

LA TORRE CRASC: UN NUOVO STRUMENTO PER VALUTARE GLI EFFETTI DELLE SOLLECITAZIONI DINAMICHE SULLE ATTREZZATURE SPELEO-ALPINISTICHE E CANYONING

SALVATORI FRANCESCO¹, MENICHETTI MARCO¹, CELESTI SERGIO¹, PODERINI LUCA¹, BOCCHIO DOMENICO¹

Riassunto - E' stato progettato e realizzato un nuovo strumento per valutare gli effetti delle sollecitazioni veloci sulle attrezzature speleo-alpinistiche e canyoning: la Torre CRASC. Permette di valutare gli effetti del variare della velocità di deformazione sui tipici campioni delle predette attrezzature.

Parole chiave: Torre CRASC, forze e allungamenti, velocità deformazione, attrezzature speleo-alpinistiche canyoning.

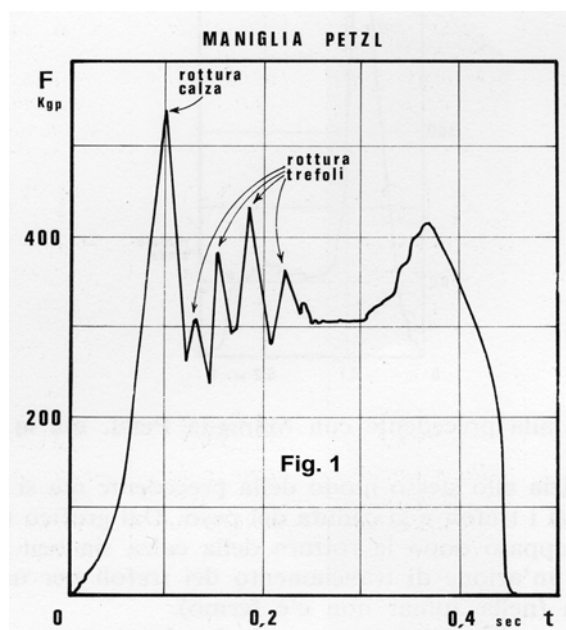
Abstract - It 'was designed and developed a new tool to assess the effects of fast stress on the climbing and canyoning caving equipment: the Tower CRASC. Allows you to evaluate the effects of varying the strain rate on typical samples of the above equipment.

Keywords: Tower CRASC, strength and elongation, deformation speed, equipment caving-climbing or Canyoning.

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, al variare della velocità di deformazione del campione sottoposto a prova. A questo scopo la Barra di Hopkinson (Anghileri M., Castelletti L., Milanese A., Moretti G., 2009) ha svolto un ruolo fondamentale nel campo del controllo dei comportamenti dei materiali utilizzati nella produzione automobilistica, aerea, degli esplosivi, degli sport a forte dinamicità.

Ma la Barra di Hopkinson, come le altre macchine di concezione simile ma più evolute (impattatori, misuratori di spostamento laser), può essere utilizzata solo nel caso di campioni a struttura omogenea lineare e di piccole e piccolissime dimensioni, quindi non utilizzabile nel campo di nostro interesse dove gli strumenti sottoposti a test hanno dimensioni rilevanti (anche di alcuni metri come nel caso di corde) e a struttura complessa, da valutare quindi nel suo insieme (si pensi ad esempio a moschettoni, bloccanti e corde annodate in vario modo).

Ad onor del vero ricerche sui comportamenti di vari attrezzi in condizioni dinamiche sono state fatte anche negli anni ottanta presso il Centro Nazionale di Speleologia "Monte Cucco" di Costacciaro (Salvatori et al., 1984; Salvatori et al., 1988; Salvatori et al., 1989). Furono testati bloccanti come le maniglie (fig. 1) su corde, longe, corde annodate, dissipatori, altro. Ma le curve ottenute, vista la variabilità del

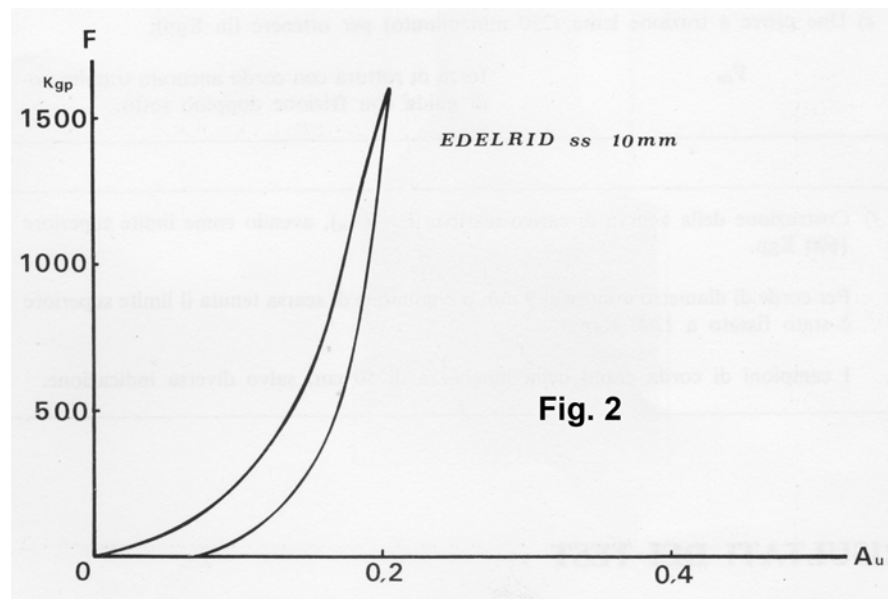


Coefficiente di Elasticità in funzione degli allungamenti, sono sempre state $F = f(t)$ (forza in

¹ Centro Ricerche sulle Attrezzature Speleo-alpinistiche e Canyoning CRASC - CENS Loc Calcinaro 7/A 06021 COSTACCIARO PG; Gruppo Lavoro Materiali della Scuola Nazionale di Speleologia del C.A.I.

funzione del tempo) e questo ha comportato l'impossibilità concreta di valutare parametri fondamentali come l'energia in gioco, il lavoro alla rottura (eventuale), la funzione che definisce le variazioni del coefficiente di 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. Tutto ciò può essere valutato solo ottenendo sperimentalmente curve $F = f(A)$ (forza in funzione dell'allungamento); e non è facile registrare gli allungamenti in condizioni di sollecitazioni veloci (sulle attrezzature speleo-alpinistiche, s'intende!). Come non è facile fare dei test con velocità di deformazione elevata se non realizzando macchine molto costose e di difficile gestione (pistoni pneumatici che si comportano come dei veri e propri cannoni o masse spinte da campi elettromagnetici) oppure, con minor impegno, sfruttando la forza di gravità con prove con caduta di un peso.

Sempre negli anni ottanta nei laboratori del CNS "Monte Cucco" furono effettuate delle prove su corde che portarono alla definizione di curve $F = f(A)$ (forza in funzione dell'Allungamento) ma ottenute in condizioni di trazione lenta nel dinamometro da banco (fig. 2) con velocità d'avanzamento del pistone di 0,006 m/s, tipica velocità delle sollecitazioni quasi-statiche. In tal caso furono registrate le variazioni del coefficiente d'elasticità e



l'energia necessaria per portare la corda ad un certo allungamento (non alla rottura). Fu registrato che il percorso di carico non coincideva con il percorso di scarico della forza. Calcolando le aree sottese alle due curve si ottenne il lavoro necessario a deformare la corda fino ad un certo valore di forza e quanto lavoro era restituito con la restituzione della parte elastica della deformazione. La differenza fra le due aree ha dato indicazioni quantitative sull'entità delle deformazioni permanenti. Ma tutto questo, come già affermato in precedenza, in condizioni di trazione lenta (quasi-statiche) e quindi senza dare risposte in merito ai comportamenti della corda con velocità di trazione più elevate.

Sempre nel campo speleo-alpinistico e canyoning per tutti gli anni compresi fra il 1990 e il 2010 non si è avuta notizia di ricerche che abbiano avuto come fine di mettere in evidenza l'influenza delle variazioni della velocità di sollecitazione nelle caratteristiche delle attrezzature. Anche presso il laboratorio di Costacciaro i test sono stati effettuati, come in precedenza, in condizioni quasi statiche. Costruttori e rivenditori hanno presentato le proprie proposte allegando unicamente dati di resistenza e di deformabilità in condizioni di trazione lenta (salvo poche eccezioni "dinamiche", ma senza l'apporto delle indispensabili valutazioni sugli allungamenti, come le valutazioni empiriche proprie dei test sulle corde con l'Apparecchio Doderò o come le dimostrazioni didattiche effettuate in certe strutture con il solo ausilio di soli dinamometri).

La Torre CRASC – La Torre CRASC nasce all'inizio del 2011 proprio dall'esigenza di adeguare i test sulle attrezzature speleo-alpinistiche e canyoning all'attuale livello delle prove sui materiali in generale, dove le misurazioni avvengono a velocità di deformazione variabile e la registrazione dei valori di forza è sempre messa in relazione con la registrazione dei valori degli allungamenti. Si

vuole anche dare una risposta precisa e quantitativa a quanti si domandano che cosa accadrebbe alle proprie attrezzature quando sopravvenisse l'incidenza di una sollecitazione veloce, magari a seguito del cedimento di un elemento della catena di sicurezza con conseguente caduta.

La Torre è costituita da una trave verticale autoportante di 9 m di lunghezza, di dimensioni e forma tale da dare rigidità al sistema. Tale rigidità è resa estrema dal fatto che la trave è solidamente e ripetutamente ancorata ad un muro dello spessore di 120 cm. Ad essa sono applicati gli strumenti di misura delle forze e degli allungamenti, un sistema di sollevamento e sganciamento di un peso, di una vasca con sabbia per accogliere senza urti l'eventuale massa cadente, un sistema di prolunghie rigide dell'attacco della cella di carico. Queste prolunghie permettono di realizzare una vasta gamma d'altezze di caduta.

Com'elemento di propulsione delle masse sollecitanti si usa la forza di gravità i cui parametri sono esattamente noti dalle leggi della fisica dei corpi in movimento. Nella fattispecie si tratta di un peso con massa variabile, lasciato libero di cadere ma vincolato al campione in prova (test a caduta). Per ora non è previsto alcun elemento accelerante (ad esempio delle molle compresse, presenti in certe macchine di dimensioni più ridotte). L'altezza di caduta h può raggiungere gli 8,5 m. Le velocità di deformazione all'impatto V_d che possono essere prodotte nella torre, considerate le dimensioni dei vari oggetti della progressione speleo-alpinistica canyoning, variano da $0,1 \text{ s}^{-1}$ a 100 s^{-1} . Si ricorda che la velocità di deformazione V_d all'impatto è data da:

$$V_d = \frac{V_0}{l_0}$$

dove V_0 è la velocità all'impatto con il campione e l_0 è la lunghezza dello stesso campione a riposo.

V_d ha le dimensioni dell'inverso del tempo.

E' importante rilevare che nei test a caduta la velocità d'allungamento (e quindi di deformazione) non è costante ma segue l'andamento riportato in fig. 3.

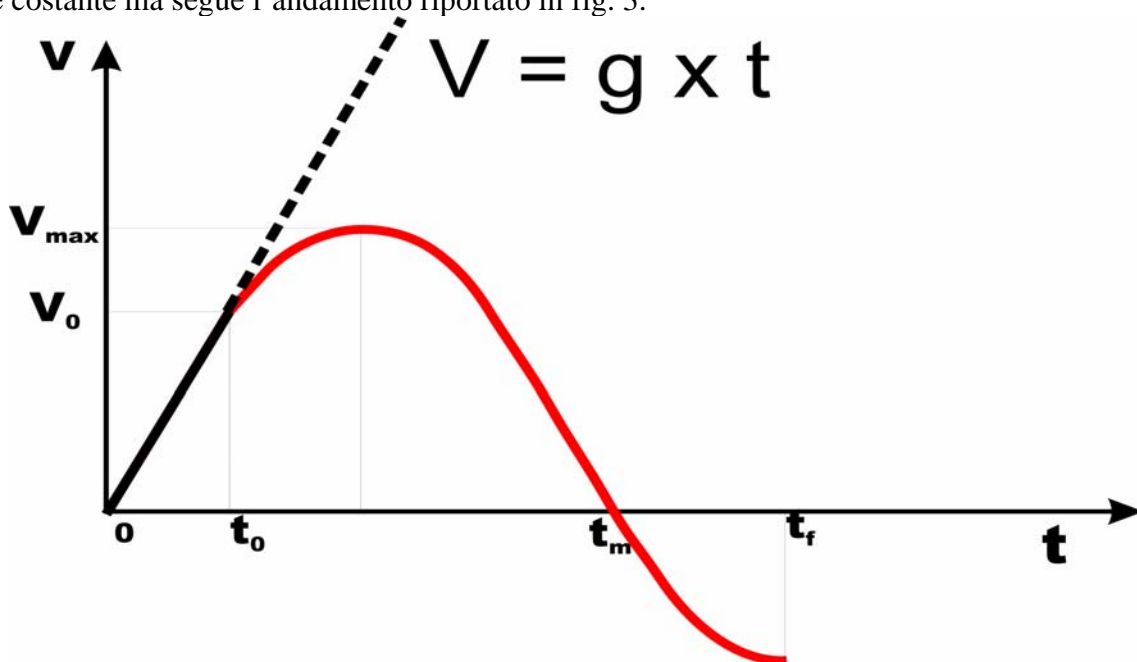


Fig. 3

Dal tempo 0 al tempo t_0 il peso cade seguendo le leggi gravitazionali ed aumenta la sua velocità in base alla relazione

$$V = g \times t$$

Al momento dell'impatto la velocità è:

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

quindi non dipende dal peso, ma solo dall'altezza di caduta.

Dopo l'impatto con il campione entra in gioco il vincolo esercitato dal campione stesso: ora vale il Principio di D'Alambert (Feodosev, 1977) e il modello che rappresenta matematicamente il fenomeno è dato dall'equazione delle oscillazioni armoniche semplici (Salvatori, 1988), ma sotto l'ipotesi che il campione sottoposto a test mantenga un coefficiente di elasticità costante (cosa del tutto improponibile nella realtà dei fatti).

$$V_a = \sqrt{Xl_0Pg + V_0^2} \times \cos(\omega t + \varphi)$$

dove:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{Xlm}} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{2h}{Xl_0P + 2h}}$$

V_a = velocità d'allungamento del campione

X = coefficiente d'elasticità del campione (costante)

l_0 = lunghezza del campione a riposo

P = peso

g = accelerazione di gravità

m = massa

Da notare che il massimo valore della velocità d'allungamento V_a non è pari a V_0 ma superiore:

$$V_{a\max} = \sqrt{Xl_0Pg + V_0^2}$$

come riportato in fig. 3. Pertanto una prova a caduta è da configurarsi come un test a velocità variabile, da un massimo stabilito dall'altezza di caduta h a zero quando il peso è arrestato (se prima non sopravviene un cedimento). Questo comporta una maggiore difficoltà d'elaborazione dei dati, ma al tempo stesso può essere ritenuta una prova molto aderente alle condizioni reali di sollecitazione nel caso della progressione speleo-alpinistica canyoning.

Si fa notare ancora una volta, ed è fondamentale da comprendere, che la velocità d'allungamento e quindi di deformazione dipende unicamente dall'altezza di caduta h e non dalla massa del peso, la quale invece influenza solo la quantità d'energia in gioco secondo le relazioni:

$$E_{totale} = P \times (h + A_{\max})$$

$$E_0 = \frac{1}{2} \times mV_0^2$$

E_0 = energia cinetica al momento dell'impatto del peso sul campione

A_{\max} = allungamento massimo del campione

L'allungamento massimo è calcolabile solo a seguito di test sperimentali, ma solo nel caso che si dispone di un sistema per la sua misurazione. Il valore dell'energia totale in gioco è dunque facilmente ricavabile.

La velocità di deformazione nella Torre CRASC – Poiché la velocità d'allungamento (e quindi di deformazione) varia da V_0 ad un massimo e quindi ad un minimo (al momento dell'arresto del peso o del cedimento del campione) occorre definire che cosa s'intende per velocità di deformazione di un dato test. Essa è definita dal valore:

$$V_d = \frac{V_0}{l_0}$$

Questo valore è quello utilizzato per caratterizzare la dinamicità della prova a caduta ed è determinato, lo ricordiamo ancora una volta, dalla sola altezza di caduta e dalla lunghezza del campione a riposo.

I contenuti energetici del test sono invece determinati dalla massa del peso, dall'altezza di caduta e dalla misura dell'allungamento massimo (con un campione molto elastico l'energia in gioco aumenta).

Fattore di caduta – Nei primi anni settanta fu indicato da ambienti alpinistici un indice per valutare la dinamicità di una sollecitazione: il Fattore di Caduta F_c . Tuttavia questo è un parametro che non definisce correttamente la sollecitazione dinamica, anzi tende a fuorviare da una corretta interpretazione qualitativa e quantitativa del fenomeno “caduta”, soprattutto alla luce di quanto oramai affermato nel campo dei test sui materiali in genere dove risalta nettamente come la velocità di deformazione dei campioni cambi, anche radicalmente, le caratteristiche di tenuta e d'elasticità dei materiali, sia metallici sia plastici sia sostanze visco-elastiche come le catene di polimeri. Per comprendere quanto il Fattore di Caduta sia insufficiente per definire una sollecitazione dinamica si ricorda che esso nasce dalla relazione (Salvatori, 1988) che dà la forza massima F_m in funzione dell'altezza di caduta h , del peso P , del coefficiente d'elasticità X , della lunghezza del campione a riposo l_0

$$F_m = P + \sqrt{P^2 + \frac{2hP}{Xl_0}}$$

L'approssimazione proposta dagli ambienti della ricerca alpinistica chiede di ritenere P (forza peso in condizioni statiche) un valore trascurabile rispetto a F_m , l'altezza di caduta del peso senza comprendere l'allungamento massimo e il coefficiente di elasticità X una costante; da cui consegue:

$$F_m \cong \sqrt{\frac{2hP}{Xl_0}}$$

e quindi:

$$F_m \cong \sqrt{\frac{2P}{X} + \frac{h}{l_0}} \cong \sqrt{\frac{2P}{X}} + \sqrt{\frac{h}{l_0}}$$

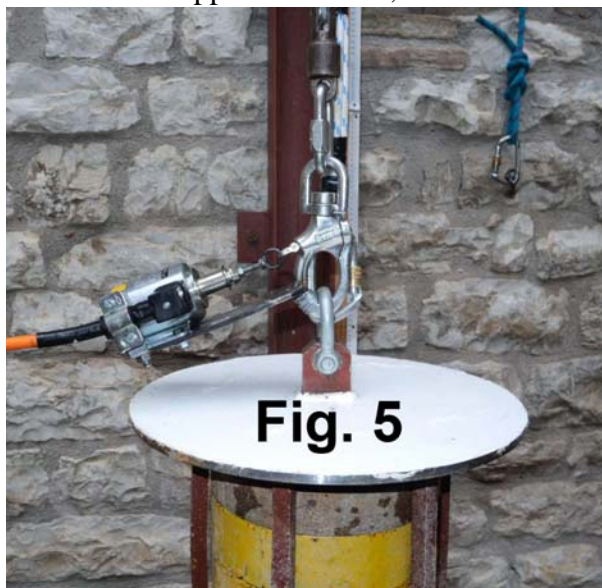
$$\frac{h}{l_0} = F_c$$

Tutte queste approssimazioni e valutazioni errate portano a far considerare il fattore di caduta un parametro “dinamico” molto impreciso e pertanto da superare con un indice che caratterizzi nella sostanza e nei numeri le caratteristiche di una deformazione dinamica.

Velocità di deformazione e Fattore di caduta – La relazione fra fattore di caduta e velocità di deformazione è data da:

$$V_d = \sqrt{Fc \times \frac{2g}{l_0}}$$

che mette in evidenza, fra l'altro, come il fattore di caduta debba essere ricalcolato per combaciare, al netto delle approssimazioni, con la velocità di deformazione.



La strumentazione della Torre CRASC

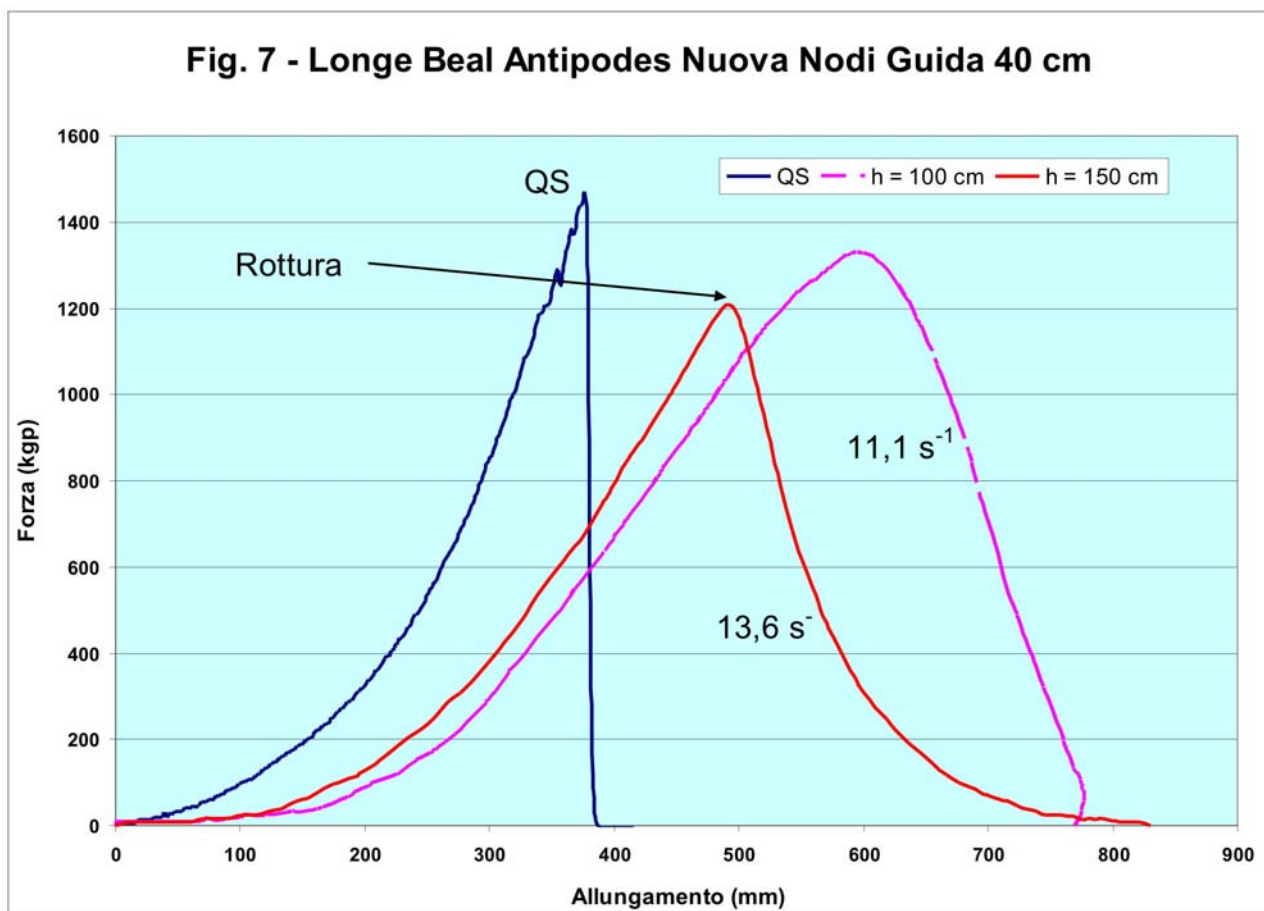
Come già detto la Torre è costituita da una trave rigida autoportante alto 9 m, dove ad una classica cella dinamometria, con caratteristiche “dinamiche” e quindi con risposta immediata nella lettura e nella trasmissione dei dati, è stato abbinato un sensore di spostamento laser puntato sul peso cadente (fig. 4). La cella ha una precisione di 0,1 kgp e una portata massima di 5000 kgp. La velocità d’acquisizione è di 1 ms. Il sensore di spostamento laser ha un campo di lettura compreso fra 0,5 m e 10,0 m, con precisione 0,001 m e tempo di risposta di 10 ms. Il peso può variare da 50 kgp a 140 kgp ed ha nella parte superiore un piatto di grandi dimensioni (fig. 5) per facilitare la lettura del laser senza interferenze visive. La consistenza delle masse periferiche del piatto stabilizza la caduta che viene in modo uniforme e senza inclinazioni. E’ stato calcolato che l’attrito nell’aria durante la caduta produce effetti ritardanti ampiamente trascurabili rispetto alla precisione degli strumenti presenti nella Torre. Lo sgancio del peso avviene tramite un moschettone da spinnaker con apertura comandata da un elettromagnete. A seguito del sistema di sollevamento del peso messo in atto nella Torre (verricello elettrico con cavo su carrucola) la linea di caduta del



peso non coincide con l'asse verticale passante per il punto di aggancio nella cella dinamometrica. Ma anche questo non comporta errori non compresi nell'intervallo di imprecisione degli strumenti di misura. Tutti i dati sono inviati in una scheda d'acquisizione dedicata, che tramite un software anch'esso dedicato, invia i dati in un computer dove è possibile registrarli sotto forma di file ed elaborarli graficamente in tempo reale (fig. 6).

Le possibilità d'analisi della Torre CRASC

Grafici Forza/Allungamento – Il grafico di base nell'acquisizione dei dati è dato dalla curva $F = f(A)$ (forza in funzione dell'allungamento) che nella fig. 7 è riportato relativamente ad una longe in corda statica da 10,5 mm di diametro.



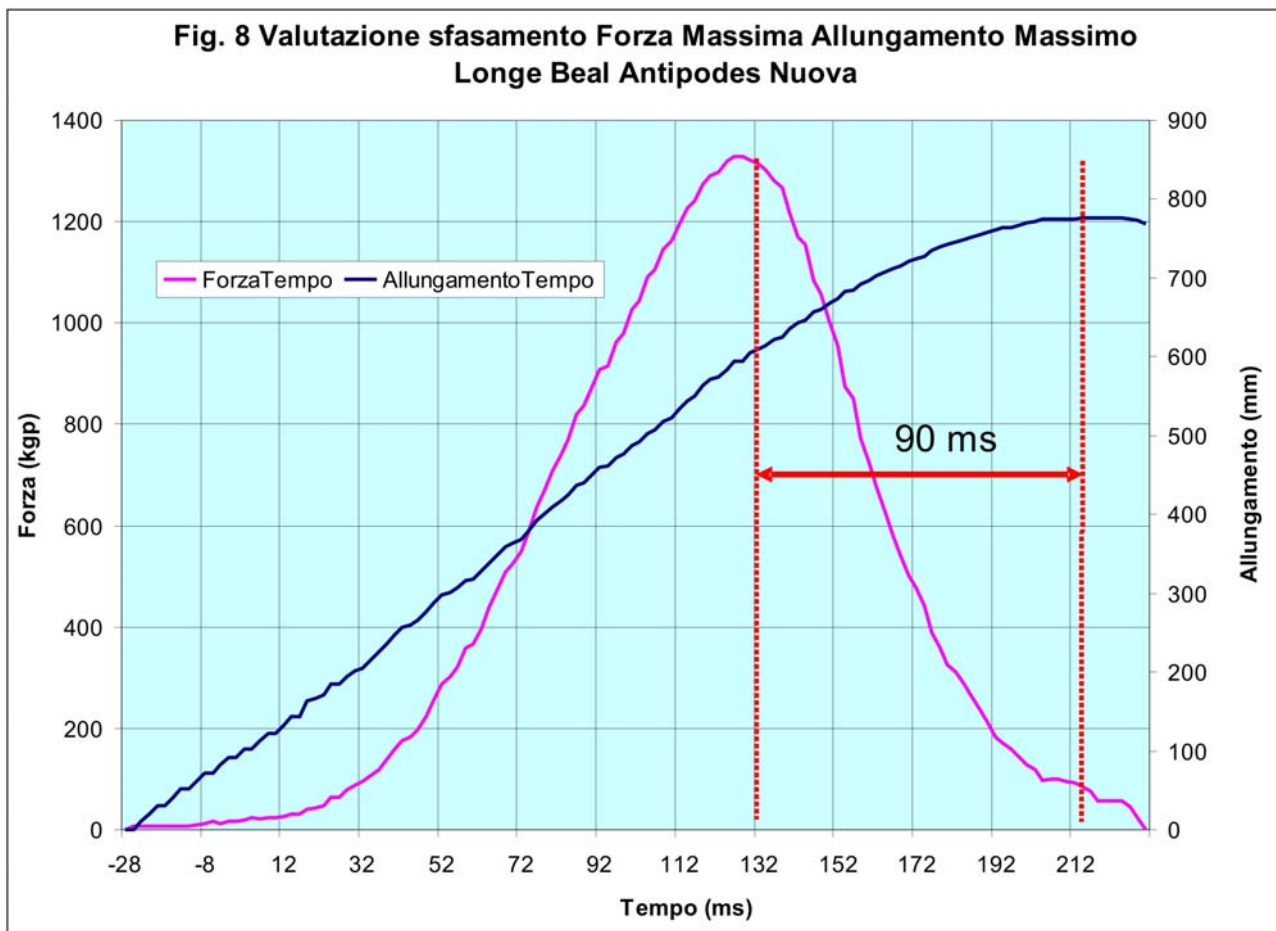
La curva "QS" è il tracciato relativo al grafico Forza/Allungamento con trazione quasi statica ($V_d = 0,015 \text{ s}^{-1}$). Le altre due curve si riferiscono allo stesso campione ma sollecitato con $V_d = 11,1 \text{ s}^{-1}$ (senza cedimento) e $V_d = 13,6 \text{ s}^{-1}$ (con rottura sul nodo).

Da questo grafico è possibile ricavare:

- Forza di Rottura F_r
- Forza massima registrata F_{max}
- Lavoro alla Rottura in condizioni quasi statiche (area sottesa alla curva)
- Lavoro fino all'allungamento massimo con $V_d = 11,1 \text{ s}^{-1}$ (area sottesa alla curva)
- Lavoro alla Rottura con $V_d = 13,6 \text{ s}^{-1}$ (area sottesa alla curva)
- Allungamenti reali e quindi energia totale in gioco
- Valutazioni comparative sul valore e la variazione dei coefficienti d'elasticità: la longe si mostra meno elastica in condizioni di trazione lenta per poi aumentare la sua rigidità con l'aumentare della velocità di deformazione)

- Valutazioni sul fatto che, in caso di non cedimento della longe, l'allungamento massimo non coincide con la forza massima (ritardo tipico dei materiali visco-elastici)
 - Costatazione che in condizioni quasi statiche il cedimento (sul nodo) è immediato e totale, mentre ad una velocità di deformazione ben più elevata il cedimento avviene gradualmente.
- Mai in precedenza era stato possibile ricavare da un test sperimentale tanti dati e tutti significativi ed innovativi.

Misurazione del coefficiente di viscosità – Con base il tempo si confronta l'evolversi della forza e del relativo allungamento. Risulta uno sfasamento fra il tempo che porta al raggiungimento della Forza Massima e dell'Allungamento Massimo. Nel caso specifico 90 ms (fig. 8), perché permette di calcolare il coefficiente di viscosità δ della longe.

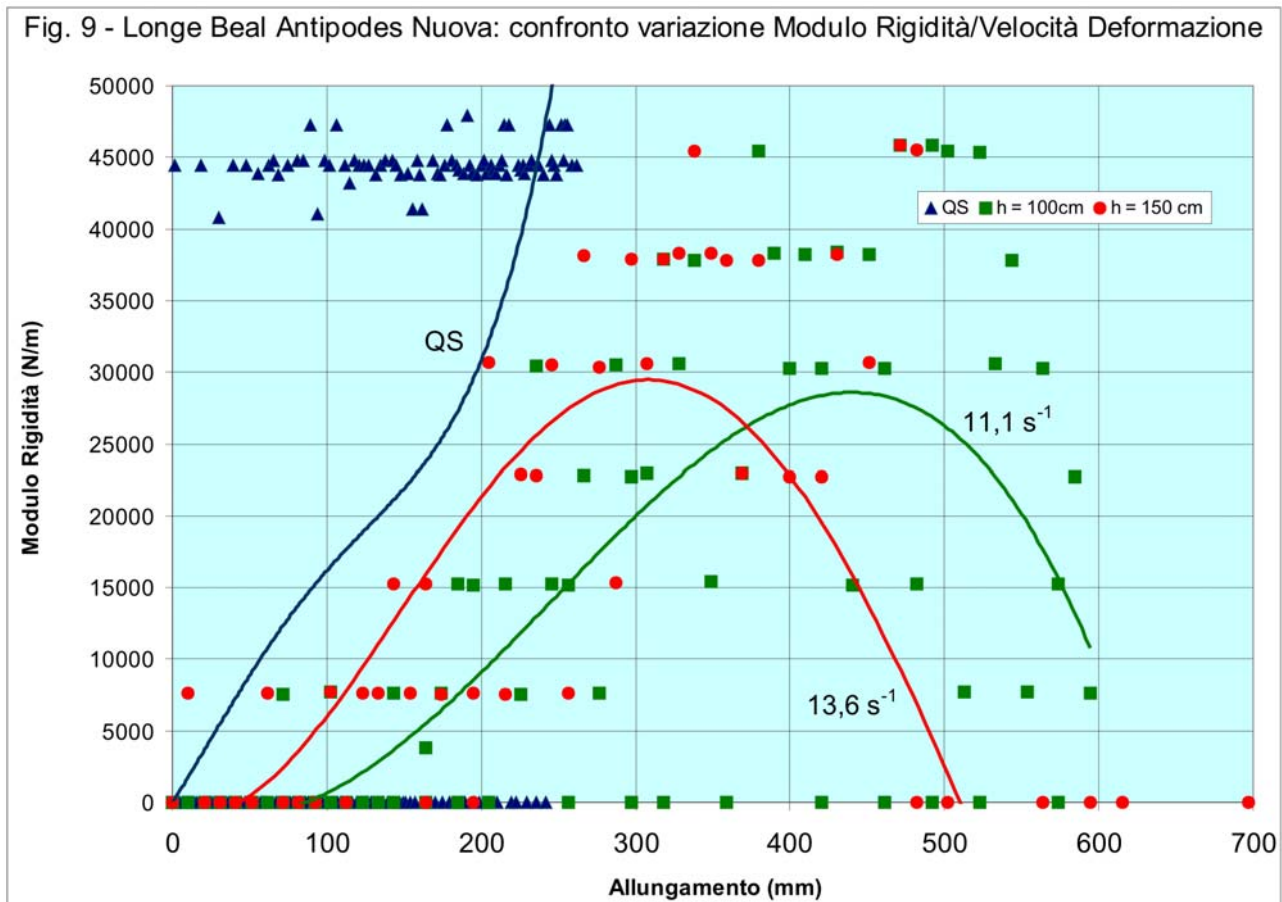


Grafici variazione Modulo di Elasticità – Il grafico di fig. 9 si riferisce ai test eseguiti su una longe di 40 cm di corda Beal Antipodes Nuova. Vi è riportato il variare del Modulo di Rigidity R (da non confondere con il Modulo di Yang giacché manca la valutazione della superficie trasversale della longe o con il Coefficiente d'Elasticità X , che n'è, in sostanza, il contrario) al variare dell'Allungamento e della Velocità di Deformazione: le linee continue sono linee di tendenza; i cerchi, i quadrati e i triangoli sono relativi ai dati ricavati per via sperimentale e con l'elaborazione puntiforme via software dal grafico $F=f(A)$.

Si nota che a tutte le velocità di deformazione il Modulo di Rigidity R non è una costante in funzione dell'allungamento:

- in condizioni quasi-statiche aumenta con incrementi sempre più accentuati fino al cedimento repentino; l'andamento non è lineare;
- con velocità di deformazione $11,1 \text{ s}^{-1}$ aumenta ma tende poi a diminuire;

- con velocità di deformazione $13,6 \text{ s}^{-1}$ aumenta con incrementi sempre più piccoli fino a diminuire e ad annullarsi.

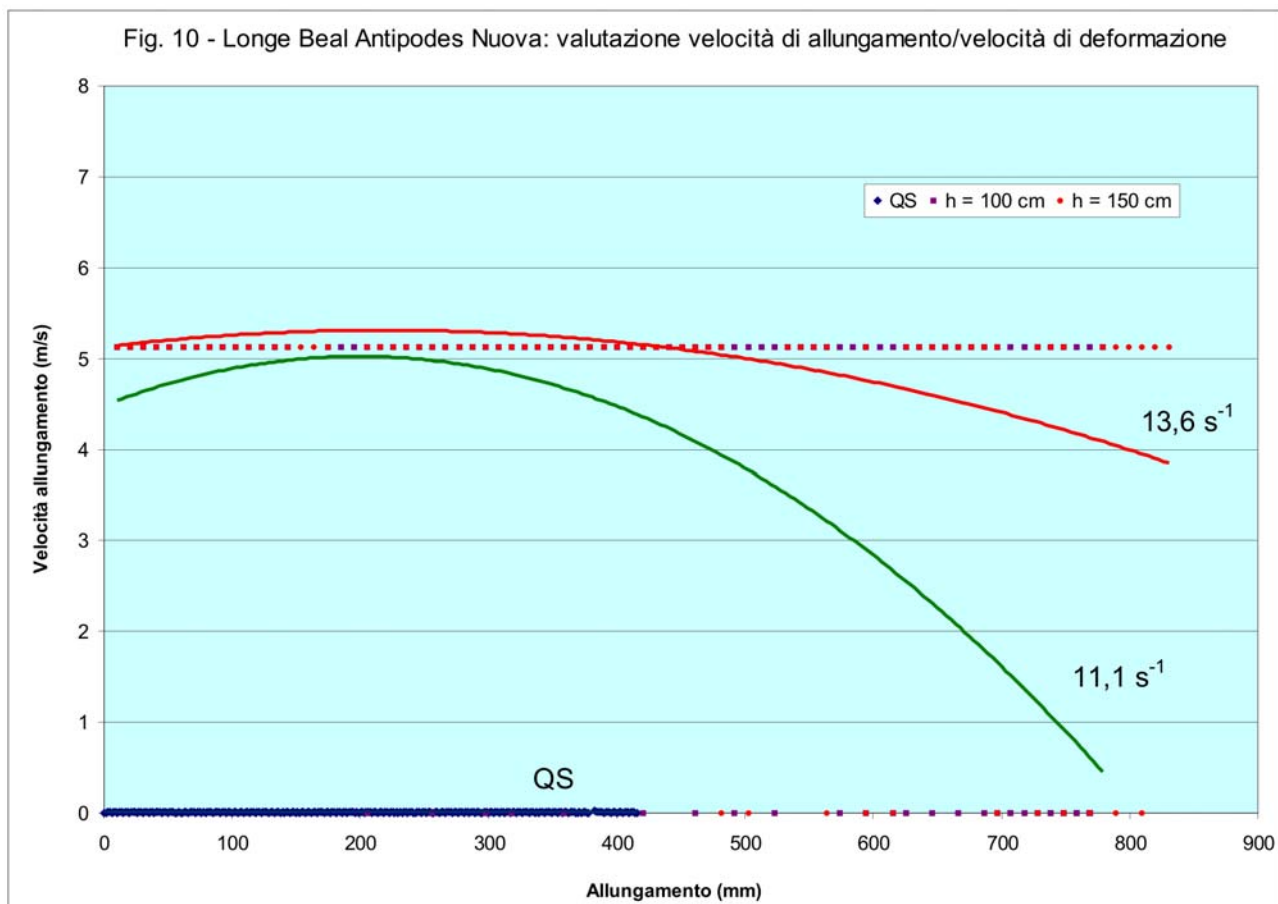


In queste due ultime situazioni si evidenzia ancora una volta l'effetto della parte viscosa della corda. Inoltre il grafico mostra che le variazioni del valore del Modulo di Rigidity sono in funzione della velocità di deformazione.

Misurazione della Velocità d'impatto e della Velocità di allungamento – La fig. 10 riporta i risultati sperimentali ottenuti con la longe indicata in merito al valore della Velocità d'Impatto V_0 (velocità con la quale inizia ad allungarsi il campione) in funzione dell'altezza h di caduta del peso e quindi della velocità di deformazione V_d (si ricorda che la velocità di deformazione è la velocità effettiva divisi la lunghezza del campione a riposo).

Innanzitutto si registra che il dato sperimentale della velocità d'impatto coincide con il valore calcolato teoricamente con la relazione $V_0 = \sqrt{2hg}$. Si ha pure la conferma sperimentale che la relazione delle oscillazioni armoniche semplici (Salvatori, 1988) descrive sostanzialmente in modo corretto l'evolversi della sollecitazione: s'inizia con la velocità d'impatto che poi va gradualmente aumentando fino ad un massimo per poi discendere (a zero nel caso che il campione non si rompa).

Conclusioni – Nel campo dei test sulle attrezzature speleo-alpinistiche e canyoning l'allestimento della Torre CRASC apre un orizzonte vastissimo di possibilità di ricerca. Sinora sono state compiute quasi esclusivamente analisi in condizioni a trazione lenta e solo in casi sporadici sono state fatte prove a trazione veloce, che comunque sono state fortemente limitate per la mancanza di strumentazioni per la misurazione contemporanea degli allungamenti. La Torre CRASC per la prima volta inserisce questo potente strumento d'analisi che permette valutazioni energetiche ed elaborazioni informatiche che vanno a definire, in funzione della velocità di deformazione,



parametri come il Modulo di Rigidità R, la Forza di Rottura Fr, la Forza massima registrata Fmax, il Lavoro alla Rottura, Lavoro fino all'allungamento massimo, Allungamenti reali e quindi energia totale in gioco, le Valutazioni comparative sul valore e la variazione dei coefficienti d'elasticità, l'effetto della viscosità. E altro ancora come l'evolversi della potenza durante la sollecitazione, parametro che sembra essere legato all'effetto nodo nel cedimento di una corda.

Bibliografia

FEODOSEV V. I., 1977 – *Resistenza dei materiali*, Editori Riuniti 1977: 1-376

MARBACH G., ROCOURT J. L., 1980 – *Techniques de la Spéléologie alpine*, Ed. TSA 1980: 1-278

SALVATORI F., CELESTI S., GUERRIERO G., 1984 – *Sollecitazioni dinamiche e statiche nelle attrezzature speleologiche. Teoria e sperimentazione*, Speleologia Umbra, 1984 pp. 188

SALVATORI F., CELESTI S., 1984 – *Prove sperimentali con dinamometro elettronico su attrezzature per la progressione in grotta*, Atti IV Convegno Nazionale SS CNSA, Trieste 1984: 33-40

SALVATORI F., 1988 – *Teoria delle percussioni elastiche applicata alle sollecitazioni impulsive sulle attrezzature speleo-alpinistiche. Effetti della caduta di un peso vincolato all'estremità di una corda. Alcuni casi di applicazioni sperimentali.*, Bollettino C.A.I. n. 89 1988: 25-36

SALVATORI F., CELESTI S., MENICHETTI M, GUERRIERO G., LAMBRI F., 1989 – *Resistenza dei materiali speleo-alpinistici*, CNS – CCS CAI, 1989 pp. 314

ANGHLERI M., CASTELLETTI L., MILANESE A., MORETTI G., 2009 – *Sviluppo di una macchina per prove a trazione veloce*, La metallurgia italiana, 2009: 57-66