

Modellazione numerica agli Elementi Distinti della frana in roccia di Scascoli (Valle del Savena, Bologna)

Luca Gambassi

Geologo, vincitore del Premio di Laurea "Gianfranco Bruzzi", Edizione 2007

INTRODUZIONE

I meccanismi e la cinematica del movimento franoso in roccia avvenuto il 12 marzo 2005 nell'area delle Gole di Scascoli vengono analizzati, nel presente lavoro, mediante l'utilizzo di codici numerici agli Elementi Distinti ed agli Elementi Finiti. I dati necessari per la definizione del modello geologico-tecnico sono stati ottenuti dall'interpretazione di un rilievo laser scanner ad alta risoluzione della superficie di frana, mentre per le proprietà fisico-meccaniche della roccia e delle discontinuità si è fatto ricorso a rilievi in situ e a dati disponibili in letteratura. Grazie all'applicazione di due codici numerici bidimensionali, uno agli Elementi Distinti (UDEEC) ed uno agli Elementi Finiti (Phase2), che contemplan comportamenti deformativi dell'ammasso e/o delle discontinuità in esso presenti, è stato possibile superare le limitazioni delle convenzionali analisi all'equilibrio limite ed analizzare il complesso meccanismo di rottura del fenomeno.

INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Le Gole di Scascoli rappresentano un segmento vallivo profondamente incassato tra affioramenti rocciosi, situato tra i comuni di Loiano e Monzuno, nell'Appennino bolognese, lungo il corso del Torrente Savena. In particolare l'area nella quale è avvenuta la frana oggetto di questo studio (Fig. 1) è ubicata lungo un tratto della Strada Provinciale di fondovalle, a circa 400 metri (in direzione Bologna) dal bivio che da questa conduce alla frazione di Scascoli. In quest'area affiorano alcune formazioni appartenenti alla Successione Semi-alloctona Epiligure (Amorosi, 1996); in particolare l'evento franoso del 2005 ha interessato principalmente litologie arenitiche appartenenti al Gruppo di Bismantova (Formazione di Pantano e Formazione di Cigarellino, entrambe di età medio-miocenica).

L'evoluzione geomorfologica dell'area in esame è controllata principalmente dall'assetto strutturale



Figura 1 - Foto aerea del crollo in roccia avvenuto nel marzo del 2005 (G. Bertolini, 2005).

della Successione Epiligure, che ha fortemente condizionato l'attività erosiva del torrente Savena in questo tratto di fondovalle. L'aspetto più rilevante è rappresentato dalla forte asimmetria della sezione valliva, modellata su una monoclinale immergente verso NW. Tale sezione presenta un ripido versante sinistro con stratificazione a reggipoggio, caratterizzato in prevalenza da alte pareti rocciose, verticali o a strapiombo sul sottostante torrente. Il versante destro presenta una morfologia meno acclive ed una stratificazione a franapoggio ed è occupato per un lungo tratto dal piede di una grande frana quiescente, nel quale si manifestano movimenti di detrito attivi e localmente profondi (Gottardi et al., 2004).

L'area delle Gole è stata interessata, soprattutto nel corso degli ultimi anni, da numerosi fenomeni di crollo. Prima dell'evento occorso nel 2005, infatti, sono degni di nota altri due episodi franosi avvenuti in questo tratto critico del fondovalle Savena, avvenuti nel 1992 e nel 2002.

Tra le cause predisponenti questi crolli, come anche quello avvenuto nel 2005, va innanzitutto chiamata in causa l'azione di scalzamento al piede del versante da parte del T. Savena. Questa azione, che persiste tuttora, è determinata dalla generale tendenza dell'alveo a spostarsi verso NW; a sua volta tale spostamento dipende da due cause concomitanti:

- l'immersione verso NW della stratificazione, che induce il torrente a spostarsi "seguendo" le unità più facilmente erodibili;
- la costruzione, risalente agli inizi degli anni Ottanta, del rilevato stradale (la suddetta S.P. di fondovalle) in destra idrografica (cioè tra la grande frana quiescente e l'alveo), affiancato da opere di difesa idraulica che forzano ulteriormente il torrente a spostarsi verso la sponda sinistra.

La presenza della grande frana quiescente sul versante destro, che in tempi storici ha ostruito il fondovalle obbligando il torrente a descrivere un ampio arco convesso verso NW, è ritenuta da alcuni Autori (Landuzzi & Bernagozzi, 1996) altra causa predisponente ai numerosi crolli che, a partire dal 1992, hanno interessato il versante sinistro della valle.

Questo insieme di fattori contribuisce ad una naturale evoluzione geomorfologica delle Gole, ma la frequenza degli eventi franosi, soprattutto nell'ultimo quinquennio, evidenzia un'attività (Cruden & Varnes, 1996) difficilmente correlabile a processi geologico-geomorfologici naturali, ma piuttosto ascrivibile alle modificazioni indotte dal tracciato stradale ed ai suoi ampliamenti.

Descrizione dell'area di frana

La marcata asimmetria della Valle del T. Savena nel tratto delle Gole di Scascoli, con ripide pareti rocciose sul fianco sinistro e morfologie decisamente

meno acclivi su quello destro, è, come già accennato, particolarmente evidente nell'area in cui è avvenuta la frana del marzo 2005, dove a stupire maggiormente è senza dubbio il forte aggetto delle porzioni rocciose, in sinistra idraulica, che incombono sul torrente e la strada sottostanti. La più imponente di queste, denominata "Mammellone 1" proprio a causa della sua conformazione, si è venuta a trovare, come risultato dell'intensa sottoescavazione da parte del T. Savena, in una situazione di forte instabilità ed è poi stata coinvolta dal crollo oggetto di questo studio.

La nicchia di distacco generatasi in seguito al movimento franoso ha un'altezza di 55 m (da una quota di 270 m fino a 325 m s.l.m) ed un'estensione di circa 50 m.

Il materiale crollato (circa 40.000 m³ di roccia) ha dato origine ad un accumulo costituito da pochi prismi rocciosi di notevoli dimensioni e da altri assai più numerosi ma di grandezza modesta, che hanno invaso in gran parte il sottostante T. Savena, ostruendolo e creando un piccolo lago di sbarramento; il materiale roccioso franato ha inoltre distrutto una parte considerevole della strada provinciale.

Confrontando le fotografie scattate prima e dopo la frana (Fig. 2) si nota come il volume roccioso distaccatosi dal versante presenti una forma a cuneo ben

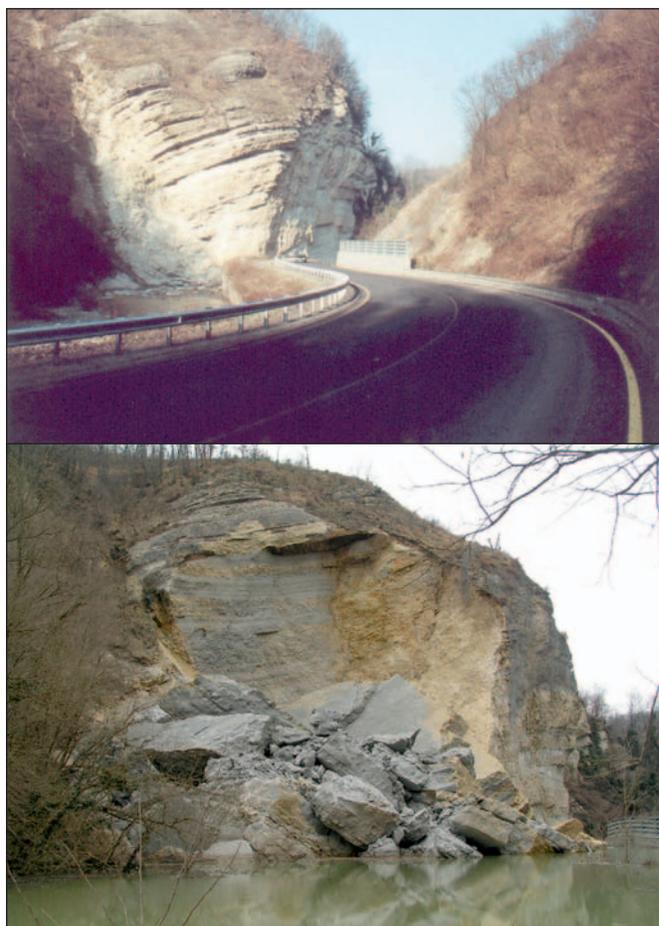


Figura 2 - Il "Mammellone" prima e dopo la frana.



Figura 3 - Superficie di scivolamento della frana.

evidente. Esso ha avuto modo di isolarsi lateralmente dal resto dell'ammasso roccioso a causa di 2 faglie, di importanza regionale, ben visibili anche nelle foto, che hanno svolto il ruolo di svincoli cinematici, una sul fianco destro e l'altra su quello sinistro del corpo di frana.

Se si osservano poi le condizioni di alterazione delle varie parti della nicchia di distacco si notano differenze marcate. Infatti, i fianchi presentano una degradazione decisamente più netta rispetto alla scarpata principale, indicata soprattutto da una colorazione giallo-rossiccia della roccia e da una maggiore scabrosità della parete. La superficie di scivolamento invece mostra delle condizioni decisamente meno alterate, con una colorazione grigio chiaro e una maggiore levigatezza.

Ma il particolare indubbiamente più interessante riguardante l'area del distacco (che è possibile notare solo osservando il corpo di frana da una posizione laterale) è la forma chiaramente curvilinea e concava della superficie di scivolamento (Fig. 3). Essa risulta limitata al tetto dalla stratificazione (in evidente giacitura a reggipoggio, come si nota, in modo marcato,

dall'assetto della porzione di roccia nella parte superiore della zona di distacco, non interessata dal crollo ma in equilibrio precario) e presenta un'inclinazione che varia da verticale nella zona sommitale (se non addirittura leggermente immergente all'interno del versante), per passare poi a intermedia nella parte centrale, fino a divenire a bassa inclinazione al piede. In essa sono visibili i ponti di roccia intatta che separano i vari sistemi di discontinuità e che, come è intuibile, giocano a favore della stabilità globale dell'intero ammasso.

La caratteristica e peculiare forma curvilinea e concava della superficie, come verrà spiegato in seguito, si rivelerà fondamentale per comprendere il meccanismo di rottura che ha coinvolto l'ammasso roccioso in esame.

ROTTURA PROGRESSIVA IN VERSANTI ROCCIOSI

Introduzione

Nelle convenzionali analisi di stabilità di versanti in roccia generalmente si assume che la superficie di rottura sia "strutturalmente controllata" e costituita da un piano continuo o da una serie di piani interconnessi preesistenti nell'ammasso. Il motivo di ciò è dovuto in parte alle osservazioni post rottura, in cui le discontinuità infinitamente persistenti sono adattate alla superficie di rottura per spiegare la sua origine in un contesto geologico e, in parte, ai vincoli imposti dalle tecniche di analisi impiegate (molte delle quali richiedono l'inserimento di discontinuità infinitamente persistenti, per esempio le analisi all'equilibrio limite per scivolamenti planari o a cuneo, il metodo degli Elementi Distinti, ecc.). Tali supposizioni spesso sono valide, ma lo sono realmente solo nei casi in cui il volume del blocco franato sia relativamente ridotto (ordine delle migliaia di m³) o nel caso in cui siano presenti importanti faglie persistenti o piani di stratificazione (Eberhardt et al., 2004).

Nei versanti in roccia di notevole estensione naturali e in quelli artificiali (ad es. le miniere a cielo aperto), è altamente improbabile che esista a priori una rete di discontinuità naturali infinitamente persistenti tale da formare una superficie tridimensionale che inneschi il rilascio cinematico. Terzaghi (1962), Jennings (1970), Einstein et al. (1983) ritengono piuttosto che la persistenza delle famiglie di discontinuità chiave sia in realtà più limitata e che, per portare il versante a rottura, sia necessaria una complessa interazione tra le discontinuità naturali esistenti e la propagazione della frattura attraverso i ponti di roccia intatta.

La comprensione di meccanismi che conducono all'instabilità di versanti in roccia di notevoli dimensioni necessita quindi di un approccio che contempli un processo di progressiva degradazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dell'ammasso ed in particolare la di-

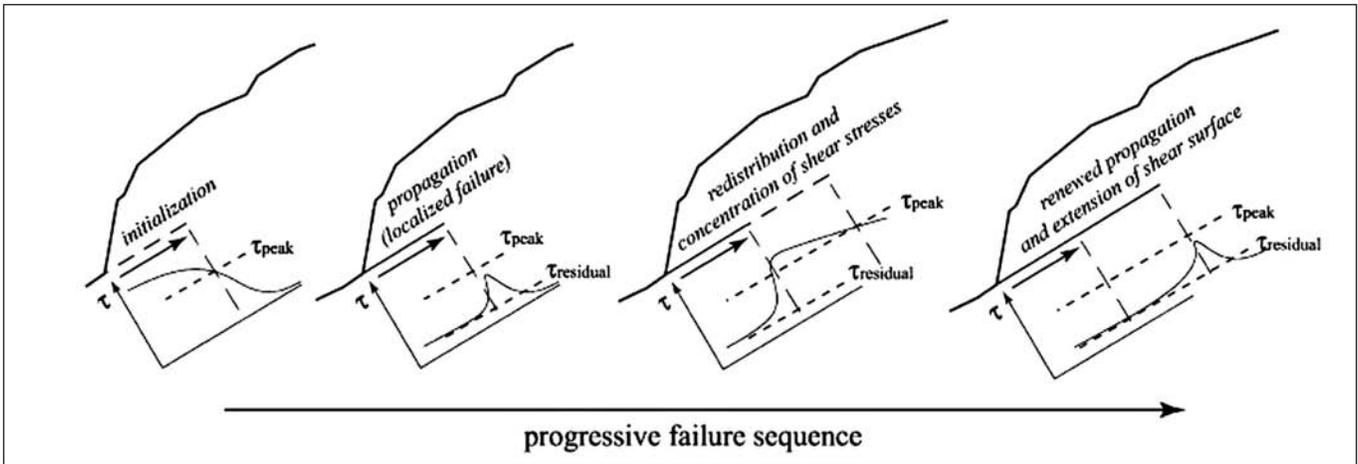


Figura 4 - Formazione del piano di taglio secondo un meccanismo di rottura progressiva (Bjerrum, 1967).

struzione degli elementi di coesione dei ponti di roccia intatta.

Meccanismo di rottura

Il concetto di rottura progressiva di versante venne originariamente introdotto per spiegare le incongruità riscontrate confrontando le resistenze a taglio medie calcolate a ritroso lungo le superfici di rottura in versanti costituiti da argilla sovraconsolidata e le resistenze a taglio del medesimo materiale argilloso valutate mediante prove di laboratorio. Bjerrum (1967) riassume che, in casi del genere, la formazione di una superficie di scivolamento continua deve essere preceduta dalla progressiva propagazione di una superficie di taglio lungo la quale la resistenza al taglio si riduce da valori di picco a valori residui (Fig. 4). Questo modello implica uno sviluppo graduale del piano di rottura finale.

Già nel 1962 Terzaghi aveva posto l'accento sul fatto che, nei versanti in roccia, molti ammassi contengono giunti discontinui con persistenza variabile, per i quali la resistenza al taglio mobilizzata risulta costituita da una componente attrittiva lungo i giunti e da una componente di coesione, data dai ponti di roccia intatta tra i giunti discontinui, che si oppone agli sforzi di taglio agenti.

Il processo di rottura progressiva in versanti rocciosi con giunti non persistenti dovrebbe perciò contemplare la rottura dei singoli ponti di roccia nel momento in cui la resistenza al taglio del materiale viene superata. Gli sforzi sul piano di taglio dovrebbero aumentare e i successivi ponti di roccia intatta cedere in maniera sequenziale fino a che la superficie di rottura si espande fino al punto in cui il rilascio cinematico diventa possibile.

In tali condizioni la rottura dovrebbe prodursi, all'inizio, al piede del versante roccioso, dove gli sforzi sono più elevati, e poi propagarsi verso l'alto, fino in superficie. Un meccanismo di rottura di questo tipo risulta essere principalmente di tipo fragile e richiede deformazioni molto basse per produrre la rottura. Tuttavia in molti casi

le fratture da trazione superficiali compaiono nella parte alta del versante molto prima che avvenga la rottura catastrofica, indicando che questa può anche essere in parte controllata da meccanismi di deformazione interna (per es. danno fragile aggiuntivo, snervamento elasto-plastico, creep, ecc...). Perciò, come mostrato in Fig. 5, il fattore di controllo principale che contribuisce alla rottura di versanti rocciosi massivi è la degradazione delle resistenze. Essa si manifesta come sviluppo di una superficie di taglio (cioè rottura progressiva) o attraverso la deformazione interna dell'ammasso roccioso. Quest'ultima è dominante nelle situazioni in cui la superficie di rottura non è planare ed è particolarmente importante nel caso in cui si sviluppino piani di taglio interni (Martin & Kaiser, 1984).

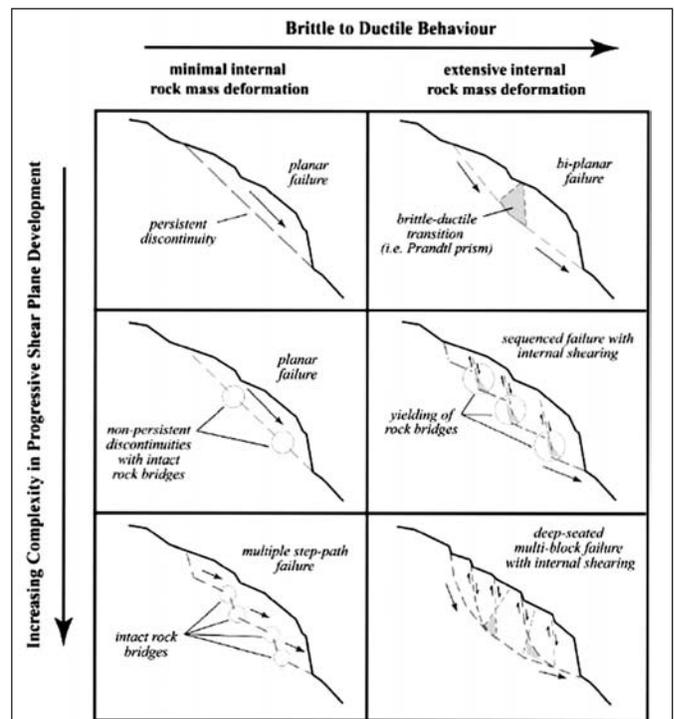


Figura 5 - Meccanismo di scivolamento di un ammasso roccioso massivo controllato dalla formazione di un piano di taglio progressivo e dalla deformazione/rottura interna della roccia (Eberhardt et al., 2004).

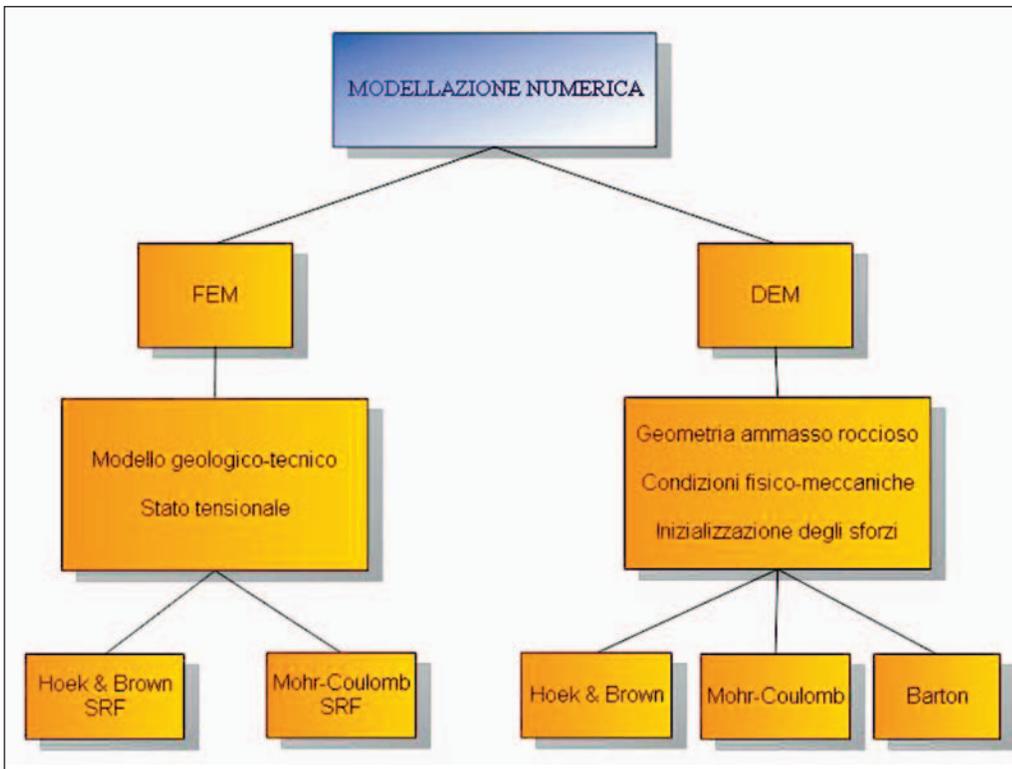


Figura 6 - Fasi della modellazione numerica.

Le tecniche all'equilibrio limite non prendono in considerazione la graduale perdita di coesione e mobilitazione di resistenze attrittive lungo questi piani di taglio, entrambe dipendenti dalla deformazione (Hajiabdolmajid & Kaiser, 2002).

L'osservazione delle caratteristiche morfologiche della superficie di rottura della frana di Scascoli del 2005, la sua geometria complessa, non riconducibile con sicurezza ad una frana planare, l'evidenza di ponti di roccia lungo la stessa, le condizioni di alterazione (assenza di decolorazione e colorazione tipica della roccia fresca), portano ad affrontare la sua modellazione con metodi numerici che contemplino le possibilità di includere le deformazioni interne all'ammasso e l'inserimento di modelli di comportamento della roccia e/o dei giunti di tipo diverso.

MODELLAZIONE NUMERICA

Introduzione: il Metodo degli Elementi Distinti (DEM)

Il comportamento meccanico degli ammassi rocciosi è fortemente influenzato dalla presenza delle discontinuità al loro interno.

I principali metodi utilizzati per la modellazione numerica di ammassi rocciosi sono: il metodo degli elementi finiti (FEM: *Finite Element Method*), quello degli elementi al contorno (BEM: *Boundary Element Method*), e quello degli elementi distinti (DEM: *Distinct Element Method*) (Curran et al, 1993).

Tutti questi metodi consentono di studiare le condizioni di equilibrio di un pendio naturale attraverso l'inserimen-

to di parametri geomeccanici caratteristici, derivati di solito da prove di laboratorio o in situ.

L'ammasso roccioso coinvolto nella frana di Scascoli del 2005, è stato modellato utilizzando sia un codice agli Elementi Distinti (software UDEC, ver. 4, Itasca) che mediante un software agli Elementi Finiti (Phase2, ver. 6, Rocscience), entrambi bidimensionali.

Lo schema di figura 6 riassume le fasi della modellazione.

UDEC (Universal Distinct Element Code) è un programma di calcolo bidimensionale (Cundall, 1989; Itasca, 1990) le cui principali caratteristiche sono:

- il sistema è costituito da un insieme di blocchi che interagiscono lungo i contatti: i blocchi hanno la possibilità di compenetrarsi e di sovrapporsi;
- le discontinuità sono considerate come zone di interazione tra i blocchi: è prescritto un modello di comportamento per tali interazioni;
- il metodo utilizza un algoritmo esplicito nel tempo che permette grandi rotazioni, spostamenti e relazioni costitutive lineari o non-lineari sia per la matrice rocciosa, sia per le discontinuità;
- il codice include la simulazione del flusso nelle fratture di un sistema costituito da blocchi impermeabili in condizioni di regime stazionario e transitorio.

Nel caso di una trattazione bidimensionale, la massa rocciosa presa in considerazione dall'analisi viene suddivisa in blocchi. Le dimensioni e la geometria dei blocchi dipendono dalle caratteristiche di fratturazione della

Tabella 1 - Parametri richiesti da UDEC

ROCCIA	GIUNTI
Densità (ρ)	Orientazione
Modulo di taglio (G)	Apertura
Modulo di volume (K)	Persistenza
Coesione (c)	Angolo d'attrito di picco (ϕ_p)
Resistenza a trazione (σ_t)	Angolo d'attrito residuo (ϕ_r)
Angolo d'attrito (ϕ)	Coesione (c)
Rapporto di Poisson (ν)	Rigidezza normale (K_{ni})
Modulo di Young (E)	Rigidezza di taglio (K_{ss})
Resist. a compr. uniaxiale (UCS)	Dilatanza (d)

roccia, cioè dall'orientazione e dalla spaziatura delle discontinuità naturali dell'ammasso roccioso.

UDEC utilizza le seguenti equazioni fondamentali:

- la legge forza-spostamento, che specifica le forze di interazione tra i blocchi;
- la legge del moto, che definisce il moto di ogni blocco come dovuto a forze non bilanciate che agiscono sul blocco stesso.

Per molte applicazioni, la deformazione dei singoli blocchi può essere ignorata, considerando i blocchi come entità rigide. In altri casi, invece, è possibile schematizzare la deformabilità dei blocchi secondo due tecniche. Nella prima, detta di "deformabilità semplice", tre sono i gradi di libertà per la deformazione dei blocchi; nella seconda, detta di "deformabilità totale", utilizzata in questo studio, la deformazione dei blocchi è ottenuta grazie ad una discretizzazione del modello alle Differenze Finite (DF), in cui i blocchi sono internamente suddivisi in zone costituite da triangoli elementari.

Il codice necessita di una serie di parametri che caratterizzano la roccia intatta e le discontinuità, in funzione del modello di comportamento che si adotta (Tab. 1).

MODELLAZIONE DELLA FRANA

Scelta della sezione

La scelta dei parametri geometrici e geomeccanici, usati come input nel modello, è funzione delle caratteristiche peculiari del programma di calcolo (Tab. 1). Occorre per prima cosa definire il modello geologico-tecnico del versante sulla base del modello geologico e della caratterizzazione geomeccanica.

Inevitabilmente, i passaggi dal modello geologico a quello geomeccanico, ed infine a quello numerico, richiedono una forte semplificazione ed una serie di assunzioni che, in ogni caso, devono essere congruenti con l'assetto geologico.

In questo lavoro è stata scelta una sezione geologica (pre-frana) quanto più rappresentativa e utile ai fini del-

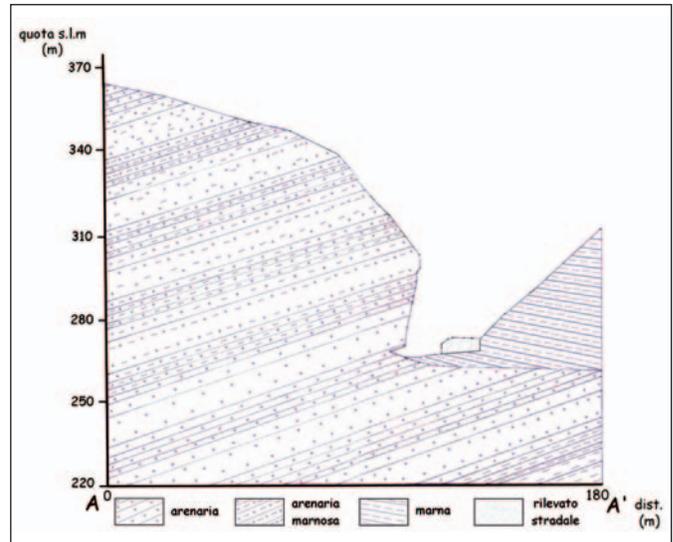


Figura 7 - Sezione geologico-tecnica iniziale per la modellazione con UDEC.

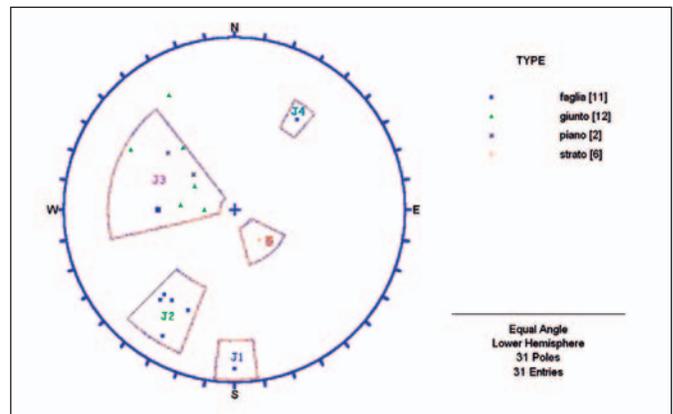


Figura 8 - Rappresentazione stereografica equiareale per poli (emisfero inferiore) delle discontinuità presenti nell'area di frana.

l'analisi di stabilità mediante UDEC della parete in esame (Fig. 7).

Il versante sinistro della sezione considerata è costituito, come detto in precedenza, dalle due Formazioni arenitica e arenitico-marnosa (Formazione di Pantano e Formazione di Cigarellino) del Gruppo di Bismantova, che si spingono al di sotto del T. Savena, con stratificazione a reggipoggio (immersione di 22° verso NW) che mostra, in termini di spessore degli strati, un'alternanza regolare di banconi più e meno potenti; in destra idrografica poggiano, con un contatto discordante, le Marne Selciose della F.ne di Antognola (immersione di 24° verso NNE), caratterizzate da una stratificazione mal definita (strati da molto sottili a medi) e interessate dalla grande frana in destra. Per la ricostruzione dei contatti ci si è avvalsi dei profili di Ferro (2003).

È chiaro che in tale sezione compare la sola stratificazione; ad essa andranno associate tutte quelle famiglie di discontinuità che risultano presenti nel piano della sezione considerata. Per fare ciò sono stati rielaborati i dati disponibili (integrati da nuove misure). Tale elabora-

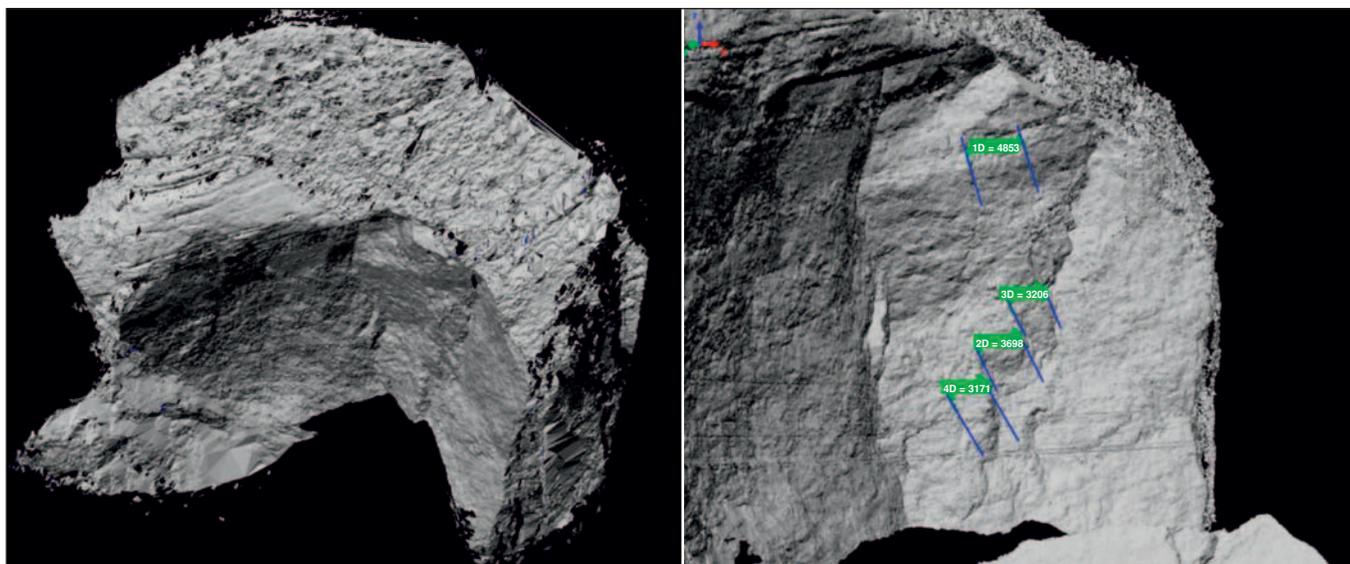


Figura 9 - Modello tridimensionale della frana di Scascoli ottenuto da rilievo laser scanner, con esempio di valutazione quantitativa della spaziatura di un set di discontinuità.

zione porterà al modello geologico da simulare mediante il codice numerico.

Caratteristiche geometriche dell'ammasso roccioso

Dato che le analisi numeriche condotte sull'ammasso roccioso sono a ritroso, si è reso necessario ottenere informazioni sulla situazione pre-frana. La maggior parte dei dati utili per caratterizzare l'ammasso derivano da rilievi eseguiti precedentemente all'evento (Ferro, 2003), integrati da rilievi post-evento.

Ad integrazione dei dati esistenti, sono state eseguite nuove misure relative alle caratteristiche delle discontinuità (orientazione, rugosità e resistenza alla compressione uniaassiale delle pareti dei giunti (JCS)) e relative all'ammasso roccioso (valutazione del GSI, Geological Strength Index).

L'ammasso roccioso corrispondente all'area di frana del 2005 risulta interessato da quattro famiglie di discontinuità (J1, J2, J3, J4) e dalla stratificazione (Fig. 8).

J2 e J4 sono le faglie che hanno svolto un importante ruolo di svincolo per l'evento del 2005, rendendo possibile il distacco del cuneo roccioso franato.

Allo scopo di descrivere in maniera quantitativa le caratteristiche di spaziatura delle famiglie di discontinuità da immettere nel modello numerico, sono stati utilizzati dati provenienti da un rilievo laser scanner ad alta definizione, eseguito nell'area del distacco in un periodo immediatamente successivo all'evento del 2005 (Fig. 9).

L'analisi del modello tridimensionale ha fornito importanti parametri geometrici dei giunti, come orientazione, spaziatura, persistenza delle discontinuità. In aggiunta a tutto ciò, ha confermato la marcata curvatura della superficie di rottura.

In particolare l'osservazione del fianco sinistro della frana (orientazione N305°E) dalle immagini laser scanner permette di analizzare in dettaglio proprio i sistemi di discontinuità che hanno giacitura parallela al versante pre-frana

e che sono quelli che verranno introdotti nel modello numerico. È stato possibile riconoscere come la famiglia di giunti J3, con direzione N210°E, quindi parallela al versante e precedentemente associata ad un unico valore di orientazione (quella del polo medio del sistema), sia in realtà costituita da ben tre sistemi subparalleli tra loro ma con differente inclinazione, che qui verranno in seguito chiamati J3a, J3b, e J3c, il primo subverticale, il secondo a media inclinazione e l'ultimo poco inclinato. Questo risultato evidenzia una delle molte potenzialità della metodologia laser scanner per lo studio delle pareti rocciose. L'analisi dell'immagine da laser scanner ha permesso di stimare anche gli spessori reali della stratificazione.

Geometria del modello in UDEC

Il modello comprende la porzione della valle in sinistra idrografica (quella cioè interessata dal distacco) a cui sono stati assegnati parametri relativi alle arenarie (Bismantova) e la restante parte in destra, a cui sono state associate le caratteristiche delle marne (Fig. 10).

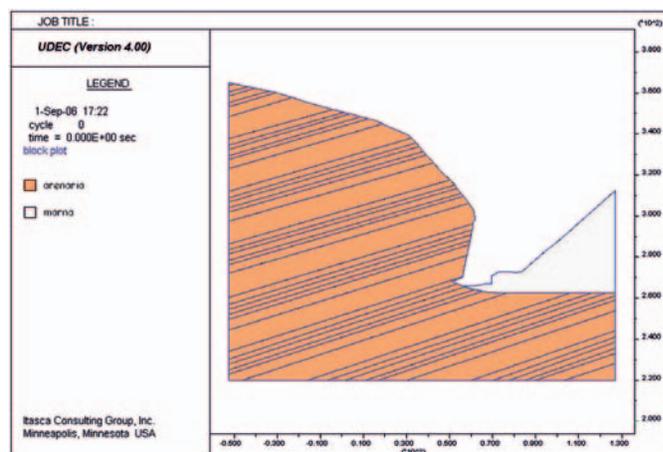


Figura 10 - Geometria del modello (situazione pre-frana) di UDEC, con evidenziati i materiali e la stratificazione.

Nel modello sono stati inseriti i sistemi di discontinuità principali a cui sono associati i rispettivi valori di spaziatura (Fig. 11). Come detto in precedenza, i sistemi di faglie J1 (dir. EW) J2 (dir. N125°E) e J4 (dir. N305°E) non sono stati inseriti nel modello numerico, il primo poiché presenta una giacitura a traverpoggio rispetto al versante, gli altri due perchè la loro direzione risulta parallela alla sezione considerata.

Per la modellazione numerica con UDEC i blocchi sono stati assunti deformabili e il modello è stato discretizzato in zone triangolari alle Differenze Finite.

Per studiare il comportamento a rottura dell'ammasso roccioso sono stati condotti tre tipi di analisi (Fig. 12):

Nelle prime due tipologie di analisi a ritroso, dopo aver condotto la preliminare fase di inizializzazione degli sforzi nel modello, si è proceduto diminuendo gradualmente i parametri di resistenza della coesione della roccia e dei giunti, sino a giungere a condizioni di instabilità

Nel terzo caso invece sono state immesse nel modello le caratteristiche fisico-meccaniche dei giunti e della roccia, stimate secondo le relazioni empiriche disponibili in letteratura (Criterio di Barton) (sempre dopo la fase di inizializzazione degli sforzi) e, sotto l'azione della gravità, si è condotta l'analisi sino al raggiungimento delle condizioni di rottura.

Di seguito, per esigenze di sinteticità, verranno descritte in dettaglio l'analisi a ritroso condotta adottando il cri-

Tabella 2 - Parametri della roccia utilizzati nella fase iniziale della modellazione con UDEC secondo il criterio Hoek & Brown

Parametro	ARENARIA	MARNA
Densità ρ (kg/m ³)	2600	2345
Modulo di taglio G (GPa)	9.23	3.41
Modulo di volume K (GPa)	20	7.36
Coazione c (GSI = 100) (MPa)	12	1.06
Resistenza a trazione σ_t (GSI=100) (MPa)	5	1
Angolo d'attrito ϕ (GSI=100) (°)	58	44
Rapporto di Poisson ν	0.3	0.3
Resistenza a compressione uniassiale UCS (GSI 100) (MPa)	90	-
mb (GSI 100)	17	-
s (GSI 100)	1	-

terio di rottura di Hoek & Brown (Hoek et al., 2002) e quella "convenzionale" (criterio di Barton per le discontinuità).

ANALISI DI STABILITÀ CON UDEC

Analisi a ritroso: modello Hoek & Brown

UDEC mette a disposizione diversi modelli costitutivi per caratterizzare il comportamento dei blocchi. In questa prima analisi sono stati assegnati alla roccia i seguenti parametri elencati nella tabella 2.

Per quanto riguarda le proprietà assegnate ai giunti, UDEC consente tre diversi modelli (Itasca, 2000):

- il *point contact area model*, valido nei casi in cui l'area di contatto tra i blocchi è molto piccola rispetto alle dimensioni dei blocchi stessi;
- il *joint area contact*, valido per blocchi con contatti areali. Questo modello considera un comportamento lineare della rigidità, attrito, coesione, resistenza a trazione e dilatazione, comuni per i giunti;
- infine la versione *residual strength*, che simula un indebolimento dei giunti con la deformazione, mediante perdita di resistenza d'attrito di coesione e/o tensione, all'inizio della rottura per taglio o per tensione.

In questo lavoro è stato adottato per i giunti un comportamento con resistenza residua.

Sequenza della modellazione

Per simulare la rottura progressiva del versante, la modellazione è stata suddivisa in 6 fasi successive, seguendo un metodo di riduzione delle resistenze proposto da Kinakin et al. (2004). Questo prevede che, partendo da una condizione iniziale corrispondente a valori di roccia intatta (GSI=100), si proceda ad una riduzione graduale dei parametri di coesione, angolo d'attrito e resistenza alla trazione della roccia e, parallelamente, ad una progressiva dimi-

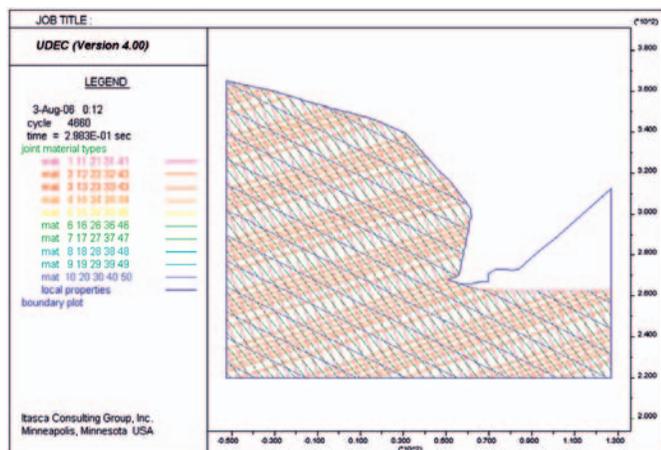


Figura 11 - Sistemi di discontinuità inseriti nel modello.

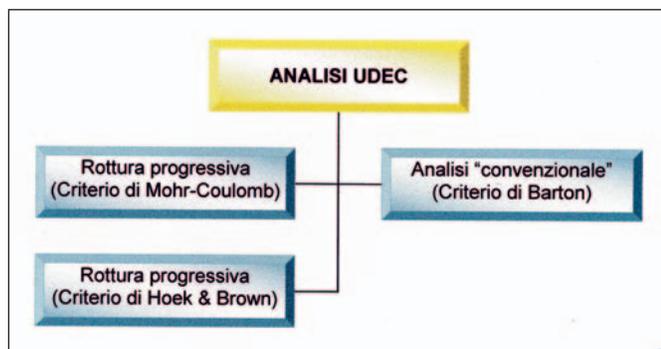


Figura 12 - Tipologie di analisi svolte per lo studio della rottura del versante tramite UDEC.

Tabella 3 - Riduzione dei parametri di resistenza delle arenarie

Parametro	Fase 1 GSI 100	Fase 2 GSI 80	Fase 3 GSI 70	Fase 4 GSI 60	Fase 5 GSI 50	Fase 6 GSI 40
Coesione c (MPa)	12	4.6	2.6	1.6	1.2	0.9
Angolo d'attrito ϕ (°)	58	53	52	51	51	50
Resistenza a trazione σ_t (MPa)	5	2	0.9	0.5	0.1	0.05
Resistenza a compressione uniaassiale UCS (MPa)	90	29.5	16.9	9.6	5.4	2.9
mb	17	8.3	5.8	4	2.8	2
s	1	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001

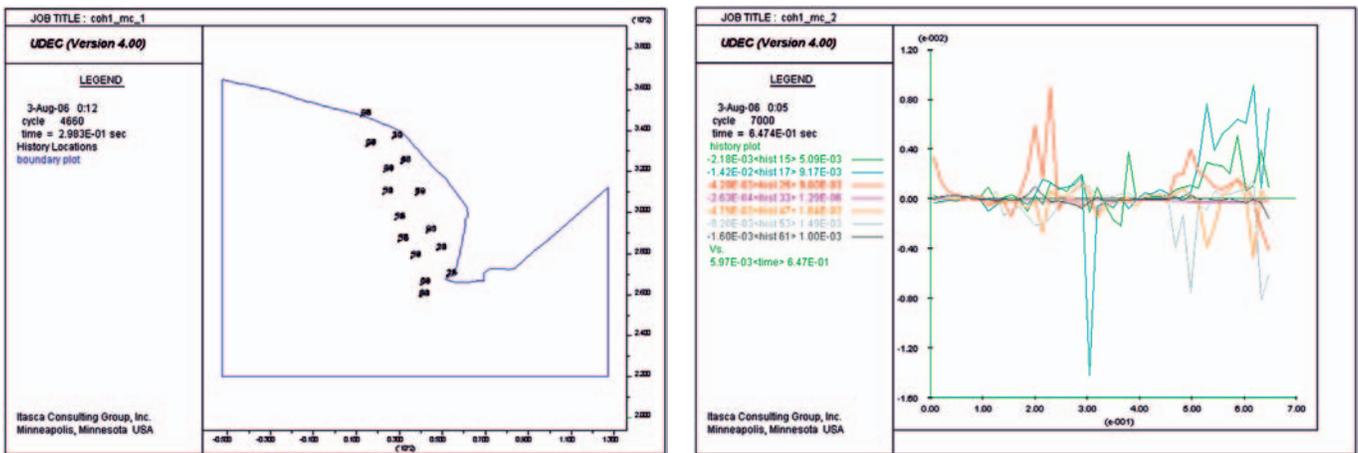


Figura 13 - Punti di monitoraggio ("time histories") fissati nel modello (a sinistra) ed esempio di "time history" relativa alla velocità (a destra).

nuzione della coesione dei giunti, considerata, nella fase iniziale, coincidente con quella della roccia intatta. Il processo di degradazione delle proprietà dell'ammasso roccioso viene dunque simulato mediante una progressiva diminuzione delle resistenze della roccia e dei giunti (relativamente alla frazione di ponti di roccia)

L'aspetto più interessante di questo tipo di analisi consiste nell'osservare il comportamento dell'ammasso roccioso nelle varie fasi e monitorare progressivamente le variazioni degli sforzi e delle deformazioni che agiscono nel modello. Vengono riportati i valori dei parametri in ciascuna fase dello studio in tabella 3.

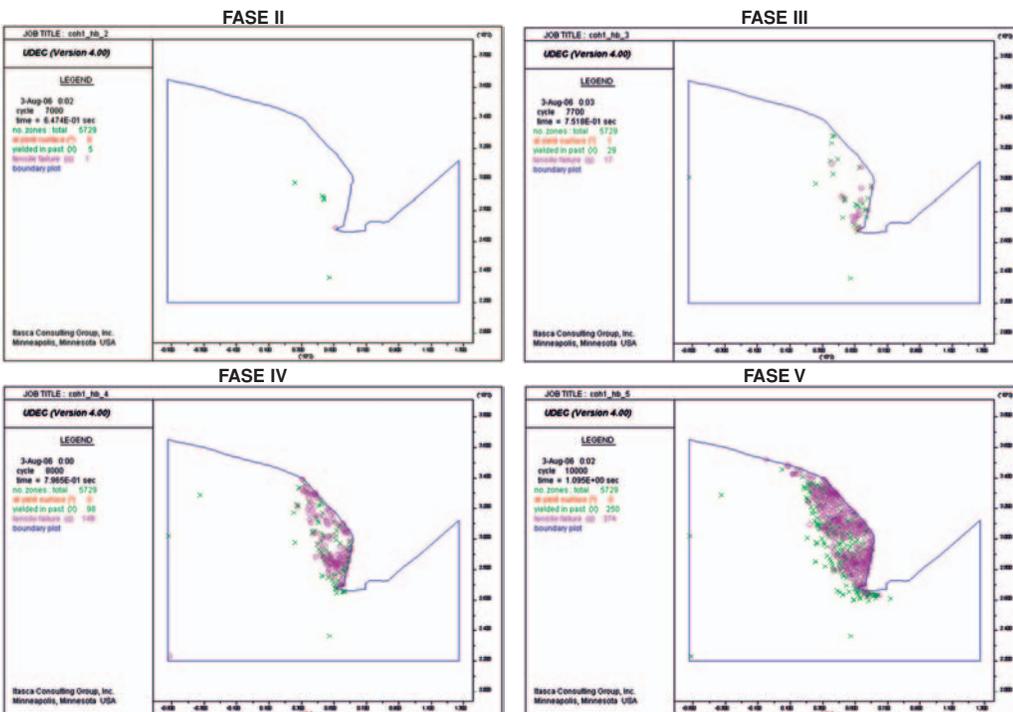


Figura 14 - Evoluzione della plasticizzazione al diminuire progressivo del GSI secondo il criterio di Hoek & Brown.

Risultato dell'analisi

L'osservazione dell'andamento di alcune grandezze (in particolare delle time histories delle velocità e degli spostamenti, Fig. 13) permette di comprendere sia il raggiungimento di condizioni "parziali" di equilibrio del sistema che l'arrivo a condizioni di rottura catastrofica. Uno dei grafici di maggiore utilità per l'analisi del comportamento dell'ammasso è quello relativo alla

"plasticizzazione" delle zone alle Differenze Finite (Fig. 14).

Dall'osservazione di questi grafici si nota come la superficie di rottura inizi a svilupparsi al piede del versante, dove maggiore è la concentrazione degli sforzi e si propaga poi gradualmente verso la porzione superiore dell'ammasso roccioso, descrivendo un percorso pressoché curvilineo. Di seguito vengono riportati i grafici relativi agli spostamenti verticali e orizzontali subiti dall'am-

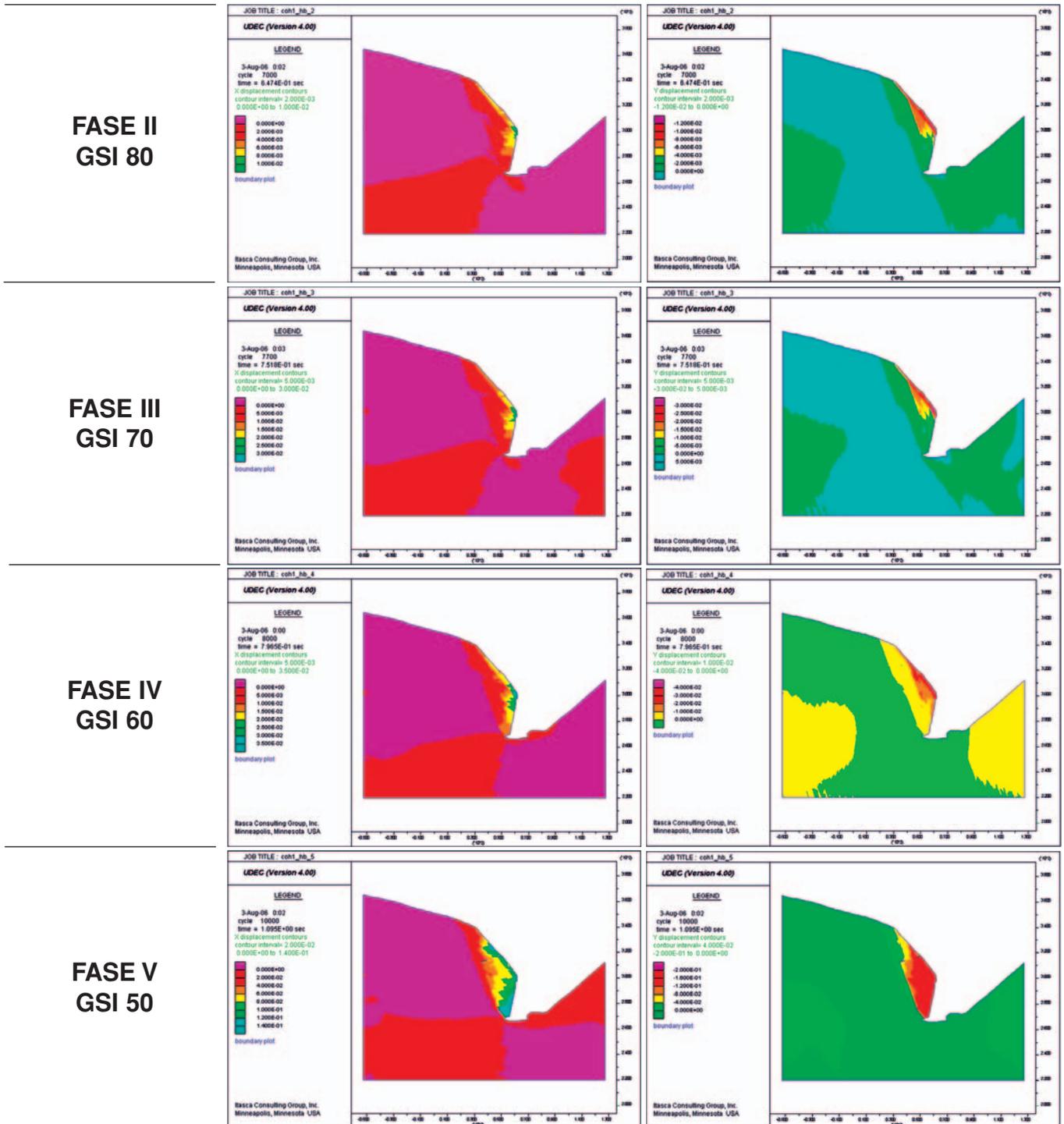


Figura 15 - Evoluzione degli spostamenti orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) al diminuire progressivo del GSI secondo il criterio di Hoek & Brown.

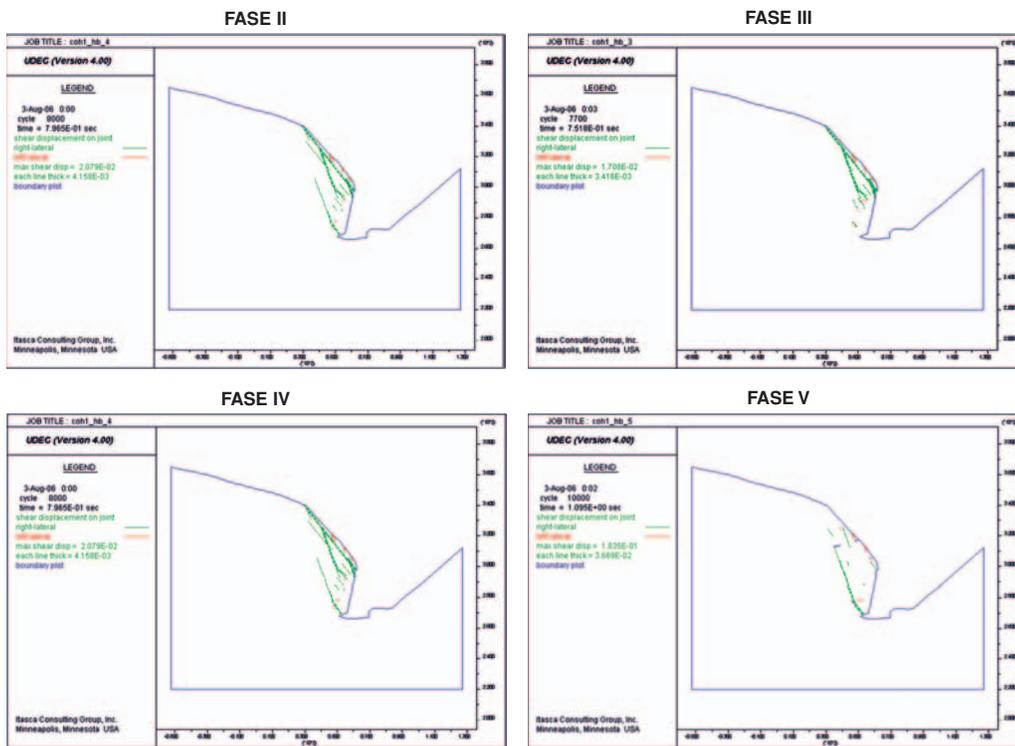


Figura 16 - Evoluzione degli spostamenti di taglio al diminuire progressivo del GSI secondo il criterio di Hoek & Brown.

masso roccioso nel tempo (Fig. 15). Questi si rivelano essenziali per individuare con accuratezza la porzione di versante soggetta a instabilità e per poter stimare, seppur approssimativamente, il volume di materiale franato. UDEC permette, tramite differenti colorazioni, di discriminare in modo rapido le varie zone dell'ammasso roccioso in base al loro grado di spostamento e quindi di individuare quelle a maggior rischio di instabilità.

Analizzando questi grafici è possibile notare come inizialmente il volume di materiale roccioso coinvolto da instabilità sia decisamente ridotto. Successivamente, col procedere della degradazione e dello sviluppo della superficie di rottura, esso aumenta di dimensioni fino a raggiungere, nelle fasi finali, un'estensione paragonabile a quella del cuneo roccioso realmente mobilizzatosi nell'evento franoso del 2005.

Esaminando il comportamento dei giunti attraverso i grafici relativi agli spostamenti di taglio lungo le discontinuità (Fig. 16), si può notare come la porzione di ammasso roccioso che va man mano delineandosi sia limitata geometricamente, ma solo in parte, dalle discontinuità presenti nell'ammasso. Gli spostamenti di taglio avvengono lungo giunti che appartengono a diversi sistemi di discontinuità e l'entità degli spostamenti aumenta progressivamente a partire dalla porzione superiore del versante. Tale configurazione indica che nessuno dei sistemi presenti ha giocato un ruolo dominante nella cinematica del fenomeno: ciò equivale ad affermare che la frana del 2005 non possa essere compresa tra quelle definite come "frane a controllo strutturale", guidate cioè dalle caratteristiche di una discontinuità pervasiva e favorevole all'instabilità (es. scivolamento planare o a cuneo), ma che il comportamento

meccanico dell'ammasso roccioso sia assimilabile a quello di un continuo-equivalente.

L'ultima serie di grafici (Fig. 17) si riferisce alla simulazione (esagerata), ottenibile mediante un'apposita "routine" di UDEC, del movimento dei blocchi col passare del tempo e al diminuire della resistenza dell'ammasso. Le utili informazioni da essi ricavabili riguardano, in primo luogo, il volume di materiale roccioso mobilizzato che, anche in questo caso, risulta essere paragonabile a quello realmente franato; inoltre il secondo aspetto molto interessante è riferito alla forma della superficie di scivolamento che, come risulta ben evidente dalle ultime due fasi della simulazione, presenta un chiaro e netto andamento curvilineo e concavo.

I risultati ottenuti confermano in modo evidente l'affidabilità del modello numerico realizzato con UDEC. Esso infatti, oltre ad aver individuato con precisione l'area di potenziale instabilità, è stato in grado di prevederne dimensione e forma in modo assolutamente realistico, come dimostra in particolare il confronto tra il grafico relativo agli spostamenti verticali e la foto della superficie di rottura scattata pochi giorni dopo l'evento franoso (Fig. 18).

Analisi "convenzionale"

Questa sequenza di modellazione, a differenza delle precedenti, condotte secondo uno schema di calcolo finalizzato alla comprensione dei meccanismi che hanno portato all'instabilità nel versante, è stata svolta a scopo "previsionale": in pratica, ci si è posti nelle condizioni di dover valutare la stabilità del versante in studio, noti solamente dati dell'ammasso in condizione pre-frana. Sono stati immessi parametri relativi sia alla roccia che ai giunti, sti-

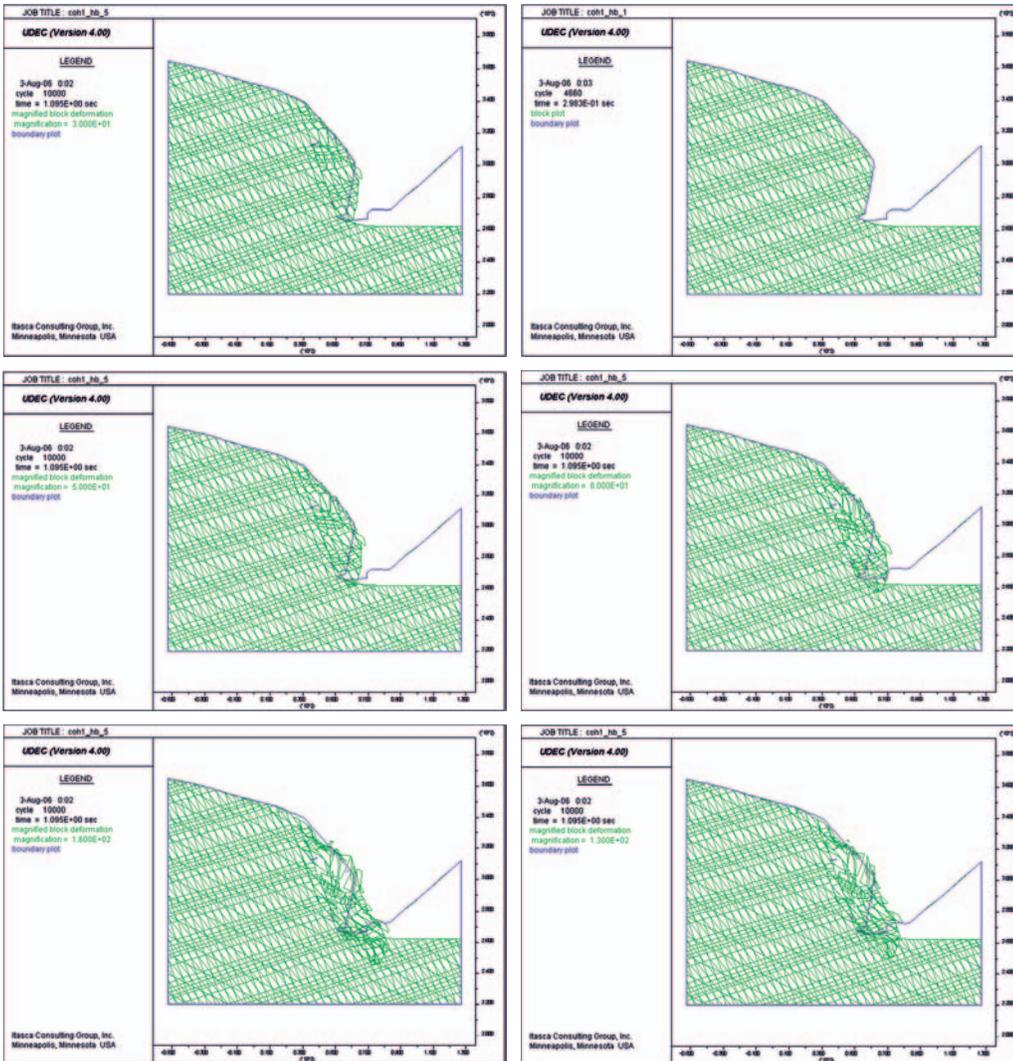


Figura 17 - Simulazione (esagerata) del movimento dei blocchi ottenuta mediante UDEC.

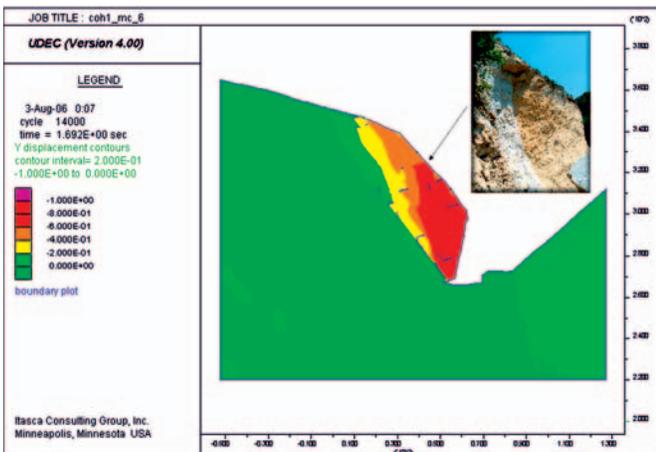


Figura 18 - Confronto tra la superficie di rottura prevista dal modello numerico e quella reale.

mati sulla base delle relazioni empiriche esistenti ed una sequenza convenzionale di calcolo che non applicasse il metodo di riduzione delle resistenze. La qualità dell'ammasso roccioso è stata valutata utilizzando la classificazione GSI. Seguendo le indicazioni di alcuni autori (Marinos et al., 2005) è stato considerato inizialmente un

intervallo di valori, in questo caso 53-57, dopodiché per la modellazione si è scelto il valore medio 55.

La Tab. 4 riassume i valori dei parametri assegnati alla roccia.

Ai giunti sono stati assegnati i parametri calcolati mediante il criterio di Barton in seguito alle prove in situ eseguite con il martello di Schmidt e il pettine di Barton (Tab. 5).

Al modello (dopo la fase di inizializzazione degli sforzi) sono stati assegnati i valori sopra riportati. Sotto l'azione della gravità, il modello, dopo un adeguato

Tabella 4 - Parametri della roccia utilizzati nell'analisi previsionale

Parametro	ARENARIA	MARNA
Densità ρ (kg/m ³)	2600	2345
Modulo di taglio G (GPa)	9.23	4.41
Modulo di volume K (GPa)	20	7.36
Coesione c (MPa)	1.34	1.06
Resistenza a trazione σ_t (MPa)	0.17	1
Angolo d'attrito ϕ (°)	55	44
Rapporto di Poisson ν	0.3	0.3

Tabella 5 - Parametri dei giunti utilizzati nell'analisi previsionale

Set	Angolo d'attrito di picco (ϕ_p) (°)	Angolo d'attrito residuo (ϕ_r) (°)	Coesione (c) (MPa)	Rigidezza di taglio (K_{ss}) (GPa/m)	Rigidezza normale (K_{ni}) (GPa/m)	Angolo di dilatanza (d) (°)
J3a	35	30	0.08	3.51	35.1	4.8
J3b	36	25	0.1	3.40	34	5.7
J3c	36	30	0.09	3.51	35.1	5.5
ST	35	27	0.1	3.33	33.3	5.1

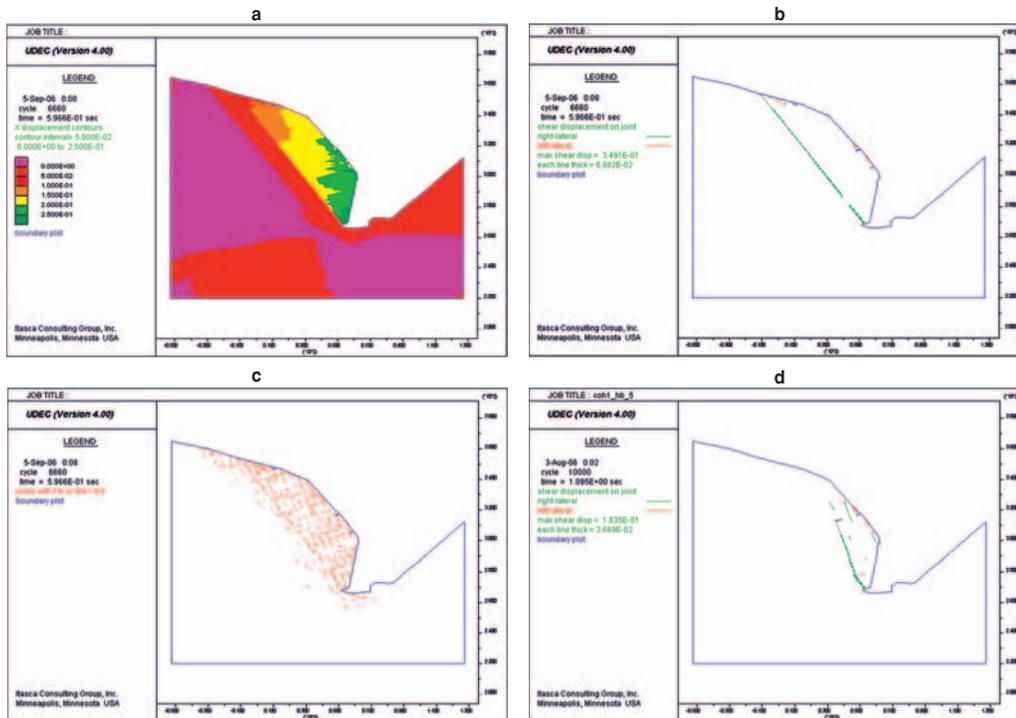


Figura 19 - Grafici relativi agli spostamenti orizzontali (a), di taglio (b), alle aperture dei giunti (c) e al movimento dei blocchi (d).

numero di cicli, giunge a rottura. Vediamo con quali caratteristiche.

Risultato dell'analisi

In questo caso, UDEC fornisce come risultato uno scioglimento planare dei blocchi lungo il set di discontinuità J3a, quello cioè con inclinazione intermedia tra i tre sistemi di giunti presenti nell'ammasso roccioso. Il dato davvero interessante e significativo consiste nel fatto che il software non individua in questo caso il cinematico e la forma della reale superficie della frana (curvilinea e di raccordo tra più famiglie) (Fig. 19 a e b), e l'area potenzialmente instabile è data da un volume di roccia superiore a quello realmente franato (Fig. 19 c e d).

METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

Caratteristiche di Phase2

Phase2 è un programma bidimensionale agli Elementi Finiti. Viene utilizzato per risolvere un'ampia gamma

di problemi di ingegneria civile, geotecnica e mineraria. Nell'analisi numerica agli elementi finiti l'ammasso roccioso è trattato come un sistema continuo e viene studiata la sua risposta a carichi statici o dinamici. I vantaggi di questo tipo di analisi rispetto ai modelli all'equilibrio limite consistono principalmente nel fatto che:

- 1) non è necessario specificare alcuna superficie di rottura;
- 2) si possono includere nell'analisi sia il comportamento elastico che quello plastico.

La caratteristica fondamentale del metodo agli elementi finiti è di suddividere la geometria del modello in esame in porzioni discrete chiamate appunto *elementi finiti*. Questi, che solitamente hanno una forma semplice (triangolare o quadrata), sono collegati fra di loro da *nodi* in condivisione. L'insieme di elementi finiti e nodi è conosciuto con il nome di *mesh* (Fig. 20). Questa discretizzazione del modello viene applicata dopo aver assegnato le proprietà ai materiali che lo

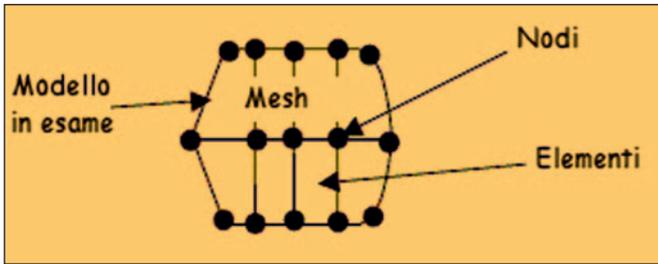


Figura 20 - Esempio di discretizzazione di un modello nell'analisi agli elementi finiti.

costituiscono. In Phase2 possono essere considerati vari modelli di comportamento del materiale e le proprietà richieste come input per l'analisi naturalmente varieranno a seconda del criterio di rottura scelto.

Una volta assegnate queste proprietà e aver discretizzato il modello, si procede con la cosiddetta tecnica della riduzione delle resistenze al taglio (SSR), che consente di analizzare la stabilità dell'ammasso roccioso in esame al diminuire delle condizioni di resistenza.

I concetti e i passaggi alla base del metodo SSR sono molto semplici. Il fattore di sicurezza di un versante stabile viene determinato nelle tre fasi seguenti:

- 1) viene creato, come detto sopra, un modello agli elementi finiti del versante;
- 2) si riducono di un fattore scelto gli involuipi di resistenza al taglio del materiale del versante;
- 3) viene rielaborata l'analisi con i nuovi parametri di resistenza ridotti.

Si procede con le riduzioni delle resistenze fino a che le elaborazioni del modello non convergono ad un risultato. Il fattore di riduzione critico in corrispondenza del quale inizia ad aver luogo la "non convergenza" viene considerato il fattore di sicurezza. Per questo valore avverrà la rottura del versante.

In Phase2 il metodo SSR può essere applicato sia in modo automatico, mediante un'apposita "routine", oppure suddividendo la modellazione in varie fasi (*stages*) ad ognuna delle quali verranno assegnati parametri di resistenza dell'ammasso sempre più bassi, secondo un

Tabella 6 - Parametri iniziali dell'ammasso roccioso utilizzati in Phase2 nell'analisi Hoek & Brown

Parametro	ARENARIA	MARNA
Resistenza a compressione uniaassiale σ_{ci} (MPa)	90	-
Peso dell'unità di volume γ (MN/m ³)	0.024	0.023
Modulo di Young E (GPa)	24	10.6
Rapporto di Poisson ν	0.3	0.3
Angolo d'attrito di picco ϕ_p (°)	58	44
Angolo d'attrito residuo ϕ_r (°)	34	35
Coesione di picco c_p (MPa)	12	1.06
Coesione residua c_r (MPa)	0	0
m_b di picco	17	-
m_b residuo	1.1	-
s di picco	1	-
s residuo	0.0002	-
a di picco	0.5	-
a residuo	0.5	-

criterio scelto da chi sta effettuando l'analisi. Nel presente lavoro si è deciso di usare entrambe le metodologie di indagine.

ANALISI DI STABILITÀ CON PHASE2

Scelta della sezione

La scelta della sezione da utilizzare per la modellazione della frana di Scascoli con Phase2 è stata effettuata seguendo le indicazioni presenti in letteratura (Eberhardt et al., 2004), che consigliano di estendere il modello considerato nell'analisi agli Elementi Distinti, per una migliore definizione dello stato tensionale. La traccia della sezione scelta è dunque la medesima considerata in UDEC però molto più estesa arealmente (Fig. 21).

Modelli di comportamento assegnati alla roccia

Nello studio della stabilità del versante interessato dalla frana di Scascoli sono state condotte, mediante Phase2, due tipologie di analisi: una, associando ai

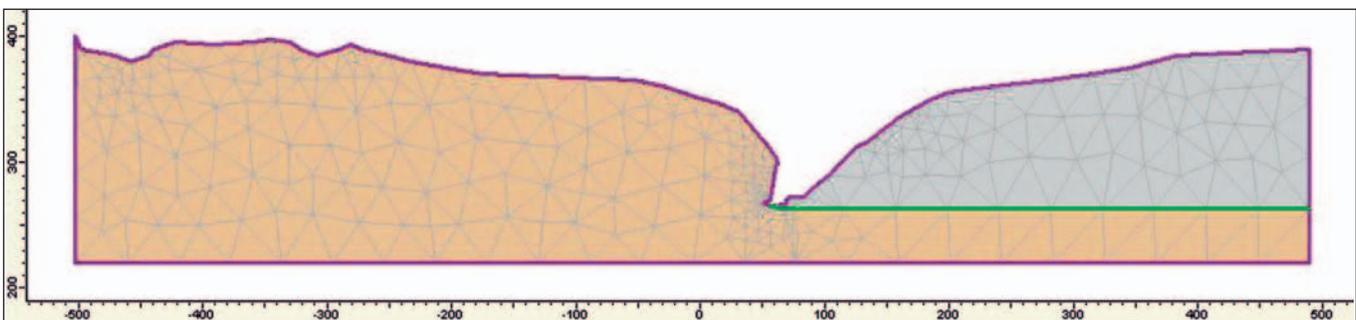


Figura 21 - Modello discretizzato ottenuto con Phase2.

Tabella 7 - Riduzione dei parametri di resistenza delle arenarie

Parametro	Fase 1 GSI 100	Fase 2 GSI 80	Fase 3 GSI 70	Fase 4 GSI 60	Fase 5 GSI 50	Fase 6 GSI 40
Resistenza a compressione uniaassiale σ_{ci}	90	29.5	16.9	9.6	5.4	2.9
mb	17	8.3	5.8	4	2.8	2
s	1	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
a	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

materiali geologici un modello di comportamento Mohr-Coulomb, l'altra, un modello di comportamento Hoek & Brown. In entrambe le elaborazioni non sono state inserite nel modello le discontinuità. Il materiale interessato dalla frana è stato considerato, per semplificazione, interamente costituito di arenaria, mentre alla porzione in destra idrografica del fiume Savena è stata attribuita una composizione marnosa. Al modello è stato applicato uno stato tensionale dovuto alla sola gravità.

Anche in questo caso, per esigenze di sinteticità, verrà di seguito trattata in dettaglio la sola analisi mediante il criterio Hoek & Brown, la quale comunque ha fornito risultati analoghi alla modellazione svolta secondo il criterio Mohr-Coulomb.

Analisi Hoek & Brown

I parametri dell'ammasso roccioso richiesti da Phase2 per lo studio della stabilità di un versante secondo il criterio Hoek & Brown sono elencati nella tabella 6 con i relativi valori scelti per l'analisi.

Sequenza della modellazione

In Phase2, dopo aver assegnato le proprietà ai materiali e aver discretizzato il modello, è stato applicato il metodo di riduzione delle resistenze alle arenarie, secondo le due metodologie precedentemente descritte, allo scopo di simulare la rottura del versante. Il primo metodo applicato (Kinakin et al., 2004) è basato sulla riduzione progressiva del valore di GSI, partendo da un valore iniziale di questo indice corrispondente ad un ammasso roccioso intatto e non alterato (GSI=100). La modellazione è stata effettuata in sei fasi successive, riepilogate in Tab. 7, grazie ad un'apposita funzione presente in Phase2 che consente di definire il fattore di riduzione di ciascun parametro per ogni fase della sequenza.

La seconda metodologia adottata per ottenere una riduzione progressiva delle proprietà di resistenza dell'ammasso roccioso ha utilizzato, come detto sopra, un'opzione da poco implementata in Phase2 (analisi SSR) che esegue il calcolo automaticamente e fornisce un fattore di riduzione critico (SRF) equivalente al

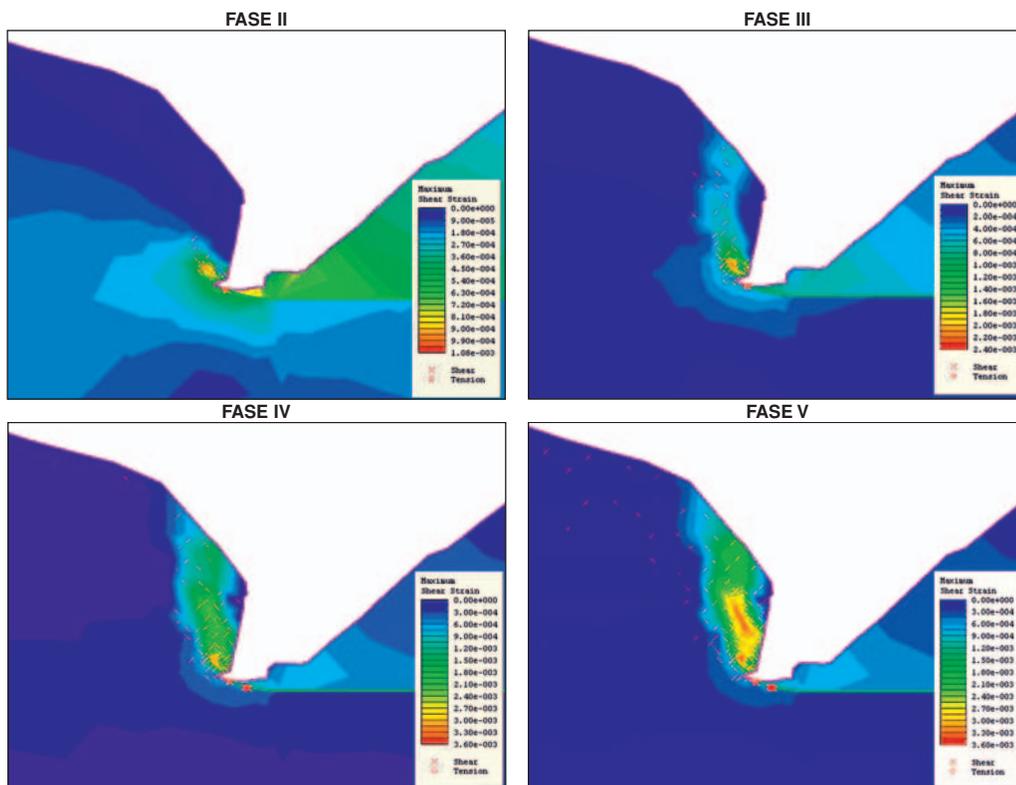


Figura 22 - Evoluzione degli sforzi di taglio al diminuire progressivo del GSI dell'ammasso roccioso secondo il criterio di rottura di Hoek & Brown; i cerchietti e le crocette indicano rispettivamente i punti in cui viene raggiunta la rottura per trazione o per taglio.

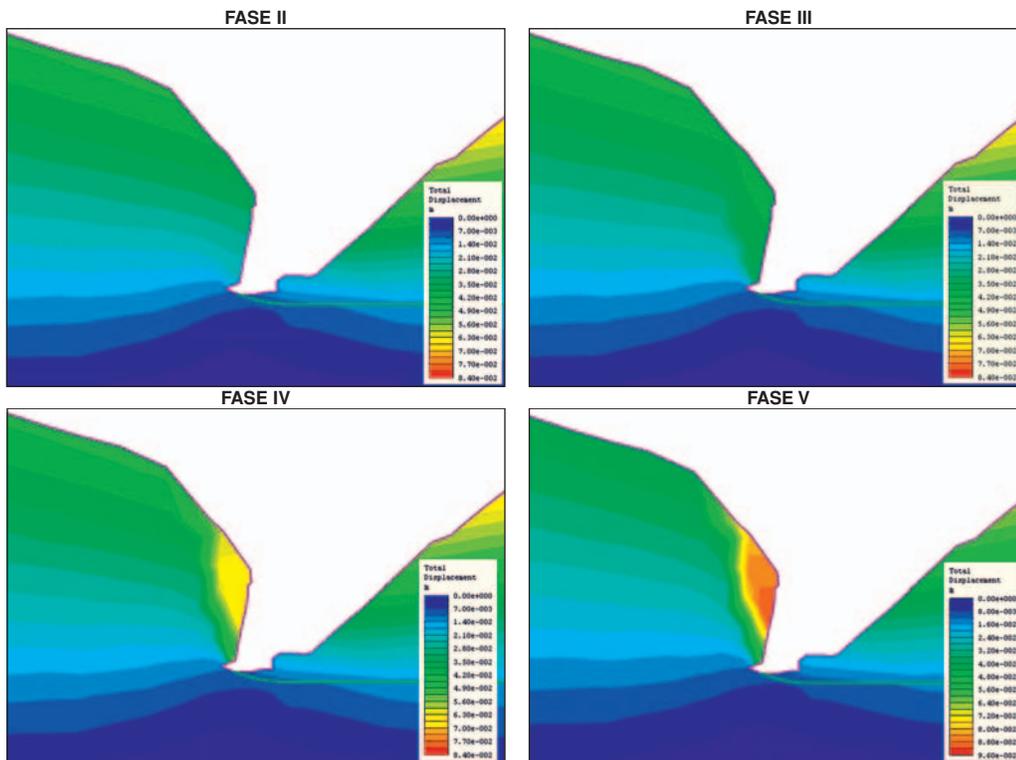


Figura 23 - Evoluzione degli spostamenti totali al diminuire progressivo del GSI dell'ammasso roccioso secondo il criterio di rottura di Hoek & Brown.

fattore di sicurezza del versante (Chang et al., 2005). Questo procedimento è vantaggioso poiché, oltre ad essere svolto in modo del tutto automatico, non richiede la suddivisione della modellazione in fasi. Le condizioni di partenza corrispondono a quelle della roccia intatta e, una volta terminato il calcolo mediante analisi SSR, il software mostra le condizioni del versante relative a vari valori di SRF, indicando quello critico corrispondente alla rottura. Questo valore viene trovato non appena l'algoritmo del programma non converge entro un numero massimo di iterazioni precedentemente definito, il che significa che gli stati di stress non soddisfano contemporaneamente il criterio di rottura e l'equilibrio globale. In questa analisi sono state utilizzate 1000 iterazioni, con un valore di tolleranza pari a 0.002.

Risultato dell'analisi

Il risultato della modellazione è la formazione di una superficie di rottura curvilinea che, partendo dal piede della parete in roccia, si propaga progressivamente verso monte, con una curvatura ed un volume di materiale coinvolto coincidente con quello realmente mobilizzato nell'evento del 2005. Si è giunti a questo tipo di risultato sia con il metodo di riduzione del GSI sia con l'analisi SSR svolta in automatico da Phase2.

Al fine di evidenziare il raggiungimento delle condizioni critiche per il versante, viene mostrata nelle figure 22 e 23, l'evoluzione delle deformazioni nell'ammasso roccioso.

CONCLUSIONI

L'applicazione della modellazione numerica all'evento franoso avvenuto il 12 marzo 2005 nelle Gole di Scascoli ha permesso di descrivere in modo accurato il meccanismo di rottura che ha coinvolto l'ammasso roccioso. L'utilizzo del metodo di riduzione progressiva delle caratteristiche di resistenza (sia della roccia che dei giunti) (Kinakin et al., 2004) applicato a modelli numerici bidimensionali sia agli Elementi Distinti che agli Elementi Finiti ha fornito risultati analoghi e congruenti, sia in termini di risposta deformativa del sistema alle sollecitazioni che in termini di volume mobilizzato a rottura.

L'osservazione dell'andamento degli sforzi e delle deformazioni al progredire della degradazione della roccia (partendo da condizioni fisico-meccaniche caratteristiche della roccia intatta non alterata), indica come, inizialmente, le sollecitazioni, sia a taglio che a trazione, si concentrano al piede del versante, soprattutto nel punto di sottoescavazione da parte del torrente Savena, per poi propagarsi progressivamente verso la porzione superiore del pendio.

Il superamento delle resistenze della roccia porta alla generazione di una superficie di rottura caratterizzata (sia nella modellazione eseguita con UDEC che in quella elaborata con Phase2) da un andamento marcatamente curvilineo e concavo, con un'inclinazione che passa da molto ridotta nella porzione inferiore del versante, a subverticale in quella superiore.

In particolare, l'analisi condotta con UDEC (metodo

dedicato all'analisi di mezzi discontinui) evidenzia come nessuno dei sistemi di discontinuità presenti abbia giocato un ruolo dominante nella cinematica del fenomeno. Tale risultato contribuisce ad affermare che la frana del 2005 non può essere compresa tra quelle definite come "frane a controllo strutturale", guidate cioè dalle caratteristiche di una discontinuità pervasiva e favorevole all'instabilità (es. scivolamento planare o a cuneo), ma che il comportamento meccanico dell'ammasso roccioso sia assimilabile a quello di un continuo-equivalente.

La marcata concavità della superficie di rottura generata dai modelli risulta estremamente simile, per forma e dimensioni, a quella rilevata.

Il meccanismo di rottura progressiva all'interno dell'ammasso risulta quindi controllato dalla rottura a trazione attraverso i ponti di roccia intatta e solo favorito dall'orientazione delle discontinuità naturali presenti nell'ammasso.

L'isolamento e successivo distacco del cuneo roccioso crollato è stato guidato, in maniera inequivocabile, dalla presenza di due faglie subverticali localizzate in destra e sinistra del corpo di frana, che hanno agito da svincoli laterali.

La modellazione numerica non ha preso in considerazione le condizioni idrauliche del versante, ipotizzando quindi l'assenza di una falda e di eventuali pressioni dell'acqua all'interno delle discontinuità. Tale assunzione (in realtà semplificatoria anche in termini di definizione del modello numerico) parte da considerazioni sul regime delle precipitazioni che hanno caratterizzato il periodo precedente il 12 marzo 2005 (14 mm di pioggia nei 10 giorni precedenti) e dalle discrete caratteristiche di permeabilità delle arenarie. Tuttavia, in analisi successive, potrebbero essere presi in considerazione gli effetti della forte nevicata che ha interessato l'area nel marzo 2005 e che ha visto un rapido innalzamento delle temperature proprio nei giorni immediatamente precedenti l'evento.

In seguito ai risultati ottenuti dalle analisi, sono state formulate le seguenti considerazioni :

1. La comprensione dei meccanismi che hanno portato alla rottura del 12 marzo 2005 può essere raggiunta solo attraverso l'utilizzo di codici-modellazioni numeriche che includono il comportamento deformativo dell'ammasso; convenzionali analisi all'equilibrio limite non permettono di contemplare né deformazioni e spostamenti dei blocchi uno rispetto all'altro, né meccanismi di rottura complessi che coinvolgono più tipi di cinematismi.
2. L'analisi realizzata nel presente lavoro (sia relativa alla modellazione FEM che a quella DEM) mette in evidenza, come risultato, il distacco di una porzione rocciosa che presenta un volume coinci-

dente con quello realmente crollato nell'evento franoso in esame ed una superficie di rottura di forma e dimensioni analoghe a quelle reali. Si evidenzia, quindi, la potenzialità dell'utilizzo di tecniche di riduzione delle resistenze nell'ambito della modellazione numerica dei fenomeni franosi "complessi".

3. In relazione a quanto sopra esposto, l'analisi è stata condotta anche in una condizione "previsoriale", con procedure di modellazione numerica "convenzionali" (che non includono il processo di rottura progressiva). Il risultato è sempre la mobilitazione di un volume roccioso coincidente con quello realmente coinvolto, ma con un meccanismo di rottura ascrivibile al solo scivolamento su superficie planare e quindi non corrispondente alla realtà. Tuttavia i softwares impiegati risultano in grado di evidenziare condizioni di potenziale instabilità del versante.

Per l'individuazione e la caratterizzazione delle famiglie di discontinuità si è rivelato di fondamentale importanza il rilievo effettuato mediante laser scanner terrestri subito dopo l'evento franoso, poiché, oltre a fornire un'accurata topografia ad alta risoluzione del versante in esame, ha consentito di valutare in maniera quantitativa la spaziatura dei vari sistemi di giunti. In particolare, analizzando la parete NE sul modello elaborato dai dati del laser scanner, risultano ben evidenziati i sistemi di discontinuità con direzione N210°E, che risultano essere tre, non persistenti e con inclinazioni variabili da subverticale, a intermedia, fino ad arrivare a bassa inclinazione, tutti in condizione di franapoggio rispetto al versante originale. I dati di orientazione delle famiglie di discontinuità, che erano disponibili da rilievi pre-frana, indicavano invece l'esistenza di una sola famiglia con direzione N210°E, il cui polo medio rappresentativo risultava in condizione di franapoggio meno inclinato del pendio. Ecco dunque che, come detto, solo attraverso il rilievo laser scanner è stato possibile definire con accuratezza le caratteristiche di orientazione e spaziatura dei vari sistemi, immettendole poi nel modello agli Elementi Distinti.

Dai risultati delle modellazioni numeriche condotte con i softwares citati in precedenza è emerso quindi che questi ultimi non solo si rivelano utilissimi strumenti per analisi di stabilità a ritroso, consentendo studi di dettaglio dei vari tipi di cinematismo, ma anche che possono essere impiegati come efficaci ed affidabili mezzi di previsione di potenziali instabilità future in ammassi rocciosi. Questo, come è ovvio, rappresenta un elemento di fondamentale importanza, poiché può permettere di individuare e monitorare aree a rischio, rendendo così possibili interventi a scopo preventivo.

RINGRAZIAMENTI

L'Autore desidera ringraziare la Prof.ssa M. Ghirotti (Università di Bologna), il Prof. R. Genevois e il dott. G. Teza (Università di Padova) per i preziosi suggerimenti.

BIBLIOGRAFIA

- AMOROSI A., COLALONGO M. L. & VAIANI S. C. (1996) - *Revisione litostratigrafica dell'unità Bismantova (Miocene epiligure, Appennino settentrionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 115, pp. 355-367.
- BJERRUM L. (1967) - *Progressive failure in slopes of over-consolidated plastic clay and clay shales*. J Soil Mech Foundat Div ASCE, 93 (SM5), pp. 1-49.
- CHANG YUAN-LIANG, HUANG TIEN-KUEN (2005) - *Slope stability analysis using strength reduction technique*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 28, No. 2, pp. 231-240.
- CRUDEN D. M. & VARNES D. J. (1996) - *Landslides Types and Processes*. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA, pp. 36-75.
- CUNDALL P. A. (1971) - *A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system*. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, vol. 1, pp. 2-8.
- CURRAN J. H., OFOEGBU G. I. (1993) - *Modelling discontinuities in numerical analysis*. Comprehensive Rock Engineering, vol. 1 "Fundamentals", chap. 18, pp. 443-467. John A. Hudson Editor.
- EBERHARDT E., STEAD D., COGGAN J.S. (2004) - *Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes: the 1991 Randa rockslide*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, pp. 69-87.
- EINSTEIN HH., VENEZIANO D., BAECHER GB., O'REILLY KJ. (1983) - *The effect of discontinuity persistence on rock slope stability*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 20 (5), pp. 227-236.
- FERRO S. (2003) - *La pericolosità per frana nelle Gole di Scascoli (Val Savena, Appennino bolognese)*. Tesi di laurea, Università di Bologna.
- GOTTARDI G., MARCHI G., LANDUZZI A., BENEDETTI G. (2004) - *Sui complessi fenomeni di instabilità presso le gole di Scascoli (Appennino settentrionale, Bologna)*. X Congresso Interpraevent, Riva del Garda (TN), 2004.
- HAJIABDOLMAJID V., KAISER PK. (2002) - *Slope stability assessment in strain-sensitive rocks*. In: EUROCK 2002, Proceedings of the ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions, Funchal, Madeira, pp. 237-244.
- HOEK E., CARRANZA-TORRES C., CORKUM B. (2002) - *Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition*. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267-271.
- ITASCA (2006) - UDEC, dati tecnici sul software. Disponibili online al sito <http://www.itascacg.com/udec.html>
- JENNINGS JE. (1970) - *A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mines*. In: Planning Open Pit Mines, Proceedings, Johannesburg, 21 (2), pp. 87-102.
- KINAKIN D., STEAD D., (2005) - *Analysis of the distributions of stress in natural ridge forms: implications for the deformation mechanism of rock slopes and the formation of sackung*. Geomorphology, 65, pp. 85-100.
- LANDUZZI A. & BERNAGOZZI G., (1996) - *Geologia e geomorfologia della frana di Scascoli (Appennino settentrionale, Bologna, Italia)*. V Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Cagliari, 1996.
- MARINOS V., MARINOS P., HOEK E. (2005) - *The geological strength index: applications and limitations*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- MARTIN CD., KAISER PK. (1984) - *Analysis of rock slope with internal dilation*. Can Geotech J, 21 (4), pp. 605-620.
- ROCSCIENCE (2006) - PHASE2, dati tecnici sul software. Disponibili online al sito <http://www.rocscience.com/products/Phase2.asp>
- TERZAGHI K. (1962) - *Stability of steep slopes on hard unweathered rock*. Géotechnique, 12, pp. 251-270.