

Sviluppo e applicazione
di un modello
matematico e numerico
per la simulazione dei
fenomeni valanghivi
in Provincia
di Trento

Dott. Ing. Paolo Scotton,

Docente presso la Facoltà
di Ingegneria dell'Università
degli Studi di Trento.

Dott. Ing. Mauro Barberi,

Ingegnere libero professionista in Trento;
collaboratore del Dipartimento
di Ingegneria Civile ed Ambientale
nello studio di campo delle valanghe di
neve.

Dott. Ing. Mauro Gaddo,

Ufficio Neve Valanghe e Meteorologia,
Provincia Autonoma di Trento.

Valanghe in Val dei Spini

Il presente elaborato illustra l'attività svolta nell'ambito dello studio del sito valanghivo della Val dei Spini, nel comune di Pejo, in Trentino. Sono descritti i metodi usati e le osservazioni effettuate durante le numerose visite al sito realizzate sia in periodo invernale che estivo negli anni 1998 e 1999. Lo studio è stato completato attraverso lo sviluppo di un modello matematico e numerico per la simulazione dei fenomeni valanghivi (utilizzato nella sua versione mono-dimensionale), validato presso il laboratorio di Idraulica del-

l'Università di Trento.



Fig.1

La Val dei Spini da
Pejo Terme
(luglio 1999).



INTRODUZIONE

Lo studio è stato affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dall'Ufficio Neve, Valanghe e Meteorologia della Provincia di Trento ed ha impegnato personale universitario, provinciale ed esperti liberi professionisti per circa due anni. Lo studio è stato ritenuto necessario ai fini di valutare il comportamento del sito valanghivo in relazione alla presenza dei centri abitati di Cogolo e Celledizzo, collocati nella parte di valle del conoide della Val dei Spini. L'attività di campo svolta, e qui brevemente descritta, si è rivelata fondamentale per lo sviluppo di un modello matematico-numerico, specificamente dedicato alla simulazione dei fenomeni valanghivi del sito in questione. Molti sono gli aspetti che devono essere considerati in questo tipo di studi a causa della estrema variabilità del fenomeno e delle molte incertezze nella sua interpretazione. Fondamentale è la conoscenza della morfologia del sito, importante la conoscen-

za delle serie storiche relative ai dati climatici (precipitazione nevosa, temperatura, direzione e velocità del vento) ed agli eventi valanghivi verificatisi in passato. Utili informazioni possono essere derivate dalla conoscenza delle caratteristiche della neve nelle zone di accumulo, distacco, scorrimento ed arresto. Rilevanti infine sono le informazioni ottenibili dallo studio della copertura vegetale, in termini quantitativi e qualitativi, ottenibili con i metodi della dendrocronologia.

Caratteri salienti del sito valanghivo della Val dei Spini

Il bacino della Val dei Spini (vedi Fig. 1), situato in sinistra orografica del torrente Noce in Val di Pejo nel Trentino nord-occidentale, è caratterizzato da una intensa attività valanghiva con periodicità degli eventi quasi annuale. La configurazione del terreno presenta versanti imbutiformi posti oltre il limite della vegetazione forestale (circa 2300 m s.m.),

con pendenze comprese fra i 35° ed i 40°. Dal punto di vista geologico l'area della zona di distacco e di scorrimento delle valanghe è caratterizzata da rocce metamorfiche che vengono estesamente a giorno in molti tratti e che altrimenti costituiscono il substrato geologico non affiorante dell'intera area. Il conoide, di tipo alluvionale-detritico, è costituito superficialmente da materiale grossolano, a matrice ghiaiosa sabbiosa, inglobante massi e blocchi di pezzatura anche consistente che derivano dallo smantellamento delle rocce affioranti del bacino imbrifero sovrastante e che vengono trasportate a valle dai corsi d'acqua e dalle valanghe. Dal punto di vista forestale, la copertura è costituita quasi esclusivamente da fustaie ed occupa i versanti scoscesi che sovrastano il fondovalle. Alle quote inferiori i tipi di popolamento sono costituiti da abete rosso e larice sia nella forma di pecceta pura, che mista. In ampie zone il larice

Immagine di deposito osservato nel sito valanghivo della Val dei Spini. Mostra un deposito rilevato il 6 marzo alla quota di circa 1900 m s.m.m. (diametro medio 20-30 cm).

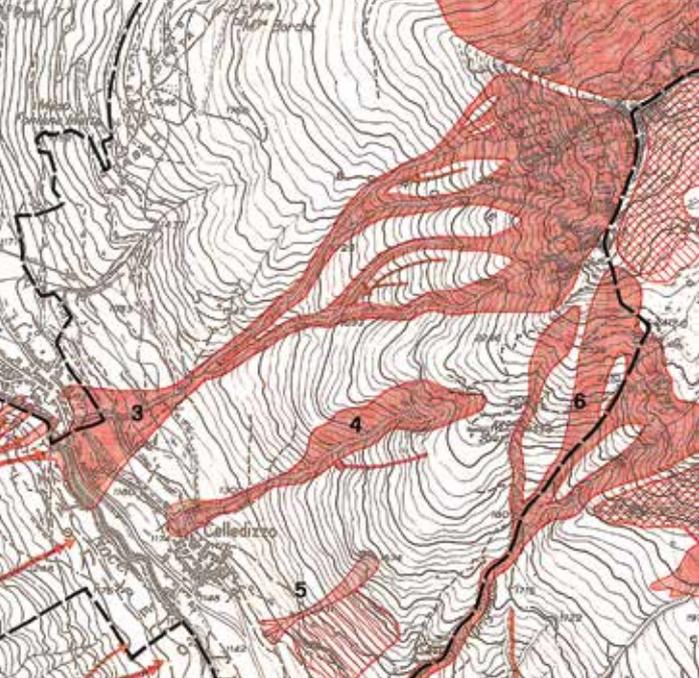


Fig.2

Estratto della C.L.P.V. della Val di Pejo. Con il numero 3 è indicato il sito valanghivo della Val dei Spini.

Nella pagina a fronte: Fig. 3: Punti significativi nel bacino della Val dei Spini con riferimento alla strumentazione installata e ai profili stratigrafici eseguiti.

Fig. 4: Spostamento dei traccianti durante la stagione invernale 1998/1999: posizione iniziale dei traccianti (punti in verde); posizione finale dei traccianti (punti in rosso); posizione iniziale dei traccianti non ritrovati (punti in blu); posizione dei traccianti rimasti nella posizione iniziale (punti in giallo); posizione del punto fiduciale di riferimento (punto in celeste).

costituisce la specie dominante e l'abete quella consociata, in funzione dell'esposizione, del grado di fertilità ed umidità del terreno. Salendo di quota, il larice diventa specie esclusiva, in quanto le basse temperature ed i movimenti nevosi costituiscono un fattore limitante per lo sviluppo dell'abete rosso. A quote superiori ai 2200-2400 m s.m.m. la vegetazione cede il posto agli improduttivi di montagna. Lungo i percorsi delle valanghe, si trovano delle formazioni pure di ontano bianco, verde e di betulla, altrove le latifoglie sono presenti sporadicamente. L'ontano verde è localizzato in particolare lungo i ripidi versanti ed i canali interessati da fenomeni valanghivi, mentre i bordi sono in generale colonizzati dal larice. A causa della composizione silicea dei suoli manca il pino mugo che predilige i terreni calcarei. Dal punto di vista climatico la valle presenta il clima tipico del versante sud delle Alpi centrali e risente, in modo attenuato, degli influssi del clima padano. L'andamento termico e pluviometrico locale è complicato notevolmente dalla altitudine e dall'esposizione dei versanti. Dalla analisi dei dati di temperature registrate presso la stazione di Pejo, posta a 1574 m s.m.m., nel periodo 1961-1978, si osserva come la

temperatura media annua sia pari a 6.8° C. Il mese più freddo risulta essere gennaio, con medie di -0.6 °C, mentre il mese più caldo risulta essere agosto con medie di 15° C. Notevoli risultano sia le escursioni termiche delle medie mensili (15.6° C) che le escursioni termiche tra il giorno e la notte. Sono frequenti le gelate tardive (maggio, giugno) e quelle precoci (settembre, ottobre) che possono portare danni alla vegetazione. Le precipitazioni sono ben distribuite nell'arco dell'anno con massimi primaverili e autunnali. La quantità media annua di pioggia caduta (dato relativo agli anni compresi tra il 1920 ed il 1978) è di 861 mm. Tale valore rappresenta uno dei più bassi registrati da tutte le stazioni poste nel Trentino. Le precipitazioni di tipo nevoso interessano i mesi da novembre a marzo. I mesi con maggiori precipitazioni nevose sono in genere quelli tardo-autunnali e marzo. Gennaio e febbraio sono molto spesso avari di nevicata, mentre oltre i 1800 m s.m.m. anche aprile e maggio possono portare abbondanti nevicata. Nei riguardi del vento, si ha un continuo alternarsi nella direzione delle correnti. I venti prevalenti vengono da ovest e sud-ovest in primavera ed autunno, mentre in estate si possono avere sporadici, anche se forti, venti da sud-est. I venti provenienti da altre direzioni sono molto rari. In passato alcuni fenomeni valanghivi di particolare intensità hanno interessato Cogolo e le zone abitate del conoide. Durante l'inchiesta sul terreno, eseguita per la stesura della Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (Fig.2), le informazioni raccolte hanno indicato come gli eventi del passato non abbiano causato vittime ma abbiano piuttosto interessato infrastrutture (abitazioni, strade e ponti). L'evento di maggiore

intensità riportato si è verificato all'inizio del secolo. Una massa di circa 100.000 m³, con profondità dei depositi superiore a 7-8 m, ha percorso tutto il conoide, raggiungendo il fondovalle, oltrepassando il torrente Noce e risalendo sul versante opposto. In Fig. 2 è indicato l'inviluppo delle aree dei depositi occupati dalle valanghe storiche.

ATTIVITÀ DI CAMPO

L'attività di campo è stata orientata al rilievo dei parametri nivologici necessari ad integrare i dati già disponibili. La sua importanza appare evidente se si considera che i caratteri dei fenomeni valanghivi sono estremamente dipendenti dalle proprietà locali del sito (in questo senso la letteratura disponibile non può essere esaustiva) e a causa del limitato numero di eventi osservati in passato. Particolare importanza riveste la comprensione dei meccanismi locali di distacco, la valutazione dei volumi di massa nevosa potenzialmente in gioco e dei parametri dinamici. Tra questi velocità e profondità di scorrimento devono ritenersi fondamentali per il processo di taratura di un modello matematico-numerico. Alla valutazione di tali parametri locali è stata indirizzata l'attività sul campo tra l'inizio dell'inverno 1997/'98 e l'estate del 1999, comprendendo due stagioni invernali. Lo studio del tipo di strumentazione da adottare è stato affrontato ponendo particolare attenzione ai requisiti fondamentali di robustezza, affidabilità, resistenza alle basse temperature ed economicità, tenendo conto delle rilevanti difficoltà di accesso al sito nel periodo invernale. Il limite posto dalla assenza di qualunque tipo di fonte energetica ha orientato la scelta verso strumenti ad azionamento essenzialmente meccanico per il

Rappresentazione schematica del pendio di scorrimento della valanga

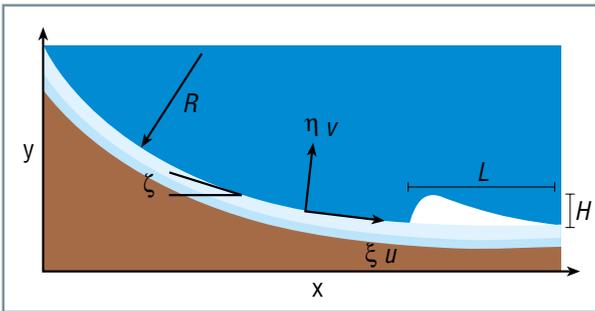


Fig.6

Parametri utilizzati

nella adimensionalizzazione e semplificazione delle equazioni del moto

$$\begin{aligned} \varepsilon &= H/L \ (\ll 1) \\ \lambda &= L/R \ (\varepsilon \leq 0 \ (\lambda) \leq 1) \\ \tan \delta &= (\varepsilon \leq 0 \ (\tan \delta) < 1) \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della massa

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial \xi} = 0$$

eq. 1

Equazione della quantità di moto

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} = g \cdot \sin \zeta - g \cdot \tan \delta \cdot (\cos \zeta + \frac{X \bar{u}^2}{g}) \cdot \text{sgn}(\bar{u}) - g \cdot k_{sp} \cdot \cos \zeta \cdot \frac{\partial h}{\partial \xi}$$

eq. 2

Fig.7

Fig.6: Rappresentazione schematica del pendio di scorrimento della valanga. x, y sono le coordinate del sistema cartesiano; ξ, η sono le coordinate curvilinee; u, v le componenti della velocità; H, L le lunghezze caratteristiche della valanga; R raggio di curvatura locale della superficie di scorrimento; ζ l'angolo rispetto all'orizzontale del pendio.

ottenute mediante la misurazione con GPS della posizione iniziale (al tempo della posa) e finale (alla fine della stagione invernale) dei traccianti in legno ([4], [5]). I profili stratigrafici (Fig. 3) del manto nevoso sono stati effettuati in centro al canale in corrispondenza dei depositi più rilevanti nella parte alta del sito. La profondità massima variava da 2 m a 3.5 m.

Tutti i profili realizzati hanno mostrato una successione di strati dovuti a piccoli fenomeni valanghivi e a precipitazioni nevose.

La densità dei vari strati variava da 370 kg/m³ in superficie, fino ad un valore massimo di 470 kg/m³.

L'osservazione della altezza della neve in corrispondenza delle paline ha messo in evidenza una certa non uniformità nella distribuzione della neve al suolo.

Determinante potrebbe essere l'azione eolica frequentemente riportata nelle osservazioni periodiche del personale della Commissione Valanghe del Comune di Pejo. Le stesse documentano la tendenza del bacino al distacco contemporaneo di tutti i versanti provocato sia da rilevante precipitazione nevosa che da rialzo termico.

CONSIDERAZIONI RIASSUNTIVE SULLA ATTIVITÀ DEL BACINO

Il pur breve periodo di osservazione del sito valanghivo ha permesso di definire alcune delle caratteristiche ritenute salienti del suo comportamento. La Fig. 4 mostra lo spostamento dei traccianti durante l'inverno 1998-1999. Appare evidente la diffusa attività su tutta la zona di accumulo e la tendenza al caricamento dei canali alle quote superiori ai 1700 m provocata da frequenti rilasci invernali di piccole dimensioni che si verificano a poca distanza dalle nevicate. I profili stratigrafici confermano tale osservazione. L'unico evento valanghivo rilevato in prossimità del conoide si è verificato in periodo primaverile ed in corrispondenza di un rialzo termico, confermando rilievi già effettuati in passato. La forma particellare del deposito testimonia la presenza di una percentuale significativa di acqua all'interno del manto nevoso al momento del distacco. L'alta densità della massa in movimento che ne deriva conferisce elevata capacità erosiva e di trasporto di materiale inerte anche di grandi dimensioni. La bassa velocità di scorrimento nella zona di controllo è giustificata dalla alta densità della massa in movimento e dalla bassa profondità, conseguenza del limitato volume dell'ammasso.

IL MODELLO MATEMATICO

Il modello matematico utilizzato nella simulazione della propagazione degli eventi valanghivi è concepito per descrivere il moto di una massa di materiale granulare senza coesione che scivola lungo un pendio curvo e scabro ([2]). Il comportamento reologico del materiale viene descritto facendo uso del criterio di Mohr-Coulomb, mentre le condizioni di attrito tra la massa in scorrimento ed il suo contenitore derivano ancora da una legge di tipo Coulombiano. Le equazioni usate per lo studio del fenomeno sono quelle di conservazione della massa (eq.1) e della quantità di moto (eq.2), scritte in forma adimensionale rispetto ad un sistema di coordinate curvilinee lungo la superficie di scorrimento (Fig. 6). Le incognite del modello sono la velocità mediata sulla normale al fondo e la altezza di scorrimento. L'importanza relativa dei termini della equazione della conservazione della quantità di moto è stata studiata mediante la analisi dimensionale realizzata utilizzando i parametri di Fig. 7. ε rappresenta il rapporto tra la altezza caratteristica della valanga (H) e la sua lunghezza caratteristica (L), ritenuto molto piccolo. λ rappresenta il rapporto tra la lunghezza caratteristica della valanga ed il raggio di curvatura rappresentativo del pendio (R). Infine, $\tan \delta$ rappresenta il coefficiente di attrito dinamico tra la massa in scorrimento e la superficie del pendio. L'equazione di continuità è scritta nell'ipotesi che la densità dell'ammasso non subisca significative variazioni durante il moto. L'equazione della conservazione della quantità di moto considera, accanto ai termini inerziali (a sinistra), il termine motore dovuto alla gravità, il termine che rappresenta

l'attrito esercitato dal fondo sulla massa (comprendente anche l'effetto della curvatura) ed il contributo dovuto alla variazione della profondità della massa in scorrimento. Si suppone che il comportamento costitutivo del materiale possa essere descritto da un criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Per un materiale senza coesione con angolo di attrito interno φ , la relazione è del tipo: $T = P \cdot \tan \varphi$ dove T e P sono rispettivamente le forze tangenziali e normali agenti sull'elemento di massa considerato. Le tensioni parallele e perpendicolari alla superficie di scorrimento possono essere messe in relazione attraverso un coefficiente di spinta, $k_{A,P}$, tipico della meccanica delle terre, dove k_A vale per stati attivi e k_P per stati passivi. Si assume che il primo derivi da un meccanismo di elongazione innescato in direzione parallela al letto di scorrimento, l'altro da uno di compressione nella stessa direzione. Il sistema di equazioni differenziali considerato è completato dalle condizioni al contorno. Sul fondo viene imposta la condizione di scambio di massa assente (non si verificano fenomeni di deposito o erosione) e la condizione di resistenza Coulombiana (lo sforzo al fondo dipende dalla tensione normale applicata). Sulla superficie libera si ritengono trascurabili gli sforzi applicati e si impone la condizione di non penetrabilità (il modello non tiene conto di fenomeni di mescolamento lungo la verticale).

IL MODELLO NUMERICO

Lo schema di integrazione numerica utilizzato è uno schema Lagrangiano alle differenze finite (Fig. 8). L'ammasso granulare viene diviso in un numero K di celle. Nella figura l'indice i corrisponde alla posizione centrale

della cella, mentre l'indice j è collocato in corrispondenza dei suoi estremi. L'integrazione, ad un determinato istante temporale n , procede a partire dalla conoscenza dei valori di altezza di scorrimento (posizione centrale della cella) e posizione (estremi della cella) all'istante $n-1$, mentre le velocità, definite agli estremi della cella, sono note al passo temporale $n-1/2$. L'integrazione inizia dall'equazione di conservazione della massa (eq. 1) tra le posizioni ξ_j e ξ_{j+1} , mediante la quale si determina il nuovo valore della altezza di scorrimento a metà cella utilizzando la velocità di scorrimento agli estremi della stessa calcolati al tempo $n-1/2$. Mediante l'equazione della quantità di moto (eq.2) vengono determinati i nuovi valori di velocità, all'istante temporale $n+1/2$, agli estremi delle celle, con riferimento alle altezze di scorrimento calcolate al passo temporale n . La reologia prevede che, al passo temporale di calcolo, il coefficiente di spinta $k_{A,P}$ debba essere considerato come coefficiente di spinta attivo quando gli estremi di una cella si allontanano, mentre come coefficiente di spinta passivo quando si avvicinano. La stabilità dello schema numerico viene analizzata dal punto di vista fisico ([7]). Il problema consiste nella necessità di evitare, in corrispondenza di un definito passo di integrazione temporale, il passaggio attraverso lo zero del valore della velocità di scorrimento. Altra condizione fisica da rispettare corrisponde alla necessità che, durante lo stesso passo temporale, l'estremo più avanzato di ogni cella non venga superato dall'estremo che lo precede. Le condizioni fisiche su indicate possono essere realizzate modificando il passo di integrazione temporale nella fase di integrazione dell'equazione di

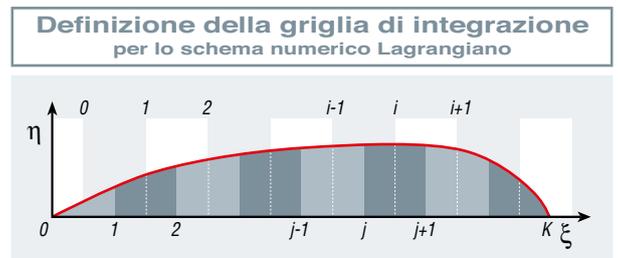


Fig.8

conservazione della quantità di moto. Il modello numerico elaborato è stato sottoposto ad una serie di test volti ad analizzare la sua sensibilità nei confronti dei parametri fisici e numerici che lo caratterizzano e alle condizioni iniziali ed al contorno. Le modalità del moto e la definizione della curvatura locale sono, ad esempio, fortemente influenzate dalla discretizzazione della superficie di scorrimento ([7]). Con una discretizzazione molto accurata vengono messe in evidenza le minute variazioni geometriche della superficie. Il campo di variabilità delle curvature diviene molto ampio ed il raggio di curvatura può assumere valori anche molto piccoli e confrontabili con la profondità di scorrimento dell'ammasso. Questa situazione contrasta con l'ipotesi iniziale di grandi raggi di curvatura rispetto alla profondità di scorrimento. Con una discretizzazione mediamente accurata l'effetto sopra descritto si può ritenere trascurabile per la maggior parte dei pendii reali. L'ipotesi di grandi raggi di curvatura rispetto alla profondità del moto è verificata, ma allo stesso tempo non vengono perse utili informazioni sull'andamento reale della superficie di scorrimento. Con una discretizzazione poco accurata l'andamento della superficie di scorrimento è notevolmente semplificato rispetto ai due casi precedenti. Nelle applicazioni a pendii reali il profilo longitudinale ottenuto non dà ragione di cambi di pendenza significativi facendo perdere utili informazioni sulle possibili

Fig. 8: l'indice i si riferisce al centro della cella mentre l'indice j ai suoi estremi.

Nella pagina che segue:
Fig. 9: L'installazione sperimentale utilizzata nelle prove: una paratoia a ventola contiene inizialmente il materiale granulare entro una canaletta rettangolare. La sua apertura impulsiva libera il materiale che si dispone secondo una nuova superficie di equilibrio.

Fig. 10: Confronto tra la forma sperimentale e numerica del deposito nel caso di materiale granulare (sfere dal diametro medio di 1 mm, angolo di attrito interno dinamico pari a 26° , angolo di attrito con il fondo pari a 18°) costituito da resina anionica rilasciata in modo impulsivo lungo una superficie orizzontale liscia costituita da perspex.

Fig. 13: La distanza interna dell'ammasso è stata adimensionalizzata con la lunghezza occupata dall'ammasso allo stesso istante di tempo.



Fig.9

zone di scorrimento ed arresto. I risultati del modello matematico e numerico sono stati confrontati con gli esiti di prove sperimentali eseguite in laboratorio. In Fig. 9 è mostrato uno scorcio dell'apparato utilizzato per le

sperimentazioni, mentre in Fig. 10 è mostrato il confronto tra il comportamento sperimentale e matematico in una particolare configurazione di prova. Il modello ha mostrato, in generale, una buona capacità di simulare il comportamento del materiale granulare nelle semplici configurazioni testate in laboratorio, giustificando il suo utilizzo nel caso di un sito reale.

APPLICAZIONE ALLA VAL DEI SPINI

La applicazione al sito valanghivo della Val dei Spini segue la analisi di campo descritta in precedenza. L'approccio monodimensionale è stato ritenuto adatto a rappresentare i fenomeni in oggetto sia per la natura sufficientemente regolare dei canali che rappresentano la zona di scorrimento, sia in considerazione delle condizioni al contorno che caratterizzano i processi studiati (le valanghe di notevoli dimensioni originano dai canali di alta quota). Per quanto riguarda la zona in uscita sul conoide un approccio almeno bi-dimensionale appare più coerente alla conformazione orografica del sito (ed è in effetti in fase di studio). Ciò nonostante si ritengono di notevole utilità le informazioni ottenute dal modello uno-dimensionale, soprattutto con riferimento agli eventi estremi. In Fig. 11 è mostrato l'andamento altimetrico dei due canali principali del sito valanghivo, la loro confluenza in prossimità della uscita sul conoide e la posizione del torrente Noce a fondovalle. Il modello è stato applicato, dapprima, nella simulazione di valanghe di diverse dimensioni delle quali sono note alcune caratteristiche dinamiche, allo scopo di stimare il valore assunto dalle grandezze fisiche in gioco. Dell'evento valanghivo rilevato il 27 febbraio 1998 ([4],

[5]), sono noti il volume (circa 1000 m³ accumulati nella zona di arresto), il canale di scorrimento (canale 9), la quota di partenza (circa 1700 m s.m.), la altezza di scorrimento nella parte finale (compresa tra 1 e 2 m), la velocità di scorrimento nella parte finale (circa 3 m/s), poco a monte della zona di arresto. Il modello è stato applicato considerando una larghezza media del canale 9 nel tratto in questione (tra 1700 e 1300 m s.m.) di 6 m, data la limitata altezza di scorrimento (il valore che appare adeguato sulla base dei rilievi effettuati nel canale). La Fig. 12 riporta la simulazione dell'evoluzione della valanga rilevata il 27 febbraio 1998. Le coordinate sono curvilinee locali e cioè la coordinata longitudinale lungo il fondo del canale ξ e la normale locale al fondo η . I risultati di Fig. 13 sono stati ottenuti attribuendo al materiale neve un angolo di attrito interno pari a 28°, mentre l'angolo di attrito sul fondo è stato posto pari a 26.5°. La Fig. 13 illustra l'andamento delle velocità interne all'ammasso a diversi istanti di tempo, dall'avviamento all'arresto. La rappresentazione utilizza le coordinate locali adimensionalizzate mediante la lunghezza L occupata dall'ammasso a vari istanti temporali. Le Figg. 12 e 13 permettono di mettere in evidenza le caratteristiche principali della modellazione reologica utilizzata. La Fig. 12 mostra come la fase di scorrimento avvenga con altezze decisamente inferiori rispetto alle altezze iniziali del deposito. Il deposito finale, invece, ha altezze che dipendono in modo molto rilevante dalle modalità di arresto, essendo queste ultime controllate in modo predominante dall'andamento altimetrico del canale di scorrimento. Il deposito presenta inoltre maggiori altezze nella parte arretrata. La Fig. 13

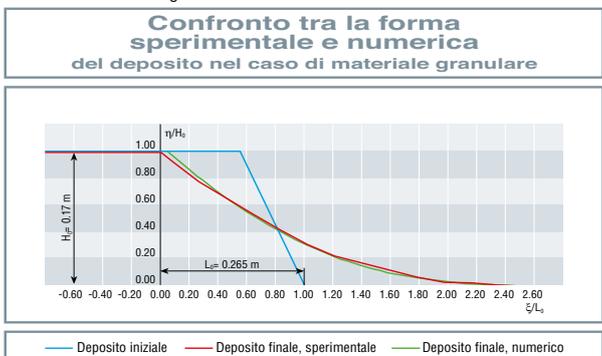


Fig.10

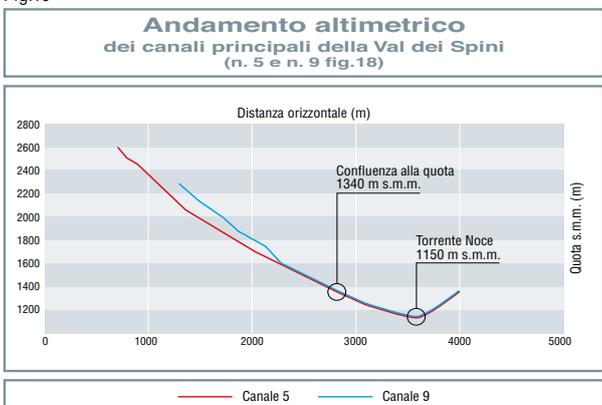


Fig.11

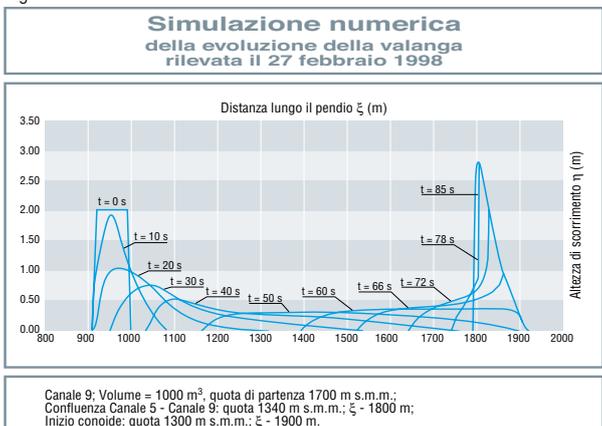


Fig.12

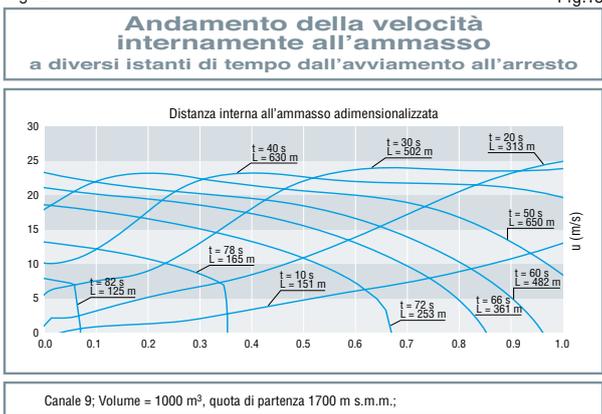


Fig.13

mostra, accanto ad una graduale accelerazione della massa, una fase di decelerazione più rapida. In generale questa dipende dalla resistenza al fondo e dalle variazioni altimetriche del canale. Nel caso presente si è mantenuto costante l'angolo di attrito al fondo date le caratteristiche del canale di scorrimento ed il non raggiungimento del conoide. La rapidità della decelerazione è causa della maggiore altezza del deposito rispetto al deposito iniziale. Il comportamento sopra descritto, sembra cogliere con sufficiente approssimazione la altezza del deposito rilevato il 27 febbraio 1998. Le velocità di scorrimento appaiono invece sovrastimate (circa 10 m/s nella zona di misura contro 3 m/s misurati) e le altezze di scorrimento massime leggermente sottostimate. La stima delle caratteristiche di una valanga estrema di progetto è stata effettuata considerando i dati rilevati nel periodo di osservazione ed i dati a disposizione relativi alle valanghe storiche. La determinazione del volume presenta ampi margini di incertezza. I dati storici a disposizione, nel loro complesso, non danno la possibilità, né per numero né per qualità, di realizzare una analisi statistica attendibile. Due eventi rivestono particolare interesse: l'evento del 1901 e l'evento del 13 marzo 1972 ([5]). La valanga del 1901 è stata in grado di giungere fino al Noce con altezze di scorrimento dell'ordine di 7-8 m, risalire sul versante opposto e creare uno sbarramento del fiume, che ha provocato la formazione di un invaso. La valanga del 13 marzo 1972 (catalogata nel Catasto Forestale Valanghe) ha depositato un volume di materiale granulare grossolano di circa 70.000 m³ su una superficie di 22.500 m², ad una quota di 1250 m s.m.m. (ben al di sopra della quota del Noce).

Gli altri eventi, di minore intensità, riportati nella analisi storica mostrano la difficoltà di trovare semplici relazioni tra i parametri osservati, per esempio tra volumi e quote di arresto, a testimonianza della intrinseca variabilità delle caratteristiche del sistema ambientale che ospita tali fenomeni. Anche in conseguenza di quanto sopra riportato, l'evento valanghivo estremo viene ricostruito a partire dalla analisi di campo. L'ipotesi considerata valida è che il distacco avvenga a partire dai canali di alta quota. I canali 5 e 9 sono considerati rappresentativi dei sottobacini rispettivamente in destra e in sinistra orografica della Val dei Spini (Fig. 18). Viene analizzato il comportamento di una massa di neve di 50.000 m³ rilasciata nei due canali. La lunghezza del deposito disponibile alla valanga viene ottenuta dai dati di campo riportati in Fig. 4 (lunghezze dell'ordine di 600 m). La larghezza media dei canali e la altezza del deposito sono stimati in 10 m e 8 m a partire dalle misurazioni eseguite sul bacino e dalle osservazioni sulla copertura vegetale. Nelle Figg. 14, 15, 16 e 17 sono riportati i risultati delle elaborazioni eseguite allo scopo di valutare l'ambito di variazione dei parametri fisici caratteristici delle valanghe ritenute estreme che possono verificarsi nel canale 5 della Val dei Spini. In Fig.14 sono indicate diverse configurazioni del deposito finale di una valanga di 50.000 m³ rilasciata dalla quota di circa 1850 m s.m.m. con le caratteristiche geometriche sopra indicate, in funzione di diversi valori dell'attrito sul fondo. Nei vari casi, b, c, d ed e, corrispondenti ad angoli di attrito sul fondo di 25°, 23°, 21° e 19°, l'angolo d'attrito nella zona del conoide viene mantenuto pari a quello della zona di scorrimento. Possono essere identificati di-

versi comportamenti. Nel caso di bassi valori dell'attrito (casi d, e) la massa appare in grado di raggiungere e superare la sezione di minima quota (fiume Noce) risalendo sul versante opposto. Le altezze massime del depo-

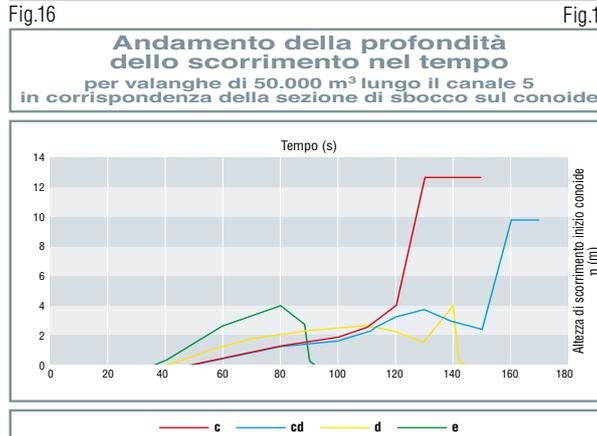
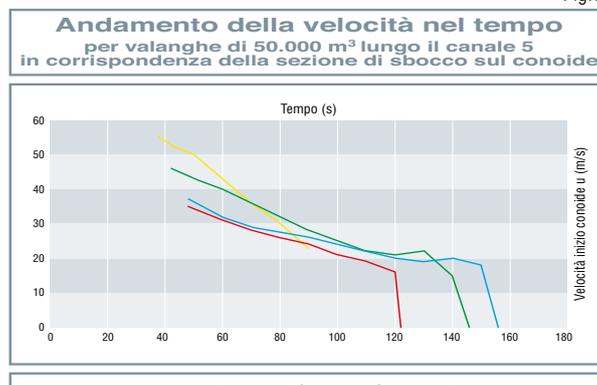
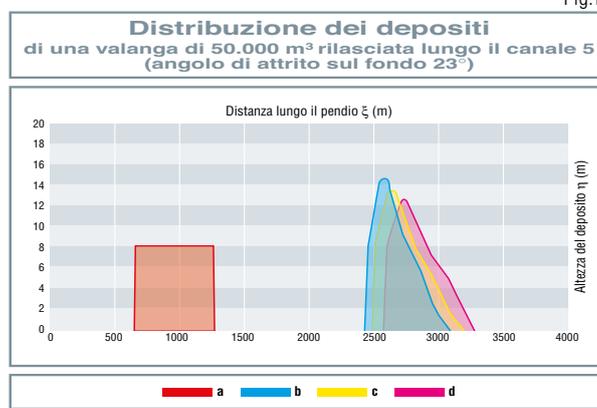
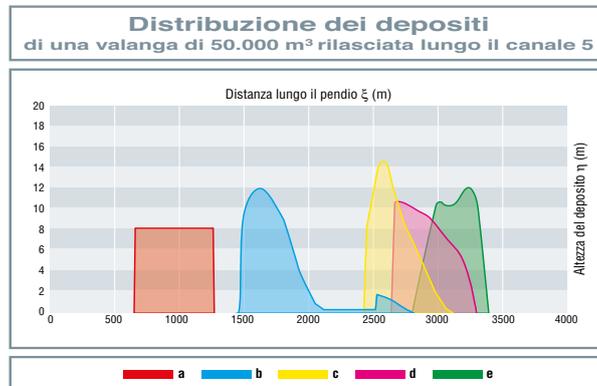




Fig.18a



Fig.18b

Fig. 18: Le zone di possibile intervento nella Val dei Spini per la riduzione rischio valanga per gli abitati di Cogolo e Celledizzo.

A pagina 39: Fig. 14: Variazione delle caratteristiche di resistenza al fondo mantenute costanti anche nella zona del conoide: a) deposito iniziale; b) angolo di attrito al fondo pari a 25°; c) 23°; d) 21°; e) 19°.

Fig. 15: Variazione delle caratteristiche di resistenza al fondo in corrispondenza del conoide: a) deposito iniziale; b) 23°; c) 21°; d) 19°.

Fig. 16 e 17: In corrispondenza della sezione di sbocco sul conoide nei diversi casi presentati in Fig.4 (lettera grande) e Fig.5 (lettera piccola).

sito sono dell'ordine di 10 - 12 m, le lunghezze dell'ordine di 600 - 700 m. In entrambi i casi il deposito non interessa, se non marginalmente, la zona dello sbocco sul conoide. Le velocità con cui la valanga attraversa la zona di sbocco sul conoide sono indicate in Fig. 16. Le massime velocità riportate corrispondono alla parte anteriore del fronte al quale è associata una altezza di scorrimento piuttosto esigua e tale da rendere poco significativa questa zona dal punto di vista fisico. Valori di velocità massima, fisicamente significativi, devono essere ritenuti quelli intorno ai 40 m/s. La massima altezza di scorrimento nella zona dello sbocco sul conoide (Fig. 17) è prossima a 4 m. La curva c di Fig. 14, corrispondente ad un valore dell'angolo d'attrito sul fondo pari a 23°, fornisce il massimo valore dell'altezza del deposito proprio nella zona dello sbocco sul conoide. Velocità ed altezze di scorrimento sono inferiori rispetto al caso precedente. Attrito sul fondo molto elevato produce

depositi come nel caso b di Fig. 14. La massa tende ad arrestarsi prima dello sbocco sul conoide e a dividersi in diversi depositi lungo il pendio. In Fig. 15 viene mostrato l'effetto di una riduzione di resistenza al fondo nella zona del conoide a partire dalle condizioni di attrito corrispondenti alla curva c di Fig. 14. Appare evidente una tendenza alla riduzione dell'altezza massima con allungamento del deposito ed allo spostamento verso valle dello stesso. L'entità di queste variazioni non è comunque tale da modificare, in modo significativo, le indicazioni date precedentemente. Considerazioni simili possono essere dedotte dalle elaborazioni effettuate nel Canale 9 ([5]).

POSSIBILI INTERVENTI SUL BACINO

Strutture attive del tipo paravalanghe

Lo studio di campo ha mostrato (Fig. 4) come gran parte dell'area del bacino al di sopra dei canali di accumulo debba ritenersi attiva dal punto di vista del rilascio di massa nevosa. Non può essere esclusa la partecipazione delle aree più elevate (fino alla quota di circa 2600 m). Indicazioni al riguardo sono state ottenute dai traccianti posti fino a quote intorno ai 2500 m s.m.m. e distribuiti, prima dell'inverno 1998-99, sull'intero fronte della valle. Le considerazioni suindicate portano a valutare l'estensione dell'area totale (Fig. 18) potenzialmente interessata dal rilascio in circa 40 ha (corrispondenti ad una superficie reale lungo il versante pari a circa 53 ha). L'angolo di inclinazione sull'orizzontale di tali aree è valutato intorno ai 40°. L'area relativa al canale 9 (Fig. 18), che se sistemata con opere paravalanghe metterebbe sostanzialmente in sicurezza la parte in sinistra orografica del

sito valanghivo, ha una superficie pari a circa 8 ha (corrispondenti ad una superficie reale lungo il versante pari a circa 10.5 ha). Il completamento delle opere di protezione dovrebbe prendere in considerazione la riforestazione di alcuni alvei (per esempio i canali 7 e 8 di Fig. 18) e di alcune aree di piccola estensione nella zona boscata, attualmente scoperte.

Strutture attive/passive del tipo "briglie a fessura"

L'ipotesi di intervento con questo tipo di strutture fa particolare riferimento al comportamento del sito valanghivo. La costruzione di opportuni sbarramenti (del tipo briglie a fessura) permetterebbe di assecondare la naturale propensione al deposito nei canali in quota limitando, nel contempo, gli effetti del distacco primaverile. La realizzazione di queste opere implica la costruzione di strutture atte all'accesso dei mezzi necessari. Tali strutture devono essere conservate in efficienza allo scopo di mantenere la loro funzionalità. Particolare attenzione deve essere posta ai problemi relativi al trasporto solido: gli sbarramenti devono essere in grado di smaltire il naturale trasporto solido o deve essere prevista la rimozione forzata. La necessaria attenzione deve essere, infine, posta nei mutati processi di scioglimento nivale. Dai sopralluoghi effettuati, un sito adatto ad accogliere questo tipo di strutture appare la confluenza tra il canale 1 ed il canale 5 (Fig. 18: zona A). Tale sito è di accesso relativamente facile dai prati di malga Borche (quota 1820 m s.m.m. circa) già raggiungibili attraverso una strada forestale. Le opere collocate in questa zona sarebbero in grado di regolare gli apporti valanghivi della parte in destra orografica del bacino. Questa modalità di intervento

appare, in via di principio, appropriata anche nel bacino in sinistra orografica ferme restando le molto maggiori difficoltà di accesso.

Strutture passive del tipo “valli deviatori”

Lo scopo di tali strutture è quello di orientare la valanga in uscita sul conoide verso le zone meno antropizzate. A tale fine appare opportuno forzare la valanga che scorra lungo il canale 5 ad allontanarsi dalla naturale pendenza del conoide che, seguendo l'alveo del rivo della Val dei Spini, tende ad avvicinare il centro storico dell'abitato di Cogolo. Questo può essere ottenuto progettando un vallo in sponda destra (Fig. 18: Zona B) dimensionato tenendo in considerazione le caratteristiche dinamiche della valanga indicate precedentemente. Appare altresì necessario, a causa delle potenzialmente elevate velocità di scorrimento, limitare l'angolo di incidenza del vallo rispetto alla traiettoria della valanga. Tale vallo deve essere, inoltre, in grado di contenere, totalmente o almeno parzialmente, la valanga di progetto che scorra nel canale 9 in sinistra orografica. Particolare attenzione deve essere posta, in questo caso, all'angolo di incidenza del canale 9 rispetto al canale 5 in corrispondenza della confluenza. La particolare conformazione planoaltimetrica del canale 9 in prossimità della confluenza (Fig. 18) non preclude la possibilità di una fuoriuscita parziale della massa valanghiva in corrispondenza della curva verso destra. Tale evento creerebbe condizioni di pericolo per zone del conoide più prossime all'abitato di Celledizzo. Anche in tale caso la costruzione di un vallo in sponda sinistra, (Fig. 18: zona B), permetterebbe di forzare la massa verso le zone meno

antropizzate. Il dimensionamento dei valli deviatori di destra e di sinistra orografica deve tenere inoltre in conto la possibilità che si verificano eventi contemporanei, o quasi contemporanei, nei due canali. Le conseguenze nella zona del conoide di una successione ravvicinata di eventi dipende in modo fondamentale dai singoli eventi, potendo questi stessi presentarsi con modalità molto differenti (come evidenziato nella analisi matematico-numerica).

Altre strutture passive di protezione

La parte più a valle del conoide appare attualmente antropizzata, anche se non densamente, senza soluzione di continuità. La progettazione dei valli deviatori dovrebbe essere perciò associata alla progettazione di opere a protezione locale come cunei deviatori. Anche l'uso di cumuli dissipatori di energia, interposti tra i valli e le strutture, possono aumentare la sicurezza diminuendo la velocità della valanga di neve densa, forzandola ad un più lungo percorso e ad una maggiore dispersione planimetrica dell'accumulo (deve comunque essere osservato che il funzionamento di tali strutture non è stato ancora completamente validato). L'eventuale uso della segnaletica a protezione dei centri abitati e della strada deve tener conto dell'esiguo tempo di allarme che il bacino concede, valutabile mediante la simulazione matematico-numerica, nell'ordine di 1-2 minuti.

CONCLUSIONI

Il presente studio è stato realizzato nel periodo di due stagioni invernali tra il 1997 ed il 1999 ed è in buona parte basato sui dati di campo raccolti durante questo periodo, oltre che sugli esigui ed incompleti dati storici a disposi-

zione. Si ritiene pertanto importante continuare nella raccolta dei dati di campo, proseguendo nella osservazione puntuale del comportamento del bacino e nel mantenimento in buona efficienza delle strumentazioni già installate. Una maggiore comprensione del comportamento del sito valanghivo si confida possa essere derivata dalla attuale fase di studio che prevede una approfondita analisi dendrocronologica associata alla applicazione di modellazioni matematico-numeriche bidimensionali. Anche questa fase prevede la preziosa collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale e l'Ufficio Neve, Valanghe e Meteorologia della Provincia Autonoma di Trento.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto con i fondi previsti dalla convenzione stipulata tra la Provincia Autonoma di Trento, Ufficio Neve e Valanghe, ed il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Trento, dal titolo “Studio dei Fenomeni Valanghivi della Valle dei Spini (Comune di Pejo)”, prot. N. 3579/97-C33-N. Si ritiene inoltre doveroso riconoscere l'importanza della collaborazione offerta dal personale dell'Ufficio Neve, Valanghe e Meteorologia della P.A.T. ed in particolare dal p.i. Mauro Mazzola, oltre che dal personale della Commissione Valanghe del Comune di Pejo e del suo presidente geom. Rinaldo Monegatti; dagli ingg. Domenico Sguerso e Paolo Zatelli, dal dott. Marco Ciolli, dal personale del Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale; dal dott. Enrico Bertolazzi del Dipartimento di Meccanica Strutturale; dal dott. Gabriele Stoppa docente presso l'Istituto di Statistica e Ricerca Operativa dell'Università di Trento.

Bibliografia

- [1] Hutter, k., Siegel, M., Savage, S.B., Nohguchi, Y., Two-dimensional spreading of a granular avalanche down an inclined plane, Part I Theory, 1993, Acta Mechanica 100, 37-68.
- [2] Hutter, k., Koch, T., Pluess, C., Savage, S.B., The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout, Part II Experiments, 1995, Acta Mechanica 109, 127-165.
- [3] Iverson, R. M., 1997, The Physics of debris flows, Cascades Volcano Observatory, U.S. Geological Survey, Vancouver, Washington.
- [4] Scotton P., 1998, Studio di fenomeni valanghivi della Valle dei Spini (Comune di Pejo, TN), 1° Rapporto Tecnico, prot. n. 3579/97-C33-N convenzione Università di Trento e Provincia Autonoma di Trento.
- [5] Scotton, P., 1999, Studio dei Fenomeni Valanghivi della Valle dei Spini (Comune di Pejo, Trento), Relazione Finale convenzione Università di Trento e Provincia Autonoma di Trento prot. n. 3579/97-C33-N.
- [6] Rilievi della Commissione Valanghe di Pejo del 1, 3, 8, 18, 23, 29 gennaio, del 6, 13 febbraio e del 14, 16 aprile 1998.
- [6.1] Rilievi effettuati in collaborazione con il personale dell'Ufficio Neve e Valanghe della Provincia Autonoma di Trento.
- [7] Scotton, P., Un modello matematico e numerico 1D, per le valanghe di neve densa, Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, in elaborazione.