

Modellazione di ammassi rocciosi instabili con il metodo degli elementi distinti

Gianluca Marcato^{1*}, Sandro Silvano¹, Lesław Zabuski²

¹Istituto della Ricerca per la Protezione Idrogeologica CNR. marcato@irpi.cnr.it

²Polish Academy of Sciences, Institute of Hydro-Engineering. lechu@ibwpan.gda.pl

*Autore corrispondente: Corso Stati Uniti 4 – 35127 Padova, Tel. 049/8295830, Fax. 049/8295827

Unstable Rock Mass Modelling by Means of Discontinuous Elements

ABSTRACT: Principles and examples of discontinuous numerical modelling of the landslide slopes are presented in the paper. In many cases rock mass is composed of relatively strong and competent rock blocks, which are intersected with discontinuities, such as joints, faults, fault zones, bedding planes, etc. Deformation process of such system is modelled numerically, using UDEC (Universal Distinct Element Code) computer programme. This approach is explained in the paper and two examples of numerical simulation of the landslide development illustrate its main features. The first example is concerned in the modelling of the landslide in diabase quarry, whereas the second presents the simulation of the process in Italian Dolomites. The results prove the appropriateness and usefulness of discontinuous modelling approach.

Key terms: landslide, numerical simulation, distinct element method, UDEC code

Termini chiave: frana, simulazione numerica, metodo degli elementi distinti, codice di calcolo UDEC

Riassunto

In questo lavoro si illustrano i principi generali e due esempi di applicazione della modellazione numerica del discontinuo a fenomeni di frana. In molti casi gli ammassi rocciosi sono formati da blocchi di matrice rocciosa relativamente competente, che sono attraversati da discontinuità come faglie, joint, stratificazione etc. I processi di deformazione di tali sistemi sono stati modellizzati numericamente tramite il codice UDEC (Universal Distinct Element Code). Questo approccio è stato descritto nel lavoro tramite due esempi che illustrano anche le principali caratteristiche del programma. Il primo esempio mostra l'applicazione della simulazione ad una frana che ha interessato una parete di cava in diabase, provocando problemi al proseguo dello sfruttamento del materiale, mentre il secondo mostra la simulazione di un grande fenomeno di frana nelle Dolomiti italiane che potrebbe, nell'eventualità di un evento parossistico, sbarrare il corso del Fiume Tagliamento, inducendo situazioni di alto rischio ai centri urbani della valle. I risultati danno conto della adeguatezza e della utilità dell'approccio di modellazione di ammassi rocciosi con il metodo degli elementi distinti.

Introduzione

Gli ammassi rocciosi sono tipicamente discontinui. La matrice rocciosa è solitamente attraversata da discontinuità e suddivisa in blocchi di diverse forme, che possono

deformarsi e muoversi indipendentemente uno dall'altro. Le discontinuità dell'ammasso roccioso possono essere immaginate come una zona di debolezza. Quindi, la rottura per taglio o tensione solitamente avviene lungo queste superfici, mentre la matrice rocciosa permane nello stato originario. Nonostante questo modello di rottura, in molti casi gli ammassi rocciosi sono modellizzati come un continuum. Anche se questo approccio può essere considerato non corretto, in molti casi i risultati della soluzione sul comportamento dell'ammasso danno prova della relativa applicabilità del modello. In ogni caso, se si devono simulare grandi deformazioni i modelli continui possono essere fortemente inadeguati. Al contrario, i modelli discontinui possono sicuramente essere applicati con successo.

Non esistono molti codici numerici che permettano la risoluzione di problemi di meccanica delle rocce basati su di un approccio discontinuo. Uno di questi è UDEC (Universal Distinct Element Code; Itasca, 2004). UDEC è implementato per studiare i processi e i meccanismi di deformazione e di rottura correlati direttamente alla presenza di discontinuità. L'ammasso roccioso è modellizzato come un sistema a blocchi rigidi o deformabili, che interagiscono lungo le superfici, che rappresentano le discontinuità (Pasuto, Tecca, 1996). Il comportamento tanto della matrice rocciosa (ovvero la parte interna dei blocchi deformabili) quanto delle interfacce è descritto tramite le note leggi della meccanica dei mezzi continui.



Fig. 1. Frana su una parete di cava in diabase.
Landslide on the wall in diabase quarry.

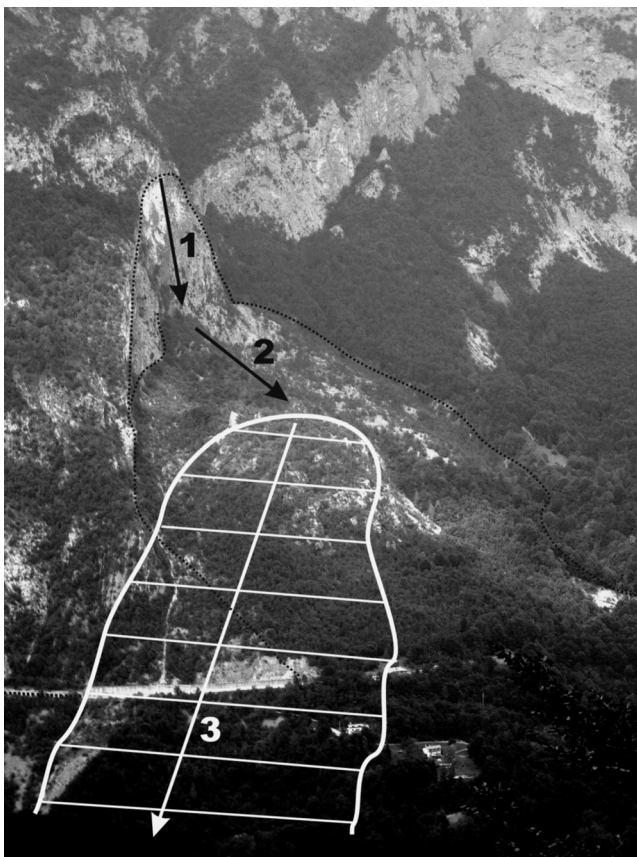


Fig. 2. Frana di Passo della Morte (evoluzione e stato attuale).
Passo della Morte landslide (development and present state).

Nel presente lavoro, UDEC è stato utilizzato per analizzare due fenomeni franosi. Il primo si è verificato su di una parete di una cava di diabase (Fig. 1), provocando problemi per il proseguimento dello sfruttamento del materiale di cava. La finalità dell'analisi è stato lo studio delle cause del fenomeno e la previsione del futuro

comportamento delle pareti della cava (Bober, Zabuski, 1993).

Il secondo esempio riguarda la grande frana del Passo della Morte, nella alta valle del Fiume Tagliamento (Dolomiti). Qui l'innesco del primo movimento (Fig. 2, stadio 1) è connesso al lento scioglimento del ghiaccio che occupava la valle nel corso dell'ultima glaciazione. La natura del movimento è in seguito mutata e attualmente la frana è quiescente oppure si muove lentamente seguendo la direzione 3 in Fig. 2.

Principi dei modelli discontinui

Ci sono sostanziali differenze tra il comportamento locale e di conseguenza globale nei modelli continui e discontinui. Queste differenze sono chiaramente osservabili se si confrontano i due schemi riportati in Fig. 3. Nell'approccio discontinuo tutti i blocchi si deformano e si muovono indipendentemente uno dall'altro, mentre il modello continuo influenza il comportamento deformativo del mezzo.

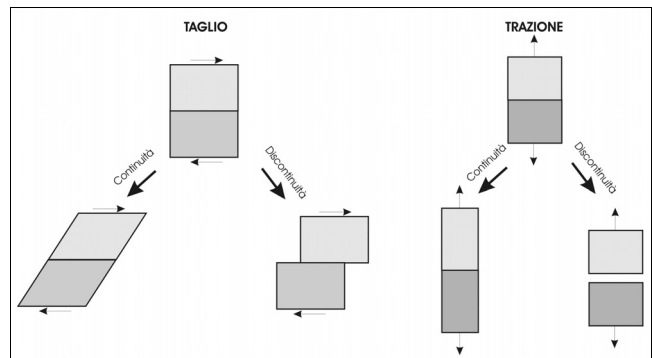


Fig. 3. Differenze nel comportamento dei modelli continuo e discontinuo.

Comparison between behaviour of continuous and discontinuous model.

L'elaborazione di un modello discontinuo consiste nella descrizione delle proprietà sia dell'elemento roccioso che delle discontinuità. Ci sono due possibilità riguardo al singolo blocco di roccia. Nei modelli più semplici il materiale che forma il blocco può essere trattato come rigido, ne deriva che il modulo di elasticità è uguale all'infinito. Nel secondo caso, ovvero blocchi completamente deformabili, il materiale si deforma e di conseguenza la forma del blocco può cambiare. Gli schemi in Fig. 4 mostrano le differenze nel comportamento di questi due modelli. Nel primo caso si assume che nel sistema tutti gli spostamenti si esplicano attraverso movimenti nella direzione delle interfacce o perpendicolarmente ad esse. Questo modello si applica a blocchi costituiti di rocce resistenti interessate da famiglie di discontinuità. Si considera invece il secondo modello nel caso il sistema di blocchi sia costituito da rocce deboli (Zabuski *et al*, 1999).

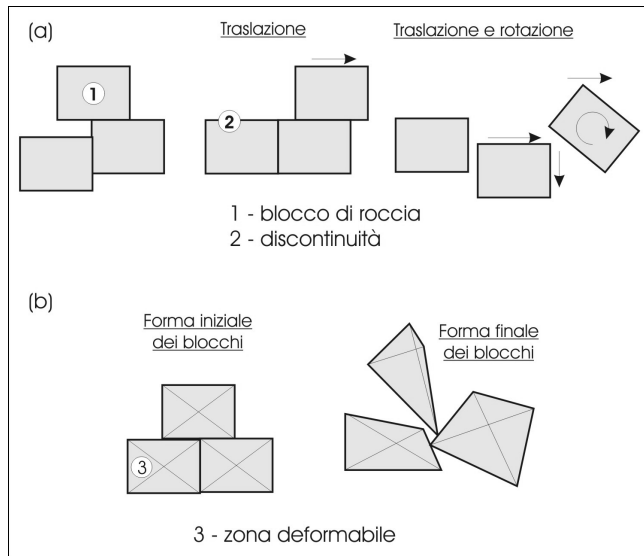


Fig. 4. Possibili deformazioni e spostamenti dei blocchi nel modello rigido (a), modello completamente deformabile (b). *Explanation of possible deformations and displacements of the blocks rigid model (a), fully deformable model(b).*

Il blocco rigido (Fig.4a) si deforma in modo traslativo e/o rotazionale. Il blocco deformabile si divide in zone che possono cambiare forma, causando di conseguenza una modificazione della forma del blocco stesso (Fig.4b). come si può osservare in figura (b), il sistema nella

configurazione finale appare completamente diverso dallo stato iniziale.

Simulazione numerica dei fenomeni franosi

Frana in una cava di diabase

Il rilevamento di campagna sul sito di studio suggeriva che la causa principale del fenomeno franoso fosse connessa con il movimento della sabbia. Di conseguenza, la prima finalità dei calcoli era la spiegazione dei meccanismi deformativi e del ruolo del diabase *settlement* in questo processo.

La geometria del modello è presentata in Fig. 5. la sezione trasversale nel centro del corpo di frana è stata scelta per la costruzione del modello e per la simulazione numerica. Le discontinuità nell’ammasso roccioso sono state assunte secondo la reale orientazione e spaziatura delle famiglie di joint. Le discontinuità nella sabbia sono invece state assunte arbitrariamente, essendo in natura costituita da singole particelle. In ogni caso, si può affermare che il comportamento globale del livello sabbioso nella simulazione numerica è confrontabile con quello reale dato che le dimensioni dei blocchi sono sufficientemente piccole. Si è inoltre assunto che i blocchi fossero rigidi e che di conseguenza la rottura fosse possibile lungo o attraverso le discontinuità, rispettivamente in condizioni di taglio o tensione. I parametri che descrivono le proprietà dei materiali sono riportati in Tab. 1.

Tab. 1. Parametri meccanici utilizzati nel modello. S – in superficie; P – in profondità. *Mechanical parameters of the model. S – shallow zone; P – deep zone.*

Strato	Discontinuità	Resistenza normale	Resistenza di taglio	Coesione	Resistenza alla tensione	Angolo di attrito	Angolo di dilatanza
		k_n	k_s		R_{rs}		
		[MPa/m]	[MPa/m]	[kPa]	[kPa]	[°]	[°]
Diabase	Dip 10° (S)	250	250	10	5	8	0
	Dip 10° (P)	250	250	15	10	20	0
	Dip 80°(S)	250	250	10	15	15	0
	Dip 80°(P)	250	250	15	10	20	0
Sabbia	S	250	250	5	0	25	0
	P	250	250	15	5	30	0

I risultati della simulazione sono mostrati in Fig. 5. Sulla base degli cicli di calcolo e quindi dei risultati ottenuti all’equilibrio di ogni “stage” è possibile descrivere sia il processo di rottura che l’evoluzione del fenomeno:

- i blocchi di diabase si abbassano e scivolano, in particolare lungo le superfici di discontinuità più inclinate, a partire dalla base del versante fino alla parte superiore della zona costituita da diabase;
- il processo si espande anche in profondità;
- si assiste alla creazione di spazio libero tra i blocchi di diabase dislocati e la copertura sabbiosa;

- si innesca lo scivolamento e la rotazione nelle particelle di sabbia in conseguenza all’abbassamento del substrato roccioso;
- la sabbia ricopre la parete di diabase;
- la superficie del versante si assesta.

I risultati mostrano che i movimenti che interessano la copertura sabbiosa sono secondari e dipendono dai movimenti che si innescano nel substrato roccioso. Questa conclusione ha implicazioni pratiche. Prima che la simulazione fosse effettuata, si era deciso che rimuovere la copertura fosse necessario per la definitiva stabilizzazione

della parete. I risultati mostrano invece che tale operazione non avrebbe dato i risultati attesi.

Inoltre, i risultati della simulazione mostrano come l'applicazione del modello discontinuo fosse opportuna in quanto lo spostamento di alcuni blocchi raggiungeva le

decine di metri e sarebbe stato quindi impossibile applicare il modello continuo con spostamenti di tale entità. Infine, la forma della frana nella simulazione è del tutto confrontabile con quella osservata in natura.

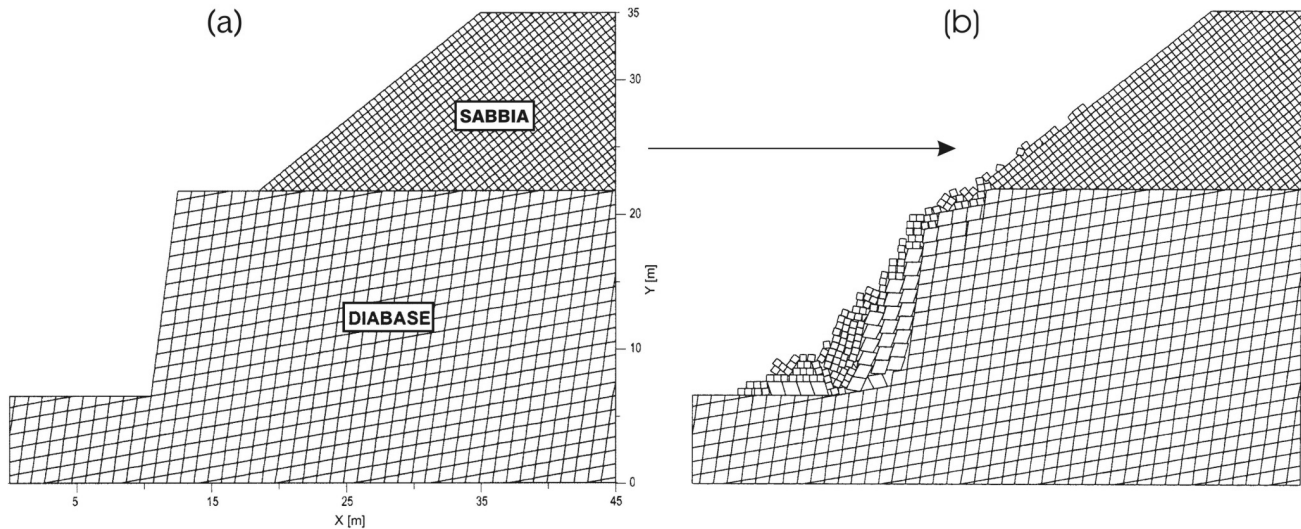


Fig. 5. Sezione trasversale utilizzata per la simulazione numerica del movimento franoso. (a) Stadio iniziale e (b) Stadio finale. *Cross-section for numerical simulation of the landslide movement (a) initial stage and (b) final stage.*

Fenomeno franoso nelle Dolomiti italiane

L'innescò e la prima evoluzione della frana del Passo della Morte sono connessi con il ritiro del ghiacciaio che occupava la valle nel corso dell'ultima glaciazione (vedi Fig. 2, stadio 1). A causa del progressivo scioglimento del ghiaccio, l'immersione della superficie di scivolamento è significativamente diminuita e la natura del processo è cambiata. Il movimento è proseguito con scivolamenti nella direzione 2 (Fig. 2) fino alla stabilizzazione del fenomeno. Il progressivo decadimento delle proprietà meccaniche unito all'infiltrazione di acqua nell'ammasso roccioso allentato in occasione di eventi climatici estremi ha provocato la riattivazione del fenomeno. Attualmente, la direzione del movimento (direzione 3 in Fig. 2) è differente da quella iniziale. La distanza percorsa in alcuni settori del versante è di alcune centinaia di metri e l'applicazione di un modello continuo sarebbe stata del tutto inappropriata. Di conseguenza si è scelto di utilizzare il codice UDEC per la simulazione numerica del processo.

La finalità del modello in UDEC è di simulare il movimento nella direzione 3 e di spiegare i meccanismi di deformazione che si sono succeduti dall'innescò dello scivolamento fino ad oggi. Questo lavoro è in corso ma sono già stati ottenuti incoraggianti risultati. Alcune difficoltà derivano da incertezze nei dati relativi ai parametri geomeccanici da assegnare all'ammasso. È altamente probabile che nel passato le proprietà dei materiali fossero differenti da quelle attuali, ma a causa della mancanza di dati a riguardo si è assunto che tali

parametri siano stati costanti. In pratica, l'unica possibilità di verifica della adeguatezza della simulazione consiste nella forma finale assunta dal versante, simulata e misurata in campagna.

Lo stadio iniziale e lo stadio finale della frana sono presentati in Fig. 6. In questo caso, si scelto di considerare i blocchi come deformabili. La simulazione è stata condotta diminuendo lo spessore della coltre di ghiaccio. Anche se quest'ultimo processo in natura è continuo, nella simulazione è possibile procedere solamente per stadi successivi. Di conseguenza si sono scelti quattro stadi e in ciascuno di questi, dopo aver rimosso una fetta di ghiaccio si è proceduto con i calcoli fino al raggiungimento dell'equilibrio. Si possono osservare grandi movimenti e modificazioni della forma dei singoli blocchi. La struttura geologica del versante, con particolare riferimento all'assetto delle differenti unità geologiche (Pisa 1972), è sensibilmente differente se paragonata allo stadio iniziale. I risultati della simulazione hanno quindi permesso di dare conto di queste differenze.

Come accennato sopra, ulteriori simulazioni sono in corso e i risultati saranno comparati a misurazioni strumentali effettuate in campagna (i.e. misure inclinometriche). Questo esempio mostra chiaramente le potenzialità di applicazione del codice anche senza una soluzione completa del modello.

Conclusioni

Le potenzialità e gli svantaggi dell'applicazione del modello

discontinuo sono stati mostrati con due esempi di simulazione numerica. Il modello può essere utilizzato con risultati soddisfacenti sia nel caso di ammassi rocciosi costituiti da rocce resistenti (modello con blocchi rigidi, sia in rocce deboli (modello con blocchi completamente deformabili). Nel primo esempio, una frana in una parete di cava in diabase, è stato utilizzato il primo modello. Nel secondo esempio, la frana di Passo della Morte, si è assunto il modello di blocchi deformabili.

Il modello discontinuo può essere applicato anche nel caso di ammassi rocciosi flyscioidi (Zabuski *et al*, 1999), con particolare riferimento a flysch arenacei, anche se il

secondo esempio mostra come anche gli ammassi rocciosi deboli possono essere facilmente modellizzabili con questo codice. Frane di differenti tipologie e dimensioni possono essere analizzate, specialmente nel caso frequente di grandi dislocazioni.

Si deve sottolineare che la simulazione numerica può aiutare il geologo nell'interpretazione dei fenomeni e delle forme che si possono osservare in natura. Questo significa che la collaborazione tra geologi e ingegneri può portare a risultati effettivi, come chiaramente mostrato dagli esempi presentati in questo lavoro.

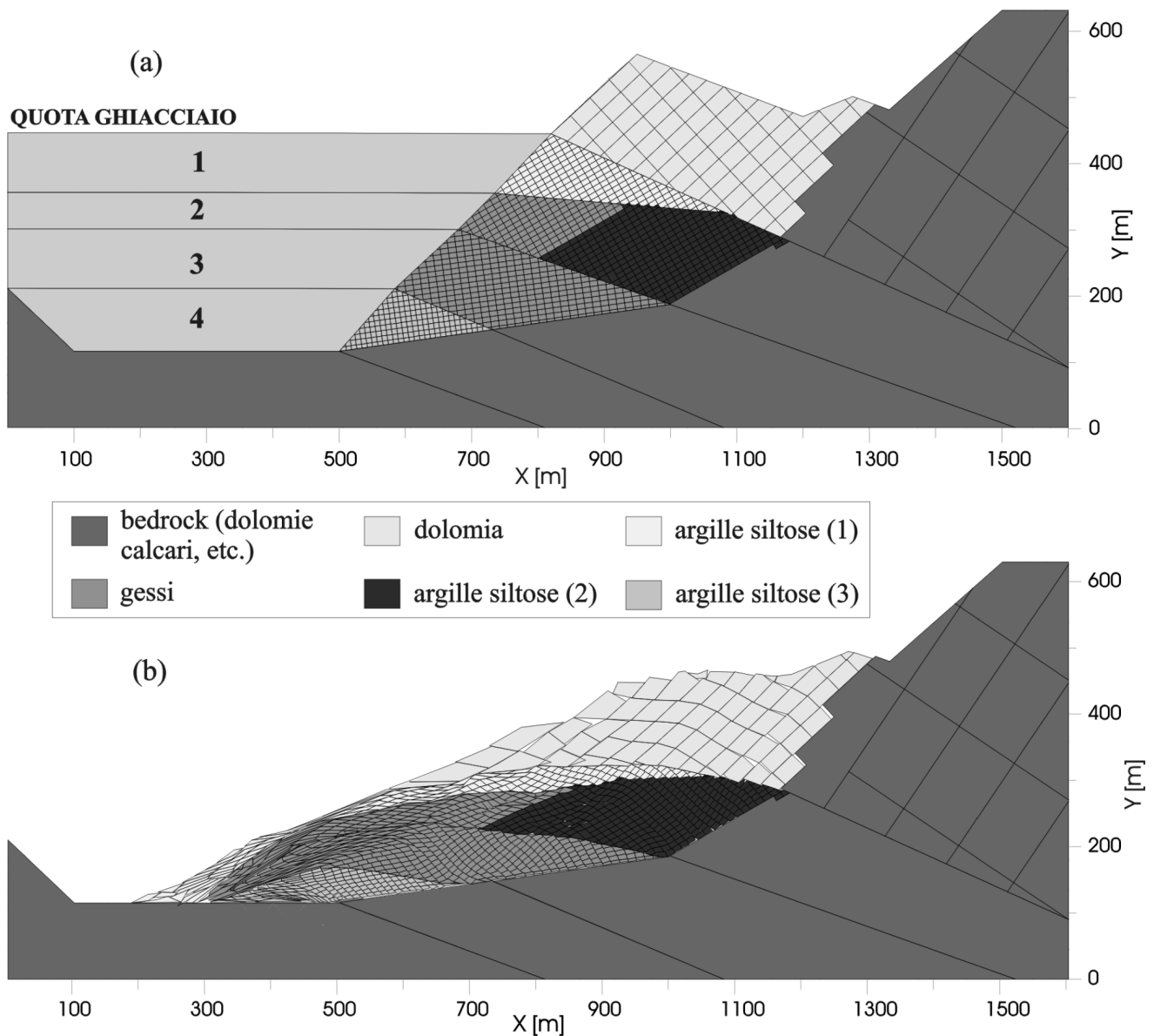


Fig. 6. Evoluzione della frana di Passo della Morte. (a) stadio iniziale (b) stadio finale (attuale).
 Development of Passo della Morte landslide, (a) initial stage (b) final (present) stage.

Bibliografia

- Bober L., Zabuski L., 1993. Flysch slope classification from viewpoint of the landslide prediction. Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rock, Athens, Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1065-1072.
- ITASCA C.G., 2004. UDEC 4.0 User's Manual, Minneapolis
- Pasuto A., Tecca P. R., 1996. Use of distinct element method in the analysis of deformation mechanism of the Giau Pass landslide (North-Easter Italy). Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Athens, Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1317-1321.
- Pisa, G., 1972. Geologia dei monti a Nord di Forni di Sotto (Carnia occidentale). *Giornale del Servizio Geologico* 38 (2), 543-691.
- Zabuski L., Thiel K., Bober L., 1999. Osuwiska we fliszu Karpat polskich. *Geologia, Modelowanie, Obliczenia stateczności (Landslides in Carpathian Flysch. Geology, Modelling, Stability calculations)*, Wydawnictwo IBW PAN, Gdansk, 171 p.