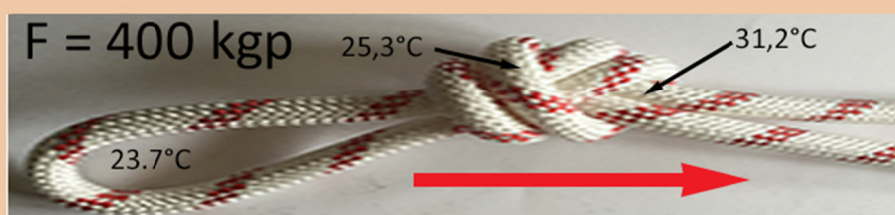
$$F_r = 3123 \text{ kgp}$$

$$F_{rn} = 2046 \text{ kgp}$$



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

Figura 81 F. Salvatori



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 maniere 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**, il più accentuato, creandovi "l'anello debole". E quindi qui, e solo qui, può avvenire la rottura non appena nella trazione si raggiungerà la forza sufficiente.

Dunque il meccanismo che produce la rottura della corda sul nodo non è il **cedimento per fusione** dei fili elementari: è di ben altra natura e **non richiede il raggiungimento della Temperatura di fusione  $T_m$** , ma piuttosto solo il superamento della Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$ . E tanto prima viene superata, tanto più basso sarà il valore di  $F_{rn}$ .

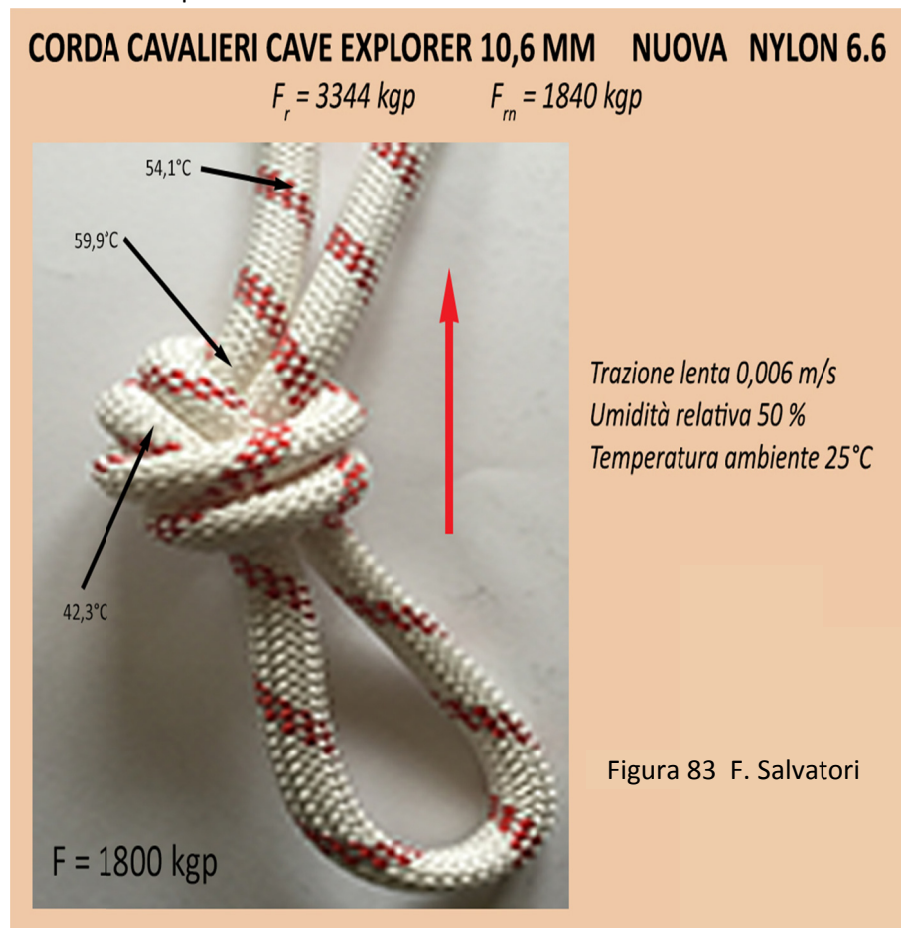
Il valore di questo "carico di rottura con nodo"  $F_{rn}$  è ovviamente inferiore al "carico di rottura senza nodo"  $F_r$ , con una percentuale variabile da nodo a nodo, da corda a corda, da corda nuova/usata e da corda asciutta/bagnata. La diversità di valori è dovuta all'interagire di un numero rilevanti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

In **Figura 82** (pag. 98) 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 ( $64,2^\circ\text{C}$ )** 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 52,1°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.



In **Figura 83** (pag. 99) 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 59,9°C**, superando quindi 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. Potrebbe essere dovuto, semplicemente, al fatto che le immagini sono state registrate, a partire dal momento in cui si è superata la  $T_g$ , in tempi diversi.

Non essendo riusciti a modellizzare la "struttura nodo", si possono comunque trarre alcune verosimili conclusioni ipotetiche:

1. le differenze nelle temperature massime raggiunte è conseguenza della geometria dei modi e della manifattura della corda, entrambe con architetture abbastanza complesse;
2. le stesse cause sono all'origine delle differenze "nell'effetto nodo" come viene ben evidenziato nella tabella riportata in precedenza (pag. 95);
3. 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;**
4. 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).

## 09. TEST A TRAZIONE LENTA: altri riscontri sperimentali del decadimento delle corde speleo-alpinistiche prodotto dall'uso in grotta e in montagna; valutazioni rispetto alle modifiche della struttura semi-cristallina dei fili elementari; contributo dell'abrasione meccanica della calza

Utilizzando dei test a trazione lenta (quasi-statica  $v = 0,006 \text{ m/s}$ ), sono state effettuate, con modalità e periodi di tempo diversi, delle indagini sperimentali su vari campioni di corde usate nella progressione speleologica, confrontandoli poi con le equivalenti corde nuove.

Lo scopo è stato di analizzarne il decadimento, collegandolo, anche singolarmente, ai vari fattori di possibile degrado (escluso l'effetto idrolisi, visto che i campioni di corda sono stati testati in condizione "nuovi asciutti" o "usati asciugati"):

1. contatto con l'acqua e quindi idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari e degradazione idrolitica,
2. contatto con gas e quindi depolimerizzazione per ossidazione (ossigeno e ozono),
3. esposizione ai Raggi UV,
4. pirolisi con depolimerizzazione,
5. abrasione meccanica della calza,
6. produzione di calore per attriti,
7. applicazione di carichi ripetuta,

anche tenendo conto delle argomentazioni e delle conclusioni tratte nei precedenti **Capitoli 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06 – 07 – 08** (i riferimenti specifici saranno indicati di volta in volta attraverso la numerazione delle **Pagine**, delle **Figure** e delle **Relazioni**, come sempre in precedenza).

### **09.a) Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)**

Spezzoni da 40 m di corda statica per uso speleologico - Beal Antipodes 10,5 mm Nylon 6 – sono stati consegnati a diverse Associazioni speleologiche. Qui di seguito la descrizione delle condizioni sperimentali utilizzate e dei risultati raggiunti.

#### **09.a.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 **16 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 **14 campioni** sono stati distribuiti ad altrettanti Gruppi Speleologici (*pag. 124, Figura 98*) 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 Gruppo di Lavoro Tecniche a Materiali alla scadenza di due anni.

In realtà i campioni di corda erano 20, ma 4 di questi sono andati dispersi.

## 09.a.b) Elenco dei campioni di corda (G. Grotte assegnatari) e relazioni sintetiche sul loro uso

n°	Gruppi Grotte	Relazioni (Figura 98 F. Salvatori)
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

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.

### 09.a.c) Tipo di test effettuati

**09.a.c.1) 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.

E' un test molto importante perché permette di definire la quantità di materiale che si oppone alla rottura e all'allungamento della corda attraverso il calcolo della Superficie efficace  $S_e$ , valore equivalente alla somma di tutte le superfici trasversali dei fili elementari che compongono la corda, che permette di elaborare analisi molto rilevanti.

Dalla Superficie efficace si calcola facilmente il Diametro efficace  $d_e$ , che è equivalente al diametro di un elemento polimerico isotropo a sezione trasversale circolare, con massa pari a quella dell'insieme dei fili elementari.

**09.a.c.2) 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). In raffronto a  $F_r$  dà percentualmente l'entità dell'effetto nodo.

**09.a.c.3) Superficie efficace  $S_e$  e sue variazioni; valutazione delle proprietà meccaniche complessive dell'insieme dei fili elementari che costituiscono una corda** - Con il test a rottura senza nodi si definisce anche la **Superficie efficace  $S_e$**  (pag. 303-304, **Relazione f**), equivalente alla somma delle sezioni trasversali di tutti i fili elementari che compongono la corda, trasformandola di fatto in una barra isotropa di polimero, nella fattispecie di Nylon 6.

La relazione da utilizzare è:

$$S_e = \frac{F_r}{\rho \cdot \sigma_{sr}} \quad (f)$$

dove:

$F_r$  = Forza (carico) alla rottura senza nodi (N)

$\sigma_{sr}$  = Sforzo specifico alla rottura ( $J/m^3$ )(MPa) = Tenacità (N/Text)

$\rho$  = Densità ( $g/m^3$ )

Il primo valore si ricava con un test a rottura della corda (pag. 31, **Figura 20**), la Tenacità  $\sigma_{sr}$  (che ha le dimensioni di un lavoro) e la Densità  $\rho$  sono riportate in letteratura, come per ogni altro tipo di polimero.

Quindi, il valore di  $S_e$  è legato attraverso  $F_r$  alla **quantità di materiale polimerico** che si oppone alla rottura; mentre la **Tenacità** e la **Densità** fanno riferimento al **tipo di polimero** e alla **sua qualità** in termini di strutturazione delle catene di macromolecole nei fili elementari. Soprattutto entra in gioco il Grado di cristallinità, che influenza fortemente la proprietà meccaniche della fibra (pag. 368 e seg.).

Se la **corda è nuova** i dati si ricavano dalle Tabelle di **Figura 19** (pag. 30) e sono standard.

Se la **corda è usata** la Superficie efficace diminuisce rispetto alla nuova in quanto:

1.  $F_r$ , rimanendo ferme le condizioni dei fili elementari della corda nuova, può diminuire di valore perché registra l'eventuale mancanza di qualche filo elementare della corda a causa di rotture prodotte, ad esempio, dall'abrasione sulla calza (pag. 135, **Figura 117**), del cedimento per il succedersi di aumenti della temperatura (pag. 102-103, **Figura 85**) e delle successione di sollecitazioni, se troppo energetiche (pag. 174 e seg., **Parte VI**);
2.  $\rho$  diminuisce il valore in presenza di una Degradazione idrolitica per perdita di massa (pag. 83, **Figura 74**), ma solo se nel polimero la cristallinità scende sotto il 50 %;
3.  $\sigma_{sr}$  diminuisce per i fattori degradanti che portano alla depolimerizzazione a causa del contatto con l'acqua (Idrolisi e Degradazione idrolitica), della produzione di calore per attrito con l'insieme freni/corda (pag. 102-103, **Figura 85**), dell'esposizione ai Raggi U.V., del contatto con ossigeno e ozono, della successione di choc (pag. 174 e seg., **Parte VI**); tutti fattori che, singolarmente o in sinergia, determinano la conseguente riduzione del Grado di cristallinità dei fili elementari e quindi della Tenacità.

E' difficile distinguere i vari contributi che provocano la diminuzione della Superficie efficace. Tuttavia è verosimile ritenere che la Degradazione idrolitica per perdita di massa (Punto 2) dia un contributo trascurabile e che il decadimento di una corda usata per uso speleo-alpinistico sia tutto concentrato nelle variazioni della Tenacità e quindi della Cristallinità delle fibre polimeriche.

Come a dire, in concreto, che il **decadimento** di una corda per usura si **riferisce quasi esclusivamente alla sua componente visco-elastica**, i fili elementari.

Un ruolo non di primo piano è lasciato all'**Abrasione della calza**. Mentre un contributo trascurabile, in termini di **deformazioni permanenti** che incidono sulle proprietà meccaniche, è riservato alla CSCC (pag. 327 e seg., **Figura O**).

Pertanto si può concludere che la misura della Superficie efficace  $S_e$  e le sue variazioni sono un indice significativo del grado di visco-elasticità della corda. Tale relazione è il fondamento che permette di

applicare l'Analisi Dinamico Meccanica ai test a caduta del peso (pag. 39 e seg.) e valutare sperimentalmente la visco-elasticità delle corde e la sua variazione in funzione del decadimento portato dall'uso in grotta e in montagna.

Nel caso si voglia utilizzare il Diametro efficace  $d_e$  anziché  $S_e$ , magari per **confrontarlo con il Diametro apparente** comunicato dal costruttore, s'immagina che l'elemento polimerico sotto esame sia di forma cilindrica (come un filo elementare, ad esempio, pag. 62, **Figura 52**) e di conseguenza si utilizza la relazione (pag. 28 e seg., **Relazione 8**):

$$d_e = 2 \sqrt{\frac{F_r}{\pi \cdot \sigma_{Sr} \cdot \rho}} \quad (8)$$

**09.a.c.4) 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, con l'intento di forzare al massimo l'allungamento, portandolo quasi alla rottura della corda (più energia si fornisce, più elementi d'analizzare appaiono).

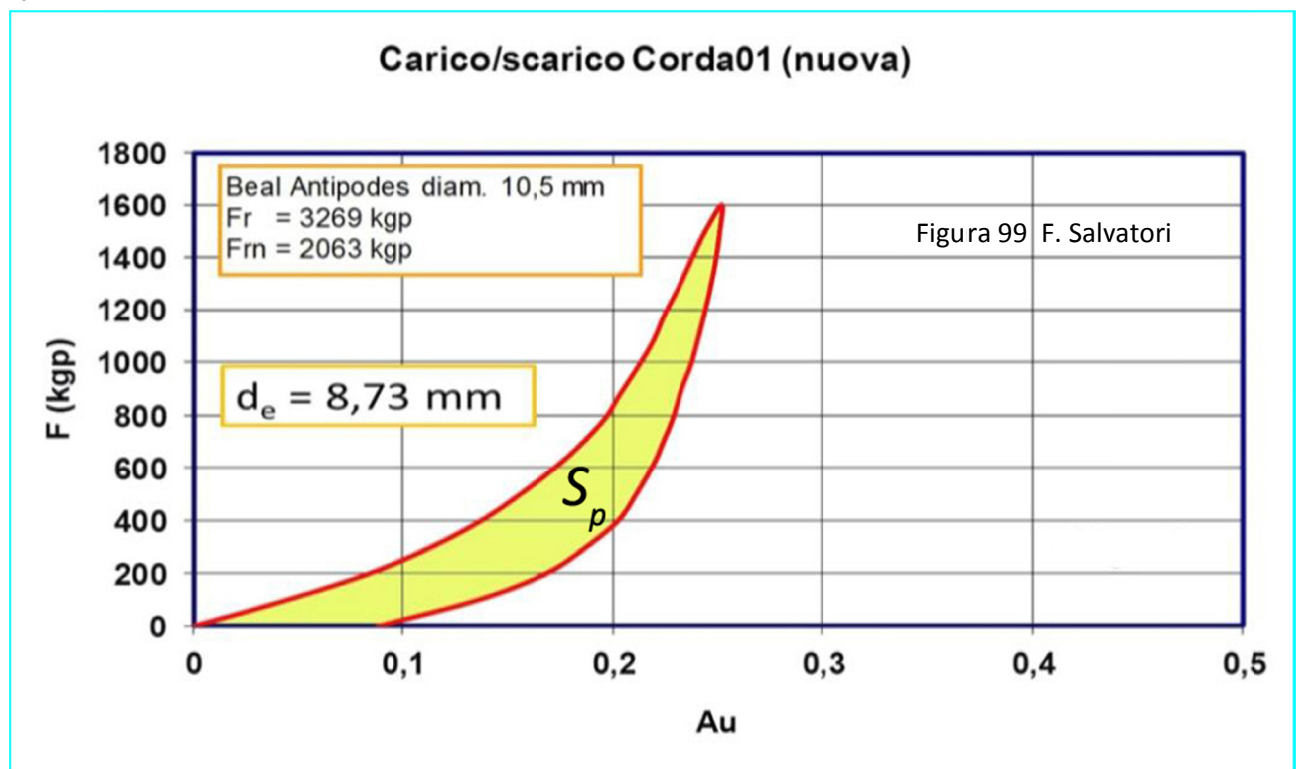
Per il Campione n° 1 (corda nuova) ne scaturisce un grafico come in **Figura 99**, dove  $A_u$  è l'allungamento unitario:

$$A_u = l/l_0 \quad (22)$$

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.).

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 diagrammi degli campioni di corda qui di seguito esposti.

Lo scopo di questo test di carico/scarico, altrimenti detto "d'isteresi" (con un solo ciclo), è di valutare:

1. approssimativamente, la **duttilità del materiale polimerico**: tanto più la curva è inclinata verso destra tanto minore sarà la rigidità e, quindi, tanto maggiore sarà la sua capacità d'assorbire/dissipare l'energia di una eventuale caduta di un peso sulla corda);
2. valutazioni sui **decadimenti irreversibili** di una corda attraverso l'estensione della superficie  $S_p$  (pag. 32, **Figura 21**).

In particolare:

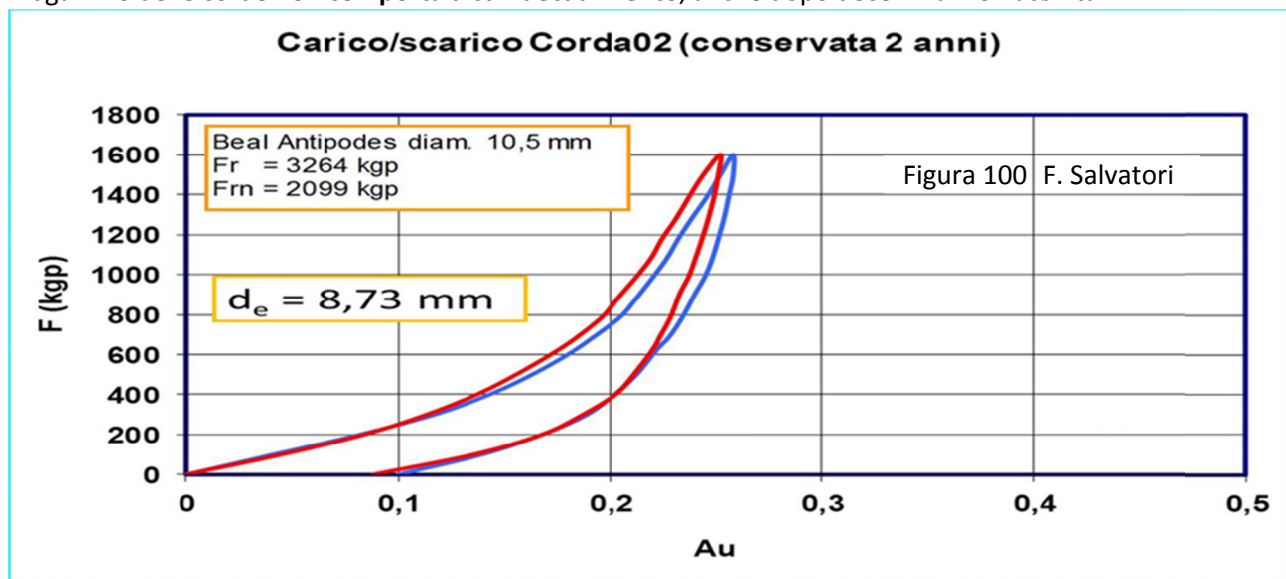
1. la superficie  $S_p$  compresa fra la curva di carico e scarico (in giallo, definita "Superficie di plasticità") ha un'estensione pari all'energia dissipata dalla corda con deformazioni **permanenti** (irreversibili) anche legate alla Compattazione della Struttura Complessa della Corde CSCC (pag. 327 e seg., **Figura O**);
2. all'estensione della superficie  $S_p$  contribuisce, anzi ne è una parte preponderante, 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 plastici irreversibili dovuti alla sollecitazione a trazione.

Soprattutto la **Visco-elasticità** della corda, **tutta concentrata nel materiale polimerico** dei fili elementari, subendo una trazione, 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 energia, 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**).

### 09.a.d) Risultati dei test e confronto fra corda nuova e corde usate

**09.a.d.1) Corda nuova e corda conservata in magazzino per 24 mesi** - Il grafico di **Figura 100** (pag. 125) 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 analogo prova di **usura di un anno**).

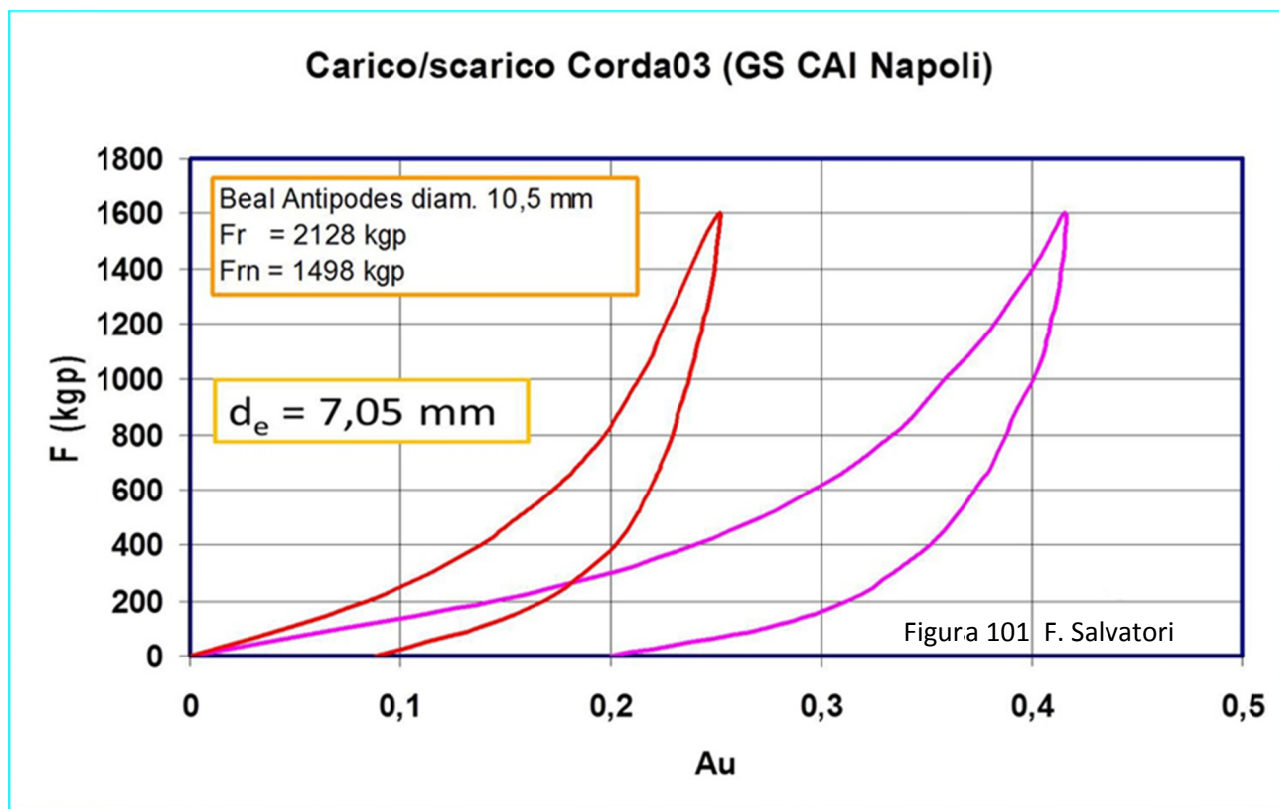
E' evidente, come del resto è inconfutabilmente confermato da altri test, che una **corretta conservazione** in magazzino delle corde **non comporta alcun decadimento**, anche dopo decenni di non attività.



**09.a.d.2) Corda nuova e corde usate per 24 mesi dai Gruppi Grotte** – Semplificando al massimo, si può affermare che i risultati ottenuti coi 14 spezzoni testati si possono suddividere in due categorie:

1. n. 9 campioni con risultati rientranti nella normalità dell'uso speleologico, senza interventi di situazioni di degrado particolari,
2. n. 5 campioni con dati sperimentali anche propri di situazioni d'uso con modi, tempi e ambienti particolari, che impongono decadimenti particolarmente rilevanti.

**09.a.d.2.1) Corde usate normalmente** - Il grafico di **Figura 101** (pag. 126), ricavato dai test sullo spezzone di corda utilizzato dal G.S. CAI Napoli, viene preso in considerazione e descritto in quanto simile e rappresentativo dei risultati di altri 8 spezzoni consegnati ai G.G. CAI (Belluno, Macerata, Boegan Trieste, Saronno, Cento Talpe, Rovereto, XXX Ottobre Trieste, Valstagna) che possono essere inclusi in questa categoria.



È evidente che la corda usata ha subito un marcato degrado generale, evidenziato dalla forte diminuzione del Diametro efficace  $d_e$  (7,05 mm dell'usata contro 8,73 mm della nuova); come a dire che è "scomparso" il 19 % della quantità di materiale che si opponeva alla rottura e all'allungamento.

Di conseguenza la curva d'isteresi della corda usata (linea viola) si è "distesa" e "allungata", perché, a parità di condizione di trazione, c'è meno materiale che si oppone all'allungamento, rendendo la corda apparentemente composta da materiale più deformabile e più capace di assorbire/dissipare l'energia prodotta da una eventuale caduta di un peso (pag. 42, **Relazione 13**).

Ma questo che sembra un punto di vantaggio rispetto alle corde nuove, in concreto non lo è; anzi determina una situazione di potenziale pericolo perché con il diminuire del Diametro efficace diminuisce anche il Carico di rottura  $F_r$ . E la considerazione paradossale per cui una corda più è usata e meglio assorbe/dissipa l'energia derivante dall'applicazione di carichi, si scontra sopraffatta con la constatazione che anche la capacità di resistere al cedimento aumenta parimenti e in maniera più pericolosa.

Altro aspetto che emerge dal grafico di **Figura 101** è legato all'evidente maggiore estensione della Superficie di plasticità della corda usata (contorno viola) rispetto all'analoga curva della corda nuova. È un altro lampante indice che le sollecitazioni, l'applicazione di carichi e la trazione con forza progressiva producono una maggiore quantità di deformazioni permanenti nelle corde usate, andando così a incidere ulteriormente sulla loro condizione di degrado.

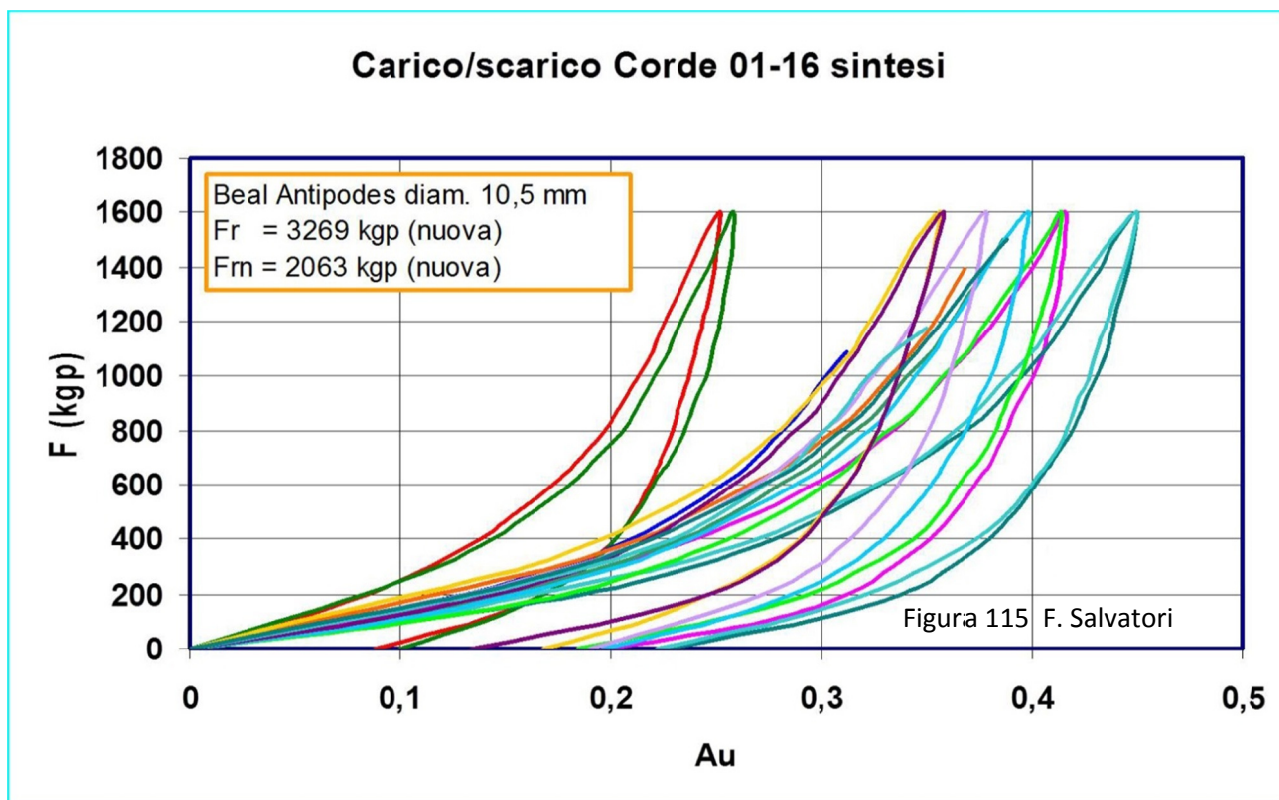
Nelle considerazioni soprastanti non si è fatta distinzione fra i contributi dati dai vari fattori che portano all'usura di una corda. Se questa distinzione viene sviluppata, l'analisi che ne segue è:

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 questo da un contributo alla diminuzione del Diametro efficace, con le conseguenze già sopra esposte;
2. il calore prodotto dall'attrito negli attrezzi di progressione portano i fili elementari a superare più volte la "**Temperatura di transizione vetrosa**"  $T_g$  (che per il Nylon 6 è di circa 42°C) per poi ritornare a temperature inferiori (pag. 101 – 102, **Figure 84 – 85**); questo, con il discensore, avviene più volte in ogni discesa su corda; 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, **Figura 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 (per i fili elementari) e del Carico di rottura senza nodi per la corda;
3. il filo elementare di Nylon è costituito, nella sua parte cristallina, da catene di macromolecole disposte parallelamente l'una all'altra, con legami ionici ("idrogeno") trasversali (pag. 65, **Figura 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, come è sempre stato fatto con le corde testate in questa prova d'usura, l'idrolisi dei legami idrogeno è completamente reversibile e pertanto questo fattore non viene preso in considerazione in questo contesto.
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  $\sigma_r$  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 **Figura 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;
6. 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.

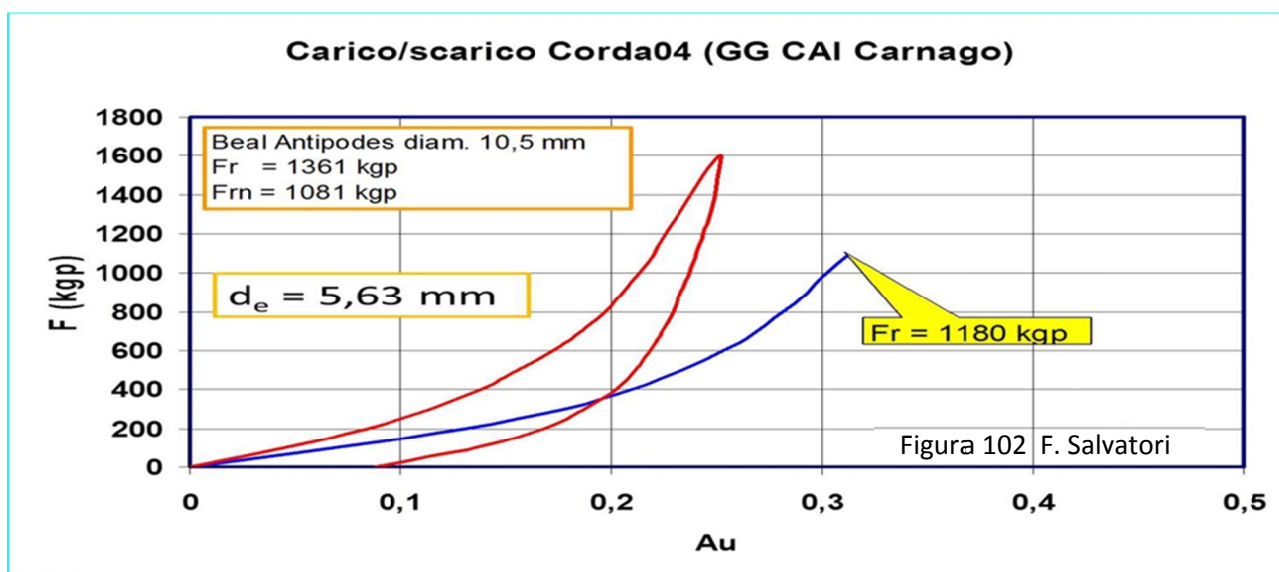
Sempre in relazione alla corda usata per due anni dal G.S. CAI Napoli, dai carichi di **rottura con nodo o senza nodo** si rileva che è ancora in buono stato, e può essere ancora utilizzata. Infatti, valore di **1100 kgp** (**LIR = limite inferiore di resistenza**) [37], imposti come forza minima per gli "anelli" della **Catena di Sicurezza**, è bel lontano dal carico di rottura con nodo  $F_{rn}$  (1498 kgp).

La corda, dunque, **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**.

La **Figura 115** (pag. 134) sintetizza il comportamento di tutti i 16 spezzoni di corda testati e conferma che tutti dati elaborati per i campioni di corda appartenenti a questa categoria di usura "normale" sono equivalenti e le differenze non sono sostanziali: è impossibile che alcuni Gruppi Grotte possano aver fatto un uso in grotta uguale nei modi, nei tempi e nell'ambiente operativo.



**09.a.d.2.2) Corde usate alla presenza di fattori degradanti straordinari** - I dati rappresentati in **Figura 102** (pag. 127), ricavati dai test sullo spezzone di corda utilizzato dal G.G. CAI Carnago nell'Abisso Schiaparelli, mostrano una situazione d'eccezionalità rispetto a quanto mostrato nel precedente **Punto 09.a.d.2.1**.



Il decadimento per usura della corda testata è molto più avanzato che negli altri casi sinora esaminati. Infatti la curva di Carico non è potuta arrivare a compimento (1600 kgp) perché il cedimento è avvenuto ben prima, ad appena 1180 kgp. Anche nell'altro analogo test la trazione senza nodi ha dato come risultato la rottura a 1361 kgp.

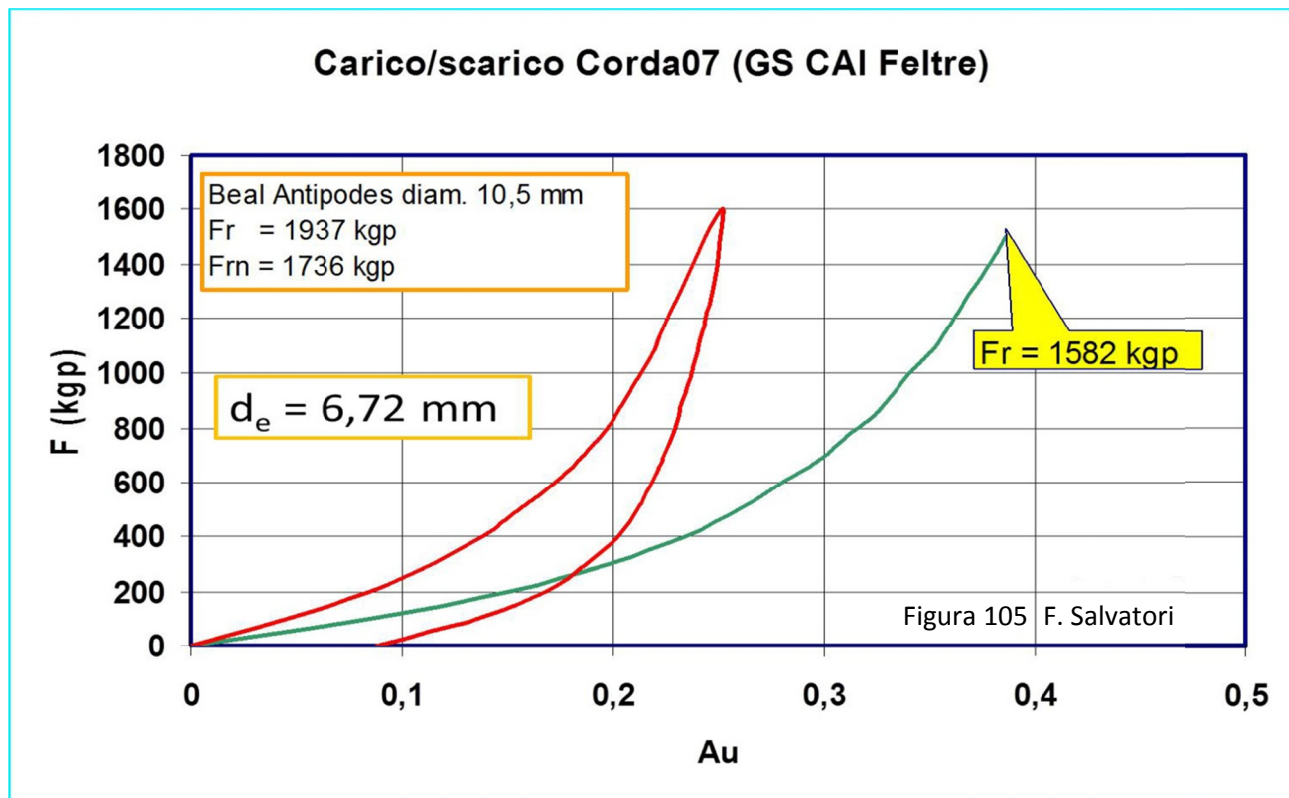
Il Diametro efficace ha subito una riduzione, da 8,73 mm della corda nuova ad appena 5,63 dell'usata, una riduzione del 36 % (quasi il doppio della riduzione subita dalla corda del G.S. CAI Napoli, che è del 19 %).

Il motivo di questa straordinaria decadenza è legata al fatto che l'Abisso Schiaparelli è scavato in **un calcare fortemente selcifero** (micro granuli di selce sedimentatisi con la calcite), marcatamente abrasivo. Si vede chiaramente che siamo in una situazione d'eccezionalità ambientale che si discosta fortemente dal caso "normalità".

I calcari selciferi, infatti, vengono disgregati dalla corrosione dei fluidi carsici e liberano micro granuli di selce, duri e taglienti, che si portano a contatto con la corda d'armo e fra le pulegge del discensore e la corda stessa, innescando un processo di abrasione della calza, protrattosi per due anni nella grotta con almeno 130 discese di speleologi. Questa abrasione ha prodotto la lacerazione di numerosi fili elementari della calza, come si può vedere in **Figura 131** (pag. 148).

Naturalmente la corda e i suoi fili elementari hanno subito anche il decadimento dovuto agli altri fattori degradanti, come da elenco nel precedente Punto **09.a.d.2.1**.

Il grafico di **Figura 105** (pag. 129) mostra i dati della corda utilizzata dal **GS CAI Feltre**, utilizzata solo per **42 discese** e **10 risalite**: il cedimento a 1582 kgp di forza non ha permesso di completare la curva di carico a 1600 kgp. Ciò non vuol dire necessariamente che la corda ha raggiunto una condizione d'usura al limite dell'utilizzabile in sicurezza, tanto più che 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, come dimostra l'esperienza sulla corda del Pozzo Pataton (pag. 155, **Figura 136**).



Una situazione peggiore della precedente è espressa dalla corda consegnata al **G.S. Mezzano**, i cui risultati numerici sono riportati in **Figura 107** (pag. 130), mostrando fra l'altro che non è stato completato il ciclo d'isteresi per una rottura avvenuta a 1460 kgp.

È dunque una corda abbastanza compromessa, utilizzata per **271 discese** e **271 risalite**, 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 di 1460 kgp, ridotto del 30% per effetto nodo, porta a un valore di 1022 kgp, inferiore al LIR imposto dalla catena di sicurezza [37]. I valori di  $F_r$ ,  $F_{rn}$ ,  $d_e$  dicono che la corda può ancora essere utilizzata nella normale progressione in grotta, ma sapendo che è al limite, con una condizione che garantisce appena un uso in sicurezza affidabilità.

La situazione di **particolare 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 le grotte dove la corda è stata utilizzata si aprono nel **gesso** dove è alta la probabilità che materiali insolubili argillosi contenenti granuli di selce entrino in contatto con la corda stessa e con le pulegge dei discensori (vedi effetto abrasione, pag. 127, **Figura 102**).

Una situazione del tutto simile si ha nella corda usata dal **G.S. CAI Lucca** (pag. 134, **Figura 114**). In questo caso l'elemento di straordinarietà che ha accentuato il degrado della corda è da imputare **all'alto numero di discese/risalite (264/264)** e dell'ambiente operativo, che ha interessato **forre e, soprattutto, palestre esterne**, dove l'effetto UV, ossigeno e ozono incide in modo marcato.

Infine, nell'ambito della categoria di casi di usura accentuata da fattori degradanti straordinari, si esamina la corda gestita dal **G.S. CAI Bolzaneto** (pag. 133, **Figura 113**), **simile** al caso della corda del G.G CAI Carnago, tenuta **nell'Abisso Schiaparelli (calcari selciferi)**.

In questo caso il **fattore degradante straordinario** è l'intenso uso, anche esterno in palestra, con **ben 343 discese e 343 risalite**.

Sintetizzando, sulla base della sperimentazione eseguita, gli elementi che maggiormente provocano il decadimento delle corde sono: il **numero di discese/risalite, quindi l'effetto calore**; la natura della roccia dov'è scavata la cavità (**calcari selciferi e gesso**) e la composizione dei sedimenti che contiene (**granuli di selce nei depositi d'argilla insolubile**).

In conclusione, si può affermare che **una corda statica speleo può essere utilizzata anche per più di due anni di uso continuativo normale**, a meno che non **sopravvengano fatti straordinari di usura**, da valutare di volta in volta.

### 09.a.e) Conclusioni sintetiche e mediate dei test effettuati

**09.a.e.1) Riduzione della Superficie efficace e Diametro efficace** - Dell'azione congiunta di tutti i fattori degradanti di una corda, provenienti dall'uso in grotta, per quanto riguarda il raffronto corda nuova/corde usate per la diminuzione della Superficie efficace  $S_e$  (e quindi del Diametro efficace  $d_e$ ) vale quanto contenuto nella tabella della **Figura 118** (pag. 136) che sintetizza i risultati ottenuti nei 16 campioni di corda sotto esame.

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. Da ricordare la straordinarietà dell'abrasione dei calcari selciferi l'importanza del numero delle discese su corda.

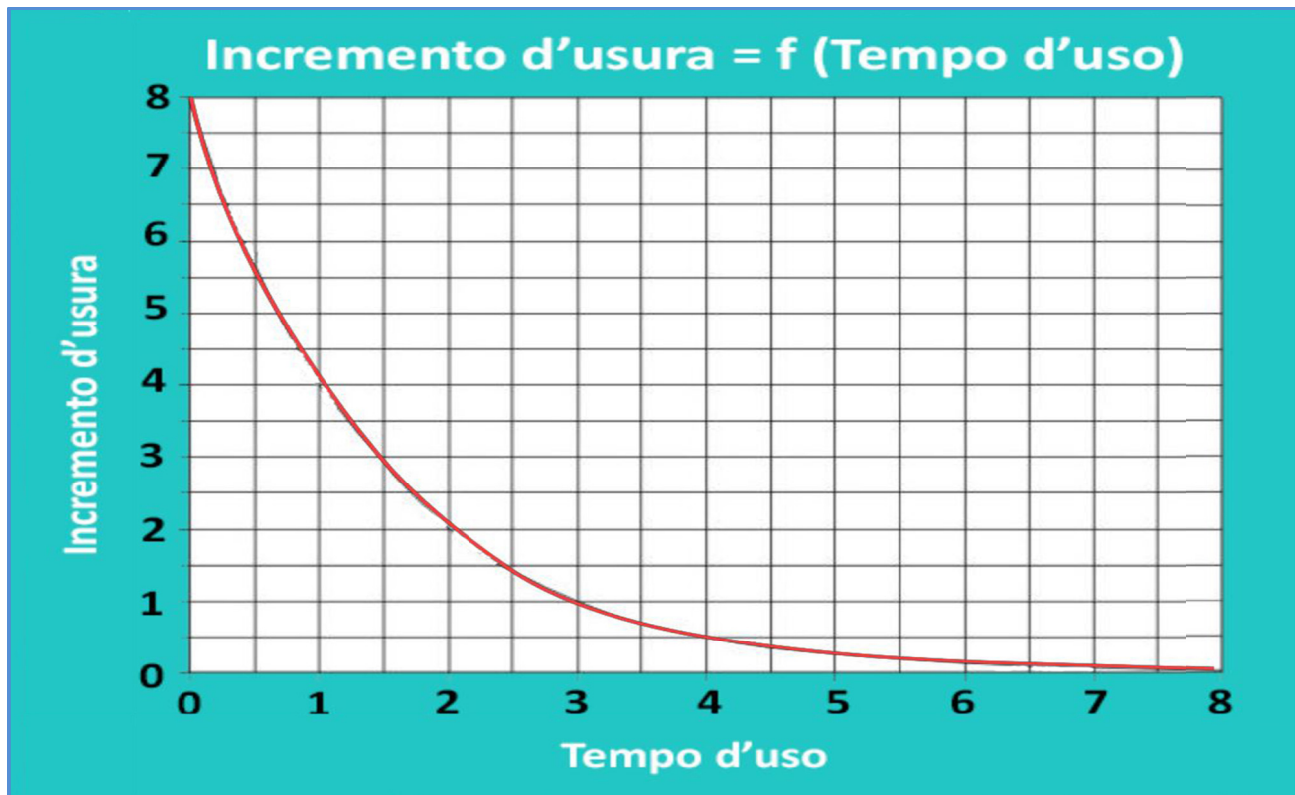
**Da notare.** A queste riduzioni, essendo stati eseguiti i test con corde nuove asciutte o corde usate asciugate, nel momento dell'utilizzo nell'armo in grotta occorre aggiungere la riduzione del 10 % circa per "effetto idrolisi" e il 40 % circa per "effetto nodo".

**09.a.e.2) Riduzione della lunghezza dei campioni di corda** - E' un fatto conclamato che con l'uso, qualunque esso sia, le corde si accorciano. Da quanto ricavato con l'esperienza qui descritta la riduzione di lunghezza media dopo due anni d'uso è del 14,5 %. E' questo un dato del quale occorre tenere conto durante l'armo nei tratti verticali delle grotte, soprattutto se corde nuove (si potrebbero creare delle anse troppo corte nei frazionamenti e dei corrimano troppo tesi).

**09.a.e.3) Riduzione del carico di rottura senza nodo; valutazione dell'andamento generale dell'usura in dipendenza del tempo d'uso** - Si giunge a valutazioni complessive del tutto uguali a quelle indicate nel precedente **Punto 09.a.e.1** relativo alla Superficie efficace. Infatti  $F_r$  è strettamente legato a  $S_e$  dalla **Relazione 7** (pag.29).

Da aggiungere a quanto sinora già detto: delineando grossolanamente un **curva che indichi il grado di decadenza in funzione del tempo** si ottiene una l'andamento di una funzione esponenziale decrescente (vedi grafico qui di seguito rappresentato).

Lo sviluppo iniziale indica una decrescita rapida, ma con gradienti in progressiva riduzione, tanto che, via via, si riducono al punto di avere decadimento per usura quasi nullo. Il contatto asintotico con l'asse del Tempo è puramente teorico: nella realtà il decadimento della corda per l'insieme dei fattori usuranti non può raggiungere il valore "zero" perché con il tempo procede anche il cedimento dei fili elementari, e quindi una rottura totale del campione che interrompe il processo di graduale decadimento.



**09.a.e.4) Riduzione dei carichi di rottura per effetto nodo sulle corde nuove e usate** - L'Effetto nodo deve essere sempre tenuto presente nel calcolo del Carico di rottura reale e il suo decremento, nelle corde usate, deve aggiungersi a quello prodotto dall'utilizzo nella progressione in grotta (si ricorda: nell'ambiente sotterraneo deve aggiungersi anche l'effetto idrolisi).

Volendo quantificare queste situazioni di degrado in base ai dati ottenuti con i test effettuati in questa prova d'usura di 24 mesi, facciamo riferimento alla Tabella di **Figura 122** (pag. 139).

### 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
<b>Media</b>	<b>1847</b>	<b>44</b>	<b>1450</b>	<b>56</b>	<b>12</b>

La terza colonna da sinistra dà le percentuali di riduzione di Carico di rottura senza nodi; e quindi è un valore commisurato al grado di usura complessivo senza l'aggiunta di alcun altro effetto: in media si ha un riduzione del 44 %, quasi la metà delle proprietà meccaniche delle corde va persa in due anni d'uso.

Se consideriamo anche l'effetto nodo sulle corde usate allora la riduzione complessiva è in media del 56 %. Dal che discende, tenendo in conto i valori della terza e quinta colonna da sinistra, che nelle corde usate l'Effetto nodo medio è appena del 12 %.

Ecco dunque una constatazione importante: nelle corde usate l'Effetto nodo, che con le corde nuove varia dal 30 % al 60 %, si riduce a un valore poco superiore al 10 %.

Questo è un aspetto positivo; ma non bisogna dimenticare che viene abbondantemente annullato dal fatto che l'uso in grotta porta anche a una forte diminuzione del Carico di rottura, per la rottura dei fili elementari e la loro diminuzione di cristallinità. Ciò ci espone alla possibilità, in caso di sollecitazione per applicazione repentina di un carico, di raggiungere Forze massime (pag. 43, **Relazione 13**) superiori al Carico di rottura  $F_{rn}$ .

**Attenzione.** Tutte le considerazioni fatte in questo **Capitolo 09.a** sono frutto dei risultati dei test elencati nei Punti precedenti, che hanno coinvolto corde utilizzate in grotta, palestra e forra, ma **senza periodi di permanenza prolungata e continuativa in grotta**. Se invece si tratta di usura derivante da utilizzo su armi fissi per tempi prolungati, di anni e addirittura decenni, occorre tenere presente un ulteriore fattore di decadenza: la Degradazione idrolitica per perdita di massa e/o diminuzione di Peso molecolare numerico (pag. 82 e seg., **Figure 74-75**).

Se questa condizione di permanenza continuativa in grotta si fosse realizzata anche nella presente prova d'usura di 24 mesi, dovremmo aggiungere un'ulteriore diminuzione del Carico di rottura di circa il 12 % (pag.161 e seg., **Figura 141-142-143**) (pag. 155 e seg., **Figura 136**) (pag. 157 e seg., **Figura 137**), come a dire che al 56 % di riduzione media della terz'ultima colonna della tabella di **Figura 122** si deve aggiungere un ulteriore 12 %, per **un totale del 68 %**.

Se poi, in ultima analisi, si aggiunge l'ineludibile effetto idrolisi per l'U.R. al 100 % dell'ambiente-grotta (pag. 105, Figura 87), si raggiunge una **perdita complessiva delle proprietà meccaniche della corda pari al 78 %**. Come a dire che una **corda nuova, con carico di rottura iniziale di 3000 kgp, con l'uso speleologico normale e la permanenza continuativa in grotta per due anni**, riduce il valore di  $F_{rn}$  ad appena 660 kgp.

### **09.b) Test su corda speleo nuova non usata e conservata in magazzino 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) ha dato i seguenti risultati:

<b>CORDA EDELRID SS 10 MM NON USATA E CONSERVATA IN MAGAZZINO PER 18 ANN</b>		
<b>senza nodo</b>	<b>2939 kgp</b>	
<b>con nodo guida con frizione d.s.</b>	<b>1901 kgp</b>	<b>(- 35%)</b>

In precedenza, nel 1996, è stata sottoposta a test a trazione lenta lo stesso tipo di corda, appena acquistata dal rivenditore e mai usata. I risultati per  $F_r$  e  $F_{rn}$  sono stati:

<b>CORDA EDELRID SS 10 MM NUOVA</b>		
<b>senza nodo</b>	<b>2948 kgp</b>	
<b>con nodo guida con frizione d.s.</b>	<b>1899 kgp</b>	<b>(- 36%)</b>

E' un risultato che toglie ogni dubbio: **le corde se conservate opportunamente mantengono la condizione iniziale anche per decine di anni.**

### 09.c) Test su corda speleo nuova e usata con tempi d'utilizzo differenti

Su corde Beal Antipodes 10,5 mm statiche usate in maniera differente sono state eseguite delle ricerche sperimentali a trazione lenta (0,006 m/s) per ricavare:

1. test a rottura senza nodo per ricavare  $F_r$ ,
2. test a rottura con nodo (guida con frizione) per ricavare  $F_{rn}$ ,
3. curve di carico/scarico fino a 1600 kgp di forza.

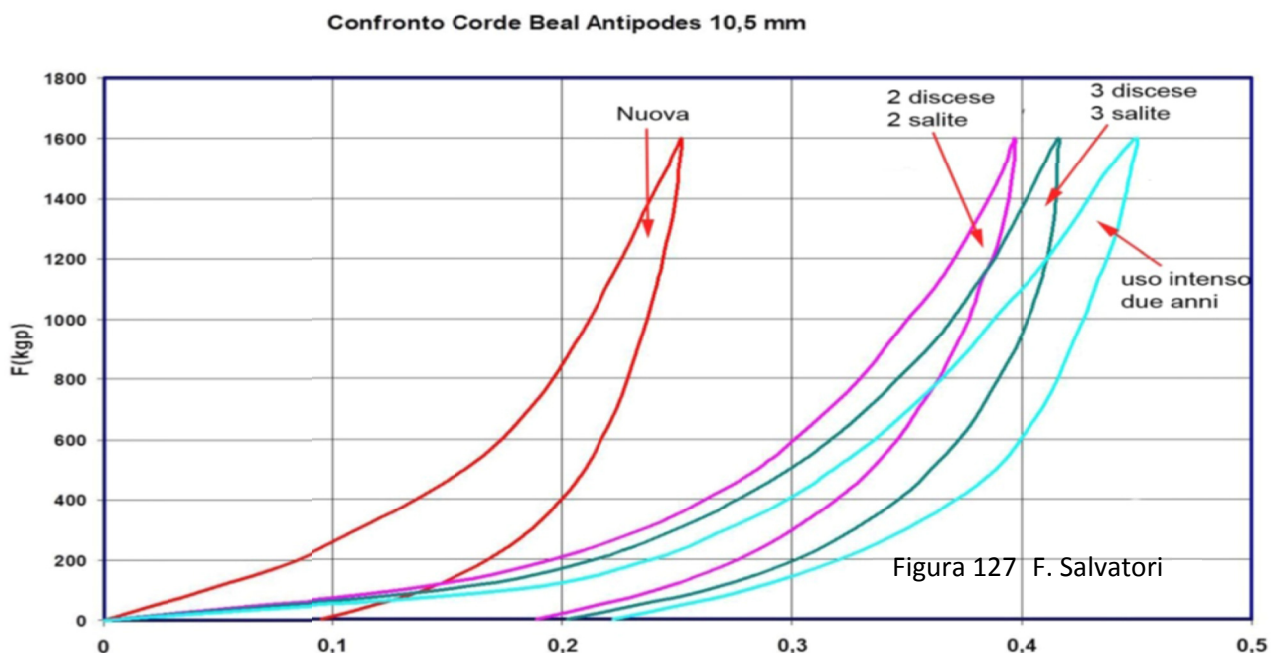
Il riferimento per la stessa corda nuova è contenuto in **Figura 100** (pag. 380). Con questa sono state messe a confronto campioni di corda prelevati da:

1. una corda Beal Antipodes 10,5 mm utilizzata in grotta **per due anni** (pag. 141, **Figura 124**);
2. una corda Beal Antipodes 10,5 mm utilizzata in grotta con calcari selciferi per 5 risalite e 5 discese (pag. 142, **Figura 125**);
3. una corda Beal Antipodes 10,5 mm utilizzata in grotta per 3 risalite e 3 discese, in ampia voragine, senza particolari contatti con le pareti (pag. 142, **Figura 126**).

La tabella che segue riassume i principali dati sperimentali ottenuti:

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

che suggeriscono in modo abbastanza deciso come il numero delle discese/risalite fa crescere il grado d'usura, ma non con incrementi in proporzione diretta: s'intravede piuttosto un andamento della curva di decrescita del tipo rappresentato nella **Figura** di pag. 386 (esponenziale decrescente), come a dire che l'usura procede più rapidamente all'inizio dell'utilizzo, per poi rallentare l'intensità con il passare del tempo. I grafici contenuti nella **Figura 127** (pag. 143) confermano quest'ultima affermazione con l'andamento e la dislocazione delle curve d'isteresi.



Dall'insieme dei risultati sopra esposti si possono ricavare alcune interessanti considerazioni, alcune anche sorprendenti:

1. la deformabilità delle tre corde usate (la capacità di assorbire l'energia comunicata con la trazione) è mostrata dalla dislocazione verso destra delle curve d'isteresi: non c'è una grande differenziazione nonostante la grande difformità nei tempi d'uso; lo si deve alla funzione tampone della CSCC (Compattazione della Struttura Complessa della Corda) (pag. 327 e seg.) che agisce in modo marcato alle prime sollecitazioni, ma poi, al succedersi di queste, va esaurendo la sua funzione di assorbire/dissipare energia;
2. sorprendentemente, il Carico di rottura con nodo della corda usata "3 discese/3 salite" è poco inferiore all'equivalente  $F_{rn}$  della corda "usata intensamente due anni" e di conseguenza la differenza nel Diametro efficace  $d_e$  è anch'essa minima; sembra evidente che al decadimento di una corda speleo la diminuzione del materiale che si oppone alla rottura incida in maniera contenuta;
3. invece la deformabilità all'allungamento, anche in questo contesto, risente in modo rilevante la **diminuzione del Diametro efficace per motivi straordinari**, 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 %; questo a conferma di quanto già dimostrato sperimentalmente nel **Punto 09.a.d.2.2** (pag. 383).

### **09.d) Test a ulteriore conferma del decadimento delle corde per degradazione idrolitica, fotodegradazione, contatto con gas ossidanti, sollecitazioni ripetute e trasmissione di calore; confronto fra corde di Nylon 6 e Nylon 6.6 e fra corde usate in speleologia e arrampicata sportiva**

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.

#### **09.d.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 i 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 eseguite sulle corde sopra indicate hanno portato alla compilazione delle **sei tabelle** riportate a nelle *pagg. 145-146*, con i risultati più rilevanti sintetizzati nella tabella di **Figura 128** (*pag. 147*).

**Da ricordare ancora una volta.** Il contatto della corda con l'acqua produce **l'idrolisi dei legami idrogeno intermolecolari nelle catene di macromolecole** e ( di conseguenza) la riduzione delle proprietà meccaniche dei fili elementari. Però il fenomeno, **eliminando il contatto con l'acqua**, è reversibile completamente. Per questo motivo, visto che i test effettuati sono stati eseguiti tutti con corde asciutte nuove o usate asciutte, l'effetto idrolisi non viene preso in considerazione in questo capitolo.

Corde: test quasi-statici		confronto dati nuove/usate		
Beal Antipodes 10 mm Nylon 6				Figura 128 F. Salvatori
	<b>Nuova</b>	<b>Usata</b>	<b>Diminuzione %</b>	
F <sub>r</sub> corda (kqp)	2666	1370	49	
F <sub>r</sub> calza (kqp)	1046	470	55	
F <sub>r</sub> 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				
	<b>Nuova</b>	<b>Usata</b>	<b>Diminuzione %</b>	
F <sub>r</sub> corda (kqp)	1862	1130	39	
F <sub>r</sub> calza (kqp)	764	372	51	
F <sub>r</sub> 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				
	<b>Nuova</b>	<b>Usata</b>	<b>Diminuzione %</b>	
F <sub>r</sub> corda (kqp)	3344	1533	54	
F <sub>r</sub> calza (kqp)	864	566	34	
F <sub>r</sub> trefolo (kqp)	157	116	26	
Diametro efficace (mm)	7,6	5,1	33	
Punto fusione (°C)	265			

**09.d.b) Confronto fra corda Beal Antipodes 10 mm statica Nylon 6 nuova e usata non continuativamente per 3 anni in grotta; valutazione dei singoli contributi dei fattori degradanti** – Dai dati della Tabella sintetica di **Figura 128** si può valutare che **l'insieme dei fattori degradanti** prodotti dall'uso della corda nella progressione speleologica ha ridotto complessivamente **del 49 % la tenuta alla rottura** (il complesso dei fattori di degrado sono quelli indicati a *pag. 376* o *pag. 382*).

**09.d.b.1) Quantificazione percentuale della perdita di proprietà meccaniche a causa del danneggiamento della superficie esterna della calza per abrasione sulle pareti della grotta** - Se si analizza separatamente il degrado della calza e di un trefolo si rileva che quello della calza è del 55 % mentre quello del trefolo è del 47 %. E' evidente che nella calza ha agito **un fattore di degrado aggiuntivo, pari all'8 %, la cui azione ha interessato solo la calza**. Dall'esame delle **Figure 129-130-131-132-133** (pag. 148) ne scaturisce la spiegazione.

Dalla immagini delle **Figure 129-132-133** (corda nuova e usata, intera e sezionata) si rileva che nella corda usata tutti trefoli e le maglie all'interno della calza appaiono come nuovi, con un aspetto candido e sericeo. Mentre l'esterno della calza appare sfilacciato e, al tatto, peloso.

Inoltre, esaminando la foto della **Figura 130** (pag. 148) relativa alla condizione dei fili elementari dei trefoli e dell'interno della calza della **corda usata** si nota che l'aspetto è **uguale a quello dei fili elementari della corda nuova, senza alcuna recisione e/o incisione**. Per contro nella **Figura 131** è rappresentata la condizione dei fili elementari sulla **superficie della calza della corda usata**, dove un'alta percentuale di fili elementari sono rotti o comunque danneggiati.

Pertanto è abbastanza verosimile concludere che una corda speleo utilizzata intensamente per tre anni subisce una riduzione delle sue caratteristiche meccaniche ( $F_r$  ed  $E$ ) di circa il 50 %, di cui l'8 % per il danneggiamento dei fili elementari posti all'esterno della calza. Tutti dati che confermano quanto già indicato in precedenza (pag. 326 e seg., **Punto 01.c**).

**09.d.b.2) Il contatto con l'acqua e la Degradazione idrolitica** - E' un'azione lenta, che agisce in modo non trascurabile quando le corde vengono immerse in acqua e/o esposte all'atmosfera-grotta con U.R. al 100 % (quindi è sufficiente che la corda testata sia entrata in grotta): in tre anni d'uso in grotta può anche essere non trascurabile.

Può essere sia Degradazione idrolitica per perdita di massa (pag. 83, **Figura 74**) che per diminuzione del peso Molecolare numerico  $M_n$  (pag. 84, **Figura 75**) e incide con una **diminuzione del Carico di rottura della corda senza nodi per circa 0,54 kgp/giorno**; come attestano i risultati della sperimentazione riportati sulla **Figura 141** (pag. 164 e seg.).

Ciò significa che la corda Antipodes in questione ha diminuito di 590 kgp, in tre anni d'attività continuativa in grotta, il Carico di rottura senza nodi  $F_r$ , come a dire il 22 % in meno del suo valore iniziale da nuova; una quantità non certo trascurabile.

Comunque si ricorda che questo è l'apporto percentuale massimo, con la corda rimasta permanentemente in grotta. Se invece il tempo di permanenza sotterranea fosse inferiore l'effetto Degradazione idrolitica sarebbe inferiore. E questo è un'altro elemento su cui riflettere per un migliore utilizzo delle corde speleo: più è lunga la permanenza in grotta, maggiore è il degrado.

**Da ricordare.** Il contatto con l'acqua provoca anche l'idrolisi dei legami idrogeno, ma, essendo quest'azione degradante completamente reversibile con l'asciugatura, non viene presa in considerazione.

**09.d.b.3) La produzione di calore per attriti fra corda e freni** - Probabilmente è questo il fattore degradante di maggiore effetto nella diminuzione delle proprietà meccaniche dei fili elementari e quindi della corda: vari elementi, sperimentali e teorici, sembrano confermarlo.

Nei **Punti 14.a e 14.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.

La convinzione che il calore prodotto per attriti fra corde e discensori sia una delle cause principali del decadimento delle fibre polimeriche (fili elementari) è sostenuta anche dal quantificare il numero di volte in cui, discendendo, si produce una quantità di calore tale da far superare abbondantemente la

Temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  lungo tutta la corda percorsa; per poi raffreddarsi a temperatura ambiente-grotta. Nei fili elementari questo processo porta a una graduale progressiva diminuzione della Cristallinità e quindi diminuzione delle proprietà meccaniche del polimero (pag. 91 e seg., **Figure 76a-76b**) (pag. 100 e seg., **Figure 84-85**) (pag. 81, **Figura 73**). Si pensi a quante volte questo processo di riscaldamento/raffreddamento avviene durante la normale attività di una corda speleo; processo ineludibile nella progressione speleo.

Ad aggravare la situazione contribuisce il processo di plasticizzazione prodotto dal contatto con l'acqua igroscopica, che penetra nelle poliammidi e abbassa il valore il valore della Temperatura di transizione vetrosa, come mostra la **Figura 72** (pag. 80); favorendo quindi l'avvento delle ripetute trasformazione cristallino/gommoso e viceversa.

A conferma della conclusione che l'effetto calore è una dei fattori principali, se non il principale, del decadimento delle fibre polimeriche stanno i risultati dei test effettuati sulla corda posta **fissa** nell'armo del Pozzo Pataton); risultati descritti e commentati nel Capitolo 05 (pag. 155 e seg.)

**09.d.b.4) La trasformazione della struttura semicristallina dei polimeri a causa del succedersi dell'applicazioni di carichi** - Ogni volta che un filo elementare di una corda viene sollecitato ad allungarsi le catene di macromolecole che lo costituiscono come materiale isotropo si deformano e in parte rimangono deformate (pag. 64, **Figura 56**) (pag. 67 e seg., **Figure 11-58-59**). Questo, di fatto, fa **decretere il Grado Cristallino/Amorfo** nei fili elementari con **conseguente diminuzione delle loro Proprietà meccaniche**. Un esperimento di Creep può illustrare bene nella sostanza il comportamento visco-elastico dei fili elementari della corda e della corda stessa (pag. 307 e seg., **Figure G-H**; pag. 315, **Figure N-O**)

Le sollecitazioni alle quali si fa riferimento sono soprattutto quelle conferite alla corda, a velocità ridotta, quando si risale con i bloccanti (pag. 151, **Figura 134**). Non sono di grande intensità, ma sono numerosissime e ognuna lascia un piccolo "danno" di deformabilità permanente, che si somma agli altri "danni" provocati dai precedenti e si aggiungerà a quelle che verranno. Sommando piccoli incrementi di diminuzione di cristallinità, si può giungere anche a un rilevante degrado dei fili elementari.

Analogamente, nelle discese su corda si provocano sollecitazioni variabili, sempre di non grande intensità, ma numerosissime (pag. 151, **Figura 135**).

Possiamo elencare nel dettaglio gli aspetti salienti, a livello delle catene di macromolecole nei fili elementari, del fenomeno degradante causato dal **succedersi delle sollecitazioni**:

1. 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  $F_r$ );
2. 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  $E$ ;
3. si possono creare sui fili elementari, soprattutto in superficie e in corrispondenza delle zone cristalline più fragili, delle "cricche", cioè delle microfrazture con rottura parziale di alcuni fili elementari; ciò va a discapito del carico di rottura  $F_r$  (e diminuisce anche  $E$  e la  $S_e$ ).

**Da notare.** Nella **Parte VI** (pag. 39 e seg.) vengono esposti i risultati dei **test a caduta di un peso** che registrano le curve d'isteresi in funzione dell'Altezza di caduta del peso (Velocità di deformazione) e del n° di choc conferiti. La **grande quantità d'energia in gioco e il drastico "invecchiamento" procurato dalla successione di choc** conferisce a questi test **molto energetici** una capacità d'analisi che non è possibile raggiungere con le prove al dinamometro presentate in questo **Capitolo 12.a**.

**09.d.b.5) La depolimerizzazione della struttura semicristallina dei polimeri a causa dell'esposizione dei fili elementari ai Raggi UV** - E' 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  $F_r$ .

E' ovvio che quest'azione disgregatrice a livello macromolecole agisce con l'esposizione ai raggi solari, unica fonte naturale possibile di raggi UV. Sono infatti le corde che rimangono esposte a lungo in pareti esterne a subirne un'azione di qualche rilievo. Anche alcune fonti di luce artificiale producono Raggi U.V., come le lampade usate per impedire la formazione di microorganismi animali e vegetali.

Tuttavia quest'azione di depolimerizzazione 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 quasi totale 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.

**09.d.b.6) La depolimerizzazione della struttura semicristallina dei polimeri a causa dell'esposizione dei fili elementari a gas ossidanti** - Il contatto delle corde con gas come lo stesso ossigeno  $O_2$  e il suo prodotto più efficace l'Ozono  $O_3$  ha lo stesso potere depolimerizzante dei Raggi UV, ma questi possono agire anche in assenza delle luce solare. Per quantizzare l'effetto occorre far riferimento a quella diminuzione di  $F_r$  **del 4 %** menzionata nel Punto precedente: in essa è compreso anche l'effetto ossidazione.

I gas ossidanti producono una depolimerizzazione attraverso la rottura dei legami  $-CH_2-CH_2-$  delle macromolecole delle poliammidi (ma la maggior parte dei meccanismi chimici che agiscono 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  $E$ ).

**Da notare.** I raggi UV sono responsabile della formazione di Ozono (la catalizzano). Il che crea una sinergia ulteriore fra ultravioletti e ossidazione.

**09.d.b.7) La depolimerizzazione della struttura semicristallina dei polimeri a causa della pirolisi** - L'effetto degradante della depolimerizzazione delle macromolecole può essere prodotto anche dalla **pirolisi** o **decondensazione** per innalzamento ad **alta temperatura**. Infatti, se l'abbassamento delle temperature durante il processo di formazione dei fili elementari (pag. 61, Figura 50) favorisce la formazione di macromolecole (pag. 61, Figura 49) e poi di catene di macromolecole, con temperature elevate si favorisce la decondensazione, con depolimerizzazione tanto più marcata quanto più è alta la temperatura registrata.

La produzione di calore con raggiungimento di alte temperature non è un evento facilmente registrabile nella progressione speleologica; anche se in certe discese su corda sono state misurate sul discensore temperature prossime ai 200°C. Con le quali, ricordando che la Temperatura di fusione del Nylon 6 è di 218°C e quanto descritto nelle **Figure 76a -76b** (pag. 92), il degrado delle fibre polimeriche (nella fattispecie, poliammidi) deriva dalla somma del passaggio allo stato gommoso estremo alla depolimerizzazione. Anche questo comporta ulteriori problemi alle proprietà meccaniche dei fili elementari (e delle corde).

Ma, attenzione, la pirolisi può avere effetti, sia pur molto ridotti, anche con temperature ambiente-grotta, specie se i periodi d'osservazione sono lunghi. Ma su questo non ci sono riscontri sperimentali accreditati, e tutto porta a concludere che questi effetti possano essere trascurati nell'ambito della vita media di una corda speleo.

**09.d.b.8) La depolimerizzazione della struttura semicristallina dei polimeri a causa di agenti acidificanti** - La formazione delle macromolecole nei fili elementari (pag. 61, Figure 49-50) è favorita dall'abbassamento della temperatura, ma anche da un ambiente basico. Un **ambiente acido invece provoca una depolimerizzazione**, con le conseguenze che sappiamo sulle proprietà meccaniche delle fibre.

L'ambiente-grotta è generalmente caratterizzato da condizioni basiche, molto ben rilevate nei flussi

liquidi che percorrono i sistemi carsici. Ma esistono situazioni in cui l'atmosfera sotterranea risente del tipo di genesi della cavità: se è presente una morfologia che indica **un'origine ipogenica**, allora possono essere presenti gas come l'Idrogeno solforato (o Acido solfidrico)  $H_2S$  o/e Anidride carbonica  $CO_2$ .

Quest'ultima sostanza è talvolta presente in grotta anche in modo massiccio (registrata sin quasi al 20 %) e, se sciolta in acqua, produce un ambiente acido debole il quale, per contatti con la corda molto prolungati nel tempo, conduce a una lenta ma rilevabile depolimerizzazione.

Nel caso di presenza d'**Idrogeno solforato**  $H_2S$  (letale sopra certe concentrazioni, oltre le 10 ppm diviene irritante e non sopportabile a lungo all'uomo). Se ne percepisce l'odore (uova marce) con concentrazioni superiori a 0,2 ppm. E' un gas 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**.

Se una corda è esposta in un ambiente con  $H_2S$  che si è evoluto, catalizzato dai batteri, in  $H_2SO_4$  la depolimerizzazione può divenire molto incisiva. E a tal proposito è possibile far riferimento a una serie di test effettuati su una corda **Edelrid SS 10 mm** è rimasta sospesa dal 1979 al 1998 (19 anni) nel Pozzo Trieste (100 m) delle Stufe di S. Calogero: 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 ipogenico 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 del Carico di rottura senza nodi misurato su 13 diversi tratti di corda è stata:  $F_r = 650 \text{ kgp}$ .

La corda **Edelrid SS 10 mm da nuova e asciutta** dà un carico di rottura  $F_r = 2936 \text{ kgp}$ . Quindi c'è stata una **riduzione** del carico di rottura del **78 %**, come a dire una **decrescita di 0,33 kgp/giorno** (a questo valore occorre togliere il contributo della Degradazione idrolitica per una U.R. pari al 100 %; ma al momento è impossibile dare una valutazione qualsiasi sui singoli contributi e si rimanda ad altri risultati sperimentali da realizzare). Tuttavia, anche sulla base di altri risultati sperimentali, l'ipotesi che la Degradazione idrolitica abbia un ruolo molto più importante dell'azione dei gas acidificanti risulta molto verosimile.

Piuttosto deve essere tenuto in conto che i risultati dei test sin qui riportati sono stati attenuati con corda asciugata in magazzino (40 % U.R.). E quindi volendo considerare anche l'effetto idrolisi che sempre si manifesta in grotta, a quel 78 % di diminuzione occorre aggiungere una percentuale di circa l'8 %. La corda dal Pozzo Trieste delle Stufe di S. Calogero recuperata dopo 19 anni **deve proprio essere eliminata**.

**09.d.c) Confronto fra corda statica Beal Antipodes 10 mm e corda dinamica Beal Booster** - 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:

1. 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;
2. 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;
3. 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 **mancanza 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.

**09.d.d) Confronto fra corda statica Nylon 6 Beal Antipodes 10 mm e corda statica Nylon 6.6 Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm** - 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 "sofferta" meglio gli innalzamenti di temperatura, mantenendo, per esempio, più facilmente le proprietà meccaniche.

### **09.e) Decadimento differenziato di una corda su armo speleo: il caso della corda nel Pozzo Pataton**

**09.e.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).

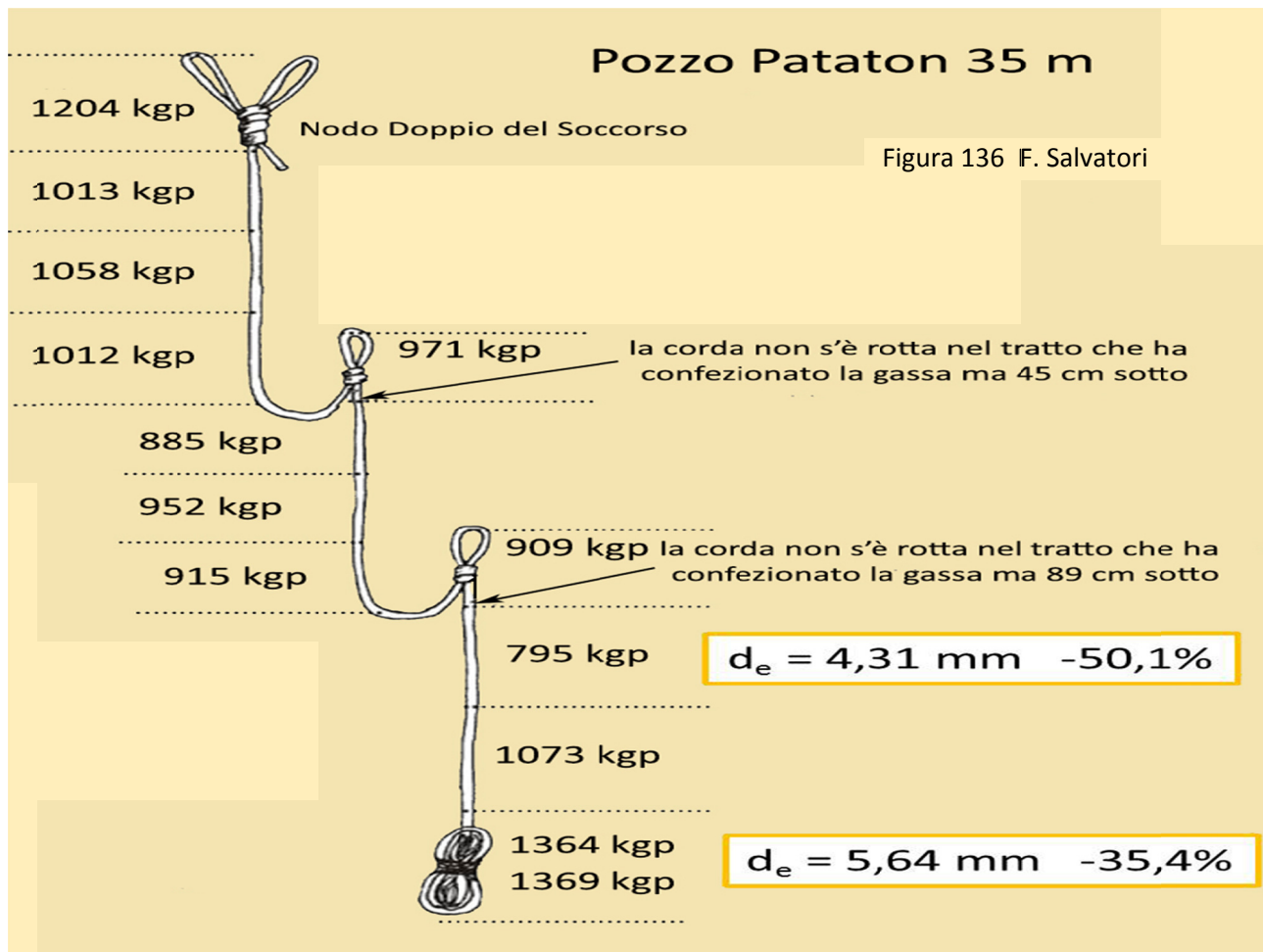
Per evidenziare le difformità nel decadimento abbiamo analizzato una corda tratta dalla grotta senza sciogliere nodi e matasse (Abisso Spaurasso – Monte Grappa - **Pozzo Pataton**) (pag. 155, **Figura 136**).

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.



**09.e.b.1) 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). Nella realtà della progressione in grotta aggiungere l'effetto idrolisi.

**09.e.b.2) 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.

**09.e.b.3) 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**.

**09.e.b.4) 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.

**09.e.b.5) 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. E' 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  $F_r = 3269 \text{ kgp}$ ; 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:

$$1903 \text{ kgp}/3955 \text{ giorni} = 0,48 \text{ kgp}/\text{giorno}$$

**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**).

**09.e.b.6) Analogie nei risultati sperimentali in merito al decadimento irreversibile delle corde per contatto con l’acqua** - Il comportamento sperimentale a trazione fino a rottura della “Bambolina” del Pozzo Pataton è **analogo** a quello riscontrato:

1. nei test che hanno interessato una corda Cousin Testec 10 mm statica lasciata immersa in acqua nella Vasca di Chorance per poco meno di cinque anni (**1781 giorni**) (pag. 358, **Punto 08.e.a**; pag. 161, **Punto 07**);
2. nei test (**Punto 09.e.b.7** che segue) relativi a una corda Cousin Testec 10 mm statica lasciata per **sei anni (2190 giorni)** continuativamente in armo nel Pozzo da 22 m della Scala Celeste nell’Abisso Schiaparelli.

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   | <b>0,48 kgp = 1903 kgp/3955 giorni</b> |
| 2. Cousin Testec 10 mm del Pozzo Scala Celeste | <b>0,55 kgp = 1199 kgp/2190 giorni</b> |
| 3. Cousin Testec 10 mm della Vasca di Chorance | <b>0,54 kgp = 961 kgp/1781 giorni</b>  |

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  $F_r$  si aggira intorno a 0,5 kgp (sembra che nella corda Cousin il degrado abbia un leggerissimo maggiore effetto riduttivo).

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 quindi d'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.

I grafici delle **Figure 142-143** (*pag. 168*) rendono con efficacia la situazione legata alla Degradazione idrolitica.

### **09.f) 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**

**09.f.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 continuativamente 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.

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.

**09.f.b) Condizioni sperimentali** - 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 dell'armo.

È stata effettuata la consueta 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** nell'Abisso 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 in esame era posta a 200 m di profondità nel primo salto di 22 m della "Scala Celeste", frequentemente battuto, a seguito di precipitazioni, da un flusso d'acqua a cascata.

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 (*pag. 109*) (la condizione che rispecchia la situazione reale dell'ambiente carsico ipogeo (dove l'U.R. è al 100 %).

I test su questa corda si distinguono dunque 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".

Tutto questo ha permesso di rilevare tanto la situazione di degrado generale quanto particolareggiata, che mette in evidenza anche la diversità d'usura da tratto a tratto di corda.

**09.f.c) Risultati sperimentali** - 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	$F_r = 2896 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 1398 \text{ kgp}$	<b>(- 52 %)</b>

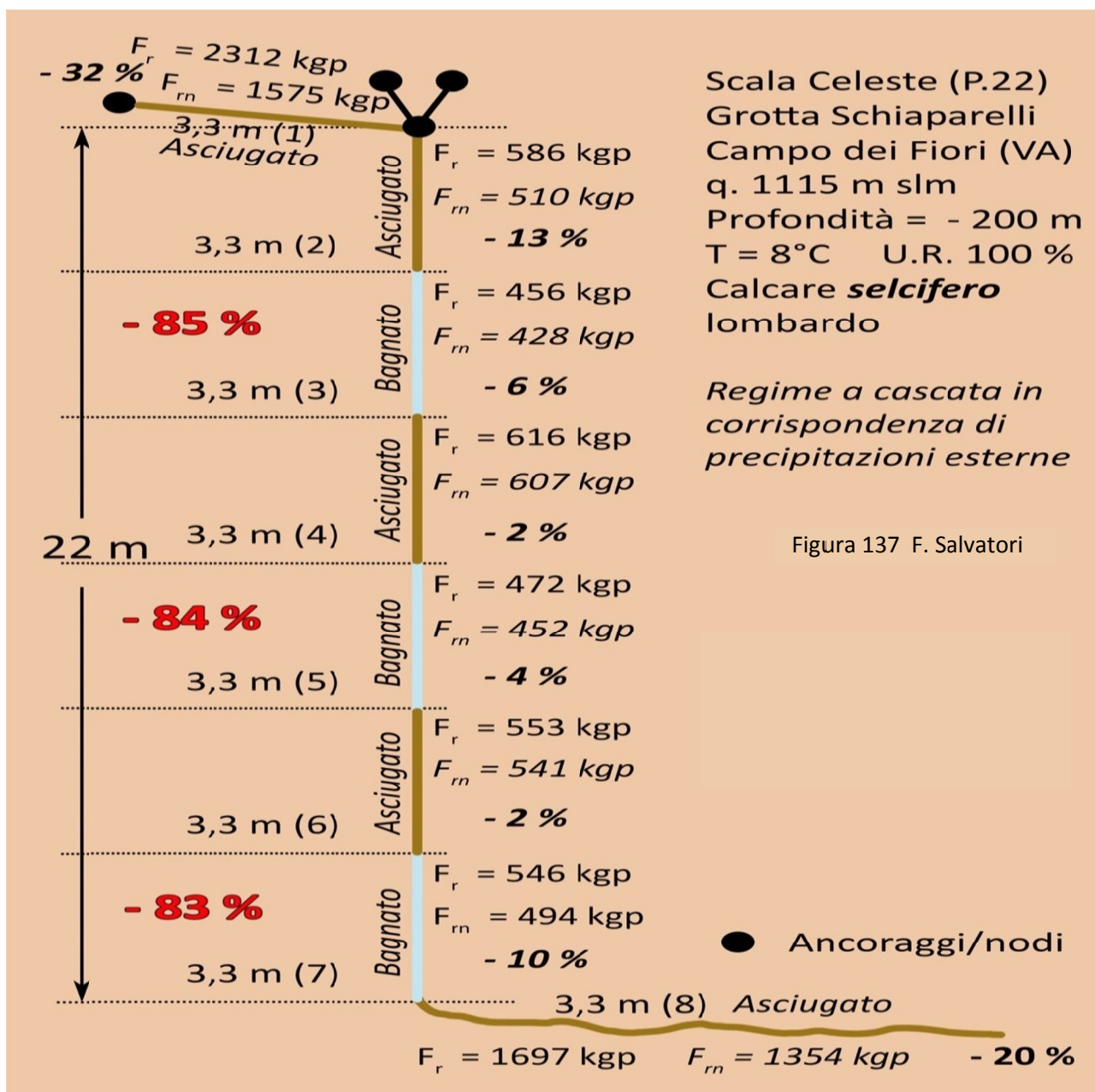


Figura 137 F. Salvatori

Si fa notare che il dato percentuale che meglio rappresenta il confronto fra la corda in condizioni “da nuova asciutta” con la condizione “da nuova bagnata con nodi” (somma dell’ “effetto-idratazione-con –idrolisi” più “effetto nodo”, che rispecchia la realtà della condizione della corda che opera in grotta) è l’ultimo a destra dell’elenco soprastante: - **52 %**, come a dire che una corda nuova appena entra in grotta e viene utilizzata in un armo qualsiasi perde circa la metà della sue proprietà meccaniche, in particolare del Carico di rottura  $F_r$ .

Lo schema d’armo della corda usata è rappresentato nella **Figura 137** (pag. 158) 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).

Per i tratti di corda usata e asciugata e poi immersi in acqua, e quindi rappresentanti la realtà operativa, la riduzione percentuale del carico di rottura fra **corda nuova senza nodi asciutta** e **corda usata con nodi bagnata** è espressa in rosso e sono i valori più rappresentativi dello stato d’usura.

**09.f.c.1) 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 più calore. Tutti gli effetti sommati (usura per la progressione + effetto idrolisi + effetto nodo + degradazione idrolitica) si arriva a un totale di – **84% !!**).

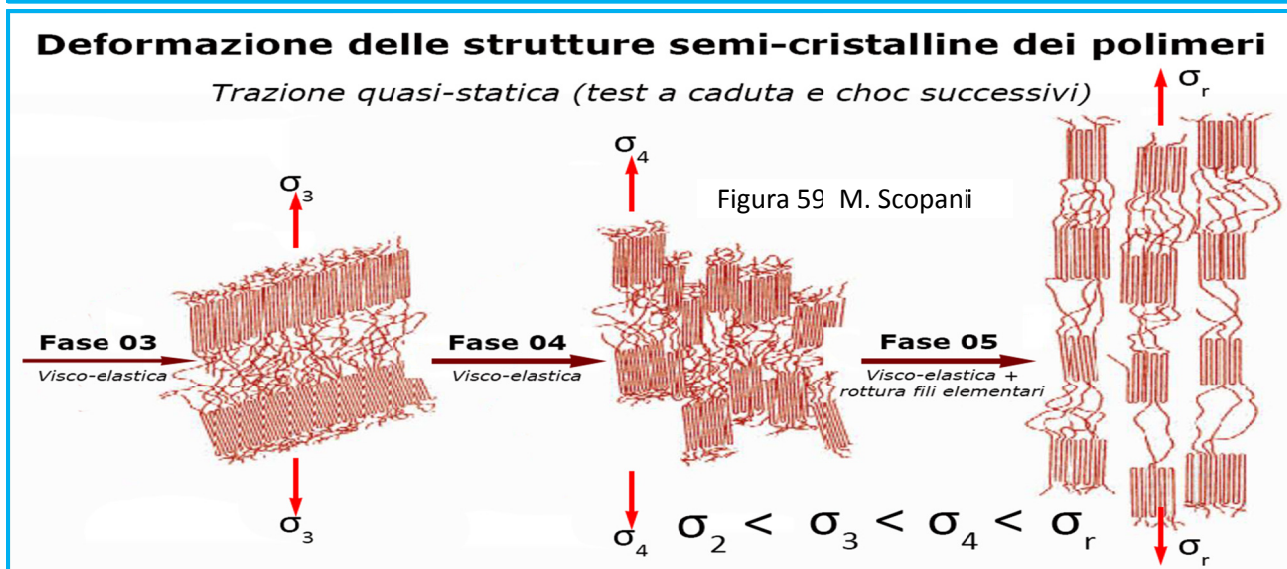
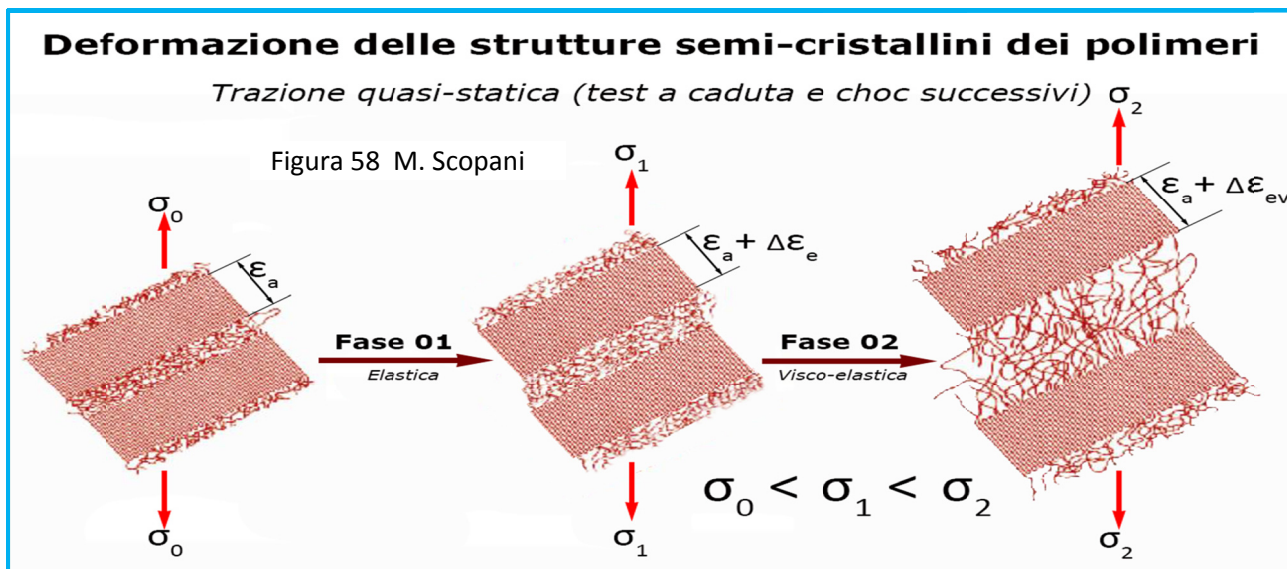
Nel tratto finale di corda, non interessato alla progressione con discensori e bloccanti, si ha una situazione **“senza usura” da sollecitazioni ripetute e calore**, dovuta soprattutto **alla degradazione idrolitica** e in modo quasi irrilevante al contatto con il pavimento, a possibili calpestii, all’energia dell’acqua che vi cade a cascata (si veda nei particolari nel successivo **Punto 09.f.c.3**).

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 tratto di corda, individuato in maniera casuale, può dare indicazioni del tutto non corrispondenti alla **reale tenuta minima** dell’intera corda.

**09.f.c.2) Seconda considerazione: decadimento per il solo effetto-idrolisi**– Nella corda in esame **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 %**. Dunque nelle corde usate l’idratazione idrolitica ha una maggiore efficacia nel ridurre la tenuta alla rottura del materiale polimerico che costituisce la corda, e di conserva le sue proprietà meccaniche. Questo risultato dà origine a interpretazioni contraddittorie.

Da un lato è verosimile ritenere che la **minore cristallinità raggiunta dalla corda usata**, attraverso l'intervento degli agenti degradanti (soprattutto la successione di sollecitazioni e la produzione di calore), le ha permesso di assorbire una quantità di acqua igroscopica maggiore (pag. 73, **Figure64-65**) con conseguente effetto idrolisi più rilevante.

In un'altra ottica, valutando quanto accade all'insieme delle catene di macromolecole a seguito di una trazione con forza crescente o una successione di sollecitazioni - come rappresentato nelle **Figure 58-59** (pagg. 68-69) con la successione delle **5 Fasi** della distruzione della struttura semicristallina dei polimeri, l'interpretazione del maggiore affetto idrolisi nella corda usata potrebbe riferirsi non solo alla maggiore quantità di molecole d'acqua penetrate, ma anche alla maggiore disponibilità di legami idrogeno da rompere nelle zone cristalline.



Per avere un chiarimento definitivo sarebbe necessario realizzare su delle corde dei test asciutte/bagnate e nuove/usate, ma accompagnati da **Analisi Diffrattometriche con Raggi X**.

Resta comunque il fatto che **l'effetto idrolisi**, a parità di condizioni, si manifesta **più consistente nelle corde usate**.

**09.f.c.3) 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** (pag. 158) 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:  **$0,55 \text{ kgp} = 1199 \text{ kgp}/2190 \text{ giorni}$** .

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 per ogni giorno di permanenza in grotta una corda riduce il Carico di rottura  $F_r$  di circa  **$0,5 \text{ kgp/giorno}$**  per degradazione idrolitica.

**09.f.c.4) Quarta considerazione: quantizzazione dei tempi d'usura 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 alcune altre sperimentazioni, oltre quella qui presentata, possono aiutare a definire il problema.

Si ricorda, innanzitutto, l'esperienza di cui al **Punto 01** (pag. 122 e seg.) "Test d'usura su corda statica per speleologia (24 mesi)" in cui 14 campioni di corda statica (Beal Antipodes 10 mm nuova) sono stati utilizzati da altrettanti Gruppi Speleologici per la loro normale attività in grotta (vedi elenco e relazioni a pag. 123).

La conclusione emersa è stata che **dopo due anni d'uso le corde sono ancora utilizzabili in sicurezza e con affidabilità**.

A meno che non subentrino elementi d'usura straordinari che accelerano e accentuano il decadimento:

1. come la permanenza continuativa in grotta, che per il solo effetto della Degradazione idrolitica dopo due anni porta a una diminuzione di circa 400 kgp del Carico di rottura  $F_r$  (pag. 164 e seg., **Figura 141**);
2. quando l'ambiente sotterraneo è tale da creare situazioni particolarmente abrasive (pag. 127, **Figura 102**, *calcari selciferi*);
3. in presenza di contatti con le pareti o il pavimento e quindi abrasione della calza con rottura e incisione dei fili elementari;
4. sotto una cascata d'acqua che scarica la sua energia battendo sulla corda accentuando la degradazione idrolitica per perdita di massa (pag. 82, **Figura 74**, **Relazione 20**);
5. quando il numero dei passaggi degli speleo è molto elevato;
6. per l'azione ripetuta di choc con contenuti d'energia elevati.

Per valutare il contributo negativo di una di queste situazioni straordinarie si ricordi l'apporto degradante di solo una di queste, precisamente quella elencata nel precedente **Punto 2.**: 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 nella **Parte V** (pag. 127, **Figura 102**).

In questa situazione, con calcari particolarmente abrasivi, l'insieme dei fattori degradanti ha portato ai seguenti risultati:

corda nuova asciutta	$F_r = 3269 \text{ kgp}$	$F_{rn} = 2063 \text{ kgp}$
corda usata asciugata	$F_r = 1361 \text{ kgp}$ (– 58 %)	$F_{rn} = 1081 \text{ kgp}$ (–48 %)

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). Il **58 % di diminuzione**, che con l'effetto idrolisi si riduce ulteriormente al **68 %**.

Prendendo in considerazione anche gli effetti "nodo" e "idrolisi", il degrado **scende al 58 %**, come a dire un  $F_{rn} = 866 \text{ kgp}$ , ben inferiore ai 1100 kgp del LIR.

Se poi si aggiunge anche l'effetto "Degradazione idrolitica per diminuzione di Peso molecolare numerico" (pag. 164 e seg., **Figura 141**, una decrescita per  $F_r$  di 0,5 kgp/giorno) si raggiungono **appena i 500 kgp di tenuta**. E' questa una situazione di grave insicurezza e affidabilità.

Da notare: il Diametro efficace  $d_e$  si è ridotto da 8,73 mm a 5,63 mm (- 36 %).

## 10. TEST A TRAZIONE VELOCE: prove a caduta su corde per valutarne il decadimento in funzione del n° degli choc e della velocità di deformazione $V_d$ ; valutazione della visco-elasticità e delle sue variazioni nei fili elementari attraverso l'Analisi dinamico Meccanica non-lineare; calcolo del contributo individuale dei meccanismi che concorrono alla dissipazione dell'energia conferita alla corda dalla caduta del peso (*reazione visco-elastica dei fili elementari, Compattazione delle Struttura Complessa della Corda CSCC, lavoro alla rottura dei fili elementari, attriti fra i componenti la struttura complessa della corda*)

Per questi test a caduta sono state utilizzate le strumentazioni e i protocolli descritti e definiti nella **Parte II** di questo lavoro (*pag. 39 e seg.*).

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, permettendo di 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).

Ricordiamo altri aspetti principali:

1. campioni di corda **lunghi 3 m** (fuori tutto), con **nodi guida** all'estremità **pretirati a 140 kgp** (che rende i campioni oggetti isotropi e geometricamente omogenei, *pag. 42 e seg., Figure 32 – 33*);
2. test 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.

A proposito del secondo punto c'è da ricordare:

- a. 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), un contributo negativo che può determinare nel Carico di rottura senza nodi  $F_r$ , una diminuzione fino al 16 %;
- b. agli effetti degradanti dovuti a choc ripetuti descritti e quantizzati nella **Parte VI** vanno aggiunti anche 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).

## 10.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):

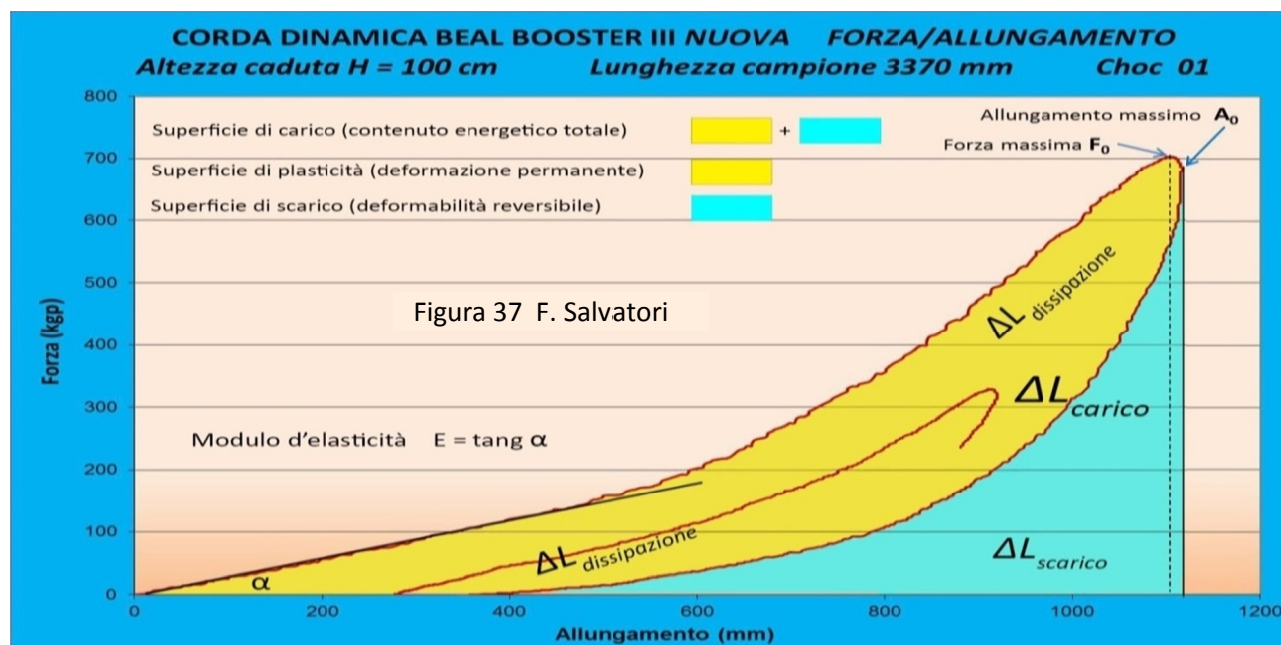
7. Beal Antipodes **statica nuova** diametro 10 mm **Nylon 6**,
8. Beal Antipodes **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10 mm Nylon 6,
9. Beal Booster III **dinamica nuova** diametro 9,7 mm **Nylon 6**,
10. Beal Booster III **dinamica usata** (4 anni arrampicata sportiva) diametro 9,7 mm Nylon 6,
11. Cavalieri Cave Explorer **statica nuova** diametro 10,6 mm **Nylon 6.6**,
12. Cavalieri Cave Explorer **statica usata** (3 anni in grotta) diametro 10,6 mm Nylon 6.6.

Le tre corde utilizzate sono diversamente caratterizzate nelle proprietà iniziali e nelle modalità d'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).

## 10.b) Diagrammi ottenuti e raccolta, organizzazione e tabellazione dei risultati; le diverse forme di dissipazione dell'energia

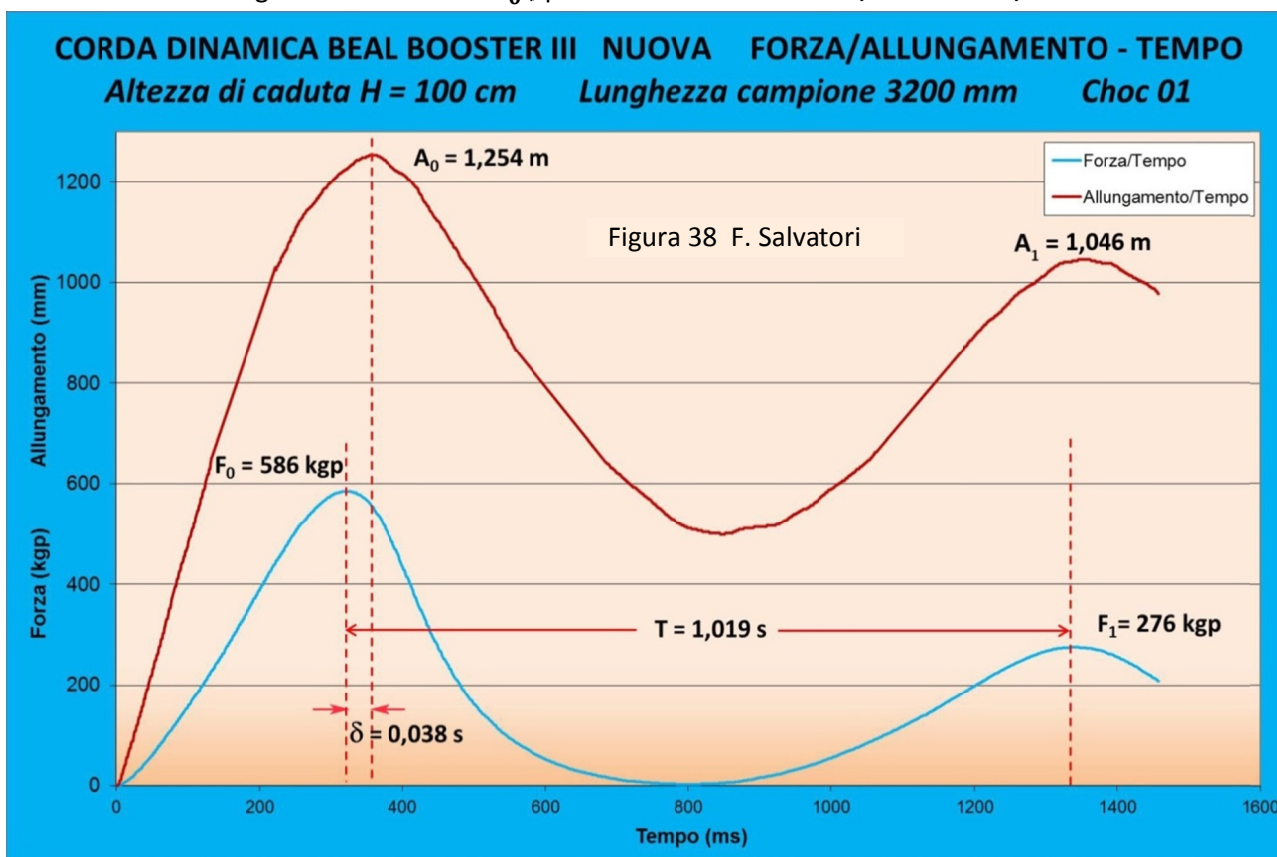
Nel complesso sono stati effettuati **480 test**, ognuno dei quali ha permesso di compilare una tabella di sintesi (su foglio di lavoro) come indicata esemplificatamene in **Figura 35** (pag. 44).



**10.b.a) Grafici d'isteresi** - 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), ricavandone i dati caratterizzanti le **forme d'energia** fornite, restituite e dissipate e la misura del **Modulo d'elasticità** e della **Velocità di deformazione**.

Attenzione, per completare il quadro della serie di Velocità di deformazione applicate, sono stati ottenuti dei grafici d'isteresi simili anche a trazione lenta (0,006 m/s), raggiungendo la forza massima di trazione di **800 kgp**. In tal modo si è agito con  $V_d = 0,002$ , praticamente con velocità di deformazione nulla.

**10.b.b) Confronto grafici  $F = f(t)$  e  $A = f(t)$**  - 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, in modo particolare il **Ritardo di tempo  $\delta_{tempo}$**  fra l'avvento della Forza massima  $F_0$  e l'avvento dell'Allungamento massimo  $A_0$ , parametro **caratterizzante, in esclusiva, della visco-elasticità**.



**10.b.c) Tabelle di sintesi** - Per ognuna delle sei corde prese in esame è stata compilata un **tabella di sintesi** con inseriti tutti dati significativi ottenuti (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  $\alpha$  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.

**10.b.d) 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 diversi 48 campioni di corde, nuove e usate (vedi elenco nel precedente **Punto 10.a**), 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 quelli indicati nei **Punti a-b-c-d** del precedente **Punto 10.b.c**. E precisamente:

1. **Caratteristiche meccaniche e geometriche** (pag. 28 e seg.)
  - 1.1. Forza alla rottura senza nodi  $F_r$
  - 1.2. Tenacità  $\delta_{sr}$  (o Sforzo a rottura)
  - 1.3. Superficie efficace  $S_e$
2. **Parametri elasticità** (pag. 45, 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** (pag. 45, Figura 37)
  - 4.1. Energia prodotta dalla caduta fino al massimo allungamento  $\Delta L_{carico}$
  - 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  $\delta_{tempo}$
  - 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**.

**10.b.e) I diversi modi di dissipazione dell'energia nei campioni di corda sollecitati con caduta del peso** - 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**  $\delta_{tempo}$  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).

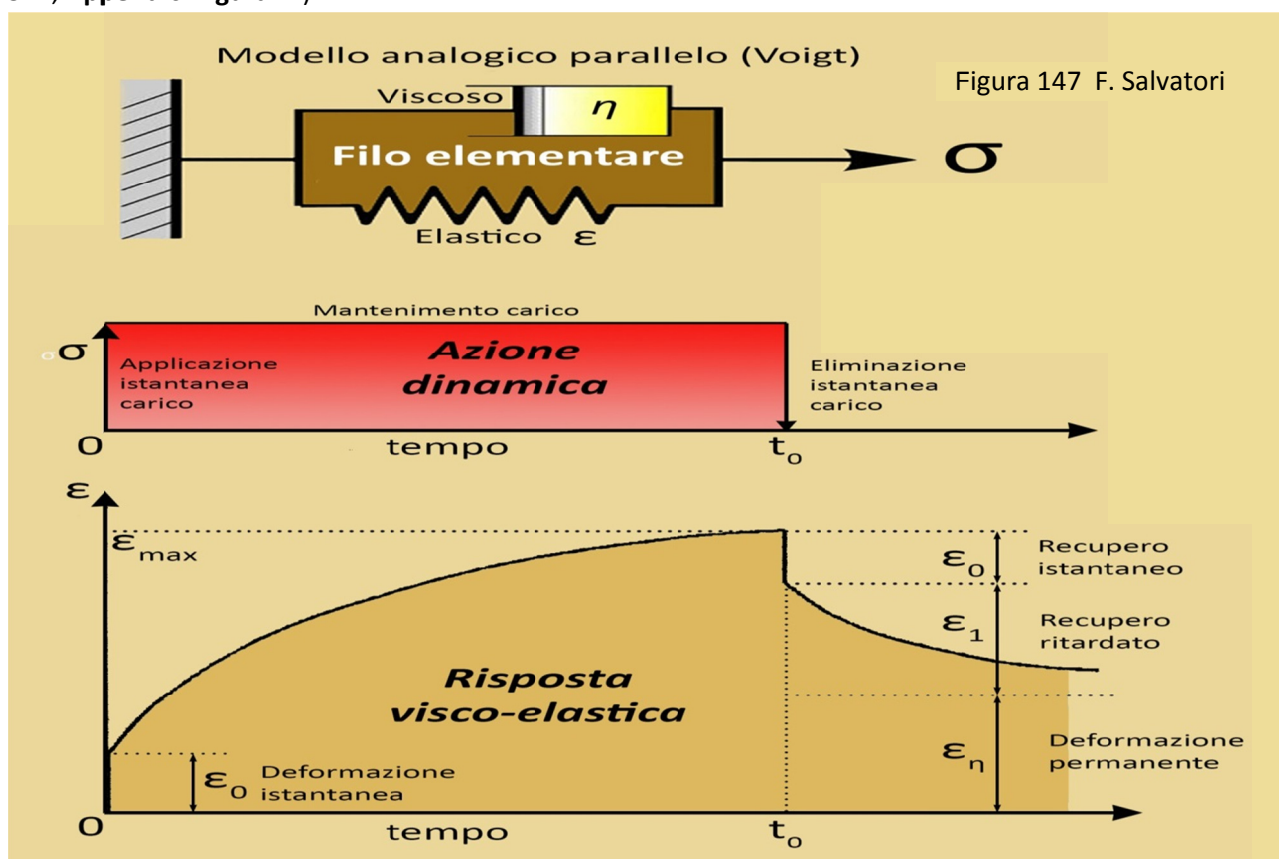
**10.b.e.1) Primo tipo di dissipazione dell'energia: compattazione della struttura complessa della corda (CSCC)** - Nella reazione all'applicazione del carico con la **CSCC** il ritardo  $\delta_{tempo}$  non si manifesta e

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 (pag. 178, Punto 01.d.a, Figura 16ter). Anche la CSCC è una deformazione parzialmente reversibile, che si va esaurendo con il succedersi delle applicazioni di carichi.

Nelle corde dinamiche, appositamente confezionate, la CSCC può contribuire all'assorbimento anche del 50 % dell'energia prodotta dalla caduta del peso: con l'uso in grotta (o in arrampicata) la sua funzione diminuisce con gradiente sempre più ridotto (massimo decremento da nuova; sempre più ridotto con l'utilizzo).

### 10.b.e.2) 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 visco-elastiche, dove il ritardo  $\delta_{tempo}$  fra il tempo  $t(F_0)$  e il tempo  $t(A_0)$ , opportunamente elaborato con l'Analisi Dinamica Meccanica, è una chiara misura del loro stato (pag. 312, Appendici Figura M).



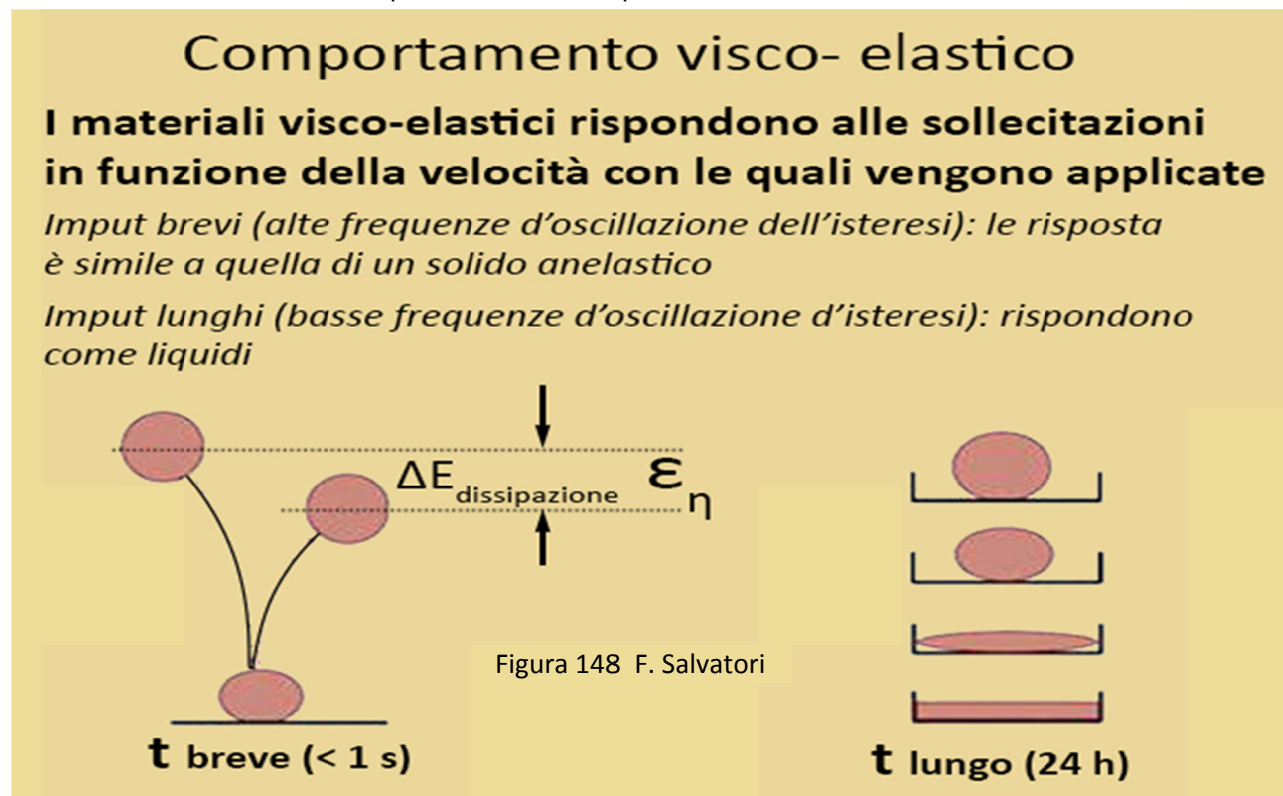
I grafici di **Figura 147** (pag. 179) mostrano il comportamento sotto trazione della parte visco-elastica di una corda (deformazioni dei fili elementari di Nylon, **senza considerare le deformazioni dipendenti dalla struttura complessa anisotropa della corda stessa**).

All'azione dinamica su un campione di corda, che si sviluppa in tre fasi:

1. applicazione istantanea di un carico con sforzo  $\sigma$  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  $\epsilon$  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  $\delta_{tempo}$  (pag. 316, Appendici Figura O; pag. 307, Figure G-H).

Con la **Figura 148** (pag. 180) e le considerazioni che la precedono si rende inoltre evidente, anche quantitativamente, che la misura del tempo di ritardo, tanto in fase di carico quanto di scarico, sono funzionali non solo al **coefficiente di viscosità  $\mu$**  del materiale, ma anche alla **velocità con cui viene applicata la sollecitazione** (Velocità di deformazione  $V_d$ ). E' dunque evidente che lo stesso materiale polimerico isotropo visco-elastico è tanto più rigido quanto maggiore è la velocità con cui si applica la sollecitazione. Di ciò è resa una plurima conferma sperimentale nella **Parte VI**.



**10.b.e.3) 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, **Punto 01.d.a, Figura 16ter**) e giungere al cedimento senza poter manifestare alcun ritardo  $\delta_{tempo}$  [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  $\delta_{tempo}$ .

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 nella **Parte VI**) - per misurare i Carichi di rottura delle corde senza nodi  $F_r$  e, di conseguenza, la Sezione efficace  $S_e$  (pag. 29). Dalla diminuzione di questo parametro e dal valore dello Sforzo specifico alla rottura (pag. 28, **Tenacità**), tipico della poliammide testata, si può calcolare il contributo dato alla dissipazione d'energia.

**10.b.e.4) 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 allungino, 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 **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**.

**10.c) Valutazione delle variazioni della visco-elasticità dei fili elementari di una corda attraverso i risultati ottenuti con test a caduta con n° di choc e Velocità di deformazione  $V_d$  crescenti; modifiche della struttura atomico-molecolare delle fibre polimeriche e decadimento delle loro proprietà meccaniche; quantizzazione dei contributi dati dalle diverse forme di assorbimento dell'energia della caduta del peso**

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 descritto nelle quattro modalità di dissipazione dell'energia elencate nei soprastanti **Punti 10.b.e.1 - 10.b.e.2 - 10.b.e.3 - 10.b.e.4**. Valutazioni che vengono elaborate nei **Paragrafi** che seguono, anche con la **costruzione di grafici** contenenti curve sviluppate sulla base dei dati raccolti nelle **Tabelle 03.b – 03.c – 03.d – 03.e – 03.f – 03.g** (pag. 286 e seg., **Appendici 03**).

I 480 test a caduta effettuati hanno fornito una messe di dati molto consistente, permettendo molte e dettagliate elaborazioni grafiche con conseguenti approfondite e capillari considerazioni sul comportamento delle diverse componenti delle corde speleo-alpinistiche sotto gli effetti degradanti della successione di choc con altezze di caduta del peso crescenti.

Di tutto ciò c'è un rendiconto dettagliato nella **Parte VI** (pagg. 181 – 236). Ai contenuti di questo rendiconto si farà riferimento ogni qual volta, nell'ambito dell'esposizione che segue, si vorrà proporre degli approfondimenti e delle delucidazioni.

Nei paragrafi che seguono verranno esaminate le risultanze sperimentali delle variazioni dei **parametri elencati nel Punto 10.b.d** (pag. 406) in funzione del **n° di choc eseguiti** sullo stesso campione, con altezza di caduta del peso **H** (come dire "Velocità di deformazione  $V_d$  ") crescente. Ne è un esempio il grafico sottostante di **Figura 149**, relativo al **Ritardo  $\delta_{tempo}$**  in funzione della variabile indipendente  $V_d$ .

Comunque l'inserimento delle curve **Fattore in esame =  $f(V_d)$**  per ogni numero di choc eseguiti permette di valutare le variazioni dovute al crescere di **entrambe le variabili indipendenti**. Stessa cosa vale anche nel caso che la variabile indipendente sia il **n° degli choc** e le curve rappresentate siano **Fattore in esame =  $f(n^\circ choc)$** .

Pertanto nei grafici che seguiranno in ordinate sono posti, di volta in volta, i diversi parametri elencati; in ascisse, a seconda delle necessità esplicative, il n° di choc subiti o la Velocità di deformazione  $V_d$ .

Le **considerazioni di carattere generale** (validità sperimentale, strumentale, elaborativa e margini d'errore) riportate a commento dei grafici di **Figura 149** sono **valide per tutti i diagrammi** rappresentanti in questo **Capitolo 10.c**.

Con il termine "**andamento**" di una curva ci si riferisce al suo sviluppo in crescita, in diminuzione o costante. Con il termine "**dislocazione**" di una curva ci si riferisce al posizionamento di una curva rispetto alle altre (soprastante o sottostante). Le curve in **tratto continuo** sono **linee di tendenza** con polinomiali di 2° grado (salvo diversa indicazione).

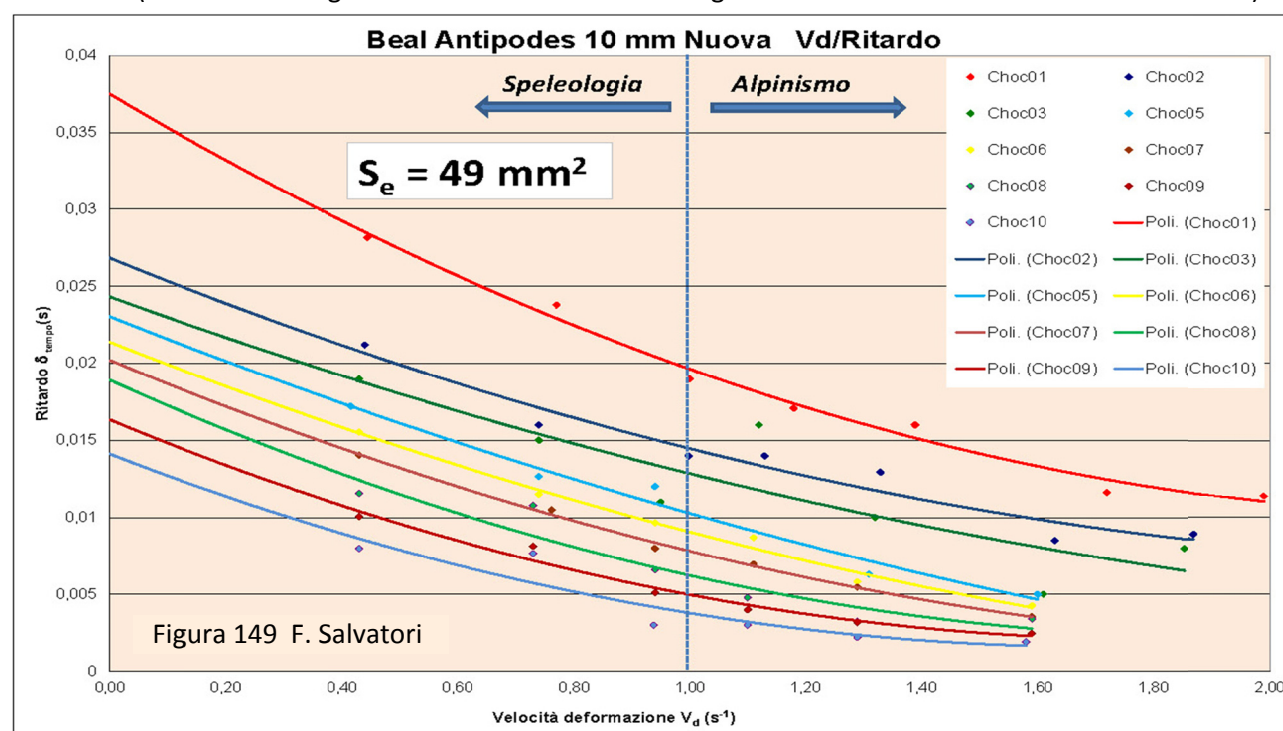
Nei grafici dove la variabile indipendente è la Velocità di Deformazione  $V_d$  è indicato il confine fra il settore con valori compatibili con sollecitazioni proprie della progressione speleologica e alpinistica (pag. 52 e seg., **Figura 42**). Questo può permettere di verificare se le variazioni del parametro in esame (variabile dipendente), sotto l'azione degli choc ripetuti e con  $V_d$  crescente, incidono sull'uno e sull'altro settore.

### 10.c.a) Variazioni del Tempo di ritardo $\delta_{tempo}$ in funzione del Numero di choc $n^{\circ} choc$ e della Velocità di deformazione $V_d$

**10.c.a.1) Rapporto fra Tempo di ritardo, viscosità e deformabilità** - Per il caso specifico di **Figura 149**, dove la variabile dipendente è il  $\delta_{tempo}$  occorre far riferimento alla **Figura 38** (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  $\delta_{tempo}$  è il dato più emblematico che caratterizza il materiale visco – elastico, come le poliammidi che costituiscono i fili elementari delle corde speleo-alpinistiche (ricordiamo ancora una volta:  $\delta_{tempo}$  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  $\delta_{tempo}$  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  $\delta_{tempo}$  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.

Infatti, con il crescere del numero di choc subiti la corda perde deformabilità in modo irreversibile, diventa più rigida per il cambiamento progressivo della sua condizione viscosa (naturalmente, non valutata nel valore del  $\delta_{tempo}$ , concorre anche irrigidimento progressivo, anch'esso irreversibile, dovuto alla compattazione della struttura complessa della corda, da valutare quantitativamente, in aggiunta, con altro metodo).

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).

Per comprendere la dipendenza delle deformabilità di un filo elementare dal n° di choc e del loro contenuto energetico dovuto all'altezza di caduta del peso, si faccia riferimento alle **Figure 58-59** (pagg. 68-69) con la successione delle **5 Fasi** della distruzione della struttura semicristallina dei polimeri. Maggiori dettagli nel **Punto 01.f.b** (pag. 183 e seg.)

Da ricordare: nella **Figura 149** all'ascissa  $V_d = 0,00 \text{ s}^{-1}$  (in realtà  $0,002 \text{ s}^{-1}$ ) corrisponde a una prova a trazione lenta ( $0,006 \text{ m/s}$ ) fino a  $800 \text{ kgp}$  di forza massima e **non a un test a caduta** del peso: il campione di corda è sempre annodato all'estremità e lungo  $3000 \text{ mm}$ .

In questo tipo di test, quando la velocità di deformazione è la minore possibile (trazione quasi-statica), si ottengono i **tempi di ritardo**  $\delta_{tempo}$  **più elevati**, a conferma di quanto esposto in **Figura 148** (pag. 180). 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 e il Dyneema.

**10.c.a.2) Modalità di costruzione delle curve** – Nella **Figura 149**, come in parte esplicitato in precedenza, sono riportate le curve  $\delta_{tempo} = f(V_d)$  costruite con i valori di  $\delta_{tempo}$  ottenuti con test **equivalenti** per **altezza di caduta**: la **curva rossa (Poli. H10)**, ad esempio, è definita dai valori del fattore Ritardo di tempo 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:  $30 \text{ cm}$ ,  $50 \text{ cm}$ ,  $70 \text{ cm}$ ,  $100 \text{ cm}$ ,  $150 \text{ cm}$ ,  $200 \text{ cm}$ .

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 (vedi **Tabelle 03.b – 03.c - 03.d - 03.e - 03.f - 03.g**, pag. 289 e seg.).

Quando sono mancati un numero sufficiente di dati per garantire la dovuta validità statistica, sono state escluse alcune delle relative curve. Tant'è che, nei grafici qui sopra esposti (e in quelli similari che seguono), non sempre sono presenti tutte le curve competenti alle otto altezze di caduta programmate.

**10.c.a.3) Validità metodologica e strumentale dei valori ottenuti dai test: la dislocazione ordinata e razionalmente coerente delle curve** – La constatazione sinottica che gli oltre 60 dati presenti nella **Figura 149** 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.

**10.c.a.4.) Validità metodologica e strumentale dei valori ottenuti dai test: l'andamento simile delle curve** – Non considerando i valori delle coordinate dei singoli punti, ma puntando l'attenzione sulla dislocazione complessiva dei diagrammi, possiamo suddividere ogni curva  $\delta_{tempo} = f(V_d)$  in tre settori:

1. **iniziale, di decrescita accentuata**, fra  $0,00 \text{ s}^{-1}$  e  $0,30 \text{ s}^{-1}$ , dove il Ritardo  $\delta_{tempo}$  tende a diminuire con pendenza più accentuata;
2. **intermedio, di decrescita poco accentuata**, fra  $0,30 \text{ s}^{-1}$  e  $1,30 \text{ s}^{-1}$ , dove  $\delta_{tempo}$  diminuisce ancora il suo valore, ma con gradiente minore;
3. **finale**, fra  $1,30 \text{ s}^{-1}$  e  $2,00 \text{ s}^{-1}$ , quando gli incrementi tendono ad annullarsi.

Questo andamento sperimentale ripetuto su tutte le curve è un'ulteriore conferma della validità sperimentale dei test, nonché una validazione della metodologia d'analisi utilizzata (pag. 312 e seg., **Figura M**, DMA non-lineare).

**10.c.a.5.) Valutazione degli errori strumentali** – I valori di base che si ricavano dai test a caduta sono il **Tempo**, la **Forza** e l'**Allungamento** (pag. 44, **Figura 45**).

Il margine d'errore di misurazione è:

- per il **Tempo** 0,0001 %;
- per la **Forza** 0,3 %;
- per l'**Allungamento** 0,1 %.

Ma nella misura degli Allungamenti, utilizzando un misuratore di distanza laser puntato sul peso cadente, si possono verificare circostanze straordinarie che creano interferenze al raggio laser (pulviscolo atmosferico, raggi di luce solare, allungamento scorretto del campione di corda, interposizione della corda in contrazione e di corde lacerate). In questi casi i valori relativi d'Allungamento creano in modo aleatorio letture errate, con distorsioni delle misure imprevedibili. I valori ottenuti, dunque, non hanno alcun significato e devono essere scartati.

Nel caso di test che hanno prodotto il cedimento dei campioni di corda non è stato possibile ottenere dei grafici di base come quelli di **Figura 38** (pag. 46). E quindi nessuna possibile elaborazione analitica con la DMA.

In entrambi i casi sopraindicati è stato inevitabile eliminare alcune delle curve programmate, senza che questo compromettesse la validità scientifica e interpretativa dell'insieme delle restanti curve costruite.

**10.c.a.6.) L'applicazione ripetuta di carichi e l'aumento della Velocità di Deformazione producono un graduale esaurimento della visco-elasticità delle fibre polimeriche** – Da un esame di sintesi dei grafici della **Figura 149** s'evince che:

1. il succedersi di sollecitazioni all'allungamento tendono a far diminuire il grado di visco-elasticità dei fili elementari della corda;
2. questa decrescita procede con gradiente maggiore con sollecitazioni con Velocità di Deformazione minori; come a dire che l'uso in speleologia, dove le sollecitazioni ripetute sono d'entità ridotta, è più degradante dell'uso in alpinismo, dove invece gli choc possono essere anche molto rilevanti;
3. nella progressione in grotta, inoltre, le sollecitazioni in successione sono sistematicamente innumerevoli, mentre in alpinismo sono eventi eccezionali (nell'arrampicata sportiva siamo in una via di mezzo); il che aggrava il processo di decadimento per le corde speleo;
4. che i fili elementari tendono a perdere completamente la deformabilità dovuta alla visco elasticità;
5. si conferma il principio generale che i materiali polimerici, come del resto tutti gli altri, si mostrano meno deformabili con Velocità di Deformazioni più elevate.

Si tenga presente che quanto elencato è valido per la corda Beal Antipodes 10 mm, che è una **corda statica per speleologia**.

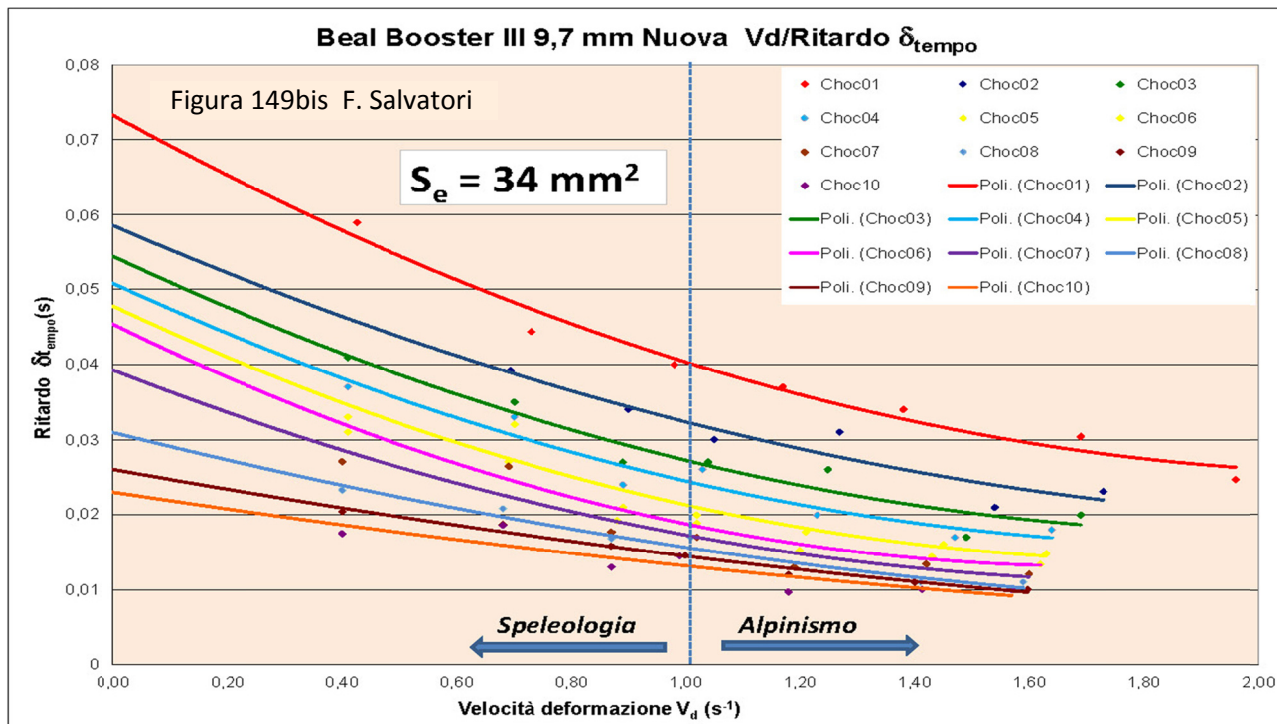
**10.c.a.7.) Confronto con una Corda dinamica della stessa fibra** – Nella **Figura 149bis**, da confrontare con la **Figura 149** (pag. 410), c'è una analoga rappresentazione dell'andamento e delle dislocazione delle curve  $\delta_{tempo} = f(V_d)$  per campioni di **corda dinamica** Beal Booster 9,7 mm nuova. I fili elementari sono in **entrambi i casi di Nylon 6**.

E' evidente che la risposta visco-elastica è analoga in termini di andamento e dislocazione, ma diversa quantitativamente (raddoppiano i ritardi di tempo a parità d'energia conferita dalla caduta del peso): nella corda dinamica l'azione degli attriti fra catene di macromolecole, che producono il comportamento viscoso e quindi il Ritardo  $\delta_{tempo}$ , è nel complesso minore.

Ma questo non è dovuto a proprietà viscosive diverse, visto che in entrambi i casi si tratta di fibre di Nylon 6.

Ma dipende unicamente dalla ridotta quantità di materiale polimerico presente nella corda dinamica; infatti la Sezione efficace della corda statica è  $S_e = 48,8 \text{ mm}^2$  contro  $S_e = 34,1 \text{ mm}^2$  della corda dinamica, **il 30 % in meno**.

Questa situazione è responsabile della maggiore capacità di deformarsi della corda dinamica (richiesta per meglio far fronte a sollecitazioni a maggior contenuto energetico), ma solo in parte.



Ma, attenzione, ci si riferisce infatti al solo meccanismo dissipativo legato alla viscosità del materiale e quindi a  $\delta_{tempo}$  e non comprende le proprietà dissipative dell'energia legate invece alla Compattazione della Struttura Complessa della corda (CSCC), meccanismo questo che contribuisce per la quasi totalità alla straordinaria deformabilità della corda dinamica.

Da notare, non c'è proporzionalità diretta fra variazioni della Superficie efficace  $S_e$  e variazioni del ritardo  $\delta_{tempo}$ : la progressione sotto trazione della forza d'attrito fra macromolecole della corda non è lineare.

**10.c.b) Variazioni del Fattore di perdita  $\tan \delta$  in funzione del Numero di choc  $n^\circ choc$  e della Velocità di deformazione  $V_d$ ; decadimento di una corda per applicazione ripetuta di sollecitazioni**

**10.c.b.1) Definizione, calcolo e significato dissipativo del Fattore di perdita  $\tan \delta$**  – Utilizzando il protocollo di studio dell'Analisi Dinamica Meccanica non-lineare basata sul Modello di Voigt (pag. 312, Appendici Figura M) si calcola il parametro **Fattore di perdita  $\tan \delta$** , che misura il grado di **reazione alla dissipazione di energia** da parte della **solca 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)**:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta = \text{Modulo elastico o conservativo (in - fase)} \tag{e}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta = \text{Modulo viscoso (non - in - fase)} \tag{f}$$

$$E''/E' = \tan \delta = \text{Fattore di perdita} \tag{h}$$

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 ed elastico ed è il fattore di **maggior rilievo per valutare** la capacità della corda di assorbire **energia** attraverso le **deformazioni visco – elastiche**. Le sue variazioni in negativo sono l'indice principale per misurare il degrado che subisce una corda nella sua sola parte polimerica (fili elementari) sotto l'effetto della ripetuta applicazione di carichi, uno dei principali fattori d'usura (*pag. 327 e seg., Punto d, Figura N – O*).

Per dare alcuni esempi di corrispondenza fra i dati ottenuti e situazione reale (sia pur al limite) e meglio precisare l'intervallo di valori entro il quale è limitato **tang  $\delta$** . Si consideri che:

1. se il Modulo viscoso  $E'' = 0$  allora **tang  $\delta = 0$**  e il comportamento viscoso si 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 **tang  $\delta = \infty$**  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 **tang  $\delta$**  ha un valore compreso fra **0** e  $\infty$  allora lo stato visco-elastico è reale;
4. nel complesso, tanto minore sarà la misura di **tang  $\delta$**  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.

In sintesi, comunque, una diminuzione di **tang  $\delta$**  significa – o per il procedere del n° di choc o per l'aumento della Velocità di deformazione o con concorso di entrambe le variabili indipendenti – che la capacità di assorbire energia è diminuita; come pure è, di conseguenza, aumentato il degrado per usura della corda.

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 spaccettamento 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 **tang  $\delta$**  non può che decrescere, con andamento variabile a seconda della fase di disgregazione.

Per una più dettagliata descrizione dei meccanismi di disgregazione della struttura atomico-molecolare del materiale polimerico dei fili elementari fare riferimento al **Punto 01.f.b** (*pag. 183 e seg., Figure 55-56-58-59*).

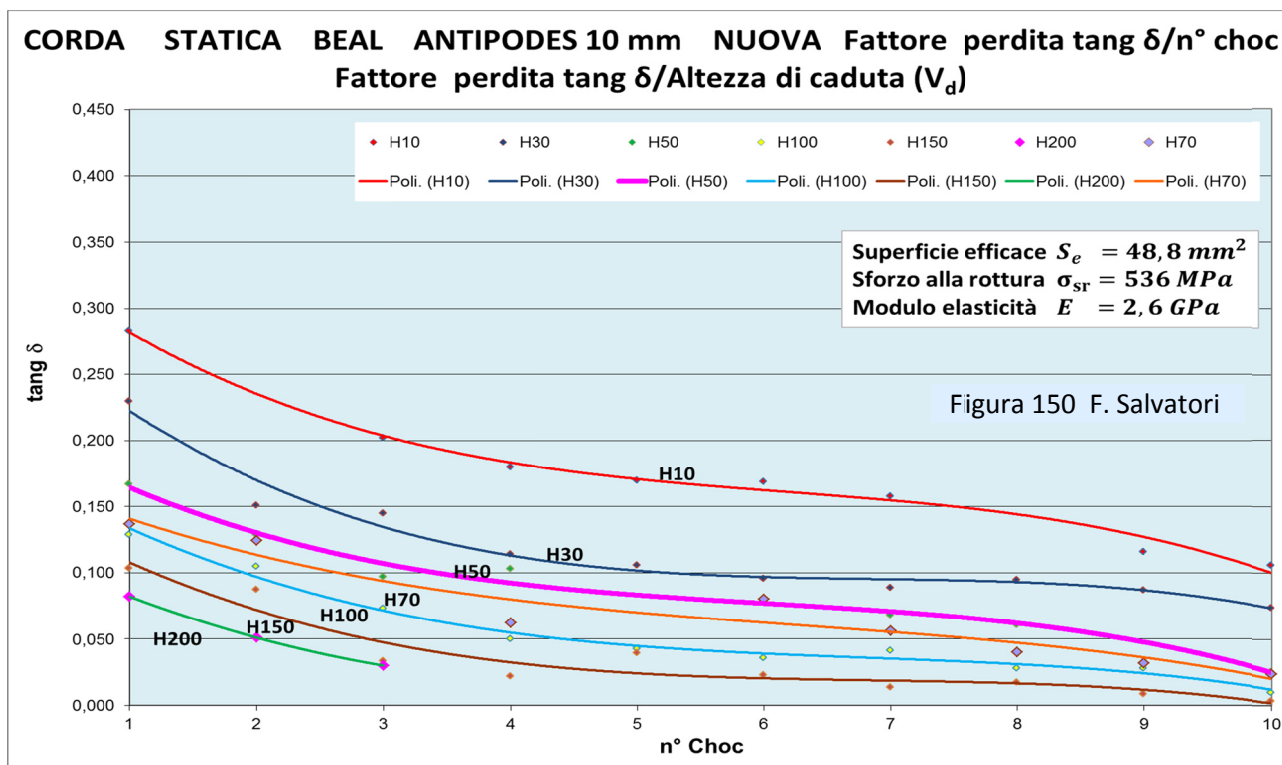
**10.c.b.2) Criteri per la costruzioni dei grafici con le curve  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ ; validità sperimentale e analitica dei risultati** – Vale quanto detto nei precedenti **Punti 10.c.a.2, 10.c.a.3, 10.c.a.4, 10.c.a.5**.

**10.c.b.3) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per la Corda statica *Beal Antipodes 10 mm nuova* (Nylon 6)**

**10.c.b.3.1.) 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  $\delta$**  in funzione dell'aumento del n° choc e dell'altezza **H** di caduta del peso (determinante la Velocità di deformazione **V<sub>d</sub>**).

Pertanto si possono fare considerazioni in relazione a qualsiasi combinazione delle due variabili.



La linea della Curva (di tendenza)  $\tan \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ , 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” come riportato in **Figura 41** (pag. 53 e seg.).

**10.c.b.3.2.) Andamento uniforme delle curve** – Non considerando, per ora, i valori delle coordinate dei singoli punti, ma puntando l’attenzione sull’andamento (pag. 410) complessivo dei diagrammi, possiamo suddividere ogni curva  $\tan \delta = f(n^\circ \text{ choc})$  in tre settori:

1. **iniziale di decrescita accentuata**, fra  $n^\circ 1$  choc e  $n^\circ 3$  choc, dove il Fattore di riduzione tende a diminuire con pendenza accentuata;
2. **intermedio di decrescita poco accentuata**, fra  $n^\circ 3$  choc e  $n^\circ 7$  choc, dove  $\tan \delta$  diminuisce il suo valore con incrementi minimi;
3. **finale** con nuova diminuzione, fra  $n^\circ 8$  choc e  $n^\circ 10$  choc, con misure di  $\tan \delta$  in calo.

Questo andamento si ripete su tutte le curva ma con gradienti differenti: **sempre più ridotti man mano che aumenta la Velocità di deformazione  $V_d$** . Comportamento, questo, coerente con i principi fondamentali che regolano, in genere, il rapporto fra sollecitazioni e proprietà meccaniche dei materiali.

Ricordando che  $\tan \delta = E''/E'$ , la sua diminuzione può essere determinata sia da una decrescita del Modulo viscoso dissipativo  $E''$  come da un aumento del Modulo elastico conservativo  $E'$ . Ma la **diminuzione di  $\tan \delta$**  può avvenire anche per una **decrescita differenziata: maggiore per il grado di viscosità, minore per quello d’elasticità**. Quest’ultima situazione è la norma con i test a caduta programmati: l’energia legata alla caduta del peso va a incidere maggiormente nella conformazione della strutturazione del groviglio di catene di macromolecole dei settori amorfi, lasciandovi modifiche irreversibili di grande entità. Soprattutto a danno della parte viscosa, e solo eccezionalmente in quella elastica, dove occorrono forze ragguardevoli per rompere la “cristallinità” (pag. 65, **Figura 57**).

**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 comunque 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  $\tan \delta$  misura in dipendenza del ritardo di tempo  $\delta$  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** (pag. 158 e seg.).

**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 evento di rottura dei fili elementari (pag. 188, **Figure 151 – 152**), che appare nei diagrammi come un'ulteriore decremento del Fattore di perdita di visco-elasticità, ma in realtà è una conseguenza della diminuzione della Superficie efficace. In questo caso si verificherebbero i fenomeni indicati nella **Fase 5** di **Figura 59** (pag.186).

In sintesi, la successione di **choc con altezze di caduta che crescono** portano a una perdita della capacità d'assorbimento d'energia attraverso la visco-elasticità di una corda, perdita tanto più accentuata nei primi choc e con contenuti energetici più bassi (altezza di caduta del peso più bassa).

Con altezze di caduta più elevate e quando il n° di choc è al limite superiore, il degrado della corda può significativamente aumentare per il cedimento di alcuni fili elementari e conseguente riduzione della Superficie efficace (verificando il Carico di rottura  $F_r$  si ha la conferma o meno).

**10.c.b.3.3.) Dislocazione coerente delle curve: 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 in 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).

Questa conclusione porta ad affermare, paradossalmente, che la progressione speleologica, con le sue sollecitazioni di bassa intensità energetica ("pedalate" in risalita sui bloccanti e "frenate" in discesa sul discensore) producono un degrado della deformabilità da visco-elasticità più marcato rispetto a quanto può procurare uno choc da caduta nella progressione alpinistica. Tanto più che in grotta le sollecitazioni sono innumerevoli, mentre in alpinismo sono eventi eccezionali. Nell'arrampicata sportiva siamo in una via di mezzo.

**10.c.b.4) Confronto fra i dati della Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e usata: variazione del grado di cristallinità, aumento del gradiente di decrescita del Fattore di perdita  $\tan \delta$ , diminuzione della Sezione efficace, valutazione percentuale dei diversi contributi degradanti**

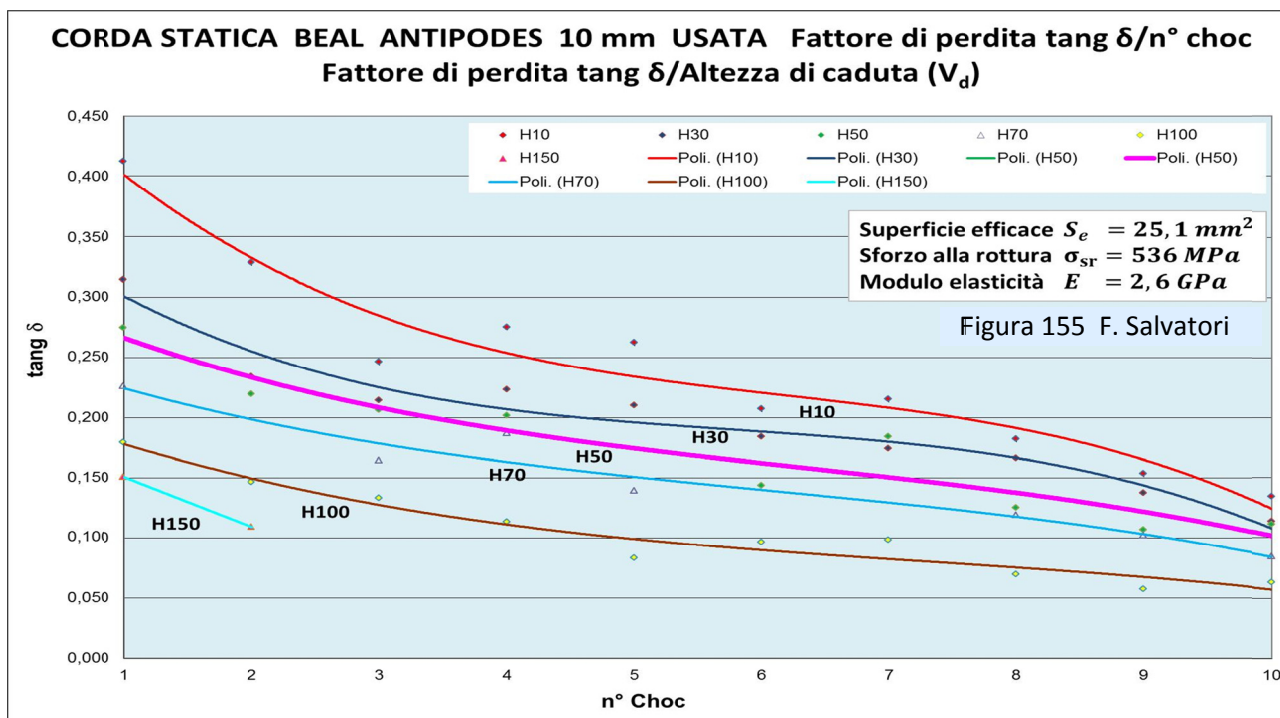
I grafici relativi alla Corda **statica** Beal Antipodes 10 mm **nuova** sono rappresentati nella precedente **Figura 150** (pag. 415), mentre quelli relativi alla analoga corda **usata** sono inseriti nella **Figura 155**.

E' molto evidente che le due serie di grafici sono simili, per andamento delle curve e per il loro ordine di sequenza nella dislocazione verticale. E' confermato il principio per cui la serie di choc con Velocità di deformazione crescente porta a una graduale diminuzione di  $\tan \delta$  e quindi a una sempre più ridotta capacità di deformazione dei fili elementari per effetto della visco elasticità.

Ma i gradienti di decrescita e i valori assoluti di  $\tan \delta$  si differenziano, mostrando che l'uso in grotta incide marcatamente nelle proprietà visco-elastiche dei fili elementari, attraverso soprattutto le mutazioni del loro grado di cristallinità.

**10.c.b.4.1) Prima differenziazione: valutazione dei ranges iniziali e finali dei valori di  $\tan \delta$  della serie di curve** – Le **differenze** fra corda nuova e usata si mostrano con risalto nei valori di  $\tan \delta$ :

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 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 dei fili elementari **amenti 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  $\tan \delta = E''/E'$  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  $\tan \delta$  (pag. 134, **Figura 115**).

**10.c.b.4.2) Seconda differenziazione: diminuzione della Superficie efficace nelle corde usate** – Il fatto che nella corda usata il Fattore di perdita  $\tan \delta$  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  $0,64 \text{ N/Tex}$ ; mentre il Nylon 6 nuovo, la cui cristallinità è al 50 %, ha una Tenacità pari a  $0,47 \text{ N/Tex}$ ).

Ne è una dimostrazione la diminuzione della Superficie efficace  $S_e$  della corda usata che scende a  **$25,1 \text{ mm}^2$** , quando da nuova è di  **$48,8 \text{ mm}^2$**  (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**).

Questo spiega perché la corda nuova riesce ad assorbire senza rompersi l'energia della caduta del peso fino al 3° choc con altezza di caduta H200 (2000 mm), mentre la corda usata cede al 3° choc con altezza di caduta H150 (1500 mm).

**10.c.b.4.3) Valutazione percentuale dei contributi degradanti** – 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

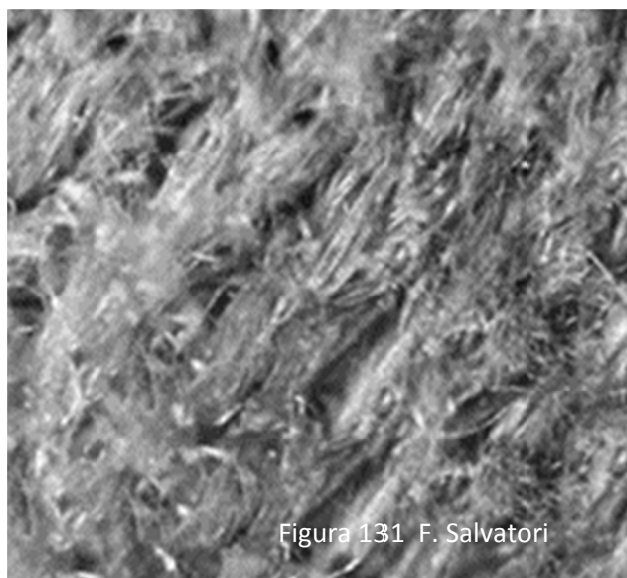


Figura 131 F. Salvatori

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  $\delta$**  (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  $F_{r\ corda}$ , i carichi di rottura dei singoli trefoli  $F_{r\ trefolo}$  e della calza  $F_{r\ calza}$  (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 (%)
$F_{r\ corda}$	2666	1270	49
$F_{r\ calza}$	1046	470	55
$F_{r\ trefolo}$	141	75	47

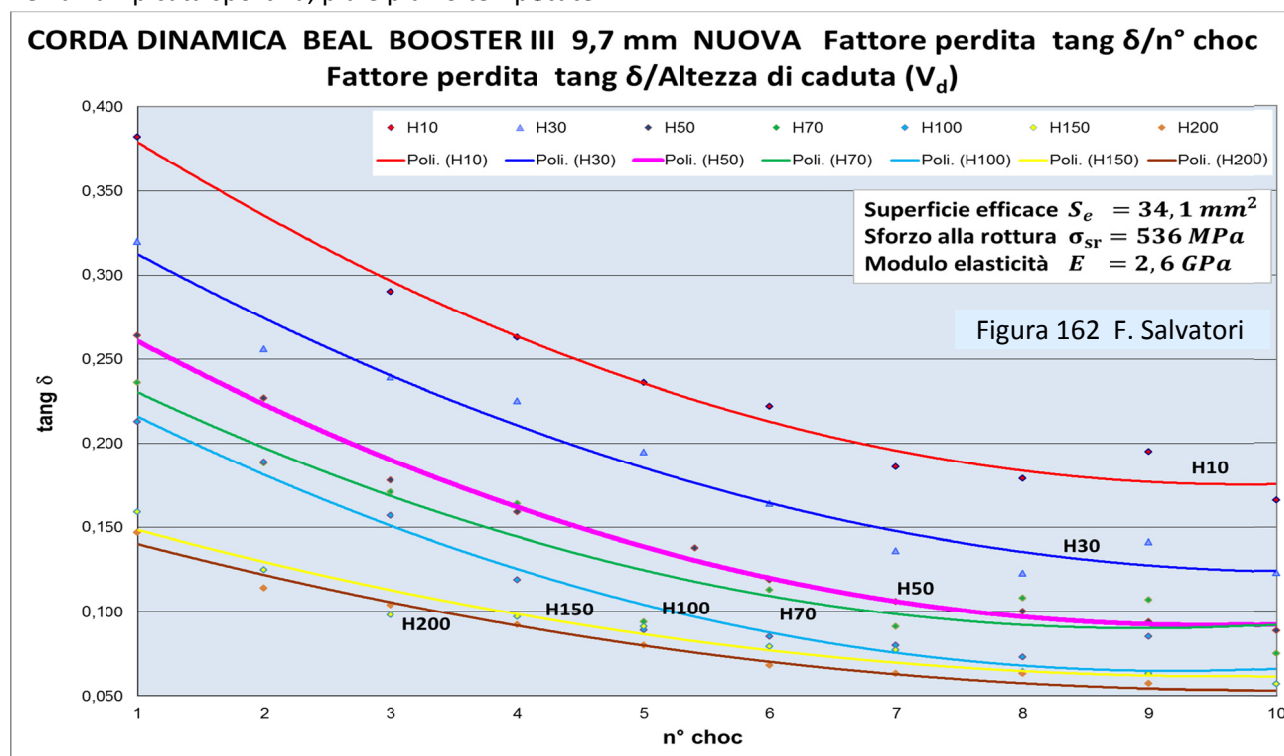
Quindi il contributo al decadimento della corda misurato con la diminuzione della Superficie efficace  $S_e$  (da 48,8 mm<sup>2</sup> a 25,1 mm<sup>2</sup>) è del **5 % circa dovuto all'abrasione** e del **95 % all'azione di tutti gli altri fattori** elencati in precedenza, tutti capaci d'incidere sul grado di cristallinità e quindi sul rapporto  $E''/E'$  e quindi sul Fattore di perdita  **$\tan \delta$** .

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.

### 10.c.b.5) 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  **$\tan \delta$** , 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, sopperisce la sola visco-elasticità o nelle corde c'è, costituzionalmente, qualche altro fattore? Un fattore particolarmente efficiente nelle corde a strutturazione “dinamica”.

Ricordiamo che il Fattore di perdita  **$\tan \delta$**  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”.

**10.c.b.5.1) 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 compressiva; 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  $\delta_{tempo}$ ).

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 sperimentate 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 viscosse 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 mm<sup>2</sup>** e **34,1 mm<sup>2</sup>**, 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  $\delta_{tempo}$ , cioè dalla visco-elasticità.

**10.c.b.5.2) 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.

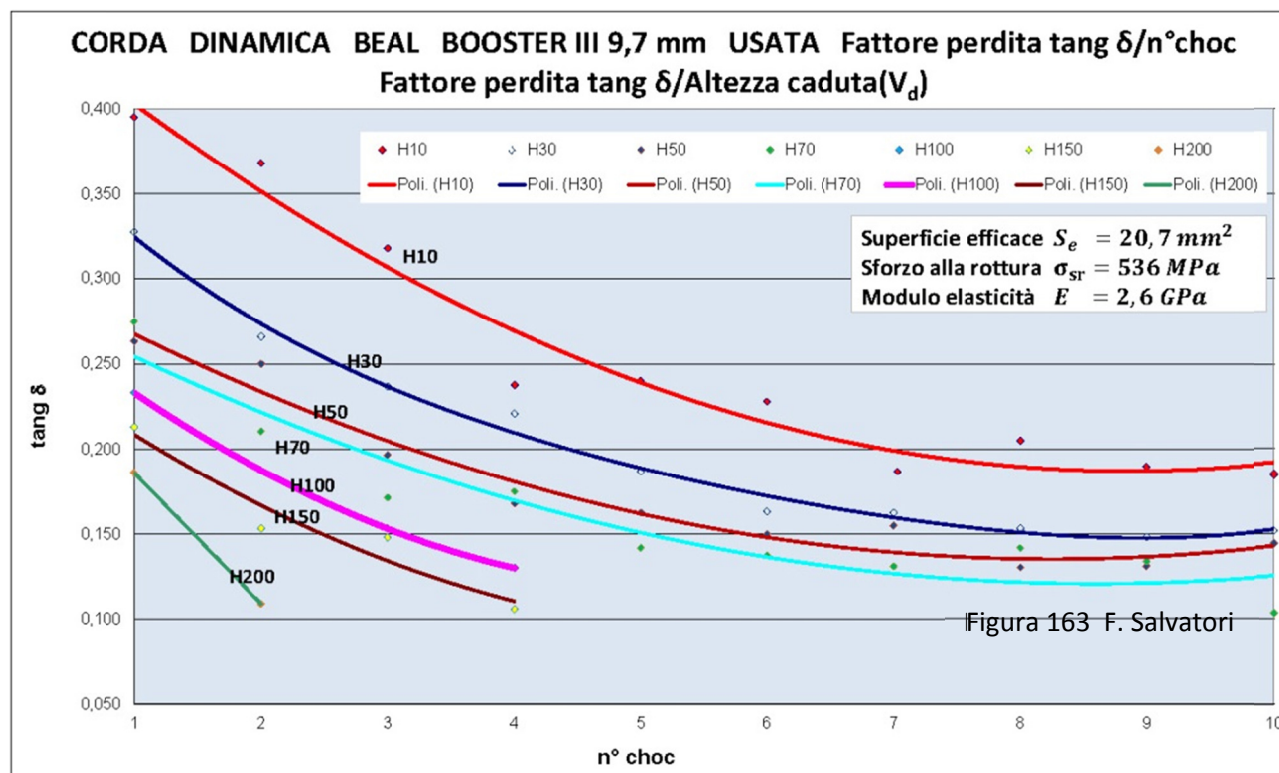
Le corde dinamiche, attraverso la CSCC mettono in atto un sistema "dissipatore" d'energia che le protegge da un degrado eccessivo della visco-elasticità per l'applicazione rapida di carichi rilevanti.

**10.c.b.6) 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 usurata Booster III 9,7 mm (pag. 205, **Figura 163**) ha valori di  $\text{tang } \delta$  superiori della omologa corda nuova (pag. 202, **Figura 162**). Infatti, a parità di altezza di caduta, le curve  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$  della corda usata sono tutte soprastanti alle corrispondenti curve della corda nuova.

L'incremento di  $\text{tang } \delta$  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).

### 10.d) 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 $n^{\circ}$ choc e della Velocità di deformazione $V_d$

**10.d.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 (esaminate nei paragrafi soprastanti e, più dettagliatamente, nella **Parte VI**, pag. 174 e seg.);
2. CSCC (Compattazione Struttura Complesso della Corda), con considerazioni e quantizzazione nel **Punto 01.h** (pag. 210 e seg.) e nei successivi paragrafi che descrivono i parametri Dissipazione % e Allungamento massimo  $A_0$  ;
3. lavoro a rottura dei fili elementari, sommariamente e parzialmente valutato in alcuni paragrafi esposti precedentemente e con quantizzazione nel **Punto 01.j** (pag. 235 e seg.) e nei paragrafi, che seguono, aventi come oggetto la Superficie efficace;
4. calore prodotto durante una sollecitazione a caduta (o trazione progressiva) dagli attriti fra gli elementi che compongono la struttura complessa della corda.

In questo capitolo viene preso in esame 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.

Per la costruzione e la validità sperimentale e analitica dei grafici relativi al % **Calore** vale quanto detto nei **Punti 10.c.a.2 – 10.c.a.3 – 10.c.a.4 – 10.c.a.4 – 10.c.a.5** (pag. 413 e seg.).

Le curve di tendenza che rappresentano l'elaborazione dei dati sono di 1° grado (lineare).

**10.d.b) Metodo di calcolo** - Quest'ultima forma d'energia dissipativa si calcola attraverso la relazione (pag. 51 e seg., pag. 205 e seg., **Relazioni 24-25**) :

$$\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico} = \Delta L_{attrito} \quad (24)$$

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)

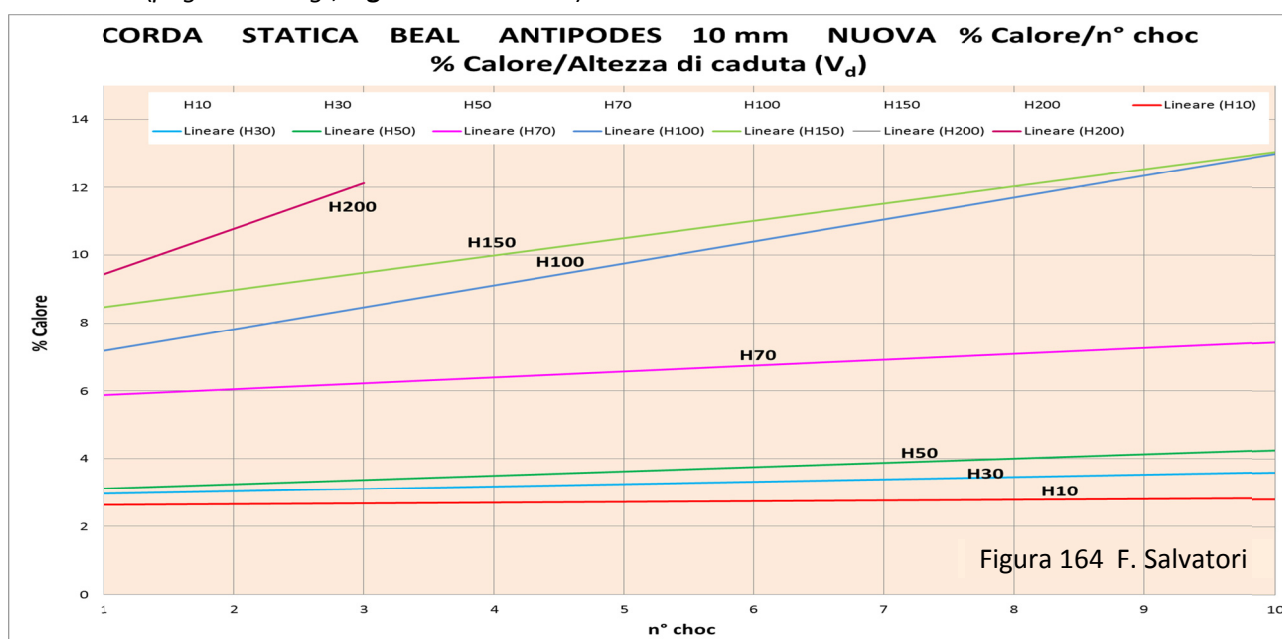
$A_0$  = Allungamento massimo (m)

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.).

Per **% 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**.

**10.d.c) Valutazione dell'andamento e della dislocazione delle curve % Calore =  $f(n^\circ \text{ choc})$  e % Calore =  $f(V_d)$  relative alle corde in esame** (pag. 175) – A titolo esemplificativo esaminiamo i grafici di **Figura 164** (pag. 206) relativo alla corda statica **Beal Antipodes 10 mm nuova**.

Si ricorda: il **% Calore** è una **proprietà delle corde** sottoposte a sollecitazione propria della loro Struttura Complessa (pag. 215, **Figura 51**) che **non è condizionato da alcun Ritardo di tempo  $\delta_{tempo}$** , se non per la parte, del tutto trascurabile, prodotta nella visco-elasticità con le **catene di macromolecole** nei fili elementari (pag. 184 e seg., **Figure 55-56-58-59**).



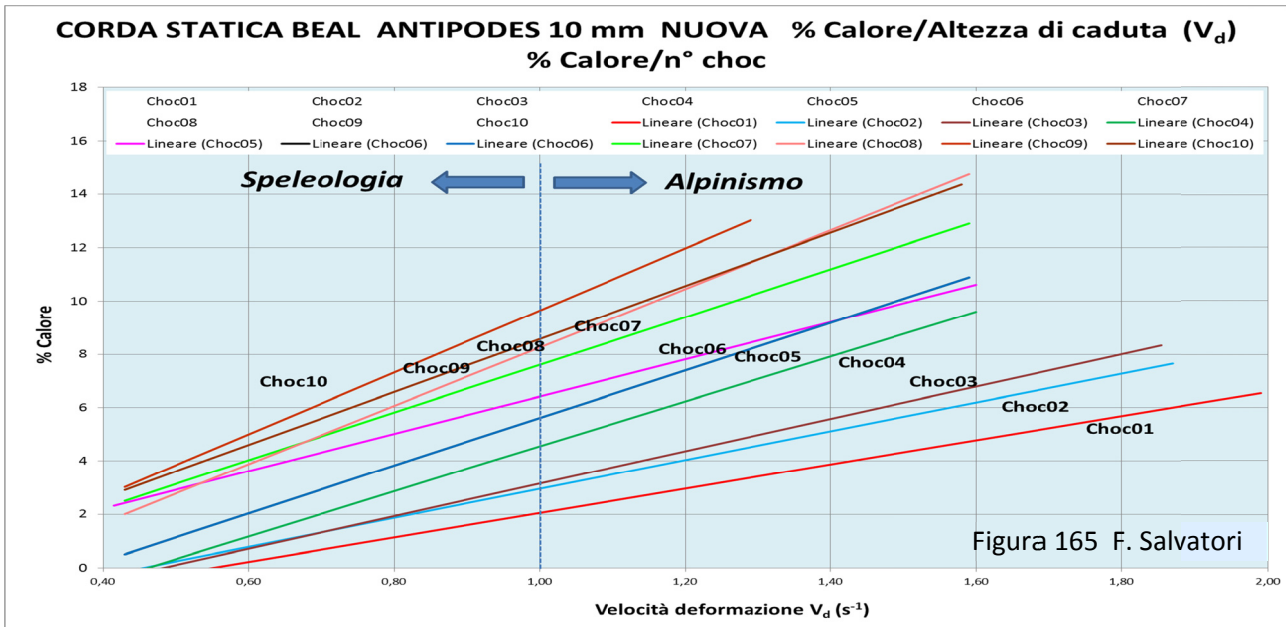
**10.d.d) La quantità d'energia dissipata per l'effetto % Calore cresce in funzione del n° degli choc e dell'aumento dell'altezza di caduta del peso** – In funzione del n° degli choc, con **velocità di deformazioni minime** (H10 cm – H 30 cm – H50 cm), la crescita della percentuale **% Calore** è appena percettibile, e si aggira intorno al **3,0 %**: un contributo dissipativo 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 13 %**.

Dunque, nel complesso, con l'**aumento dell'altezza di caduta** del peso le **forze d'attrito** che si oppongono agli allungamenti **cregono**, con gradiente in accentuazione man mano che **aumenta l'altezza di caduta**. Comportamento del tutto coerente con quanto impone il principio per cui tutti i materiali reagiscono con indurendosi con l'aumento della Velocità di deformazione.

Per meglio rilevare il variare di **% Calore** in dipendenza della Velocità di deformazione  $V_d$  si osservi la **Figura 165**: è evidente 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 si mette in evidenza che le sollecitazioni tipiche della progressione speleologica (uso dei bloccanti e discensore) hanno un'incidenza ridotta nella produzione di calore rispetto a quelle tipiche dell'alpinismo e, soprattutto, dell'arrampicata sportiva.



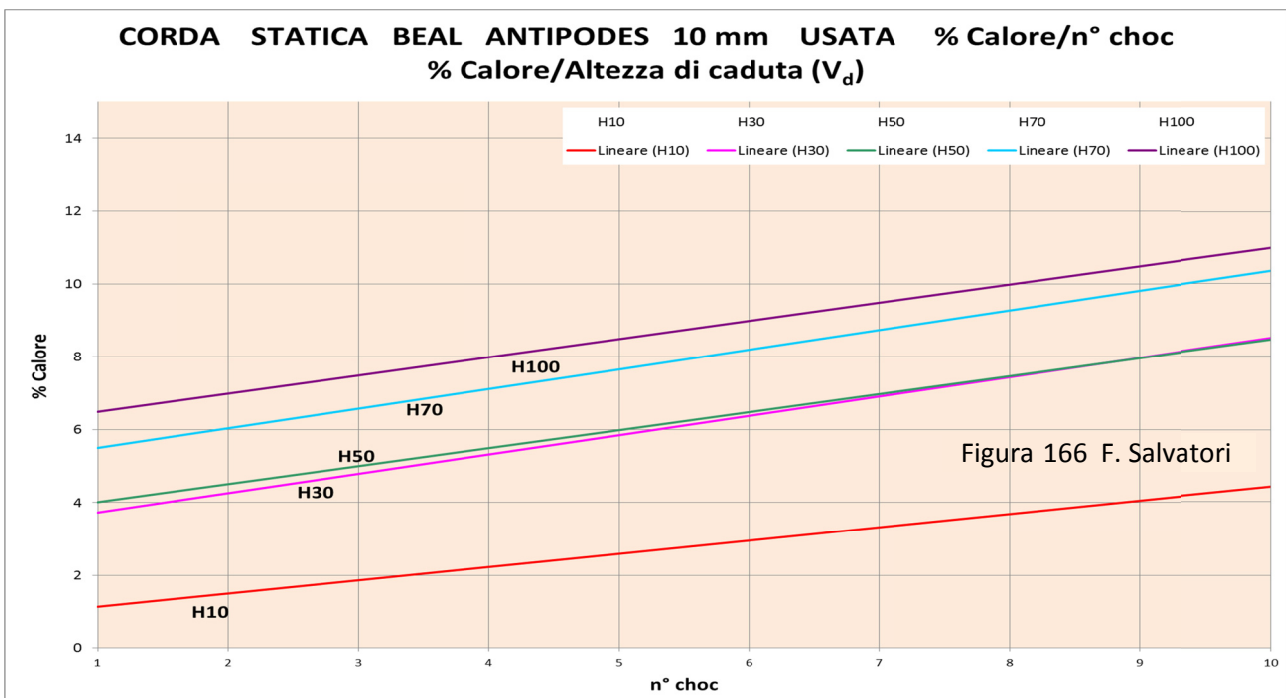
Da tenere presente infine che il succedersi di “sollecitazioni a caduta” tipo “progressione speleo”, comprese quelle prodotte nella risalita su corda, sono di entità minima e quindi poco efficaci. Mentre quelle di tipo “Alpinismo” sono di maggior contenuto energetico e pertanto più degradanti.

Per contro le sollecitazioni “Speleologia” sono molto numerose, mentre quelle “Alpinismo” solo occasionali. Se molti incrementi minimi che si sommano, eguagliano l’efficacia di pochi choc a caduta di grande intensità energetica.

**10.d.e) Confronto fra corda statica Beal Antipodes 10 mm 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



Dunque, la Corda statica Beal Antipodes 10 mm **usata** ha una minore disponibilità a dissipare energia sotto forma di calore. Ma la differenza è di minima entità, appena accennata, ed è il risultato dell'azione combinata di fattori che si contrappongono:

1. le sollecitazioni subite durante l'uso in grotta hanno diminuito la CSCC e quindi gli Allungamenti massimi  $A_0$ ;
2. il contatto con l'acqua (degradazione idrolitica, pag. 82 e seg., **Figura 73**) e il calore conferito con il discensore (pag. 100 e seg., **Figure 84-95**) hanno ridotto le proprietà meccaniche dei fili elementari e quindi anche, di fatto, la Superficie efficace della corda (come dire che c'è meno materiale ad opporsi agli allungamenti);
3. l'uso in grotta ha abraso la calza recidendo alcuni fili elementari, con conseguente diminuzione della Superficie efficace.

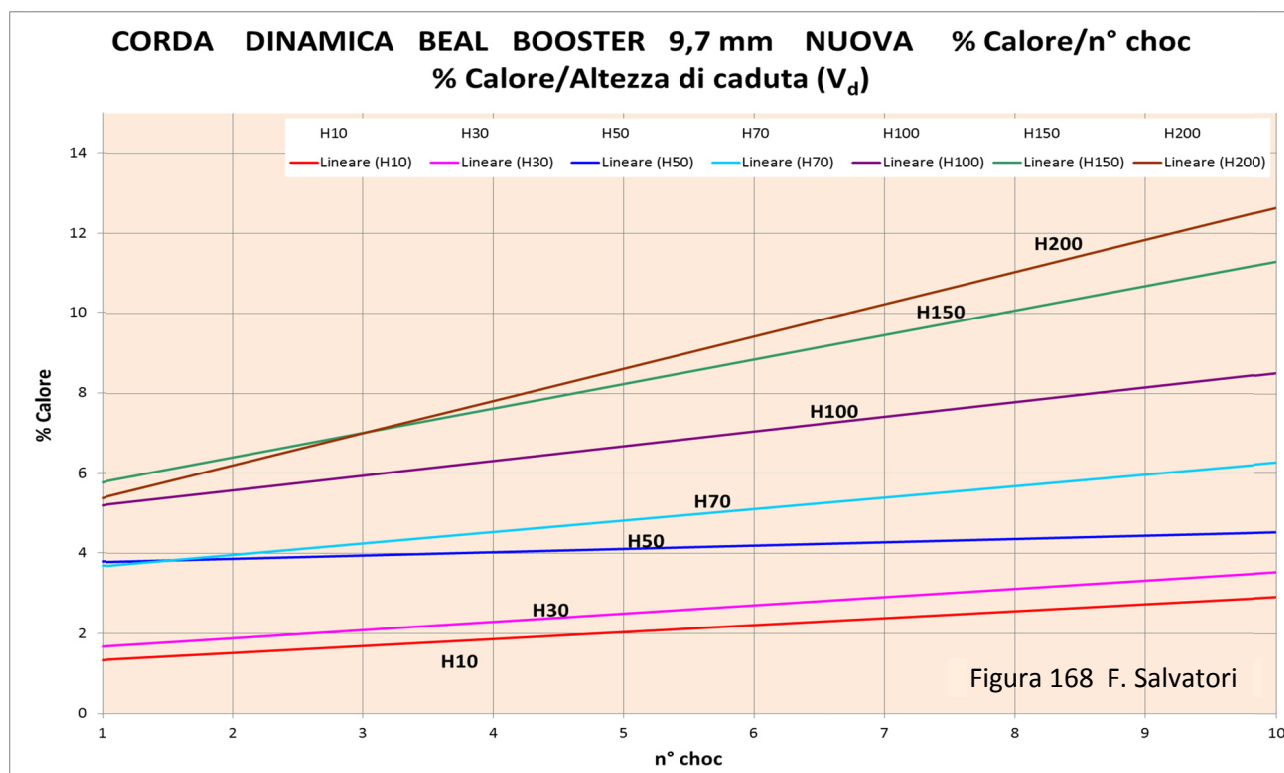
**10.d.f) Confronto fra la Corda statica Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) e Corda dinamica Beal Booster 9,7 mm (Nylon 6), entrambe nuove** - Sappiamo che la capacità aggiuntiva di deformarsi della corda dinamica dipende dal tipo d'intreccio fra calza e trefoli e dalla tensione con cui la corda stessa viene 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 produttori 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.

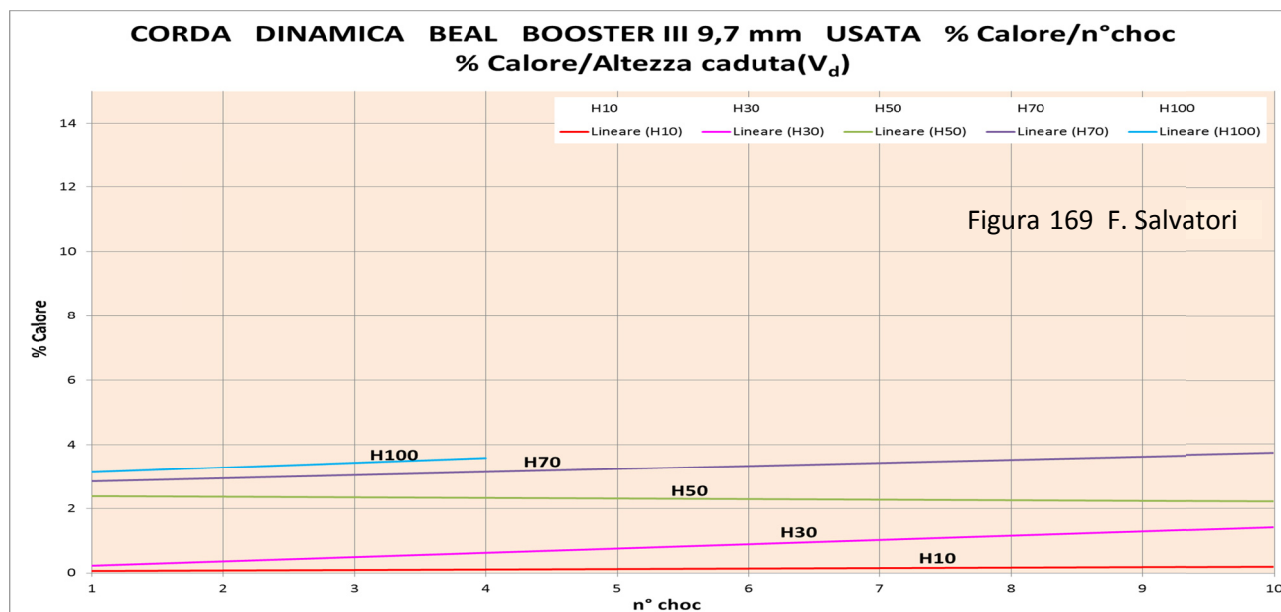
Ma confrontando la **Figura 168**, relativa alle curve  $\% \text{ Calore} = f(n^\circ \text{ choc})$  della Corda **dinamica** Beal Booster III nuova,  $\% \text{ Calore}$  mostra valori molto ridotti rispetto a quelli della corda statica Beal Antipodes (pag. 206, **Figura 164**): poco più delle metà.



Questa netta differenza di risultati sperimentali per **% Calore** è verosimilmente legata a due fattori:

1. nella corda dinamica la **Superficie efficace** è pari a **34,1 mm<sup>2</sup>** contro **48,8 mm<sup>2</sup>** 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.

### 10.d.g) 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 **proprietà termiche** sono:

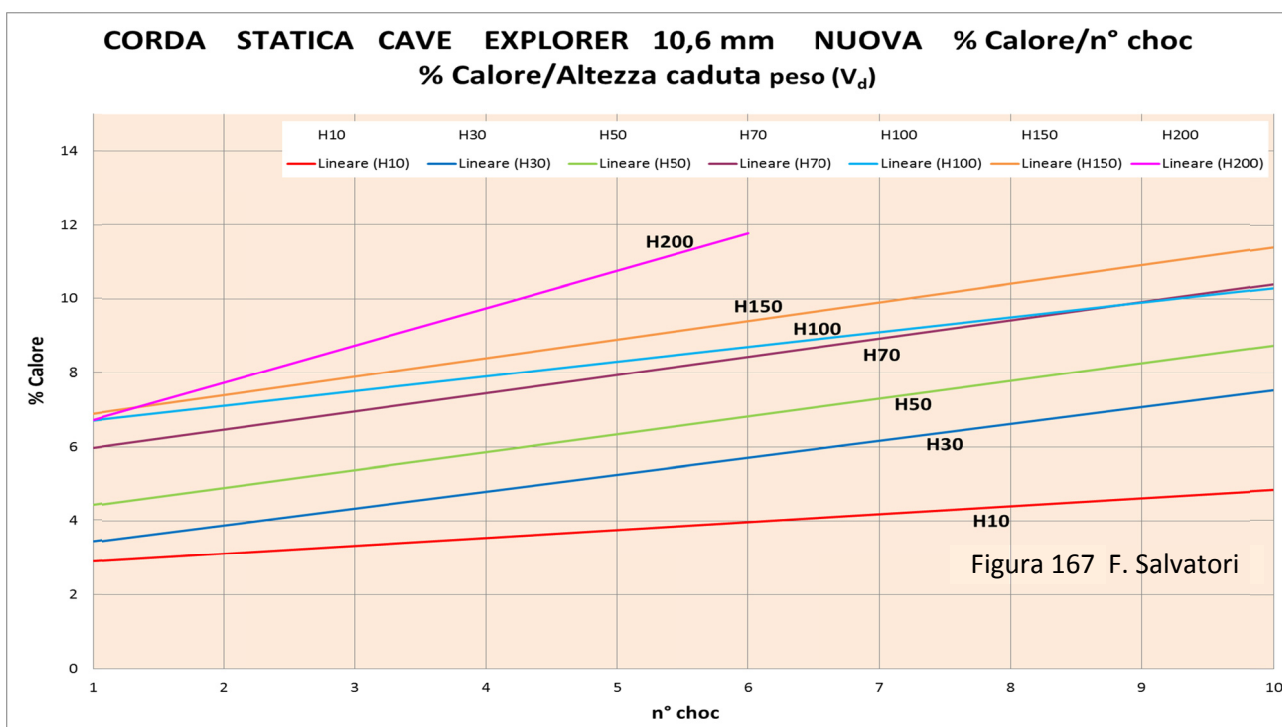
Poliammide Nylon 6		Poliammide Nylon 6.6	
Conduttività termica W/(K · m)	0,25	Conduttività termica W/(K · m)	0,30
Capacità termica J/(g · K)	1,7	Capacità termica J/(g · K)	1,6

Le differenti proprietà meccaniche sono:

Poliammide Nylon 6.6			Poliammide Nylon 6		
Densità $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,14		Densità $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	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 <sup>2</sup> =MPa)	900	strength	Sforzo alla rottura (N/mm <sup>2</sup> =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	

Confrontando i grafici di **Figura 167** (Nylon 6.6) con quelli di **Figura 164** (pag. 206, 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 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**.

### **10.e) Valutazione del contributo della Compattazione della Struttura Complessa della Corda (CSCC) all’assorbimento e dissipazione dell’energia prodotta dalla caduta del peso**

Nel precedente **Punti 10.c** (pag. 409 e seg.) è stata trattata la valutazione del comportamento della visco-elasticità dei fili elementari (poliammide) delle corde oggetto di sperimentazione (pag. 404) con test a caduta di un peso. Dato che la visco-elasticità è una proprietà dei polimeri condizionata dal Ritardo di

tempo  $\delta_{tempo}$  (pag. 46, **Figura 38**) per definirne le caratteristiche e le variazioni derivanti dall'uso delle corde sono state utilizzate per le analisi le curve del Fattore di perdita  $tang \delta = f(n^\circ choc)$  e  $tang \delta = f(V_d)$  (pag. 406).

Inoltre, nel precedente **Punto 10.d** (pag. 422 e seg.) è stato quantificato il contributo dato dal % Calore, conseguenza degli attriti, sotto trazione per la caduta del peso, fra le componenti della Struttura Complessa della Corda. Anche in questo caso sono stati analizzati l'andamento e la dislocazione delle curve  $\% Calore = f(n^\circ choc)$  e  $\% Calore = f(V_d)$ . Anche questo parametro è indipendente dal Ritardo di tempo  $\delta_{tempo}$ .

In questo Punto invece analizziamo e quantizziamo il contributo che apporta la CSCC, meccanismo di assorbimento e dissipazione dell'energia della caduta del peso anch'esso non dipendente dal Ritardo di tempo  $\delta_{tempo}$ .

Le curve che si esaminano sono relative alle variabili dipendenti  $\% Dissipazione$ ,  $E$  (Modulo elasticità) e  $A_0$  (Allungamento massimo) (pag. 406) e sono:

1.  $\% Dissipazione = f(n^\circ choc)$
2.  $\% Dissipazione = f(V_d)$
3.  $E = f(n^\circ choc)$
4.  $E = f(V_d)$
5.  $A_0 = f(n^\circ choc)$
6.  $A_0 = f(V_d)$

facenti riferimento **all'insieme di tutte le deformazioni possibili in una corda** trazionata, come a dire:

- a. deformazioni visco-elastiche,
- b. CSCC,
- c. lavoro a rottura dei fili elementari.

Pertanto si prendono in considerazione tutti gli effetti dissipativi conglobati, senza distinzione, ma escludendo il fattore dissipazione per attriti/calore.

Anche in questo caso i dati sono ricavati dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06 Appendice 03** (pag. 286 e seg.)

La valutazione del **contributo ammortizzante e dissipativo della CSCC emerge** nelle considerazioni contenute nei **Punti** che seguono, dove sono messi opportunamente a confronto i diagrammi sopra enumerati, fra di loro e con i grafici relativi al **Fattore di perdita della visco-elasticità** riportati nel precedente **Punto 10.c.b**.

Anche nei grafici analizzati in questo **Punto 10.e** l'andamento e la dislocazione uniforme delle varie curve denota la validità della sperimentazione e delle considerazioni che ne scaturiscono.

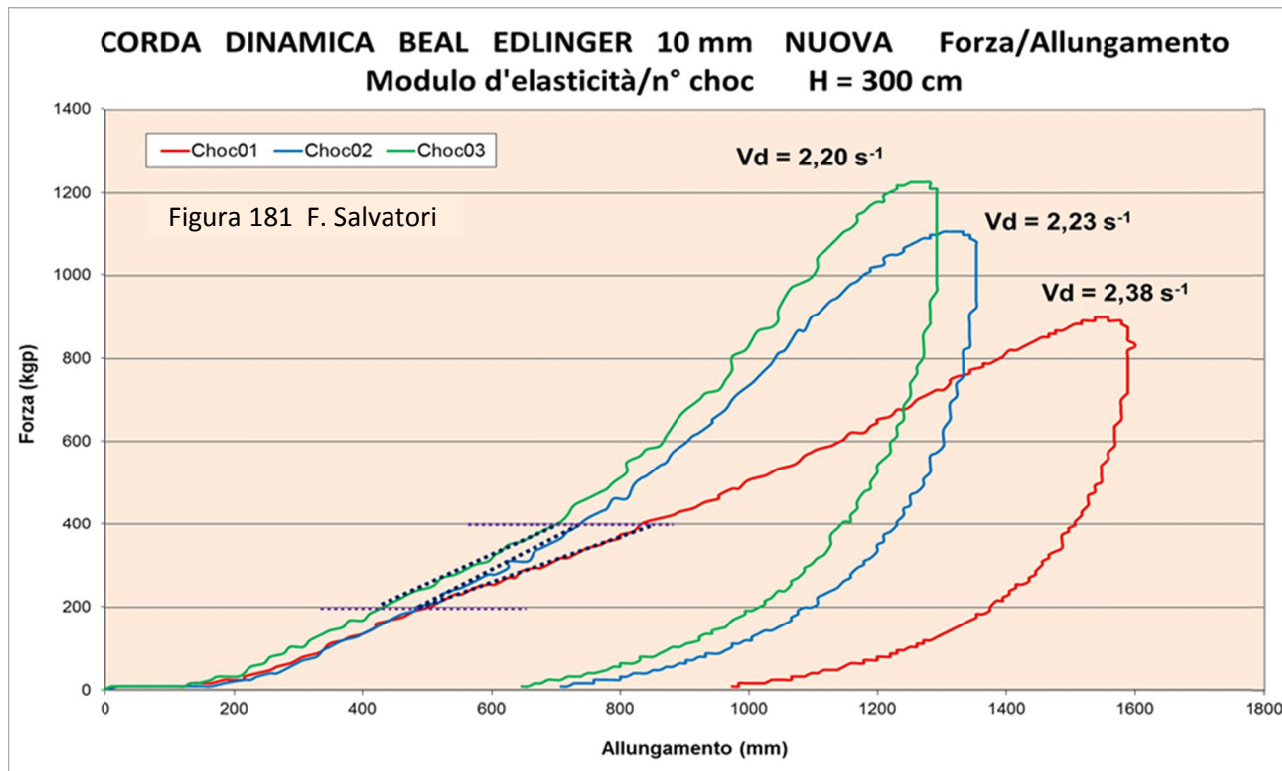
**10.e.a) Calcolo di % Dissipazione** - Il calcolo delle energie in gioco è misurato con l'integrazione grafica delle curve d'isteresi  $F = f(A)$ , indicate, come esempio, nella **Figura 37** (pag. 45):

1. **Superficie di carico** ( $\Delta L_{carico}$  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 (pag. 211, **Relazione 26**):

$$\% Dissipazione = \left( \Delta L_{dissipazione} / \Delta L_{carico} \right) \cdot 100 \quad (26)$$

**10.e.b) Calcolo del Modulo d'elasticità  $E$**  – Il Modulo d'elasticità è un parametro della corda sotto trazione che dà una misura della sua resistenza ad allungarsi; e si definisce costruendo le curve d'isteresi  $F = f(A)$ , come ad esempio in **Figura 181** (pag. 228 e seg.) prodotte dai test a caduta di un peso (140 kgp) su una corda **dinamica** Beal Edlinger 10 mm. I dati sono ricavati, al solito, dalle **Tabelle riassuntive 01 – 02 – 03 – 04 – 05 – 06** **Appendice 03** (pag. 286 e seg.) e si riferiscono a tre choc successivi sullo stesso campione di corda, nuova e asciutta, lungo 3000 mm, con nodi guida all'estremità (f.t.).



Il **Modulo d'elasticità della corda  $E$**  è ricavato, sulla base della relazione  $\tan \alpha = E$ , dalla pendenza  $\alpha$  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  $F = 400 \text{ kgp}$ .

Ricordiamo che  $E$  è una misura **indicativa** della **rigidità** del campione sottoposto a trazione (tanto più è elevato il suo valore tanto più è rigido), 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 **Figura 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 dunque variabile in funzione della Forza applicata.

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 restante delle curve  $F = f(A)$  è **non - lineare** e ciò non permette di utilizzare  $E$  come rappresentativo di tutto lo sviluppo del grafico Forza/Allungamento.

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 con essa s'inizia a dissipare, 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, alla **CSCC**.

Ma i valori di  $E$ , visto i limiti entro i quali variano i carichi che li producono (200 – 400 kgp), sono anche appropriati per valutare gli effetti sul **decadimento delle corde speleo** prodotto dalle **sollecitazioni normali della progressione in grotta** (risalita e discesa), 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:

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

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

$l_0$  = lunghezza del campione a riposo

$l$  = lunghezza del campione trazonato

$E$  = modulo d'elasticità o di Young (N/m<sup>2</sup> = Pascal = Pa)

L'utilizzo dello Sforzo  $\sigma$  infatti riferisce ogni mutamento all'unità di misura (in questo caso mm<sup>2</sup>) 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 il ruolo della CSCC nella dissipazione dell'energia** in gioco nei test.

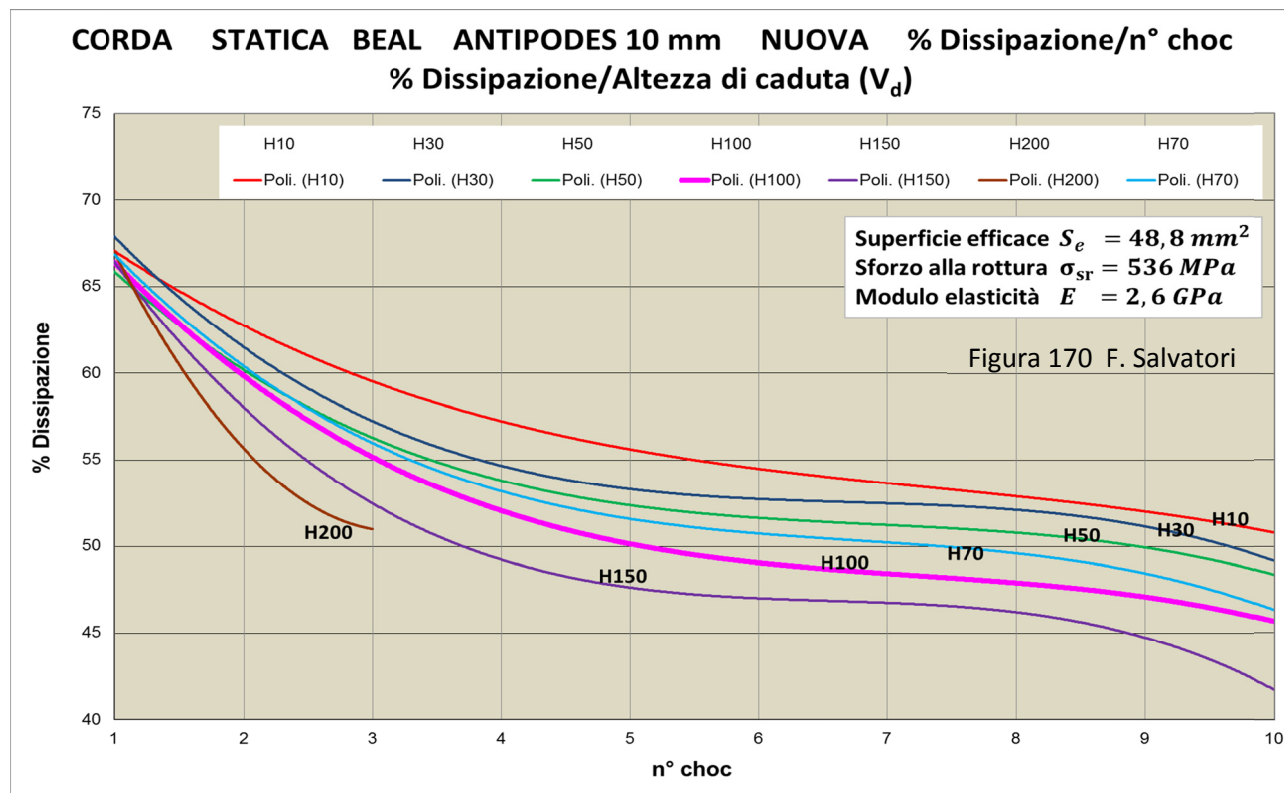
**10.e.c) Valutazione delle curve  $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$  e  $A_0 = f(V_d)$**  – L'Allungamento massimo  $A_0$  (pag. 46, **Figura 38**) che un campione di corda (con nodi guida all'estremità e lunghezza superiore a 3000 mm) subisce per effetto della trazione che produce la caduta di un peso (140 kgp) è conseguenza della somma di ogni possibile deformazione, come a dire:

1. quanto deriva dalla deformazione dei fili elementari per effetto della visco-elasticità (solo parzialmente reversibile, condizionata dagli attriti fra catene di macromolecole e quindi caratterizzata dal Ritardo di tempo  $\delta_{tempo}$ );
2. quanto conseguente alla Compattazione della Struttura Complessa della Corda (anch'essa parzialmente reversibile, determinata dalla strizione dei vari componenti della corda, pag. 62, **Figura 51**, tanto in senso assiale che radiale, non dipendente da attriti che producono Ritardi di tempo).

**10.e.d) Individuazione del settore d'influenza della CSCC rispetto alla progressione del n° degli choc: analisi delle curve % Dissipazione =  $f(n^\circ \text{ choc})$  della corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova in funzione dell'altezza di caduta del peso crescente; confronto con le omologhe curve del Fattore di perdita  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$**  – Analizzando, innanzitutto, la **Figura 170** (pag. 212) relativa alla corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova, sono possibili alcune considerazioni che convergono a definire il comportamento e la quantizzazione del **contributo della CSCC** all'assorbimento e dissipazione dell'energia prodotta da una sollecitazione.

**10.e.d.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): pendenza in discesa;
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): pendenza nulla;
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): pendenza in salita;
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.

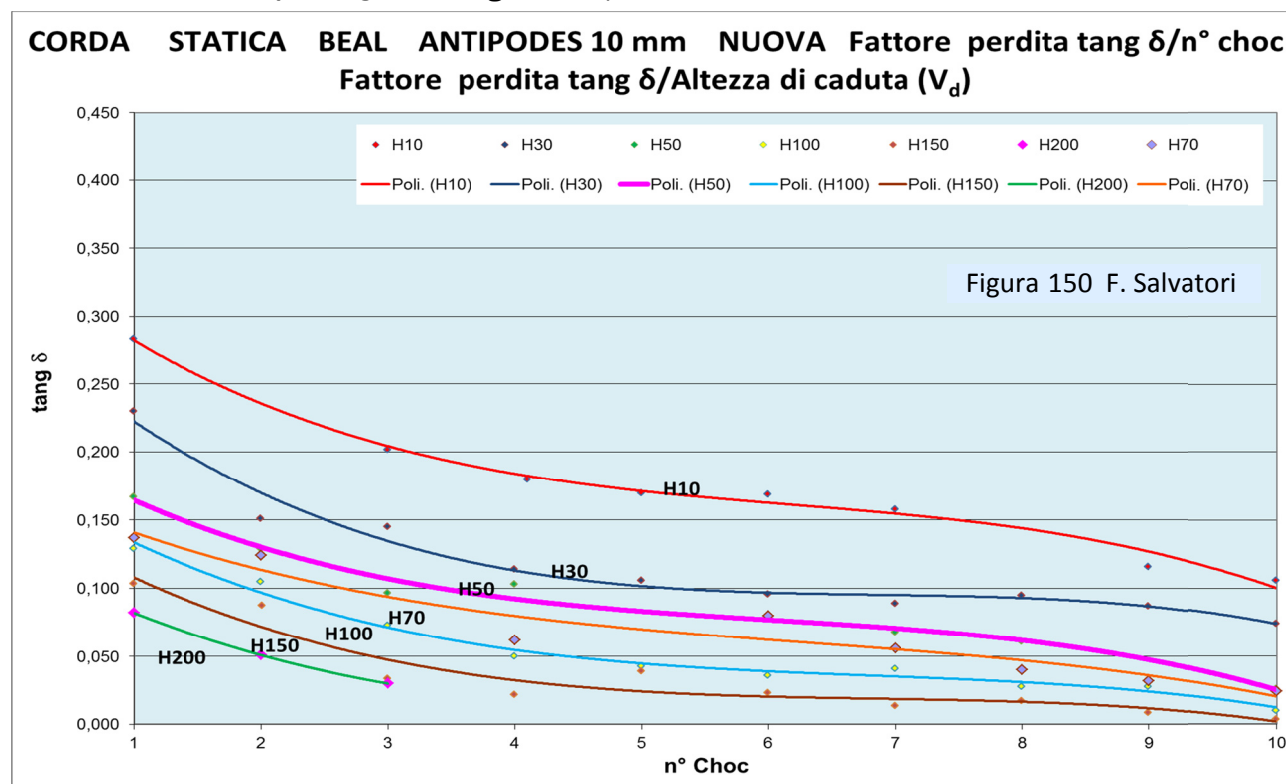
Tutte le curve inserite in **Figura 170** mostrano di **decreocere, sia con il progredire del n° degli choc sia con il crescere dell'altezza di caduta del peso**. Ma con pendenza più o meno accentuate, distinguendosi in tre settori:

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. Le cause che portano a questi meccanismi di degrado sono dettagliatamente descritte nel **Punto 01.h.b.2** (pag. 213 e seg.).

Da rilevare, perché particolarmente significativo, è il fatto che tutte le curve della **Figura 170** hanno origine, con ascissa **n° choc = 1**, con valori praticamente uguali (range **66 % - 68 %**).

**10.e.d.2) Seconda considerazione: confronto fra l'andamento delle curve % Dissipazione =  $f(n^\circ \text{ choc})$  e  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$**  - Confrontando le curve della soprastante **Figura 170** con le curve relative al Fattore di perdita  **$\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$**  di **Figura 150** (pag. 186) (della stessa corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova) si constata che il loro andamento e dislocazione è del tutto simile, con **un'unica differenza**, sostanziale: le curve relative al Fattore di perdita **non hanno un'origine comune** e si differenziano in un **ampio range di  $\text{tang } \delta$**  compreso fra **0,080** e **0,285**.



Quindi, tenendo conto che il **Fattore di perdita** misura quanto compete alla **visco-elasticità dei soli fili elementari** e quindi disegna l'assorbimento e dissipazione dell'energia a loro competente, si può affermare che il **% Dissipazione** è guidato soprattutto dalle deformazioni visco-elastiche proprie del materiale polimerico dei fili elementari; tranne che nel primo settore, fra **n° choc = 1** e **n° choc = 3** dove è in azione, evidentemente, un ulteriore fattore dissipativo che si somma alla visco-elasticità e modifica l'andamento delle curve portandole ad un'origine pressoché identica.

Questo fattore che si somma alla visco-elasticità è la **Compattazione della Struttura Complessa della Corda** che è molto efficace nel dissipare energia per effetto dei primi choc e che diminuisce il contributo con il proseguo dell'applicazione di carichi (parte della CSCC si perde in modo irreversibile

ad ogni choc). Mentre l'effetto dissipativo della visco-elasticità aumenta con il progredire delle sollecitazioni con altezza di caduta crescente.

Pertanto, da questo primo confronto fra grafici delle curve  $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  e  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$ , si può concludere che la CSCC agisce in maniera prepotente con le sollecitazioni iniziali a basso contenuto energetico, per poi esaurire la sua funzione ed essere sostituita dalle capacità di deformazione dei soli fili elementari.

In altre parole, con il progredire dell'uso, la corda diventa sempre più compatta (e rigida) con pochi spazi vuoti fra calza, trefoli e fili elementari. Condizione facilmente costatabile al tatto e ai piegamenti nella corde usate.

Ora, quindi, abbiamo la conferma che l'azione dissipatrice della CSCC è presente nelle corde speleo, che agisce soprattutto a seguito delle prime sollecitazioni e che va esaurendosi con l'uso. Ma non sappiamo ancora qual è il contributo percentuale della CSCC nell'assorbimento e dissipazione delle energia di caduta del peso.

Infine, dalla **Figura 171** (pag. 217) relativa alle curve di  $\% \text{Dissipazione}$  della corda statica Beal Antipodes 10 mm **usata** a confronto con la **Figura 155** (pag. 191) relativa alle curve di  $\text{tang } \delta$  della stessa corda, sempre **usata**, si può concludere che la **funzione ammortizzante e dissipatrice della CSCC** nelle **corde usate** (in grotta) è **molto ridotta**, ma pur sempre presente; e nel complesso produce una dissipazione d'energia più elevata di quella rilevata nella equivalente corda nuova.

Ma questa, apparente, maggiore capacità dissipativa della corda usata è soprattutto legata al fatto che quest'ultima ha una **Superficie efficace ridotta** ad appena **25,1 mm<sup>2</sup>**, contro i **48,8 mm<sup>2</sup>** della nuova (i vari fattori degradanti della progressione in grotta ne sono responsabili): questo quasi dimezzamento del materiale polimerico che si oppone agli allungamenti fa sì che, a parità di forza, il lavoro svolto sia superiore, con conseguente maggiore quantità di lavoro non reversibile (è una constatazione generalizzata che le corde di minor diametro apparente siano quelle che, a parità di sollecitazione, ricevano la maggior perdita di deformabilità e quindi il maggior danno da usura).

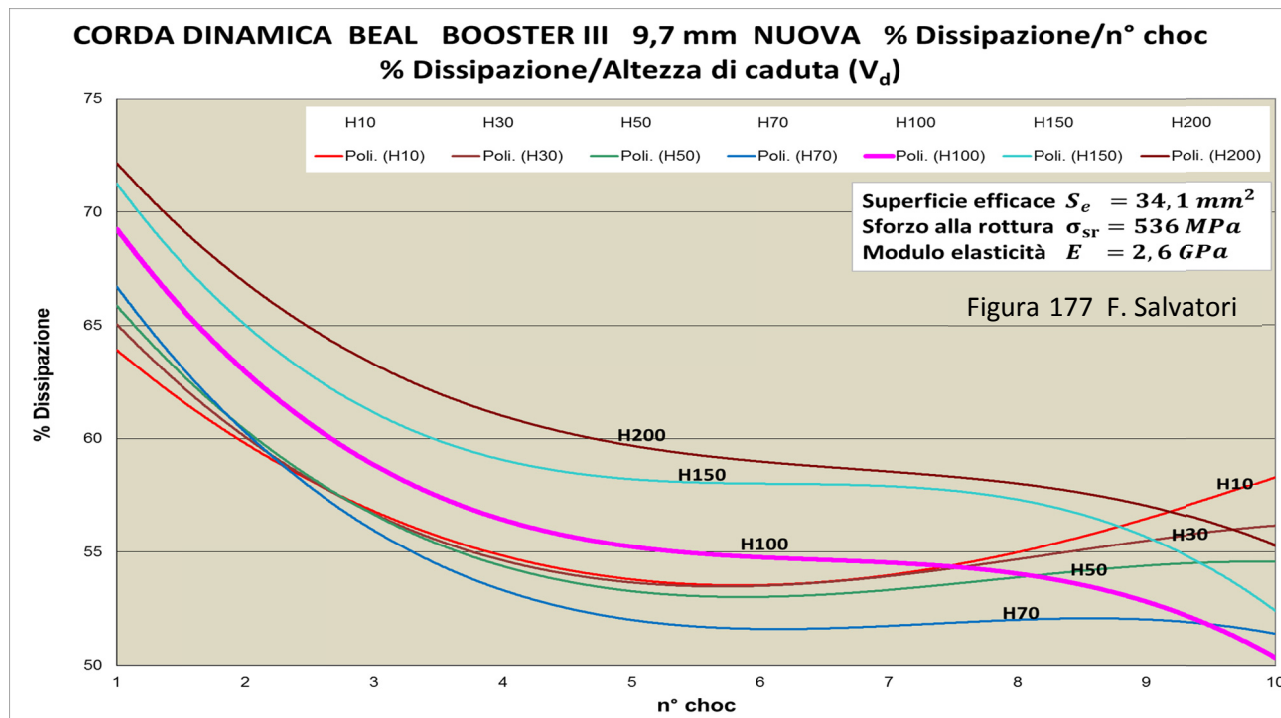
La **CSCC** è una caratteristica delle proprietà meccaniche di una **corda cosiddetta "dinamica"**. Ma anche in una **corda "statica"** come la **Beal Antipodes 10 mm** c'è un **effetto aggiuntivo ammortizzante e dissipativo della CSCC**, che, da **nuova**, vale fino al **30 %** con sollecitazioni di bassa e media intensità.

**10.e.e) Valutazione quantitativa del contributo della CSCC nell'assorbimento dell'energia prodotta dalla caduta del peso: confronto fra le curve  $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  della corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm (Nylon 6) con le corde statiche Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6) e Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm (Nylon 6.6)** - Nella Parte VI (pag. 210 e seg., **Punto01.h**) sono ampiamente esposte le analisi e le conclusioni relative al comportamento della CSCC e della visco-elasticità nelle corde prese in esame (pag. 175, **Punto01.a**). Qui di seguito sono sintetizzati soprattutto gli aspetti che portano a **definire quantitativamente il contributo ammortizzante e dissipatore della CSCC**, tanto nelle corde **statiche** come, soprattutto, nelle **dinamiche**.

**10.e.e.1) Corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm nuova: analisi dell'andamento e della dislocazione delle curve  $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  e valutazione del rapporto fra CSCC e visco-elasticità; netta prevalenza della CSCC e inversione della dislocazione** - 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 (Nylon 6) 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 la proprietà (CSCC) macro-strutturale che caratterizza le corde cosiddette "dinamiche", rendendole adatte a sopportare le sollecitazioni estreme che può produrre la progressione in alpinismo e in arrampicata sportiva.

Da rilevare innanzitutto che il dislocamento delle curve della **Figura 177** (corda dinamica) è inverso rispetto a quello in **Figura 170** (pag. 212, corda statica): in quest'ultima, infatti, il dislocamento procede diminuendo il

% **Dissipazione** con l'aumentare dell'altezza di caduta del peso (coerentemente con il comportamento dei materiali polimerici visco-elastici puri, che aumentano rigidità e elasticità con il crescere della Velocità di deformazione  $V_d$ ; pag. 54, **Figura 43**) (si ricorda che l'origine delle curve coincide in quanto all'inizio incide marcatamente la CSCC, che sovrasta le caratteristiche proprie della visco-elasticità).



Per contro le curve della **Figura 177** relativa alla **corda dinamica** procedono aumentando la dissipazione con il crescere della Velocità di deformazione, andando contro, apparentemente, al principio che regola i rapporti fra proprietà meccaniche dei materiali polimerici e la  $V_d$  (pag. 54, **Figura 43**).

Ma questa apparente contraddizione si giustifica con il fatto che nella corda **Beal Booster dinamica** gioca un **ruolo preponderante la CSCC** che aumenta la deformabilità della corda molto di più di quanto produca l'irrigidimento dovuto all'aumento della Velocità di deformazione.

Questa conclusione interpretativa viene ulteriormente confermata dal fatto che, raggiunto il 6° - 7° choc, la CSCC ha perso gran parte della sua capacità d'assorbimento dell'energia e ritorna a prevalere il comportamento proprio dei materiali polimerici visco-elastici dei soli fili elementari: la dislocazione, a partire dal 7° choc s'inverte gradualmente, per ritornare decrescente come richiedono i materiali polimerici privi di CSCC.

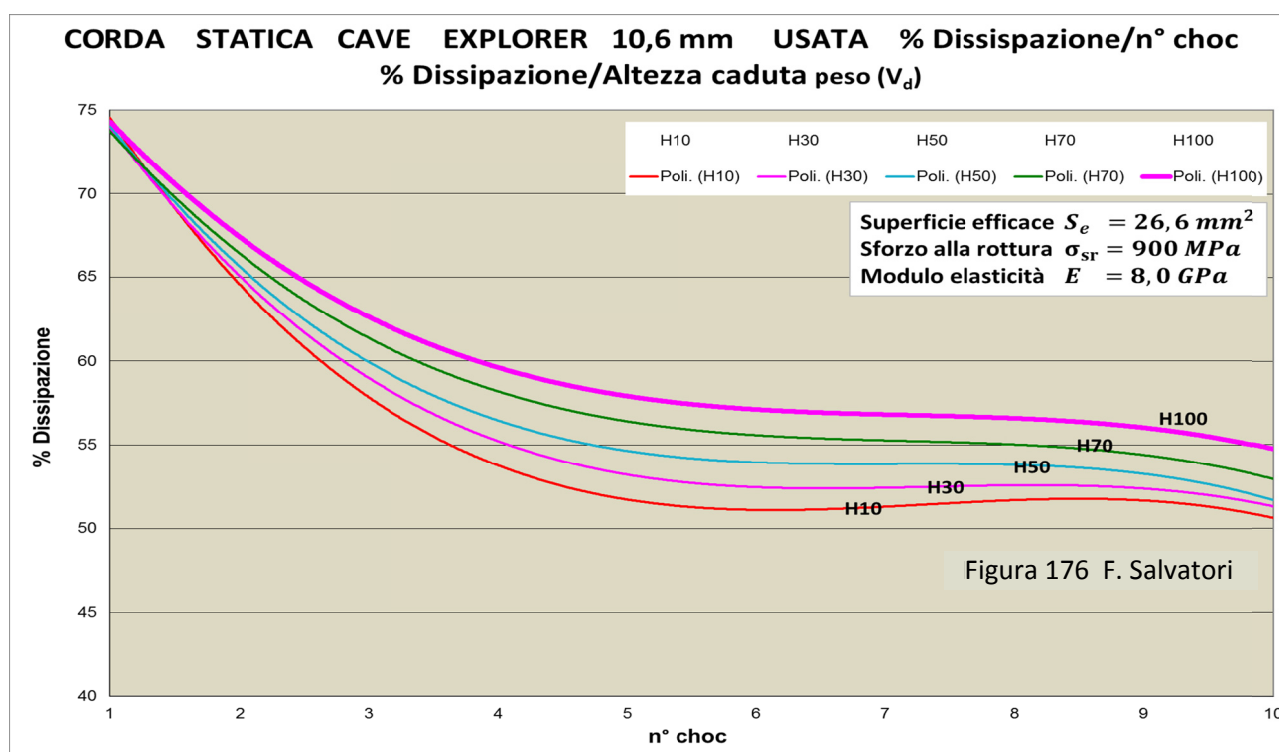
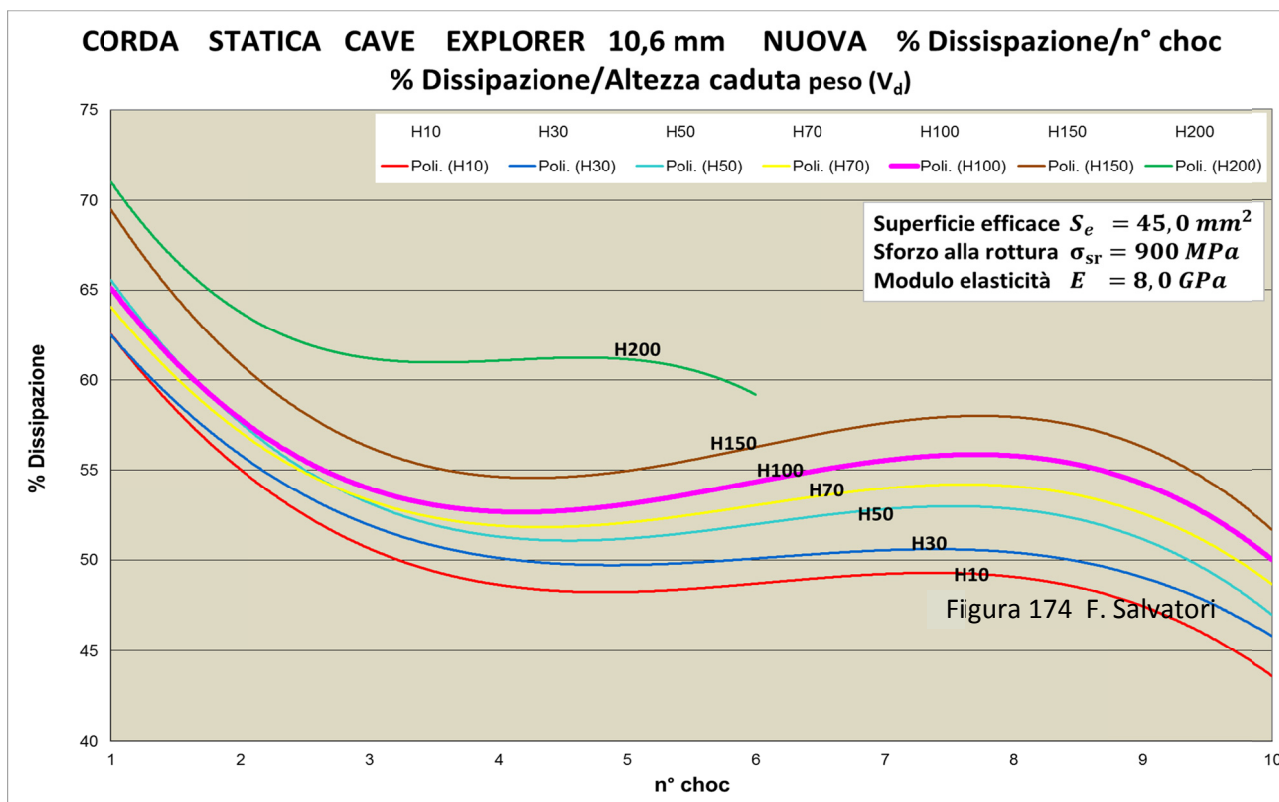
In sintesi possiamo dichiarare che:

1. la CSCC nelle corde dinamiche ha una grossa rilevanza, tanto da oscurare le caratteristiche dei materiali polimerici (nelle **equivalenti corde statiche** l'effetto CSCC **non è sufficiente a contrastare il comportamento della visco-elasticità**)
2. la CSCC va esaurendo la sua funzione d'assorbimento e dissipazione dell'energia con il progredire del decadimento della corda per effetto del succedersi di sollecitazioni a contenuto energetico crescente.

**10.e.e.2) Corda statica Cavalieri Cave Explorer 10,6 mm nuova e usata (Nylon 6.6): analisi dell'andamento e della dislocazione delle curve % Dissipazione =  $f(n^\circ \text{ choc})$ : inversione della dislocazione delle curve** - Coi grafici di **Figura 174 -176** sono rappresentate le curve % **Dissipazione =  $f(n^\circ \text{ choc})$**  della corda Cave Explorer 10,6 mm nuova e usata, che, diversamente da tutte le altre corde, ha i **fili elementari di Nylon 6.6**.

Anche in questi due casi si verifica che **l'andamento delle curve non è diverso** da quello della corda statica, mentre avviene l'inversione completa della loro dislocazione: la quantità di lavoro dissipata

con la sollecitazione aumenta con la Velocità di deformazione  $V_0$  come nel caso della prima parte dello sviluppo delle curve della corda dinamica (Figura 177).



E' dunque evidente che con fibre polimeriche di Nylon 6.6 il rapporto fra CSCC e visco-elasticità è a vantaggio del primo meccanismo deformativo, che prevale nonostante si tratti di una corda definita statica e quindi con un effetto ridotto.

Ma nel caso del Nylon 6.6 occorre anche ricordare che questa fibra ha delle proprietà meccaniche superiori al Nylon 6: la **Tenacità** (lavoro necessario per portare a rottura il filo elementare) è **0,64 N/Tex** contro **0,47 N/Tex** e il Modulo d'elasticità  $E$  è pari a **8,0 GPa** contro **2,6 GPa**. Questo comporta che, con

l'aumentare della Velocità di deformazione  $V_d$ , l'effetto irrigidimento nel Nylon 6.6 sia minore e di conseguenza minore la quantità d'energia dissipata a parità di condizioni di trazione.

In sintesi, anche se la CSCC della corda statica Cave Explorer non è pari a quella di una corda dinamica, è comunque sufficiente a prevalere e a far aumentare % **Dissipazione** al crescere di  $V_d$ . E' questo un altro esempio del perché non siano applicabili, senza condizionamenti valutabili di volta in volta, i principi generali che governano i materiali a elementi anisotropi come le corde.

Da osservare che dal confronto fra **Figura 174** (nuova) e **Figura 176** (usata) emerge che il % **Dissipazione** è sempre superiore, a parità di sollecitazione, nella corda usata.

Ma questo è dovuto al fatto che la **Superficie efficace della corda usata**, per effetto del degrado prodottosi con l'uso in grotta (per due anni) si è ridotta a **26,6 mm<sup>2</sup>** (da nuova era **45 mm<sup>2</sup>**), il **- 41 %**. Infatti la riduzione della quantità di materiale polimerico che si oppone agli allungamenti porta a mostrare che il succedersi degli choc produce nella corda usata dei valori del % **Dissipazione** più elevati; ma non è la conseguenza della sua condizione d'usura (rapporto CSCC/visco-elasticità) a determinare queste dislocazioni delle curve.

Comunque emerge, ancora una volta, sperimentalmente, il fatto, generalizzabile, che la riduzione del diametro delle corde porta con l'uso sempre a un degrado più rapido e con gradienti crescita più accentuati.

**10.e.f) Valutazione del contributo all'assorbimento d'energia della CSCC attraverso l'analisi delle curve  $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$  relative alle corde Beal Antipodes 10 mm statica e Beal Booster III 9,7 mm dinamica** - Facendo riferimento a quanto contenuto nel precedente **Punto 10.e.c** (pag. 430), analizziamo le curve  $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$  delle due corde in intestazione, rappresentate nella **Figura 172** (pag. 218, statica) e nella **Figura 179** (pag. 225, dinamica).

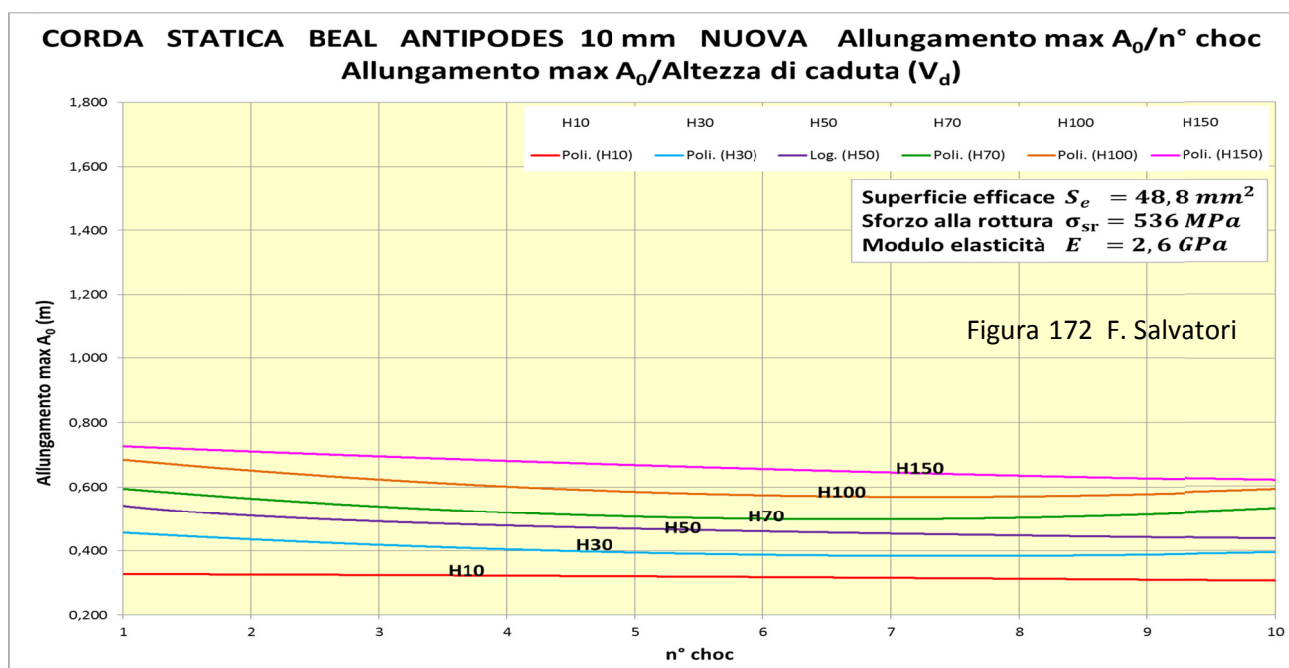
**10.e.f.1) Componenti dell'Allungamento massimo** - La **prima componente** è generata dall'Altezza di caduta  $h$  del peso  $P$  in base alla relazione (pag. 40):

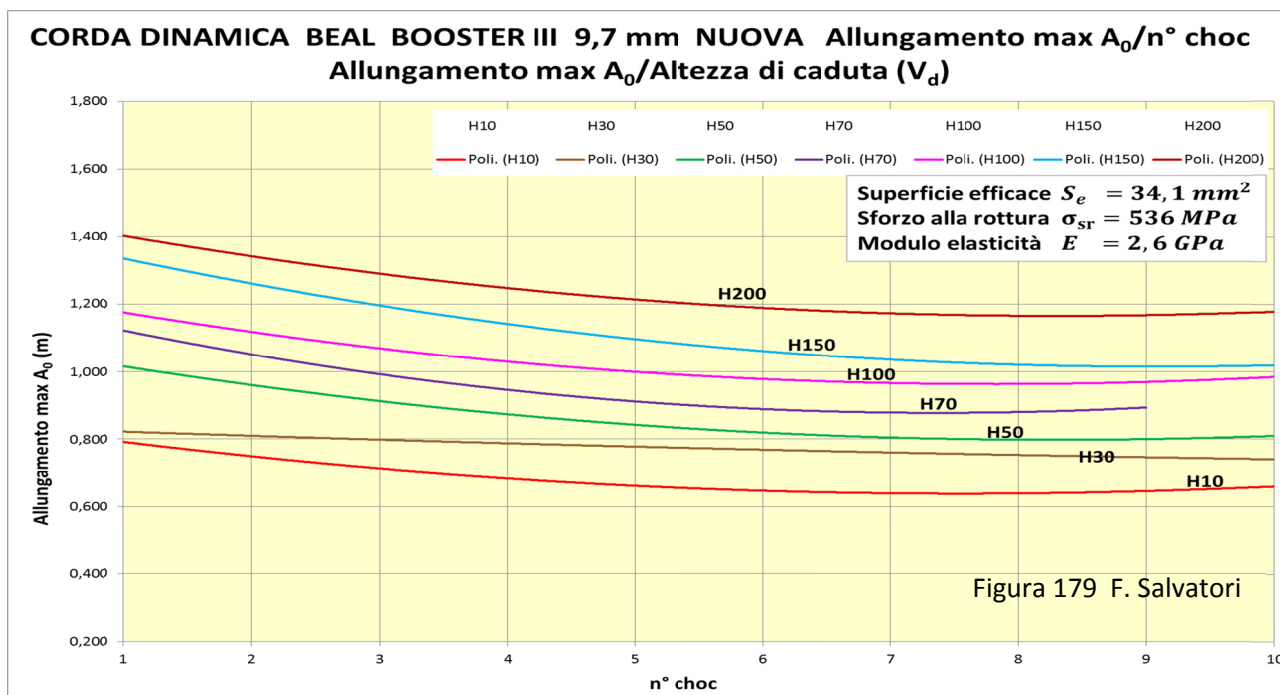
$$E_{\text{potenziale}} = P (h + A_0)$$

dove:

$A_0 = \text{Allungamento massimo}$

Infatti a una maggiore quantità d'energia da assorbire (una parte della quale, misurata da % **Dissipazione**, non viene recuperata) deve corrispondere anche un maggiore Allungamento massimo.





In **secondo luogo**, l'Allungamento massimo dipende anche dalla capacità di deformarsi della corda, la quale a sua volta è condizionata dal numero di meccanismi che producono le deformazioni. Nel caso in questione sono essenzialmente due: **Compattazione Struttura Complesso della Corda (CSCC)** e deformazioni legate alla visco-elasticità dei soli fili elementari.

Una **terza componente** che contribuisce all'entità dell'allungamento è la quantità di materiale polimerico che si oppone alla trazione, quantità misurata, in una corda, dalla Superficie efficace  $S_e$ .

**10.e.f.2) Prima considerazione: le curve  $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$  non mostrano variazioni di valori al succedersi degli choc** – Le curve di **Figura 172** (statica) non presentano un'inclinazione evidente e solo con altezze di caduta più elevate si mostrano appena discendenti. Pertanto risalta abbastanza chiaramente che il crescere del n° degli choc (tutti con la stessa altezza di caduta) non porta a variazioni dell'Allungamento massimo. E questo vale anche per le curve di **Figura 179** (dinamica) dove è evidente un leggera pendenza discendente a seguito dell'applicazione dei primi choc; nel proseguo della sequenza il valore di  $A_0$  rimane costante (è indubbio, ancora una volta, l'apporto deformativo straordinario della CSCC).

**10.e.f.3) Seconda considerazione: differenza marcata fra ranges iniziali e finali delle curve relative alla corda statica e dinamica** – Invece, sempre confrontando le curve della **Figura 172** con quelle di **Figura 179**, risalta la netta differenza di valori di  $A_0$  fra corda statica e dinamica, tanto che i ranges iniziali e finali sono più che raddoppiati:

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 al solo contributo del Fattore di perdita **tang  $\delta$**  (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:

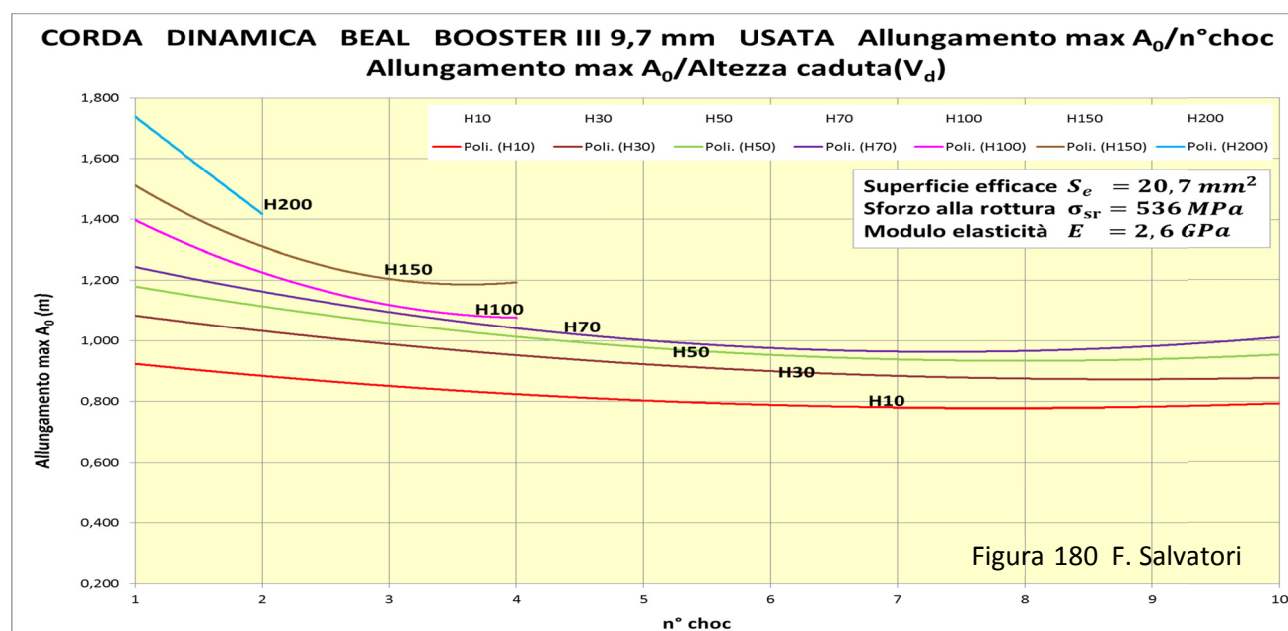
1. la corda dinamica **Booster III 9,7 mm nuova** ha una Superficie efficace pari a  $S_e = 34,1 \text{ mm}^2$  contro una  $S_e = 48,8 \text{ mm}^2$  della corda statica **Antipodes 10 mm nuova**; come a dire il **30 % in meno di materiale** polimerico a contrapporsi agli allungamenti conseguenti alle applicazioni di carico;

- 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 all'assorbimento dell'energia (per la caduta del peso) pari al **70 %** (se non maggiore) dalla **CSCC** e pari al **30 %** per la ridotta Superficie efficace.

**10.e.f.4) Terza considerazione: valutazione del contributo dissipativo della CSCC nelle 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), i ranges dei valori iniziali e finali delle curve  $A_0 = f(n^\circ \text{ choc})$  mostrano un aumento medio di quasi il 50 %:

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).

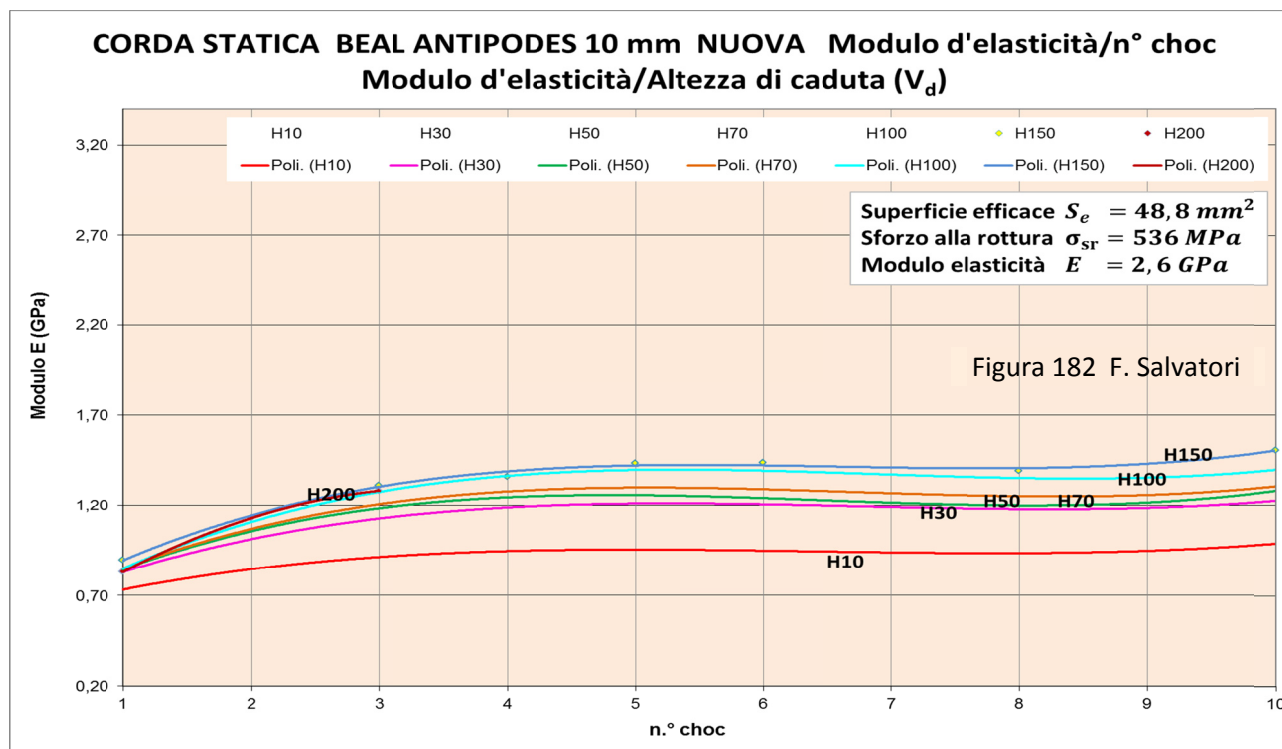
Questa rilevante crescita “anomala” dei valori degli Allungamenti massimi medi è dovuta agli stessi due fattori indicati per valutare il calcolo del contributo della CSCC nella corda dinamica Booster III nuova:

- l'ulteriore diminuzione della Superficie efficace del **18 %** (da **25,1 mm<sup>2</sup>** a **20,7 mm<sup>2</sup>**),
- 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.

**10.e.g) Valutazione quantitativa del contributo della CSCC nell'assorbimento e dissipazione dell'energia prodotta dalla caduta del peso: confronto fra le curve  $E = f(n^\circ \text{ choc})$  della corda dinamica Beal Booster III 9,7 mm (Nylon 6) con la corda statiche Beal Antipodes 10 mm (Nylon 6)** - Tenendo presente quanto premesso nel precedente **Punto 1.e.b** (pag. 429 e seg.), soprattutto ricordando che il Modulo d'elasticità  $E$  fa riferimento a campioni di corda con Superficie efficace  $S_e$  unitaria e quindi questa grandezza geometrica non ha alcuna influenza - analizziamo le curve  $E = f(n^\circ \text{ choc})$  ricavate dai test a caduta sulle due corde in intestazione.

**10.e.g.1) Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova e usata** - Nella Figura 182 vengono riportate le curve  $E = f(n^{\circ} \text{choc})$  relative alla corda statica Beal Antipodes Nylon 6.



**10.e.g.1.1) 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 **Premessa 01.i.a** (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. Ma è soprattutto nella parte iniziale delle curve (fra Choc n° 1 e Choc n° 3) che la CSCC si manifesta.

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.

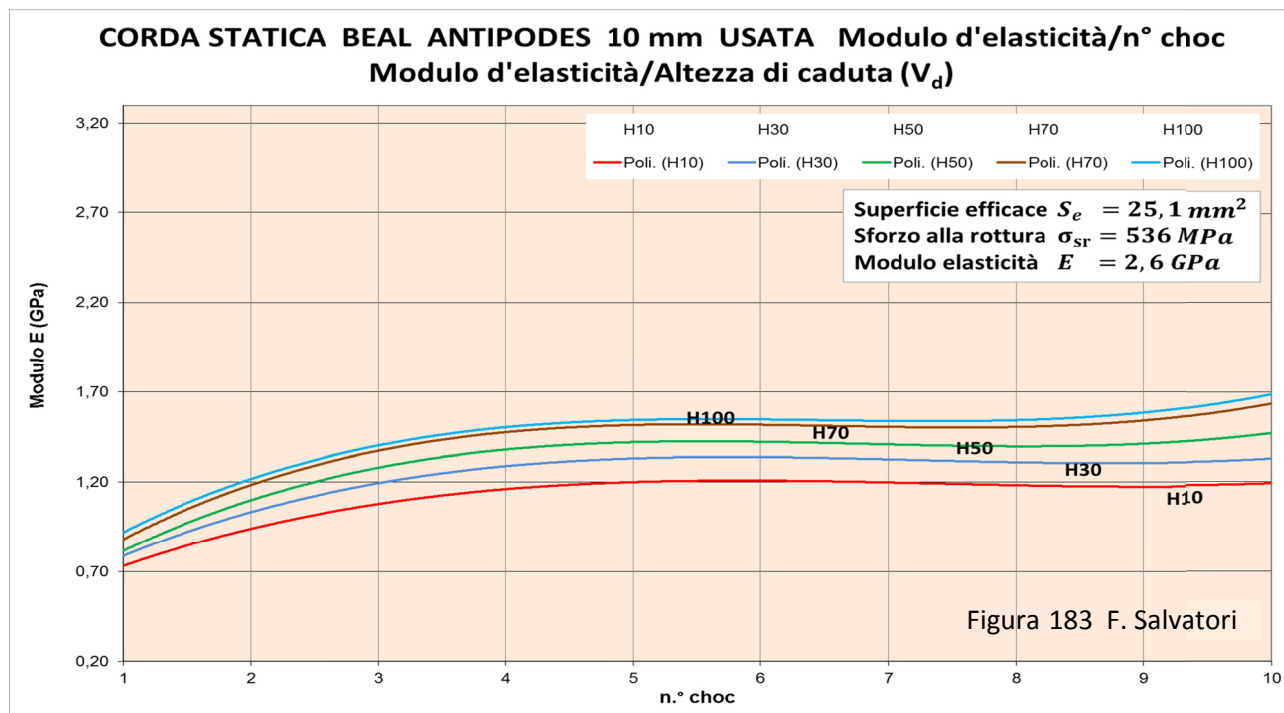
Questo significa, come già detto parzialmente, che la Compattazione della Struttura Complessa della Corda non reagisce sempre con la stessa intensità. Inizialmente le deformazioni che subisce sono in gran parte irreversibili (sottraendo capacità d'assorbire energia); irreversibilità che successivamente 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  $E$  è verosimilmente 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 Punto.

Da notare che - e non poteva essere altrimenti - l'andamento delle curve  $E = f(n^{\circ}choc)$  è inverso rispetto a quello delle curve  $\%Dissipazione = f(n^{\circ}choc)$ ,  $A_0 = f(n^{\circ}choc)$ ,  $tang \delta = f(n^{\circ}choc)$ .

**10.e.g.1.2) 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 conferma 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.

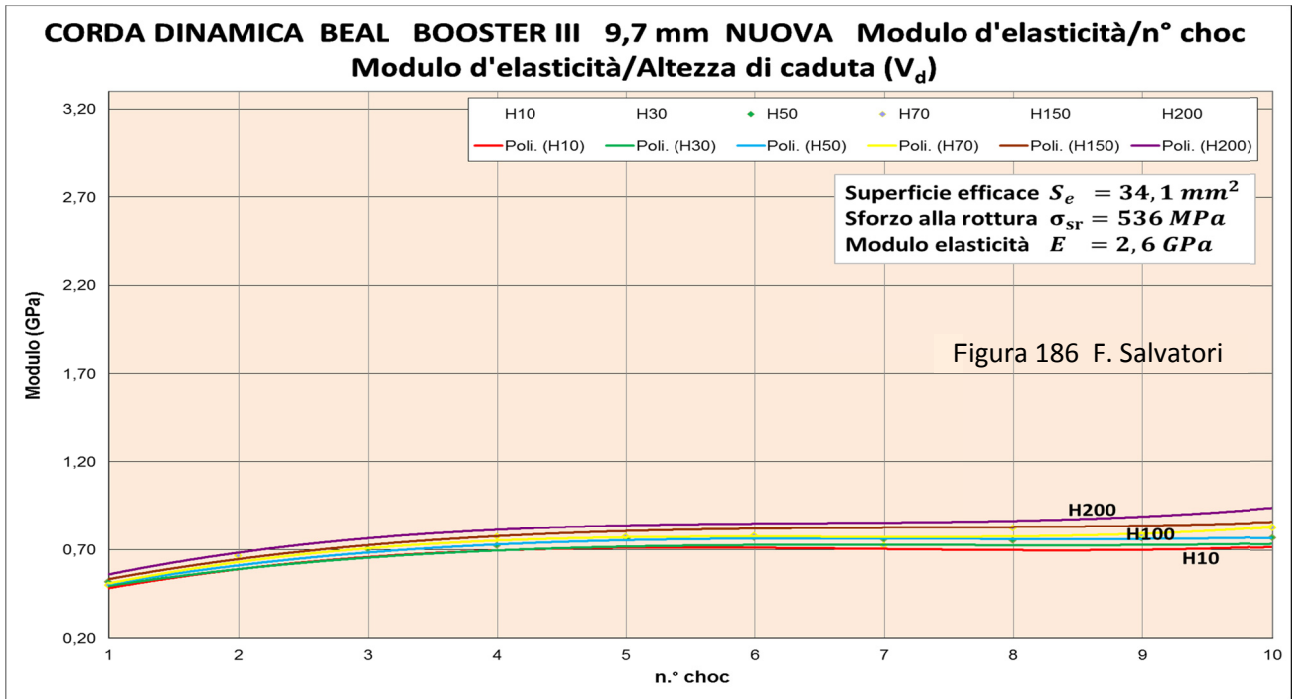
### **10.e.g.2) Analisi dei dati sperimentali ottenuti per la Corda dinamica Beal Booster III nuova Nylon 6 e confronto con la Corda statica Beal Antipodes nuova Nylon 6**

Nella Figura 186 vengono riportate le curve  $E = f(n^{\circ}choc)$  relative alla corda dinamica Beal Booster III nuova.

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

**10.e.g.2.1) 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.



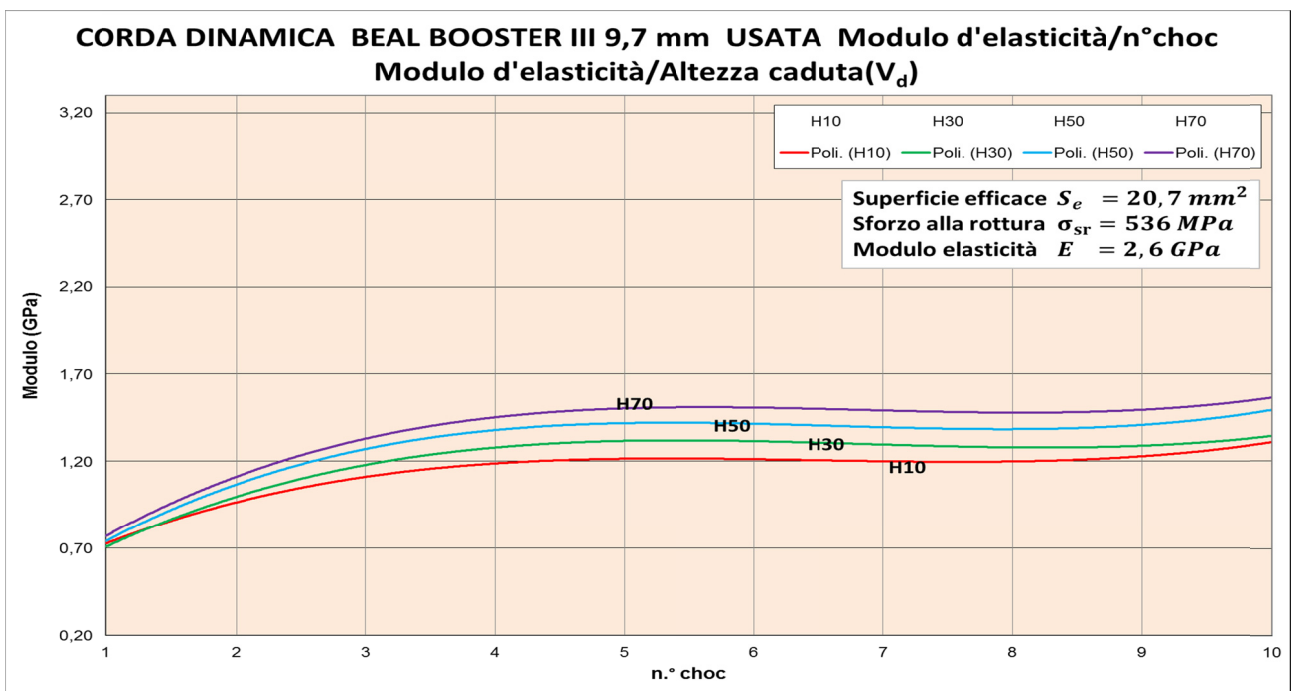
Valore percentuale, questo, compatibile con quanto calcolato sulla base delle misurazioni ottenute per gli Allungamenti massimi.

Da questo speculare 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.

**10.e.g.2.2) 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** (pag. 230, 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.

### **10.f) Valutazione delle variazioni della Superficie efficace $S_e$ in funzione del Numero di choc $n^\circ \text{ choc}$ e della Velocità di deformazione $V_d$**

#### **10.f.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)

$\rho$  = densità del filo elementare ( $\text{g/cm}^3$ )

La Tenacità è una caratteristica meccanica 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 (pag. 61 e seg., **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.

### 10.f.b) Condizioni sperimentali

Le corde sono state sottoposte a test del tutto uguali a quelli che hanno portato all'elaborazione di tutti 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 nei **Punti 10.c.a.2 – 10.c.a.3 – 10.c.a.4 – 10.c.a.5** (pag. 411 e seg.).

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  $S_e$ .

### 10.f.c) Analisi dei dati sperimentali ottenuti con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm Nylon 6, nuova e usata

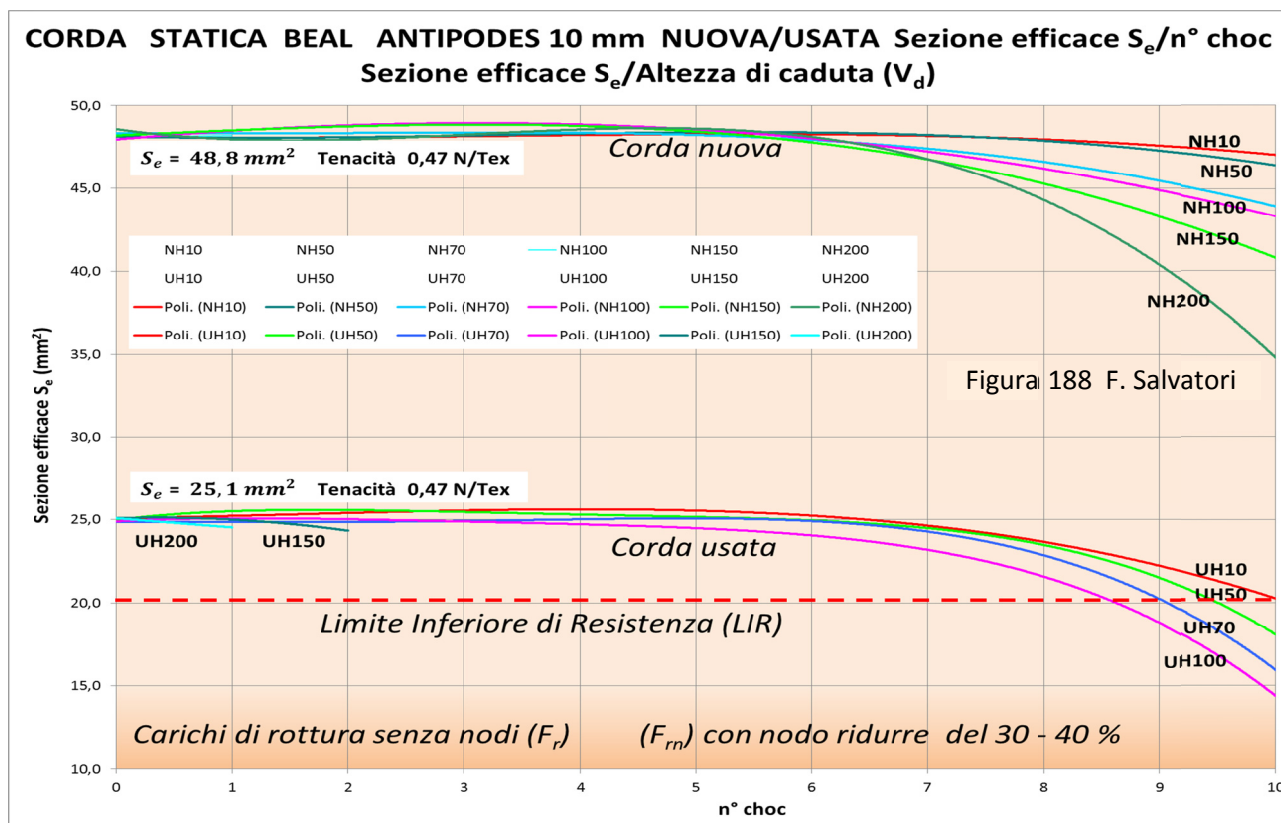
Nella **Figura 188** sono esposti i diagrammi relativi a questa corda, nuova e usata, dove risulta, per prima cosa, che la corda ha perso quasi il 50 % del suo materiale polimerico per l'uso fattone in grotta (più di due anni intensi d'utilizzo).

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 sopradette.



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 %.

**10.f.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.

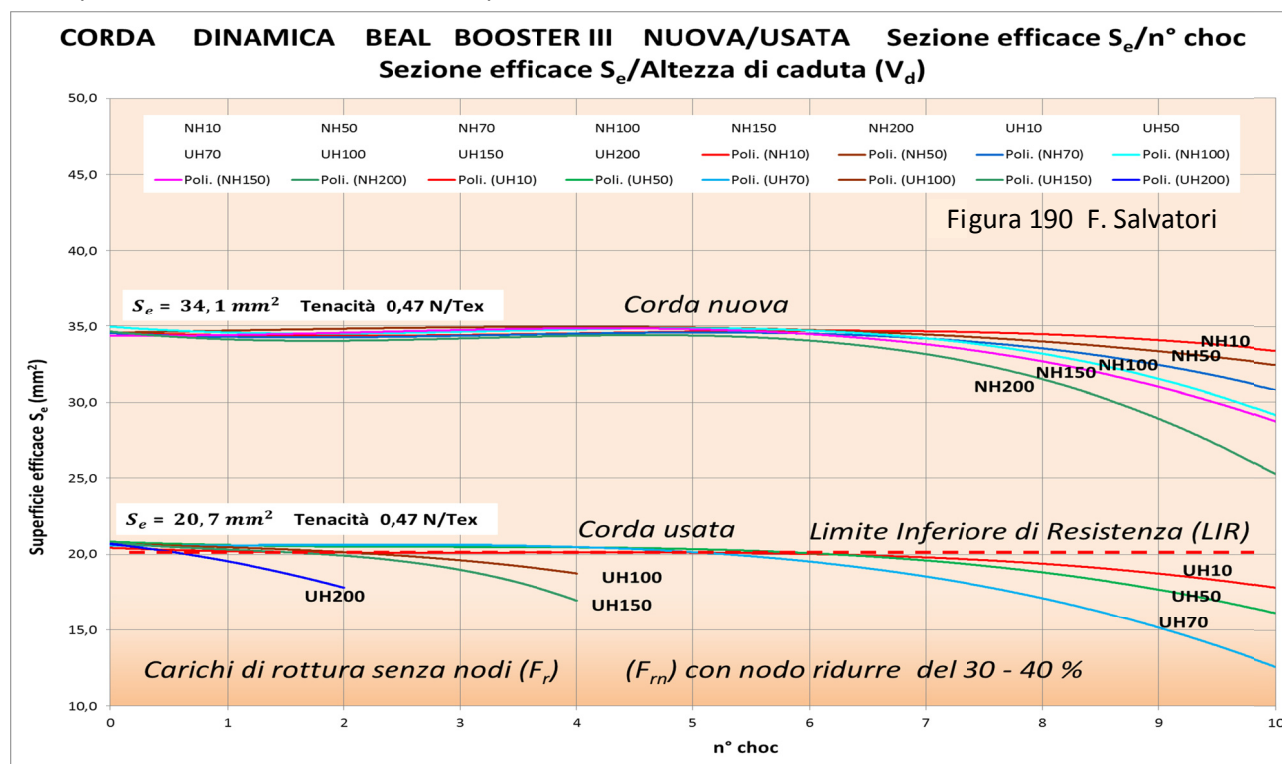
Prima il carico di rottura non risente degli choc e si mantiene costante; ma a un valore **ben al di sopra del LIR**. E' quindi chiaro che l' "invecchiamento" per choc successivi, se limitato ai primi 5-6 choc comporta solo una perdita di deformabilità nella CSCC e nella visco-elasticità, ma non nella tenuta alla rottura.

**10.f.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.

### 10.f.d) 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.



**10.f.d.1.) Prima considerazione: proprietà meccaniche peggiori per la 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.

Adirittura 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:

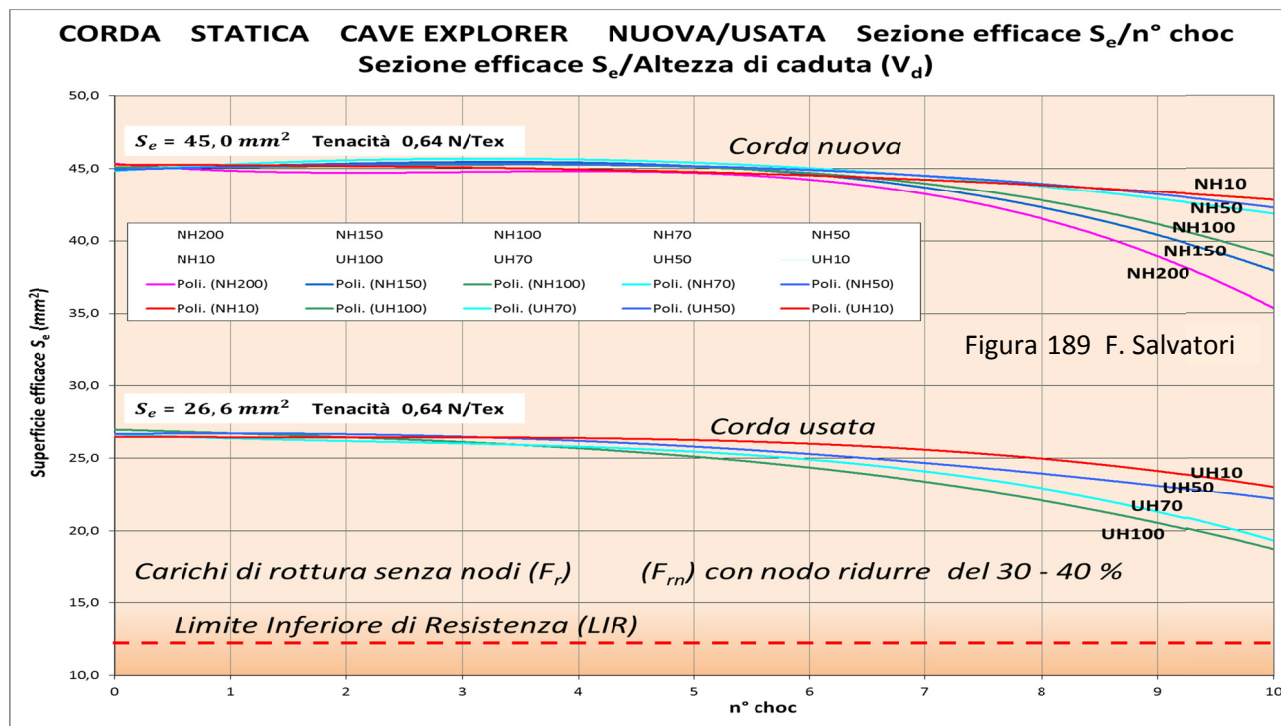
1. con la corda nuova, al termine della serie di choc, con le altezze di caduta del peso più elevate, le curve  $S_e = f(n^\circ \text{ choc})$  si avvicinano alla linea tratteggiata del LIR;
2. con la corda usata le curve  $S_e = f(n^\circ \text{ choc})$  coincidono addirittura con la linea tratteggiata 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.

### 10.f.e.) 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).

**10.f.e.1.) Prima considerazione: il Nylon 6.6 è migliore del Nylon 6** – L'effetto di decrescita nella parte finale delle curve  $S_e = f(n^\circ \text{ choc})$  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<sup>2</sup> e le curve della corda usata.

### 10.f.f.) Considerazioni di sintesi sulla diminuzione del Carico di rottura sottoposta a choc in successione con altezza di caduta del peso crescente

Le sollecitazioni ripetute tendono a ridurre gli effetti dissipatori e ammortizzanti delle corde, agendo sia sulla CSCC che sulla visco-elasticità.

Per una corda statica nuova, come la Beal Antipodes 10 mm, solo con l'ultima serie di choc con massima altezza di caduta del peso si raggiunge una situazione che intacca i valori di  $F_r$ , facendoli discendere. Ma solo con una corda usata si raggiungono misure inferiori al LIR.

La situazione peggiora drasticamente con corde dinamiche come la Beal Booster III 9,7 mm. Mentre la corde in Nylon 6.6 appare come la migliore.

# I CORDINI

## 11. Caratteristiche, proprietà e funzioni di un cordino speleo-alpinistico

### 11.a) Premessa

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 **Parte VI** (pag. 174 e seg.) abbiamo analizzato 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, nella **Parte VII** (pag. 242 e seg.), che qui sintetizziamo e semplifichiamo, sono esposte le tabelle sulle proprietà meccaniche/termiche e si valutano i risultati sperimentali 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.

### 11.b) Proprietà meccaniche e termiche dei cordini

Nelle Tabelle di pag. 242 e seg. sono inseriti nel dettaglio le **caratteristiche meccaniche e termiche** dei cordini **Beal Nylon 5,5 mm**, **Repetto Dyneema 5,5 mm**, **Repetto Dyneema 8,0 mm**, **Kevlar 5,5 mm**, tutti in condizioni nuovi e asciutti. È riportata anche la tabella della corda Beal Antipodes 10 mm nuova, utilizzata per confronti.

### 11.c) 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 (e fettucce) 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.

#### 11.c.a) Il Dyneema, fibra di polietilene

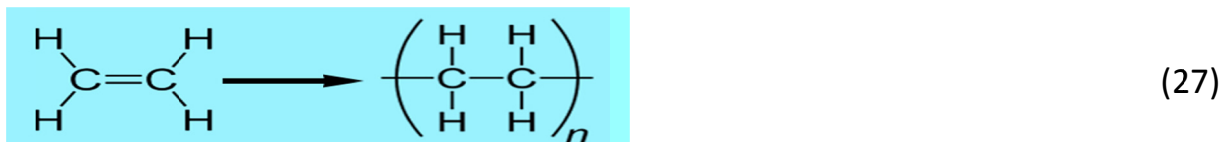
La sua unica pecca, se così si può dire, è la temperatura di fusione, **relativamente bassa (150°C)**, che la espone negativamente a tutto ciò che è legato alla produzione di calore. Ma dato l'uso che se ne fa - senza produzione d'attriti fra i componenti della struttura complessa del cordino e con i 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 %** (pag. 242).

Contrariamente al Nylon e al Kevlar, il Dyneema è una fibra **non igroscopica**, e quindi 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, perché rigide come l'acciaio e non degradabili nel contatto con l'acqua marina.

Pertanto il Dyneema è una fibra artificiale adatta all'ambiente grotta e, inoltre, resiste agli acidi (anche l'acido solforico e nitrico), alle basi (come nell'ambiente grotta) 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**.

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).

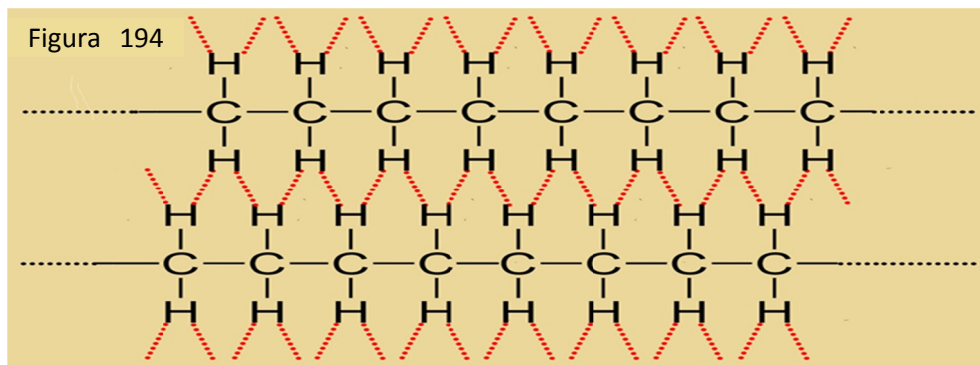
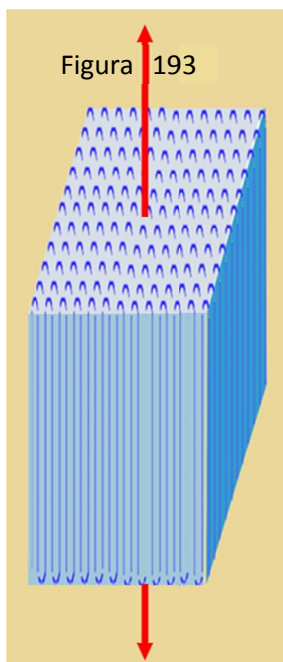
Infatti, come è ben evidente dal grafico di **Figura 73** (pag. 81) dove è rappresentata la curva **Sforzo alla rottura** dei fili di Nylon 6.6 in funzione del **Peso molecolare** (numerico) della poliammide (in questo caso limitato a un massimo di 12.000). La curva è valida anche per il Dyneema e, se estrapolata fino all'ascissa 100.000, suggerisce a quale valore di  $\sigma_r$  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. Il Dyneema è una fibra adatta a sopportare l'attrito volante (carrucola).



### 11.c.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).

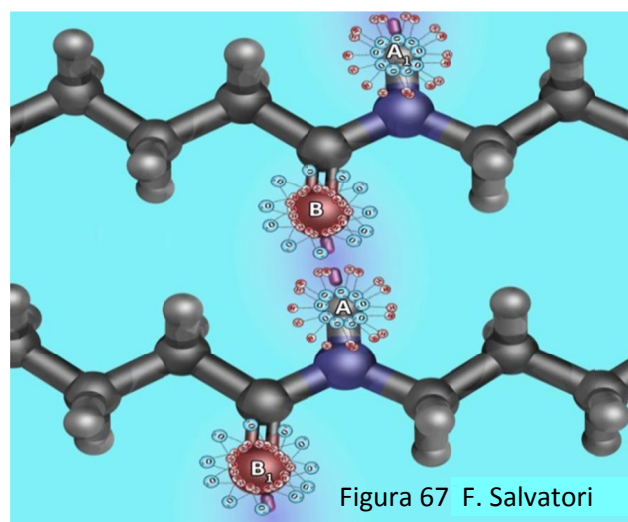
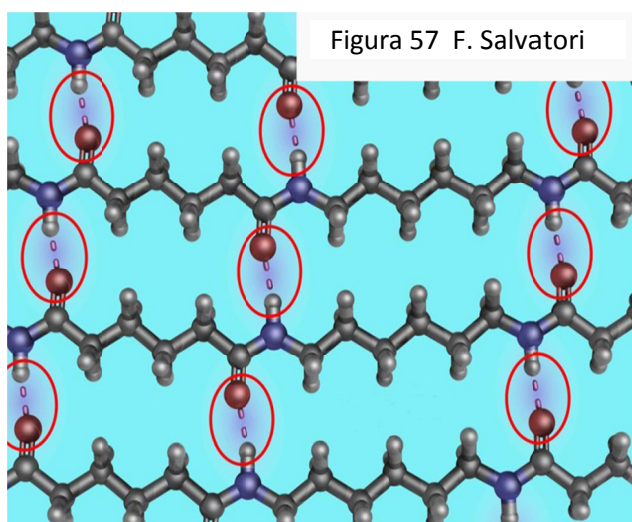
Il Kevlar ha un carico di rottura leggermente inferiore al Dyneema (la Tenacità del primo è **2,03 N/Tex**, del secondo **2,80 N/Tex**; mentre quella del Nylon 6 è **0,47 N/Tex**). Il Dyneema è molto più rigido, con un Modulo d'elasticità pari a **142 GPa** contro **72 GPa** del Kevlar.

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.

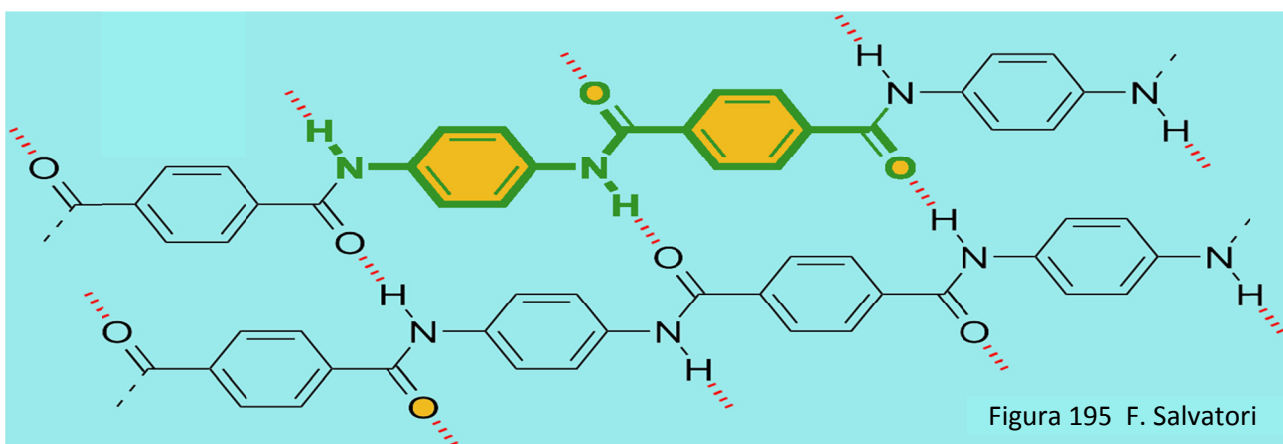
Di particolare rilievo è il fatto che il **Kevlar è igroscopico**, e quindi subisce un processo di aumento della viscosità, assorbendo acqua fino al 3 % in peso con U.R. al 55 % (nel Nylon 6, più igroscopico del Nylon 6.6 perché con zone amorphe più estese, la percentuale è del 5 % in peso con lo stesso 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 **fili 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 (**Figura 195**) ripete nelle caratteristiche principali quanto riscontrabile nelle catene dei fili elementari di Nylon: anche nelle strutture polimeriche dei fili 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:

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;

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 diminuire 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. Il Kevlar è un polimero poco affine all'attrito prodotto da un rotolamento su carrucola.

## 12. TEST QUASI-STATICI E A CADUTA: Cordini nuovi di Dyneema, Kevlar e Nylon 6; analisi dei risultati sperimentali e confronto con la corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova

### 12.a) Condizioni sperimentali

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 (pag. 21 e seg.)** e nella **Parte II (pag. 39 e seg.)**.

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).

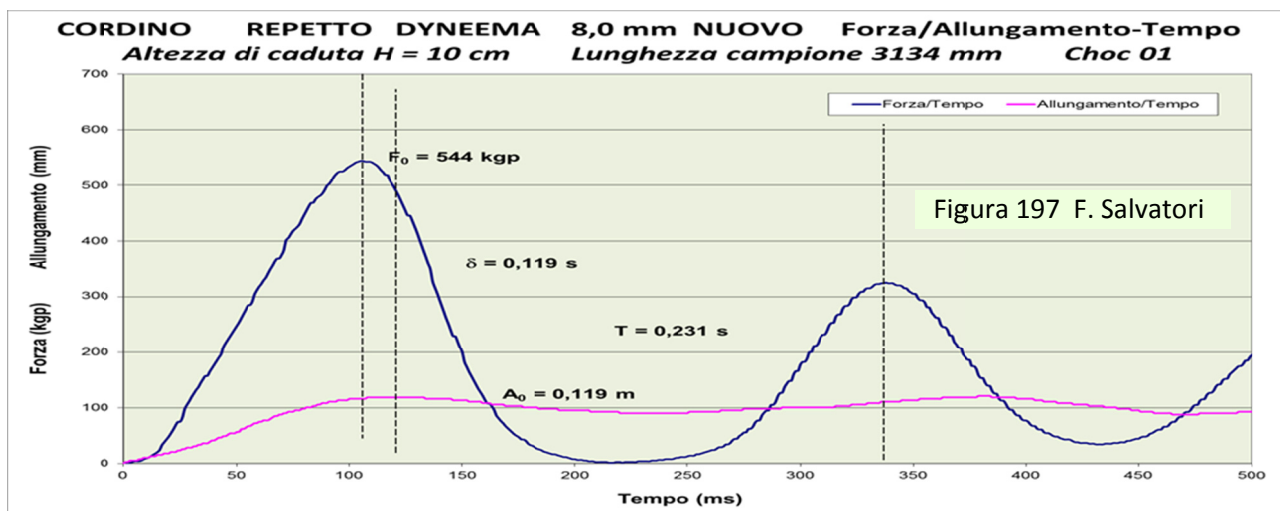
I test a caduta sono stati effettuati in funzione:

1. del n° degli choc applicati,

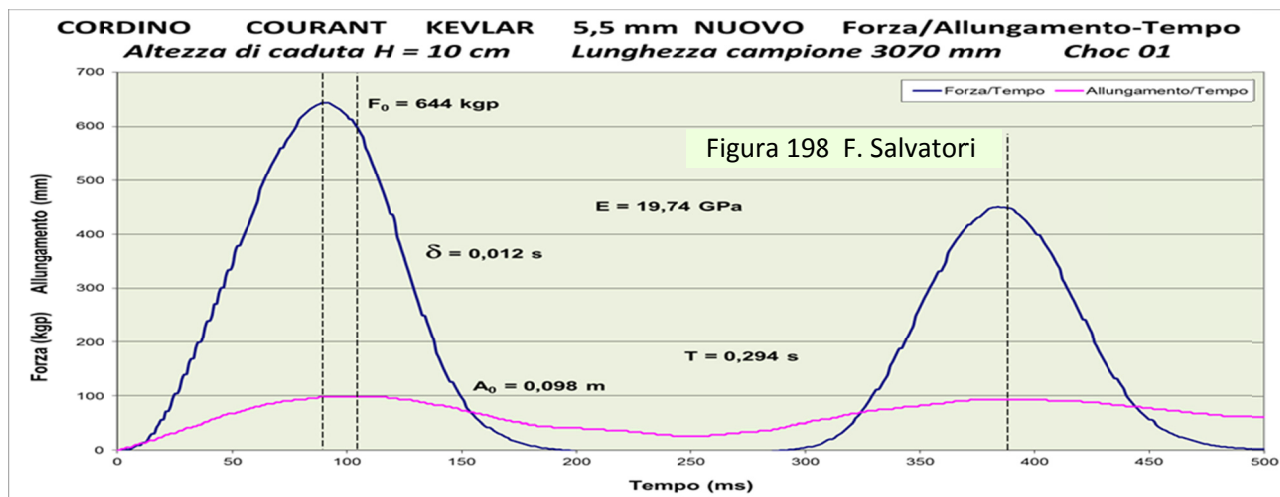
2. del tipo di materiale che compone i fili elementari (aramide, polietilene, poliammide),
3. del diametro degli stessi cordini.

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  $\delta$ ).



Infatti sono stati costruiti i grafici riportati nelle **Figure 197 – 198** (pag. 248) 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)**.



Nei grafici delle **Figure 197 – 198** sono evidenti tutti gli elementi tipici della visco-elasticità, soprattutto il ritardo  $\delta$  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  $\delta$  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  $\eta$ .

Replichiamo qui l'elencazione dei parametri che possono essere ricavati e utilizzati per le analisi, validi per le corde come per i cordini:

6. **Caratteristiche meccaniche e geometriche** (pag. 28 e seg.)
  - 6.1. Forza alla rottura senza nodi  $F_r$
  - 6.2. Tenacità  $\delta_{sr}$  (o Sforzo a rottura)
  - 6.3. Superficie efficace  $S_e$
7. **Parametri elasticità** (pag. 45, Figura 37)
  - 7.1. Modulo d'elasticità  $E$
8. **Parametri velocità di trazione** (pag. 52, Relazione 15)
  - 8.1. Velocità di deformazione  $V_d$
9. **Parametri forme d'energia** (pag. 45, Figura 37)
  - 9.1. Energia prodotta dalla caduta fino al massimo allungamento  $\Delta L_{carico}$
  - 9.2. Energia restituita per effetto della reazione alle deformazioni elastiche reversibili  $\Delta L_{scarico}$
  - 9.3. Energia dissipata  $\Delta L_{dissipazione}$  ( $\Delta L_{carico} - \Delta L_{scarico}$ )
  - 9.4. Percentuale di dissipazione  $\%_{dissipazione}$   $[(\Delta L_{dissipazione}/\Delta L_{carico}) \times 100]$
  - 9.5. Energia dissipata in calore per attrito  $\Delta L_{attrito}$  ( $\Delta L_{caduta+allungamento} - \Delta L_{carico}$ )
10. **Parametri decadimento visco-elastico (Analisi Dinamica Meccanica)** (pag. 47 e seg.)
  - 10.1. Tempo di ritardo  $\delta_{tempo}$
  - 10.2. Periodo  $T$
  - 10.3. Modulo complesso  $E^*$
  - 10.4. Modulo elastico  $E'$
  - 10.5. Modulo viscoso  $E''$
  - 10.6. Rapporto di dissipazione viscoso  $\tan \delta = E'/E''$
  - 10.7. Coefficiente di viscosità  $\eta = E''/\omega$

I grafici che seguono 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.

## **12.b) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 8 mm nuova**

### **12.b.a) Variazione del Modulo d'elasticità in funzione del n° degli choc e confronto con la Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova**

**12.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  $\eta$ , 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:

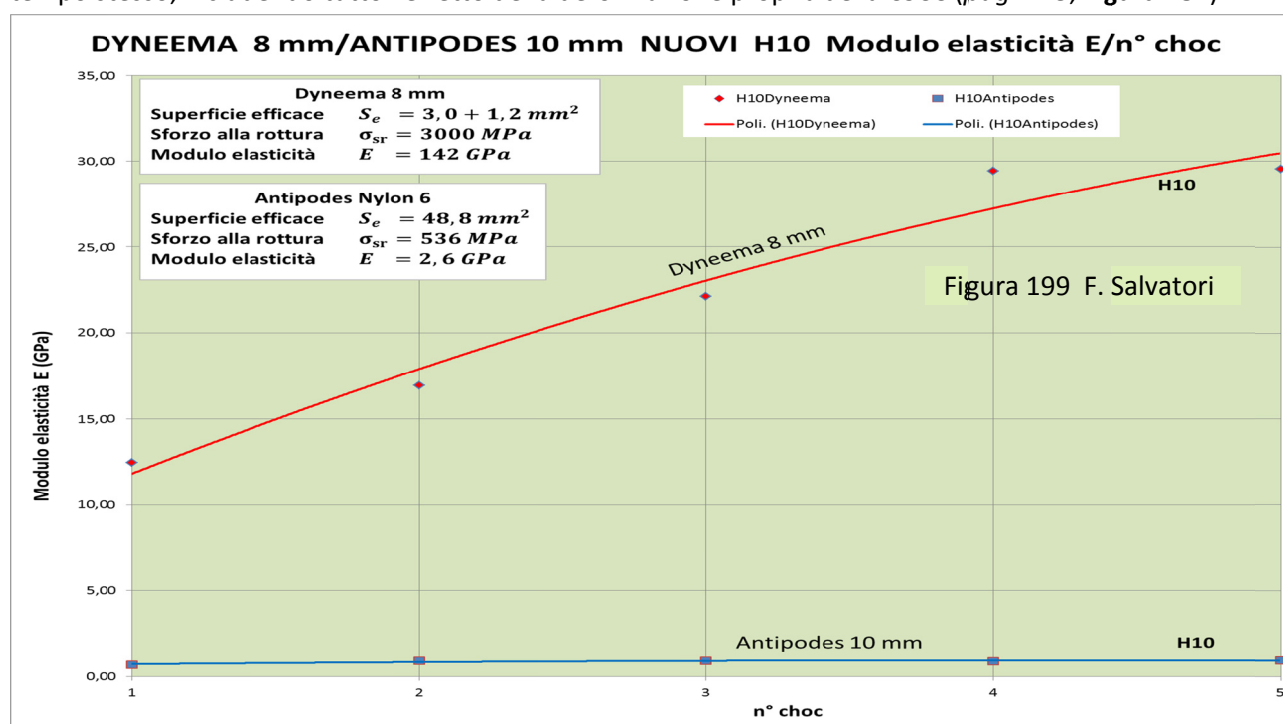
1. la CSCC, che qui ovviamente si riferisce a un Cordino, e coinvolge un solo trefolo e la calza,
2. le deformazioni legate alla visco-elasticità dei fili elementari di Dyneema, che sottostanno nei loro movimenti agli **attriti** fra catene di macromolecole e sono presenti tanto nei settori amorfi quanto nei cristallini,
3. lo snervamento e la rottura dei fili elementari.

Un quarto modo di dissipazione può essere teoricamente considerato: il calore prodotto per l'attrito fra i componenti del cordino (calza + trefolo+ fili elementari). Ma, essendo il Modulo d'elasticità definito solo con la pendenza iniziale delle curve  $F = f(A)$  (pag. 228, **Figura 181**), 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. Il Modulo d'elasticità è infatti per la quasi totalità legato alla CSCC e alle prime deformazioni visco- elastiche. Del resto la quota dissipativa **% Calore** risulta, sperimentalmente, per i cordini ad altissima tenacità, del tutto trascurabile.

Altro aspetto interpretativo dell'andamento delle curve da ricordare: 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  $E = f(n^{\circ} choc)$  ne risentirebbe, mostrando delle brusche flessioni in corrispondenza dello choc successivo all'evento degradante chimico-fisico. Stessa considerazione se si verificassero cedimenti dei fili elementari.

**12.b.a.2) Premessa** - 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 (pag. 228, **Figura 181**).



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).

Anche nella corda Beal Antipodes 10 mm statica nuova e asciutta il **ripetersi delle sollecitazioni a caduta** produce un graduale incremento del Modulo d'elasticità, non percettibile data la scala delle ordinate 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** (*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).

**12.b.a.4) Seconda considerazione: confronto fra la dislocazione delle curve  $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$  della Corda e del Cordino; inadeguatezza del cordino Dyneema 8 mm a sopportare carichi istantanei a grande contenuto energetico e applicati ad alta Velocità di deformazione** - 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** (leggi Tenacità) 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 ( $12 \text{ mm}^2$ ) e della Corda ( $48,8 \text{ mm}^2$ ), 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 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 idrorepulsione) 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 un **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 negli ultimi paragrafi di questo capitolo "I Cordini".

**12.b.a.5) Terza considerazione: valutazione fra l'andamento delle curve** - 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 cristallina 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 ogni test avviene con Velocità di deformazione costante (leggermente in diminuzione per il fatto che ad ogni choc il campione di corda aumenta di lunghezza). Quindi l'aumento di  $E$  è dovuto solo alla diminuzione di deformabilità che riscontra al successivo choc.

Pertanto, 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.

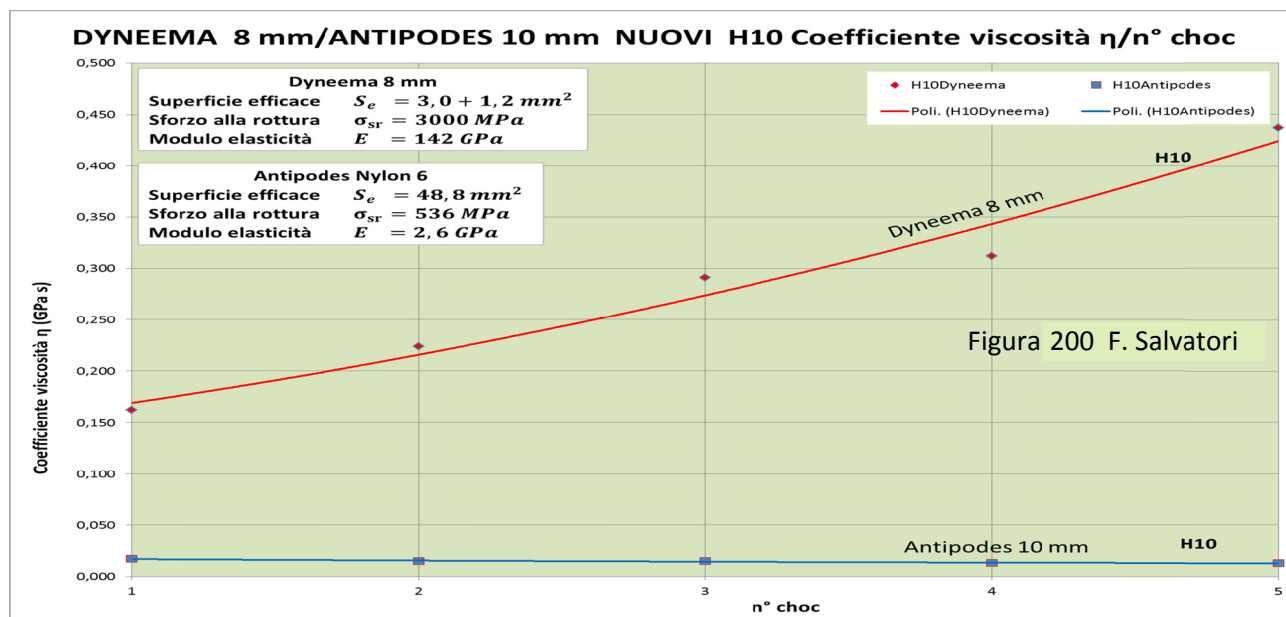
Per la CSCC l'analisi è presto fatta: esaurisce la sua influenza sin dai primissimi choc, avendo una rilevanza del tutto marginale nel comportamento dissipativo di un cordino con fibre ad altissima tenacità. Al massimo, con una sperimentazione più risolutiva, si nota un inizio della curva  $E = f(n^{\circ} \text{ choc})$  con una pendenza meno accentuata.

**Tutt'altra situazione si manifesta 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 (pag. 245, **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.

Per procedere nell'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  $\eta = f(n^{\circ} \text{ choc})$  (pag. 254, **Figura 200**).

E' evidente che il Coefficiente di viscosità  $\eta$  aumenta in modo costante; anzi aumentando, sia pur leggermente, il gradiente, ed è corretto concludere che l'aumento del Modulo  $E$  è interamente dovuto all'aumento del Grado di viscosità, e poco o nulla alla CSCC.

Il fenomeno che conta è dunque 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.

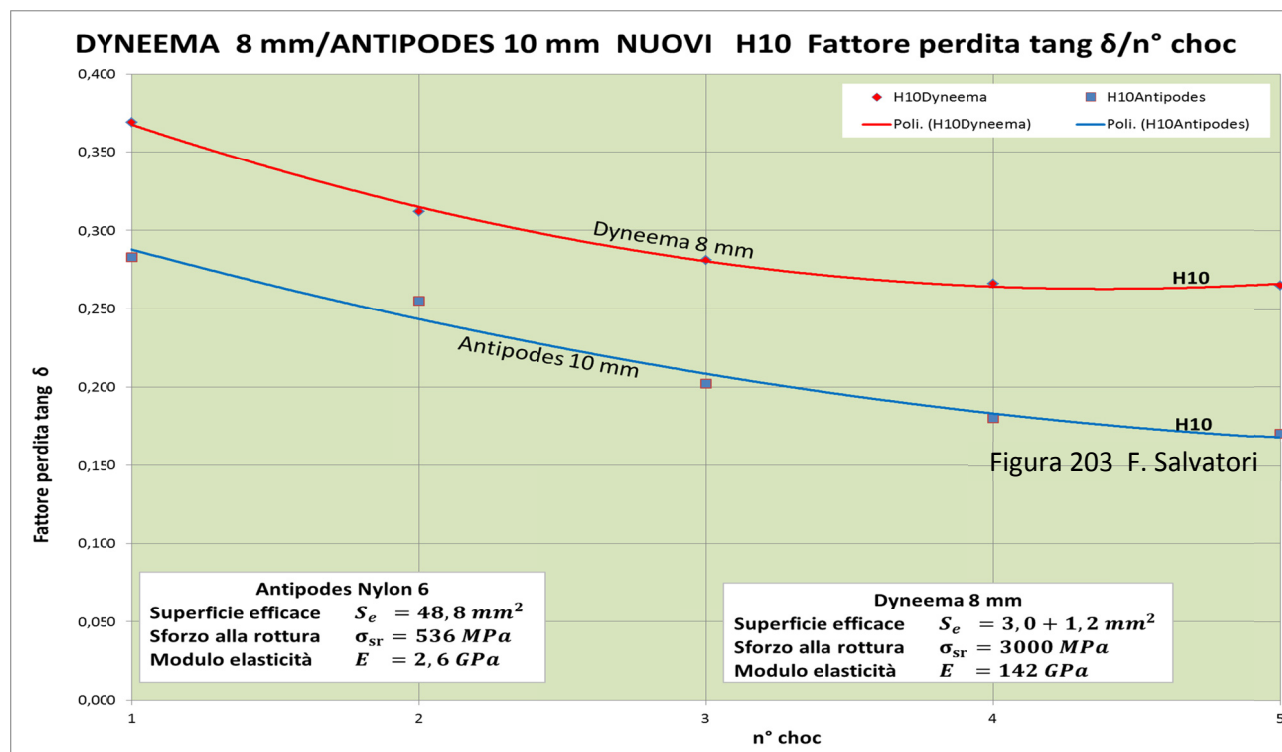


Come principio analitico di base, si tenga presente che la viscosità (irreversibile) compete **soprattutto ai settori amorfi** (come già più volte ricordato, le forze d'attrito che si oppongono al movimento caotico delle catene di polimeri sta alla base del comportamento viscoso dei materiali), mentre 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 alle sollecitazioni (pag. 254).

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.

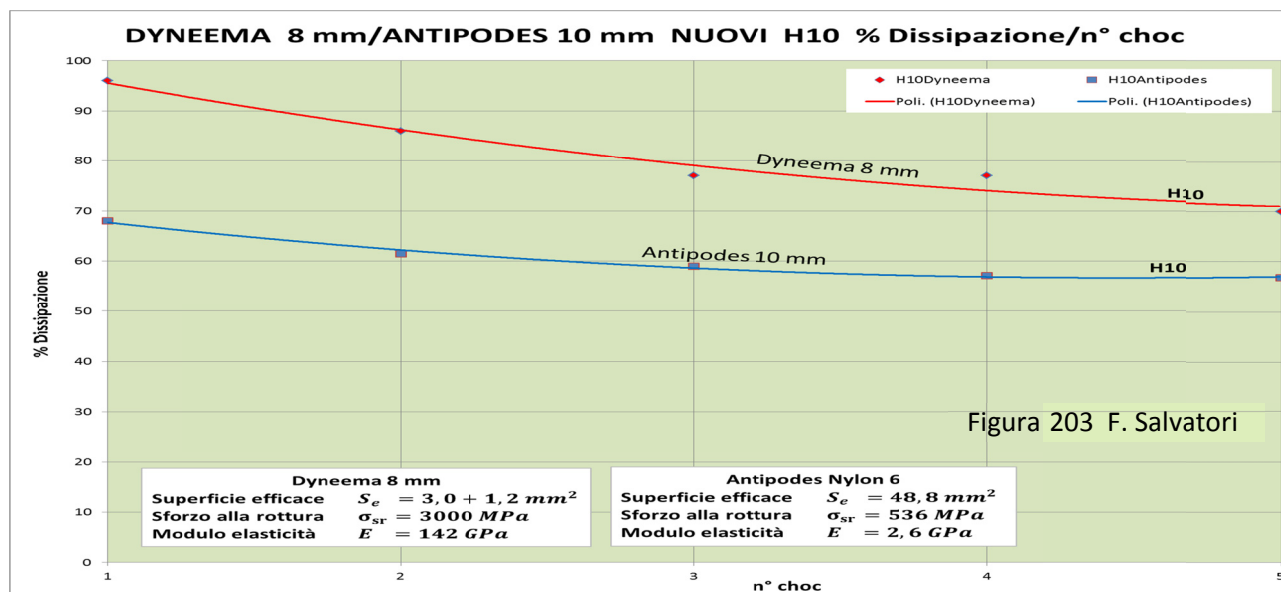
**Inoltre**, a conferma di quanto già elaborato, esaminiamo i dati ottenuti per il Fattore di perdita **tang  $\delta$**  (pag. 256, **Figura 202**), il quale, si ricorda, è una valutazione dell'entità delle sole trasformazioni irreversibili visco-elastiche: è evidente la coincidenza dell'andamento delle curve **tang  $\delta = f(n^\circ \text{ choc})$**  e  **$E = f(n^\circ \text{ choc})$** , dimostrando ancora una volta che la crescita di quest'ultima variabile dipendente e quasi interamente legata alle variazioni del grado di visco-elasticità.



Ma è anche molto evidente che il danno della successione degli choc è molto più marcato nel cordino con fibre polimeriche ad alta Tenacità rispetto a quelle come il Nylon 6 a bassa Tenacità. Il che vuol dire che le funi di Dyneema, se sottoposte alla tipica usura della progressione in grotta, hanno delle rapide degradazioni, **sconsigliandone l'uso speleologico classico**, dove le ripetute sollecitazioni sono blande, ma anche molto numerose.

**Infine**, esaminiamo i dati ottenuti per il fattore **% Dissipazione** (pag. 257, **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.

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 amorfe 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

È 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.

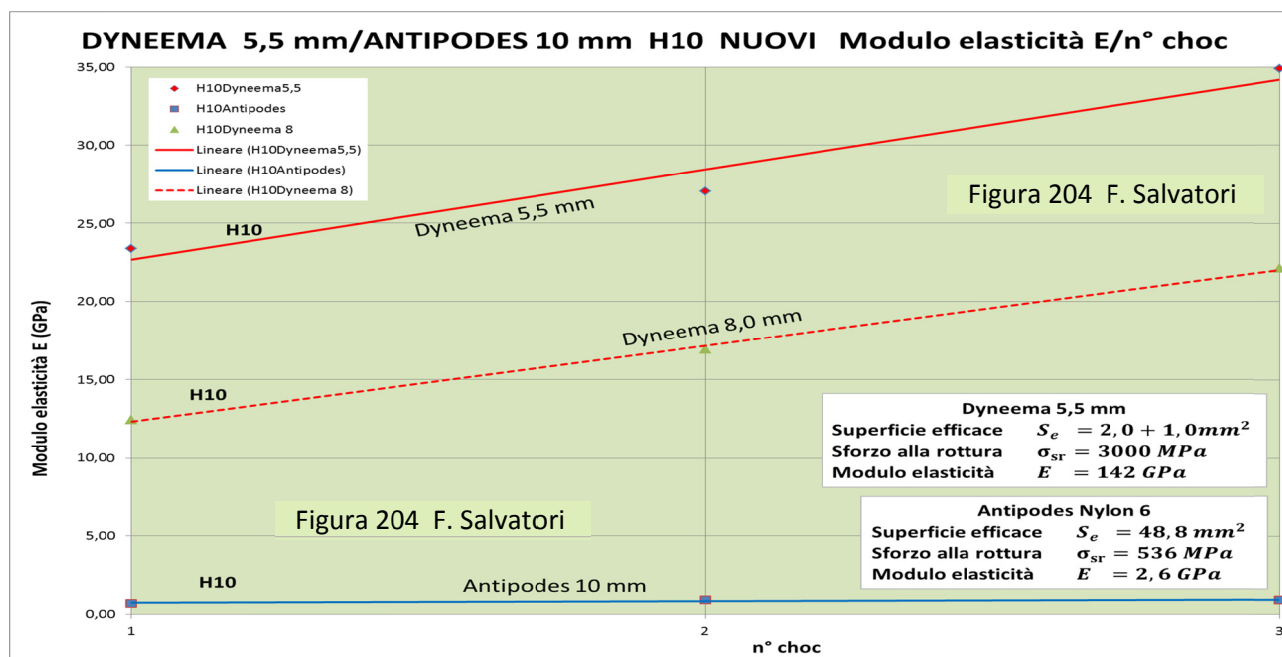
### **12.c) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Repetto Dyneema 5,5 mm nuovo: inaspettata maggiore rigidità, più rapido gradiente di decadimento e ruolo della CSCC e della visco-elasticità**

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.

### 12.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

**12.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).



**12.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	12,0 GPa iniziale	22,0 GPa finale
per il cordino Dyneema 5,5 mm	25,5 GPa iniziale	34,0 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  $\sigma_0$  e la Deformazione massima  $\epsilon_0$ , 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 tessitura 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):

<b>fili elementari Nylon 6 (corda Antipodes)</b>	<b>2,60 GPa</b>
<b>fili elementari Dyneema</b>	<b>142,0 GPa</b>
<b>fili elementari acciaio</b>	<b>100,0 GPa</b>

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.

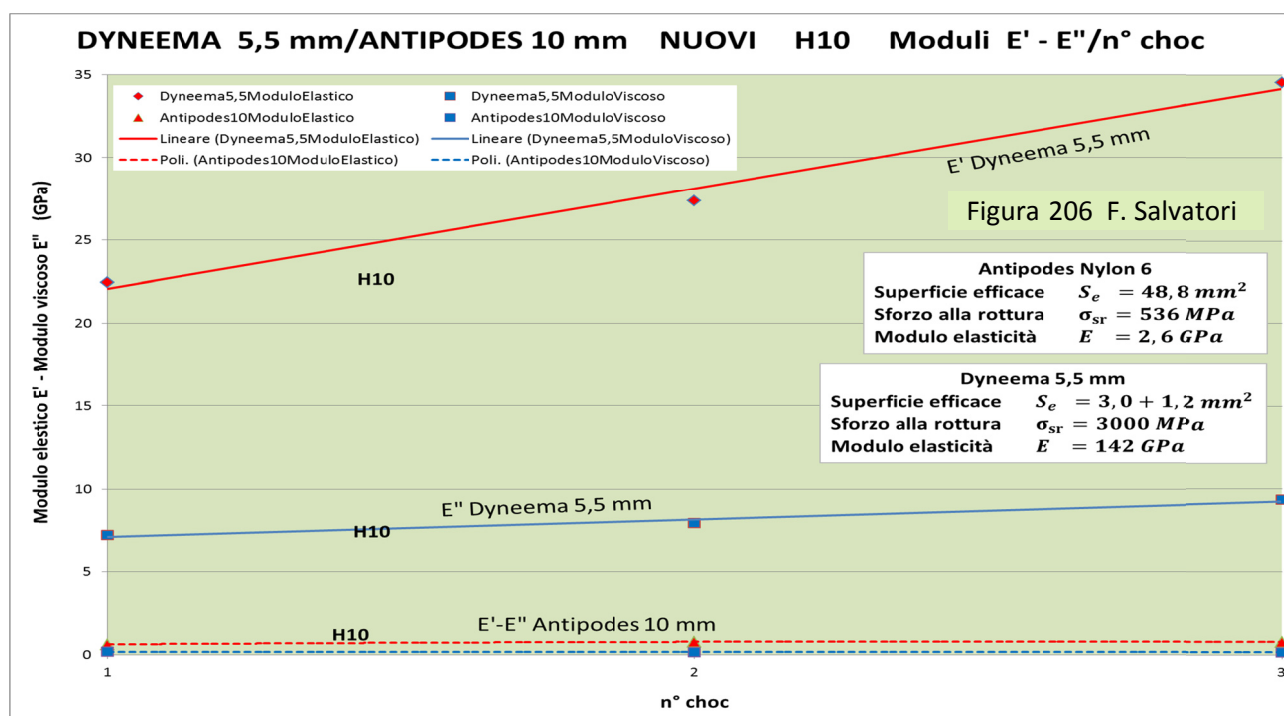
Infine, sintetizzando il significato di queste ultime considerazioni, risalta il ruolo della CSCC nel determinare la deformabilità di un Cordino (e ancor più di una Corda), sia pur **limitato all'effetto dei primi choc** (in questo caso solo tre), **entro i quali si esaurisce** la sua compattazione irreversibile.

### 12.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.

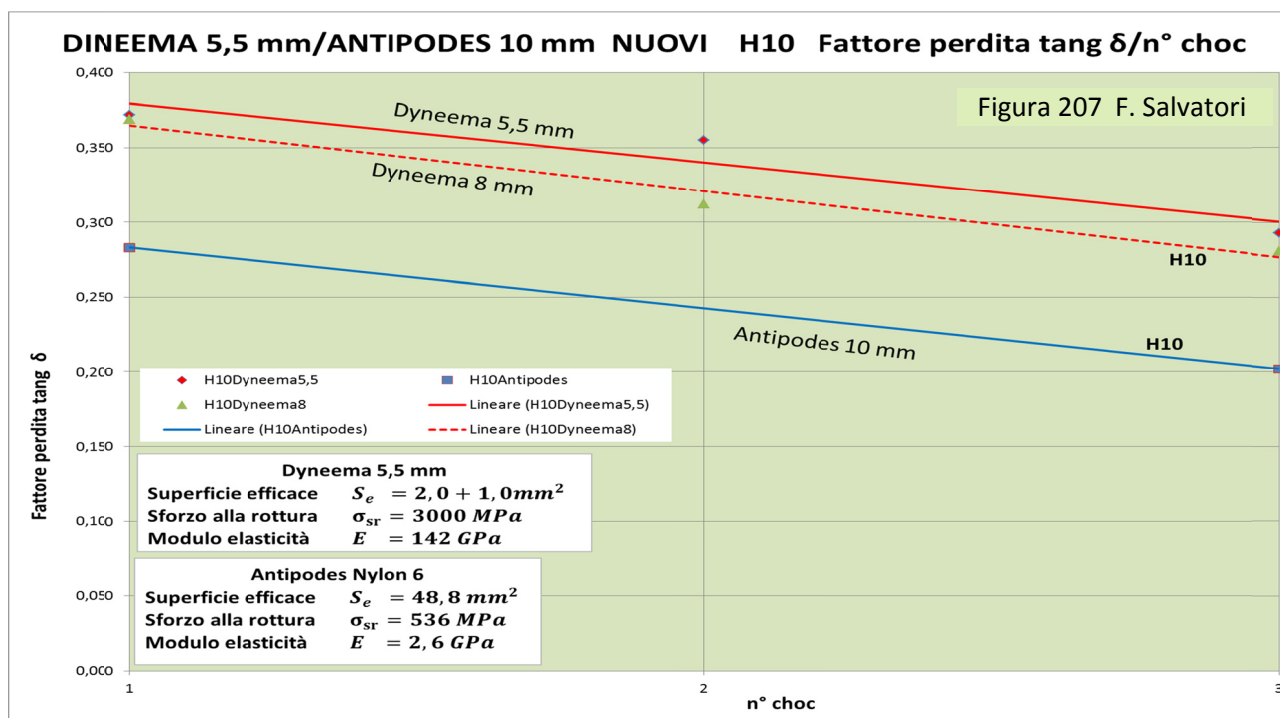
### 12.c.a.4) Terza considerazione: valutazione del rapporto fra le variazioni irreversibili di natura viscosa ed elastica

– 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  $E' = f(n^\circ \text{ choc})$  ed  $E'' = f(n^\circ \text{ choc})$ , rispettivamente Modulo elastico (conservativo) e Modulo viscoso (dissipativo), 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, quindi 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 viscosi. 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  $\text{tang } \delta$ , 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.

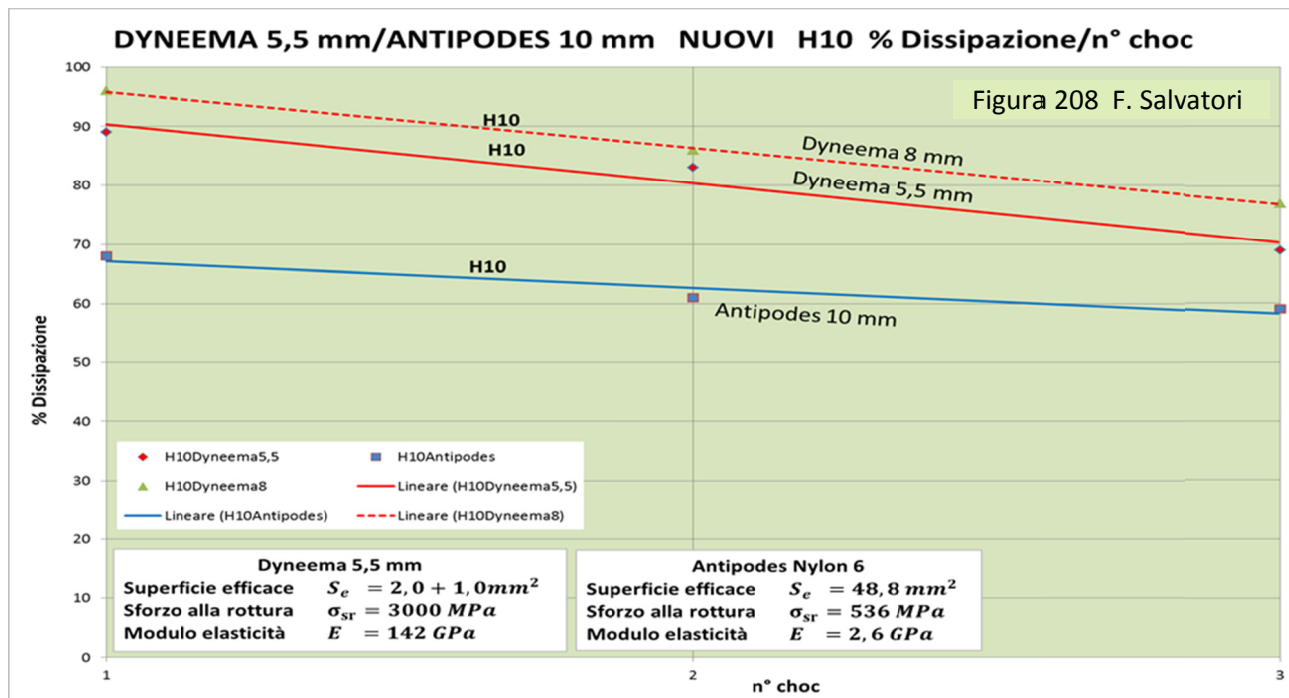
Comunque, entrambi i Cordini subiscono una perdita nel campo delle deformazioni visco-elastiche nettamente superiore a quella che patisce la Corda statica.

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 ( $F_r = 1473 \text{ kgp}$ ).

**12.c.a.5) Quarta considerazione: coincidenza dell'andamento e della dislocazione delle curve  $\text{tang } \delta = f(n^\circ \text{ choc})$  e  $\% \text{ Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$**  – In **Figura 208** le variazioni di  $\% \text{ Dissipazione}$ . Ricordando che questa variabile dipendente 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.

## 12.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).

### 12.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

**12.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!

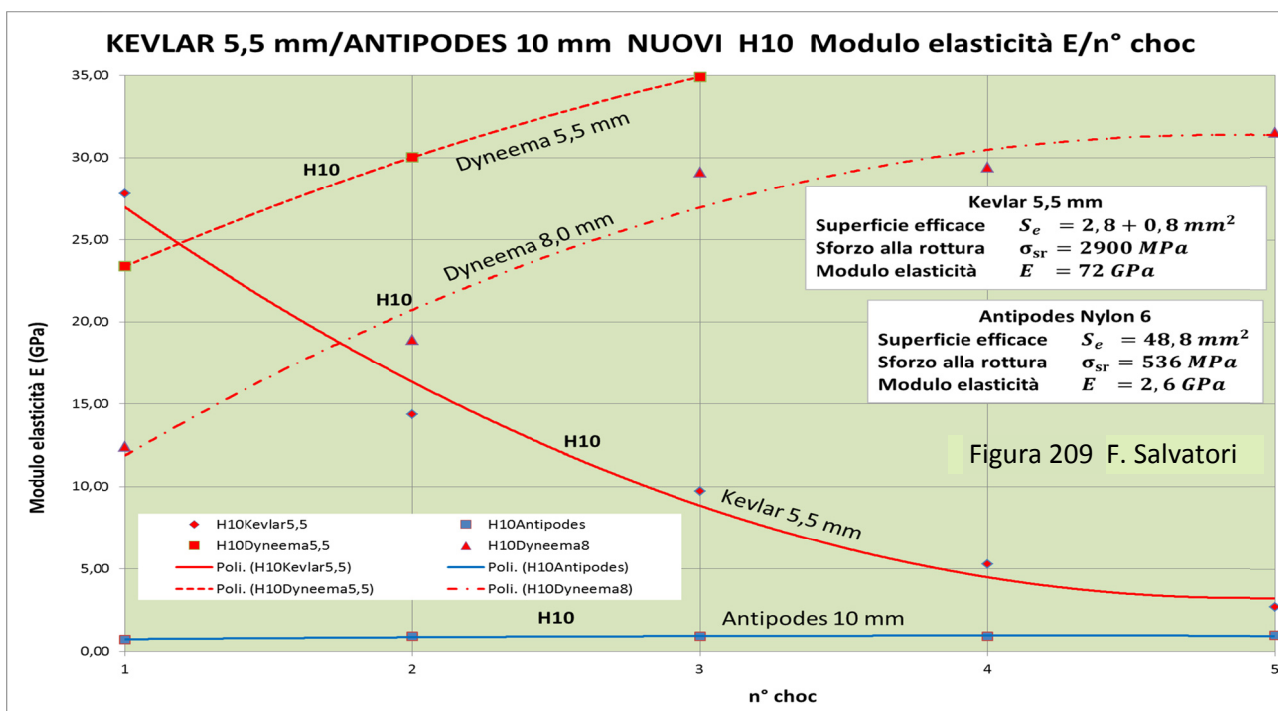
Altro aspetto che compromette la possibilità d'uso del Kevlar nella normale **progressione su corda in grotta** è la sua sensibilità alle variazioni del **pH**, variazioni sia al di sopra (basiche) che al di sotto (acide) dello zero, che portano comunque a una depolimerizzazione delle macromolecole e, 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).

**12.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

È 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.

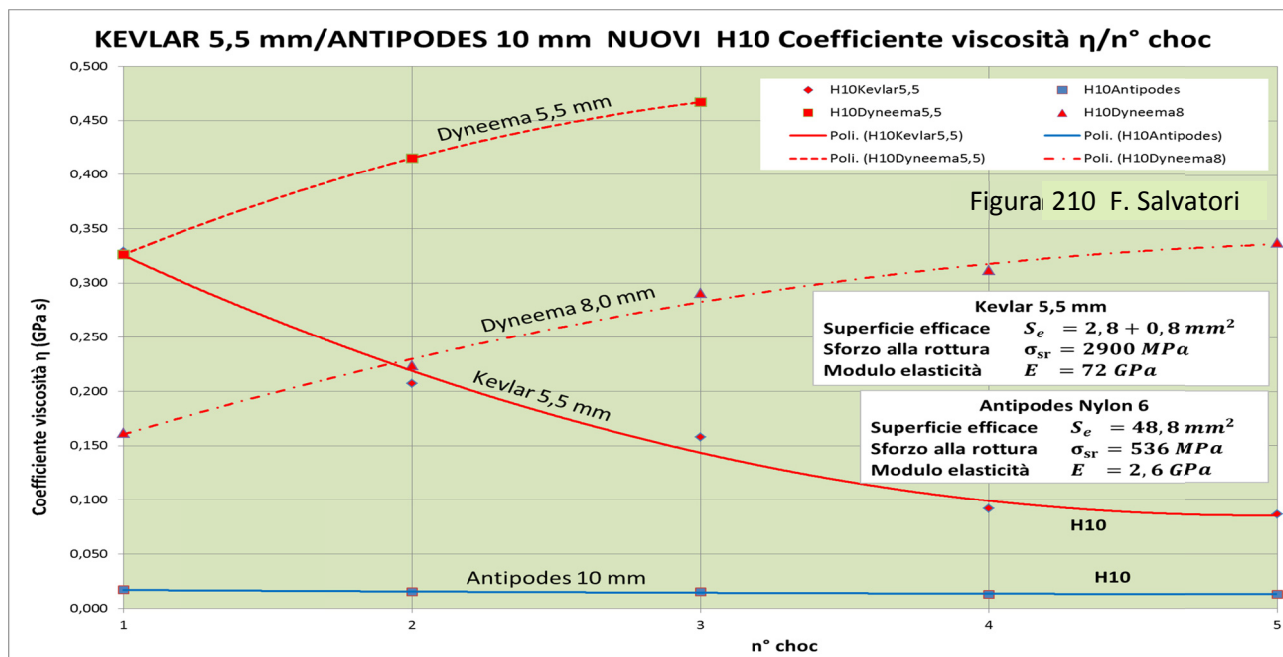
Inoltre, è di notevole rilievo, **e da spiegare**, perché il cordino Kevlar 5,5 mm è **più rigido del suo omologo in Dyneema**, quanto invece il filo elementare del primo è molto meno rigido del filo elementare del secondo (**72 GPa** contro **142 GPa**).

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.

**12.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**.



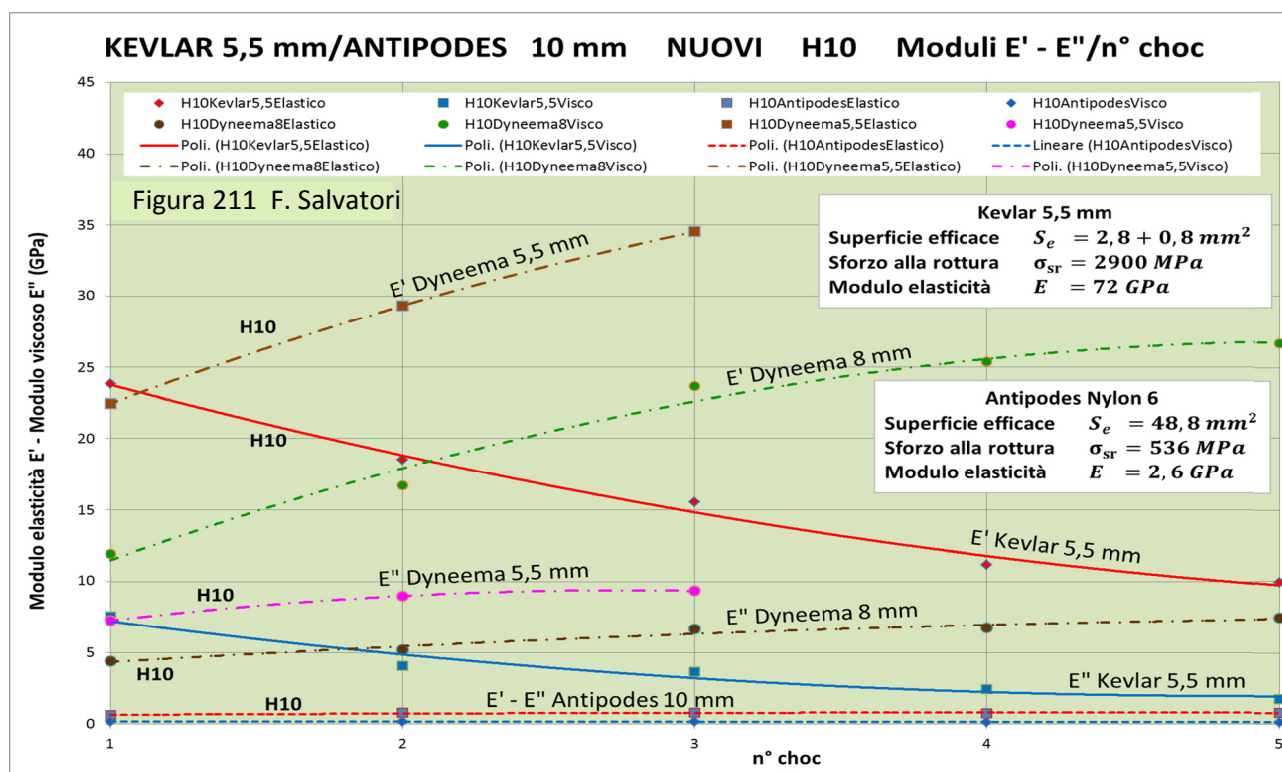
È dunque evidente che il Modulo  $E$  segue l'andamento del Coefficiente di viscosità  $\eta$ . Ne discende che, non potendo imputare alcun contributo alla CSCC del Cordino Kevlar, ciò che determina la deformabilità complessiva è solo conseguenza di quanto accade alla visco-elasticità; e in questo caso 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  $\delta$ , 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 amorfe. 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.

**12.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.

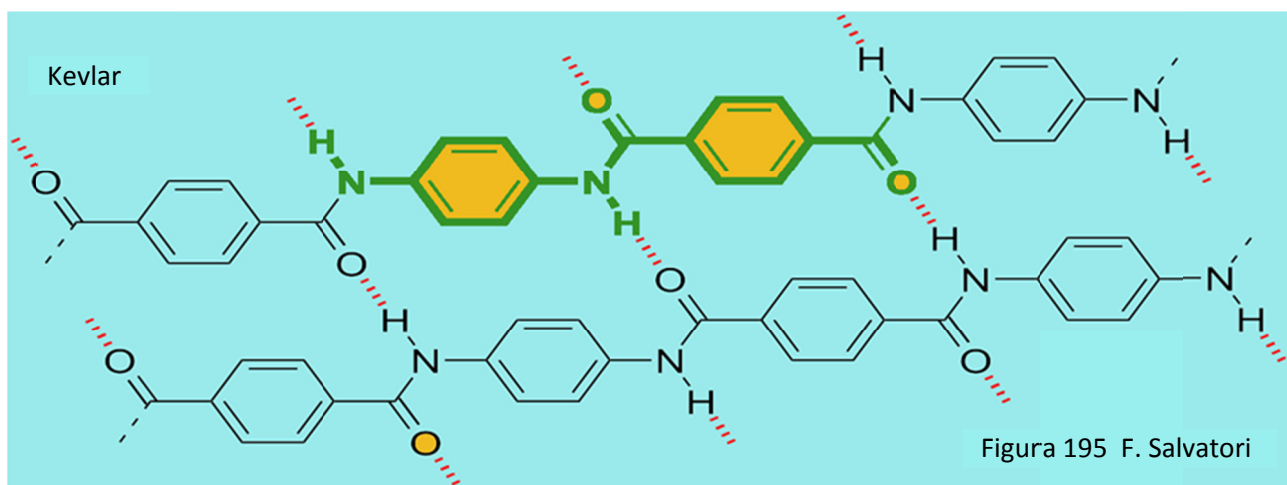
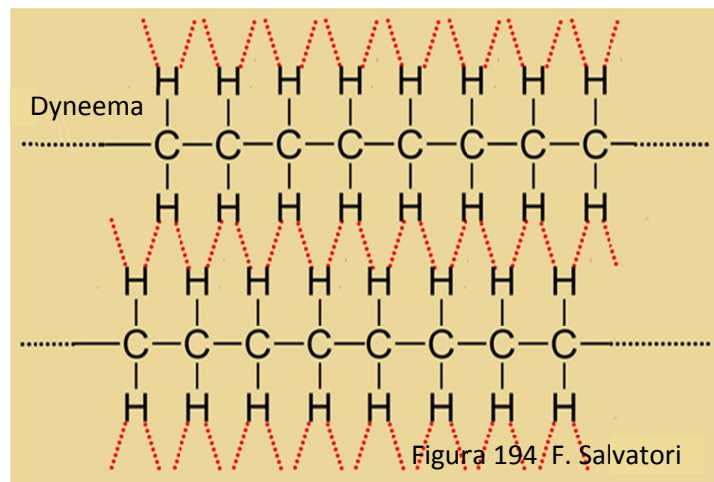
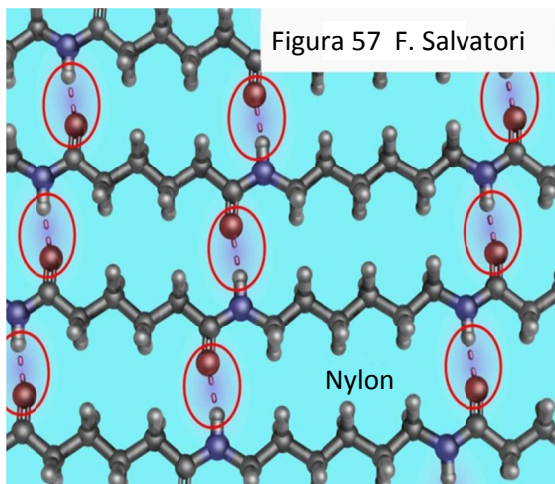


Al fine di individuare le diversità di comportamento fra fili elementari di Kevlar e Dyneema per effetto degli choc a caduta, sono disegnate, con linee variamente tratteggiate, anche le analoghe curve dei Cordini Dyneema 5,5 mm e Dyneema 8,0 mm

È 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  $\eta$ .

**12.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 il 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:

	<b>Fibra</b>	<b>Modulo elasticità E (GPa)</b>	<b>Sforzo spec. rottura <math>\sigma_{sr}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tenacità T (N/Tex)</b>
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 soprastante **Figura 211**.

**12.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.

**12.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 amorfe, 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.

**12.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].

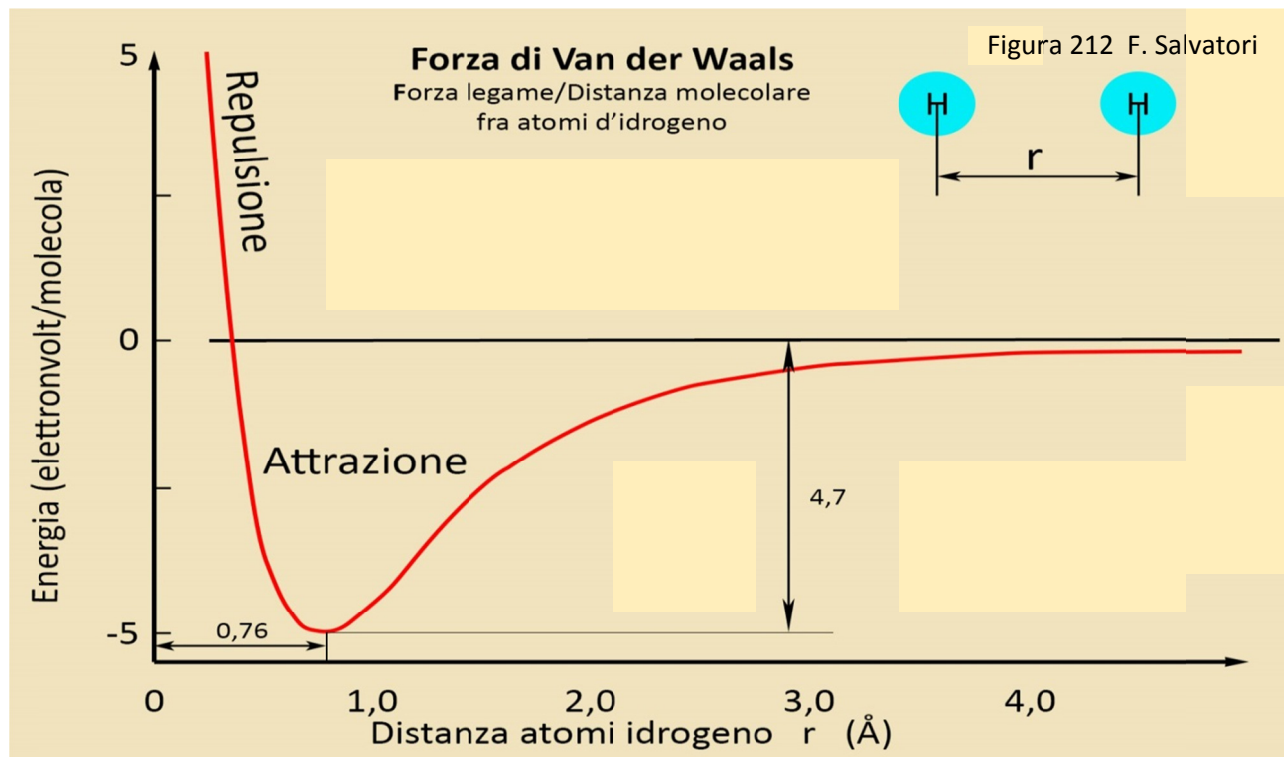
Si noti che le pieghe possono avvenire in ogni direzione, ma sempre secondo quanto impone l'angolazione specifica del caso (**Immagine a**).

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 Å 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  $\eta$ ).

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 amorphe. 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  $F_r$ .

**12.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  $E$ ,  $\eta$ ,  $E'$ ,  $E''$  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.

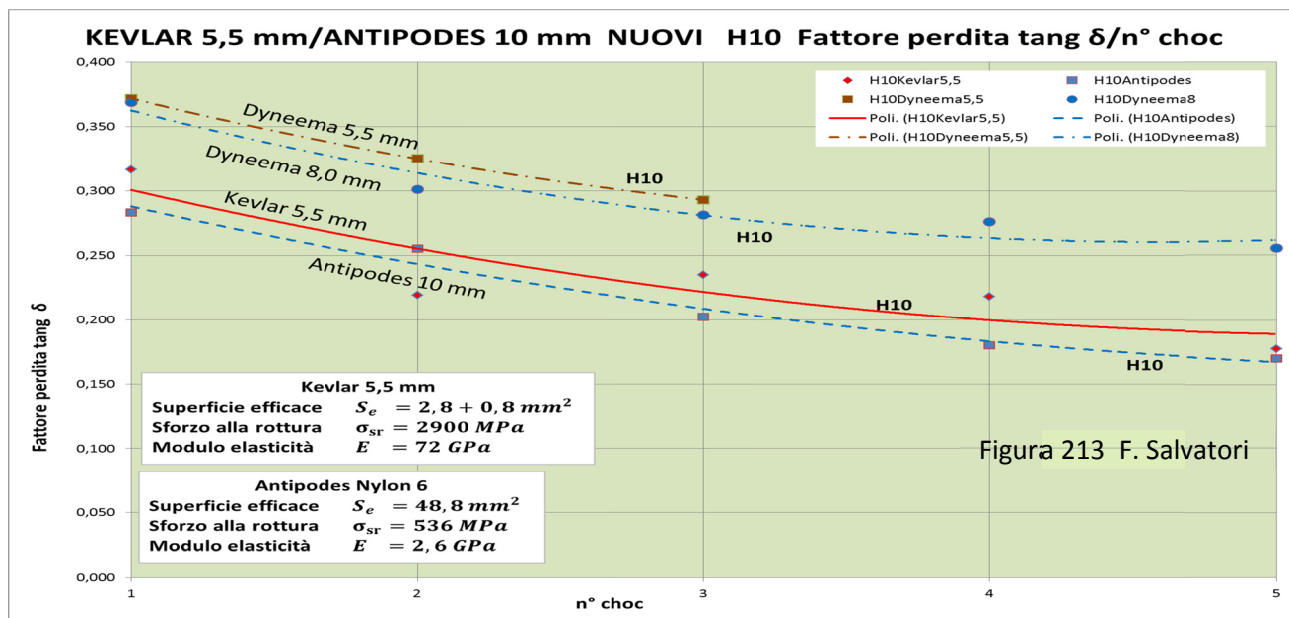
Si rende quindi evidente che la fibra Kevlar, nonostante le sue proprietà meccaniche iniziali corrispondenti a quelle di un materiale polimerico ad altissima tenacità (addirittura superiori al Dyneema), subisce un decadimento prodotto dal succedersi delle sollecitazioni impulsive (o da una trazione con 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).

### 12.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 esauendosi.



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 filli 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 filli 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).

**12.d.a.6) Quinta considerazione: analisi delle curve della percentuale di dissipazione**  
 $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  - Ricordato e premesso che  $\% \text{Dissipazione}$  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 con andamenti e dislocazioni praticamente coincidenti con quelli delle curve relative al Fattore di perdita di **Figura 213**.

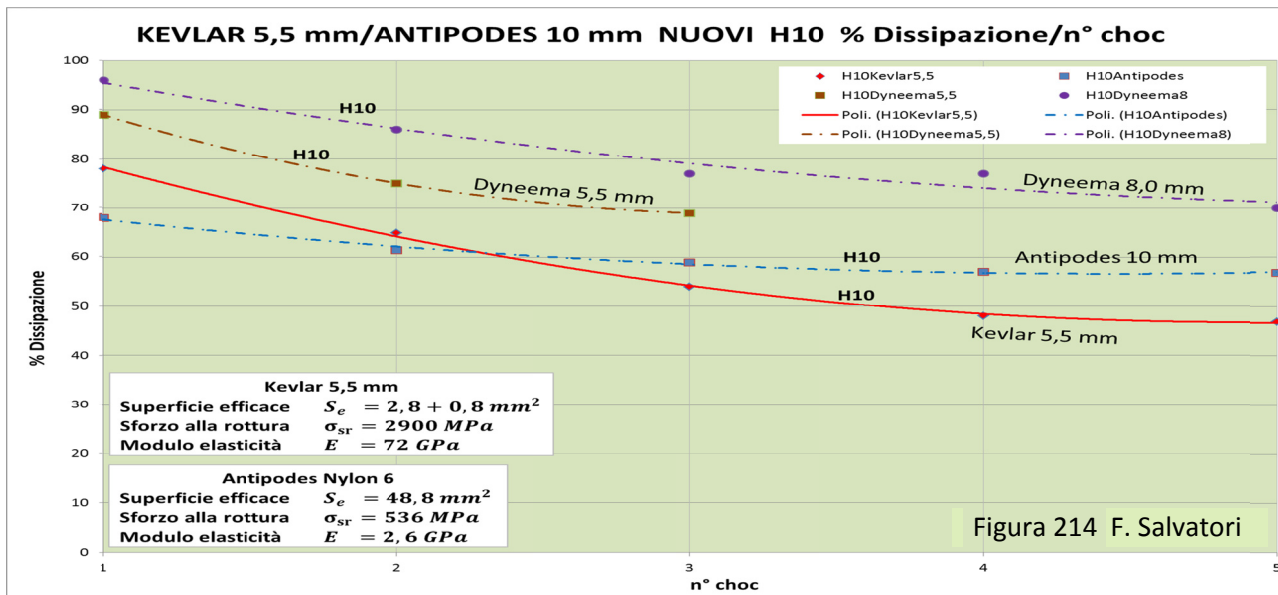


Figura 214 F. Salvatori

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.

**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 e 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.

### 12.e) Valutazione dei dati sperimentali ottenuti per il Cordino Beal Nylon 6 5,5 mm nuovo

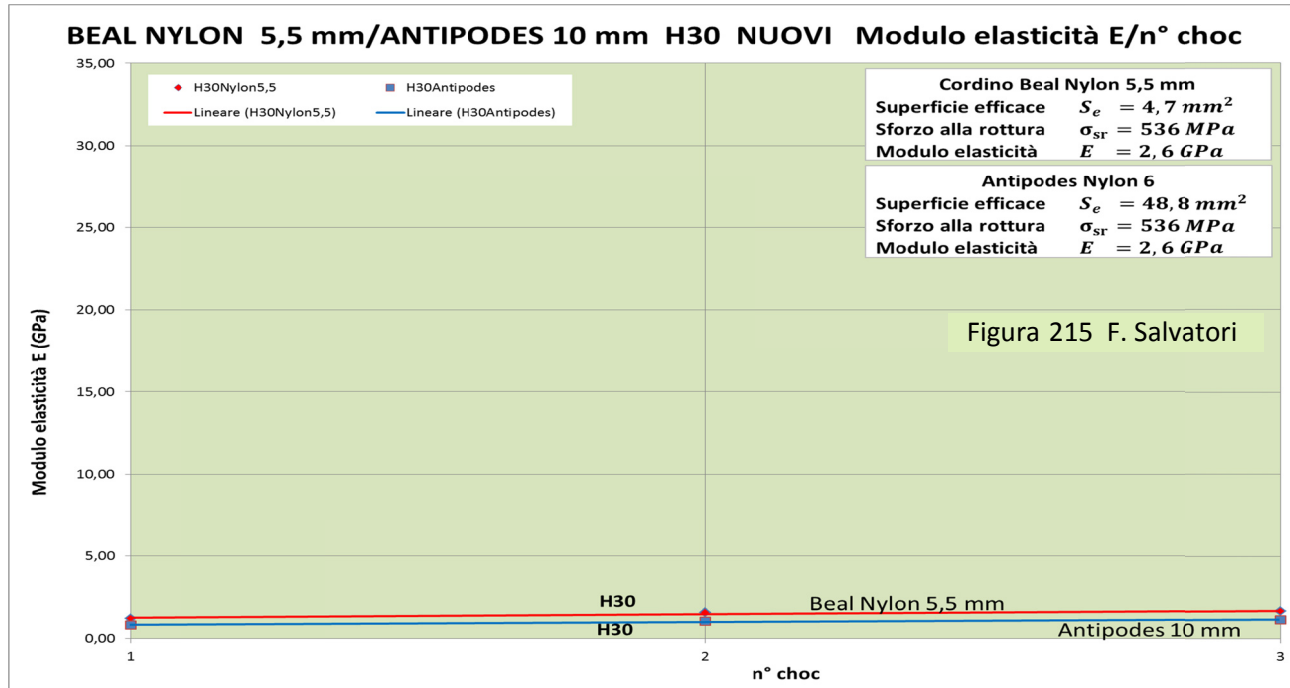
I grafici che riportiamo sono stati costruiti con le stesse modalità utilizzate in precedenza e la loro validità statistica e analitica è confermata. Variano solo il n° degli choc (tre anziché cinque) e le altezze di caduta del peso (30 cm anziché 10 cm). Nei grafici fanno da riferimento le curve della Corda statica Beal Antipodes 10 mm nuova.

#### 12.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  $E = f(n^\circ \text{ choc})$   $\eta = f(n^\circ \text{ choc})$   $tang \delta = f(n^\circ \text{ choc})$   $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  quasi coincidenti alle analoghe curve della Corda Antipodes 10 mm.

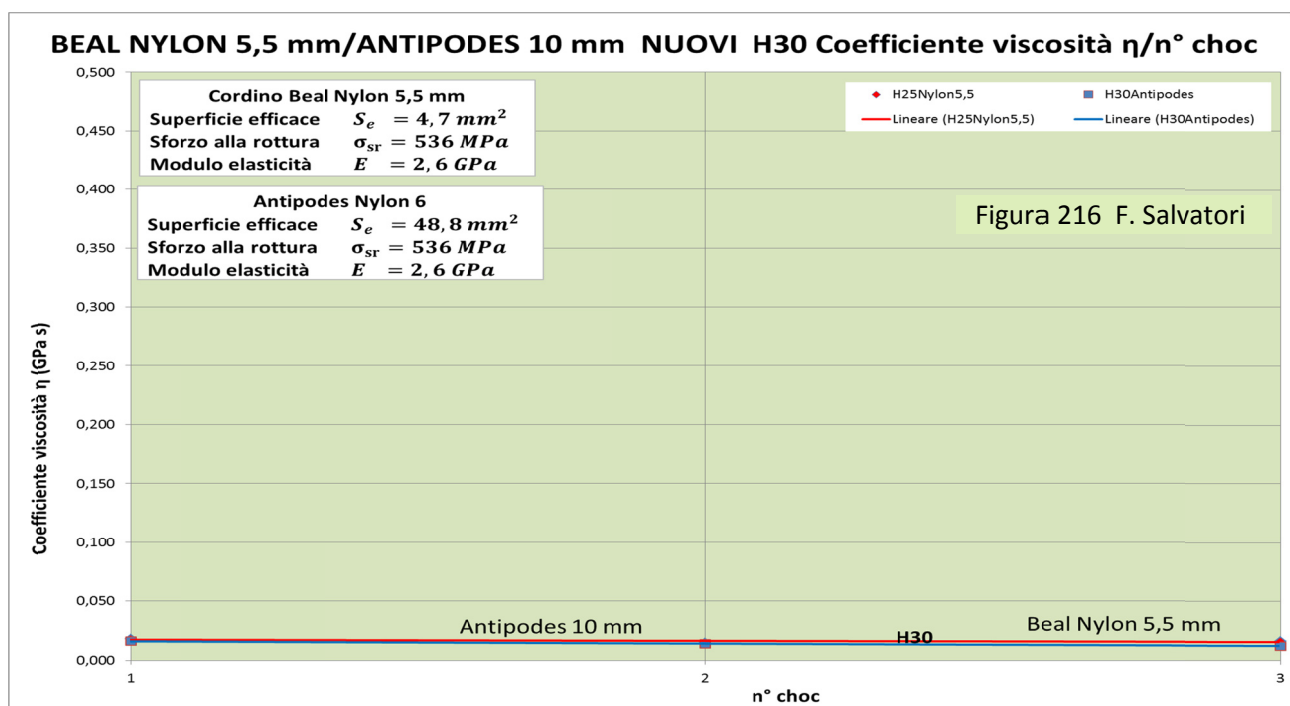
Il che è del tutto plausibile per il Coefficiente di viscosità  $\eta$  e il Fattore di perdita  $\tan \delta$  valutati con la DMA che utilizza gli Sforzi; come pure per il Modulo d'elasticità  $E$ . Ma necessita di analisi specifiche nel caso del % **Dissipazione**, che invece fanno riferimento alla Superficie efficace  $S_e$ .

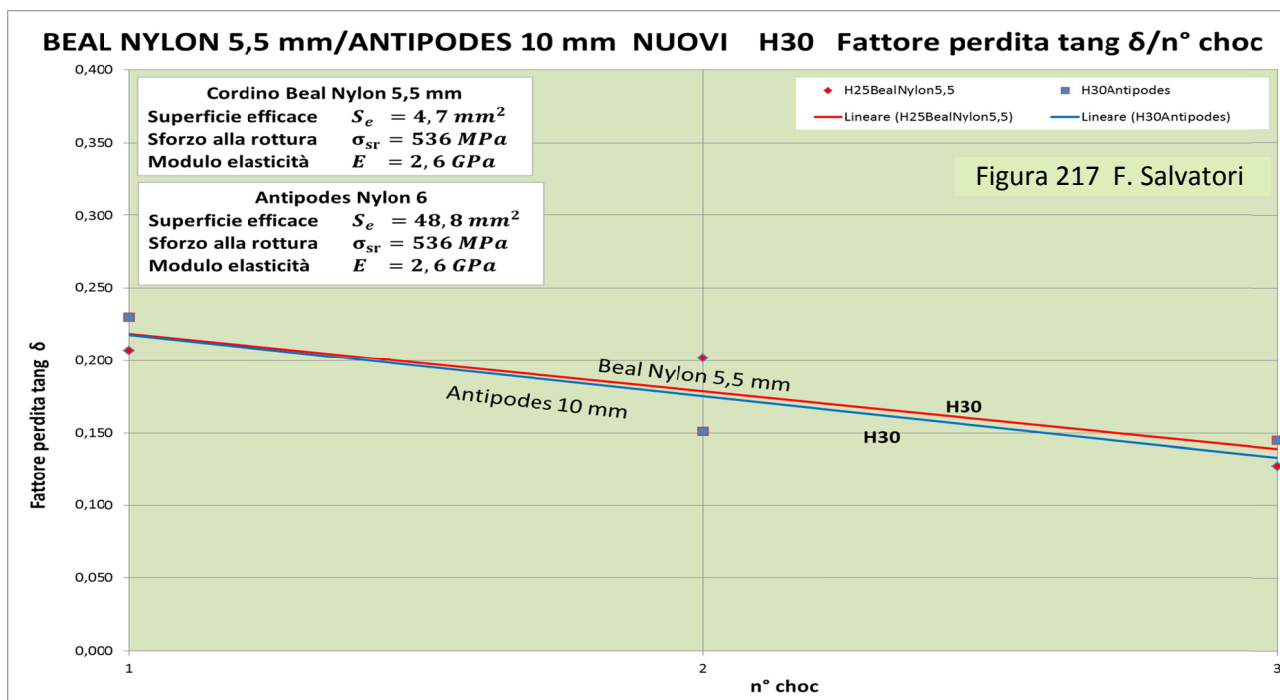
Infatti la quasi coincidenza fra le curve relative al Modulo d'elasticità del Cordino e della Corda di Nylon 6 (Figura 215) è coerente al fatto che non deve esserci proporzionalità diretta fra quantità di materiale polimerico che si oppone alla trazione ed  $E$ . Nella fattispecie, il Modulo d'elasticità 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.

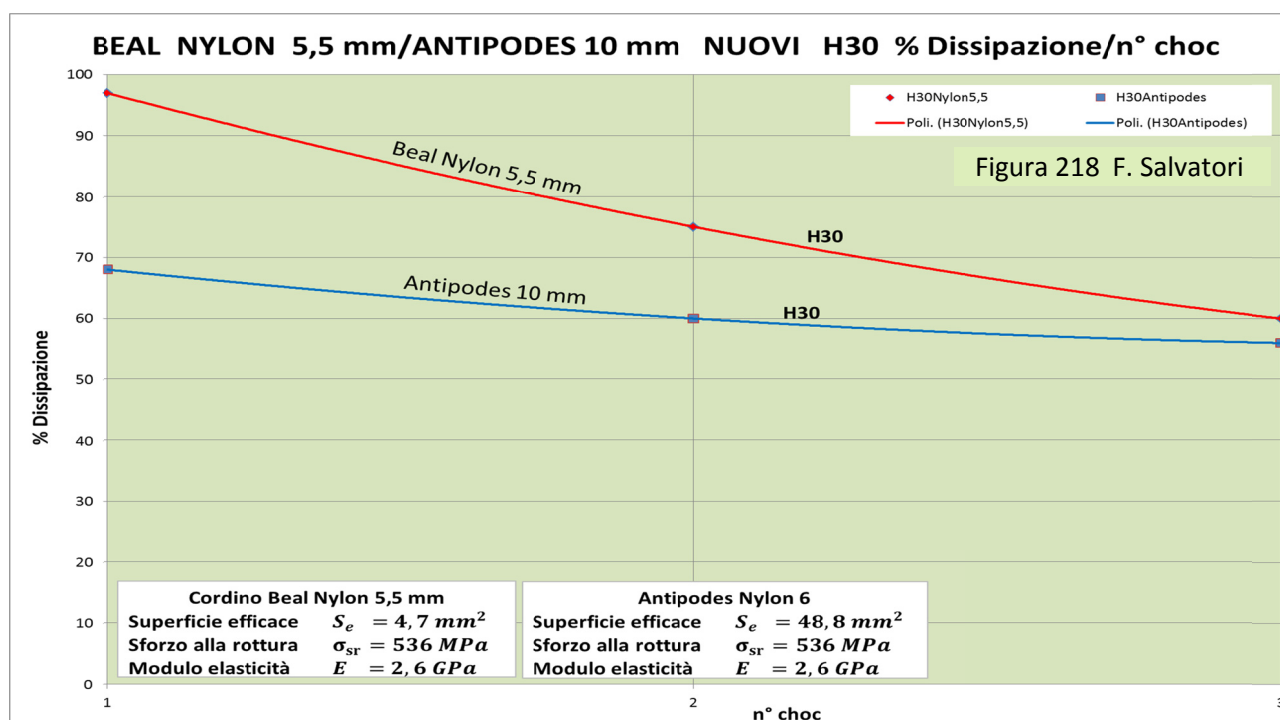
Come già detto, la coincidenza fra Cordino e Corda delle curve relative al Coefficiente di viscosità (Figura 216), trattandosi dello stesso tipo di fibra, è pienamente giustificabile.





Identica valutazione deve essere fatta per le curve della **Figura 217**, relative al Fattore di perdita **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 mm<sup>2</sup>** contro **48,8 mm<sup>2</sup>**), si distribuisce su una quantità maggiore dello stesso materiale polimerico (Nylon 6). In definitiva sul **Cordino** si applicano **246 J/mm<sup>2</sup>** mentre sulla **Corda** agiscono solo **20 J/mm<sup>2</sup>**. 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/mm<sup>2</sup>** fa sì che il Cordino venga trazonato in modo esorbitante rispetto alla Corda (**20 J/mm<sup>2</sup>**), andando a produrre deformazioni permanenti marcate soprattutto nella parte cristallina dei fili elementari (aumenta l'estensione delle zone amorfe).

Infine, la pendenza molto accentuata della curva  $\% \text{Dissipazione} = f(n^\circ \text{ choc})$  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".

## 13. TEST QUASI STATICI E A CADUTA: 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 ( $V_d$ )

### 13.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 le variazioni del Carico di rottura con nodo  $F_{rn}$  rispetto al crescere della Velocità di deformazione  $V_d$ .

### 13.b) Analisi dei grafici delle curve $F_{rn} = f(V_d)$ 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.

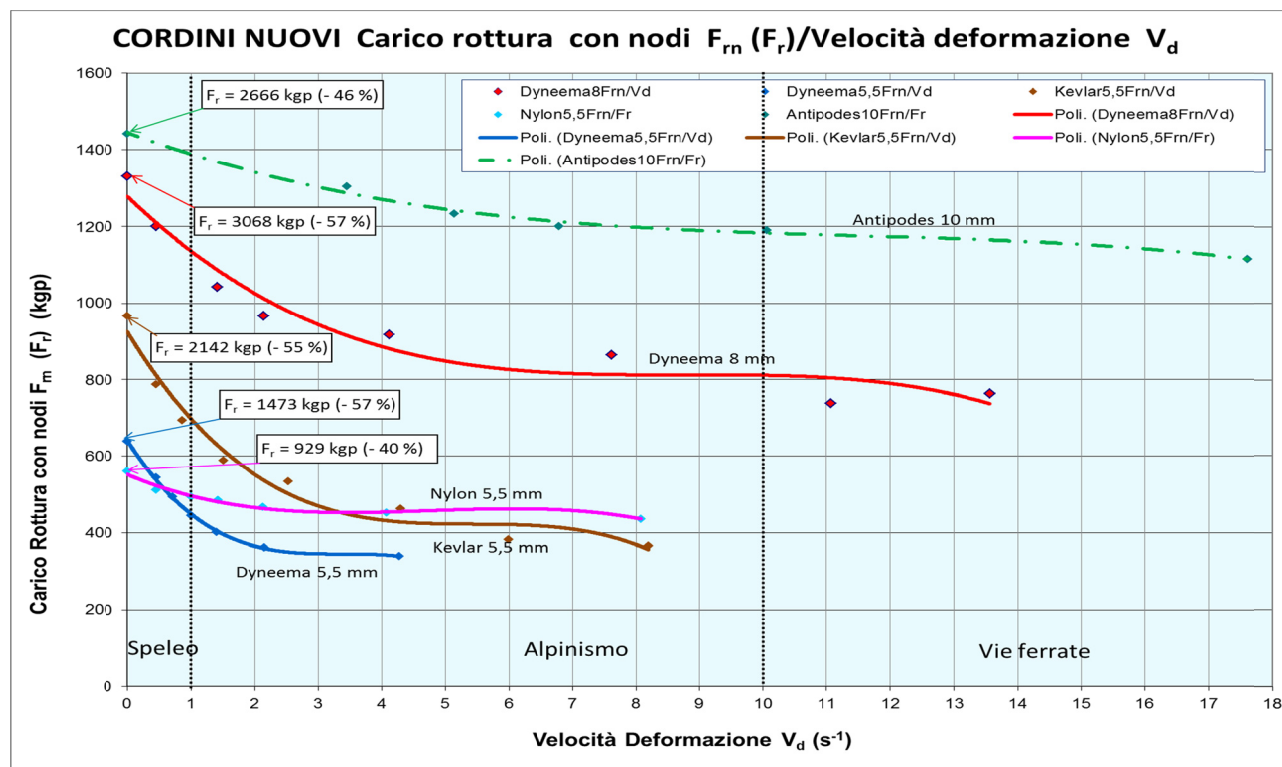
In questi grafici viene anche indicata la riduzione percentuale del carico di rottura che la presenza del nodo impone ai Cordini e alla Corda; carichi di rottura ottenuti in condizioni quasi-statiche (trazione lenta).

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.

**13.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 %.



**13.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 risalta 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;

- 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 maniere 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.

**13.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.

## **14. TEST QUASI-STATICI E A CADUTA: cordini nuovi di Dyneema e Kevlar; valutazione termografica delle temperature durante la trazione quasi-statica fino alla rottura nel nodo**

### **14.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**.

### **14.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 ( $V = 0,006 \text{ m/s}$ ).

### **14.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.

## Nodo Guida CORDINO REPETTO DYNEEMA 5,5 MM NUOVO

$$F_r = 1473 \text{ kgp} \quad F_m = 639 \text{ kgp} \quad (-57\%)$$

Trazione lenta 0,006 m/s  
 Umidità relativa 50 %  
 Temperatura ambiente 15°C



F = 200 kgp



$$T_m = 150^\circ\text{C}$$

$$T_g = -90^\circ\text{C}$$

$$d_e = 2 \text{ mm (Dyneema)} \\ + 1 \text{ mm (Nylon 6.6)}$$

F = 600 kgp

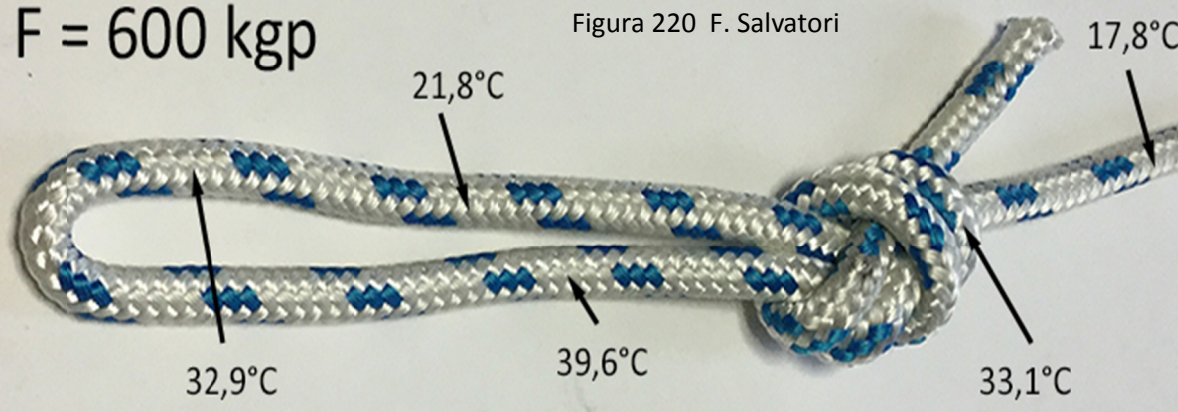


Figura 220 F. Salvatori

### 14.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  $-90^\circ\text{C}$ , 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  $T_g = 47^\circ\text{C}$ .

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).

**14.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.

**14.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.

**14.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.

### Nodo Guida CORDINO COURANT KEVLAR 5,5 MM NUOVO

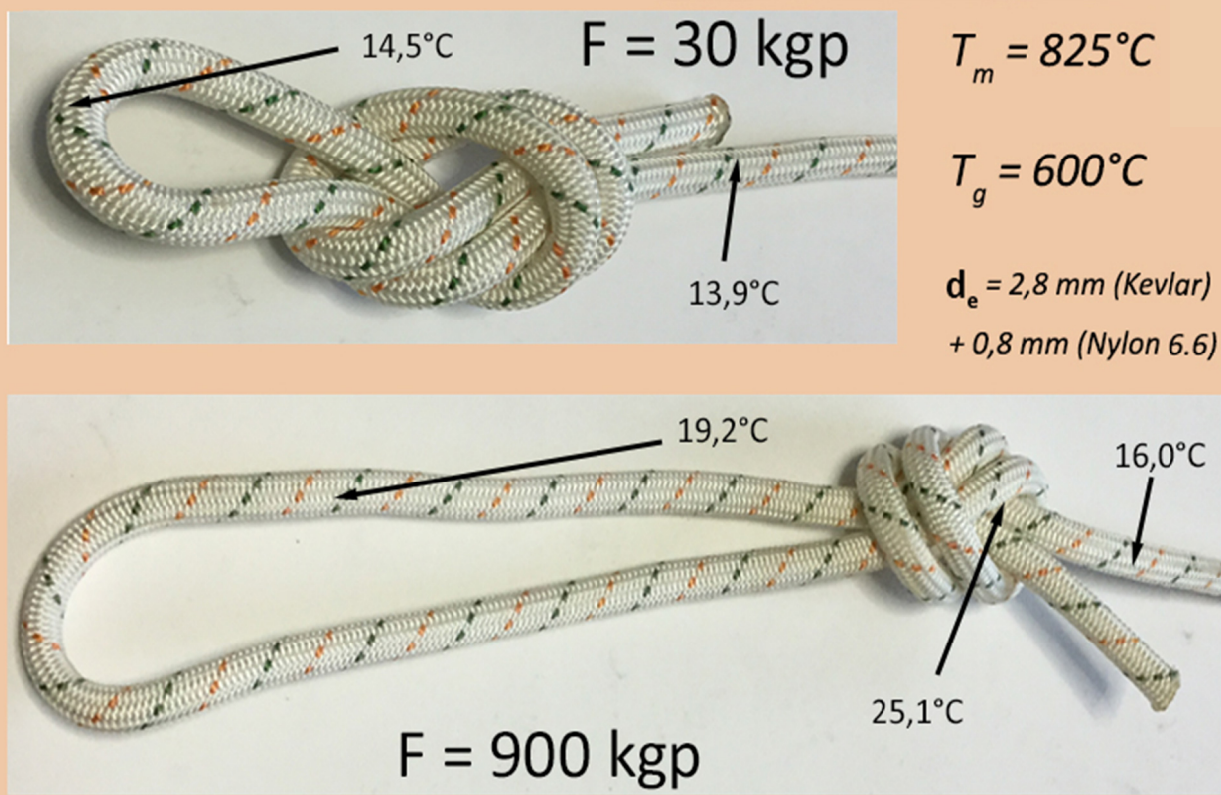
$$F_r = 2142 \text{ kgp} \quad F_m = 967 \text{ kgp} \quad (-55\%)$$

Trazione lenta 0,006 m/s

Umidità relativa 50 %

Temperatura ambiente 15°C

Figura 221 F. Salvatori



### **14.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.

**14.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  $F_{rn}$ .

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).

**14.d.a.1) Dimensioni ridotte della Superficie efficace** – Valgono le stesse considerazioni espresse per il Cordino Dyneema (*pag. 277*).

**14.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 %.

**14.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.

### **14.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.



Scuola Nazionale di Speleologia CAI  
[direttore@sns-cai.it](mailto:direttore@sns-cai.it) (Stefano Nicolini)  
[www.sns-cai.it](http://www.sns-cai.it)

[segretario@sns-cai.it](mailto:segretario@sns-cai.it) (Patrizia Diani)

CENS – Centro Escursionistico Naturalistico Speleologico – Loc. Calcinaro 7/A 06021  
Costacciaro PG  
075 9170548 [corrispondenza@cens.it](mailto:corrispondenza@cens.it) [www.cens.it](http://www.cens.it)

