Agosto, 19

Resistenza delle corde e assicurazione dinamica

di Carlo Zanantoni

Il problema della resistenza delle corde è stato trattato in un precedente articolo (R.M. settembre 1968) soprattutto allo scopo di svolgere una critica alle norme internazionali U.I.A.A.

Nel presente lavoro esso viene inserito quale elemento tecnico di base nella discussione del problema più complesso dell'assicurazione. In particolare il moderno concetto di assicurazione dinamica può trovare una convincente giustificazione solo nell'analisi dei fenomeni fisici essenziali in cui si risolve la caduta dell'alpinista legato in cordata.

1) Un po' di storia

1.1) Ho avuto occasione di occuparmi recentemente della resistenza delle corde, e mi sono reso conto di molti fatti per me nuovi e interessanti. Ma la cosa che più mi ha stupito è che essi erano quasi del tutto sconosciuti anche in ambienti alpinistici molto qualificati, mentre avrebbero dovuto essere noti da più di vent'anni per merito dell'americano A. Wexler [1, 2, 3].

Tento ora di diffondere queste conoscenze fra gli alpinisti italiani.

1.2) L'argomento di cui tratto fu affrontato in maniera sistematica in America: l'esercito degli U.S.A. e il National Bureau of Standards di Washington condussero negli anni successivi al 1940 una serie di esperimenti molto importante a proposito della resistenza delle corde, dell'equipaggiamento alpinistico in generale e dell'assicurazione, seguendo una linea già tracciata dallo Sierra Club e dall'American Alpine Club. È a questa attività che si devono la produzione del *mountain nylon*, il miglioramento dei moschettoni, uno studio delle proprietà delle corde che ha formato la base per la formulazione delle Norme Internazionali dell'U.I.A.A. (Union Internationale des Associations d'Alpinisme) di recente istituzione, infine la messa a punto delle tecniche di «assicurazione dinamica».

1.3) A vent'anni di distanza, negli ambienti alpinistici europei succede di solito che l'apprendista arrampicatore, ascoltati gli insegnamenti dell'«anziano» a proposito di assicurazione, crede di essere in grado di «tenere» il volo del primo di cordata con la cosidetta «assicurazione rigida», cioè senza essere costretto a lasciar scorrere la corda fra le mani o essere sbalzato via dall'ancoraggio: e non sa che l'«anziano» non ha mai provato a tenere un volo in queste condizioni. Il fatto è che nessuno si esercita in questo genere di cose, anche perché l'esercizio sarebbe poco divertente e costoso. E quando, in caso di «volo», l'assicurazione «rigida» non riesce, come è la regola, si attribuisce l'insuccesso a cause come una momentanea distrazione del secondo di cordata, senza rendersi conto che non è riuscita perché non poteva riuscire.

1.4) Va detto che non sono mancate, specialmente fra gli alpinisti americani e inglesi, valutazioni obiettive delle difficoltà della assicurazione «rigida»: Joung [6] riconosceva che la caduta verticale del primo di cordata non poteva essere «tenuta» e che, se lo fosse stata, le corde allora esistenti non avrebbero retto allo sforzo. Concludeva che il problema dell'assicurazione al primo di cordata non poteva essere risolto se non rispettando il principio: «The leader must not fall». E se non trovava una soluzione, faceva con questo il passo più importante, che è quello di valutare con chiarezza la realtà dei fatti.

1.5) È proprio questa valutazione dei termini del problema che tento ora di stimolare, senza voler proporre ai lettori una mia opinione sulla assicurazione dinamica che sarebbe solo «cartacea» perché, ve lo confesso, non ci ho mai provato. E riterrei di avere ottimamente speso il mio tempo se questo articolo servisse ad aprire un dibattito, oppure a convincere i responsabili di un corso di alpinismo a fare qualche prova di volo e di assicurazione «in laboratorio», magari arrivando a formarsi una opinione contraria alla assicurazione dinamica, come D. Hasse [7, 8].

Nota: Questo articolo è stato scritto due anni fa. Da allora qualche progresso è stato fatto, soprattutto in Germania, nella pratica dell'assicurazione dinamica e nello sviluppo di speciali «freni»: si tratta di placchette metalliche nelle quali sono ricavati fori o fessure in cui la corda scorre con attrito. La descrizione sarebbe troppo lunga: dirò solo che esiste un tipo inventato dalla nota guida tedesca Sticht e un tipo costruito dall'americano Chuinard.

Ambedue sono già in commercio.

Purtroppo l'introduzione di queste tecniche in Italia non ha ancora avuto inizio.

2) A quale sforzo può essere sottoposta la corda?

2.1) Riassumo in Appendice 1 alcune considerazioni esposte più diffusamente in [9]. Qui desidero soprattutto portare l'attenzione sulla seguente verità di cui è così difficile convincere gli alpinisti: *la massima tensione che può verificarsi nella corda in occasione del volo del primo di cordata non dipende dall'altezza del volo.*

Questo fatto è dovuto allo smorzamento elastico della velocità di caduta da parte della corda, smorzamento tanto meno brusco quanto più la corda è lunga: siccome altezza del volo e lunghezza di corda disponibile crescono assieme, la tensione massima nella corda non dipende dall'altezza di caduta. Essa dipende dalle caratteristiche del materiale e dalla sezione della corda. Questo non vuol dire in pratica che nella maggioranza dei casi un «volo» piccolo non sia più facile da «tenere» e meno pericoloso di un «volo» grande: al crescere dell'altezza del «volo» crescono le energie in gioco, ed è quindi più improbabile che una frazione considerevole di detta energia venga assorbita dall'attrito o dallo spostamento del corpo del secondo di cordata. In altri termini, è più difficile effettuare una assicurazione «dinamica». Su questo punto ritornerò in seguito, in particolare nella Appendice 1.

2.2) Ne derivano alcune importanti conseguenze:

A) È possibile definire la resistenza di una corda semplicemente in base al peso che, cadendo verticalmente per il doppio della lunghezza di corda, è capace di romperla. Come giustamente propone Avcin [3], questo «peso critico» oppure, che fa lo stesso, l'energia di rottura della corda dovrebbe essere quotato dai fabbricanti che oggi troppo spesso si accontentano di dichiarare il carico di rottura statico delle loro corde, un dato che, da solo, non ha nessun significato. (Tanto più che questo carico di rottura è misurato fissando la corda senza nodi, cioè in condizioni ben diverse dall'impiego in montagna. E anche i migliori nodi riducono la resistenza della corda di quasi il 50%).

B) È stato possibile istituire prove di resistenza delle corde effettuate semplicemente con la caduta di un peso di 80 kg da una altezza standard ($2 \times 2{,}5$ m). La corda che è capace di sostenere un volo di tal genere sarà in grado di resistere ad un volo di qualsiasi altezza, e può quindi ritenersi sicura. Queste prove sono codificate nelle Norme della U.I.A.A. ([1]) e le corde che le hanno superate sono corredate di un certificato di garanzia. Un arrampicatore ragionevole non dovrebbe, penso, arrampicare con corde che non abbiano questo «certificato». Purtroppo buona parte degli alpinisti non sa neppure della sua esistenza e giudica le varie marche di corde da quello che se ne sente dire in giro. Tempo fa il direttore di una scuola di roccia mi mostrò le corde ricevute in dotazione dal C.A.I.: erano accompagnate da un cartoncino recante il nome della fabbrica e qualche affermazione reclamistica redatta in termini generici, come se si trattasse di un detersivo.

C) Non è giusto pensare che in vie con molti chiodi si possano tranquillamente usare corde meno resistenti che in vie con pochi chiodi perché l'eventuale volo sarebbe piccolo (questo punto è trattato diffusamente in [9]).

D) Il secondo di cordata deve essere preparato al peggio fino dai primi metri di arrampicata del primo.

E) Quando la corda ha sopportato un volo, se questo, pur essendo piccolo, non ha «goduto delle attenuanti» citate in Appendice 1 (e di questo le costole di chi vola si accorgono senz'altro) la corda deve essere sostituita senza parsimonia.

F) Bisogna sempre, anche in arrampicata artificiale, legarsi con nodi che riducano il meno possibile la resistenza della corda. Nodi come il Bulin (Bowline, Gassa d'Amante) o il nodo delle guide sono adatti perché riducono il carico di rottura di circa il 40% soltanto [1, pag. 85]. Altri nodi, come apparirà dalle prove eseguite dalla Scuola di Roccia della Sezione di Varese del C.A.I., sono del tutto sconsigliabili, perché provocano riduzioni ben maggiori.

2.3) Il «teorema fondamentale» enunciato in 2.1 vale nel caso che la corda non scorra nel moschettone perché impedita dall'attrito contro la roccia o da una assicurazione «rigida» da parte del secondo. La prima eventualità porterebbe il primo di cordata a sopportare sforzi così elevati (App. 1) che non potrebbe probabilmente proseguire la scalata. La seconda è irrealizzabile (almeno così assicurano Wexler e Avcin [1, 3]) poiché gli sforzi in gioco sono tali che il secondo non può trattenere la corda. Ne consegue la necessità di una assicurazione «dinamica», cioè di consentire, come spiegherò, uno scorrimento controllato della corda, a meno che il secondo non decida di sacrificare le proprie costole (e quelle del compagno) adottando un ancoraggio a prova di cataclisma e l'assicurazione «a croce» come ha fatto D. Hasse [7]. Credo che questa prova di Hasse sia l'unico esempio riportato di assicurazione rigida, perché in altri casi l'assicurazione è sempre stata, volontariamente o no, almeno parzialmente ([2]) dinamica.

3) Che cos'è l'assicurazione dinamica?

3.1) È un metodo di assicurazione che consiste nel consentire uno scorrimento controllato

([1]) Che prevedono la resistenza ad almeno due voli di questo tipo.

([2]) Sarei molto lieto se qualche lettore potesse citare un esempio in contrasto con questa affermazione. Deve trattarsi, però, di voli di una certa importanza, in cui non valgano le «attenuanti» citate in Appendice 1. Cioè voli di almeno 3 + 3 metri.

lato della corda (è consigliabile usare guanti!).

Vantaggi: Riduce di molto la tensione nella corda, quindi anche lo sforzo sul torace dell'alpinista caduto e sul chiodo, e consente al secondo di resistere senza essere strappato violentemente dal suo ancoraggio con possibilità di gravi conseguenze.

Svantaggi: Prolunga la caduta del primo di cordata (dell'ordine del 30%), quindi potrebbe portarlo ad atterrare su qualche cengia o spuntone. Richiede allenamento e uso di guanti. Non permette di sfruttare tutta la lunghezza della corda (vedere 4.5).

3.2) Il fatto è che, dice Wexler, l'assicurazione rigida non la si può fare neanche se si vuole [3] (a meno che non si sia molto aiutati da attriti vari della corda contro roccia e moschettoni) quindi tanto vale allenarsi a controllare efficacemente quello scorrimento che inevitabilmente si produrrà.

La serietà dimostrata da Wexler negli articoli citati e la vastità dello sforzo compiuto a proposito della assicurazione in montagna dallo Sierra Club, dall'American Alpine Club e della 10th U.S. Mountain Division mi fanno pensare che Wexler abbia ragione: si guardino le cifre citate in App. 1 e si legga anche quanto scrive Avcin [3].

Ma, che ci si creda o no, le considerazioni di Wexler dovrebbero spingere la nostra Scuola nazionale di alpinismo a provare sperimentalmente l'una e l'altra tecnica di assicurazione fino a farsi una chiara opinione in merito.

3.3) Val la pena di aggiungere che questa tecnica di assicurazione è soprattutto utile su ripidi pendii ghiacciati al fine di ridurre lo sforzo sul secondo di cordata, la cui posizione è spesso malsicura: in questo caso è più difficile trovare controindicazioni, perché il prolungare la caduta non porta di solito a inconvenienti.

4) Nozioni sull'assicurazione dinamica

4.1) Le vere nozioni essenziali sarebbero quelle derivanti da una esperienza pratica, che io purtroppo non ho. Espongo qui i principi teorici su cui il metodo si basa. Lo farò in una forma semplificata che, come vedremo, è sufficientemente accurata. Chi volesse maggiori dettagli può trovarli in App. 2.

4.2) L'approssimazione consiste nel supporre che la corda non si allunghi: essa è realistica se si lascia scorrere un notevole tratto di corda, così da ridurre la tensione a bassi valori, come appunto l'assicurazione dinamica prevede.

In questa ipotesi, se la lunghezza libera di corda dopo il moschettone è l, l'altezza di caduta libera verticale è h e la corda viene lasciata scorrere per un tratto d mantenendola frenata con una tensione costante F, la energia potenziale liberata nella caduta vale

$$E = P(h + d) \qquad \text{(I)}$$

ed essa viene dissipata in lavoro di attrito:

$$W = F d \qquad \text{(II)}$$

uguagliando E a W si ottiene

$$F = P\left(1 + \frac{h}{d}\right) \qquad \text{(III)}$$

ossia

$$F = P\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \qquad \text{con } \alpha = \frac{d}{h}. \qquad \text{(IV)}$$

4.3) Cioè la riduzione della tensione dipende dal rapporto α fra la quantità di corda che si lascia scorrere e l'altezza di caduta libera. Chiamo questo rapporto «scorrimento».

La (IV) è riportata (tratteggiata) in fig. 8 per il caso $h = 2l$, $P = 80$ kg.

Confrontandola con le curve più esatte si vede che solo ai bassi valori dello scorrimento la (IV) porta ad errori importanti: è infatti chiaro che, quanto più ci si avvicina a condizioni di assicurazione «rigida», tanto maggiore frazione dell'energia del corpo che cade viene assorbita dalla deformazione della corda. Se lo scorrimento fosse nullo lo sforzo in una corda assolutamente non cedevole sarebbe infinito, come risulta dalla (IV).

4.4) È interessante notare che gli scorrimenti debbono essere molto elevati se si vuole ridurre notevolmente lo sforzo: se supponiamo (?) che il secondo di cordata sia in grado di controllare lo scorrimento della corda con tensione uguale a 160 kg, la tensione nella corda al di là del moschettone sarà dell'ordine del doppio, cioè 320 kg (vedere App. 1). Dalla fig. 8 si deduce allora che lo scorrimento α dev'essere circa 0,6, cioè la corda deve scorrere per circa 2/3 della lunghezza di corda libera, ossia per 1/3 dell'altezza libera di caduta. Lo stesso risultato si ottiene ponendo $\frac{F}{P} = \frac{320}{80} = 4$ nella (IV).

4.5) Una spiacevole conseguenza di questo sistema di assicurazione è che non si possono fare lunghezze di corda tali quanto la corda permetterebbe: bisogna sempre che il secondo abbia a disposizione una lunghezza di corda dell'ordine (nel caso in cui valga l'ipotesi fatta sopra) dei 2/3 dell'altezza del primo di cordata sopra l'ultimo chiodo.

4.6) Un esempio: sia L la lunghezza di corda fra i due alpinisti. Se il chiodo è subito alla partenza e il primo sale in arrampicata libera, potrà salire al massimo per un tratto X_1 dato da

[3] Questo mi sembra l'aspetto essenziale del problema, perché per quanto riguarda i danni riportati da chi vola l'elasticità delle corde moderne dovrebbe essere tale da ridurli di molto. Almeno così hanno ritenuto i codificatori delle Norme U.I.A.A., le quali impongono che le caratteristiche di elasticità della corda siano tali da non far mai superare, anche nel massimo volo di un peso rigido di 80 kg, lo sforzo di 1200 kg. Questo corrisponderebbe, secondo Henry ([5] pag. 56), a non superare le accelerazioni massime previste per astronauti e (?) automobilisti e utilizzatori di ascensori rapidi.

$$(1 + \frac{2}{3}) X_1 = L$$

cioè per un tratto

$$X_1 = \frac{3}{5} L.$$

A questo punto dovrà piantare un chiodo, poi potrà salire di un altro tratto X_2 tale che

$$L - \frac{3}{5} L - X_2 = \frac{2}{3} X_2$$

cioè per $\quad X_2 = \frac{6}{25} L.$

E se a questo punto avrà piantato un altro chiodo, potrà salire ancora per un tratto X_3 dato da

$$L (1 - \frac{3}{5} - \frac{6}{25}) - X_3 = \frac{2}{3} X_3$$

cioè per $\quad X_3 = \frac{12}{125} L.$

In altri termini, se L = 40 m, l'arrampicatore dovrà, come minimo, piantare chiodi alle seguenti distanze: 24; 9,6; 3,8, dopo di che gli restano meno di tre metri di corda e gli conviene fermarsi.

4.7) A questo punto mi immagino il lettore che ride a crepapelle al pensiero di arrampicare con il regolo calcolatore fra i denti.

Dovrebbe essere chiaro, però, che queste considerazioni non vanno prese alla lettera. Per esempio, non so se la stima dello sforzo massimo controllabile che ora ho fatto è troppo pessimistica, inoltre dopo uno scorrimento iniziale si potrebbe forse assorbire l'energia che resta con assicurazione statica. E ancora, se i chiodi sono numerosi e quindi l'attrito è notevole, la massima tensione controllabile a parità di sforzo del secondo di cordata cresce notevolmente. E potrei continuare. Ma il mio scopo non è di scrivere un trattatello sulla assicurazione dinamica, che fra l'altro, come ho già detto, non ho mai messo in pratica. È soltanto di attirare l'attenzione delle scuole di alpinismo su questo problema.

4.8) Penso che, per esempio, si potrebbe fare prove di «tenuta» del volo di pesi di valore crescente, con «assicurazione rigida», fino a rendersi conto di quali pesi si possono trattenere in questo modo. Dopo di che si potrebbe passare a prove di assicurazione dinamica. Un copertone da automobile zavorrato con cavi metallici costituirebbe un peso variabile molto comodo, che per di più avrebbe caratteristiche elastiche simili a quelle del corpo umano. E un grosso albero si presterebbe molto più docilmente di una parete a questo genere di esperimenti. Si ricordi che, secondo [1] e [3], la tenuta a spalla non è la più indicata per l'assicurazione dinamica: si consiglia l'assicurazione «alle anche».

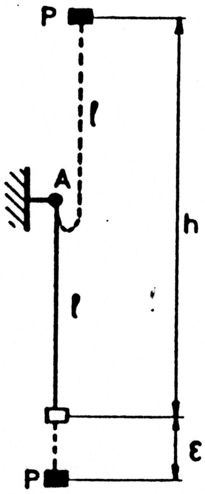


Fig. 1 - Schema di «volo» verticale con assicurazione rigida.

Auguro buona fortuna ai volonterosi che volessero cimentarsi in questa nuova tecnica. Cercherò di provarla anch'io e di trarre dalla mia esperienza elementi per fruttifere discussioni, che spero non mancheranno.

APPENDICE 1

Calcolo della tensione massima nella corda in caso di assicurazione «rigida»

Intendo con assicurazione rigida una assicurazione tale che la corda sia come fissata rigidamente al punto in cui il secondo di cordata la tiene: come se il secondo l'avesse legata al chiodo di fermata.

In queste condizioni la tensione nella corda è la massima possibile, dato che tutta l'energia cinetica del corpo che cade deve essere assorbita dalla corda sotto forma di lavoro di deformazione. Per precisare, consideriamo la fig. 1. Supponiamo la corda saldamente legata al moschettone in A. L'energia potenziale liberata dalla caduta del peso P vale

$$P\,(h + l\varepsilon) \qquad (1)$$

dove h = altezza libera di caduta

l = lungh. della corda non deformata

ε = allungamento = $\dfrac{l_d - l}{l}$

con l_d = lunghezza della corda deformata.

Nel momento in cui il corpo si ferma (e sta per risalire richiamato dalla elasticità della corda) l'allungamento raggiunge il suo massimo valore ε_m. Ad esso corrisponde un lavoro di deformazione per unità di lunghezza di corda L_m, che si ha uguagliando la quantità (1) al lavoro di deformazione di tutta la corda:

$$l\,L \qquad (2)$$

da cui

$$L_m = P\,(\frac{h}{l} + \varepsilon_m). \qquad (3)$$

Nel caso peggiore, che chiamerò in seguito caso di *volo massimo* si ha $\frac{h}{l} = 2$: il lavoro di deformazione, e quindi la tensione nella corda, è allora indipendente dall'altezza di caduta. Nel caso più generale esso dipende dal rapporto $\frac{h}{l}$.

Il calcolo esatto della tensione massima si può fare graficamente, una volta nota la caratteristica tensione-deformazione della corda (fig. 2). Si traccia la curva che rappresenta il lavoro di deformazione L e che non è altro che l'area sottesa della curva F. Noto il peso che cade P, poiché deve essere, per la (3):

$$P = \frac{L_m}{\frac{h}{l} + \varepsilon_m} \qquad (4)$$

si ricava ε_m e il corrispondente sforzo F_m come indicato in figura.

In tab. 1 sono riportati i valori dello sforzo nella corda, calcolati con questo metodo a partire da fig. 2, con $\frac{h}{l} = 2$.

Va notato che la curva F_d di fig. 2, valida in condizioni dinamiche, è ben diversa dalla curva statica F_s che si otterrebbe sottoponendo il materiale a trazione lenta [9]. Le curve di fig. 2 sono tipiche di una corda moderna in fibra sintetica di diametro 11 mm.

Tab. 1 - Sforzo e allungamento massimi nella corda le cui caratteristiche sono descritte in fig. 2, nel caso di «massimo volo» di un peso P

Peso P (kg)	Sforzo F (kg)	Allungamento ε
20	625	.162
40	1060	.215
60	1450	.253
80	1780*	.282
100	2110	.307

(*) Questa corda non soddisferebbe alle Norme U.I.A.A., perché lo sforzo corrispondente al «volo» di 80 kg supera i 1200 kg.

Come risulta dalla tab. 1, gli sforzi che si verificherebbero in condizioni di assicurazione «rigida» sono enormi: si tratta del peso di una automobile, anche se lo si deve sostenere solo per un tempo dell'ordine del decimo di secondo.

Vediamo ora metodi più diretti, anche se approssimati, per il calcolo dello sforzo massimo. Essi ci consentiranno alcune deduzioni utili.

I metodi approssimati per il calcolo della tensione si basano sulla sostituzione della vera curva F_d di fig. 2 con una espressione analitica.

Se il peso che cade è tale da provocare piccoli allungamenti (nel caso di fig. 2 fino ad $\varepsilon = 0{,}1 - 0{,}2$) è sufficiente usare una retta, cioè scrivere

$$F = AE\varepsilon = K\varepsilon \qquad (6)$$

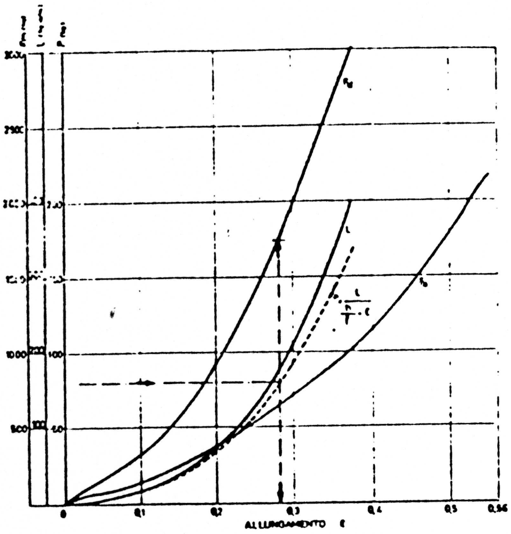


Fig. 2 - Calcolo grafico dell'allungamento e dello sforzo massimo nella corda, provocati dalla caduta di un peso rigido P secondo lo schema di fig. 1.

La curva F_d rappresenta la caratteristica dinamica di una tipica corda in materiale sintetico di diametro 11 mm. La curva F_s rappresenta la sua caratteristica statica (a trazione lenta). L è il lavoro di deformazione per unità di lunghezza di corda (curva integrale della F_d). $P = \frac{L}{\frac{h}{l} + \varepsilon}$ è il peso che, cadendo secondo fig. 1, provoca l'allungamento ε. La curva tratteggiata è stata calcolata per il caso di «volo massimo»: $\frac{h}{l} = 2$.

con A = sezione della corda
E = modulo di elasticità del materiale
K = AE = modulo della corda.

Se invece il peso che cade è grande, sicché gli allungamenti risultanti siano notevoli, diciamo superiori a 0,2, conviene spesso usare una parabola, cioè scrivere

$$F = m\varepsilon^2. \qquad (7)$$

Chiameremo anche in questo caso m modulo della corda.

Il lavoro di deformazione per unità di lunghezza di corda vale, nel caso della retta (6):

$$L = K\frac{\varepsilon^2}{2} \qquad (8)$$

e nel caso della parabola (7):

$$L = m\frac{\varepsilon^3}{3}. \qquad (9)$$

Sostituiamo questa espressione nella (3), dove trascuriamo il termine ε rispetto al termine $\frac{h}{l}$ [approssimazione meno grossolana di quella che la (6) o (7) comporta] e otteniamo così

$$\varepsilon = \sqrt{2\frac{P}{K}\frac{h}{l}} \quad (10)$$

$$F = \sqrt{2\,PK\frac{h}{l}} \quad (11)$$

nel caso della retta

$$\varepsilon = \sqrt[3]{3\frac{P}{m}\frac{h}{l}} \quad (12)$$

$$F = \sqrt[3]{9\,m\,(P\frac{h}{l})^2} \quad (13)$$

nel caso della parabola

Si riconosce da queste relazioni l'importanza del modulo della corda: quanto più esso è piccolo, cioè la corda è più facilmente deformabile, tanto minore è lo sforzo massimo che la corda e quindi le costole dello sfortunato alpinista debbono sopportare. Perciò le corde moderne sono caratterizzate da forti allungamenti. I materiali oggi disponibili (come lo *high elongation nylon* già noto nel 1945 [1]) consentirebbero la costruzione di corde ancora più cedevoli, ma esse presenterebbero inconvenienti, per esempio difficoltà di manovra. Sicché le Norme U.I.A.A. si limitano a richiedere che le caratteristiche delle corde siano tali da far sì che lo sforzo massimo (assicurazione rigida, $\frac{h}{l} = 2$) non superi 1200 kg.

A titolo di esempio riporto in fig. 4 e 5 gli sforzi e gli allungamenti nel caso di «volo massimo» ($\frac{h}{l} = 2$), calcolati secondo i tre metodi ora esposti a partire dalla caratteristica della corda e delle sue approssimazioni parabolica o lineare (curve a, b, c di fig. 3). Come si vede, l'approssimazione lineare è sufficiente per piccoli allungamenti, cioè per la caduta di piccoli pesi, ma l'approssimazione parabolica è più adatta per allungamenti elevati. Questo, naturalmente, per una corda la cui caratteristica sia del tipo (a) in fig. 3.

Non rientra comunque negli scopi di questo articolo discutere in dettaglio le approssimazioni di questi calcoli. Mi serve solo far notare l'entità degli sforzi massimi, che non possono probabilmente essere sostenuti dal secondo di cordata nemmeno con l'interposizione di un chiodo (vedere in seguito).

Di qui la necessità di praticare, volenti o nolenti, una assicurazione dinamica, di cui parlo al paragrafo 3 e all'Appendice 2.

A questo punto però molti lettori si rifiuteranno di continuare a seguirmi a meno che io non spieghi loro come mai, in occasione di voli verticali del primo di cordata, essi non hanno dovuto sostenere gli sforzi enormi da me citati. Il fatto è che, a mia conoscenza, i casi riportati di voli trattenuti senza difficoltà e danni ad ambedue gli alpinisti sono relativi a cadute di piccola altezza, e in questo caso numerose «attenuanti» intervengono a ridurre la tensione rispetto al caso di assicurazione rigida per cui valgono le formule citate:

Attenuante 1: Il corpo che cade non è rigido, e assorbe energia deformandosi («attenuante» poco efficace).

Attenuante 2: La corda, anche se fissata rigidamente al punto di fermata (A in fig. 6), si allunga anche nel tratto che sta fra A e l'ultimo moschettone, così contribuendo a un più graduale smorzamento della caduta: si vede facilmente [9] che lo sforzo nel tratto l_1 di corda si calcola come se la corda fosse fissata in B, mantenendo per l'altezza di caduta h il suo valore vero ma dando ad l anziché il valore l_1 il valore:

se si usa la (11):

$$l^* = l_1\,(1 + \frac{l_0}{l_1}\,\beta^2) \quad (14)$$

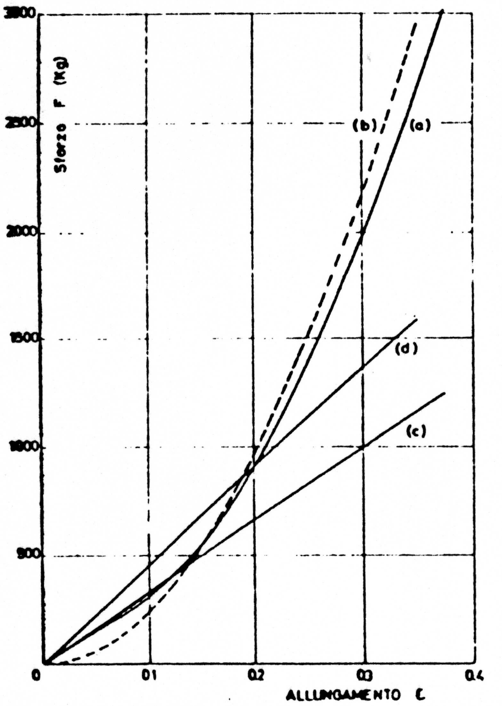
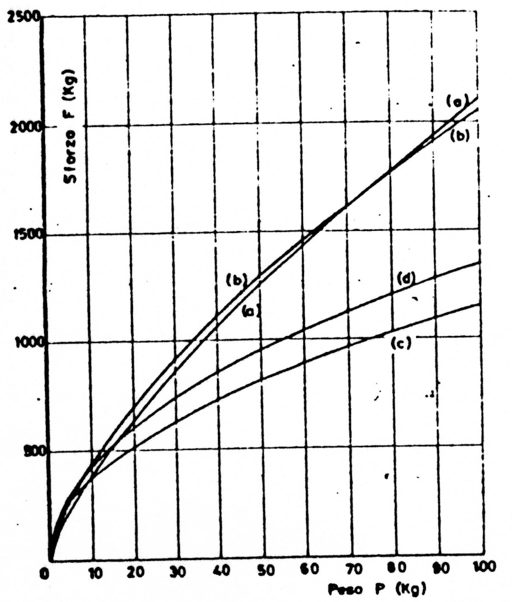


Fig. 3 - Vari esempi di rappresentazioni analitiche della caratteristica della corda.

(*a*) Caratteristica dinamica tipica di una corda in materiale sintetico di diametro 11 mm. (*b*) Approssimazione con una parabola $F = m\,\varepsilon^2$ con $m = 24200$ kg. Questo valore di m è stato determinato imponendo che la parabola fornisca correttamente il lavoro di deformazione per $\varepsilon = 0.282$ (vedere fig. 2). (*c*) Approssimazione con una retta $F = K\,\varepsilon$ con $K = 3340$ kg. Questa retta è abbastanza prossima alla curva vera (*a*) per piccoli allungamenti. (*d*) Retta $F = K\,\varepsilon$ con $K = 4550$ kg.



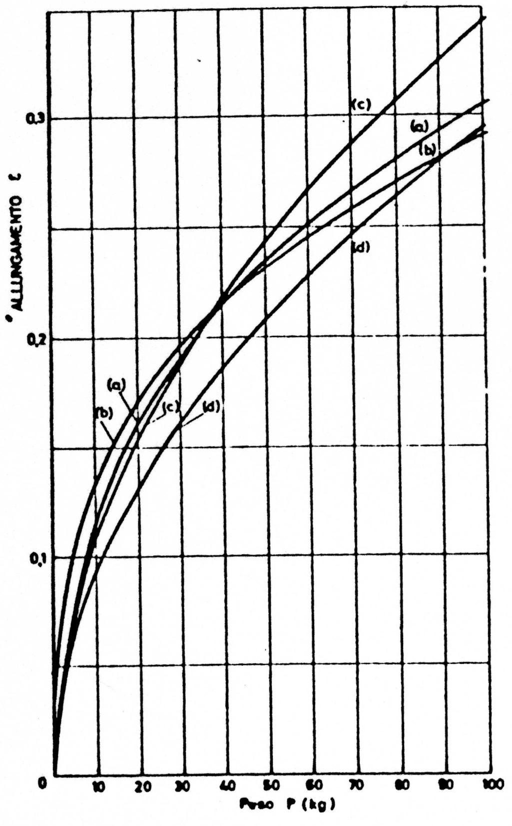


Fig. 4 e 5 - Sforzo massimo e allungamento nella corda provocato dalla caduta verticale di un peso P (come in fig. 1) con h = 2 l.

I calcoli sono stati eseguiti a partire dalle quattro caratteristiche (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) riportate in fig. 3. Il calcolo esatto (*a*) è stato effettuato graficamente come descritto in fig. 2. Il calcolo (*b*) è stato eseguito in base alle (*12*), (*13*). I calcoli (*c*), (*d*) sono stati eseguiti in base alle (*10*), (*11*).

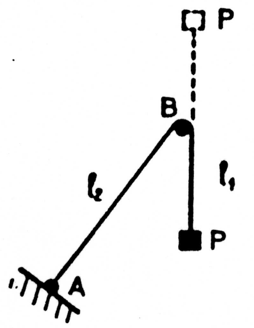


Fig. 6 - Assicurazione «rigida» a distanza dal moschettone. La corda è fissata in A e scorrevole con attrito in B.

se si usa la (13):

$$l^* = l_1 \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \beta^{3/2}\right) \qquad (15)$$

dove β rappresenta il rapporto fra le tensioni dei rami l_2 e l_1, e vale

$$\beta = e^{-\xi\alpha} \qquad (16)$$

con ξ = coefficiente d'attrito corda-moschettone

α = angolo (in radianti) di cui la corda abbraccia il moschettone.

Per le nostre valutazioni possiamo prendere $\beta = 1/2$.

Queste formule ci dicono che l'allungamento del tratto di corda fra secondo di cordata e ultimo moschettone è abbastanza efficace nel ridurre la tensione, e perciò è importante assicurare un buon scorrimento della corda. Ma lo è ancora di più per quanto riguarda la:

Attenuante 3: Il secondo di cordata si sposta e nei casi più gravi è sollevato in aria o lascia scivolare la corda per un buon tratto, sacrificando forse la sua epidermide e praticando così almeno in parte quella assicurazione dinamica che gli americani consigliano. Questo riduce la tensione: di quanto, è difficile valutarlo e lo si potrebbe fare per casi particolari. Non credo che ne valga la pena, perché se riconosciamo di dover ricorrere a questa terza «attenuante» non facciamo altro che sposare la causa della assicurazione dinamica, di cui enuncio i principi al paragrafo 3 e in Appendice 2.

APPENDICE 2

Teoria dell'assicurazione dinamica

Si tratta di lasciare scorrere la corda, con frenamento controllato, per ridurre lo sforzo massimo. Questa riduzione si ottiene perché l'energia cinetica del corpo che cade si trasforma non più soltanto in lavoro di deformazione della corda, ma anche (anzi prevalentemente) in calore, per attrito sul moschettone e sul corpo di chi assicura.

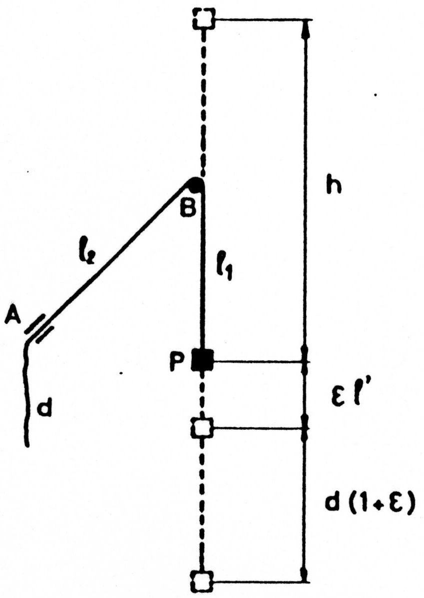


Fig. 7 - Assicurazione «dinamica»: dopo la caduta libera del peso P per una altezza h si lascia scorrere in A un tratto di corda d, in maniera da mantenere costante al valore F lo sforzo nel ramo l_1.

Con riferimento a fig. 7, l'arrampicatore (peso P), salito per una lunghezza di corda l_1 dopo il chiodo, cade verticalmente. Sia h l'altezza di caduta libera. Il secondo (A) trattiene la corda fino a che la tensione nel ramo l_1 raggiunge un valore F_m (l'allungamento corrisponde sia ε_m) poi ne lascia scorrere con frenamento controllato un tratto d, mantenendo la tensione costante fino a che il corpo P si ferma (si noti che tensione nel ramo AB non sarà F_m ma βF_m con β dato dalla (16). Ecco un altro vantaggio derivante dalla interposizione di un chiodo, oltre a quello ovvio di ridurre l'altezza di caduta h).

L'energia potenziale liberata dalla caduta del peso P fino al momento in cui esso si ferma (e sta per risalire richiamato dalla elasticità della corda) vale

$$E_p = P\,[h + d + (d + l')\,\varepsilon_m] \tag{17}$$

dove ε_m è l'allungamento massimo raggiunto dalla corda ed

$$l' = l_1 + \beta\, l_2 \tag{17'}$$

con β dato dalla (16) per tenere conto anche dell'allungamento del tratto di corda l_2 compreso fra A e B in fig. 7.

Questa energia potenziale si trasforma in lavoro di deformazione della corda e lavoro di attrito. Descrivendo le caratteristiche della corda con la legge lineare (6) (approssimazione sufficiente perché non si raggiungono allungamenti molto elevati con l'assicurazione dinamica) si ha che il lavoro di deformazione della corda vale

$$W_d = (l^* + d)\,\frac{K}{2}\,\varepsilon^2_m \tag{18}$$

con l^* dato dalla (14), mentre il lavoro di attrito vale

$$W_a = d\,(1 + \varepsilon_m)\,F_m. \tag{19}$$

L'equazione

$$E_p = W_d + W_a \tag{20}$$

fornisce, ricordando la (6)

$$\frac{l^* + 3\,d}{2\,K}\,F^2_m - \left(P\,\frac{d + l'}{K} - d\right) F_m - P\,(h + d) = 0. \tag{21}$$

Per semplificare le formule supponiamo di poter porre

$$l' = l^* = l \tag{22}$$

Questa approssimazione è sempre giustificata poiché, come vedremo, nell'assicurazione dinamica l'allungamento della corda ha poca importanza, avvenendo l'assorbimento di energa soprattutto per attrito; la (22) è addirittura esatta quando l_2 è piccolo, nel qual caso $l = l_1$. Posto

$$\alpha = \frac{d}{l} \qquad \gamma = \frac{h}{l} \tag{23}$$

la soluzione della (21) si scrive

$$F_m = \frac{P\left[1 + \sqrt{(1 + \alpha)^2 + 2\,\frac{K}{P}\,(1 + 3\,\alpha)\,(\alpha + \gamma) + \left(\frac{K\,\alpha}{P}\right)^2}\,\right] - K\,\alpha}{1 + 3\,\alpha}. \tag{24}$$

Il calcolo di questa espressione è riportato in fig. 8 per il caso di «massimo volo» ($\gamma = 2$) di un peso di 80 kg [curve (a) e (b)]. Le curve (a) e (b) si riferiscono a due casi che si possono ritenere estremi, nel senso che rappresentano una corda rigida e una cedevole. Il fatto che le due curve si avvicinino al crescere di α significa che quando l'assicurazione è veramente dinamica, cioè lo scorrimento è elevato, l'allungamento della corda è piccolo quindi le sue caratteristiche perdono di importanza: la maggior parte dell'energia viene dissipata in attrito.

Per questo motivo la curva (c), calcolata per una corda rigida ($K = \infty$), coincide praticamente con le altre per valori abbastanza grandi dello scorrimento α.

Queste curve dimostrano chiaramente l'efficacia dello scorrimento nel ridurre la tensione; ma questo discorso è sviluppato più ampiamente nel testo, paragrafo 4.

Estendiamo ora queste considerazioni al caso di assicurazione su un pendio nevoso: è infatti in questi casi che l'assicurazione dinamica è soprattutto indicata.

Questo caso è descritto dalla fig. 9.

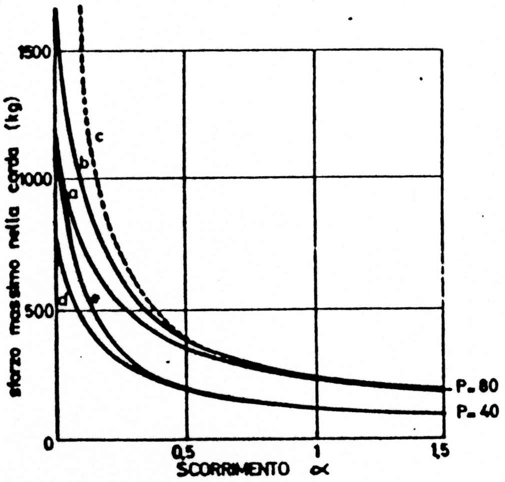


Fig. 8 - Sforzo massimo nella corda con assicurazione dinamica, in funzione dello «scorrimento» α. Nelle curve (a), (b) si suppone la caduta libera verticale di un peso di 80 kg, con $h = 2 l_1$, (fig. 7).

La (*a*) corrisponde a un modulo della corda $k = 3340$ kg; la (*b*) corrisponde a un modulo della corda $k = 8400$ kg. Le curve (*d*), (*e*) sono le analoghe delle (*a*), (*b*) ma per scivolamento su un pendio (fig. 9) con $\mu = .5$. La curva (*c*) corrisponde a $P = 80$ kg, $k = \infty$.

Sia χ il coefficiente d'attrito fra il corpo e la superficie su cui scivola, inclinata di un angolo δ sull'orizzontale. La resistenza d'attrito, in direzione opposta allo scivolamento, vale

$$R = \chi P \cos \delta. \qquad (25)$$

Ripetendo considerazioni del tutto simili a quelle fatte per il caso di caduta verticale si ha che il lavoro assorbito dalla deformazione della corda è ancora dato dalla (18), mentre il lavoro di attrito vale

$$W_a = [h + \varepsilon_m l' + d(1 + \varepsilon_m)] \chi P \cos \delta + d(1 + \varepsilon_m) F_m \qquad (26)$$

e l'energia potenziale liberata nella caduta è

$$E_p = P [h + \varepsilon_m l' + d(1 + \varepsilon_m)] \operatorname{sen} \delta. \qquad (27)$$

La (20) quindi, ricordando la (6), fornisce

$$\frac{l' + 3d}{2K} F_m^2 - \left[\frac{l' + d}{K} (\operatorname{sen} \delta - \chi \cos \delta) P - \delta \right] F_m - (d + h)(\operatorname{sen} \delta - \chi \cos \delta) P = 0 \qquad (28)$$

che si trasforma nella (21) se in questa si sostituisce a P

$$P^* = \mu P \qquad (29)$$
$$\text{con} \quad \mu = \operatorname{sen} \delta - \chi \cos \delta.$$

Ecco quindi che l'assicurazione dinamica su pendio si tratta nello stesso modo di quella per caduta verticale, sostituendo al peso vero P un «peso efficace» P* dato dalla (29).

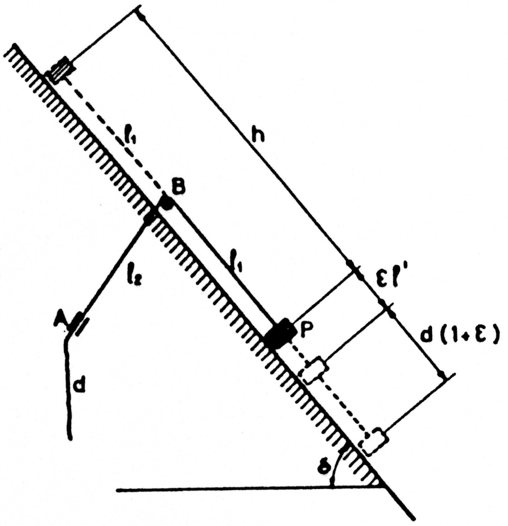


Fig. 9 - Assicurazione «dinamica» su pendio.

Il valore di χ è variabile e incerto, ma fortunatamente μ non ne dipende molto. Ecco due esempi:

	$\delta = 60°$	$\delta = 45°$
$\chi = 0.1$	0.82	0.45
$\chi = 0.3$	0.72	0.35

Perciò penso che un valore ragionevole del peso equivalente a P = 80 kg su pendii nevosi di pendenza attorno ai 50° sia P* = 40 kg.

Le curve relative a P* = 40 kg sono tracciate in fig. 8 [curve (d) ed (e)].

Carlo Zanantoni

(C.A.I. Sez. di Bologna e Varese)

BIBLIOGRAFIA

[1] Leonard R. M., Vexler A.: «Belaying the leader», *Sierra Club Bulletin*, dic. 1946, pag. 68-100.
[2] Vexler A.: «The theory of belaying», *American Alpine Journal*, 1950, pag. 379-405.
[3] Avcin F.: «Cordes d'assurage et assurage à la corde», *Les Alpes*, genn. 1959, pag. 34-48.
[4] Ravizza G.: «Per un centro di studi alpinistici», *Rivista Mensile C.A.I.*, genn. 1951, pag. 24-29.
[5] Henry P., Paragot R.: «Les cordes de l'alpiniste», *La Montagne et Alpinisme*, apr. 1965, pag. 55-63.
[6] Joung G. W.: *Mountain Craft*, London, 1920, 1945.
[7] Hasse D.: «Kreuzsicherungstest auf der Schäbischer Alb», *Alpinismus*, febbr. 1967, pag. 30-32.
[8] Hasse D.: «Seilsicherung im Umbruch», *Alpinismus*, giugno 1967, pag. 22-23.
[9] Zanantoni C.: «È pericoloso arrampicare con due corde sottili?», *Rivista Mensile C.A.I.*, sett. 1968, pag. 413-424.