



TORRE A CADUTA C.R.A.S.C.: UNO STRUMENTO D'AVANGUARDIA PER TEST DINAMICI CON VELOCITA' DI DEFORMAZIONE VARIABILE

Energia in gioco, viscoelasticità e altro

Premessa - Dalla fine degli anni sessanta, nel vasto campo dei test sui materiali in genere (metallici, plastici o altro) si è sempre più evidenziata la necessità di definire il variare dei risultati, quantitativi e qualitativi, in funzione della velocità di deformazione V_d del campione sottoposto a prova. E' infatti ovvio che i materiali e gli attrezzi per la progressione speleo-alpinistica e canyonig debbano mostrare le loro caratteristiche e la resistenza alla rottura anche nelle condizioni che sono più coerenti con la realtà molto dinamica della progressione, anche riproducendo situazioni derivanti dal cedimento della catena di sicurezza.

Il Gruppo di Lavoro Materiali e Tecniche della SNS CAI ha eseguito test a caduta fin dai primi anni '80, realizzando una torre nella Valle del Sodo nei pressi di Sigillo (PG) (**Figura 0**, foto E. Rosati 1984).

Ma la strumentazione di allora in possesso del GLMT SNS CAI (con sede operativa nel Centro Nazionale di Speleologia CAI "Monte Cucco") ha permesso di misurare solo il variare della forza F

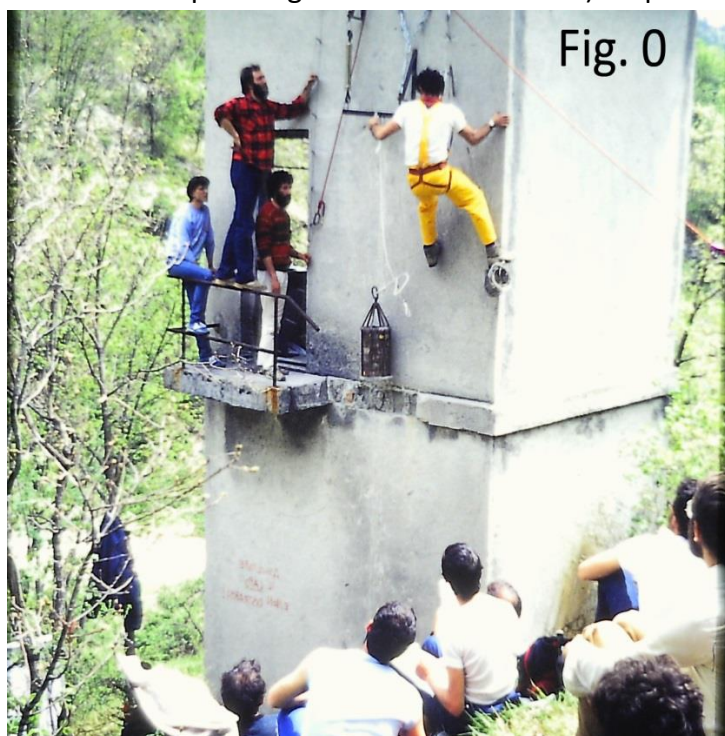
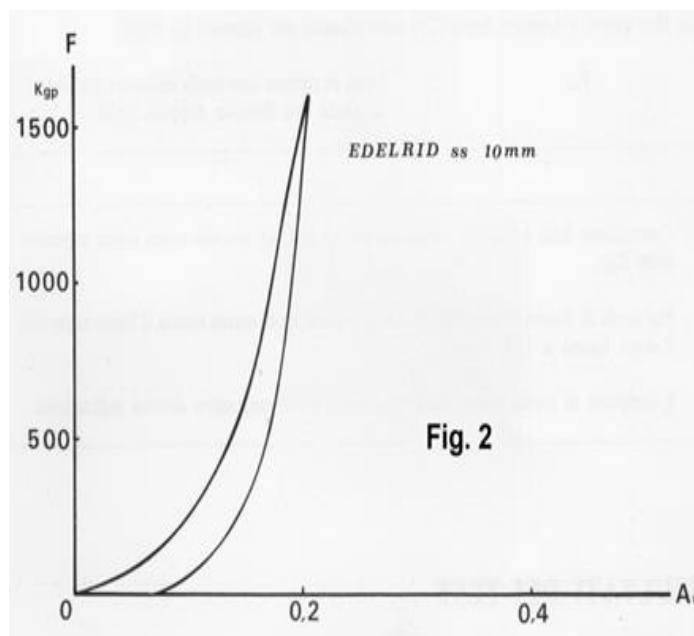
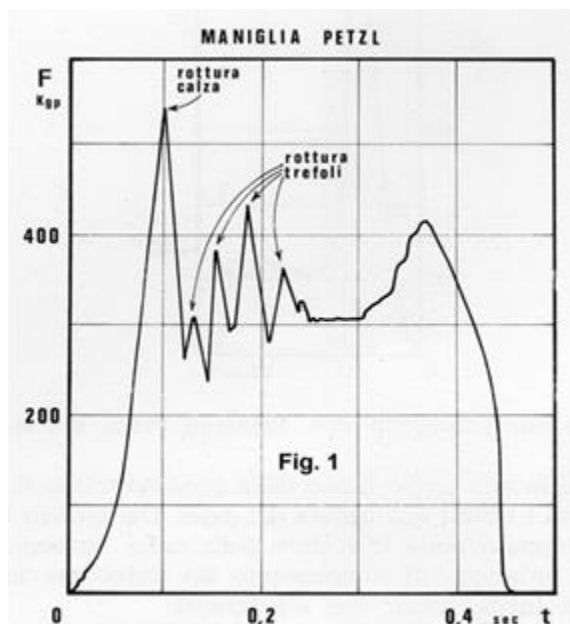


Fig. 0

in funzione del tempo t e non gli allungamenti A , fondamentali per calcolare i contenuti energetici, il lavoro svolto e dissipazione d'energia in attriti.

Furono eseguiti test sulla caduta di un peso su un bloccante inserito in una corda producendo grafici $F = f(t)$ come in **Figura 1** che dettero importanti informazioni sul meccanismo di rottura, prima della calza e poi dei trefoli, suggerendo la necessità di collocare un antiribaltamento nel corpo del bloccante per evitare che la corda venisse troppo strozzata nella gola e quindi s'innescasse un meccanismo di dissipazione per assorbire gran parte dell'energia prodotta dalla caduta del peso.



Furono testate anche corde, longe, corde annodate, dissipatori, discensori, il corpo umano e tanto altro. Ma le curve ottenute, mancando i dati sull'allungamento A del campione sottoposto a sollecitazione, non permettevano di conoscere parametri fondamentali come l'energia in gioco, il lavoro alla rottura (eventuale), la funzione che definisce le variazioni del coefficiente d'elasticità, lo sfasamento fra forza massima e allungamento massimo dovuto alla viscosità di certe strutture come i polimeri (corde), la velocità d'impatto iniziale, la curva di annullamento della velocità di sollecitazione, l'evolversi della potenza istantanea.

Grafici $F = f(t)$ vennero ricavati in quei tempi, per esempio con le corde (**Figura 2**), non a caduta (trazione veloce) ma solo a trazione lenta (quasi-statica).

E questo era limitativo dal punto di vista dei contenuti energetici e dissipativi (viscosità). Ma comunque vennero valutati alcuni parametri energetici dalle curve di "carico" e "scarico" (**Figura 2**), soprattutto se confrontate fra corde nuove diverse e corde nuove/usate.

TORRE DI CADUTA C.R.A.S.C.

La svolta nei test sui materiali e le attrezzature speleo-alpinistiche e canyonig avviene quando all'inizio del 2011 nasce la Torre per prove a caduta, ad opera del CENS di Costacciaro. Per la prima volta si misurano insieme - sotto l'effetto di una sollecitazione impulsiva variabile - la forza F applicata al campione sottoposto a test, il suo allungamento conseguente A e il tempo t .

E' stata una svolta storica e per la prima volta è stato possibile valutare le caratteristiche e la resistenza dei materiali per la progressione in grotta, in montagna e in forra nelle condizioni reali di un ipotetico subitaneo cedimento della catena di sicurezza. Da allora le ricerche hanno avuto evoluzioni rapide e di grande rilievo, consentendo di dare risposta ai tanti problemi rimasti insoluti sull'effetto della velocità di deformazione V_d (sollecitazioni choc).

Descrizione

La Torre è costituita da una trave, posta in verticale, autoportante, di 9 m di lunghezza, di forma e dimensioni tali da dare rigidità al sistema. Tale rigidità è resa estrema dal fatto che la trave è saldamente e ripetutamente ancorata a un muro dello spessore di 120 cm (**Figura 3**).



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

Il peso viene sollevato con un verricello e può essere sospeso a un'altezza qualsiasi all'interno della trave: uno sganciatore meccanico o elettromagnetico (**Figura 4**) provvede a farlo cadere al momento stabilito (una vasca con sabbia posta alla base della trave può eventualmente accoglierlo senza urti).

Il peso di massa ***m*** - una volta lasciato libero di cadere - è attratto dalla forza di gravità, che, con accelerazione ***g***, aumenta la sua velocità al passare del tempo ***t*** secondo la relazione:

$$V = g \cdot t$$

Al tempo ***t₀*** il peso cadente inizia a mettere in tensione il campione sottoposto a test, il quale comincia ad allungarsi, rallentando la velocità e assorbendo energia. Al momento dell'impatto con il campione la velocità del peso è:

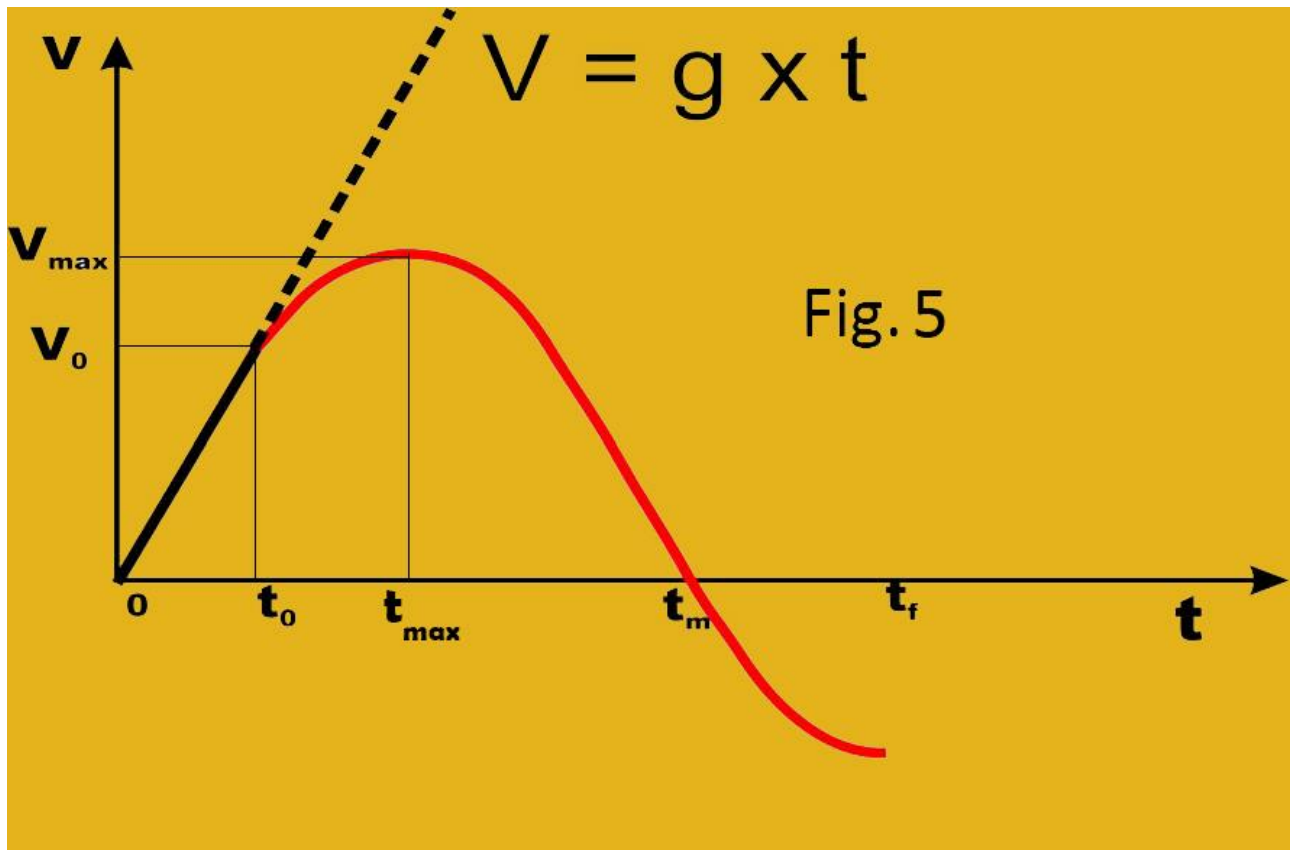
$$V_0 = \sqrt{2 \cdot h \cdot g}$$

dove ***h*** è l'altezza di caduta libera del peso.

Nel grafico di **Figura 5** viene rappresentata sinotticamente l'evoluzione della sollecitazione:



1. al momento **0** (zero) il peso inizia la sua caduta e la velocità va aumentando in modo lineare rispetto al tempo ($V = g \cdot t$);
2. al tempo ***t₀***, con velocità $V_0 = \sqrt{2 \cdot h \cdot g}$, il peso comincia ad applicare la sollecitazione al campione, che inizia ad allungarsi e deformarsi, rallentando la velocità di caduta e iniziando ad assorbire energia;



3. poi la velocità aumenta ma con incrementi sempre minori, finché raggiunge il valore massimo V_{max} al tempo t_{max} ;
4. ora la velocità diminuisce e al tempo t_m s'annulla;
5. l'energia accumulata nel campione viene in parte restituita e fa rimbalzare il peso verso l'alto.

L'energia contenuta nel peso al momento dell'impatto con il campione è:

$$E = h \cdot P = h \cdot m \cdot g = \frac{1}{2} m V_0^2$$

L'evolversi della sollecitazione a caduta, qui sopra esposta (**Figura 5**), si conclude con un rimbalzo (senza rottura del campione) se l'energia prodotta dalla caduta è inferiore a quella che il campione può assorbire senza arrivare alla rottura completa: il campione si allunga e si deforma ma non cede e alla fine restituisce l'energia elastica accumulata, producendo un rimbalzo.

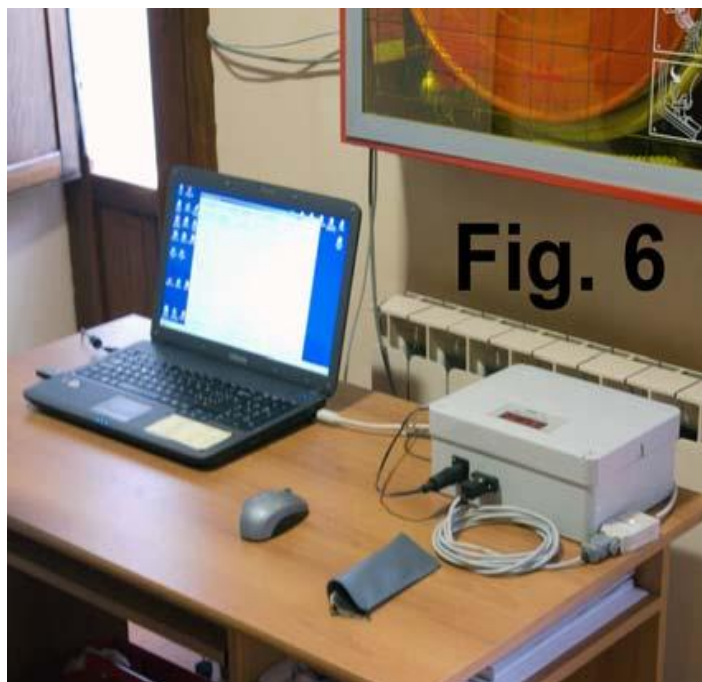
Se invece l'energia espressa dalla relazione sopradetta è superiore a quella che può ricevere il campione - tramite allungamento elastico e deformazione plastica - si verifica la rottura del campione stesso; non c'è alcun rimbalzo e il peso precipita.

In tal caso il grafico di **Figura 5** s'interrompe bruscamente, in un punto qualsiasi della curva entro l'intervallo:

$$0 < t \leq t_m$$

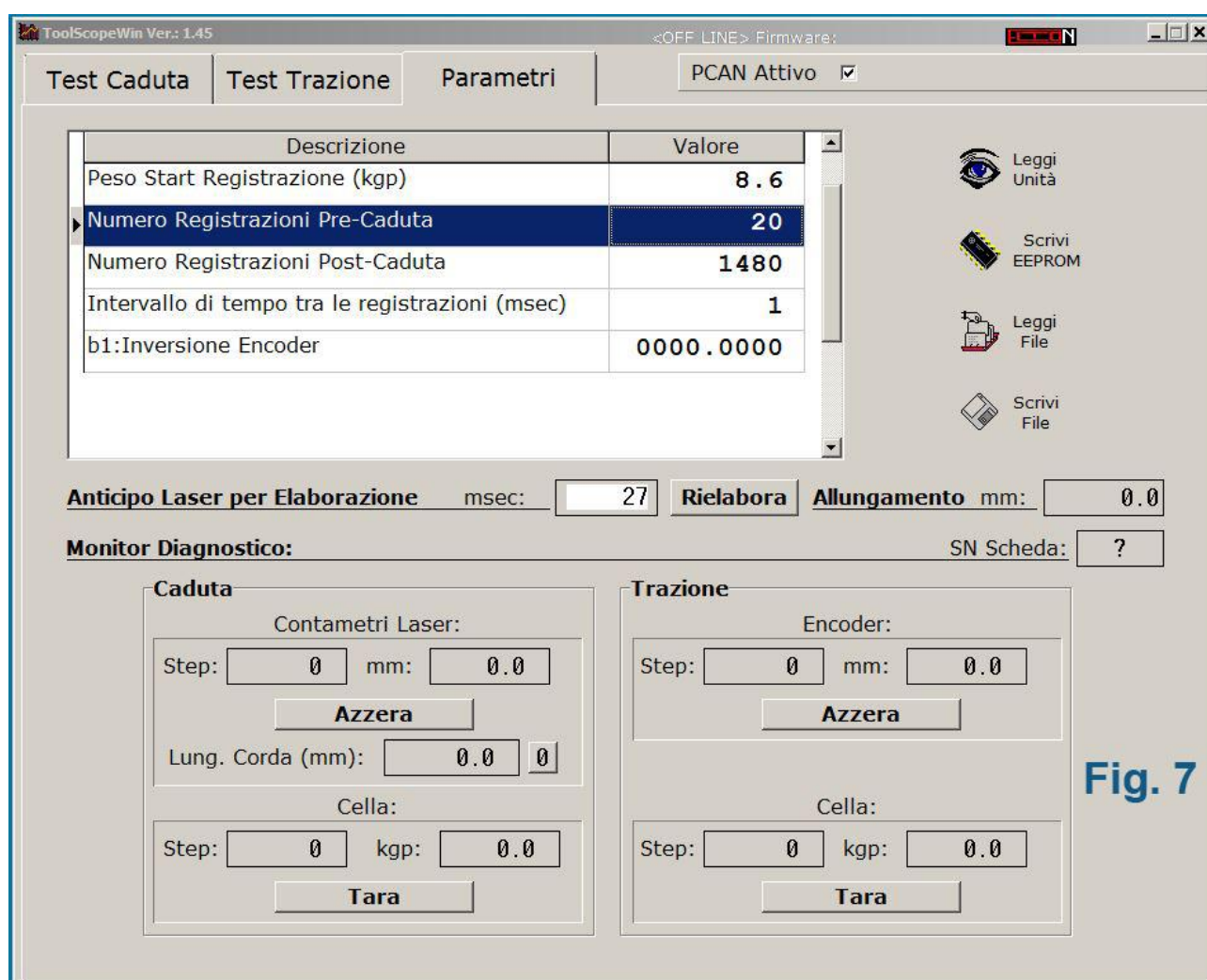
Forza, allungamento e tempo: acquisizione ed elaborazione dei dati

La cella di carico, il sensore di distanza laser e il misuratore del tempo trascorso dall'inizio della sollecitazione, inviano i dati alla scheda di acquisizione e quindi al computer (**Figura 6**), dove un programma dedicato li elabora, rendendoli leggibili con varie organizzazioni e impostazioni grafiche.

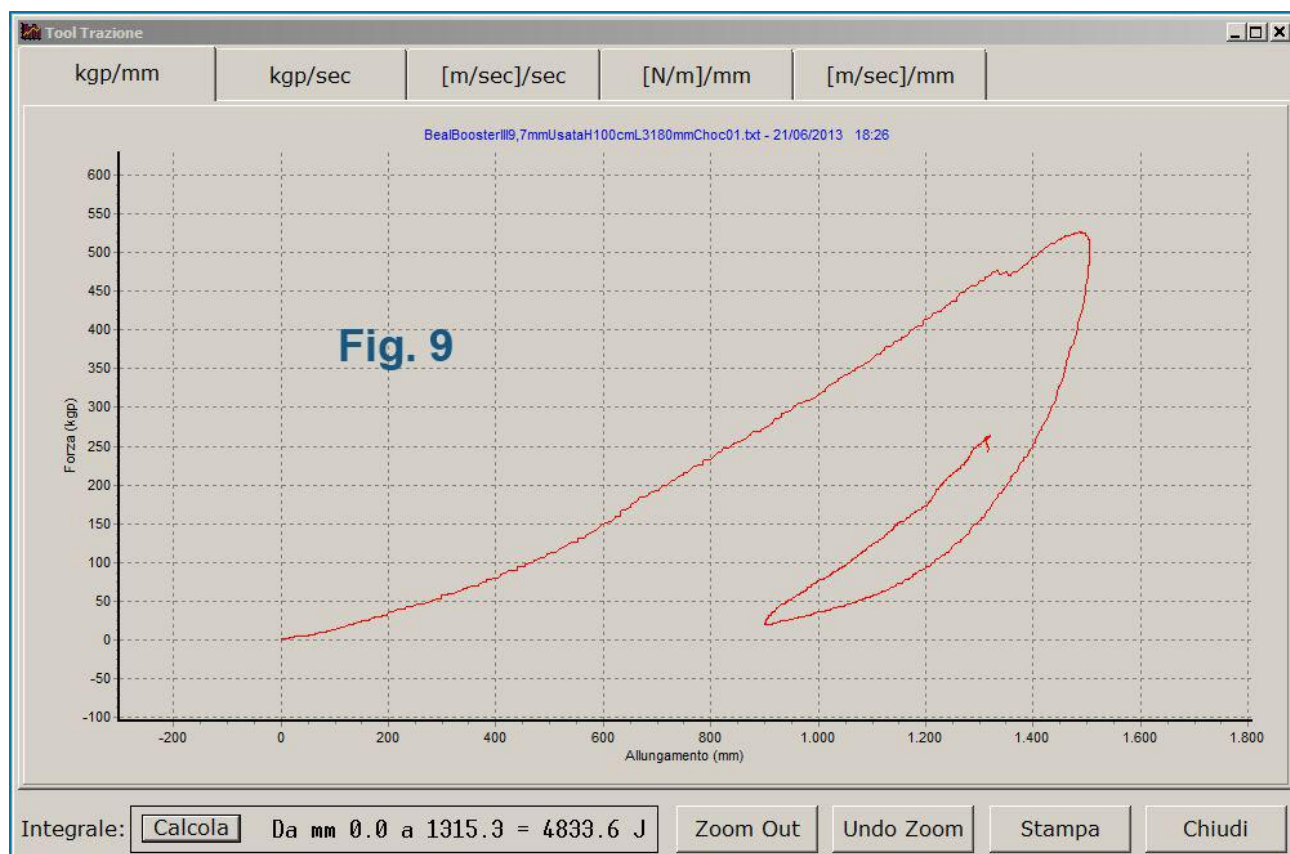
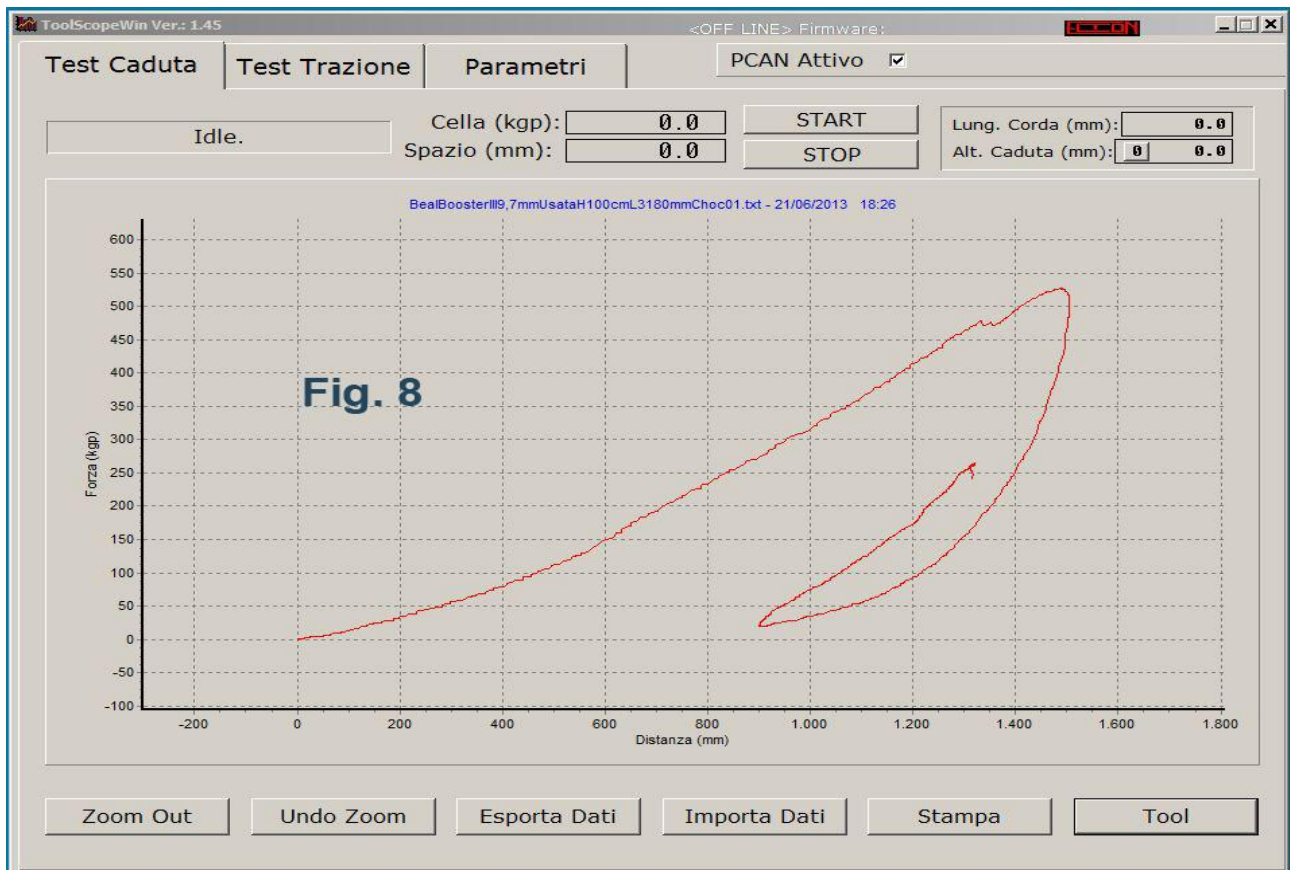


L'intervallo di campionatura è regolabile; nell'esempio utilizzato è di 1 ms (millisecondo).

In tal modo sono possibili analisi, calcoli e integrazioni grafiche che permettono di valutare molteplici aspetti delle caratteristiche del campione sottoposto al test a caduta: elasticità, plasticità e deformazioni permanenti, lavoro recepito e restituito, velocità di deformazione, energia persa per attrito. L'evolversi dei grafici avviene in tempo reale.



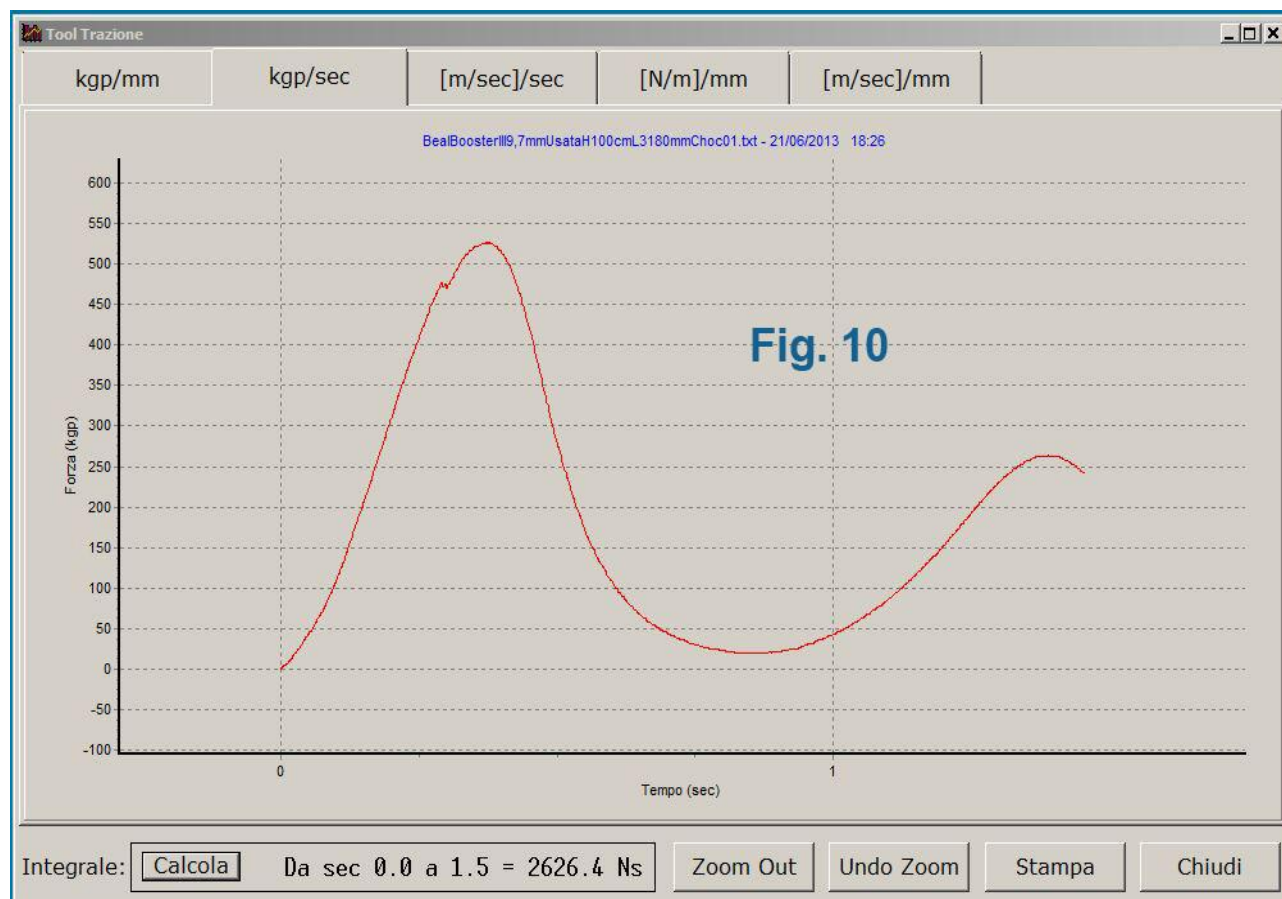
Nella **Figura 7** è riportata al schermata iniziale del programma dedicato dove è possibile impostare i parametri secondo le necessità delle ricerche.



In **Figura 8** il grafico **Forza/Allungamento** ottenuto, in tempo reale, con un test a caduta su una corda (specificata nell'intestazione): sono calcolabili Forza massima, Allungamento massimo, Inclinazione della curva, Superfici sottese (equivalenti alle energie in gioco).

In **Figura 9** lo stesso grafico di Figura 8 ma con la possibilità di quantizzare le energie in funzione dell'intervallo selezionato. Le altre schede attivabili danno la variazione della velocità di allungamento nel tempo, la variazione del Modulo d'elasticità e della velocità del peso in relazione all'allungamento.

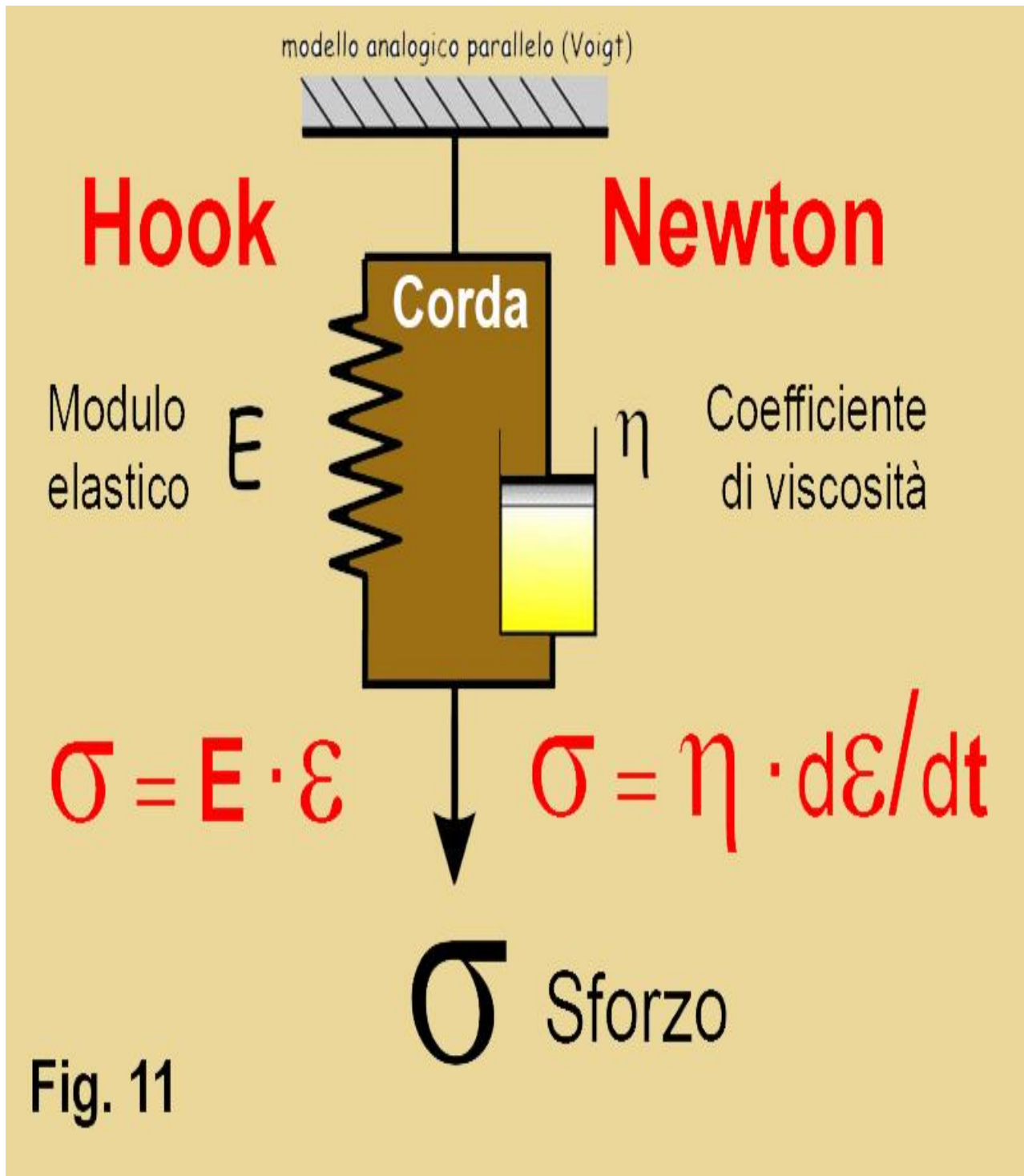
Nella **Figura 10** la sinusoide smorzata della variazione della Forza in funzione del tempo.



Corde e cordini: un esempio di elaborazione dei dati a caduta con fogli di calcolo; valutazioni energetiche e viscoelastiche

Da quanto rappresentato nelle **Figure 8 – 9 – 10** risalta che le corde (e i cordini) cambiano le proprie caratteristiche subendo una sollecitazione choc. E se gli choc si succedono sullo stesso campione, questi cambiamenti si accumulano portando al decadimento per “invecchiamento” da choc ripetuti. La sinusoide smorzata di **Figura 10** ne è una prova evidente.

Le corde sono dunque costituite da materiali viscoelastici (poliammidi, Nylon) e alla viscosità è da attribuire il loro processo di decadimento: mettendo in atto un'analisi quantitativa sul procedere della viscosità, attraverso test a caduta, è possibile dare una valutazione numerica al decadimento di una corda (che si va ad aggiungere al decadimento prodotto dagli agenti chimici e alle modifiche prodotte dalle variazioni di temperatura).



Una **corda**, essendo costituita da fili elementari di Nylon (poliammide), è un materiale **viscoelastico**.

Il modello che meglio la rappresenta è il “**Modello analogico parallelo di Voigt**” rappresentato in **Figura 11**: è la combinazione “in parallelo” di un elemento elastico (reversibile) guidato dalla **Legge di Hook** e di un elemento viscoso (irreversibile), quantizzato dalla **Legge di Newton**.

L’equazione che esprime il Modello di Voigt è:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

dove:

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

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

$S_e = \text{superficie efficace provino (corda) (m}^2\text{)***}$

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

$\varepsilon = l/l_0 = \text{deformazione}$

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

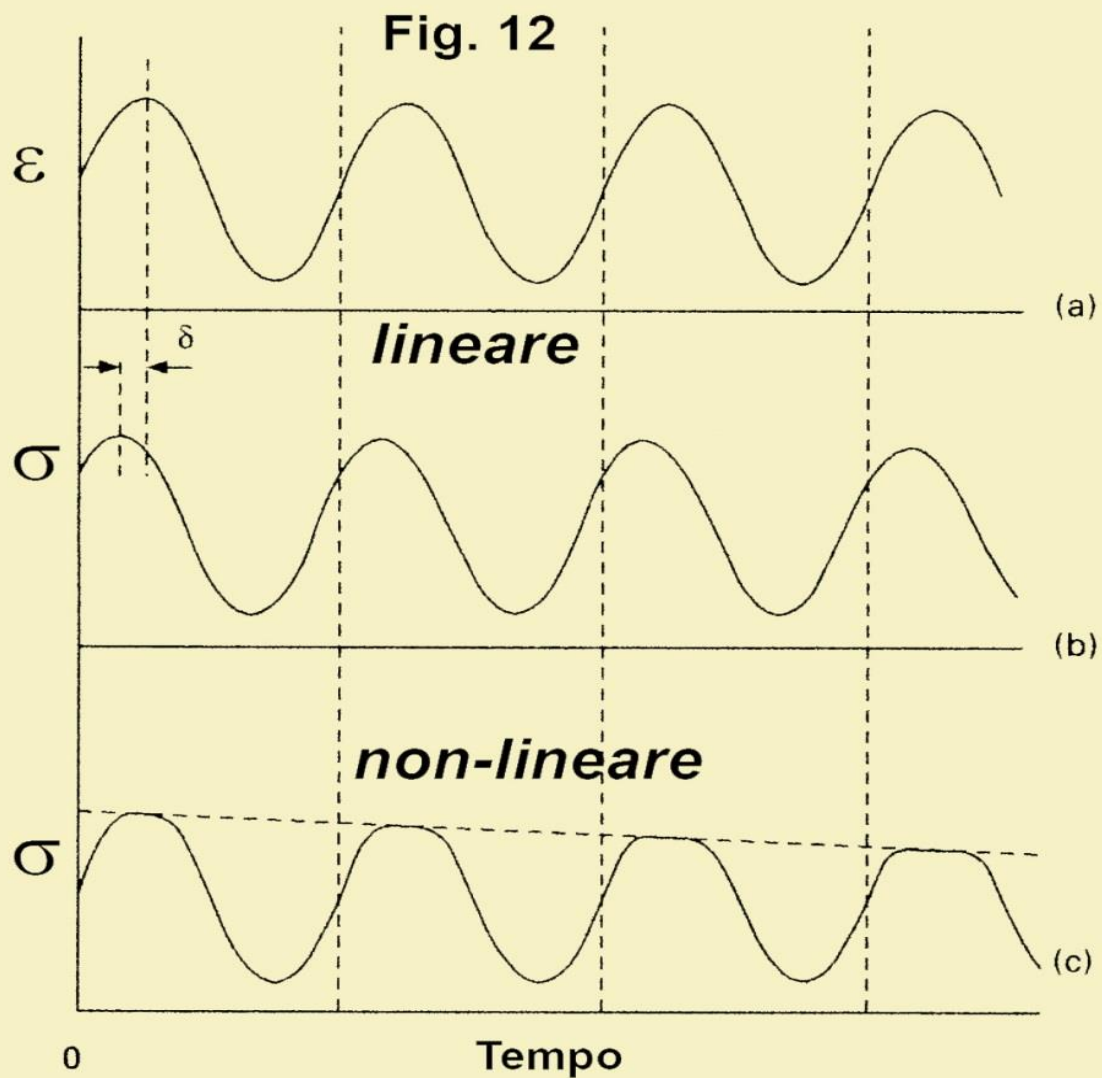
$l = \text{lunghezza provino trazonato (m)}$

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

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

*** La Superficie Efficace S_e di una corda equivale alla superficie trasversale di un provino cilindrico **isotropo**, dello stesso materiale dei fili elementari, pari alla somma di tutte le sezioni trasversali dei singoli fili elementari.

Viscoelasticità: test dinamici a impulsi



Per valutare l'effetto delle sollecitazioni sui materiali viscoelastici (come le corde, appunto) si fanno dei test dinamici, a impulsi meccanici, valutando, in funzione del tempo, le variazioni simultanee degli sforzi σ e delle deformazioni ϵ (Figura 12).

Se gli impulsi meccanici sono ripetuti ciclicamente nel tempo, il test è definito **lineare** Figura 12a e 12b.

Se invece il test dinamico produce uno smorzamento sia dello sforzo sia della deformazione (Figura 12c), il test è **non – lineare**.

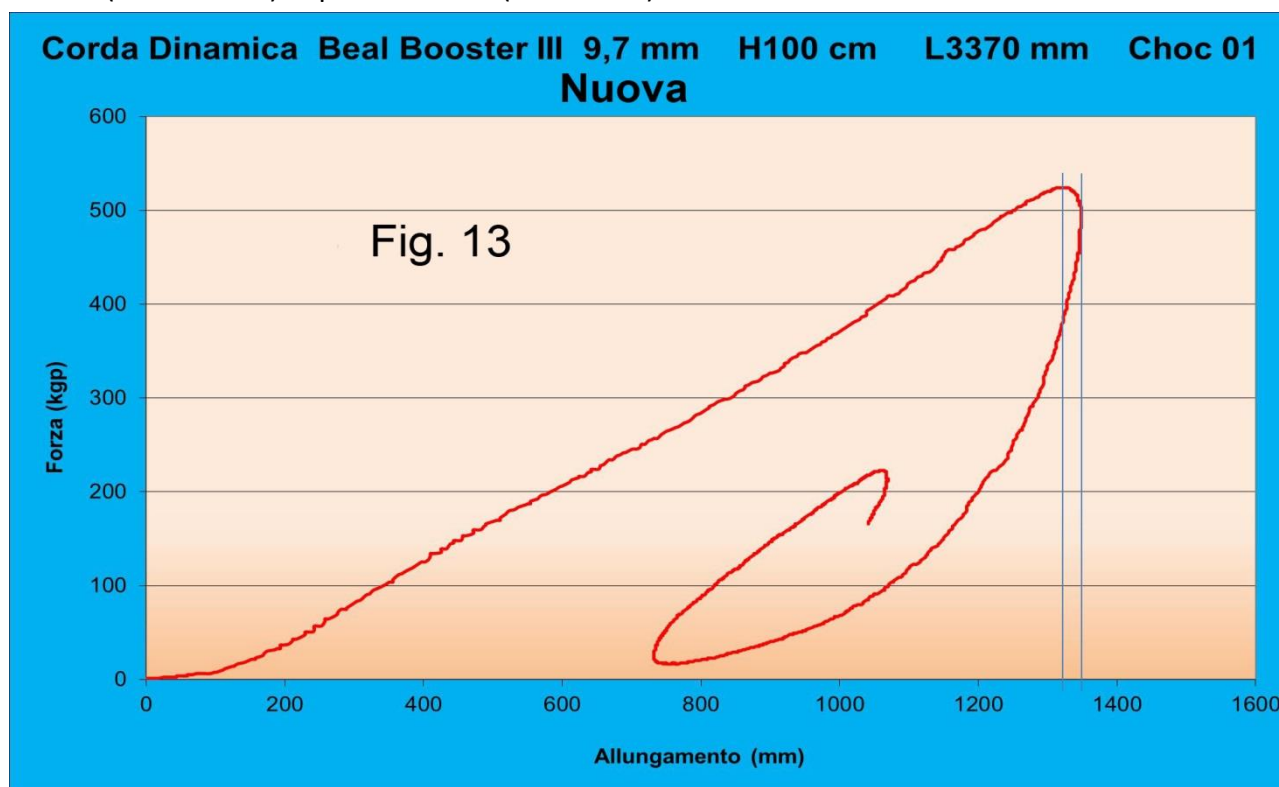
Forza, allungamento e tempo: restituzione grafica, organizzazione dei dati, elaborazioni e valutazioni

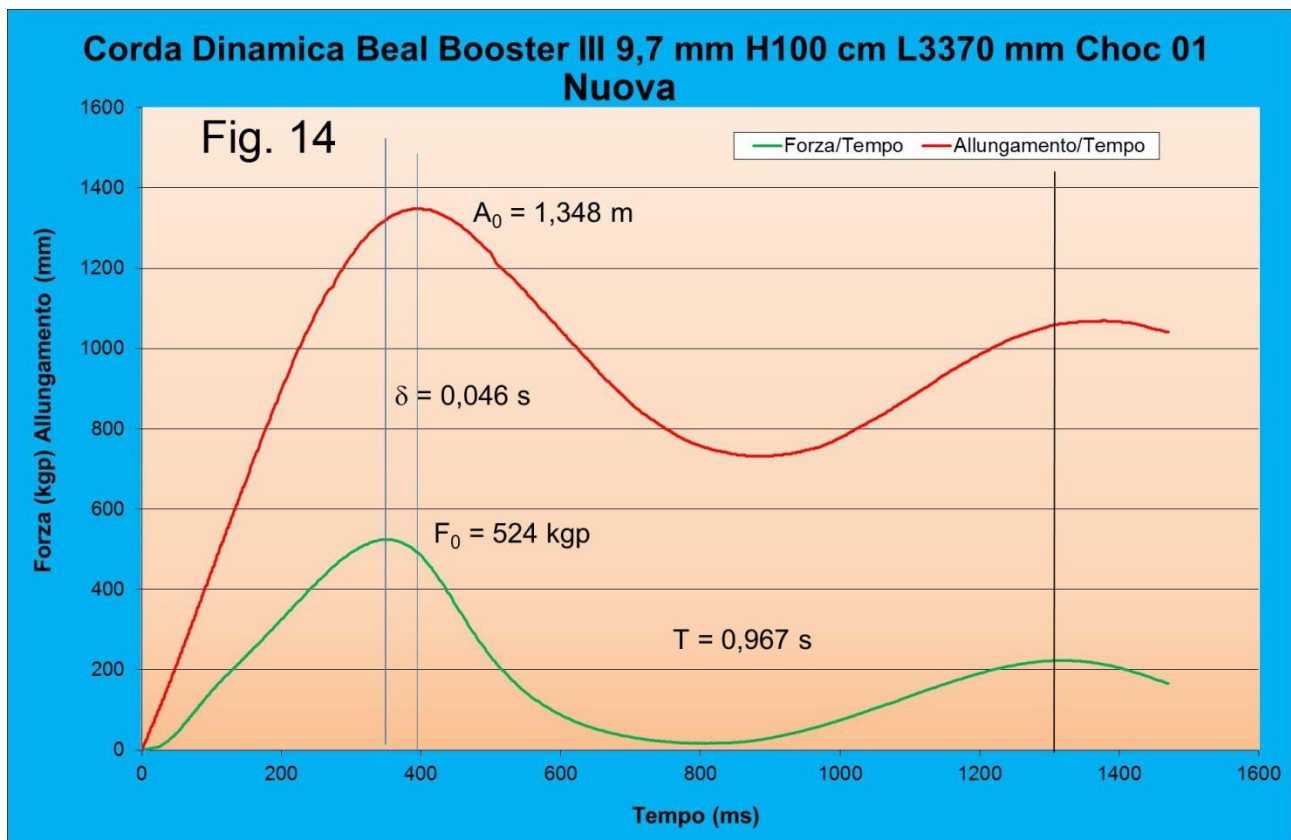
I test su corda con **Torre di caduta** sono assimilabili a test **non lineari** con smorzamento e possono essere definiti dalla **Relazione (1)** e i suoi conseguenti sviluppi. I dati necessari sono prelevati dal primo impulso (Figura 12c, Figura 13 e 14).

A seguito di un test a caduta, acquisiti i dati tramite la scheda e poi il computer (Figura 6), è possibile visualizzare dei grafici che, oltre a dare una visione sinottica molto significativa, permettono di registrare dei dati, fondamentali, da inserire nel **foglio di lavoro** di raccolta e di elaborazione (come mostrato nelle pagine seguenti).

Dal grafico di **Figura 13** le prime indicazioni e i primi calcoli:

1. nella fase iniziale l'andamento è pressoché lineare, permettendo di calcolare il valore del modulo di elasticità E ;
2. segue un tratto con pendenza in costante aumento, quindi con E crescente e corda sempre più rigida;
3. la curva di scarico non segue lo stesso percorso di quella di carico: dalla differenza delle superfici sottese alle curve si calcola la quantità di lavoro assorbita in plasticità/viscosità (irreversibile) e quella elastica (reversibile).





Nel grafico di **Figura 14**, trattandosi di una corda, con struttura non isotropa (calza + trefoli + fili elementari), vengono utilizzati l'**Allungamento A** e la **Forza F** (al posto dello **Sforzo σ** e della **Deformazione ϵ**).

Ma negli sviluppi successivi, dove sarà necessario inserire la **Sezione Efficace**, saranno fatte le necessarie modifiche ed equivalenze.

Sempre nel grafico di **Figura 14**, in modo penetrante e chiaro, si misurano diversi parametri, fra cui il **Tempo di sfasamento**:

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

uno dei più importanti fra quelli ricavabili dalle prove a caduta.

Si ottiene dal confronto fra curva **Allungamento/Tempo** (verde) e curva **Allungamento/Forza** (rossa): è l'intervallo che intercorre fra il tempo in cui si raggiunge la **Forza massima** e, successivamente, l'**Allungamento massimo**.

Questo tempo, di alcuni **millisecondi**, è una misura legata alla **Viscosità**, cioè al decadimento, a seguito dello choc subito, dei polimeri che costituiscono i fili elementari (quindi al decadimento della corda stessa).

E' fondamentale calcolare anche l'**Allungamento Massimo A_0** , la **Forza Massima F_0** e il **Periodo T** .

Dopo di ciò si può procedere nella compilazione del **Foglio di Lavoro**, come mostrato nelle immagini che seguono, dalle quali è possibile ricavare, in modo organico, le diverse categorie di dati per elaborazioni, ricerche e valutazioni (come esemplificato nel capitolo successivo).

Corda Beal Booster III 9,7 mm Nuova H100 cm L3370 mm Temperatura 13°C Choc 01		
Descrizione Parametro	Simboli	Valori
Lunghezza campione fuori tutto (gasse 6 cm) pretiraggio 140 kgp (m)	$l_0 =$	3,370
Fibra calza		Nylon 6
Fibra anina		Nylon 6
Forza alla rottura senza nodi (kgp)	$F_r =$	1862
Tenacità=sforzo specifico alla rottura (N/tex)	$\sigma_{sr} =$	0,47
Densità (g/cm ³)	$\rho =$	1,14
Densità lineare (kg/m)	$\rho_l =$	0,039
Sezione efficace (m ²)	$S_e =$	3,40915E-05
Diametro efficace (mm)	$d_e =$	6,6
Lavoro svolto nel primo ciclo fino al massimo allungamento (J)	$\Delta L_{carico} =$	3212
Lavoro svolto nel primo ciclo dal massimo allungamento a zero (J)	$\Delta L_{scarico} =$	749
Lavoro dissipato dalla parte viscosa del mezzo (J)	$\Delta L_{dissipazione} =$	2463
Percentuale di dissipazione ($\Delta L_{dissipazione} / \Delta L_{carico} \cdot 100$)	% dissipazione =	77
Peso massa cadente (kgp)	$P =$	140
Altezza caduta libera (m)	$H =$	1
Energia prodotta dalla caduta libera + massimo allungamento (J)	$\Delta L_{caduta+allung.} =$	3225
Lavoro dissipato per attrito (J)	$\Delta L_{attrito.} =$	0
Percentuale lavoro dissipato per attrito (calore) (%)	$\Delta L_{att} / \Delta L_{cad+all} =$	0
Modulo angolare m di $F_{(kgp)} = m A_{(mm)} + q$	$m =$	0,42
Modulo di elasticità iniziale (Hook-Young) (GPa)	$E =$	0,40

Forza massima primo ciclo (kgp)	$F_0 =$	524
Allungamento massimo primo ciclo (m)	$A_0 =$	1,348
Sfasamento $F_0 - A_0$ (s)	$\delta_{\text{tempo}} =$	0,046
Periodo: tempo necessario per completare un ciclo completo (s)	$T =$	0,967
Pulsazione: $360^\circ/\text{periodo}$ (gradi/s)	$\omega =$	372
Pulsazione: $2\pi/\text{periodo}$ (radianti)	$\omega =$	6,50
Sfasamento $F_0 - A_0$ (gradi)	$\delta_{\text{gradi}} =$	17,1
Sfasamento $F_0 - A_0$ (radianti)	$\delta_{\text{radianti}} =$	0,299
Sforzo massimo ($F_0/\text{sezione efficace}$) nel primo ciclo (GPa)	$\sigma_0 =$	0,151
Deformazione massima (A_0/l_0) nel primo ciclo (adimensionale)	$\epsilon_0 =$	0,400
Coseno di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\cos \delta =$	0,956
Senso di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\sin \delta =$	0,294
Tangente di δ (sfasamento F_0 e A_0) espresso in radianti	$\tan \delta =$	0,308
Modulo complesso (σ_0/ϵ_0) (GPa)	$E^* =$	0,377
Modulo elastico (in-fase reversibile) ($E^*\cos\delta$) (GPa)	$E' =$	0,360
Modulo viscoso (fuori-fase irreversibile) ($E^*\sin\delta$) (GPa)	$E'' =$	0,111
Rapporto di dissipazione	$E''/E' = \tan \delta$	0,308
Coefficiente di viscosità (ω in radianti)	$\eta = E''/\omega$	0,017
Velocità d'impatto (alla fine della caduta libera) (m/s)	$v_0 =$	4,43
Velocità di deformazione v_0/l_0 (s^{-1})	$v_d =$	1,31

E' estremamente evidente che - una volta compilato questo **Foglio di Lavoro** - le possibilità di confronto, integrazione, sommatorie, valutazioni statistiche (e tanto altro ancora) sono numerose e tutte tali da mettere in rilievo i molteplici aspetti che descrivono compiutamente le caratteristiche e la resistenza dei campioni sottoposti a test. Si spazia dalla resistenza, alla viscosità, alla capacità di dissipare energia, all'influenza della velocità di deformazione, e molto altro.

Questo vale, come già detto, per una corda; ma è applicabile anche a qualsiasi altro materiale o attrezzo, per i quali è sempre possibile compilare una scheda come quella soprastante.

Velocità di deformazione

Questa “velocità” non ha le dimensioni di una velocità classica (s/t), in quanto rappresenta la velocità con cui si allunga un campione di lunghezza unitaria. Lo scopo di questa definizione sta nel fatto che in tal modo i risultati che si ottengono sono confrontabili.

La relazione che esprime la velocità di deformazione è:

$$V_d = \frac{V_0}{l_0} \quad (2)$$

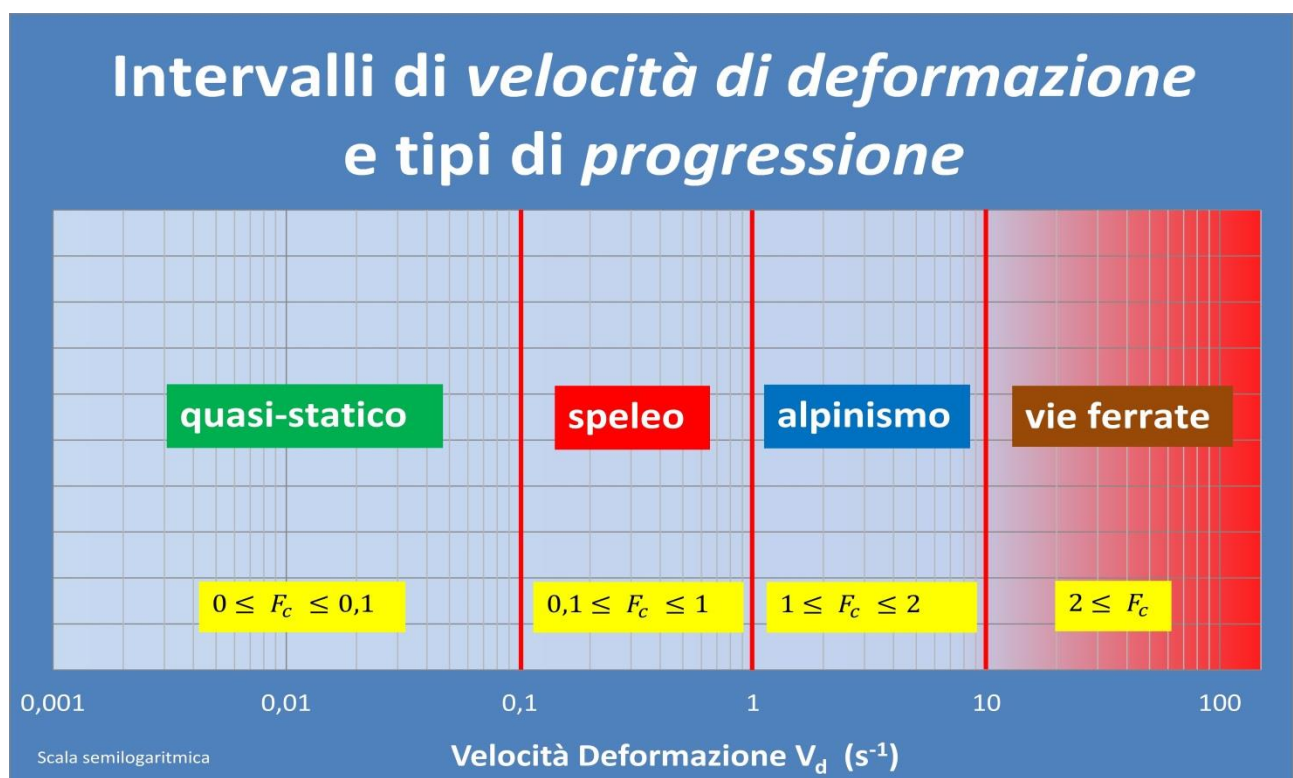
dove:

- V_d = velocità di deformazione (s^{-1}) inverso del tempo
- $V_0 = \sqrt{2 \cdot h \cdot g}$ = velocità del peso cadente al momento dell’impatto con il campione
- h = altezza di caduta libera del peso
- l_0 = lunghezza del campione a riposo

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

Nell’immagine soprastante gli intervalli di velocità di deformazione in corrispondenza con l’entità delle sollecitazioni compatibili con le caratteristiche dei vari tipi di progressione. Nell’area “quasi-statico” agiscono le sollecitazioni del dinamometro a trazione lenta con $V = 0,006 m/s$; nelle altre sono presenti solo le sollecitazioni impulsive prodotte con la Torre a caduta.

Per valutare l’influenza della velocità di deformazione i grafici che derivano dai test sulla Torre si sovrappongono a quest’ultima immagine.



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

$$V_d = \sqrt{F_c \cdot \frac{2g}{l_0}} \quad (3)$$

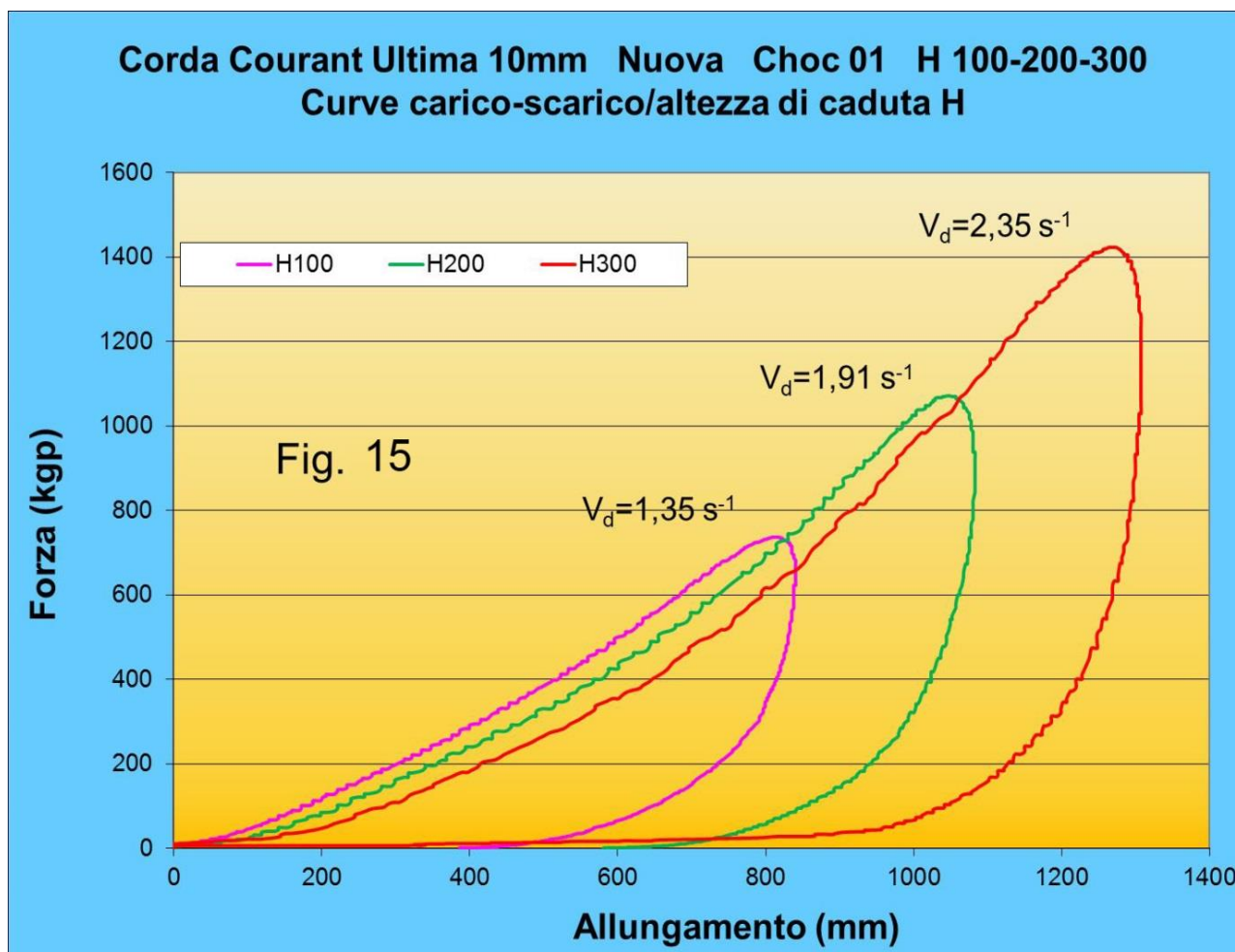
Per classificare una sollecitazione si può utilizzare sia l'uno sia l'altra. Il fattore di caduta è d'interpretazione più rapida. La velocità di deformazione deve essere utilizzata per una più corretta e confrontabile analisi dei risultati.

ALCUNI ESEMPI D'ANALISI DEI TEST CON TORRE DI CADUTA

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

Altezza di caduta crescente, curve di carico/scarico, modulo di elasticità, superfici sottese/energia, energia dissipata

In **Figura 15** i grafici **Forza/Allungamento** di campioni di corda statica nuova, lungo 3000 mm, al variare dell'altezza di caduta del peso H (100 cm, 200 cm, 300 cm).



In tutte le tre curve, la pendenza iniziale va aumentando: i campioni s'irrigidiscono con l'aumentare dell'allungamento.

Essendo le aree sottese alle curve:

1. di carico equivalenti all'energia conferita al campione con la caduta del peso,
2. di scarico equivalenti all'energia elastica propria del campione,

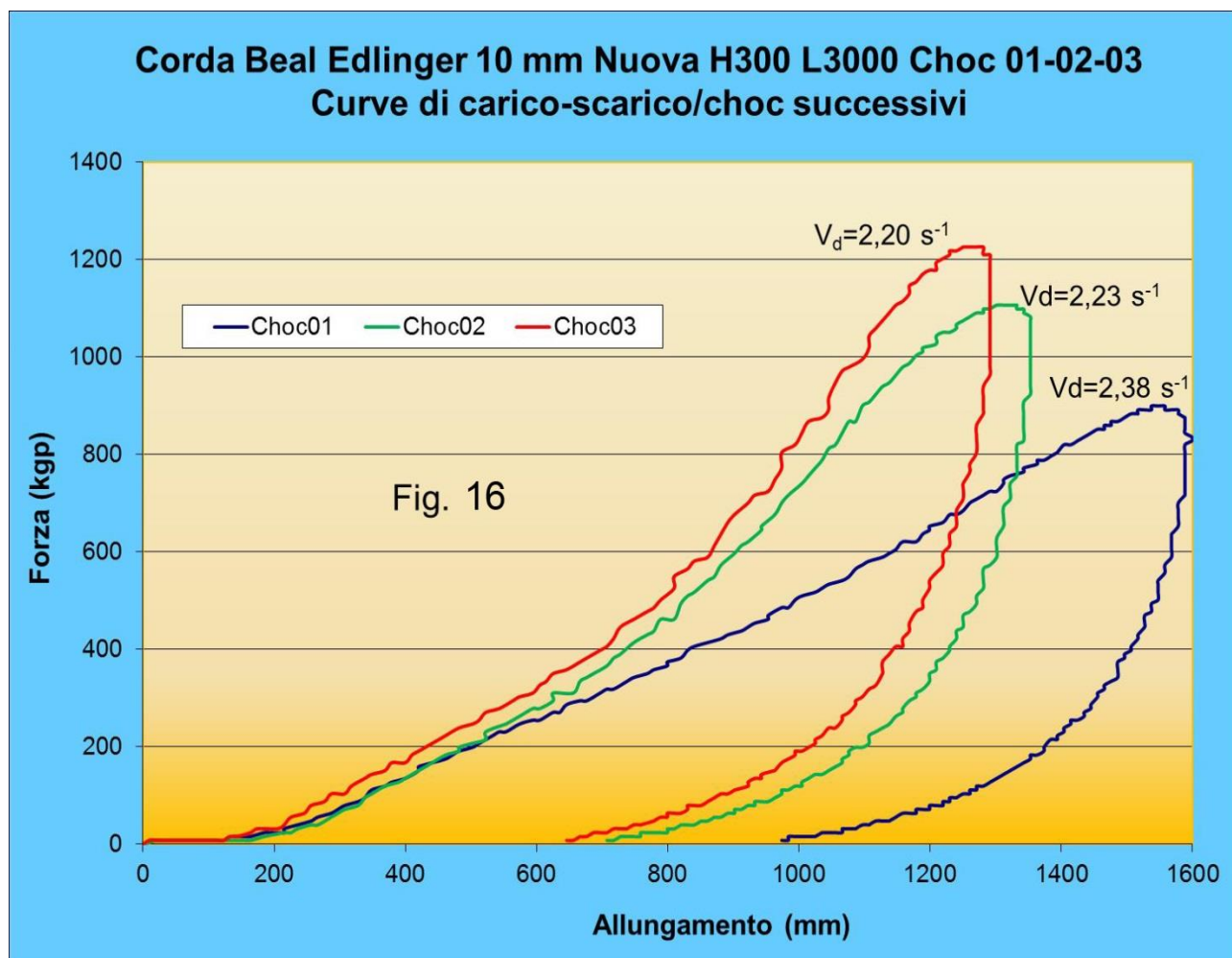
risulta che le superfici contenute all'interno delle curve intere sono rappresentative dell'energia dissipata in plasticità/viscosità irreversibile.

E' dunque evidente che - tanto maggiore è l'altezza di caduta del peso, tanto più elevata è l'energia in gioco e la velocità di deformazione – tanto più consistente è il “decadimento” di una corda. L'aumento della velocità di deformazione incide nella perdita di capacità di assorbire lavoro.

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

Successione di choc equivalenti: variazione del Modulo d'elasticità, quantità decrescente di energia dissipata per trasformazione viscosa superficie compresa fra curva di carico e scarico

In **Figura 16** i grafici **Forza/Allungamento** di un campione di corda dinamica usata, lungo 3000 mm, per tre choc in successione con una caduta del peso da 300 cm d'altezza.



Con il succedersi degli choc la corda diventa sempre più rigida (aumenta la pendenza della curva di scarico); più netta la variazione fra Choc01 e Choc02.

Al primo choc la pendenza della curva di carico si mantiene pressoché costante: il Modulo d'elasticità non varia con l'allungamento. Questo non avviene più al secondo e terzo choc.

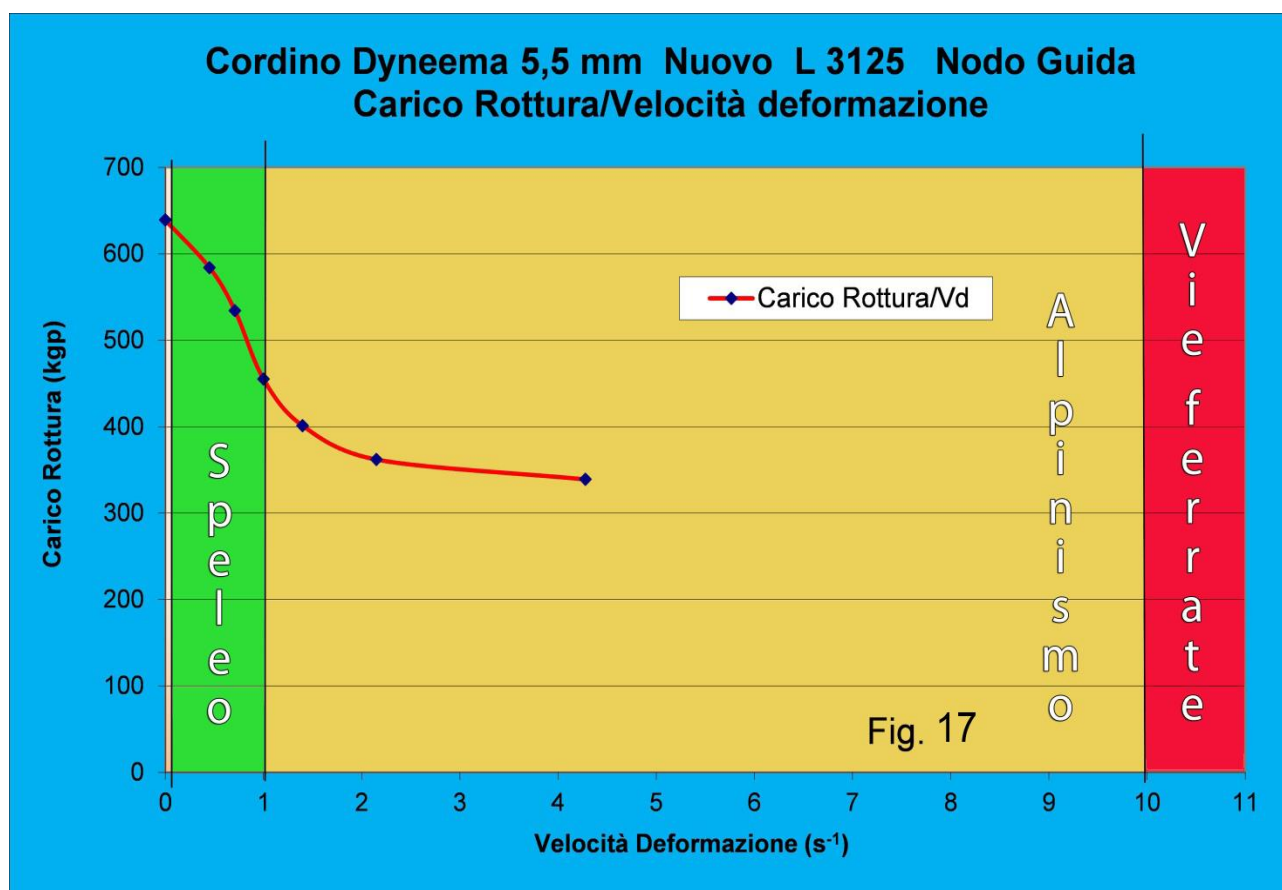
Con il primo choc l'energia dissipata per deformazione viscosa (plastica irreversibile) è maggiore. La superficie compresa fra curva di carico e scarico va diminuendo dopo ogni choc: sempre meno energia viene dissipata in modo irreversibile.

Cordino Dyneema 5,5 mm nuovo: Carico di rottura con nodo/Velocità di deformazione

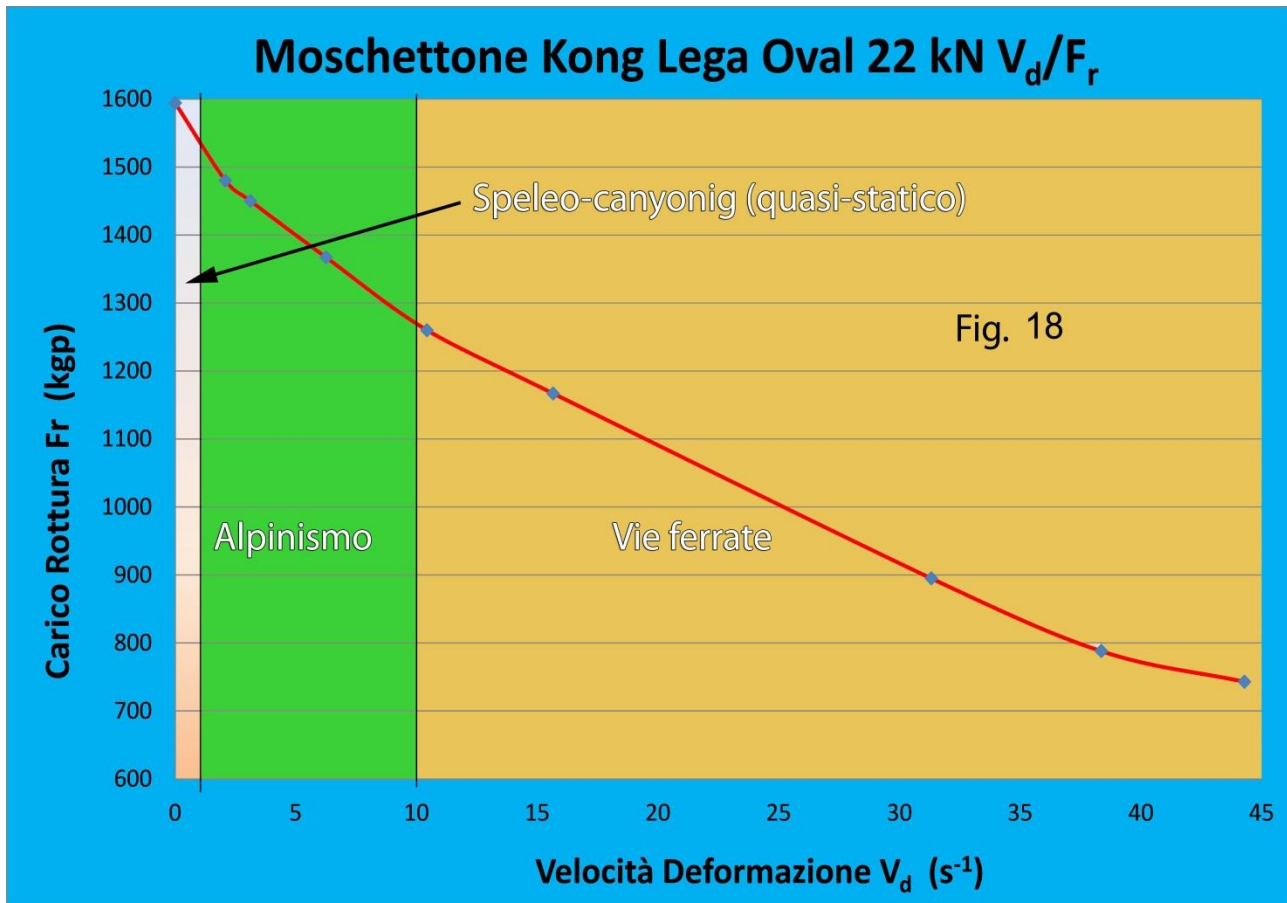
E' questo un caso (**Figura 17**) in cui la **Torre di caduta** mostra tutta la sua efficacia nel rilevare l'influenza della **velocità di deformazione** nel comportamento delle attrezzature speleo-alpinistiche e canyon.

Si mette infatti in evidenza come una corda di piccolo diametro (5,5 mm), costituita da una fibra estremamente rigida (Dyneema), annodata alle estremità (nodi guida), sia molto sensibile all'aumento della velocità di deformazione, dimezzandone il carico di rottura (su un campione di 3125 mm di lunghezza, cadute libere del peso fino ad oltre 4 m). Il primo valore di circa 640 kgp è stato ottenuto con trazione lenta (0,006 m/s).

Importante: gran parte della riduzione di F_r avviene con sollecitazioni proprie del campo speleo-canyonig, con valori nettamente più bassi di quanto richiesto per il limite inferiore (**LIR**) della **catena di sicurezza**. Se il cordino non fosse annodato avverrebbe esattamente il contrario!



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



Anche in questo caso (**Figura 18**), i test con varie altezze di caduta del peso mostrano l'influenza della **velocità di deformazione** nella diminuzione del carico di rottura di un moschettone in lega: tanto maggiore è V_d tanto più basso è F_r .

Comunque nel campo delle sollecitazioni **Speleo- canyonig** diminuisce al massimo del 4 %; mentre si riduce del 23 % nel campo **alpinistico**.

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

Coi **moschettoni in acciaio** l'aumento della V_d ha una trascurabile influenza negativa.

Da notare che gli stessi test a caduta su barre cilindriche isotrope di lega d'alluminio o acciaio avrebbero dato risultati opposti: all'aumentare di V_d sarebbe aumentato il carico di rottura (e anche la rigidità). Infatti è un fatto generalizzato che più si rende complessa l'architettura di un campione (moschettone rispetto a barra) più V_d ha un'influenza negativa su F_r .

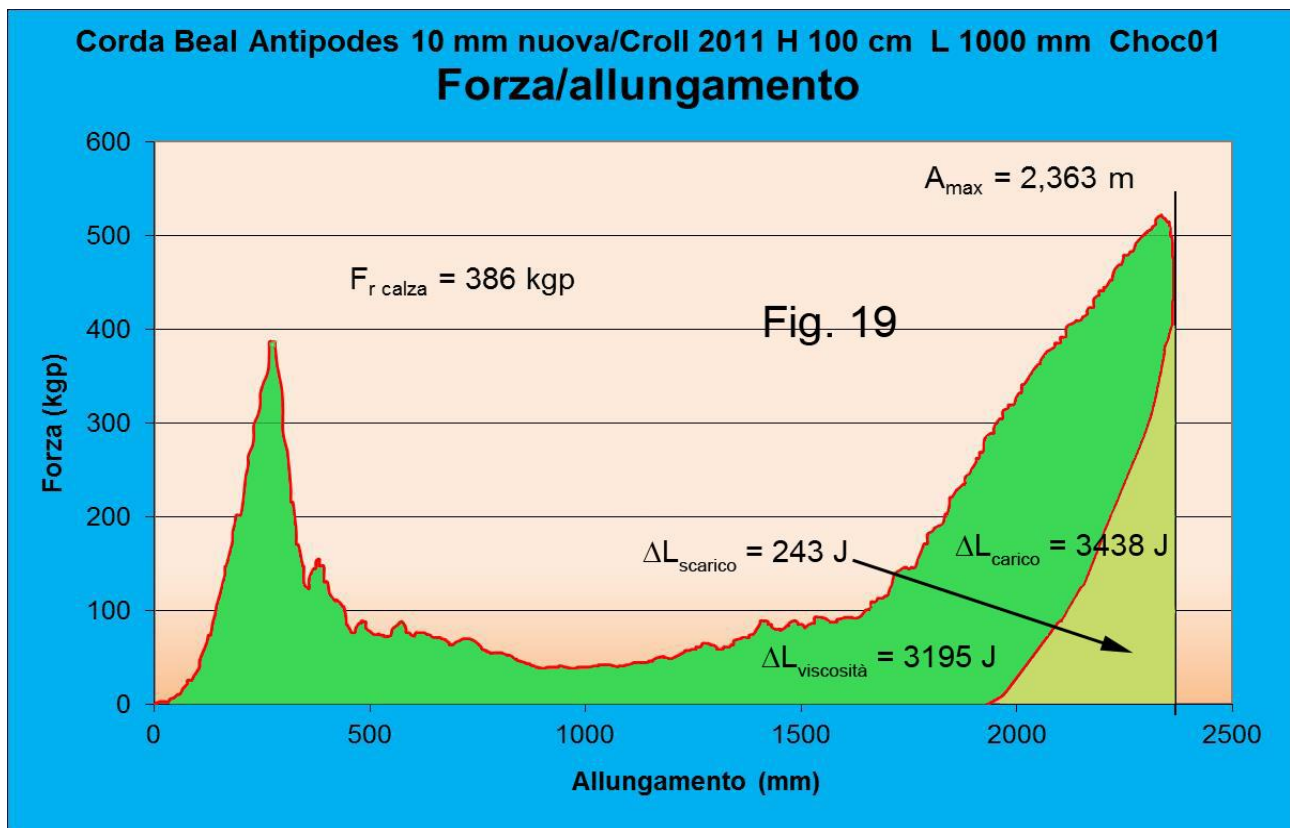
Bloccante/corda statica: carico di rottura calza, forza massima, allungamento massimo, energia assorbita

Nella **Figura 19** è rappresentato il grafico **forza/allungamento** di un test a caduta applicato a un bloccante Petzl Croll (anno 2011, con antiribaltamento) inserito in una corda statica. L'altezza della

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

Il grafico risulta molto dettagliato (la campionatura è al **millisecondo**, come in tutti gli altri casi esaminati), mettendo in risalto comportamenti e valori con le variazioni di F_r :

1. inizio con allungamento della corda secondo i criteri normali e nessun cedimento;
2. rottura della calza con quantificazione del valore relativo ($F_{r\text{ calza}} = 386 \text{ kgp}$);
3. trascinarsi della calza sui trefoli, con attrito e conseguente dissipazione d'energia ("dissipatore");
4. compattamento del grumo di calza con aumento della forza d'attrito fino all'esaurimento di tutta l'energia (velocità di allungamento uguale a zero);
5. rimbalzo verso l'alto con restituzione dell'energia elastica.



Risalta con chiarezza il motivo per cui un simile attrezzo, il cui carico di rottura dichiarato non supera qualche centinaio di kgp, è accettato all'interno della catena di sicurezza, dove il limite inferiore di resistenza (**LIR**) è di 1100 kgp: nel caso in cui sia sottoposto a una sollecitazione, raggiunta una forza F , intorno ai 300-500 kgp, lacera la sola calza (merito dell'antiribaltamento) che inizia a scorrere sui trefoli senza romperli (al massimo solo alcuni).

Con ciò si crea di fatto un "dissipatore" con forza d'attrito che si oppone alla sollecitazione del peso, dissipando lavoro (2506 J) che altrimenti andrebbe a proseguire l'allungamento della corda, che invece raggiunge un forza massima di appena $F_m = 523 \text{ kgp}$.

Se invece proseguisse l'allungamento, la corda potrebbe raggiungere un valore di forza massima F_m tale da:

1. romperla, nel nodo guida,
2. far ribaltare il cricchetto del bloccante con conseguente fuoriuscita della corda dalla gola.

Dopo la sollecitazione il bloccante si apre e può essere tolto facilmente dalla corda: non ha subito deformazioni e può essere riutilizzato in tutta sicurezza.

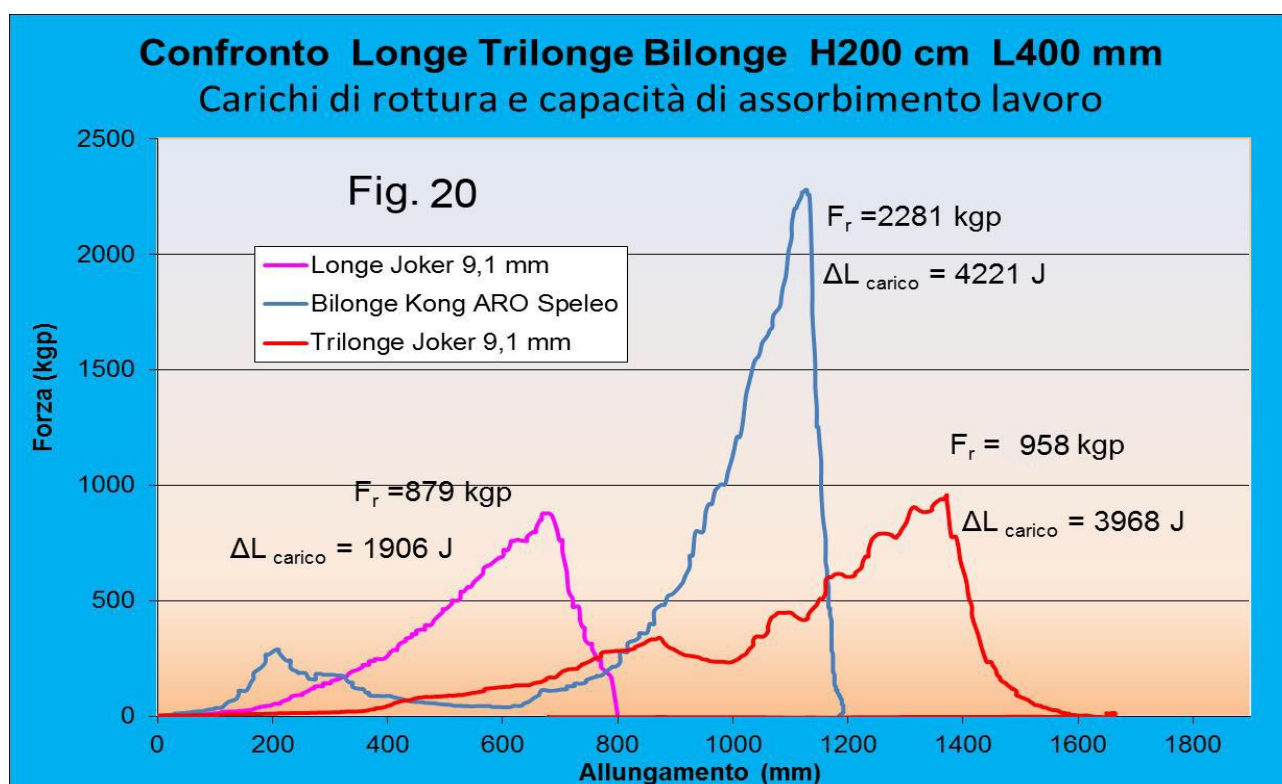
L'assenza nella curva, dopo la rottura della calza, di picchi secondari indica che nessun trefolo è stato rotto.

Confronto fra longe, bilonge (fettuccia confezionata) e trilonge: carichi di rottura e capacità d'assorbimento energia

La **Figura 20** riporta i grafici **forza/allungamento** di test a caduta (altezza H 200 cm) su longe e trilonge di corda (lunghezza L 40 cm), nonché su bilonge confezionata (fettuccia di dyneema).

Lo scopo è di mettere in risalto qual è l'attrezzo migliore, tanto per il carico di rottura F_r , che per la capacità di assorbire lavoro ΔL_{carico} (e quindi abbassare la forza massima prodotta dalla sollecitazione).

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



CONCLUSIONI

I test a caduta sono, dunque, molto penetranti e pregnanti, tanto risolutivi da risultare decisivi nella scelta delle attrezzature e del loro modo d'uso.

Ma è altrettanto vero che altri tipi di prove sperimentali e l'esperienza che viene dall'uso (in grotta, in montagna e in forra) possono essere ugualmente determinanti nel comprendere i limiti e i comportamenti delle attrezzature e dei materiali.

Ad esempio, rifacendoci al caso in **Figura 20**:

1. la longe Joker 9,1 mm è sconsigliabile perché, come tutte le corde dinamiche, avendo una calza delicata, si deteriora rapidamente;
2. la trilonge Joker 9,1, quando usata (cosa che non può essere evitata!), perde gran parte della capacità d'assorbire l'energia: il doppino che deve scorrere non rientra nel nodo madre.

PRECISAZIONI

La strumentazione utilizzata nella **Torre di Caduta** (sensore di distanza laser e cella di carico dinamica) può essere usata anche per trazioni **quasi-statiche** (trazione lenta $0,006\text{ m/s}$), sia nella stessa Torre, sia applicandola al dinamometro da banco orizzontale.

La trazione quasi-statica nella Torre (con verricello) permette di ottenere grafici che sono punto d'inizio di un'analisi che comprende tutta la gamma delle velocità di deformazione, da "Quasi-statico" a "Vie ferrate".

La strumentazione della Torre di Caduta applicata al dinamometro da banco consente di calcolare con esattezza i carichi di rottura F_r di attrezzature e materiali metallici, ad esempio moschettoni e ancoraggi, quando l'evento è istantaneo.

Ciò è dovuto al fatto che con la strumentazione della Torre (laser + cella di carico dinamica + scheda d'acquisizione) è possibile scegliere l'intervallo di campionatura, da 1 ms a 1480 ms .

E tanto più è piccolo questo intervallo tanto più è probabile cogliere il valore massimo (di forza o altro) in eventi che si concludono in pochi ms .

*Villa Scirca (Sigillo – PG)
18 aprile 2020*

*Salvatori Francesco
Coordinatore Gruppo di Studio
Materiali e Tecniche SNS CAI*