

OPERE PASSIVE PER VALANGHE DI NEVE

**Paolo Scotton
e Francesca Moro**
Dipartimento di Geoscienze
Università di Padova



L'articolo presenta alcuni aspetti di una indagine sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Trento allo scopo di analizzare il comportamento di alcuni tipi di opere di difesa passiva, usate nella pratica dell'ingegneria ambientale al fine di rallentare valanghe granulari di neve densa. La ricerca considera strutture quali i coni e i denti, considerati come elementi singoli e come sistemi di tre opere distribuite su due linee.

L'apparato sperimentale è costituito da due piani posizionati su due pendenze diverse, allo scopo di simulare la pendenza della zona di scorrimento e della zona di arresto tipiche delle valanghe di neve densa. La zona di scorrimento è confinata all'interno di una sezione rettangolare. Il moto sul piano di valle non è vincolato lateralmente. Le opere sono collocate alla fine del piano superiore, all'inizio della fase di rallentamento dell'ammasso granulare utilizzato nelle simulazioni.

L'articolo descrive l'apparato sperimentale, realizzato per simulare fenomeni reali secondo la similitudine di Froude, con una scala geometrica di circa 1:100 del modello rispetto al prototipo, e da alcuni criteri per la stima delle forze di impatto sugli elementi della prima e della seconda linea. Fornisce inoltre la distribuzione più efficiente delle opere (quella che massimizza la dispersione della massa) e mostra come la massima efficienza si verifica quando la forza adimensionalizzata sulle opere è massima.

DENSA





Sopra, denti frenanti
I tipo a Foppolo (BG), in
Valle Brembana.

Fig. 1
A sinistra deposito
granulare di una valanga
verificatesi nel sito
valanghivo della Lavina
Granda, (Vigolana, TN),
nel dicembre 2003;
sulla destra, il deposito
granulare di una valanga
verificatesi in Val dei
Spini, nel Trentino nord-
occidentale (Val di Pejo,
TN) nel marzo 1998.



INTRODUZIONE

Nelle regioni alpine le valanghe di neve rappresentano una seria minaccia per gli insediamenti, le attività e le infrastrutture realizzate dall'uomo.

Queste si presentano in forme molto diverse, con diverse proprietà dinamiche, e devono essere trattate in modo appropriato al fine di mitigare il rischio associato. Le valanghe di neve polverosa sono molto difficili da controllare, una volta che si sono formate, a causa del basso valore della loro densità di volume, dell'elevato valore della altezza e della larghezza di scorrimento e dell'alta velocità che riescono a raggiungere.

Per questo tipo di valanghe la mitigazione del rischio viene ottenuta evitando la formazione della valanga, stabilizzando il manto nevoso nella zona di distacco, o provocando frequenti distacchi di masse nevose di volume contenuto, generando

eventi poco rischiosi. I sistemi di protezione sono, in genere, molto costosi e sono giustificati dalla necessità di proteggere territori giudicati di alto valore.

Le valanghe di neve densa hanno proprietà dinamiche significativamente diverse dalle valanghe di neve polverosa. Generalmente la loro velocità e la loro profondità di scorrimento è molto più bassa, mentre la densità di volume assume valori molto alti.

Inoltre, presentano la tendenza a seguire maggiormente le caratteristiche topografiche della superficie di scorrimento. Da un punto di vista ingegneristico, è possibile interagire con questo tipo di fenomeni nella zona di scorrimento e, forse in modo ancora più efficace, nella zona di arresto.

Opere di ingegneria volte alla riduzione della potenza distruttiva delle valanghe di neve densa, ampiamente diffuse nelle

regioni alpine, sono i cumuli, i denti di rallentamento ed i valli deviatori, posizionati, in genere, nelle zone iniziali dell'area di arresto. I costi di questi sistemi di protezione sono certamente minori rispetto al caso precedente. Minore è anche la percezione di sicurezza che producono, dipendendo dal duro compito di definire, in modo affidabile, i parametri dinamici dell'evento di progetto.

Il progetto di queste opere non è ancora fondato su accettate linee guida e si basa, in gran parte, sulla capacità di giudizio di esperti del settore in grado di valutare e interpretare il territorio ed i fenomeni che possono essere prodotti. Allo stesso modo non sono disponibili metodi riconosciuti per la valutazione quantitativa degli effetti di redistribuzione della massa nevosa provocata dalle opere (Norem, 1995; Larsen and Norem, 1996; Hammersland et al., 2000).

Il presente articolo si inserisce in questo ambito e descrive una ricerca sperimentale effettuata su questo tipo di opere. Lo scopo è di caratterizzare alcuni aspetti della interazione tra le opere di rallentamento ed il moto di un ammasso granulare generato in scala di laboratorio. Da una parte viene quantificato l'impatto dinamico contro gli elementi di un semplice sistema di opere, dall'altra viene quantificato l'effetto di redistribuzione della massa indotto dalla loro presenza.

Negli esperimenti, per simulare le valanghe di neve densa, viene utilizzata una massa granulare costituita da zeolite sintetica. La scelta è conseguenza dell'esperienza di campo ottenuta dagli autori, negli anni, nei siti valanghivi della provincia di Trento.

In tali siti un gran numero di eventi valanghivi sono definibili come valanghe di neve densa, presentano depositi in forma granulare e comportamenti dinamici tipici degli ammassi granulari.

L'immagine di Figura 1 è stata ripresa nel sito valanghivo della Lavina Granda (Vigolana, Trento) e mostra il materiale granulare di un deposito valanghivo coperto da uno strato di neve fresca.

Sulla destra della stessa figura è mo-

strato parte del deposito di una valanga verificatasi in un sito del Trentino nord-occidentale (Val dei Spini, Pejo).

Notevole è, attualmente, la attività di ricerca che fa ricorso alla indagine sperimentale con l'utilizzo di misture granulari al fine di indagare le proprietà delle valanghe di neve (Chu et al., 1995; Hutter et al., 1995; Keller et al., 1998) e le caratteristiche della interazione con opere di rallentamento con il fine principale di definire la dissipazione energetica da queste provocate (Hákonardóttir et al., 2003; Sheikh et al., 2008). In questo articolo l'attenzione è posta sulle sollecitazioni subite dalle opere e sulla redistribuzione della massa da queste indotta nel deposito finale.

L'APPARATO SPERIMENTALE

La canaletta e il suo supporto

Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando il supporto mostrato in Figura 2. Il supporto è formato da due piani in Forex ad inclinazione variabile, di forma quadrata con lato pari a 150 cm. La pendenza del piano superiore può essere variata dallo 0% al 70%, mentre la pendenza del piano inferiore può variare dallo 0% al 18%. La continuità tra il piano inferiore ed il piano superiore è ottenuta mediante un sottile nastro adesivo a superficie liscia. Sul piano superiore è stata realizzata una canaletta le cui pareti laterali sono trasparenti e realizzate in Perspex.

La larghezza della canaletta è di 20 cm e la altezza delle pareti laterali è di 15 cm. La canaletta termina 20 cm a monte del cambio di pendenza. All'estremo superiore della canaletta è stata realizzata una scatola di carico dove viene posto il materiale granulare prima della esecuzione degli esperimenti. Le opere di rallentamento sono state collocate sul piano di monte a valle della canaletta (subito a monte del cambio di pendenza). Successivamente all'impatto contro le opere di rallentamento, il materiale granulare può distribuirsi liberamente sul piano di valle.

La scatola di carico

La scatola di carico (Figura 3) è stata ottenuta mediante una paratoia verticale rimovibile realizzata in Forex. La paratoia scorre dentro a due gargami ottenuti nelle

pareti laterali della canaletta. La sezione trasversale della scatola di carico è la stessa della canaletta. La sua lunghezza è di 30 cm. Il suo volume è di circa 9 litri.

Il materiale granulare

Il materiale granulare (Figura 3) utilizzato negli esperimenti è stato ottenuto da zeolite sintetica. La forma dei grani è sostanzialmente sferica (il fattore di forma è praticamente uguale ad 1). Il diametro dei grani varia da 0.1 mm a 2 mm, con un diametro medio pari a circa 1.0 mm. Il peso specifico della resina è di 1080 kg/m³. L'angolo di attrito interno è pari a 28°. L'angolo di attrito statico con il fondo, ottenuto mediante prove con scatola di taglio, è pari a 18° (deviazione standard pari a 0.8°). L'angolo di attrito cinematico con il fondo è stato stimato tra 15° e 16°.



Fig. 2
Sulla sinistra, una vista della canaletta e della struttura di supporto; sulla destra una vista laterale dell'apparato sperimentale.

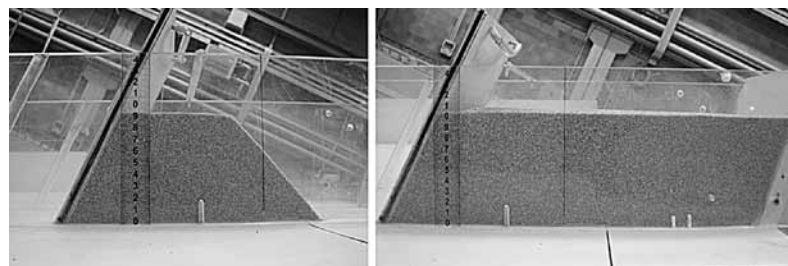


Fig. 3
La scatola di carico all'estremo superiore della canaletta; 29 N (3 kg) di ammasso granulare, sulla sinistra, e 69 N (7 kg), sulla destra.

Sotto, coni di rallentamento presso il Lago Cavia (BL), in Val di S. Pellegrino.



Coni e denti frenanti a Tacconaz, in Vallée de Chamonix Mont Blanc.



Fig. 4
I modelli di opere di rallentamento utilizzati negli esperimenti: sopra a sinistra, il dente ed il cono a base circolare realizzati in legno; sopra sulla destra uno schema progettuale di un cono; sotto tre cono a base ellittica utilizzati, rispettivamente, agli angoli di inclinazione di 30°, 27° e 24°.

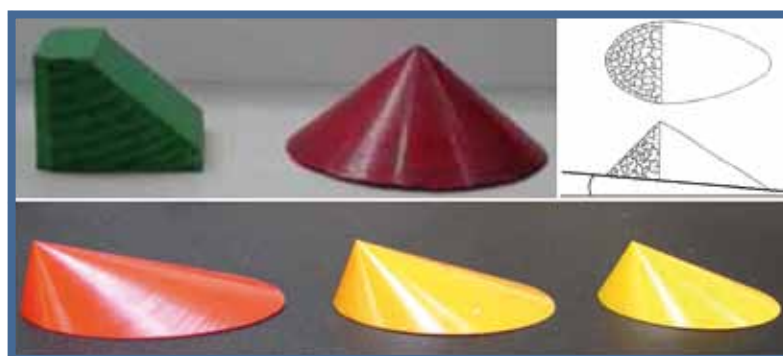


Fig. 5
Sulla sinistra e al centro, una vista da sotto e da sopra della piastra di supporto dei supporti a T; sulla destra, il supporto a T utilizzato per trasferire la forza agente sull'elemento di rallentamento alla cella di carico.

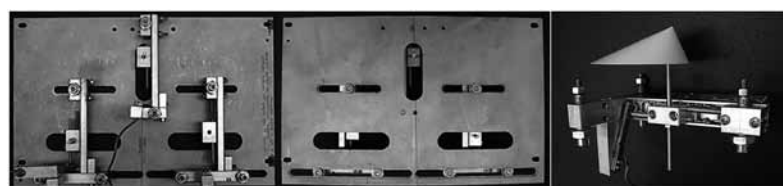


Fig. 6
Una sequenza di fotogrammi ottenuti dalla video-camera digitale frontale. Il trattamento delle immagini permette la stima della velocità della mistura nei pressi degli elementi di rallentamento.

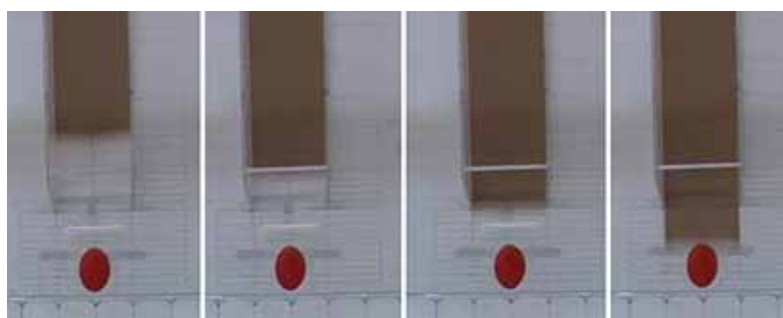
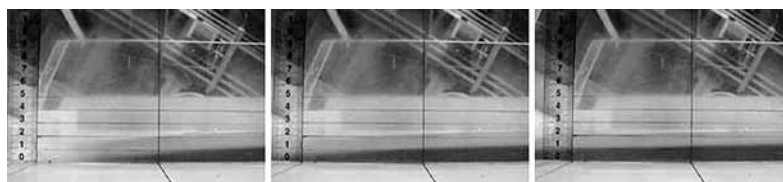


Fig. 7
Una sequenza di fotogrammi ottenuti dalla video-camera laterale. Il trattamento delle immagini permette di stimare la altezza di scorrimento della mistura nei pressi degli elementi di rallentamento.



Coni e denti

Sono stati utilizzati diversi modelli di opere di rallentamento (Figura 4) per simulare le opere effettivamente realizzate in scala di prototipo. Una prima serie di test è stata condotta usando coni e denti realizzati in

legno. I coni sono alti 30 mm ed il diametro della base circolare è di 73 mm.

I denti hanno una altezza di 30 mm e una larghezza di 38 mm. In una successiva serie di test è stato analizzato il comportamento di tre elementi ottenuti da forme

coniche. Questi sono stati realizzati tenendo conto che le opere reali presentano un angolo sull'orizzontale della faccia a monte di circa 45°.

La loro altezza è ancora di 30 mm; la forma dipende dalla pendenza del piano di monte.

Il peso degli elementi è stato contenuto il più possibile allo scopo di ridurre gli effetti inerziali nella fase di impatto (il peso varia da 20 g a 30 g), scavando all'interno i tre elementi realizzati in nylon.

Il supporto delle opere di rallentamento

Ogni elemento di rallentamento (cono o dente) è collegato con un supporto a T (Figura 5) costituito da una guida a scorrimento lineare a basso attrito.

La forza esercitata sull'elemento viene trasmessa alla cella di carico montata sul supporto a T.

La cella di carico misura la forza totale in assenza di momento flettente. Il sistema di elementi di rallentamento (al massimo tre) sono stati montati su una piastra di supporto fissata sotto il piano di monte.

Le celle di carico

Negli esperimenti eseguiti in laboratorio sono stati usati due tipi di celle di carico: il modello L1510 (protetto) ed il modello L1501 (non protetto) della Futek.

A seguito di una serie preliminare di test sono state scelte le capacità di 4.5 N (1 libbra) e 8.9 N (2 libbre). La sensibilità del modello da 1 libbra è di 0.002 libbre (0.906 grammi), mentre la sensibilità del modello da 2 libbre è di 0.0004 libbre (0.181 grammi). Il tempo di risposta di entrambe le celle di carico è stato stimato sperimentalmente minore di 0.005 s.

Misura della velocità e profondità del flusso

La misura della velocità (Figura 6) e della profondità del flusso (Figura 7) sono state ottenute mediante due video-camere. Una video-camera digitale è stata posizionata sopra alla canaletta in modo da coprire l'area tra la fine della canaletta e gli elementi di rallentamento.

La velocità utilizzata nelle elaborazioni è la velocità media del fronte della massa in movimento negli ultimi 40 centimetri prima dell'impatto contro le opere di rallentamento.

La seconda video-camera digitale è stata posizionata lateralmente alla parte finale della canaletta al fine di riprendere la profondità della mistura in una sezione molto vicina alle opere (circa 10 centimetri a monte).

La altezza di scorrimento è qui definita come la massima altezza del fronte.

Misura della dispersione dell'ammasso granulare

La misura della dispersione finale, longitudinale e trasversale, della mistura è stata ottenuta dalla analisi di immagini del tipo di Figura 8. La dispersione della mistura dipende dal tipo di opere (coni a base circolare, coni a base ellittica e denti) e dalla loro disposizione. L'opera frontale è sempre collocata nei pressi della sezione finale della canaletta, sul suo asse.

La linea posteriore di opere è posizionata ad una distanza longitudinale dall'elemento di monte di circa due volte la altezza delle opere (70 mm). Gli elementi posteriori possono essere sistemati in diverse posizioni lungo la guida trasversale.

L'angolo θ tra la direzione del flusso originale (la direzione definita dall'asse della canaletta) e la linea passante attraverso l'elemento frontale e posteriore (Figura 9) può essere modificata tra 25° e 50°.

Sono stati definiti due parametri fisici per caratterizzare la dispersione della mistura: l'efficienza longitudinale e l'efficienza trasversale. Il primo parametro è una misura della tendenza alla riduzione della posizione longitudinale più lontana raggiunta dalla mistura granulare a causa della presenza delle opere di rallentamento.

L'efficienza longitudinale è definita come segue:

$$\epsilon_L = \frac{d_{NW} - d}{d_{NW}}$$

dove "d" è definito come in Figura 9 e

" d_{NW} " è la massima distanza percorsa dalla mistura in assenza di elementi di rallentamento.

Il secondo parametro è una misura della tendenza ad aumentare la massima distanza trasversale raggiunta dalla mistura, a causa della presenza delle opere. L'efficienza trasversale è definita come segue:

$$\epsilon_T = \frac{L - L_{NW}}{L_{NW}}$$

dove "L" è definita come in Figura 9 e " L_{NW} " è la massima larghezza raggiunta dalla mistura in assenza delle opere di rallentamento.

RISULTATI SPERIMENTALI

Le prove realizzate

Nel presente articolo sono mostrati i risultati ottenuti dalla esecuzione ed elaborazione di circa 130 prove sperimentali. La pendenza del piano inferiore è stata mantenuta costante e corrispondente a 7° (dello stesso ordine di grandezza delle aree di arresto naturali). Il piano superiore è stato posizionato a 24°, 27° e 30° (tre valori nel campo di variabilità della inclinazione della zona di scorrimento naturale). I flussi granulari sono stati ottenuti da due volumi della mistura corrispondenti al peso di 3 kg (29.43 N) e 7 kg (68.67 N).

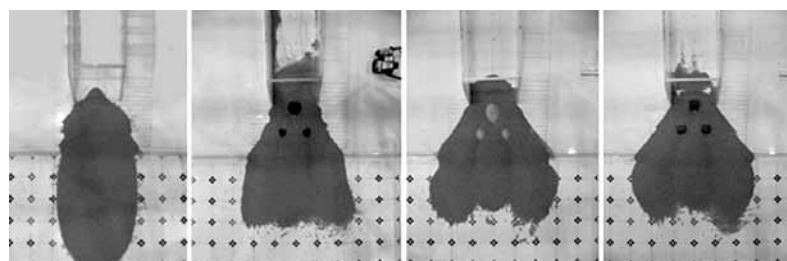


Fig. 8 Sulla sinistra la distribuzione della massa in assenza di opere di rallentamento; sulla destra tre esempi di dispersione causati da un particolare lay-out di tre coni a base circolare, di tre coni a base ellittica e di tre denti.



A sinistra, coni di rallentamento a Trafoi (BZ), in Val di Trafoi.

Fig. 9 Sotto uno schema di distribuzione delle opere di rallentamento. Le opere posteriori formano un angolo θ con la direzione del flusso longitudinale; sulla destra, uno schema che mostra i parametri usati per definire l'efficienza trasversale e longitudinale del sistema di opere usato.

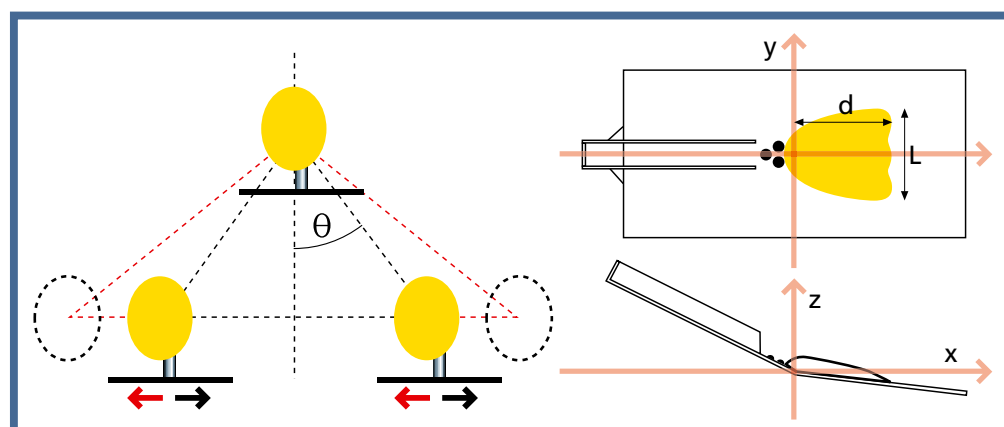


Fig. 10
L'apparato sperimentale per la calibrazione del sistema di misura della forza d'impatto.



Fig. 11
Il numero di Froude in prossimità delle opere degli eventi generati in laboratorio alle diverse condizioni sperimentali. N è la numerosità del campione; σ è la deviazione standard.

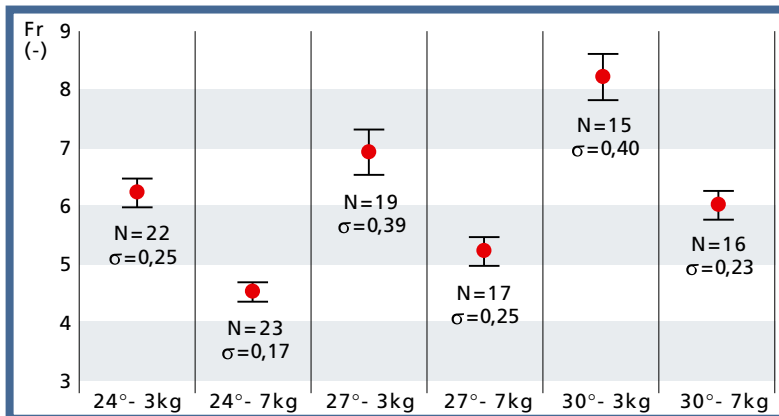
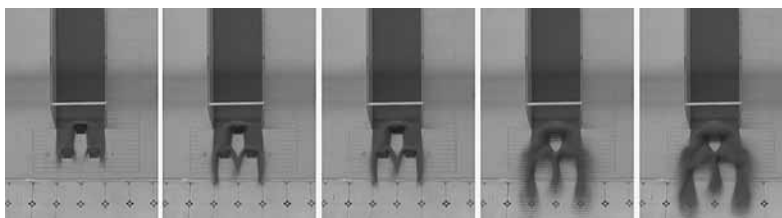


Fig. 12
Schema dei due tipi di impatto per una mistura trifasica secondo Armanini, Scotton (1993).



Fig. 13
Una sequenza di fotogrammi ottenuti con la video-camera frontale (intervallo di ripresa pari a 0.04 s) durante l'impatto di una mistura contro un sistema di tre denti. L'angolo di apertura è pari a 26°.



Le opere posteriori sono state posizionate secondo 5 angoli di apertura: 26°, 30°, 35°, 40° e 45°. Alcuni esperimenti sono stati realizzati in assenza di elementi di rallentamento allo scopo di valutare l'efficienza longitudinale e trasversale del sistema di opere.

Molte configurazioni sperimentali sono state realizzate due o tre volte al fine di verificare la ripetibilità dei test. Particolare attenzione è stata posta per evitare che i grani dell'ammasso potessero penetrare tra la base dell'elemento di rallentamento ed il piano di supporto e nel sistema di scorrimento meccanico sotto al piano, causando seri problemi nella misurazione della forza di impatto.

Questo si è rivelato di particolare importanza a causa delle piccole dimensioni delle particelle più piccole della mistura granulare utilizzata. Anche per questa ragione la calibrazione del sistema di misura della forza è stata effettuata prima della esecuzione di ogni test (Figura 10).

Risultati sperimentali

I parametri fisici che sono stati ritenuti più significativi per il fenomeno sono: la forza di impatto (F), l'altezza di scorrimento (h, definita sopra), la velocità di scorrimento della mistura (v, definita sopra), la forma e la dimensione delle opere di rallentamento (cono a base circolare, cono a base ellittica, dente; la superficie delle opere è

liscia), la distribuzione geometrica degli elementi di rallentamento, la larghezza massima del deposito (L, Figura 8), la massima distanza longitudinale raggiunta dal deposito (d), la densità del materiale granulare, la sezione trasversale del moto confinato. Il volume della mistura e la sua forma all'inizio del moto, la reologia della mistura, la pendenza della canaletta e la scabrezza del fondo e delle pareti contribuiscono a determinare tutte le proprietà della distribuzione dell'ammasso prima dell'impatto.

Non tutti i parametri citati sono stati investigati. In particolare, non è stato possibile definire la densità di volume della mistura. Per questa ragione nella rappresentazione dei risultati sperimentali è stata utilizzata la densità del materiale. Inoltre, sono state analizzate alcune forme particolari di rallentatori, allo scopo di simulare la geometria delle opere usate nei casi reali. La distribuzione triangolare di tre elementi di rallentamento è stata adottata allo scopo di simulare la distribuzione geometrica più semplice utilizzata nella progettazione. Il rapporto tra la larghezza del moto vincolato e la larghezza del sistema di opere ha avuto sempre valori prossimi all'unità. Negli esperimenti i valori misurati della altezza di scorrimento variano tra 8 mm e 21 mm; i valori della velocità tra 1.5 m/s e 2.6 m/s; il numero di Froude varia da 4. a 8. In Figura 11 è mostrato il numero di Froude calcolato secondo la seguente definizione:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \cos\theta \cdot h}}$$

La Figura mostra la buona capacità dell'apparato sperimentale di produrre eventi ripetibili, alle stesse condizioni al contorno ed iniziali (uguale pendenza del piano di monte, uguale volume di materiale granulare con uguale distribuzione all'interno della scatola di carico) prima dell'impatto contro le opere di rallentamento. Mostra, inoltre, che, all'aumentare della pendenza del canale, a parità di volume dell'ammasso granulare, il numero di Froude aumenta, mentre, aumentando il volume dell'ammasso granulare, alla

stessa pendenza, tende a diminuire. Il numero di Froude è, generalmente, piuttosto alto. L'impatto dinamico osservato è stato sempre del tipo "a getto verticale" (Figura 12).

In Figura 13 sono mostrati alcuni istanti di un impatto tipico contro un sistema di tre denti. La presenza degli ostacoli tende a deviare la mistura normalmente al fondo. Questo vale sia per gli elementi frontali che per gli elementi in seconda linea. Non si nota alcuna influenza a monte del sistema di opere causata dall'impatto. I valori della forza contro l'elemento frontale variano da 0.64 N a 2.84 N, mentre contro l'elemento posteriore da 0.16 N a 2.26 N. Circa venti test sono stati realizzati per verificare la ripetibilità. La variabilità media della forza adimensionalizzata è stata di circa il 12%, mentre la deviazione standard è stata di circa il 10%.

La forza adimensionalizzata sugli elementi frontali

La forza di impatto adimensionalizzata è stata ottenuta per mezzo della densità del materiale (la densità della zeolite è pari a $\rho = 1080 \text{ kg/m}^3$), la velocità della miscela nei pressi delle opere (v) e l'area di impatto (A), essendo F la forza misurata agente sull'elemento:

$$F_{d_less} = \frac{F}{\rho v^2 A}$$

L'area di impatto è definita come in Figura 14.

Risultati per i coni a base circolare

I dati sperimentali sono stati trattati mediante una analisi di regressione lineare multipla, seguendo l'analisi dimensionale del fenomeno. Un modello sufficientemente buono è stato ottenuto rappresentando la forza adimensionalizzata per mezzo del numero di Froude della miscela e con il parametro che rappresenta il rapporto tra la altezza di scorrimento della miscela e la altezza dell'opera (h/H). Il modello ottenuto, insieme al campo sperimentale di definizione, è riportato in eq. 1 di Figura 15. Il modello è in grado di

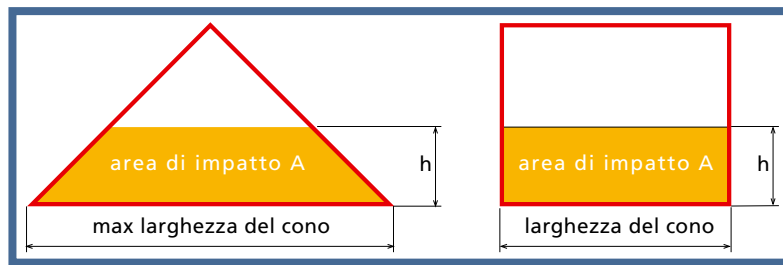


Fig. 14
Definizione dell'area di impatto per i coni e per i denti utilizzata nella valutazione della forza di impatto adimensionalizzata.

Equazioni

1. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 0.939 - 0.0582 \cdot Fr - 0.390 \cdot \frac{h}{H}$
2. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 1.188 - 0.0873 \cdot Fr - 0.543 \cdot \frac{h}{H}$
3. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 1.365 - 0.00465 \cdot Fr^2 - 0.993 \cdot \frac{h}{H}$
4. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 1.743 - 0.0447 \cdot Fr - 0.723 \cdot \frac{h}{H} - 1.131 \cdot \theta$
5. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 1.053 - 0.0546 \cdot Fr - 0.459 \cdot \frac{h}{H} - 0.417 \cdot \theta$
6. $F_{d_less} \text{ calcolato} = 1.61 - 0.00365 \cdot Fr^2 - 0.718 \cdot \frac{h}{H} - 1.129 \cdot \theta$

Fig. 15
La forza adimensionalizzata ottenuta mediante un modello di regressione lineare multipla ed il campo di indagine sperimentale.
eq. 1: cono a base circolare frontale;
eq. 2: cono a base ellittica frontale;
eq. 3: dente frontale;
eq. 4: cono a base circolare posteriore;
eq. 5: cono a base ellittica posteriore;
eq. 6: dente posteriore.

descrivere l'80% (R^2) dell'informazione contenuta nel campione. L'errore standard della stima è pari allo 0.032, mentre l'errore medio assoluto è pari a 0.024. Un confronto tra i valori misurati ed i valori calcolati della forza adimensionalizzata contro il cono a base circolare frontale è mostrato in Figura 16.

Risultati per i coni a base ellittica

Per il cono frontale a base ellittica il modello ottenuto è riportato in eq. 2 di Figura 15. Il modello descrive il 78% dell'informazione contenuta nel campione. L'errore standard della stima è pari a 0.038, mentre l'errore assoluto medio è pari a 0.031. Il confronto tra i valori misurati ed i valori calcolati della forza adimensionalizzata contro il cono frontale a base ellittica è mostrato in Figura 17.

Risultati per i denti

Per il dente in posizione frontale un'accettabile interpretazione dei dati sperimentali è stata ottenuta con il modello rappresentato dalla eq. 3 di Figura 15: Il modello contiene il 79% dell'informazione contenuta nel campione.

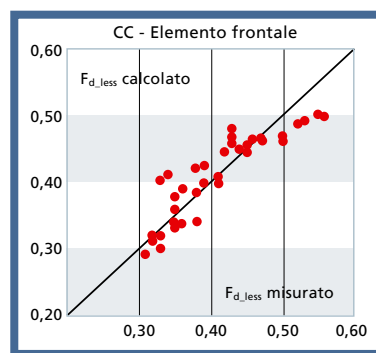


Fig. 16
La forza adimensionale misurata e calcolata secondo il modello di regressione lineare multipla per il cono a base circolare frontale.

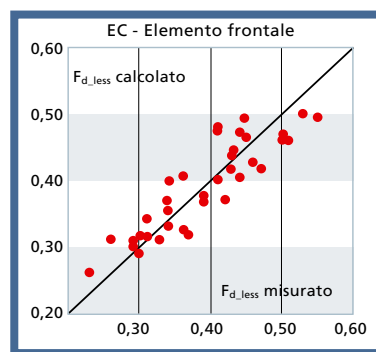


Fig. 17
La forza adimensionale misurata e calcolata secondo il modello di regressione lineare multipla per il cono a base ellittica frontale.

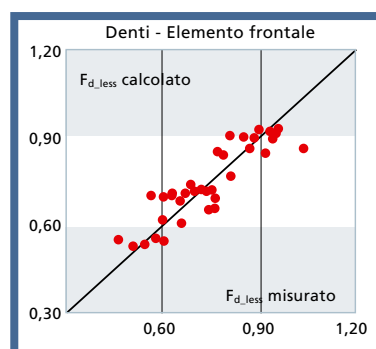


Fig. 18
La forza adimensionale misurata e calcolata secondo il modello di regressione lineare multipla per il dente frontale.

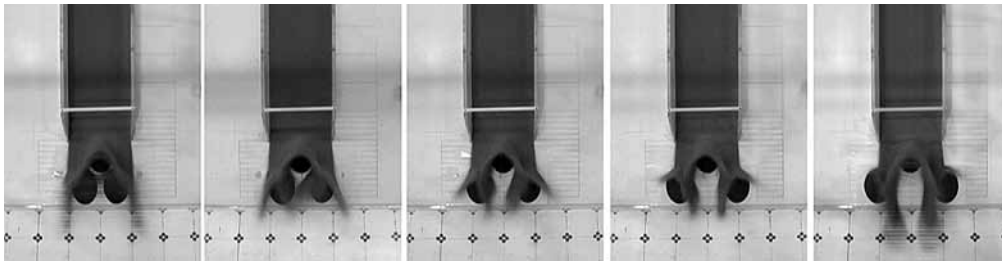
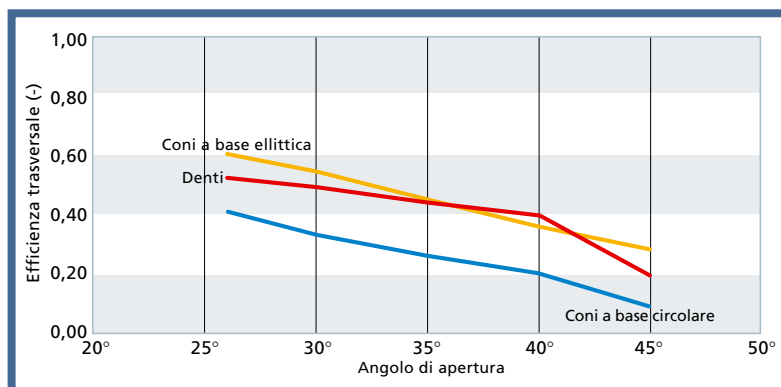
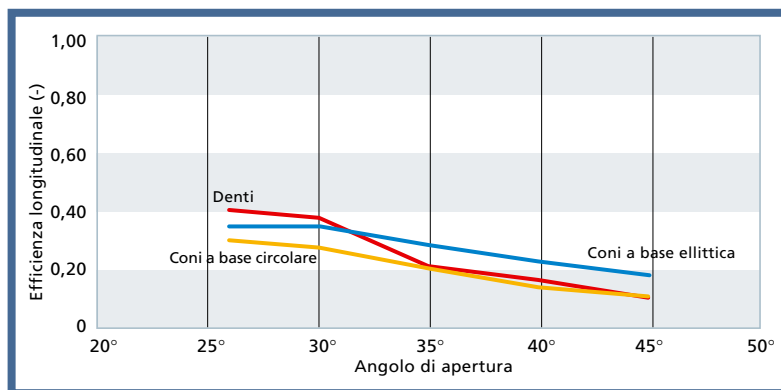
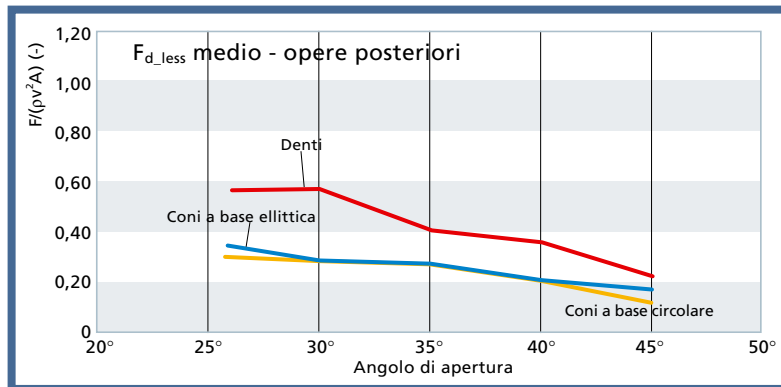


Fig. 19
Una sequenza di fotogrammi ottenuti dalla video-camera frontale durante cinque diversi eventi al momento dell'impatto contro un sistema di tre coni a base ellittica. Gli angoli di apertura sono, da sinistra verso destra, 26°, 30°, 35°, 40° 45°.

Fig. 20
Valore medio della forza d'impatto adimensionalizzata contro gli elementi di rallentamento posteriori, quando l'angolo di apertura varia da 25° a 45°.

Fig. 21
Valore medio dell'efficienza trasversale dei sistemi di rallentamento, quando l'angolo di apertura delle opere posteriori varia da 25° a 45°.

Fig. 22
Valore medio dell'efficienza longitudinale dei sistemi di rallentamento, quando l'angolo di apertura delle opere posteriori varia da 25° a 45°.



L'errore standard della stima vale 0.068, mentre l'errore assoluto medio vale 0.053. Il confronto tra il valore della forza adimensionalizzata misurata e calcolata per il dente in posizione frontale è mostrato in Figura 18. Non è osservabile una differenza significativa tra i modelli per i due tipi di cono. Al contrario, il modello per i denti è piuttosto diverso, sia in considerazione dei valori assunti dalla forza adimensionalizzata, che per il tipo di di-

pendenza dai parametri. In questo caso la dipendenza dal numero di Froude che meglio descrive i dati sperimentali è di tipo quadratico.

La forza adimensionalizzata sugli elementi della seconda linea

Nella Figura 19 è mostrata una sequenza di immagini che illustra l'effetto dell'angolo di apertura al momento dell'impatto di una mistura granulare contro un sistema

di tre coni a base ellittica. In tutti i casi illustrati l'impatto è del tipo "a getto verticale" modificato dalla forma dell'elemento ritardante. La cella di carico accoppiata all'elemento in seconda linea misura la componente longitudinale della forza totale subito dallo stesso.

Anche per le opere posteriori i dati sperimentali sono stati trattati mediante una analisi di regressione multipla. In questo caso i migliori risultati sono stati ottenuti considerando, accanto alle variabili precedenti, anche l'angolo di apertura θ (Figura 9) espresso in radianti. Il numero di Froude ed il rapporto h/H utilizzati sono quelli misurati in prossimità dell'elemento frontale.

Risultati per i coni posteriori a base circolare

Per il cono a base circolare posteriore si propone il modello di eq. 4 di Figura 15. Il modello è in grado di descrivere il 70% (R^2) dell'informazione contenuta nel campione. L'errore standard della stima è pari a 0.12, mentre l'errore medio assoluto vale 0.088.

Risultati per i coni posteriori a base ellittica

Per i coni a base ellittica posteriori il modello proposto è quello di eq. 5 di Figura 15. In questo caso il modello raccoglie il 68% dell'informazione del campione. L'errore standard della stima vale 0.055 e l'errore assoluto medio vale 0.038.

Risultati per i denti

Per i denti posteriori una buona interpretazione dei dati sperimentali può essere ottenuta con il modello di eq. 6 di Figura 15. Il modello descrive il 70% dell'informazione del campione con un errore standard della stima pari a 0.12 e un errore assoluto medio pari a 0.088.

La capacità dei modelli di descrivere l'impatto sugli elementi posteriori è minore che per gli elementi frontali.

Altri parametri che possono influenzare il fenomeno, come il rapporto tra la larghezza del moto e la larghezza totale del sistema di opere, non sono stati presi

esplicitamente in considerazione.

La forza adimensionalizzata massima si verifica quando l'angolo di apertura è ai suoi minimi valori, nel campo sperimentale. In Figura 20 è mostrato il valore medio della forza di impatto adimensionale al variare dell'angolo di apertura e del tipo di opera. Nel caso dei coni, la massima forza di impatto si verifica in corrispondenza del minimo angolo di apertura analizzato, mentre, per i denti, il massimo si osserva ad un angolo di apertura compreso tra 25° e 30°.

Efficienza longitudinale e trasversale

Nelle Figure 21 e 22 è rappresentata l'efficienza del sistema di opere quando l'angolo di apertura delle opere posteriori varia da 25° a 45°. Tutti i sistemi di rallentamento tendono a ridurre la loro efficienza longitudinale e trasversale quando l'angolo di apertura è maggiore di 25°. L'efficienza dei sistemi di denti e di coni a base ellittica sembra essere maggiore dell'efficienza dei sistemi di coni a base circolare, in particolare a bassi angoli di apertura. L'efficienza longitudinale e trasversale variano insieme con una correlazione positiva (Figura 23). L'efficienza massima si verifica quando si realizza la massima forza di impatto contro gli elementi posteriori (Figura 19).

CONCLUSIONI

L'articolo fornisce varie informazioni di natura tecnica che possono essere utilizzate nella fase di progetto di sistemi di rallentamento di valanghe di neve densa. Fornisce, inoltre, alcuni criteri per stimare la massima forza totale che agisce su diversi tipi di strutture, una volta che siano stati definiti, per esempio per mezzo di una appropriata simulazione numerica, i principali parametri fisici che caratterizzano il moto.

La forza adimensionalizzata è molto più grande per sistemi che usano elementi a parete verticale rispetto a sistemi che utilizzano strutture a cono; l'angolo di apertura delle opere posteriori, in

corrispondenza del quale la efficienza longitudinale e trasversale assume il suo massimo valore, è dell'ordine di 25°; la massima efficienza si verifica quando la forza adimensionalizzata è massima.

Gli eventi prodotti in laboratorio possono rappresentare i fenomeni reali in similitudine di Froude ad una scala di circa 1:100 (modello su prototipo).

Una valutazione sulla correttezza dei risultati sperimentali dovrebbe essere data ad una scala maggiore. A titolo di esempio si esegue una stima della forza totale che investe un cumulo o un dente in posizione frontale.

Si considera una valanga di neve densa la cui velocità del fronte in prossimità dell'opera è pari a 20 m/s e la cui altezza di scorrimento è dell'ordine di 3 m.

La densità del materiale costituente l'ammasso in movimento viene stimata in 600 kg/m³.

Si considerano i due tipi di opere analizzate. I cumuli abbiano una base di diametro pari a 16 m e un'altezza di 8 m; i denti abbiano una larghezza di 8 m e altezza pari alla larghezza. Nell'ipotesi che l'angolo sull'orizzontale nella zona delle opere sia dell'ordine dei 27° si ottiene una forza adimensionalizzata per i coni

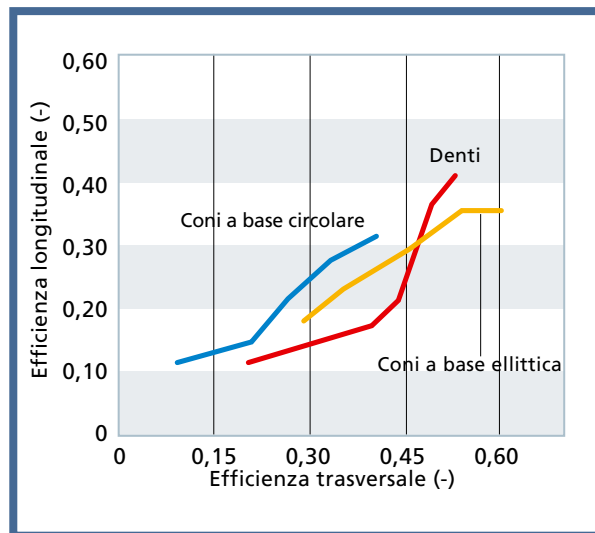


Fig. 23
Relazione tra i valori medi dell'efficienza trasversale e longitudinale per i vari sistemi di rallentamento.

pari a 0,57 (Figura 15: eq. 1) e per i denti pari a 0,92 (Figura 15: eq. 2). La forza totale vale rispettivamente $5,29 \cdot 10^6$ N e $5,31 \cdot 10^6$ N. La pressione media sulle opere vale rispettivamente $0,14 \cdot 10^6$ Pa e $0,22 \cdot 10^6$ Pa.

RICONOSCIMENTI

Gli autori ritengono necessario ringraziare Ilaria Bezzi e Patrizia Pederzoli, coinvolte nella ricerca durante lo svolgimento della loro tesi di laurea.

Un doveroso ringraziamento va anche ai tecnici del Laboratorio di Idraulica dell'Università di Trento.

Bibliografia

- Armanini, A., Scotton, P., 1993, On the dynamic impact of a debris flow on structures, Proc. XXV IAHR Congress, Tokyo, Vol. B, paper n. 1221.
- Chu, T., Hill, G., McClung, D.M., Ngun, R., Sherkat, R., 1995 Experiments on granular flows to predict avalanche run up. Canadian Geotechnical Journal 32, 285-295.
- Faug, T., Naaim, M., Naaim-Bouvet, F., 2004, An equation for spreading length, center of mass and maximum run-outs shortenings of avalanche flows by obstacle, Cold Regions Science and Technology 39, 141-151.
- Hakonardottir, K.M., Hogg, A.J., Johannesson, T., Tomasson, G.G., 2003, A laboratory study of the retarding effects of braking mounds on snow avalanches. Journal of Glaciology, Vol. 49, No. 165, pp. 191-200.
- Hutter, K., Koch, T., Pluss, C., Savage, S.B., 1995 The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout: Part II. Experiments. Acta Mechanica 109, 127- 165.
- Johannesson, T., alii, 2006, The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments (www.leeds.ac.uk/satsie/).
- Keller, S., Ito, Y., Nishimura, K., 1998 Measurements of the velocity distribution in ping-pong-ball avalanches. Ann. Glaciol. 26, 259-264.
- Scotton, P., 1996, Dynamic impact of debris flow: experimental study, Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Trento.
- Sheikh, A. H., Verma, S. C., Kumar, A., 2008. Interaction of retarding structures with simulated avalanches in snow chute. Current Science, Vol. 94, No. 7, pp. 916-921.