

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XXIV CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA

Napoli, 22-24 giugno 2011



INNOVAZIONE TECNOLOGICA NELL'INGEGNERIA GEOTECNICA

VOLUME 2

EDIZIONI AGI

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

**XXIV CONVEGNO NAZIONALE
DI GEOTECNICA**

Napoli, 22-24 giugno 2011

**INNOVAZIONE TECNOLOGICA
NELL'INGEGNERIA GEOTECNICA**

VOLUME 2

EDIZIONI AGI

Copyright by Associazione Geotecnica Italiana – Roma

I diritti di traduzione e di adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.
È inoltre vietata la riproduzione, anche parziale, compresa la fotocopia, anche ad uso interno o didattico, non autorizzata.

Opera completa 2 volumi: ISBN 978 88 97517 00 9

Volume: 1 ISBN 978 88 97517 02 3

Volume: 2 ISBN 978 88 97517 04 7

Stampato nello Stabilimento Litograf Editor - Città di Castello (PG)

APPLICAZIONE DI MODELLAZIONI NUMERICHE ALLA FRANA DI MONT DE LA SAXE (Courmayeur - AO)

Broccolato M.* , Cancelli P.** , Castellanza R.*** , Crosta G.B.*** , Frattini P.*** , Tamburini A.****

* Regione Autonoma ValleD'Aosta, Assessorato OO.PP. Difesa del Suolo e Edilizia Residenziale Pubblica, Dip. Difesa del Suolo e Risorse Idriche, Servizio Geologico, Quart (AO), Italy

** Studio Cancelli Associato, via Sansovino, 23 - 20133 Milano, Italy

*** Dip. Scienze Geologiche e Geotecnologie, Milano Italy

**** IMAGEO Srl, Torino, Italy

SOMMARIO

Il versante nord-occidentale del Mont de la Saxe (Courmayeur, AO) è interessato da un fenomeno franoso che è caratterizzato da una notevole attività ed evoluzione nell'ultimo decennio. Il corpo di frana coinvolge un ammasso di scisti argillosi fortemente tettonizzati con profondità mediamente ubicata a 60-70m da p.c per un volume complessivo di ca $8 * 10^6$ m³. Il presente contributo presenta gli esiti di alcune analisi numeriche eseguite con lo scopo di valutare le condizioni di stabilità del versante e di stimare le potenziali aree di invasione dell'ammasso in frana.

Le analisi di stabilità sono state effettuate agli Elementi Finiti, in condizioni piane e tridimensionali, modellando il comportamento dell'ammasso in frana con modelli costitutivi tradizionali e modelli avanzati quali il "Jointed Rock".

Le analisi di espansione sono state effettuate mediante un modello agli elementi finiti lagrangiani, a cui vengono affiancati i risultati ottenuti dall'applicazione dei più tradizionali metodi empirico-statistici.

Parole Chiave: analisi numeriche, stabilità dei versanti, caratterizzazione geomeccanica.

1 INTRODUZIONE

La presenza di un preoccupante fenomeno di dissesto sul versante nordoccidentale del Mont de la Saxe, in comune di Courmayeur (AO), ha comportato la necessità di eseguire successive campagne di studio, monitoraggio ed indagine, allo scopo di approfondirne il quadro conoscitivo. Con particolare riferimento alle attività di analisi numerica, sono state eseguite:

- analisi di filtrazione, a scala di versante, in modo da ricostruire la distribuzione dei livelli piezometrici;
- analisi di stabilità, bi e tri-dimensionali, eseguite a partire dalle condizioni piezometriche definite al punto precedente;
- analisi di espansione, per la definizione delle aree di invasione della frana;
- analisi degli effetti conseguenti lo sbarramento dell'alveo della Dora di Ferret da parte del materiale franato: studio dei fenomeni di brecciatura e di propagazione dell'onda di piena da Dam Break.

Data la maggiore attinenza al tema di interesse vengono qui sinteticamente presentati gli esiti delle sole analisi di stabilità e di espansione del materiale in frana.

2 INQUADRAMENTO DEL FENOMENO

Il versante nordoccidentale del Mont de la Saxe è situato all'imbocco della val Ferret e sovrasta l'abitato di Entreves. L'area interessata dal fenomeno franoso è valutabile in un intervallo di 120'000-170.000 m² circa, con una larghezza massima di 350 m ed una lunghezza massima di 500 m, per un volume complessivo pari a circa $8 * 10^6$ m³. Alla quota di 1800 m s.l.m. è localizzata la scarpata principale del corpo di frana, costituita da una parete di scisti argillosi disarticolati. Nella zona a monte di questa scarpata è presente un altro ammasso roccioso disarticolato, anch'esso isolato da fratture beanti e interpretabile con una propagazione retrogressiva della superficie di movimento. Lo svincolo laterale a nord del corpo di frana è costituito da una scarpata alla cui base si individua un colata di detrito, mentre quello a sud è stato individuato in corrispondenza di un'area cataclata, interessata da frequenti fenomeni di risorgenza. I dati di spostamento profondo (inclinometri manuali ed automatici) hanno indicato la presenza di una superficie di movimento mediamente ubicata a 60-70m da p.c. (Fig. 1).

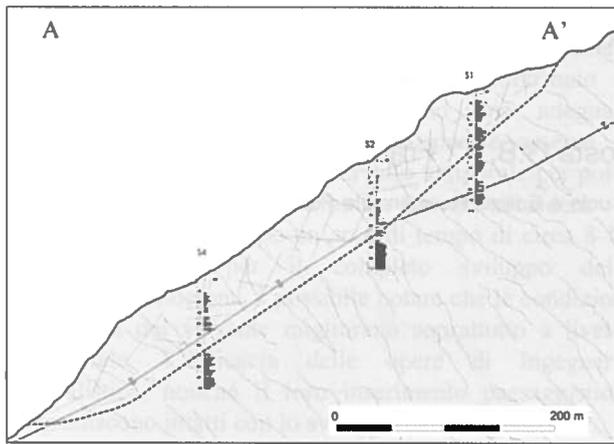


Figura 1. Sezione rappresentativa del dissesto, con i profili di RQD dei sondaggi e linea di rottura desunta dalle misure inclinometriche.

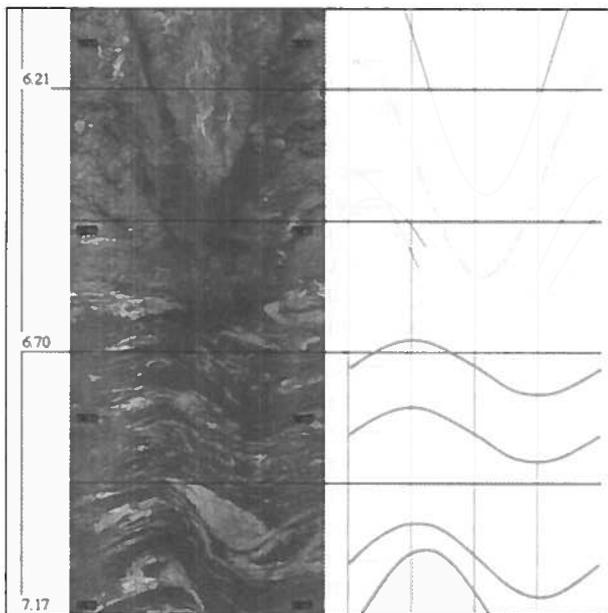


Figura 2. Immagini ottenute dalla sonda televisiva (a sx) ed interpretazione delle discontinuità rilevate (a dx).

3 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

La caratterizzazione geomeccanica del versante è stata effettuata mediante:

- rilievi strutturali e geomeccanici, eseguiti in corrispondenza degli affioramenti rocciosi;
- rilievi geostutturali in foro con sonda televisiva strumentata; (Fig. 2)
- esame delle carote di sondaggi a carotaggio continuo, con profilo verticale di RQD;
- prove in foro, dilatometriche e Lefranc.

Dai risultati è stato possibile ricavare alcune preziose informazioni sulle condizioni del versante. L'ammasso roccioso costituente il versante presenta condizioni di intensa fratturazione (RQD variabile da 0 a 40%) per tutto lo spessore in movimento, ed in modo particolare nella parte sommitale del corpo di frana.

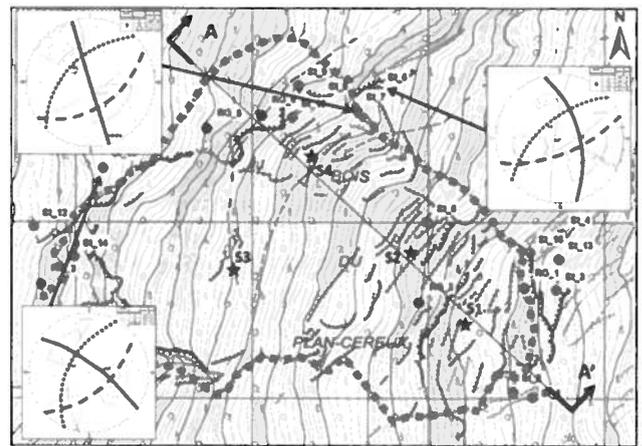


Figura 3. Planimetria del sito ed indicazione di tre proiezioni stereografiche (emisfero inferiore), con indicazione della scistosità Sc (linea tratteggiata), di $K1$ (linea puntinata) e di $K2$ (linea continua).

Anche al di sotto della superficie di rottura le condizioni dell'ammasso appaiono differenti nelle diverse parti del versante: da buone ad eccellenti nelle parti centrale ed inferiore (RQD prossimo al 100%) a scadente e molto scadente nell'area di nicchia (RQD da 0 a 40%).

Le condizioni di fratturazione sono riconducibili principalmente ai piani di scistosità (Sc), i quali sono generalmente disposti a reggipoggio o subverticali e pertanto svincolano l'ammasso da monte.

Sono però presenti altre famiglie di discontinuità, due delle quali sono state ritenute di particolare interesse per via della loro capacità di governare l'equilibrio del versante: l'una ($K1$), avendo giacitura subparallela al pendio, favorisce lo scivolamento e costituisce probabilmente gran parte della superficie di rottura, l'altra ($K2$), libera longitudinalmente comparti di versante, e ne favorisce lo svincolo laterale. (Fig. 3).

Il ruolo giocato dai sistemi di discontinuità presenti nel versante è evidentemente non trascurabile, per questo motivo l'ammasso è stato caratterizzato sia come mezzo continuo equivalente, ovvero descritto in termini di parametri medi dell'ammasso, sia come mezzo discontinuo equivalente, ovvero descritto dai parametri delle tre famiglie principali (Sc , $K1$ e $K2$).

3 ANALISI DI STABILITÀ

Al fine di effettuare la valutazione della stabilità del versante interessato dal fenomeno franoso si è deciso di procedere eseguendo analisi numeriche bidimensionali e tridimensionali; il primo obiettivo che si è voluto raggiungere è stata la determinazione per via numerica della superficie di rottura. I risultati ottenuti sono stati confrontati con la superficie di scorrimento reale ricostruita sulla base dei dati di monitoraggio. In particolare è stato svolto il seguente percorso:

- analisi numeriche bidimensionali preliminari sulla sezione di massima pendenza utilizzando il metodo dell'equilibrio limite ed il metodo degli elementi finiti;

- analisi numeriche tridimensionali utilizzando il modello costitutivo di Mohr-Coulomb con progressiva riduzione dei parametri di resistenza;
- analisi numeriche tridimensionali utilizzando il modello costitutivo denominato Jointed Rock anch'esso con progressiva riduzione dei parametri di resistenza.

Partendo da modelli semplici con geometrie semplificate bidimensionali, ed arrivando ad utilizzare geometrie complesse tridimensionali con modelli avanzati per la descrizione delle proprietà meccaniche, è stata effettuata la validazione e la calibrazione del modello numerico. È stato così possibile definire lo strumento più adeguato per valutare la stabilità del versante nelle condizioni attuali ed in relazione ad eventuali interventi di stabilizzazione. Il ricorso alle analisi 3D è stato dettato dalla tridimensionalità intrinseca del problema nonché dalla mole di dati di monitoraggio acquisiti direttamente in tridimensionale (ad es. i dati forniti dalla stazione radar SAR). Per le analisi riportate in questa sezione è stata considerata la condizione estiva della falda, ritenuta la più gravosa. Tutte le analisi numeriche presentate sono state eseguite utilizzando il codice FEM Midas GTS.

3.1 Analisi bidimensionali

Dopo aver eseguito delle analisi bidimensionali preliminari con il metodo dell'equilibrio limite, le quali hanno permesso di ottenere una validazione di massima dei parametri geomeccanici ottenuti dalla campagna sperimentale effettuata, si è passati ad analisi ad elementi finiti, portando a rottura il pendio tramite una progressiva riduzione dei parametri del criterio di Mohr-Coulomb ($c-\phi'$ reduction). È stata scelta la sezione di massima pendenza e dopo aver definito il modello numerico (mesh di Fig. 4a) è stata individuata la superficie di rottura evidenziata dalle deformazioni plastiche e dal modulo degli spostamenti (Fig. 4b e 4c); dal confronto con la linea di rottura ricostruita dai dati di monitoraggio riportata in Fig. 1, si riscontra un sostanziale accordo con la superficie prevista dal modello. Si fa presente che le analisi 2D possono essere considerate analisi predittive poiché non è stata imposta alcuna superficie di rottura

3.2 Analisi tridimensionali con modello Mohr Coulomb

Il primo passo per effettuare un'adeguata analisi tridimensionale riguarda la ricostruzione dettagliata della geometria dell'area in oggetto. È necessario quindi partendo dalla topografia (DTM) ricostruire la superficie topografica, definire nello spazio le superfici stratigrafiche e delle macrodiscontinuità presenti in sito che si intende modellare, definire la superficie della falda e quindi passare alla creazione dei volumi solidi del dominio sufficientemente rappresentativo del problema al fine di minimizzare gli effetti di bordo. In Fig. 5a sono mostrati i solidi utilizzati per generare la mesh tridimensionale utilizzata nelle analisi riportate in Fig. 6a.

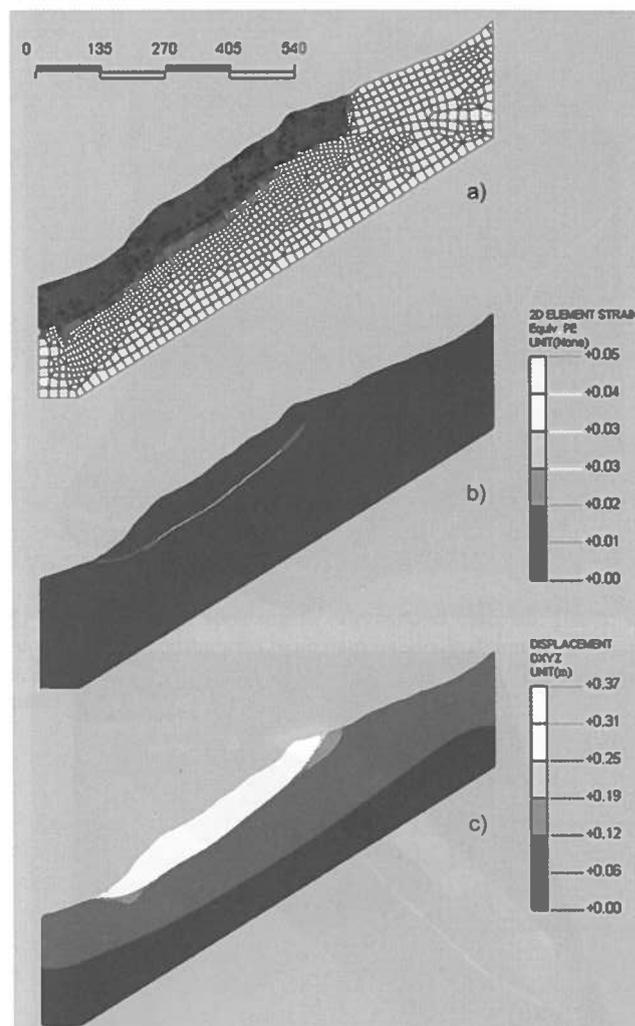


Figura 4 a) mesh utilizzata; b) deformazioni plastiche; c) campo degli spostamenti (modulo)

La mesh più fitta riportata in Figura 6a, che si estende per una profondità di circa 100m dalla superficie topografica, rappresenta il volume di elementi finiti ai quali è stata applicata la progressiva riduzione dei parametri di resistenza. Pertanto essendo la massima profondità della superficie di scorrimento rilevata di circa 70m, si è inteso fare delle analisi (parzialmente) previsionali della superficie di scorrimento, in particolare per quanto concerne la profondità ed il piede della frana.

L'unico vincolo significativo inserito nel modello è il limite destro; tale vincolo è stato inserito sulla base delle evidenze geomorfologiche che evidenziano la presenza di una notevole marcata discontinuità.

Una prima serie di analisi è stata effettuata utilizzando come per le analisi 2D il modello costitutivo elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb adottando l'algoritmo $c-\phi'$ reduction.

La superficie ottenuta, evidenziata dalle deformazioni plastiche, è riportata in Fig. 5b dove è posto in evidenza il discreto accordo con la superficie reale di scorrimento.

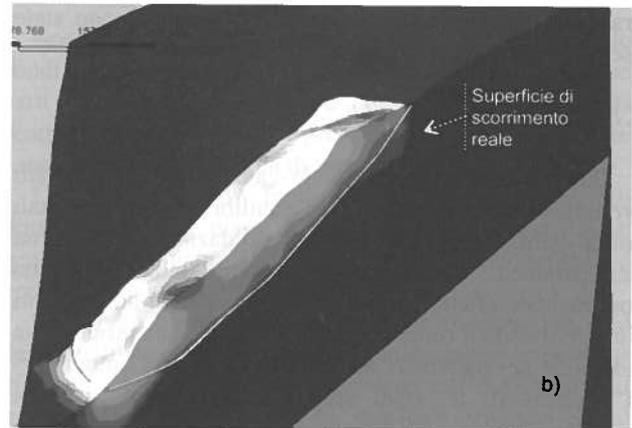
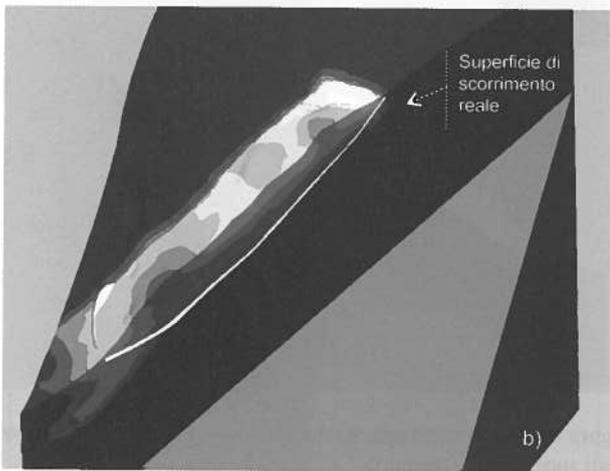
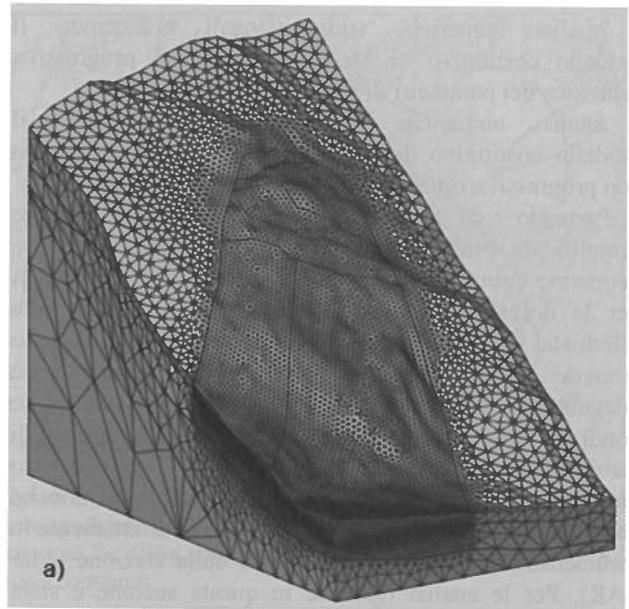
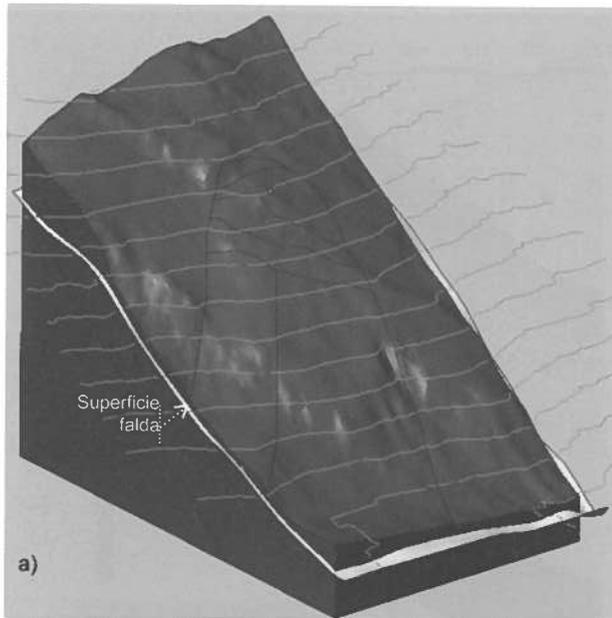


Figura 5: a) solidi ricostruiti per la modellazione b) confronto tra le deformazioni plastiche e la superficie di scorrimento reale.

Figura 6: a) mesh b) def. plastiche vs. sup. di rottura reale

3.3 Analisi tridimensionali con modello Jointed Rock

Non appena il grado di modellazione geometrica è stato ritenuto più che soddisfacente, si è deciso di procedere utilizzando un modello costitutivo avanzato, denominato Jointed Rock (JR). Esso consente di descrivere sistemi di ammassi rocciosi il cui comportamento meccanico è condizionato da discontinuità. Sulla base dei rilievi geomeccanici sono state individuate tre famiglie di discontinuità lungo le quali è stato possibile assegnare delle specifiche proprietà meccaniche in termini di coesione ed angolo d'attrito. Utilizzando una formulazione basata sul mezzo continuo è possibile descrivere il comportamento di un ammasso roccioso discontinuo. Anche in questo caso è stata sviluppata una procedura che permette di ridurre progressivamente i parametri di resistenza delle singole discontinuità fino al raggiungimento della rottura del versante individuabile in corrispondenza della perdita di equilibrio globale del sistema.

Il maggior onere richiesto per la calibrazione del maggior numero di parametri ha però permesso di riprodurre in modo ottimale la superficie di scorrimento visualizzabile dall'estensione della zona plasticizzata (Fig. 6b). Analogamente, il campo degli spostamenti 3D normalizzati, ottenuti con il modello JR (Fig. 7b), riproduce molto bene il campo degli spostamenti normalizzati misurati con il sistema SAR (Fig. 7a).

3.4 Risultati delle analisi

Il confronto tra i risultati dei diversi set di analisi ha consentito di riconoscere l'estrema importanza della tridimensionalità del problema in esame: le analisi piane, non considerando gli effetti di bordo, tendono a sottostimare in maniera significativa la resistenza mobilitata. Sono state applicate diverse procedure di riduzione della resistenza in modo da valutare gli eventuali effetti della differente natura della degradazione: decadimento della sola coesione, della sola componente frizionale o di entrambi.

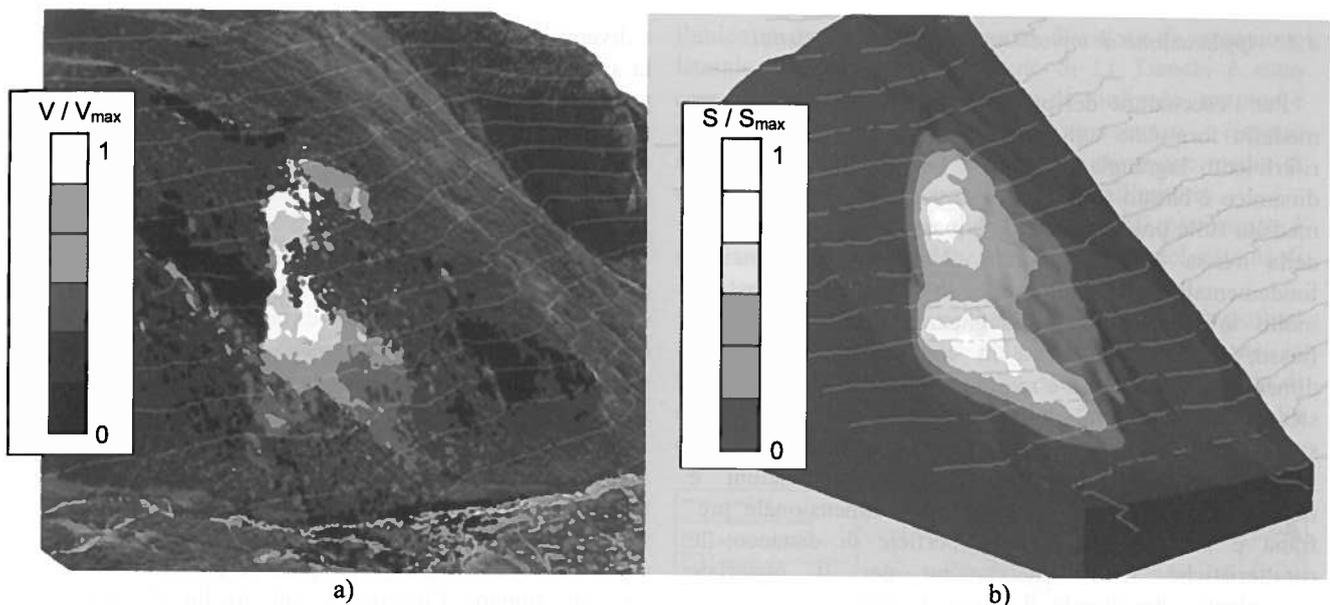


Figura 7: a) Campo degli spostamenti normalizzati misurati (SAR); b) campo degli spostamenti normalizzati calcolati. [Nota: tale confronto non è significativo in termini quantitativi giacché pone a confronto gli spostamenti in un dato intervallo di tempo con quelli calcolati per un dato grado di degradazione dei parametri geotecnici. Esso serve piuttosto a mostrare la capacità del modello numerico di riprodurre la distribuzione spaziale del campo degli spostamenti misurati].

Il confronto tra i risultati non ha condotto ad apprezzabili differenze di risultato.

Infine, di particolare interesse è risultato il confronto tra i risultati della modellazione con parametri medi dell'ammasso (in questo caso il modello di Mohr Coulomb) e quella di un mezzo che può presentare scorrimenti solo lungo le tre discontinuità predefinite (modello JR). Il confronto tra i risultati ha condotto ad ottenere un rapporto tra le resistenze mobilitate a rottura anche dell'ordine di 2:1. Tale risultato si giustifica considerando il maggior grado di iperstaticità del modello JR che non consente rottura per superamento della resistenza del materiale intatto in direzioni differenti a quelle delle tre famiglie di giunti inserite.

4 VALUTAZIONE DELLE AREE DI INVASIONE

La definizione delle aree di espansione o di invasione di frane ad elevata mobilità è un requisito fondamentale per poter arrivare a una zonazione della suscettibilità, pericolosità e rischio. In linea generale i metodi attualmente esistenti per la previsione dell'area d'invasione delle frane possono essere raggruppati in quattro grandi categorie in funzione dei criteri e del tipo di approccio alla base della loro formulazione:

A. Metodi statistici: basati sull'analisi statistica, tipicamente mediante regressioni lineari di dati di frane avvenute nel passato (Scheidegger, 1973; Li Tianchi, 1983).

B. Metodi statistico – deterministici: producono analisi statistiche corrette in base a diversi criteri non statistici (Dade & Huppert, 1998).

C. Metodi statistico – morfologici: procedono ad un'analisi statistica, analogamente al gruppo precedente, avendo però a priori suddiviso la massa di dati in base alla morfologia del terreno (Nicoletti & Sorriso Valvo, 1991;

Corominas, 1996).

D. Metodi deterministici: basati su modelli reologici che simulano il movimento del fenomeno gravitativo riproducendone matematicamente le condizioni (Hung, 1995; McDougall and Hung, 2005; Chen e Lee, 2000; Crosta et al., 2003, 2004, 2005, 2006; Mangeney et al., 2005; Roddeman, 2002).

I metodi statistici, appartenenti ai primi tre gruppi, sono quasi sempre applicabili data la loro semplicità, la necessità di pochi dati di ingresso, in genere facilmente ricavabili, e la presenza di casi analoghi (cataloghi di frane) su cui tarare il modello e/o confrontare i risultati ottenuti. In generale, tali metodi consentono di ricavare la corsa assiale della frana a partire dal rapporto H/L, ovvero il rapporto tra la distanza verticale e la distanza orizzontale tra la parte più alta della zona di distacco e la parte più avanzata del deposito di frana.

Per contro, tali metodi non consentono di tener conto della topografia della potenziale zona di espansione dell'accumulo di frana. Inoltre, mentre tutti i metodi elencati forniscono il valore della corsa assiale, solo pochi autori propongono formule utilizzabili per determinare l'espansione laterale. Al fine di ottenere una zonazione spaziale completa, consentendo la ripetibilità delle analisi e dei risultati, eliminando molte delle incertezze proprie dei metodi empirici, si possono impiegare modelli matematici quasi 3D o completamente 3D. Tali modelli sono stati sviluppati in ambito di ricerca nell'ultimo decennio e si basano su diversi approcci numerici e su diverse schematizzazioni reologiche.

Per tali ragioni si è deciso di integrare l'approccio empirico-statistico con quello modellistico ed adottare come risultato l'involuppo delle aree di invasione ottenute con i diversi approcci utilizzati.

4.1 Applicazione di metodi numerico-deterministici

Per l'esecuzione del presente studio si è utilizzato un modello formulato agli elementi finiti in un sistema di riferimento lagrangiano (Chen e Lee, 2000). Il modello dinamico è basato sulla risoluzione quasi tridimensionale, mediata sulla profondità, delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto. Le assunzioni fondamentali del modello sono: lo spessore del flusso è molto inferiore alla sua lunghezza nella direzione di flusso; le particelle sono in contatto tra loro e la dimensione delle stesse è molto più piccola dello spessore stesso; la curvatura della topografia è limitata; lo spostamento della massa avviene per traslazione.

Ai fini della realizzazione delle simulazioni è necessario descrivere: la topografia tridimensionale pre-frana e la geometria della superficie di distacco; le caratteristiche fisico meccaniche per il materiale equivalente, che simula il corpo di frana, e che viene descritto tramite il modello reologico prescelto. Nel caso di simulazioni realizzate a scopo previsionale, in assenza di eventi pregressi nello stesso sito e nei materiali coinvolti, la scelta del modello reologico e dei suoi parametri può essere compiuta sulla base di osservazioni fatte per frane (valanghe di roccia e detrito) realizzate in materiali simili e in ambienti con caratteristiche comparabili. Al contrario, nel caso di analisi a ritroso di eventi avvenuti o attesi in località ove fenomeni simili si siano già realizzati, i parametri possono essere ottenuti tramite calibrazione del modello. La calibrazione può avvenire in base a: distribuzione finale dell'accumulo e degli spessori lungo il percorso e finali; tracce di transito del materiale, valori misurati o stimati di velocità, durata totale dell'evento, energia rilasciata e sua distribuzione nel tempo. Per il caso di studio, non avendo a disposizione osservazioni di eventi pregressi, è stato necessario stimare le caratteristiche medie del materiale. A tale scopo si sono scelti 94 eventi storici avvenuti in ambienti non glacializzati e non vulcanici. Le litologie coinvolte in questi casi sono di vario tipo ma agli scopi dello studio, e con lo scopo di attribuire delle proprietà medie, i 94 casi sono ritenuti compatibili. Per i volumi in gioco (ca. 8 Mm³) il valore medio del rapporto H/L (massimo dislivello/massima lunghezza percorsa proiettata sull'orizzontale) assume un valor medio pari a circa 20°. Tale valore medio è stato quindi prescelto per descrivere l'angolo d'attrito basale del materiale (ossia lungo la superficie di scorrimento o topografia). L'assunzione è che il materiale si comporti come un materiale frizionale e prevalentemente asciutto, in base alle osservazioni del livello di falda entro il pendio e dello stato di fratturazione dell'ammasso, con un angolo d'attrito interno pari a 35°. Le superfici topografiche pre- e post-frana sono state ottenute ricampionando un rilievo LIDAR (1 m * 1m) con una spaziatura finale di 5 m * 5 m. La massa in frana è stata discretizzata tramite una mesh quadrangolare composta da ca. 700 elementi (colonne). Le simulazioni offrono la possibilità di analizzare risultati e di estrarre informazioni utili quali il limite della frana a diversi istanti (Fig. 8), il massimo di espansione, il campo di velocità

a diversi istanti, lo spessore della massa durante il moto e in accumulo finale. La geometria finale dell'accumulo e il percorso seguito dalla stessa risultano essere chiaramente influenzati dalla topografia locale. L'espandimento si realizza prevalentemente verso valle, controllato dal forte gradiente topografico e dal progressivo allargamento della valle in questa direzione.

Lo spessore massimo dell'accumulo (Fig. 9) ammonta a circa 40 m, la risalita sul versante opposto a quello di frana è controllata dalla geometria locale e dalla iniziale direzione di movimento forzata dalla geometria della superficie di rottura. La velocità massima viene raggiunta nella parte mediana, ed è pari a ca. 48 m s⁻¹.

Le carte degli spessori e delle velocità massime (Fig. 10) lungo l'intero percorso consentono di: visualizzare l'intera area di transito, più estesa dell'area di accumulo finale, ed il potenziale distruttivo della massa in movimento; visualizzare la variazione di spessore presso il fronte, al fine di stimare l'incertezza sul livello di danni in prossimità del fronte stesso; calcolare un valore per la

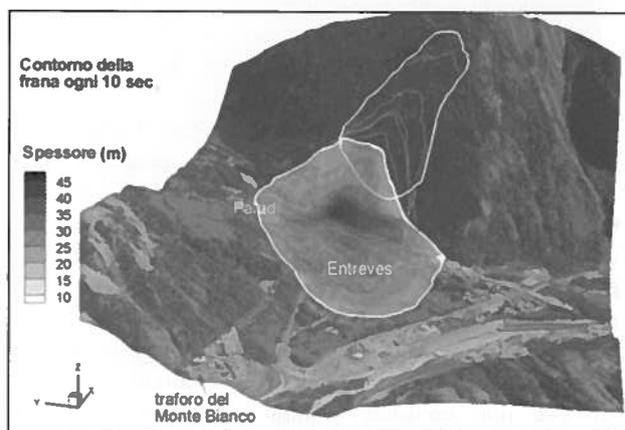


Fig. 8. Espandimento della frana in diversi istanti e spessore dell'accumulo finale in vista prospettica.

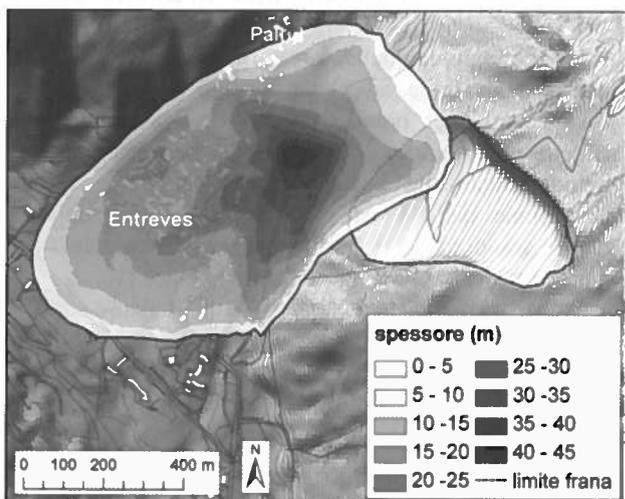


Fig. 9. Spessore dell'accumulo e topografia risultante dal potenziale collasso della frana.

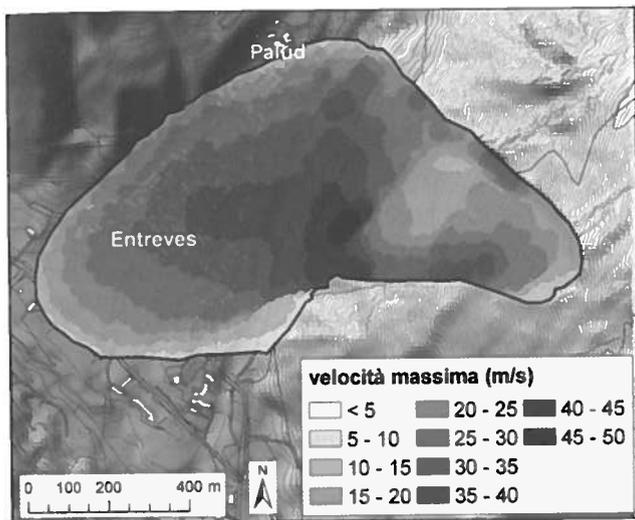


Fig. 10. Massima velocità modellata lungo il percorso della frana

forza di impatto; stimare la geometria dello sbarramento naturale e la profondità massima di un possibile invaso a monte dello stesso da utilizzare per la formulazione e analisi dello scenario di brecciatura della sbarramento naturale; individuare la geometria del nuovo scaricatore della Val Ferret a seguito della deposizione.

4.2 Applicazione di metodi empirico-statistici

Nel caso di studio la morfologia dell'eventuale accumulo di frana è fortemente condizionata dalla morfologia del fondovalle, ed in particolare:

- dalla limitata ampiezza della valle lungo la direzione media di movimento ipotizzata
- dall'elevata inclinazione media dell'alveo della Dora di Val Ferret (circa 7°) ai piedi del versante nella zona di potenziale espansione dell'accumulo di frana.

Si è pertanto deciso di utilizzare, tra tutte le correlazioni disponibili in letteratura, quelle che consentivano di tener conto della morfologia.

Per quanto riguarda il primo aspetto, l'impatto con il versante opposto in caso di caduta potrebbe determinare la formazione di un deposito a T (caso C di Nicoletti & Sorriso Valvo, 1991), tipico di frane con limitata mobilità dovuta alla presenza di ostacoli lungo il percorso. Tale aspetto viene preso in considerazione da Corominas (1996), Nicoletti e Sorriso-Valvo (1991) e, in modo indiretto, da Dade & Huppert (1998). Per tale ragione sono state utilizzate le correlazioni proposte dagli autori citati, come si dirà meglio nel seguito.

E' stato inoltre utilizzato l'approccio proposto da Li Tianchi (1983) poiché è l'unico a fornire delle correlazioni tra volume di frana ed espansione laterale ovvero ampiezza del deposito in fondovalle misurata lungo la perpendicolare alla direzione media di movimento ipotizzata. Poiché l'approccio proposto da Li Tianchi non tiene conto dell'inclinazione del fondovalle ai piedi del versante, che nel caso specifico non è affatto trascurabile, per la distribuzione del materiale in fondovalle ci si è affidati all'approccio modellistico,

l'unico in grado di tenerne conto. Il valore di espansione laterale ottenuto con la formula di Li Tianchi è stato comunque utilizzato come valore di confronto, ma non è stato applicato in modo simmetrico rispetto all'intersezione tra l'asse vallivo e la direzione media di movimento ipotizzata, come suggerito dall'autore.

Per quanto riguarda la direzione media di movimento, è stata assunta quella evidenziata dai risultati del sistema di monitoraggio topografico.

In Figura 11 viene riportato l'involuppo dei risultati ottenuti dall'applicazione delle formule pubblicate in letteratura e quello del modello deterministico. L'area di espansione potenziale proposta è quella ottenuta dalla combinazione dei due poligoni.

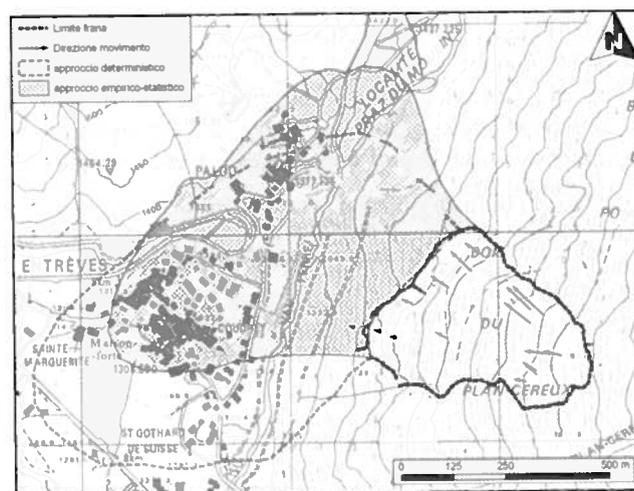


Fig. 11. Confronto tra i risultati delle due differenti metodologie: modellazione numerica (linea tratteggiata) e metodi empirici (linea continua, area retinata).

5 CONCLUSIONI

Con riferimento alla frana in esame, la memoria ha presentato due diverse applicazioni di tecniche di modellazione avanzata, entrambe confrontate con metodologie più tradizionali.

Per quanto riguarda le analisi di stabilità, le modellazioni eseguite hanno consentito di tenere conto sia della tridimensionalità del problema, sia della presenza di famiglie di discontinuità, consentendo di replicare in modo più che soddisfacente i cinematismi osservati mediante monitoraggio. Per contro deve rilevarsi l'oggettiva onerosità di una modellazione 3D con riferimento ad esigenze di operatività, più che di ricerca, in problemi fortemente non lineari. Per tali applicazioni il ricorso a drastiche semplificazioni (mesh poco raffinata, modelli costitutivi semplici, criteri di convergenza poco restrittivi ecc.) conducono facilmente al raggiungimento di risultati inadeguati.

Per quanto riguarda le analisi di espansione, la modellazione eseguita ha consentito di superare tutte le tradizionali limitazioni connesse con il ricorso ai metodi empirico-statistici. Tuttavia deve rilevarsi come per il modello in esame non esista la possibilità di determinare i

parametri reologici mediante indagine diretta. Ai fini previsionali i parametri potranno ottenersi solo da letteratura, per casi analoghi, oppure mediante analisi statistica di angoli d'attrito apparenti per eventi osservati.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'Ing. Danilo Trapasso per il prezioso aiuto fornito per l'esecuzione delle analisi di stabilità.

BIBLIOGRAFIA

- Chen, H. & Lee, C. F., 2000. *Numerical simulation of debris flows*. Can. Geotech. J., 37 (1), 146 -160.
- Chen, H., Crosta, G. B. & Lee, C. F., 2006. *Erosional effects on runout of fast landslides, debris flows and avalanches: a numerical investigation*. Geotechnique, 56 (5), 305-322
- Corominas J., 1996. *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. Can. Geotech. J., 33, 260-271.
- Crosta, G., Imposimato, S., Roddeman, D., 2003a. *Numerical modeling of large landslide stability and runout*. Natural Hazard and Earth System Sciences, 3(6), 523-538.
- Crosta, G. B., Chen, H. & Lee, C. F., 2004. *Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps*. Geomorphology, 60, 1-2, 127-146.
- Crosta, G. B., Imposimato, S., Roddeman, D., Chiesa, S., Moia, F., 2005. *Small fast moving flow-like landslides in volcanic deposits: the 2001 Las Colinas Landslide (El Salvador)*. Engineering Geology, 79 (3-4), 185-214.
- Crosta, G., Imposimato, S., Roddeman, D., 2006. *Continuum numerical modelling of flow-like landslides. Landslides from Massive Rock Slope Failure*, (eds S. G. Evans et al.), Nato Science series, Heidelberg: Springer, IV, 49, 211-232.
- Dade W.B. & Huppert H.E., 1998. Long-runout rockfalls. *Geology*, September 1998 v. 26 No. 9 p.803-806.
- Hungr, O., 1995. *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches*. Can. Geotech. J., 32, 610-623.
- Hungr, O., and Evans, S.G., 2004. *Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism*. Geological Society of America Bulletin, 116 (9/10), 1240-1252.
- Mangeney-Castelnau, A., Bouchut, B., Vilotte, J.P., Lajeunesse, E., Aubertin, A., and Pirulli, M., 2005. *On the use of Saint-Venant equations for simulating the spreading of a granular mass*. J. Geophys. Res., 110, B09103.
- Matthias Jakob and Oldrich Hungr, 2005. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer, UK, 135-155.
- McDougall S., and Hungr, O., 2005. *Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides*. Can. Geotech. J., 42, 1437-1488.
- Nicoletti P.G. & Sorriso-Valvo M., 1991. *Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches*. Geological Society of American Bulletin, v. 103, p. 1365-1373, October 1991.
- Pastor, M., Blanc, T., Pastor, M.J., Sánchez, M., Haddad, B., Mira, P., Fernández Merodo, J.A, Herreros, I., Dremptic V., 2007. *A SPH depth integrated model with pore pressure coupling for fast landslides and related phenomena*, Hong Kong.
- Roddeman, D.G., 2002. *Tochnog user's manual – a free explicit/implicit FE program*. FEAT, 177 pp., (www.feat.nl/manuals/user/user.html).
- Scheidegger A.E., 1973. *On prediction of the reach and velocity of catastrophic land-slides*. Rock Mecahnics 5, p. 231-236 (1973).
- Tianchi Li 1983. *A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall*. Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Bd.27, p. 473-482.

ABSTRACT

APPLICATION OF NUMERICAL MODELING TECHNIQUES TO THE MONT DE LA SAXE LANDSLIDE

Keywords: numerical analyses, slope stability, geomechanics of rock masses

During the last decade, a large rockslide in the NW slope of Mont de la Saxe (Courmayeur, AO - Italy) showed a significant activity rate increase.

The slide, whose global volume is about 8 Mm³, involves a heavily tectonised and intensely fractured mass of black schists, for a surface area of about 120'000 to 180'000 sqm (approx.. 350m per 500m). The slide surface reach typically depths of 60 to 70m above g.l. Since the presence of the village of Entreves, in proximity of the footslope, regional authorities commissioned comprehensive ground investigation and monitoring campaigns, as well as numerical analyses, in order to assess the rockslope stability conditions.

Plane and 3D Finite Element Analyses were carried, at first by modeling the slope as a homogeneous continuum, thus assessing global rock mass parameters. In a second step, since geological investigations demonstrated that the stability of the slope was significantly affected by its discontinuities, a Joint Rock Model was also considered.

Due to the necessity of activate civil protection plans, comprehensive analyses were also carried in order to assess the rockslide run-out. For this reason Lagrangian Finite Element Analyses allowed to take into account all of the morphology effects which couldn't be considered by traditional empirical-statistical approaches.