



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

Mechanical model for the artificial triggering of dry snow slab avalanches

*Original*

Mechanical model for the artificial triggering of dry snow slab avalanches / Cardu, M.; Chiaia, B.; Chiaravalloti, L.; Cornetti, P.; Frigo, B.. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - 120:1(2007), pp. 25-36.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2852518 since: 2020-11-12T13:56:55Z

*Publisher:*

Patron Editor

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# Modello meccanico per l'innescò di valanghe di neve

Marilena Cardu (1, 2)

Bernardino Chiaia (3)

Lorenzo Chiaravallotti (4)

Pietro Cornetti (3)

Barbara Frigo (3)

(1) DITAG, Politecnico di Torino, Italy

(2) IGAG-CNR, Torino, Italy

(3) DISTR, Politecnico di Torino, Italy

(4) Ing. Ambiente e Territorio, Torino, Italy

L'articolo illustra un criterio accoppiato tensionale/energetico per l'innescò spontaneo ed artificiale delle valanghe di neve, considerando la presenza di un difetto nello strato debole del manto nevoso. Il modello considera l'approccio tensionale e quello energetico. In base agli studi di Leguillon [2002] e Cornetti et al. [2006], si propone il confronto fra i due criteri, assumendo che entrambi debbano essere contemporaneamente verificati per la propagazione della frattura in Modo II. Considerando l'energia specifica di vari tipi di esplosivi e valutandone la capacità di trasmissione attraverso i differenti strati costituenti il manto nevoso, il criterio è applicato al distacco di valanghe indotto dagli esplosivi. Infine, mediante il calcolo del carico equivalente con il criterio tensionale e dell'energia indotta dall'onda d'urto con il criterio energetico, si testa l'efficacia del modello per il distacco artificiale di valanghe di neve a lastroni.

**Mechanical model for the artificial triggering of dry snow slab avalanches** The paper shows a coupled stress/energy criterion for spontaneous and artificial triggering of dry snow slab avalanches, starting from a defect in the weak layer of the snowpack.

The model takes into account both the tensional and the energetic approach. According to Leguillon [2002] and Cornetti & oth. [2006], a comparison between these two approaches is suggested, assuming that both should be simultaneously verified for the fracture's motion in Mode II.

Considering the specific energy of different kinds of explosives and evaluating their transmittance capacity through the different snow layers, the method is applied to the artificial detachment of avalanches by explosive. Finally, thanks to the computation of the equivalent load (through the tensional approach) and of the energy induced by the shock wave (through the energetic approach), the effectiveness of the model is checked for the artificial detachment of snow slab avalanches.

**Critère mécanique pour le départ artificiel des avalanches de neige** L'article illustre un critère tensionnel/énergétique pour le départ spontané et artificiel des avalanches de neige, ayant considéré la présence d'un défaut dans la couche faible du manteau neigeux. Le modèle considère soit l'approche tensionnel soit celui énergétique. Sur la base des études de Leguillon [2002] et Cornetti et al. [2006], on propose une comparaison entre les deux critères, avec l'assumption que tous les deux doivent être en même temps vérifiés pour la propagation de la fissure dans le Mode II.

Ayant considéré l'énergie spécifique des différents types d'explosives et ayant évalué leur capacité de transmission à travers les couches du manteau de neige, le critère est appliqué au décollement des avalanches à l'explosif. Enfin, au moyen du calcul de la charge équivalente avec le critère tensionnel et de l'énergie induite par l'onde de choc avec le critère énergétique, on va vérifier l'efficacité du modèle pour le décollement artificiel des avalanches de neige à plaques.

## 1. Introduzione

A seguito del crescente sviluppo delle attività antropiche, la protezione del territorio dai fenomeni naturali costituisce un obiettivo sempre più attuale e prioritario: in ambiente montano, in particolare, il problema del distacco di valanghe di neve comporta notevoli rischi, cui occorre far fronte. L'ingegneria si è da sem-

pre impegnata su questo problema, sia dal punto di vista scientifico (dall'individuazione del fenomeno allo sviluppo di modelli di innescò e di dinamica) sia tecnico (dalla progettazione di opere di difesa all'impiego di tecnologie più versatili e mobili, come il distacco artificiale).

La nota tratta entrambi i rami dell'ingegneria applicata alle valanghe di neve, presentando un mo-

dello meccanico per il loro innescò sia spontaneo sia artificiale, e si propone come strumento di previsione dell'innescò spontaneo (stima dell'altezza critica del lastrone, della dimensione critica del difetto e dello spessore critico dello strato debole), e di protezione per il distacco artificiale tramite esplosivo.

Per fare ciò, dapprima si richiama le modalità di innescò spontaneo delle valanghe di neve a lastroni, con l'esposizione della teoria del modello accoppiato "Avalanche shear lag", quindi si espongono le modalità di azione delle onde d'urto all'interno del manto nevoso, per la successiva applicazione del modello al distacco artificiale.

## 2. Innescò delle valanghe a lastroni

Il manto nevoso, risultato del processo di accumulo, trasporto eolico e compattazione di cristalli di neve e ghiaccio, è costituito da strati che differiscono per età, microstruttura, spessore, durezza; ognuno di essi è caratterizzato dal proprio stato tensionale, variabile in funzione della sua genesi e del successivo metamorfismo. Indagini in sito, confermando la stratigrafia del manto nevoso, hanno mostrato che le valanghe di neve a lastroni si formano tipicamente da manti nevosi composti da un sottile strato debole (*weak layer*) sottostan-

te uno spesso lastrone di neve con coesione medio-alta. Il *weak layer*, che si origina in particolari condizioni ambientali, è costituito da macrocristalli (dimensioni fino a qualche mm) che conferiscono allo strato stesso proprietà meccaniche molto scadenti, soprattutto se confrontate con quelle del lastrone sovrastante. Alla base dello strato debole si considera la presenza di un ulteriore strato coesivo – strato basale – coincidente con il pendio oppure con un aggiuntivo lastrone di neve di elevate caratteristiche meccaniche e alta densità.

Per studiare la stabilità del manto nevoso considerando l'equilibrio delle forze agenti, si definisce lo sforzo di taglio agente all'interno dello strato debole come:

$$\tau_N = \gamma \sin \alpha H \quad (1)$$

in cui  $H$  è l'altezza del lastrone di neve,  $\alpha$  l'inclinazione del pendio (Fig. 1) e  $\gamma$  la massa volumica della neve.  $\tau_N$  è definita come la tensione tangenziale nominale agente direttamente sullo strato debole, nel caso di assenza di difetti preesistenti. È infatti noto [e.g. Schweizer, 1999] che il distacco di una valanga a lastroni è causato dalla presenza di difetti all'interno dello strato debole (*super-weak zones* [Bader and Salm, 1990]) che agiscono come *stress concentrators*. Considerando perciò la presenza di una *super-weak zone* all'interno dello strato debole, il manto nevoso risulta costituito dal lastrone (parti scollata e incollata), dallo strato debole e dalla *super-weak-zone* (Fig. 1). In particolare, nella parte scollata del lastrone di neve si osservano rilevanti tensioni normali in direzione parallela al pendio, che

portano la parte a valle del lastrone in compressione e quella a monte in trazione. Ancora più importante risulta la concentrazione delle tensioni all'interno dello strato debole circostante la *super-weak zone*, dovuta alla necessità da parte dello strato debole intatto di trasferire la componente del peso della parte scollata del lastrone lungo il pendio allo strato basale coesivo. In altre parole, la tensione tangenziale massima può risultare maggiore di quella di taglio nominale  $\tau_N$  (eq. (1)) a causa della presenza della *super-weak zone*.

È possibile che, per svariate ragioni (nuove nevicate, peso degli sciatori, decadimento delle proprietà meccaniche della neve, ecc...), il difetto basale si inneschi, provocando la propagazione della frattura in Modo II (di scivolamento nel piano) e in Modo III (strappo) lungo lo strato debole sottostante il lastrone. Questo processo di propagazione risulta instabile, ovvero si ha una rapida auto-propagazione della frattura per taglio. In accordo con l'ipotesi di geometria piana, si considera l'apice della fessura sollecitata esclusivamente in Modo II. Inoltre, la tensione tangenziale residua  $\tau_r$ , presente nella fessura dopo la propagazione, è considerata trascurabile. Successiva alla propagazione della frattura per taglio alla base del lastrone, un'ulteriore fessura in Modo I (di apertura) appare nella parte incollata del lastrone di neve, a causa delle alte sollecitazioni di trazione: tale fessura si propaga lungo tutto lo spessore del lastrone, che può scivolare sul pendio

(frattura in corona) rendendo visibile l'innesco della valanga.

### 3. Distacco spontaneo: modello shear lag

Per valutare l'incremento della concentrazione degli sforzi all'interno dello strato debole a causa della presenza della *super-weak zone*, al fine di realizzare un modello per la previsione di un eventuale distacco di una valanga a lastroni, viene proposto un criterio di rottura accoppiato tensionale/energetico per la valutazione del campo tensionale agente all'interno del manto nevoso, basato sulla teoria dei modelli *shear lag*, generalmente usati per lo studio del comportamento dei materiali compositi (e.g. materiali fibro-rinforzati [Stang et al., 1990]).

Essendo il Modulo di Young della neve costituente lo strato debole di gran lunga inferiore a quello del lastrone, si assumono le deformazioni dovute al taglio concentrate nello strato debole. Di conseguenza, il lastrone risulta indeformato in assenza di *super-weak zones* (come accade in realtà) ed esclusivamente soggetto a dilatazione in direzione parallela al pendio in presenza di difetti interni al *weak layer*. Si assume valido il principio di conservazione delle sezioni piane.

Considerando il sistema di riferimento Cartesiano  $(x,y)$  riportato

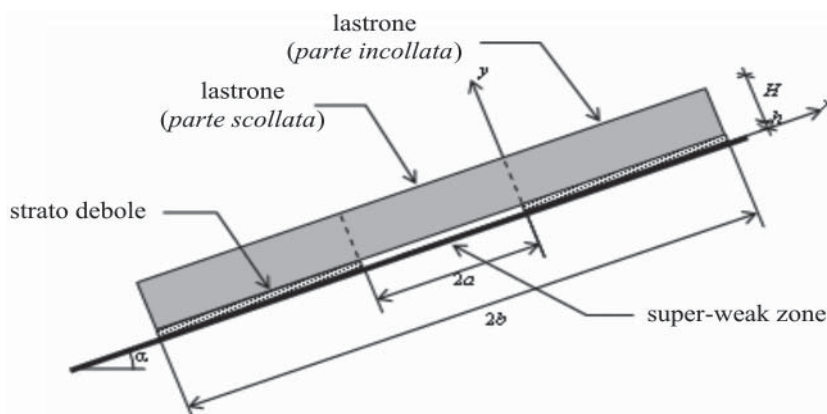


Fig. 1. Schema del manto nevoso: il lastrone di neve, lo strato debole e la *super-weak zone*. Da notare l'origine del sistema di riferimento.

The snowpack: snow slab, weak layer and *super-weak zone*. The origin of the reference system is at the top of the *super-weak zone*.

in Fig. 1 e definendo  $a$  la semi-lunghezza della *super-weak zone*,  $b$  la distanza tra il centro del difetto e il limite superiore del lastrone (coincidente con il limite superiore dello strato debole), è possibile definire lo spostamento  $u$  in direzione  $x$  della generica sezione del lastrone rispetto allo strato basale considerato rigido e fisso, che nelle ipotesi fatte risulta indipendente da  $y$ . Si assume  $b \gg a$ . Ipotizzando la neve un materiale elastico-lineare ed il campo deformativo piano in funzione degli spostamenti, l'equilibrio del concio infinitesimo del lastrone in direzione parallela al pendio (trascurando le forze inerziali) è espresso come:

$$\tau = \frac{dN}{dx} - \gamma H \sin \alpha \quad (2)$$

in cui  $\tau$  è la tensione tangenziale all'interno dello strato debole ed  $N$  la forza assiale per unità di spessore del lastrone. Si suppongono costanti rispetto alla variabile  $x$  le proprietà meccaniche (modulo di Young effettivo della neve del lastrone  $[E' = E/(1 - \nu^2)]$  e modulo di taglio della neve dello strato debole  $G_w$ ) e geometriche (altezza del lastrone  $H$ , spessore dello strato debole  $h$ ) di ciascun tipo di neve del manto nevoso.

Si noti come, in assenza di difetti interni allo strato debole,

lo spostamento  $u$  risulti costante, comportando  $N$  nullo e  $\tau$  pari (in valore assoluto) a  $\tau_N$  (eq. (1)). Al contrario, in presenza di un difetto di lunghezza pari a  $2a$ , considerando la simmetria del sistema rispetto al centro della *super-weak zone* ( $x = -a$ ), il lastrone è in trazione nella sua parte superiore ed in compressione in quella inferiore, rispetto alla posizione della *super-weak zone*. Focalizzando l'attenzione sulla parte superiore del manto nevoso ( $x > -a$ ), si ricavano due soluzioni distinte, rispettivamente per la parte *scollata* e per quella *incollata* del lastrone. In particolare, nella parte *scollata* ( $-a < x < 0$ ), lo strato debole non è in grado di trasmettere nessuna tensione, comportando  $\tau = 0$  e, dall'eq. (2):

$$N = \gamma H \sin \alpha (x + a), \quad -a < x < 0 \quad (3)$$

Al centro della *super-weak zone* (i.e.  $x = 0$ ), per simmetria, risulta  $N = 0$ .

Nella parte *incollata* ( $0 < x < b-a$ ), dall'eq. (2) e definendo il parametro  $\psi = \sqrt{\frac{E' H h}{G_w}}$  come lunghezza caratteristica del modello, si ottiene l'equazione differenziale per gli spostamenti:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{u}{\psi^2} = \frac{\gamma \sin \alpha}{E'}, \quad (4)$$

$$0 < x < b-a$$

di soluzione generale:

$$u(x) = c_1 e^{x/\psi} + c_2 e^{-x/\psi} - \frac{\psi^2 \gamma \sin \alpha}{E'} \quad (5)$$

Per valori tipici di parametri geometrici e fisico-meccanici del manto nevoso (Tabella 1), la lunghezza  $\Psi$  è dell'ordine dei decimetri e pertanto può essere trascurata per  $(b - a) \gg \Psi$ . Imponendo come condizioni a contorno l'espressione della forza assiale (eq. (3)) al limite superiore del difetto (per  $x = 0$ ,  $N = \tau_N a$ ) e al limite superiore del lastrone (per  $x = b - a$ ,  $N = 0$ ), la soluzione dell'eq. (5) risulta nella forma:

$$u(x) = -\frac{\psi^2 \gamma \sin \alpha}{E'} \left( 1 + \frac{a}{\psi} e^{-x/\psi} \right), \quad 0 < x < b-a \quad (6)$$

Dall'espressione del campo tensionale in funzione degli spostamenti e della definizione di  $\Psi$ , la tensione tangenziale all'interno dello strato debole è:

$$\tau(x) = -\tau_N \left( 1 + \frac{a}{\psi} e^{-x/\psi} \right),$$

Tab. 1 – Valori tipici in letteratura per i parametri caratterizzanti le proprietà fisico-meccaniche e geometriche dello strato debole e del lastrone.

*Typical values for snow slab and weak layer: physical-mechanical and geometrical properties.*

| Parametro                                 | Valore tipico         | Intervallo                | Riferimento                                   |
|---|-----------------------|---------------------------|---|
| Inclinazione pendio: $\alpha$             | 38°                   | 30-45°                    | Schweizer [1999]                              |
| Altezza lastrone: $H$                     | 0.5 m                 | 0.3-1 m                   | Schweizer [1999]                              |
| Spessore strato debole: $h$               | 10 mm                 | 1-15 mm                   | Schweizer [1999]                              |
| Densità lastrone: $\rho$                  | 200 kg/m <sup>3</sup> | 100-300 kg/m <sup>3</sup> | Schweizer [1999]                              |
| Modulo Elastico lastrone: $E$             | 1 MPa                 | 0.5-10 MPa                | Schweizer [1999]                              |
| Coefficiente di Poisson lastrone: $\nu$   | 0.2                   | 0.1-0.4                   | Schweizer [1999]                              |
| Modulo tangenziale strato debole: $G_w$   | 0.1 MPa               | 0.1-0.6 MPa               | Föhn et al. [1998]<br>Jamienson et al. [2001] |
| Resistenza strato debole: $\tau_p$        | 2 kPa                 | 0.3-6 kPa                 | Föhn et al. [1998]<br>Jamienson et al. [2001] |
| Energia di frattura in Modo II: $G_{IIc}$ | 0.2 J m <sup>-2</sup> | 0.1-0.3 J m <sup>-2</sup> | Kirchner et al. [2002]                        |

$$0 < x < b-a \quad (7)$$

mentre la forza assiale nel lastrone risulta:

$$N(x) = (\tau_N a) e^{-x/\psi}, \quad 0 < x < b-a \quad (8)$$

Le eq. (7) e (8) esprimono l'effetto della *super-weak zone*: essa induce una concentrazione della tensione tangenziale all'interno dello strato debole e, allo stesso tempo, una forza assiale nel lastrone. Spostandosi verso il limite superiore del manto nevoso, la tensione tangenziale  $\tau$  tende al valore asintotico  $\tau_N$ , mentre la forza assiale  $N$  svanisce. Si osserva che, per una determinata lunghezza del difetto  $a$ , bassi valori di  $\Psi$  causano una più pronunciata concentrazione delle tensioni; esse, peraltro, decadono rapidamente con il progressivo allontanamento dall'apice della fessura. Tale concentrazione degli sforzi si annulla per  $a \rightarrow 0$ , in quanto  $u$  risulta costante,  $\tau$  (in valore assoluto) è pari a  $\tau_N$  e  $N$  è nullo per ogni valore di  $x$ .

### 3.1 Il criterio di innesco tensionale

Al fine di determinare il criterio tensionale per la propagazione della frattura all'interno dello strato debole, si assume che la rottura abbia luogo quando la tensione tangenziale  $\tau$  nello strato debole raggiunge il valore critico  $\tau_p$  (i.e. la resistenza al taglio della neve

dello strato debole). Essendo il valore massimo della tensione tangenziale  $\tau_{max}$  ottenuto all'apice del difetto ( $x = 0$ ), si esprime il criterio di rottura tensionale per l'innesco spontaneo:

$$\tau_{max} = \tau_N \left( 1 + \frac{a}{\psi} \right) = \tau_p \quad (9)$$

con relativa tensione tangenziale nominale alla rottura  $\tau_{N,s}$ :

$$\tau_{N,s} = \frac{\tau_p}{1 + a/\psi} \quad (10)$$

L'eq. (10) afferma che, in assenza di difetti, la tensione nominale critica è correttamente fornita da  $\tau_p$  mentre, in presenza di un difetto di lunghezza ad esempio pari a 2 m all'interno dello strato debole ( $a = 1$  m), la tensione nominale critica decresce e risulta pari a  $\tau_p/6$ . Il modello *shear lag* è perciò in grado di evidenziare come la presenza di un difetto all'interno dello strato debole possa ridurre drasticamente la tensione nominale critica rispetto al caso dello strato debole integro (assenza di difetti). Si sottolinea che il criterio tensionale (eq. (9)) implica comunque una propagazione instabile della frattura, a causa dell'incremento della tensione tangenziale massima in funzione di  $a$ .

### 3.2 Il criterio di innesco energetico

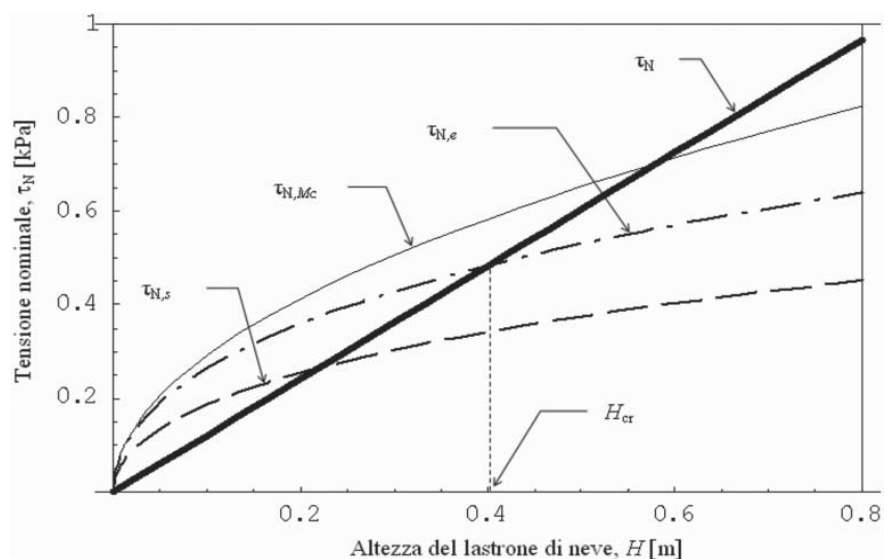
Considerando ora il criterio energetico di rottura, si assume che la propagazione della fessura abbia luogo quando la *crack driving force*  $G_{II}$  raggiunge il valore critico  $G_{IIc}$  (i.e. l'energia di frattura in modo II per la neve costituente lo strato debole). Denotando con  $\Phi$  l'energia di deformazione dell'intero manto nevoso e considerando per simmetria solo la parte a monte dello schema di Fig. 1, (i.e.  $x > -a$ ), si definisce il criterio energetico di rottura per l'innesco delle valanghe come:

$$G_{II} = \left( \frac{d\Phi}{da} \right) = G_{IIc} \quad (11)$$

Per il Principio della Sovrapposizione degli Effetti, l'energia di deformazione  $\Phi$  (per unità di spessore) è la somma delle differenti energie di deformazione di tutte le parti costituenti il manto nevoso (Fig. 2), quali l'energia di deformazione nella *super-weak zone* ( $\Phi_0 = 0$  essendo trascurata la tensione di taglio residua  $\tau_r$ ), nella zona scollata del lastrone di neve ( $\Phi_1$ ), nella zona incollata del lastrone di neve ( $\Phi_2$ ) e nello strato debole ( $\Phi_3$ ) a monte della *super-weak zone*, definite grazie alle eq. (3), (8) e (7). Altri termini che contribuiscono al calcolo di  $\Phi$  (come lo

Fig. 2. Andamento della tensione tangenziale nominale rispetto all'altezza del lastrone  $H$  per  $a = 0.7$  m e  $h = 5$  mm. Si osserva la rottura per  $H$  maggiore del valore critico  $H_{cr}$  (circa 0.4 m) con prevalenza del criterio energetico.

Nominal stresses vs. slab height  $H$  for  $a = 0.7$  m and  $h = 5$  mm. The failure is achieved if  $H$  overcomes a critical value  $H_{cr}$  (approximately 0.4 m), with a preponderance of the energetic criterion.



sforzo normale agente lungo l'asse  $y$ ), ma indipendenti dal parametro  $a$ , risultano ininfluenti per il calcolo di  $\Phi$  e sono quindi trascurati, come i termini delle espressioni di  $\Phi_2$  e  $\Phi_3$  che evidenziano  $[-(b-a)/\Psi]$  sotto l'assunzione dell'ipotesi  $(b-a) \gg \Psi$ . L'espressione della *crack driving force*  $G_{II}$  è perciò:

$$G_{II} = \frac{d\Phi}{da} = \frac{\tau_N^2}{2E'H} (a^2 + 2a\psi + \psi^2) \quad (12)$$

i cui tre addendi in parentesi rappresentano rispettivamente il contributo della zona scollata, della zona intatta dello strato debole e del lastrone. In accordo con l'eq. (11), l'innesco della valanga ha luogo se:

$$G_{II} = \frac{\tau_{N,e}^2}{2E'H} (a + \psi)^2 = G_{IIc} \quad (13)$$

e la relativa tensione tangenziale nominale critica  $\tau_{N,e}$  è:

$$\tau_{N,e} = \frac{\sqrt{2E'HG_{IIc}}}{a + \psi} \quad (14)$$

In particolare, esprimendo l'eq. 14 in funzione della lunghezza caratteristica  $\Psi$ , si evidenzia come entrambi i criteri, sia quello tensionale sia quello energetico, mostrino la stessa dipendenza dal parametro  $a$ , convalidando le considerazioni fatte in precedenza sulla caduta di resistenza per causa della presenza di una *super-weak zone* e sulla propagazione instabile della fessura. È possibile affermare che l'obiezione della non validità dell'eq. (14) per bassi valori del rapporto  $a/H$  (i.e.  $a/H \ll 1$ ) decade, in quanto sia considerazioni teoriche, sia dati sperimentali dimostrano che il rapporto tra la lunghezza della fessura e l'altezza del lastrone in condizioni di rottura è "larger than 1, but probably not much larger than 1" [Bažant et al., 2003].

### 3.3 Il criterio di innesco accoppiato

Basandosi su quanto affermato da Leguillon [2002] e Cornetti et

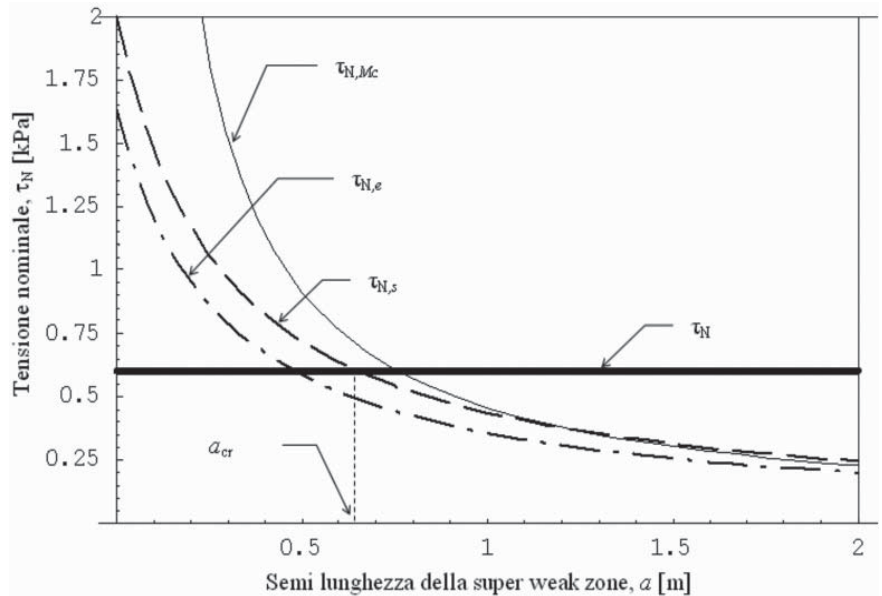


Fig. 3. Andamento della tensione tangenziale nominale rispetto alla semi-lunghezza  $a$  della *super-weak zone*, per  $H = 0.5$  m e  $h = 15$  mm. Si osserva la rottura per  $a$  maggiore del valore critico  $a_{cr}$  (circa 0.65 m) con prevalenza del criterio tensionale.  
Nominal stresses vs. half length  $a$  of the *super-weak zone* for  $H = 0.5$  m and  $h = 15$  mm. The failure is achieved if  $a$  is larger than a critical value  $a_{cr}$  (approximately 0.65 m), with a preponderance of the tensional criterion.

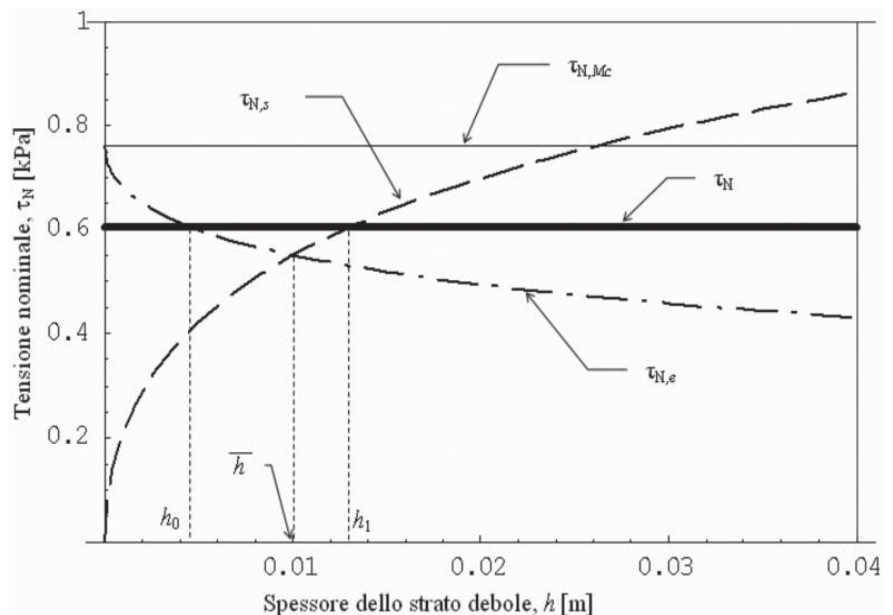


Fig. 4. Andamento della tensione tangenziale nominale rispetto allo spessore dello strato debole  $h$ , per  $a = 0.6$  m e  $H = 0.5$  m. La rottura ha luogo se  $h$  è compreso nell'intervallo  $[h_0, h_1]$  (circa [5 mm, 13 mm]);  $\bar{h}$  (circa 10 mm) è lo spessore dello strato debole corrispondente alla minima tensione nominale richiesta per l'innesco della valanga.  
Nominal stresses vs. weak layer height  $h$  for  $a = 0.6$  m and  $H = 0.5$  m. The failure takes place if  $h$  is comprised in the interval  $[h_0, h_1]$  (approximately [5 mm, 13 mm]);  $\bar{h}$  (about 10 mm) is the weak layer height corresponding to the minimal nominal tension required for the triggering of a dry snow slab avalanche.

al. [2006], si propone un criterio di rottura accoppiato, assumendo che entrambe le eq. (10) e (14) debbano essere contemporaneamente soddisfatte affinché abbia luogo la propagazione della fessura:

$$\tau_N > \max \{ \tau_{N,s}, \tau_{N,e} \} \quad (15)$$

In altre parole, si afferma che l'azione dell'energia di frattura non sia sufficiente ad innescare la propagazione della fessura ed il conseguente distacco della valanga a lastroni, ma che sia necessaria la contemporanea azione di un campo tensionale sufficientemente alto. Ogni singolo criterio esprime perciò una condizione esclusivamente necessaria per la propagazione della fessura, mentre nel caso in cui entrambi i criteri siano contemporaneamente soddisfatti, si verifica la condizione sufficiente per la rottura. Quanto alla prevalenza di un criterio rispetto all'altro, il criterio energetico risulta prevalente rispetto a quello tensionale quando il processo di rottura è governato dalla richiesta energetica, ovvero:

$$\tau_{N,e} > \tau_{N,s} \Rightarrow \frac{2G_w G_{IIc}}{\tau_p^2 h} > 1 \quad (16)$$

mentre, quando il processo di rottura è governato dalla richiesta tensionale, si ottiene:

$$\tau_{N,s} > \tau_{N,e} \Rightarrow \frac{2G_w G_{IIc}}{\tau_p^2 h} < 1 \quad (17)$$

Le applicazioni del criterio di rottura sono illustrate nelle Figure 2, 3 e 4, in cui sono riportati la tensione nominale (eq. 2) ed i suoi valori critici forniti dal criterio tensionale (eq. (10)) e da quello energetico (eq. (14)), rispetto a differenti quantità geometriche caratteristiche del manto nevoso. Il valore dell'inclinazione del pendio e delle proprietà meccaniche della neve coincidono con i valori tipici riportati in Tabella 1, mentre per le tre lunghezze geometriche che caratterizzano il modello (i.e.  $H$ ,  $a$ ,  $h$ ) nei diversi grafici, due sono mantenute costanti e la terza è

fatta variare per analizzarne l'effetto.

Per confronto, nelle Fig. 2, 3 e 4 è riportata anche la tensione nominale a rottura definita dal modello di McClung [1979], imponendo nulla la resistenza residua  $\tau_r$ , in accordo con la notazione adottata in Bažant *et al.* [2003]:

$$\tau_{N,Mc} = \frac{\sqrt{2E'HG_{IIc}}}{a} \quad (18)$$

Quest'ultima formula, come l'eq. (14), è ottenuta da un bilancio energetico di un modello mono-dimensionale, trascurando il contributo

dell'*energy release rate* della parte incollata del lastrone al di sopra della *super-weak zone*. Si nota come, in termini matematici, la considerazione di questo contributo significhi semplicemente sostituire nell'eq. (18) il termine  $a$  con il termine  $(a + \Psi)$ , ottenendo in questo modo l'eq. (14). Se  $a$  risulta sufficientemente grande – oppure  $\Psi$  abbastanza piccolo – i due criteri di rottura (eq. (14)) e (eq. (18)) coincidono. Tuttavia, se l'innescò della valanga è causato dalla presenza di difetti di dimensioni inferiori (o uguali) a  $\Psi$ , il contributo della zona incollata ( $x > 0$ ) non può essere trascurato. Un

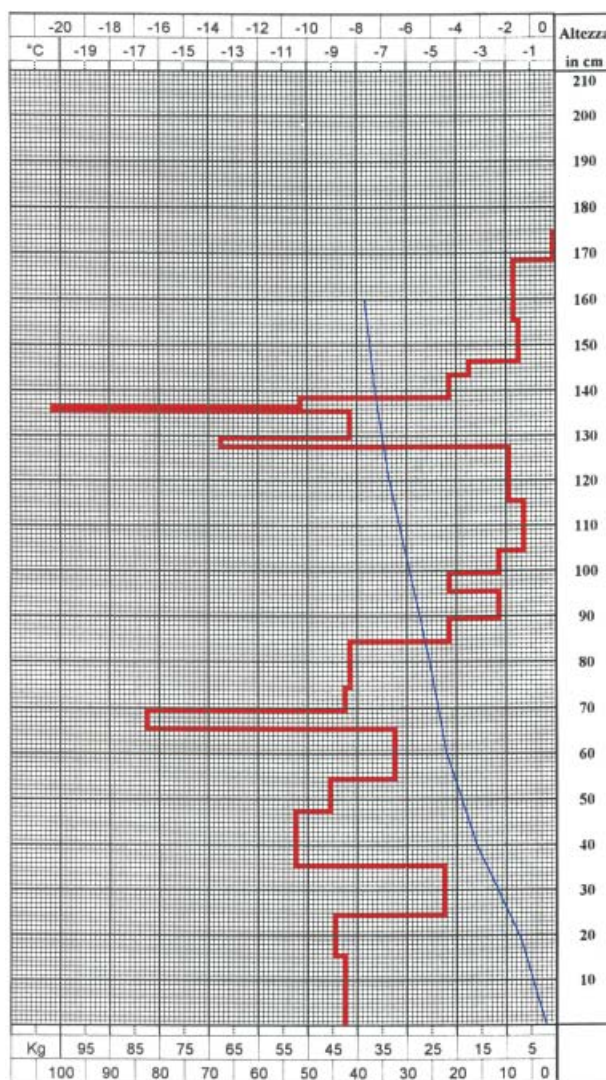


Fig. 5. Risultato di una prova penetrometrica. In blu è riportato l'andamento della temperatura (dati forniti dal Servizio Meteomont).

Result of a penetrometric test. The trend of the temperature is represented by the blue line (Meteomont Service).

vantaggio dell'eq. (14) rispetto all'eq. (18) è che, nel caso di valori nulli di  $a$  (strato debole integro), la prima fornirebbe comunque un valore finito della tensione nominale critica, mentre la seconda darebbe luogo ad un valore infinito e quindi indesiderato, anche se peculiare degli approcci LEFM. Il criterio di McClung può perciò essere visto come un caso particolare (per  $h \rightarrow 0$ ) del presente modello *shear lag*.

Le Fig. 2 e 3 evidenziano il distacco della valanga in funzione dello spessore del lastrone  $H \geq H_{cr}$  (e.g. per una nuova nevicata) con prevalenza del criterio energetico e in funzione della semi-lunghezza della *super-weak zone*  $a \geq a_{cr}$  con prevalenza del criterio tensionale, rispettivamente.

In Figura 4 il distacco è invece valutato in funzione dell'altezza dello strato debole  $h$ , evidenziando come esso si verifichi per  $h$  compresa nell'intervallo  $[h_0, h_1]$ . È interessante osservare che l'altezza dello strato debole corrispondente al minimo della tensione nominale richiesta per l'innescò della valanga è rappresentata dal valore per cui i criteri tensionale ed energetico coincidono, ovvero:

$$\frac{2G_w G_{IIc}}{\tau_p^2 h} = 1 \quad (19)$$

La valanga avrà perciò luogo più facilmente per spessori degli strati deboli vicini al valore  $\bar{h}$ , definito come:

$$\bar{h} = \frac{2G_w G_{IIc}}{\tau_p^2} \quad (20)$$

Considerando i valori riportati in Tabella 1, risulta  $\bar{h} \cong 10$  mm, coincidente con il valore tipico ottenuto dalle osservazioni sul campo per lo spessore dello strato debole, a ulteriore conferma della validità del modello.

Nei grafici riportati nelle Figg. 2, 3 e 4, la linea spessa rappresenta la tensione tangenziale nominale, la linea tratteggiata il criterio tensionale, la linea tratto-punto il criterio energetico, la linea continua fine il criterio di McClung [1979].

## 4. Applicazioni del modello al distacco artificiale

A causa della forte antropizzazione dell'ambiente montano, negli ultimi decenni si sono sviluppate nuove tecnologie per la protezione

del territorio, ivi incluso il distacco artificiale per la prevenzione del rischio di valanghe. Pur essendo convenienti quanto a versatilità, i metodi per l'innescò di valanghe di neve presentano problemi sia tecnici (determinazione dell'adeguata quantità di esplosivo e dell'altezza

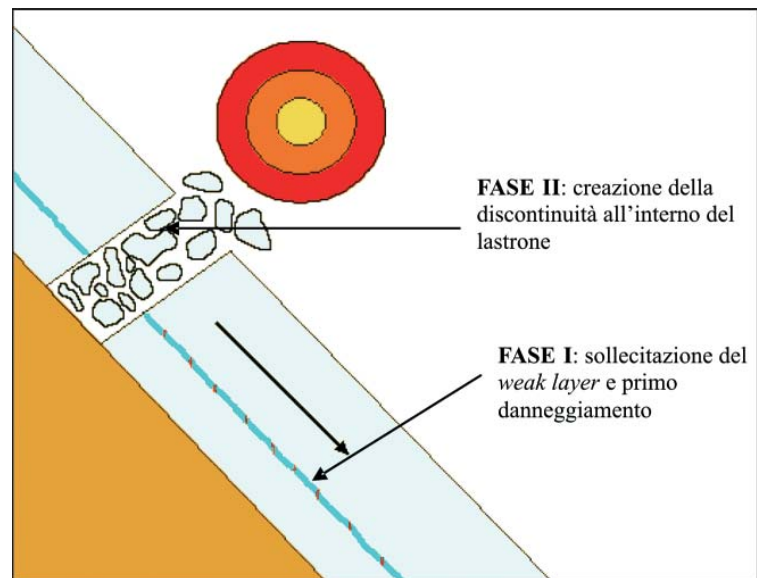


Fig. 6. Cause che comportano il distacco del lastrone. Causes implying the detachment of a snow's slab. Phase I: stress of the weak layer and first damaging; Phase II: creation of the discontinuity inside the slab.

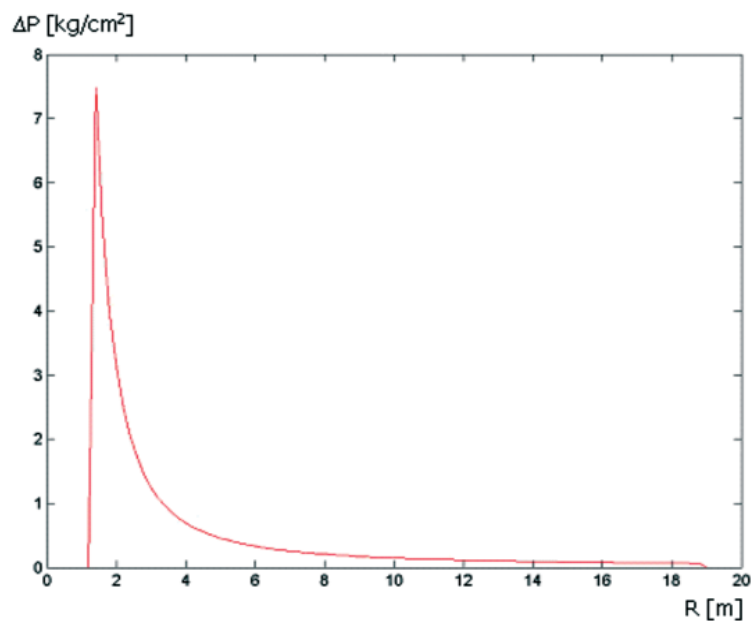


Fig. 7. Variazione della sovrappressione  $\Delta P$  (rispetto alla pressione atmosferica) in funzione della distanza  $R$  dal centro di detonazione della carica, per cariche da 2 kg TNT [Sadowskij, 1941]. Overpressure  $\Delta P$  variation (respect to the atmospheric pressure) as a function of the distance  $R$  from the centre of the charge detonation, for 2 kg TNT charges (Sadowskij, 1941).



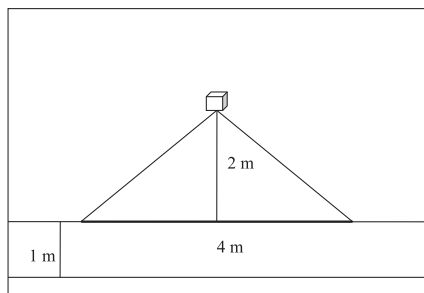


Fig. 8. Geometria della carica e suo posizionamento.

*Geometry of the charge and its positioning.*

di scoppio), sia logistici (accesso in sicurezza all'area del distacco e trasporto tempestivo in quota dell'impianto o/e dell'esplosivo), sia legislativi (obbligo di recupero delle cariche, in caso di mancata esplosione, e di distruzione dell'esplosivo in eccesso), soprattutto se attuati su pendii montani.

Ciò si ripercuote operativamente sulla scelta del tipo di dispositivo più idoneo, che deve anche tenere conto delle condizioni geomorfologiche ed antropiche del sito, delle possibili condizioni meteorologiche e di visibilità durante il distacco, del necessario controllo dell'evoluzione della dinamica della valanga innescata e dei rischi residui sull'ambiente circostante (antropizzato o meno), oltre ai costi di investimento e di esercizio.

I metodi impiegati possono prevedere l'uso di esplosivi in senso stretto o di miscele gassose. In particolare, tra i primi si citano: il lancio

di cariche a mano (libere o vincolate), lo sparo con slitta, con paletto o con trave sospesa *Galgen* (per il posizionamento delle cariche al di sotto di zone aggettanti), il lancio da funivia (per il possibile intervento lungo tutta la linea dell'impianto), il *Cat-Ex* (teleferica adibita esclusivamente allo sparo cariche), il brillamento da elicottero (lancio di carica libera o vincolata), il lancio di proiettili (di artiglieria militare oppure con sistemi pneumatici - *Avalancheur*), le installazioni fisse per il rilascio di cariche libere previo segnale remoto (dispositivi *Lawinenwächter/Lawinenmast*) o vincolate (*Sprengmast*). Attualmente molto diffusi, i metodi del secondo tipo comprendono: i sistemi fissi *Gaz-Ex* ed *Avalhex*, azionati rispettivamente da miscele di propano-ossigeno ed idrogeno-ossigeno, e la più recente evoluzione elitrasportabile dell'*Avalhex*, l'*Avalanche Blast*.

Questi metodi possono essere attuati da postazione fissa, in pendii con maggior frequenza di fenomeni valanghivi, oppure mobile, in caso di necessità, anche in zone difficilmente raggiungibili. In particolare, in Italia, dal punto di vista legislativo, alcune tecniche non sono utilizzabili (e.g. *Sprengmast*), in quanto prevedono la permanenza dell'esplosivo in loco, al di fuori di un deposito autorizzato e sorvegliato; il divieto di abbandono di eventuali cariche

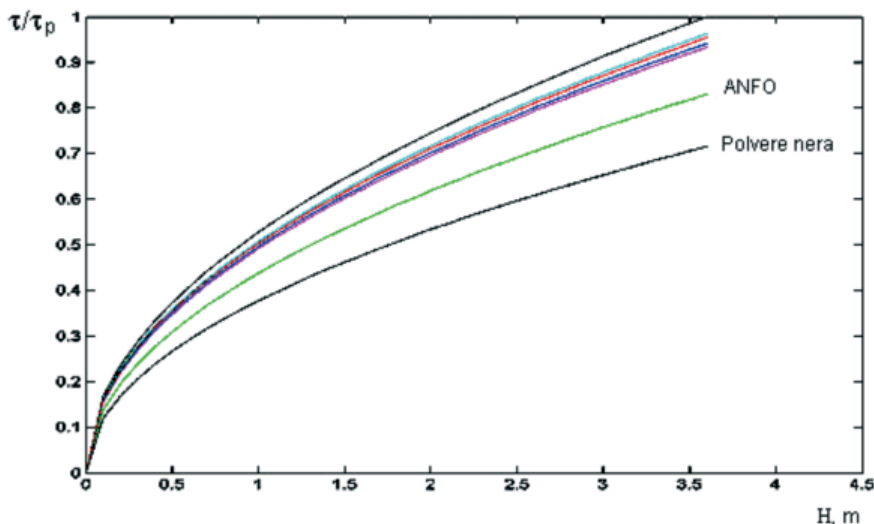
inesplose ed il conseguente obbligo di recupero per la loro disattivazione (e.g. lanci di cariche non vincolate e utilizzo di proiettili) costituisce un ulteriore problema. Inoltre, per quanto riguarda l'uso dell'elicottero, esiste l'imposizione di armare le cariche al di fuori dell'abitacolo dei velivolo, rendendo necessari laboriosi sistemi di trasporto e di attivazione delle cariche stesse. Si sottolinea invece la mancanza di uno strumento legislativo specifico per i dispositivi a miscela gassosa: ad oggi si deve ricorrere alle caratteristiche fornite dal costruttore ed alle normative nazionali per lo stoccaggio di bombole in pressione.

### 4.1 Dal modello statico al modello dinamico

Per analizzare il fenomeno dell'innesco in campo dinamico, occorre dapprima valutare le principali caratteristiche meccaniche del manto nevoso e la sua peculiare stratificazione. A tal fine, si ritiene adeguata la prova penetrometrica (l'equivalente della prova NSPT in geotecnica - Fig. 5): oltre a consentire il rilievo della stratigrafia dello specifico manto nevoso e l'andamento della temperatura al suo interno (essenziale per la prima approssimazione della struttura dei cristalli), essa risulta di basilare importanza per la sua correlazione con la densità di ogni singolo strato.

Fig. 9. Confronto tra il criterio energetico statico (in nero) e quello dinamico per diversi tipi di esplosivo con cariche da 3 kg. L'analisi è stata eseguita facendo variare  $\tau$  in funzione dell'altezza del lastrone  $H$ .  $\tau_p$  è la tensione critica dello strato debole.

*Comparison between the static energetic criterion (in black) and the dynamic one, for different kinds of explosive and 3 kg charges. The analysis has been done by varying  $\tau$  as a function of the height of the slab  $H$ .  $\tau_p$  is the critical tension of the weak layer.*



Per valutare gli effetti indotti dai carichi statici e da quelli dinamici, occorre dapprima osservare come una sollecitazione dinamica critica debba essere superiore alla sua corrispondente sollecitazione statica, con un fattore di intensificazione ipotizzabile tra 10 e 15 per la neve, variabile in funzione della sua densità. A tale proposito, è necessario premettere che per il distacco artificiale:

- in aree caratterizzate da una maggiore resistenza (quindi più fragili), la riflessione e la sovrapposizione delle onde possono provocare un'intensificazione delle tensioni che potrebbe dar luogo ad una frattura, anche per modeste sollecitazioni iniziali;
- generalmente, la frattura primaria si origina da sforzi di trazione, dovuti alla riflessione ed alla rifrazione delle onde di compressione all'interno del manto nevoso;
- la velocità di propagazione della frattura nella neve ( $\approx 100$  m/s) risulta molto minore rispetto alla velocità di propagazione

delle onde acustiche nel mezzo (fino a 2500 m/s per la neve compatta e metamorfosata) con conseguente possibile origine di *super-weak zone*, a seguito di sollecitazioni dinamiche;

- il modulo elastico dinamico è maggiore di quello statico a causa della presenza di microfessure che comportano una riduzione del modulo elastico statico.

Sulla base di tali considerazioni, è possibile assumere un comportamento prevalentemente elastico della neve in campo dinamico, rendendo possibile l'applicabilità del modello *avalanche shear lag* definito nei paragrafi precedenti.

### 4.2 Il criterio di innesco tensionale

Al fine di determinare il criterio di innesco tensionale nel caso di sollecitazione dinamica, si sono ipotizzate due fasi d'azione dell'onda d'urto all'interno del manto nevoso

(Fig. 6): (i) danneggiamento causato dal passaggio della sollecitazione all'interno dello strato debole, *tubo di guida* dell'onda d'urto perché costituito da fragili cristalli di notevoli dimensioni; (ii) creazione di una discontinuità all'interno del manto nevoso (assimilabile ad una *tension crack*) che, isolando il lastrone dal manto nevoso, impone tutto il carico del peso del lastrone stesso sullo strato debole precedentemente danneggiato; (iii) per manti nevosi con un certo grado di coesione della neve (tipici manti per genesi di valanghe a lastroni) si può considerare l'ulteriore contributo al danneggiamento delle onde superficiali indotte dall'esplosivo.

Le formule utilizzate per la valutazione delle sovrappressioni indotte sulla superficie del manto nevoso sono semiempiriche e reperibili in letteratura: cariche da 2 kg di TNT<sub>eq</sub> inducono sollecitazioni che si propagano radialmente fino ad una distanza di circa 20 m dal punto di scoppio (Fig. 7).

Per stimare l'entità del raggio d'azione di una carica, si ritiene opportuno valutare i picchi di pressione in funzione della distanza dal centro dell'esplosione (Tabella 2).

Si nota che, ad una distanza di circa 20 m, una carica da 1 kg TNT induce una sovrappressione intorno a 30 mbar: tale valore è ritenuto sufficiente a provocare il distacco.

### 4.3 Il criterio di innesco energetico

Per le considerazioni di tipo energetico, si fa riferimento al *rendimento* definito come il complemento ad 1 dello smorzamento dell'energia associata all'onda d'urto dell'esplosivo causato dal passaggio della stessa attraverso ciascuno strato costituente il manto nevoso. Esso è desumibile dai rapporti di impedenze acustiche dei diversi mezzi attraversati dall'onda d'urto indotta dell'esplosivo (Tabella 3).

Tab. 2. Raggio di influenza per cariche di diversa massa a distanze progressivamente crescenti rispetto al centro dell'esplosione.

Radius of influence relevant to different mass charges, at distances progressively growing respect to the centre of the explosion.

| Distanze                    | 1.5m    | 5m     | 10m    | 15m    | 20m    |
|-----------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 2 kg TNT: $\Delta P$ [mbar] | 5761.31 | 458.87 | 152.96 | 81.58  | 50.99  |
| 1 kg TNT: $\Delta P$ [mbar] | 3324.22 | 305.91 | 112.17 | 61.182 | 30.591 |

Tab. 3. Impedenze caratteristiche di diversi mezzi (Esplosivo di riferimento: ANFO; Neve: fresca; Roccia: calcare di media resistenza).

Typical impedences of different means (reference explosive: ANFO; snow: fresh; rock: medium-strength limestone).

| Mezzo                             | Esplosivo         | Aria | Neve             | Roccia            |
|-----------------------------------|-------------------|------|------------------|-------------------|
| Densità [kg/m <sup>3</sup> ]      | 800               | 1.2  | 60               | 2600              |
| Velocità onde P [m/s]             | 2300*             | 330  | 450              | 4000              |
| Impedenza [kg/(m <sup>2</sup> s)] | $1.84 \cdot 10^6$ | 396  | $2.7 \cdot 10^4$ | $10.4 \cdot 10^6$ |

\* Per l'esplosivo si tratta della velocità di detonazione

Tab. 4. Rendimenti ottenuti considerando l'impedenza dei diversi mezzi attraversati dall'onda d'urto esplosiva.

Efficiencies obtained taking into account the impedance of different means crossed by the shock-wave.

| Interfaccia | Esplosivo/Aria     | Aria/Neve          | Neve/Roccia        |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Rendimento  | $\eta_1 = 0.00086$ | $\eta_2 = 0.05698$ | $\eta_3 = 0.10331$ |

Si sottolinea che nel trasferimento di energia attraverso i vari mezzi influiscono sia le caratteristiche dell'esplosivo che la fornisce sia quelle del mezzo che la riceve. Infatti, per l'esplosivo, l'impedenza è il prodotto della sua massa volumica per la velocità di detonazione, mentre per gli altri mezzi (e.g. aria, neve, roccia) essa è il prodotto della massa volumica del mezzo per la velocità di propagazione del suono. Il rendimento verrà calcolato come [Berta, 1989]:

$$\eta = 1 - \frac{(Z' - Z'')^2}{(Z' + Z'')^2} \quad (21)$$

in cui  $Z'$  e  $Z''$  sono le impedenze del corpo da cui proviene e da cui si propaga l'onda d'urto. Si osserva che più  $Z'$  e  $Z''$  tendono allo stesso valore, più il rendimento aumenta, mentre più i loro valori si discostano, più il rendimento diminuisce. In Tabella 4 sono riportati i valori teorici dei rendimenti ottenuti nei casi riportati in Tabella 3.

Per il calcolo dell'energia disponibile all'atto dell'esplosione, deve essere nota l'energia specifica dell'esplosivo costituente la carica. Per l'ANFO essa risulta pari a 3.66 MJ/kg. Lo schema di posizionamento della carica è riportato in Fig. 8.

Pertanto, ammettendo di utilizzare 1 kg di esplosivo, contenuto in una carica avente 0.1 m di lato (assimilabile ad una carica sferica), posizionata a 2 m di altezza dal manto nevoso (di spessore pari a 1 m), si può assumere che l'energia sviluppata verso il suolo (all'interno dell'angolo solido indicato) sia pari ad 1/6 di quella liberata dall'esplosione della carica, con un innesco puntiforme e posizionato nel baricentro della carica stessa. L'energia utile  $\varepsilon$  emessa verso il suolo sarà pari a 0.61 MJ. Per valutare la quota parte di energia effettivamente trasmessa al suolo, occorre moltiplicare  $\varepsilon$  per il coefficiente di trasmissione  $\eta_1$  e, per riferire tale parametro ad un'unità di superficie (A), lo si deve dividere per i 16 m<sup>2</sup> che sono presumibilmente

te investiti direttamente dalla detonazione della carica; in formule:

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon \cdot \frac{1}{A} \cdot \eta_1 = 0.61 \text{ MJ} \cdot \frac{1}{16 \text{ m}^2} \cdot 0.00086 = 32.8065 \text{ J/m}^2 \quad (22)$$

Moltiplicando il valore così ottenuto (eq. (22)) per il rispettivo rendimento di trasmissione, si determina la quota parte di energia trasmessa allo strato di neve (eq. 23). Si esegue analogo calcolo per la valutazione della trasmissione al substrato roccioso:

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_1^* \cdot \eta_2 = 32.8065 \text{ J/m}^2 \cdot 0.05698 = 1.8694 \text{ J/m}^2 \quad (23)$$

$$\varepsilon_3^* = \varepsilon_2^* \cdot \eta_3 = 1.8694 \text{ J/m}^2 \cdot 0.01033 = 0.0193 \text{ J/m}^2 \quad (24)$$

Effettuando analoghe considerazioni per cariche esplosive di differente massa, si può stimare la variazione dei parametri energetici al variare della massa della carica. In Tabella 5 sono riportati i risultati ottenuti per una carica di massa pari a 3kg, con la stessa geometria di posizionamento.

Tab. 5. Valori dei parametri energetici ottenuti con cariche di 3 kg (esplosivo ANFO) a parità di geometria (Fig. 7).  
*Values of the energetic parameters obtaining with 3 kg charges (ANFO explosive) having the same geometry (see Figure 7).*

| Parametro                             | Risultato |
|---------------------------------------|-----------|
| $\varepsilon$ [MJ]                    | 1.83      |
| $\varepsilon_1^*$ [J/m <sup>2</sup> ] | 98.4196   |
| $\varepsilon_2^*$ [J/m <sup>2</sup> ] | 5.6082    |
| $\varepsilon_3^*$ [J/m <sup>2</sup> ] | 0.0579    |

Si noti che tale metodologia tiene conto esclusivamente dell'energia prodotta dall'esplosivo, senza considerare né il tempo di azione né la fase dell'onda retrograda. Inoltre, l'irraggiamento energetico della carica verso il suolo è stato calcolato ricorrendo a criteri puramente geometrici, trascurando la dinamica del fenomeno.

Si osserva, inoltre, che l'energia liberata dall'esplosivo contribuisce ad abbassare l'energia di frattura critica  $G_{IIC}$ , agendo come ulteriore fattore di destabilizzazione del manto nevoso. L'energia critica di frattura può perciò essere scritta come:

$$G_{IIC} = G_{II} + \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} \Rightarrow \Rightarrow G_{II} = G_{IIC} - \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} \quad (25)$$

in cui il coefficiente  $K_{din}$  tiene conto della natura dinamica del carico derivante dall'esplosivo.

Osservando l'eq. (25), si può tentare di giustificare il motivo per cui, talora, si assiste ad un esito negativo del distacco artificiale: generalmente tale inconveniente si presenta quando la neve ha già subito un primo stato di metamorfismo o quando presenta una discreta umidità (oltre il 5-8%). Questi due fattori comportano un significativo aumento dell'energia di frattura critica  $G_{IIC}$  (fino a 2 J/m<sup>2</sup>), in quanto contribuiscono ad incrementare le caratteristiche meccaniche del mezzo: risulta quindi necessaria una maggiore energia  $\varepsilon_2^*$  per destabilizzare il manto nevoso.

In riferimento al caso in cui si utilizzi una carica di ANFO con massa di 1 kg, posizionata a 2 m di altezza dal manto nevoso ( $\varepsilon_2^* = 1.87$  J/m<sup>2</sup>), assumendo  $K_{din} = 10$ ,  $G_{IIC} = 2$  J/m<sup>2</sup> (valore massimo) ed ammettendo che l'energia di frattura  $G_{II}$  per quel dato manto nevoso sia pari a 1.44 J/m<sup>2</sup> (per la sua determinazione si sono adottati i parametri tipici riportati in Tabella 1), si ottiene:

$$G_{II} + \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} = \left(1.44 + \frac{1.87}{10}\right) \text{ J/m}^2 = 1.63 \text{ J/m}^2 < G_{IIC} = 2 \text{ J/m}^2 \quad (26)$$

Tale risultato comporta, evidentemente, un fallimento del tiro.

In presenza di tale evenienza, si può ricorrere ad una delle seguenti alternative:

Tab. 6. Principali caratteristiche degli esplosivi utilizzabili.

Tab. 6. Main characteristics of the explosives employable.

| Esplosivo    | $\varepsilon$ [MJ/kg] | $v_{det}$ [m/s] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\varepsilon_2^*$ [J/m <sup>2</sup> ] 1 kg | $\varepsilon_2^*$ [J/m <sup>2</sup> ] 3 kg | $\varepsilon_2^*$ [J/m <sup>2</sup> ] 5 kg |
|--------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--|--|--|
| Gomma A      | 6.74                  | 7503            | 1550                        | 0.55                                       | 1.63                                       | 2.72                                       |
| Gelatina I   | 42                    | 6552            | 1450                        | 0.45                                       | 1.34                                       | 2.24                                       |
| Vulcan 3     | 3.90                  | 4505            | 1050                        | 0.78                                       | 2.33                                       | 3.87                                       |
| Tutagex 210  | 3.52                  | 4200            | 1150                        | 0.69                                       | 2.06                                       | 3.43                                       |
| ANFO 5       | 3.66                  | 2300            | 800                         | 1.87                                       | 5.61                                       | 9.35                                       |
| Polvere Nera | 2.99                  | 800             | 1200                        | 2.93                                       | 8.78                                       | 14.63                                      |

- si riprova il tiro con una carica di uguale massa, fatta brillare nello stesso punto, dopo un certo tempo (da 15 a 60 minuti);
- si riprova il tiro con una carica di massa maggiore, fatta brillare nello stesso punto, dopo un certo tempo (da 15 a 60 minuti);
- si riprova il tiro in una zona adiacente.

Se anche queste misure risultassero inefficaci, è consigliabile il prolungamento della chiusura temporanea dell'area a rischio al pubblico. In ogni caso, prima di effettuare una nuova serie di tiri, è bene attendere un abbassamento della temperatura, per favorire il congelamento dell'eventuale acqua presente nel manto nevoso ed ottenere una migliore propagazione della frattura.

Sulla base di quanto detto, qualora si decida di effettuare il distacco di valanghe tramite esplosivi, l'eq. (9) andrà riscritta nella seguente forma:

$$\tau_{N_{FAILURE}}^E = \frac{\sqrt{2EH \left( G_{IIC} - \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} \right)}}{a + \psi} \quad (27)$$

In Fig. 9 è riportato il confronto fra il criterio energetico statico e quello dinamico. L'analisi è stata eseguita facendo variare  $\tau$  in funzione dell'altezza del lastrone  $H$ . I risultati mostrano che, all'aumentare della massa volumica della carica (quindi dell'energia ad essa associata), si ha un decremento dell'involuppo di rottura, imputabile alla diminuzione dell'energia critica di frattura  $G_{IIC}$ .

Si può quindi notare che gli

esplosivi *lenti* (aventi velocità di detonazione inferiore a 2500 m/s), a parità di massa della carica utilizzata, forniscono i migliori risultati, in quanto la durata della sollecitazione che inducono è maggiore, anche se le energie specifiche che ad essi competono sono minori di quelle degli esplosivi caratterizzati da una maggiore dirompenza.

In Tabella 6 si riportano i valori dei principali parametri influenti per gli esplosivi utilizzabili, a parità di caratteristiche geometriche e meccaniche del sistema.

### 5. Conclusioni

Sulla base delle Teorie della Meccanica della Frattura, l'articolo ha analizzato l'innesco spontaneo e quello indotto dalle valanghe di neve a lastroni. Considerando la propagazione della frattura all'interno dello strato debole del manto nevoso in Modo II, si è presentato un nuovo criterio di innesco basato sull'accoppiamento degli approcci tensionale ed energetico per la predizione della formazione di valanghe di neve causate dall'attivazione di un sottile strato debole (di spessore  $h$ ), caratterizzato dalla presenza di un difetto al suo interno. Il nuovo criterio di innesco, testato per valori geometrici e fisico-meccanici delle caratteristiche della neve e del pendio, risulta più conservativo rispetto allo storico criterio energetico di innesco di McClung [1979], ma per  $h \rightarrow 0$ , i due criteri coincidono. In particolare, il modello si propone come

strumento di previsione dell'innesco spontaneo attraverso la stima dell'altezza critica del lastrone, della dimensione critica del difetto e dello spessore critico dello strato debole.

Applicato al distacco artificiale indotto da esplosivo, l'approccio proposto ha consentito di ottenere alcuni risultati, che possono costituire un buon punto di partenza per successivi sviluppi:

- si dovrebbe rivisitare il concetto di  $TNT_{eq}$ , utile per la valutazione dei danni indotti dal brillamento di cariche esplosive solo in applicazioni militari o di esplosivistica giudiziaria; infatti il  $TNT_{eq}$  non implica alcuna considerazione di tipo energetico e tensionale;
- l'apporto energetico e, di conseguenza, il tempo d'azione della sollecitazione, non è trascurabile: occorre considerare anche la fase retrograda (onda di depressione) dell'esplosione in aria, non limitandosi alla valutazione del valore di picco indotto dalla detonazione della carica. In campo libero, se la massa della carica raddoppia, gli effetti non sono solo proporzionali al cubo della distanza;
- il coefficiente  $K_{din}$  va valutato alla luce del tipo di esplosivo utilizzato, soprattutto in base alla velocità di detonazione o deflagrazione (ad esempio, si potrebbe assumere  $K_{din} = 10-15$  per gli esplosivi detonanti con elevata velocità di detonazione,  $K_{din} = 5-10$  per quelli a bassa velocità di detonazione o deflagranti);

- grazie all'approccio energetico è possibile giustificare il motivo per cui, talora, non avviene il distacco; esso, inoltre, evidenzia la particolare attitudine al distacco artificiale da parte degli esplosivi caratterizzati da basse velocità di reazione, fino agli esplosivi deflagranti.

### Ringraziamenti

Per la parte riguardante il distacco artificiale delle valanghe, si ringrazia la preziosa collaborazione del Servizio Meteoromont della Brigata Alpina Taurinense, che ha fornito molti dati sulla neve e numerosi spunti per lo sviluppo del presente lavoro.

### Bibliografia

- BAŽANT Z.P., ZI G. and McCLUNG D.M., (2003): Size effect law and fracture mechanics of the triggering of dry snow slab avalanches, *Journal of Geophysical Research*, 108, 2119-2129.
- BERTA G., (1989): *L'esplosivo strumento di lavoro. Italesplosivi*, Milano.
- CHIAIA B. M., CORNETTI P., FRIGO B., (2006): *Triggering of dry snow slab avalanches and a new concept of active protection*. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino.
- CHIARAVALLI L., (2006): *Meccanica dell'innescamento di valanghe nevose tramite esplosivo*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- CORNETTI P., PUGNO N., CARPINTERI A. and TAYLOR D. (2006): Finite fracture mechanics: a coupled stress and energy failure criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2021-2033.
- FÖHN P.M.B., CAMPONOVO C., KRÜSI G. (1998): Mechanical and structural properties of weak snow layers measured in situ, *Annals of Glaciology*, 26, 1-6.
- JAMIESON B. and JOHNSTON C.D., (2001): Evaluation of shear frame test for weak snowpack layers, *Annals of Glaciology*, 32, 59-69.
- KIRCHNER H.O.K., MICHOT G. and SCHWEIZER J., (2002): Fracture, toughness of snow in shear and tension. *Scripta Materialia*, 46, 425-429.
- LEGUILLON D. (2002): Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 21, 61-72.
- MANCINI R., CARDU M., (2000): *Scavi in roccia – gli esplosivi*. Helvelius E., Benevento.
- McCLUNG D., SCHAERER P., (2000): *Manuale delle valanghe – Formazione, Dinamica ed effetti, Prevenzione e sicurezza, Soccorso*. Zanichelli Ed., Bologna.
- McCLUNG D.M., (1979): Shear fracture precipitated by strain softening as a mechanism of dry slab avalanche release, *Journal of Geophysical Research*, 84(B7), 3519-3526.
- SADOVSKIJ M.A., (1941): Valutazione delle zone sismicamente pericolose nelle esplosioni. *Rend. Ist. Sism. Acc. Scienze URSS*. 106 pp. (citato in Ratti G. 1966. Sugli effetti delle vibrazioni prodotte da esplosioni. *Boll. Ass. Min. Subalpina*, III, n. 3-4).
- SCHWEIZER J., (1999): Review of dry snow avalanche release, *Cold Regions Science and Technology*, 30, 43-57.
- STANG H., LI Z. and SHAH S.P., (1990): Pullout problem: stress versus fracture mechanical approach, *Journal of Engineering Mechanics*, 116, 2136-2150.
- WEBER P., DE MONTILLE G., (1970): Les resistances dynamiques des roches. *L'Industrie Minerale, Revue Mines-Abattage des roches a l'explosif*. 15 Novembre 1971, 39-45.
- BADER H. AND SALM B., (1990): On the mechanics of snow slab release. *Cold Regions Science and Technology*, 17, 287-299.