

Biomeccanica dell'alpinismo su ghiaccio

di Piero Villaggio

1. Introduzione

Questo lavoro costituisce la seconda parte di una ricerca [5] precedentemente avviata sull'applicazione della meccanica elementare e della resistenza dei materiali alla tecnica dell'alpinismo. Precisamente vengono qui esaminati alcuni problemi di equilibrio e di resistenza connessi con la progressione su neve o su ghiaccio che formano il terreno naturale delle salite in alta montagna, ove le cime difficilmente sono raggiungibili per vie di roccia pura anche perché improvvise variazioni di temperatura possono ricoprire di uno strato di neve o di ghiaccio pareti inizialmente asciutte.

Molte delle considerazioni espone nella fase introduttiva dell'articolo sulla biomeccanica dell'arrampicata su roccia [5] sono ovviamente mantenute valide anche in questa sede, perché il problema sotto la forma di «progressione con mezzi naturali» ammette nei due casi uguale formulazione. In particolare viene applicato costantemente il principio di economia e di sicurezza per decidere se un'andatura sia razionale o meno. Piuttosto verranno evidenziati tutti i fatti tecnici che sono caratteristici del terreno su cui si svolge la salita in ghiaccio. Questi fattori di diversificazione rispetto alla parete di pura roccia sono essenzialmente la *omogeneità del pendio di ghiaccio e la possibilità indefinita di ricavare appigli e appoggi di progressione*; e si può affermare che tutte le prerogative della tecnica su ghiaccio sono conseguenze di questi due termini: per esempio la omogeneità del terreno si traduce in una *uniformità* di andatura, ove le doti di *ritmo* e di *tenuta* sono preponderanti rispetto alla *adattabilità istantanea* di coordinare i movimenti allo stato di articolazione della parete; la costruzione artificiale dei punti d'appoggio consente automaticamente di dare maggior rilievo alla sede di collocazione degli arti inferiori, sicché l'avanzamento avviene essenzialmente per lavoro delle gambe; per converso sul pendio ghiacciato sono più difficilmente reperibili buoni punti di sosta e di ancoraggio anche perché il permanente pericolo di caduta di materiale rende precarie le assicurazioni.

Non verranno invece qui esaminate le diversificazioni che dipendono dalle condizioni climatiche tipiche dell'arrampicata su ghiaccio, come la presenza delle basse pressioni e temperature, perché in questo settore — che non è propriamente biomeccanico — la fisiologia ha acquisito un insieme di risultati già noti a livello divulgativo nei manuali di tecnica alpinistica; né si insisterà sulle influenze psicologiche che l'ambiente dell'alta montagna esercita nella sfera della pura prestazione atletica, anche se esse sono importanti e i due domini (mentale e fisico) di difficile separazione.

Un particolare di carattere meteorologico che ha avuto una profonda ripercussione nella storia dell'alpinismo: il fatto che sul pendio il passaggio delle acque, il deposito di neve e infine il moto naturale del ghiacciaio cancelli entro breve tempo le tracce di passaggio, ha conservato lo stato primitivo di molte salite e la corrispondente valutazione nella scala delle difficoltà.

Il lavoro è diviso sostanzialmente in due parti. Una, sviluppata nei paragrafi 2, 5, tratta questioni concernenti la natura del terreno e la resistenza degli ancoraggi; una seconda esamina la ripartizione delle forze nelle principali andature-tipo (paragrafo 3) e i lavori dissipati nelle operazioni di preparazione del terreno (paragrafo 4).

2. Il terreno

La prima importante questione che incide sulla statica dell'arrampicata e della sicurezza su ghiaccio è la risposta del materiale sotto carico. Contrariamente a quanto avviene per i materiali cosiddetti strutturali a temperatura ambiente (acciaio, pietra, ecc.), la presenza di uno stato di tensione in una regione localizzata di una massa indefinita di ghiaccio è accompagnata da un fenomeno fisico alquanto complesso di difficile schematizzazione. Ove vigono tali pressioni il materiale cambia stato perché il punto di fusione dipende dalla pressione, la fusione è accompagnata da uno scambio termico perché la parte che si trasforma in acqua assorbe calore da quella circostante, la differenza di temperatura tende a sparire sicché si riproduce lo stato iniziale con la variazione nel mezzo del punto d'applicazione della pressione. Il fenomeno del taglio del blocco di ghiaccio con un filo di ferro collegato ad un peso, o più propriamente lo sprofondamento dei massi rocciosi caduti sulla superficie di un ghiacciaio sono verifiche sperimentali di questa interazione.

Naturalmente i glaciologi si sono preoccupati di trovare per il ghiaccio una legge costitutiva di tipo classico che ne descrivesse in forma soddisfacente il comportamento sotto carico prescindendo dagli effetti non meccanici. Questo è stato ottenuto inquadrando il ghiaccio nella classe dei materiali cosiddetti viscosi (Glen [1], [2]). Senza entrare

in dettagli tecnici ci limiteremo ad esporre qualitativamente e a commentare le principali conseguenze fenomenologiche del comportamento viscoso. Sotto una pressione costante la deformazione non è costante ma cresce indefinitamente nel tempo: ne consegue come prima fondamentale caratteristica della tecnica su ghiaccio che nessuna posizione è sostenibile indefinitamente sul pendio, perché *nei punti di concentrazione dello sforzo (asta della piccozza, punte dei ramponi, chiodi) si avvia sino dall'inizio un processo di scorrimento viscoso che rende labili i punti di sostegno.*

Non solo, ma poiché la deformazione viscosa cresce con la pressione, gli effetti di scorrimento sono maggiormente vistosi sotto i punti di massima concentrazione. Questo fenomeno può essere di irrilevante importanza quando il carico è ripartito su relativamente estese superficie d'appoggio, ma d'altra parte dimostra la precarietà di certe soste prolungate sulle punte anteriori dei ramponi o peggio il pericolo di prolungato ancoraggio ai chiodi da ghiaccio. Per un meccanismo che verrà illustrato, il chiodo da ghiaccio sotto carico costante tenderà inevitabilmente a fuoriuscire dalla sede di collocazione.

3. Le andature

Il movimento viene idealmente decomposto in una successione di unità in cui si distinguono tre fasi: una *iniziale* in cui il carico è prevalentemente affidato ad una gamba ed eventualmente alle braccia, mentre l'altra gamba scarica è disposta nella posizione di avanzamento; una di *partenza* in cui si ha il passaggio statico del carico da una gamba all'altra; una di *arrivo* in cui il corpo assume la configurazione finale. Il moto avviene naturalmente nell'intervallo fra la seconda e la terza fase.

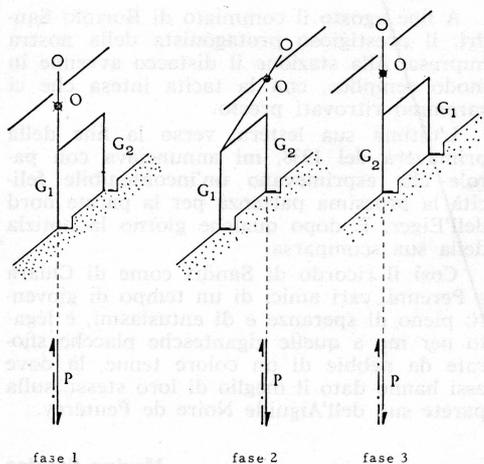


Fig. 1

L'esempio del camminare chiarifica la situazione, intendendo con questo termine le andature che non richiedono l'ausilio delle braccia.

1) *Camminare* (fig. 1). Designamo con 1) la fase iniziale in cui il peso P del corpo è sostenuto direttamente dalla gamba G_1 disposta sulla verticale del baricentro. Nella fase 2) si verifica lo spostamento del carico sulla gamba G_2 , spostamento ottenuto mediante l'inclinazione del busto in modo da disporre il baricentro sulla verticale della gamba G_2 . Nel passaggio dalla fase 2) alla 3) la gamba G_2 viene estesa, il corpo eretto sulla dirittura di G_2 e la gamba G_1 portata in avanti con il piede corrispondente nella

successiva orma. Il moto continua per ripetizione periodica delle tre fasi. L'analisi dell'equilibrio delle forze nelle tre situazioni è immediata perché il carico P viene equilibrato da una forza uguale ed opposta trasmessa successivamente dalla gamba G_1 [fase 1)] e dalla gamba G_2 [fasi 2), 3)].

Alcune brevi considerazioni sull'influenza della natura del terreno. In neve *fresca* lo sprofondamento delle soles richiede un lavoro addizionale per il maggior sollevamento dei piedi nel passaggio da una posizione alla successiva. Quando questa operazione diventa eccessivamente gravosa conviene servirsi della suola in avanzamento per compattificare la sede d'appoggio battendo ripetutamente sulla sua superficie. Naturalmente anche questa operazione richiede lavoro e l'esperienza indica la soglia in cui è opportuno metterla in uso. In neve *dura* le orme vanno invece artificialmente praticate sul pendio con la punta o la costa della suola, secondo che si proceda *frontalmente* secondo la linea di massima pendenza o *obliquamente* a serpentina per evitare l'eccessivo affaticamento della gamba a monte. Il principio di economia consiglia passi brevi e una posizione eretta del corpo, mentre per motivi di sicurezza, si richiede l'appoggio di quasi tutta la suola nella salita obliqua e di almeno la metà della lunghezza del piede in quella frontale (cfr. Sturm e Zintl [4], p. 78).

In discesa, se il pendio non è eccessivamente inclinato, si può procedere con le spalle a monte. Le orme vengono ricavate imprimeando i talloni nella neve con le punte sollevate per ottenere una base orizzontale d'appoggio. La posizione eretta del corpo assicura anche qui una ripartizione uniforme della pressione sulla suola limitando così il pericolo di improvvisi scoscendimenti dell'appoggio.

2) *Uso della piccozza* (fig. 2). Prescindendo dalle altre importanti modalità d'impiego (assicurazione, taglio dei gradini, ecc.) la piccozza determina la prima fase di passaggio dalle andature naturali a quelle artificiali anche quando viene impugnata come semplice punto di appoggio aggiuntivo nel camminare. Come risulta evidente dalla figura 2, la fase 1) è identica al caso precedente e il peso P viene totalmente scaricato sulla gamba G_1 . Al termine della fase 2) invece il peso P viene assorbito in parte dalla gamba G_2 e in parte dalla piccozza. Nella posizione di arrivo 3) il peso P viene infine fatto gravare sulla gamba in arrivo G_2 . Quindi, almeno teoricamente, la piccozza nelle andature semplici, assolve soltanto la funzione di creare un terzo punto d'appoggio a scarico parziale della gamba in avanzamento come il bastone da passeggio. È necessario tuttavia rilevare che non è questa la funzione più importante della piccozza nel camminare semplice, ma piuttosto quella di saggiare il terreno e soprattutto di arresto in caso di scivolamento.

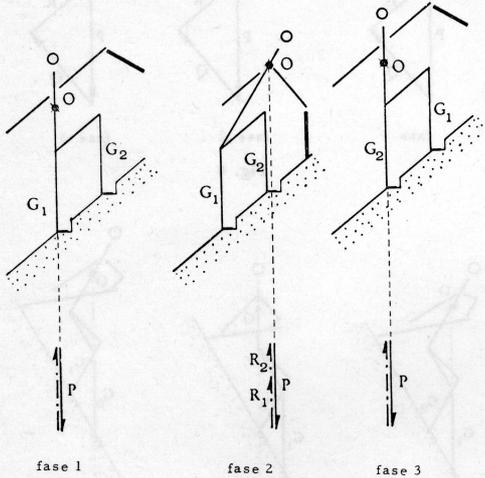


Fig. 2

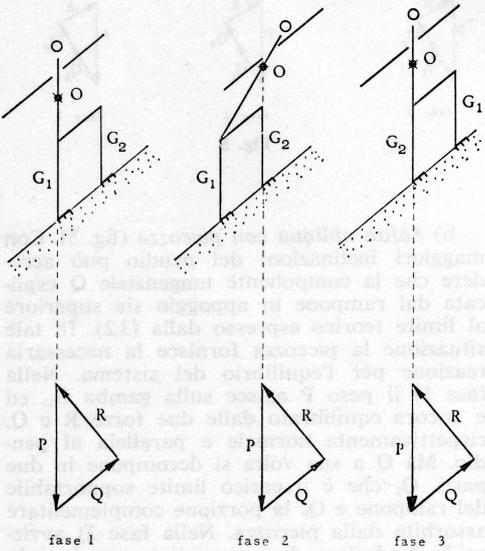


Fig. 3

3) *Uso dei ramponi* (fig. 3). I ramponi assolvono ad una funzione statica alquanto semplice, che macroscopicamente consiste nella creazione artificiale di un coefficiente d'attrito corpo-terreno tale da consentire l'equilibrio sul pendio inclinato. Quando i denti sono penetrati entro il manto nevoso il peso verticale P nelle tre fasi, che sono staticamente analoghe a quelle esaminate nel caso 1), viene equilibrato dalla reazione R del pendio che è normale alla superficie d'appoggio e dalla componente d'attrito Q funzione dell'inclinazione α del pendio secondo la formula elementare

$$Q = R \operatorname{tg} \alpha \quad (3.1)$$

In effetti è anche possibile valutare i limiti teorici dell'aderenza dei ramponi in termini della lunghezza delle punte infisse e della resistenza limite a compressione dello strato di neve. Ammettendo che tutte le dieci punte verticali siano infisse sino alla radice, e che si abbia ripartizione uniforme dello sforzo su tutte le punte, il valore limite del carico Q è dato dalla formula:

$$Q_L = 10 \sigma_0 S, \quad (3.2)$$

dove σ_0 è il valore della resistenza a compressione della neve, S l'area di ciascuna punta e 10 il numero totale delle punte verticali di ciascun rampone. Poiché nella (3.2) S è una costante, ne consegue che un aumento della tenuta dei ramponi può essere parzialmente ottenuto influenzando sull'unico parametro controllabile σ_0 : questo è l'effetto di una compattificazione preliminare del pendio prima di infilarvi le punte dei ramponi perché la resistenza a compressione della neve è sensibilissima al consolidamento che diminuisce la porosità.

Risulta pure evidente la validità della regola empirica di disporre le soles perpendicolari alla superficie d'appoggio. Primo perché è massimo il numero di punte infisse, secondo perché si può contare su una ripartizione uniforme del carico sulle stesse.

Come sottocasi del presente paragrafo esaminiamo le principali andature a ramponi.

a) *Salita obliqua* (fig. 4). Per pendii di moderata inclinazione [fino a 25 gradi (1)], conviene progredire obliquamente poggiando le soles normalmente al pendio e forzando sulle caviglie per mantenere la posizione eretta. Nella figura 4 le tre fasi fondamentali sono riprodotte frontalmente. Nella fase 1) il peso P grava interamente sulla gamba G_1 ; la gamba G_2 , inizialmente indietro alla G_1 , viene portata avanti a questa e caricata (fase 2); si effettua il sollevamento sulla G_2 e si porta avanti la G_1 in modo tale da riprendere lo schema della fase 1). Piccole inclinazioni del busto in avanti e lateralmente permettono di disporre il baricentro sulla verticale del punto di appoggio.

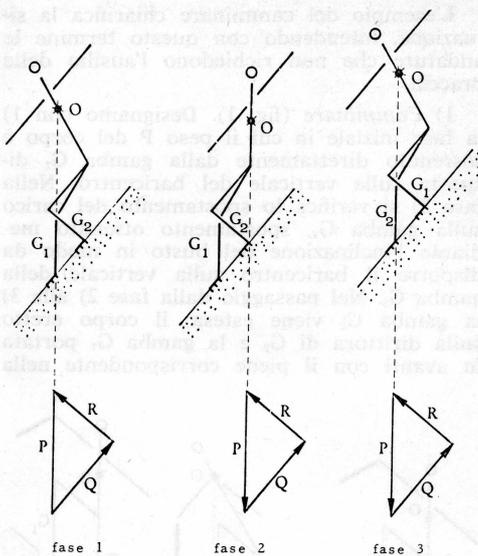


Fig. 4

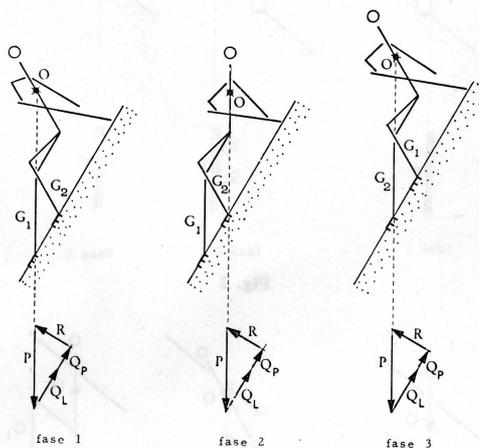


Fig. 5

b) *Salita obliqua con piccozza* (fig. 5). Con maggiori inclinazioni del pendio può accadere che la componente tangenziale Q esplicata dal rampone in appoggio sia superiore al limite teorico espresso dalla (3.2). In tale situazione la piccozza fornisce la necessaria reazione per l'equilibrio del sistema. Nella fase 1) il peso P agisce sulla gamba G_1 , ed è ancora equilibrato dalle due forze R e Q , rispettivamente normale e parallela al pendio. Ma Q a sua volta si decompone in due parti, Q_L che è il carico limite sopportabile del rampone e Q_p la porzione complementare assorbita dalla piccozza. Nella fase 2) avviene la medesima decomposizione con la sola differenza che l'equilibrio avviene sulla gam-

(1) Cfr. Sturm e Zintl [4], p. 86.

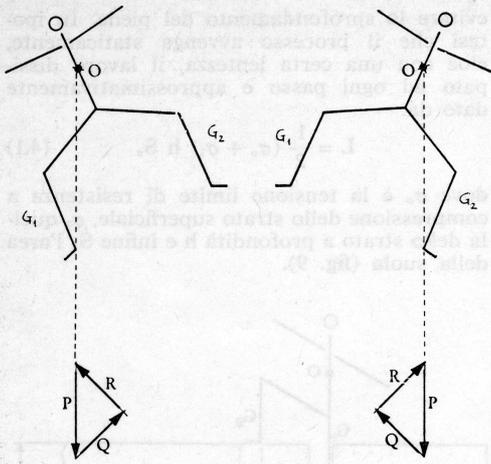


Fig. 6

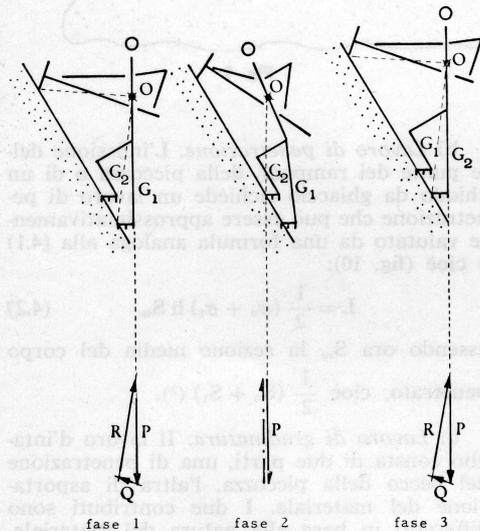


Fig. 7

ba G_2 , fatto che comporta un opportuno spostamento del busto. Infine la fase 3) è identica alla 1), eccetto che la posizione delle gambe è invertita.

E tuttavia necessario ricordare che l'uso della piccozza non è soltanto prescritto per motivi di sostegno, ma anche da ragioni di sicurezza per fronteggiare situazioni imprevedute.

c) *Discesa a V* (fig. 6). Una tecnica caratteristica per la discesa a ramponi di pendii non troppo inclinati è quella a V, che consiste del disporre alternativamente i piedi con le punte aperte verso valle mentre il corpo (con le spalle a monte) oscilla alternativa-

mente per collocare il baricentro sulla verticale del punto d'appoggio. Nella figura 7 sono rappresentate le fasi 1) e 2), la prima di equilibrio sulla gamba G_1 , la seconda sulla G_2 . In entrambe le posizioni il carico P è equilibrato dalla risultante di R , reazione normale al pendio, e Q componente tangenziale trasmessa attraverso i ramponi. Affinché l'appoggio sia completo è necessaria una lieve flessione delle ginocchia mentre per l'equilibrio la distanza ottima fra i talloni è della lunghezza di un piede circa (cfr. Sturm e Zintl [4], p. 83). Scioltrezza e ritmo sono prerogative essenziali di questa andatura.

d) *Discesa a V con piccozza*. Se l'inclinazione è notevole, da 30 a 50 gradi, la tecnica a V è ancora applicabile purché si utilizzi la piccozza per appoggio e sicurezza. Nel primo caso la situazione di equilibrio è identica a quella schematizzata nella figura 6, con la sola differenza che la componente Q consta ora di due contributi, Q_1 agente sul rampone, Q_2 agente sulla punta del bastone della piccozza, come si verifica nel caso b).

e) *Salita frontale* (fig. 7). In brevi salti a più di 45 gradi di inclinazione viene spesso applicata in salita la cosiddetta tecnica frontale combinata all'uso della piccozza. Qui l'appoggio avviene sulle punte dei ramponi mentre il terzo punto d'appoggio è offerto dalla punta della piccozza, che viene impugnata con una mano alla sommità mentre l'altra mano esercita la trazione all'altezza della punta. Le fasi di equilibrio consistono nell'alternativa decomposizione del peso P secondo la gamba tesa e la piccozza [fasi 1) e 3)] oppure secondo la gamba flessa e la piccozza [fase 2)].

La penetrazione delle punte dei ramponi è mantenuta dalla spinta verso il basso delle caviglie. Naturalmente esistono due valori limiti teorici delle componenti dello sforzo trasmesse parallelamente al pendio dalle punte dei ramponi e dalla piccozza. Tali valori dipendono proporzionalmente dalla sezione resistente del corpo immerso e dalla resistenza della neve. E poiché i due termini sono in pratica contrastanti perché una buona penetrazione può avvenire solo con neve cedevole, ne consegue che la tecnica frontale a ramponi è piuttosto faticosa e per questo viene consigliata per brevi tratti di pendio.

4) *Gradinatura*. La necessità di intagliare gradini interviene quando l'inclinazione o la consistenza del pendio non consentono l'impiego di altre tecniche. La pratica prescrive che l'intaglio dei gradini avvenga manovrando la piccozza con le due braccia (cfr. Sturm e Zintl [4], p. 94), perché l'uso di un solo braccio è faticoso. Sempre per economia di sforzo, il movimento deve essere sciolto senza impegnare una eccessiva contrazione dei muscoli del braccio, il centro di rotazione del moto essendo concentrato nell'articolazione della spalla.

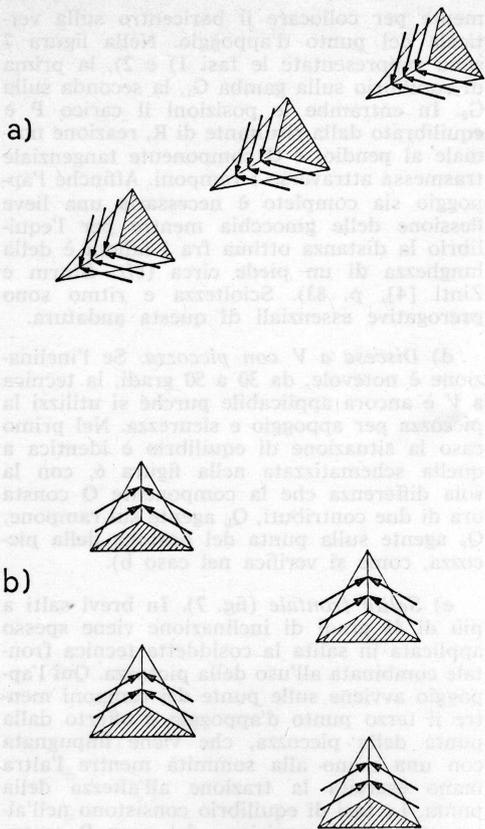


Fig. 8

La salita obliqua procede secondo una serie di gradini *orizzontali* (fig. 8 a), ciascuno ottenuto mediante sei o sette colpi di piccozza vibrati nelle due direzioni indicate in figura, in modo che la base sia ampia a sufficienza per contenere tutte le punte verticali del rampone. La salita verticale richiede invece l'intaglio di gradini *verticali* (fig. 8 b) disposti su due colonne e della larghezza alla base tale da alloggiare almeno la metà anteriore del piede. La figura indica pure le due direzioni di battitura più naturali.

4. I lavori addizionali

Con il termine *lavori addizionali* indichiamo i lavori meccanici spesi nella artificializzazione del pendio, cioè in quelle operazioni che ne modificano lo stato naturale allo scopo di permettere la progressione. Questo lavoro va aggiunto evidentemente al lavoro meccanico netto (peso \times dislivello) nel conto dell'energia totale spesa.

a) *Lavoro di consolidamento.* È il lavoro speso durante l'operazione spontanea di consolidare il terreno antistante premendo con la suola nella base d'appoggio successiva per

evitare lo sprofondamento del piede. In ipotesi che il processo avvenga staticamente, cioè con una certa lentezza, il lavoro dissipato ad ogni passo è approssimativamente dato da:

$$L = \frac{1}{2} (\sigma_0 + \sigma_1) h S_s \quad (4.1)$$

dove σ_0 è la tensione limite di resistenza a compressione dello strato superficiale, σ_1 quella dello strato a profondità h e infine S_s l'area della suola (fig. 9).

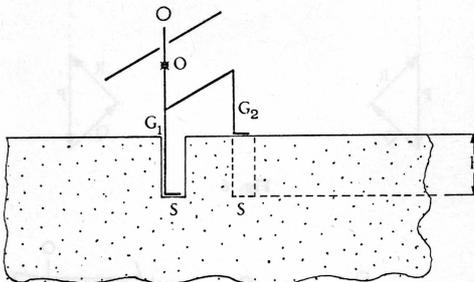


Fig. 9

b) *Lavoro di penetrazione.* L'infissione delle punte dei ramponi, della piccozza o di un chiodo da ghiaccio richiede un lavoro di penetrazione che può essere approssimativamente valutato da una formula analoga alla (4.1) e cioè (fig. 10):

$$L = \frac{1}{2} (\sigma_0 + \sigma_1) h S_m \quad (4.2)$$

essendo ora S_m la sezione media del corpo penetrato, cioè $\frac{1}{2} (S_0 + S_1)$ (2).

c) *Lavoro di gradinatura.* Il lavoro d'intaglio consta di due parti, una di penetrazione del becco della piccozza, l'altra di asportazione del materiale. I due contributi sono differenti in base alla natura del materiale, per esempio in ghiaccio vivo, che è un materiale essenzialmente fragile, il lavoro di asportazione è trascurabile; invece in neve i rapporti sono invertiti proporzionalmente al grado di durezza. Al limite in neve fresca (ma in tal caso non è necessario gradinare!) il lavoro d'intaglio è totalmente di ablazione.

Osservazione. Nel computo del lavoro addizionale non si tiene conto della energia spesa in altre operazioni pur frequenti ed importanti durante la progressione (infissione di chiodi di sicurezza, spostamenti di equilibrio ecc.), non rivestendo essi quella prerogativa di sistematicità derivante dalla schematizzazione di una andatura-tipo su un dato terreno.

(2) Ammesso che vari linearmente lungo la retta di penetrazione.

5. La resistenza degli ancoraggi

L'ancoraggio è ottenuto mediante la piccozza o chiodi piantati sino alla testa perpendicolarmente al pendio [fig. 11 a)].

La giustificazione tecnica di questa regola risiede nella distribuzione delle tensioni interagenti fra l'asse dello strumento d'ancoraggio e il mezzo circostante. Ammettendo che la legge di distribuzione sia lineare con

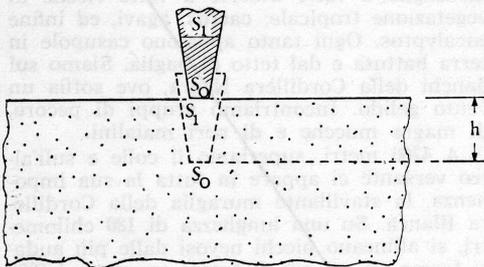


Fig. 10

un punto di annullamento a $2/3$ della profondità di immersione ⁽³⁾, dal calcolo risulta che, a parità di lunghezza dell'ancoraggio, la massima tensione di compressione vale

$$\sigma_a = \frac{6P}{hb}, \quad \sigma_b = \frac{6P}{h \cos \alpha b}, \quad (5.1)$$

rispettivamente nel caso a) e b). Nelle (5.1) b è il diametro della sezione del corpo immerso, supposto cilindrico, e α l'inclinazione dell'asse rispetto alla normale. Il confronto fra la (5.1)₁ e la (5.1)₂ dimostra che σ_b è necessariamente più grande per la presenza del termine $\cos \alpha$ al denominatore. In entrambe le situazioni la massima tensione sorge sullo strato superficiale ove abitualmente la resistenza del mezzo è più bassa.

Quando l'asse è inclinato esiste inoltre una forza normale $P \sin \alpha$ agente nel senso della trazione nello schema indicato nella figura 11 b) o di compressione se l'inclinazione è simmetrica (direzione OA'_B). La presenza di una forza aggiuntiva di compressione è importante per evitare l'uscita del dispositivo di ancoraggio, per questo motivo esperienze più recenti hanno dimostrato (cfr. Sticht [3]) che la posizione ottima dell'asse è quella con un *piccolo angolo di inclinazione* nel senso della direzione dello sforzo (direzione OA'_A).

Per ovviare alla non uniforme ripartizione della pressione lungo il fusto si può ricorrere infine alla *completa immersione* dell'ancoraggio (fig. 12) eventualmente comprimendo gli strati con il peso del corpo (Sticht [3]). In tal caso, se la forza P di trazione è applicata nel baricentro del fusto, la tensione di compressione uniforme esercitata nel mezzo vale:

⁽³⁾ Che è l'ipotesi comunemente adottata nella statica dei pali rigidi infissi in terreno elastico.

$$\sigma = \frac{P}{hb} \quad (5.2)$$

con evidente riduzione del cemento rispetto ai casi precedenti. In via sperimentale sembra accertato che l'ancoraggio immerso comporta un aumento di più del 100% della capacità di tenuta (Sticht [3]).

Infine per i chiodi da ghiaccio a vite manuali di tecnica (cfr. Sturm e Zintl [4], p. 124) consigliano come posizione ottima, non quella perpendicolare al pendio, bensì quella con un'inclinazione di circa 45° in senso contrario alla direzione di provenienza dello sforzo.

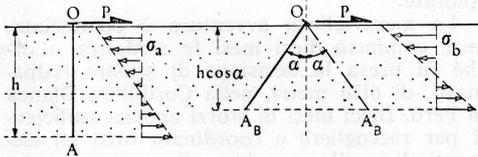


Fig. 11

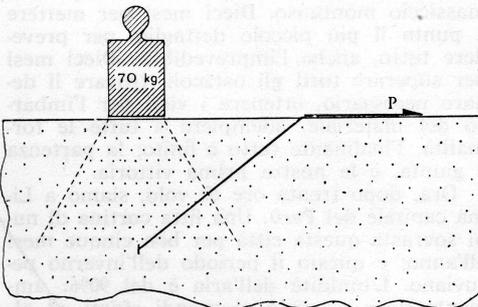


Fig. 12

La giustificazione teorica di questa prescrizione di prevedibile origine empirica non è chiara. Probabilmente dipende dalla distribuzione non uniforme della pressione sulle varie spire della vite sotto una forza normale, che tende a sollecitare più intensamente gli strati superficiali. La forte inclinazione del fusto rispetto alla linea d'azione dello sforzo escluderebbe così la presenza di tensioni di trazione eccessive in corrispondenza della zona di ghiaccio adiacente alla testa del chiodo.

Piero Villaggio

(C.A.I. Sezione di Udine e C.A.A.I.)

BIBLIOGRAFIA

- [1] FINNILL, I. and HELLER, W. R.: *Creep of engineering materials*. Mc Graw-Hill (1959).
- [2] JUDD, R.: *State of stress in the earth's crust*. Elsevier (1964).
- [3] STICHT, F.: «Sicherheit in Farn und Eis». «Alpinismus», 8 (1970), 27-29.
- [4] STURM-ZINTL: *Sicheres klettern in Fels + Eis*. BLV (1969).
- [5] VILLAGGIO, P.: «Introduzione alla biomeccanica dell'alpinismo». R.M., 10 (1969), 468-476.