

Processi gravitativi di instabilità in rocce molto fratturate: il metodo alle differenze finite in un caso applicativo nella provincia della Spezia

Giacomo D'Amato Avanzi¹, Daria Marchetti^{1*}, Alberto Pochini¹, Alberto Puccinelli¹,
Nicola Sciarra²

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa - damato@dst.unipi.it, pochini@dst.unipi.it, pucci@dst.unipi.it

²Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio, Università di Chieti - nsciarra@unich.it

*Autore corrispondente: Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa. Via S. Maria, 53. 56126 Pisa Tel.050/2215725
Fax.050/2215800, marchettid@dst.unipi.it,

Gravitational instability processes in densely fractured rock masses: the finite-difference method applied to the Marinasco-Strà slope near La Spezia (Italy)

ABSTRACT: The Marinasco-Strà village is involved in wide instability phenomena in rock masses, determining a high landslide risk. In this area a geological-technical, kinematic and geomechanical characterization of the landslides and rock masses was carried out. Moreover, a monitoring system concurred in collecting important data on rainfall, piezometric response and deformation of the slopes. This integrated approach allowed the realization of a model of the landslide mass, regarded as a multiphase system and based on the physical-mechanical characterization of soil and rock.

The determination of the state of stress and deformation and the location of actual or possible zones of failure inside the slope were among the main aims. In particular, the finite-difference method was applied, in order to estimate the stress-strain response of the slope to the variations of tensional state; in fact, this method fits better the instability phenomena in intensely fractured rock masses. A deformation model, consistent with the results of the investigations, was performed. In the analysed model, the shear strain concentrates along the main discontinuities deriving from plastic deformation of the mass causing the slope failure.

Key terms: landslide, DGSD, numerical modelling, La Spezia, northern Apennine

Termini chiave: frana, DGPV, modellazione numerica, La Spezia, Appennino Settentrionale

Riassunto

Il paese di Marinasco è interessato da vasti fenomeni di instabilità dovuti alla presenza di ammassi rocciosi molto fratturati, che determinano una situazione ad alta pericolosità di frana. In quest'area è stata effettuata una caratterizzazione geologico-tecnica delle frane e degli ammassi rocciosi attraverso successive campagne di indagini. La realizzazione e messa a punto di un sistema di monitoraggio ha consentito, inoltre, di raccogliere dati importanti sulle precipitazioni, sulla risposta piezometrica e sulle deformazioni dei pendii. Questo approccio integrato ha permesso la realizzazione di un modello del sottosuolo, inteso come mezzo multifase e definito in base alla caratterizzazione in termini fisico-meccanici dei terreni e delle rocce. Gli obiettivi sono stati la determinazione dello stato di stress e deformazione, e l'individuazione di zone di rottura reali o potenziali all'interno dell'ammasso. In particolare, per valutare la risposta deformativa del versante alle variazioni di stato tensionale, è stato applicato il metodo alle differenze finite, che ben si adatta allo studio di fenomeni di instabilità in ammassi rocciosi intensamente

fratturati. Ne è derivato un quadro deformativo piuttosto aderente ai risultati desunti dalle indagini geognostiche, in cui le concentrazioni massime dello sforzo di taglio, che portano alla rottura del pendio, si addensano lungo discontinuità principali, presenti a diverse profondità, derivanti da una deformazione plastica della massa in frana.

Introduzione

Le località collinari di Marinasco e Strà, nel comune della Spezia (Fig.1), sono state interessate a metà degli anni '90 dalla riattivazione di movimenti franosi, indotti anche da interventi antropici, provocando danni ingenti a numerosi edifici, tanto che fu dichiarato lo stato di emergenza. Allo scopo di approfondire le conoscenze in merito alla stabilità del versante, sono stati condotti: uno studio geologico e geomorfologico, una caratterizzazione geologico-tecnica, cinematica e geomeccanica degli ammassi rocciosi ed una modellazione numerica con il metodo alle differenze finite, che ha consentito di verificare i più probabili andamenti delle superfici di scivolamento, sia superficiali sia profonde, confortati da indagini geognostiche e di monitoraggio.

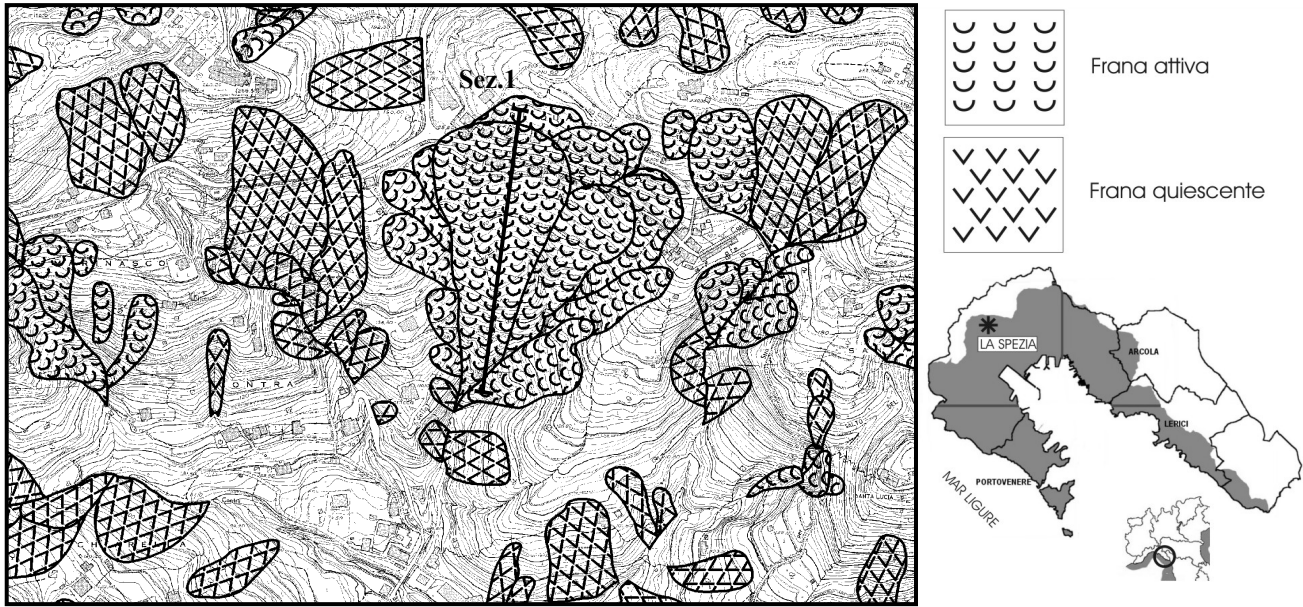


Fig.1 – Inquadramento geomorfologico del versante di Marinasco – Strà
Geomorphological map of Marinasco – Strà slope

Inquadramento geologico e geomorfologico

Il versante di Marinasco – Strà fa parte dell’arco collinare che chiude verso Nord il Golfo della Spezia e che corrisponde ad una successione di bassi crinali e di cime arrotondate, situate alle quote comprese tra 250 e 300 metri sul livello del mare; solo ad occidente della sella della Foce le forme del terreno si fanno più movimentate ed aspre ed i

versanti assumono una maggiore ripidezza. A questi due aspetti del paesaggio corrispondono due diverse litologie: ad Est della Foce, quindi dal lato di Marinasco, sono presenti arenarie con intercalazioni argillitico-siltose, mentre sul lato opposto prevalgono i calcari stratificati e massicci.

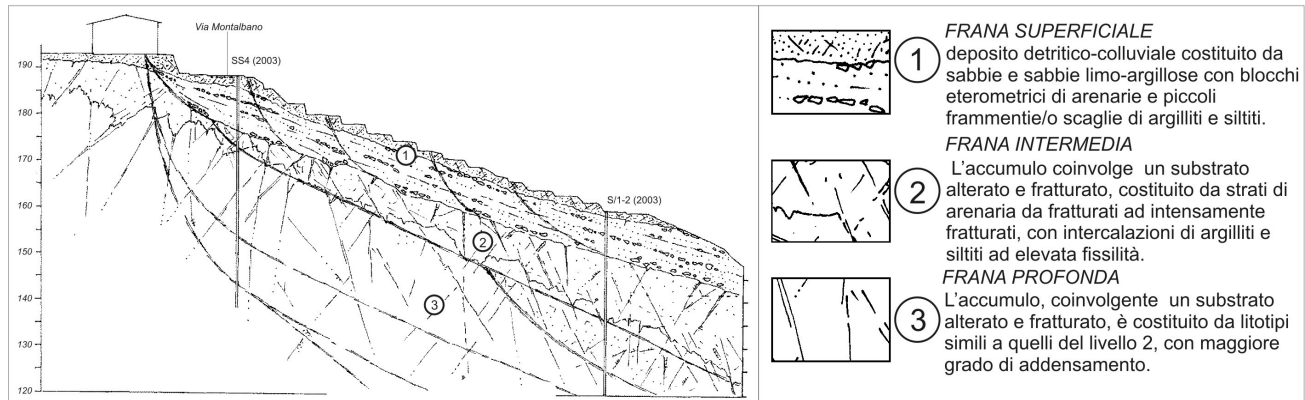


Fig.2 – Sezione geologica attraverso l’abitato di Strà
Geological section across the examined area

Le arenarie appartengono alla formazione delle Arenarie di M. Gottero (Campaniano sup.-Maastrichtiano) (Elter, 1960,1973), costituita da torbiditi prossimali arenacee o più raramente arenaceo-pelitiche comprendenti grovacche quarzoso-feldspatiche o grovacche feldspatiche, spesso molto grossolane, di colore grigio, marrone chiaro o ruggine all’alterazione; localmente sono rappresentate da una

sequenza irregolare di strati costituiti da minuti frammenti litici in matrice generalmente argillitico-siltitica, intercalati con livelli prettamente argillitico-siltitici di spessore variabile; le arenarie prevalgono nella parte superiore del rilievo collinare, le argilliti e le siltiti nella parte inferiore. La limitatezza degli affioramenti non permette di ricostruire in dettaglio l’assetto strutturale degli strati, che

generalmente mostrano una giacitura contropoggio. In considerazione delle caratteristiche strutturali tipiche della formazione, evidenti nei più vistosi affioramenti dell'alta Val di Vara, possiamo ipotizzare che anche sulle colline di Marinasco questa formazione sia interessata da deboli ondulazioni e comunque da pieghe ad ampio raggio di curvatura. La formazione delle Arenarie di M. Gottero nella zona che si estende ad Est della Foce fino alle colline di Marinasco-Strà è interessata da importanti sistemi di frattura in direzione NO-SE e N-S, riferibili allo stesso fase tettonica distensiva che ha dato origine al sollevamento di questa porzione di Appennino comprendente anche tutto il promontorio occidentale del golfo della Spezia. Oltre al controllo della morfologia, gli elementi strutturali ed in particolare le grandi superfici di discontinuità (faglie dirette ed inverse), originatesi durante le fasi tettoniche compressive e distensive, sono diventate le superfici di scorrimento preferenziali, almeno nella parte alta del pendio, di movimenti gravitativi di massa. Inoltre le frequenti intersezioni tra il clivaggio e la stratificazione condizionano la compagine d'insieme della roccia sino alla frammentazione della stessa in blocchi di dimensioni medio-piccole, come risulta anche dai sondaggi; la frammentazione fino alla brecciatura con clasti di piccole dimensioni è da riferire inoltre anche ai movimenti gravitativi profondi di versante (D.G.P.V.) originatisi per il riequilibrio raggiunto dagli ammassi rocciosi a seguito dei sollevamenti più recenti e in condizioni climatico-ambientali certamente più severe delle attuali (Hutchinson, 1988; D'Amato Avanzi & Puccinelli, 1997). Tali movimenti sono testimoniati da evidenti marker geomorfologici, quali i vistosi pianori e contropendenze dei versanti ed i tratti più ripidi corrispondenti a settori delle corone di frana ancora preservate dall'erosione.

Le caratteristiche morfologiche d'insieme appena osservate sono in parte obliterate da fenomeni gravitativi più recenti, riconducibili a frane più superficiali di masse detritiche, talvolta in forma di colate, dove i clasti arenacei sono frammisti ad una più abbondante matrice limoso-argillosa derivante dall'alterazione degli strati argillitico-siltitici. Mentre i movimenti più superficiali, taluni ancora in atto, sono da riferire principalmente all'azione delle acque meteoriche, i movimenti delle masse rocciose più profonde nella loro origine primaria sono da mettere in relazione con fenomeni naturali di ordine diverso, legati soprattutto all'attività tettonica e sismica, nei quali l'azione delle acque meteoriche ha un ruolo meno significativo.

Mentre le conoscenze geologiche e geomorfologiche a carattere generale dell'entroterra spezzino sono note da tempo e sono reperibili in lavori pubblicati in alcune riviste specializzate già da vari decenni, solo in tempi più recenti si sono sviluppati nell'area di Marinasco vari studi geologico-tecnici (Puccinelli & Raggi, 2002; Puccinelli et al., 2002; Raggi, 2002) di supporto ad opere di ingegneria (ANAS, 1997), dapprima in occasione delle fasi di progettazione del tracciato di una galleria della «variante Aurelia», tra le

località Ortonovo e Borghetto Vara, e delle successive varianti, quindi per lo studio, il monitoraggio e la bonifica dei dissesti comparsi in superficie dopo l'inizio di lavori di scavo nel sottosuolo: si sono infatti verificati diffusi e rilevanti fenomeni di dissesto idrogeologico sui due versanti interessati dalle opere, che hanno coinvolto la viabilità, alcuni edifici privati, il cimitero comunale ed il Monastero di S. Maria del Mare.

La ricostruzione del modello geologico-tecnico (Fig.2), derivato da studi anche a carattere geognostico (sondaggi a carotaggio continuo, piezometri, in clinometri, fessurimetri, sismica a riflessione e riflessione, etc.) è risultata molto articolata e prevede sul versante di Strà:

- una “frana superficiale”, con una superficie di scorrimento posta a 10-13 m di profondità, il cui materiale comprende sabbie e limi e blocchi di arenaria alterata e spesso arenizzata; la compagine ha scarsa permeabilità ed è sede nei periodi piovosi di una modesta falda idrica con un'altezza piezometrica di circa 3-4 m;
- una “frana intermedia”, con superficie di scorrimento posta a 25-30 m, comprendente Arenarie del Gottero fratturate e brecciate con abbondante matrice argilloso-argillitica, generalmente impermeabile; non sono da escludersi orizzonti completamente arenacei molto fratturati con circolazione di acque in pressione;
- una “frana profonda”, il cui livello di base non è stato raggiunto dalle prove geognostiche, ma ipotizzato intorno ai 100 m, costituita dallo stesso materiale della frana intermedia, meno cataclastato, come testimoniano le maggiori velocità di propagazione delle onde Vs (800-900 m/s contro 500-700 m/s).

La modellazione numerica

Il codice numerico utilizzato (FLAC_2D, 2000) è un metodo di analisi numerica bi-dimensionale alle differenze finite, che permette di risolvere numerose problematiche nell'ambito della meccanica delle rocce e dei terreni.

Il versante in esame è rappresentato da elementi quadrilateri all'interno di una griglia, creata appositamente perché la sua geometria corrisponda il più possibile a quella reale del pendio; il comportamento fisico-meccanico di ogni elemento deve rispondere ad una prestabilita legge costitutiva lineare o non-lineare, in risposta alle forze applicate e/o alle condizioni al contorno.

Il codice FLAC è basato su uno schema di calcolo “Lagrangiano”, che ben si adatta alla modellazione di grandi deformazioni ed alla rottura dei materiali. In questo metodo, le equazioni differenziali che legano campi di sforzo e deformazione con spostamenti e carichi esterni vengono espresse in termini incrementali discreti nei nodi del reticolo, dando luogo ad equazioni polinomiali. Tali equazioni vengono risolte utilizzando un metodo esplicito: inizialmente sono richiamate le equazioni fondamentali del moto per derivare velocità e spostamenti dagli stress e dalle

forze, poi gli incrementi dello sforzo sono derivati dalle velocità, ed infine nuovi stress dagli incrementi stessi.

Durante il calcolo, l'informazione associata con il fenomeno in esame è propagata attraverso le zone nella griglia; è richiesto un certo numero di step per arrivare allo stato di equilibrio per una soluzione statica. In FLAC si raggiunge una soluzione statica quando il valore di energia cinetica nel modello raggiunge un valore trascurabile; al raggiungimento di questo valore trascurabile, il modello avrà raggiunto lo stato di equilibrio delle forze oppure sarà in uno stato di "steady flow" se una porzione o l'intero modello è instabile (rottura) sotto il carico delle condizioni applicate: il raggiungimento dello stato di equilibrio o l'inizio del movimento sono indicati dalle forze non bilanciate (*unbalanced force*).

Per applicare il metodo al pendio in esame è stata scelta una sezione che attraversa interamente l'abitato di Strà nella zona interessata dai più importanti dissesti attivi (Fig.1): è stata dunque generata una griglia, alla quale sono state progressivamente aggiunte tre tavole, che rappresentano i livelli del terreno caratterizzati da differenti proprietà fisico-meccaniche. I modelli costitutivi utilizzati per questo studio sono il Mohr-Coulomb e l'Ubiquitous-Joint: il primo è il modello convenzionalmente usato per rappresentare la rottura al taglio in terreni ed in rocce, in cui l'involuppo di rottura corrisponde a quello del criterio di Mohr-Coulomb. Il secondo è un modello anisotropo di plasticità che include piani di debolezza all'interno di un modello Mohr-Coulomb. In questo modello la rottura può avvenire sia nella roccia intatta sia lungo i piani di debolezza, o in entrambi, secondo la quantità di sforzo, la giacitura dei

piani e le proprietà meccaniche della roccia intatta e dei piani di frattura. La rottura in prima analisi viene rilevata secondo le indicazioni insite nel modello Mohr-Coulomb, poi i nuovi sforzi sono analizzati lungo i piani di debolezza e aggiornati di conseguenza.

È da considerare che lo spessore del terreno è interessato da una modesta circolazione, di tipo freatico, sino alla profondità variabile tra 10 e 15 m, e che la circolazione delle acque freatiche non interessa per altro l'intero spessore di questo primo livello, ma è limitata a quegli intervalli dove sono più frequenti i frammenti litici, con scarsa matrice.

In tutte le verifiche realizzate per questo studio, non essendovi una significativa presenza di flusso, tale parametro non è stato considerato, motivo per il quale i fattori di sicurezza si attestano su valori piuttosto alti.

Sono state dunque applicate le proprietà dei materiali e le condizioni al contorno, poi in una prima fase dell'analisi è stato raggiunto l'equilibrio statico sotto la sola forza della gravità, importante passo nel processo di modellazione, ovvero quello in cui sono ristabilite le condizioni in situ prima di procedere allo studio parametrico, per verificare o meno il raggiungimento dell'equilibrio con le caratteristiche reali di resistenza del materiale.

Lo studio parametrico si è inizialmente sviluppato sulla base del modello definito dall'indagine geomorfologica e geognostica, in cui si è ottenuta una geometria con due principali livelli di scollamento e tre strati con diverse proprietà fisico-meccaniche, corrispondenti ai tre corpi di frana (Tab.1).

Tab.1 – Valori delle proprietà fisico-meccaniche usate nell'analisi
Values of physical-mechanical properties used in the calculation

Parametri	-	-	Frana superiore	Frana intermedia	Frana profonda
Peso unità di volume	γ	kNm^{-3}	19,0	21,0	22,0
Coesione	c	Pa	1,00E+04	2,00E+04	6,00E+04
Angolo di attrito	ϕ'	°	25,0	27,0	30,0
Modulo di rigidità normale (bulk)	K	Pa	2,17E+07	4,57E+07	7,35E+07
Modulo di rigidità di taglio (shear)	G	Pa	1,63E+07	2,74E+07	3,39E+07
Coesione giunti	c	Pa	5,00E+03	5,00E+03	5,00E+03
Angolo di attrito giunti	ϕ'	°	20,0	20,0	20,0

Sintetizzando i risultati di questa prima analisi, è stato possibile osservare che la massima deformazione per taglio avviene nel livello più superficiale del pendio, caratterizzato da un basso angolo di attrito e soprattutto dall'assenza di coesione.

Poiché l'obiettivo principale di questo studio consiste nel verificare la stabilità di più superfici di possibile movimento (dal momento che la situazione reale ne presenta numerose a diverse profondità), si è ritenuto opportuno modificare le proprietà del modello costitutivo, assegnando al livello superficiale le caratteristiche dei livelli inferiori.

L'operazione appare plausibile, poiché, dove si verificano scorrimenti più profondi, le caratteristiche del materiale nel livello superficiale diventano meno influenti, per cui assegnare anche ad esso le caratteristiche del livello sottostante non modifica di molto la situazione reale. Da questa verifica osserviamo che il modello risulta in equilibrio, con un fattore di sicurezza abbastanza alto ($F_s=2.08$), e la localizzazione dello stress di taglio risulta lungo una curva di neoformazione con geometria piuttosto simile a quella delle superfici di scorrimento desunte dalle indagini geognostiche.

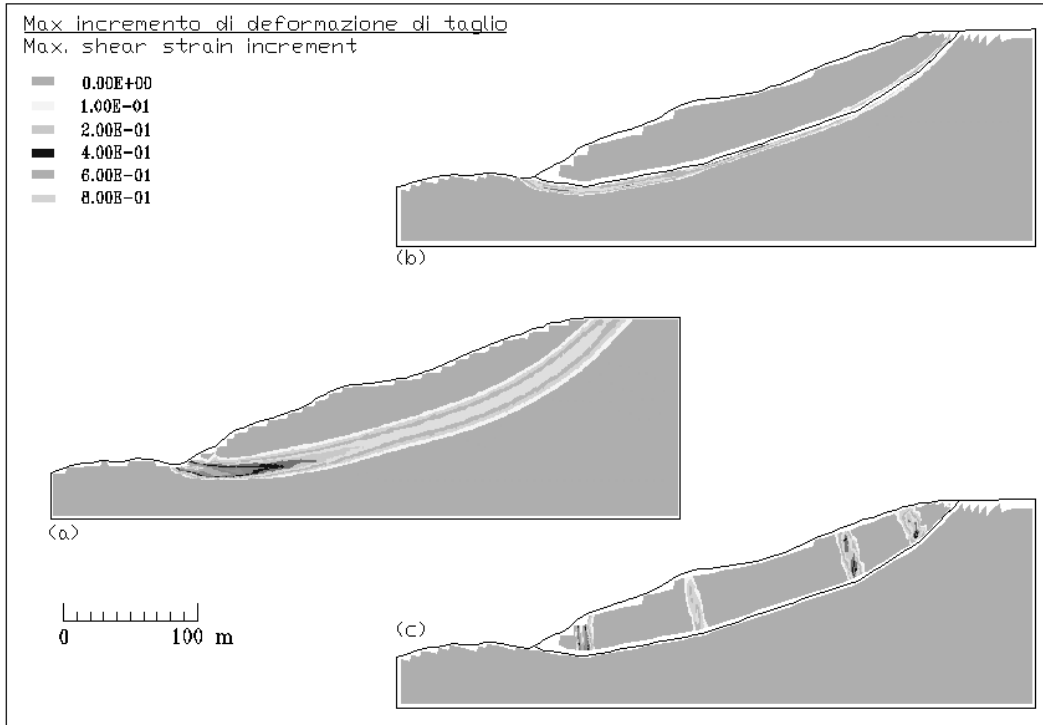


Fig.3 – Rappresentazione dei massimi incrementi di deformazione per taglio – modello costitutivo Mohr-Coulomb
Max shear strain increment – Mohr-Coulomb constitutive model

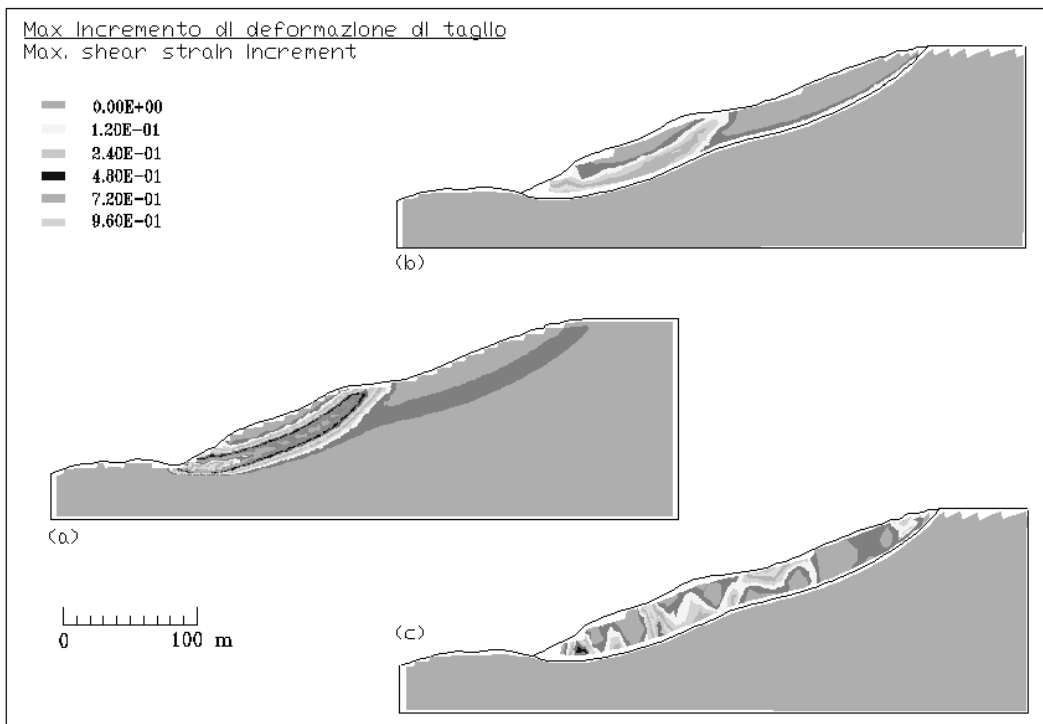


Fig.4 – Rappresentazione dei massimi incrementi di deformazione per taglio – modello costitutivo Ubiquitous-Joint
Max shear strain increment – Ubiquitous-Joint constitutive model

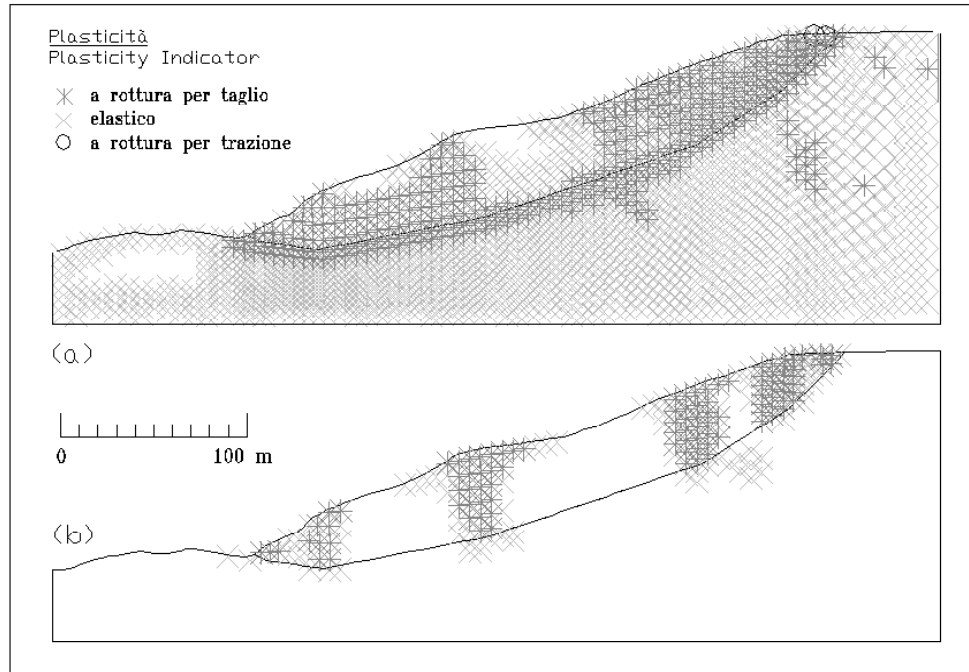


Fig.5 – Rappresentazione dell'indicatore di plasticità nel modello costitutivo Mohr-Coulomb
Plasticity indicator for Mohr-Coulomb constitutive model

Confrontando i risultati di questa fase nelle due modellazioni con i criteri Mohr-Coulomb e Ubiquitous-joint, si osserva che nel primo caso (Fig.3a) la fascia, unica, che unisce i punti con massimo sforzo di taglio interessa il pendio in esame per la sua intera lunghezza, mentre nel modello Ubiquitous-joint (Fig.4a) si forma in un primo momento una fascia di stress di minore ampiezza e, solo dopo una evoluzione della deformazione in questa porzione di versante, lo stress sembra interessare il versante in modo retrogressivo, con la formazione di una fascia più estesa, verso monte. La superficie di scorrimento finale risulta piuttosto simile nelle due analisi.

È stato piuttosto interessante confrontare per sovrapposizione il risultato ottenuto per queste superfici con il dettaglio della sezione geologica, in fig.7: in effetti la zona di maggiore concentrazione della deformazione si trova esattamente dove due deformazioni progressive (a 34 e 45 metri di profondità) sono state registrate da un inclinometro adiacente (SS4) e dove, per questo motivo, sono state tracciate due superfici di scorrimento. Solo più a monte i due andamenti divergono, cosa che potrebbe anche far supporre un arretramento verso monte della superficie desunta oppure, come risulta dall'interpretazione geologica, una superficie di scivolamento precedente. In questo caso, disponendo di dati relativi alla concentrazione dello stress di taglio, non è possibile determinare con certezza tale andamento.

Sulla base di questi risultati ed essendo di particolare interesse esaminare la superficie più profonda, si è cercato di modificare il modello, per verificarne le possibili evoluzioni, introducendo un'interfaccia che nella modellazione numerica rappresenta una discontinuità fisica,

definita da nodi attaccati di sub-griglie diverse; tale discontinuità, dotata di proprie caratteristiche fisico-meccaniche, nel modello prodotto dal FLAC può aprirsi e/o scivolare.

Per approfondire la conoscenza sul possibile sviluppo del modello realizzato, lungo la zona di massima deformazione ottenuta attraverso la precedente analisi è stata costruita una discontinuità, operazione ritenuta ammissibile dal momento che reali spostamenti sono registrati dagli inclinometri e confermati dai sondaggi in corrispondenza della stessa.

Si è detto che l'ammasso roccioso in esame è caratterizzato da qualità molto scadenti da un punto di vista geomeccanico, al punto tale da essere trattato come un continuo equivalente; per questo motivo si è ritenuto opportuno procedere con la verifica di stabilità attraverso due diversi criteri:

1. risoluzione del problema attraverso una progressiva diminuzione della resistenza del materiale (coesione ed angolo di attrito) fino al raggiungimento dell'equilibrio o della rottura nel modello: la massa in frana può liberamente deformarsi e muoversi lungo la discontinuità;
2. risoluzione del problema attraverso una progressiva diminuzione della resistenza (coesione ed angolo di attrito) solamente lungo la discontinuità: la massa in frana si comporta come un corpo rigido poiché le sue caratteristiche di resistenza restano invariate e pari a quelle dell'ammasso roccioso.

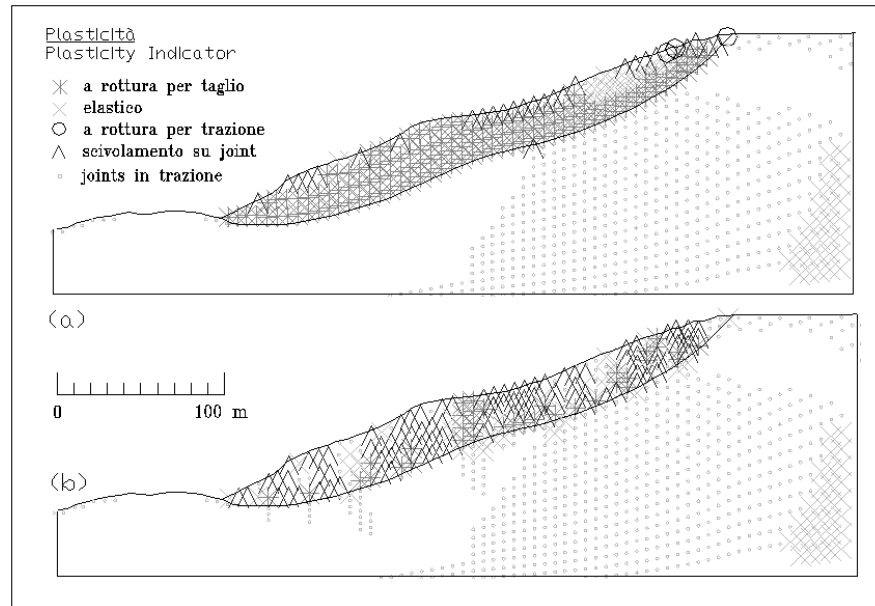


Fig.6 – Rappresentazione dell'indicatore di plasticità nel modello costitutivo Ubiquitous-Joint
Plasticity indicator for Ubiquitous-Joint constitutive model

Soluzione 1

Modello costitutivo Mohr-Coulomb: in Fig.3b è evidente come la concentrazione dello stress sia distribuita lungo il piano di debolezza assunto; la Fig.5a permette invece di capire il movimento di deformazione della massa: le aree più scure mettono in evidenza le parti della massa in frana che si deformano in maniera plastica; al centro, la zona in chiaro è l'unica che può deformarsi in maniera elastica perché le deformazioni non sono spinte; nella parte in alto del versante si osservano zone a rottura per trazione.

Modello costitutivo Ubiquitous-Joint: in Fig.4b si osserva come la concentrazione dello stress sia distribuita lungo la prima curva di neoformazione risultante dal modello stesso; la Fig.6a descrive più in dettaglio come avviene tale movimento: l'intera massa ne è coinvolta, ma nei metri più superficiali tale movimento non è caotico ma piuttosto segue la discontinuità principale, descrivendo uno scivolamento su giunto.

Soluzione 2

Modello costitutivo Mohr-Coulomb: attraverso una progressiva diminuzione della resistenza, soltanto lungo la discontinuità, la massa in frana si comporta come un corpo rigido poiché le sue caratteristiche di resistenza restano invariate e pari a quelle dell'ammasso roccioso: il materiale che si muove lungo la discontinuità presenta zone principali di rottura (Fig.5b) perpendicolari al pendio, così come appare anche dalla Fig.3c che mostra la distribuzione dello sforzo di taglio.

Modello costitutivo Ubiquitous-Joint: attraverso l'analisi con questo modello costitutivo si ha un'evoluzione simile a quella vista per il Mohr-Coulomb, ad iniziare dalla parte bassa del versante (Fig.4c), ma ancor più interessante è ciò

che emerge nell'analisi dell'indicatore di plasticità: nella Fig.6b si vede infatti che lungo le zone a maggiore concentrazione di sforzo di taglio si ha scivolamento lungo i giunti ma nel loro intorno la rottura avviene per taglio senza orientazione preferenziale.

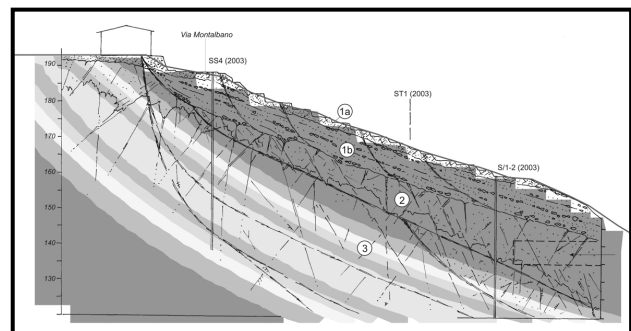


Fig.7 – Concentrazione del massimo incremento di deformazione per taglio in corrispondenza di una superficie di taglio rivelata dall'inclinometro SS4
Max shear strain increment in correspondence of a shear surface revealed by the SS4 inclinometer

Conclusioni

Sovrapponendo le zone di maggiore stress della Fig.5b sulla base topografica, è stato possibile verificare che le lesioni, anche gravi, sui fabbricati nella parte sommitale del pendio, dove si trova l'abitato di Strà, si trovano in corrispondenza di queste fasce di deformazione. Le concentrazioni della deformazione relative all'instabilità del versante, così come proposte nel modello analizzato, potrebbero dunque aver contribuito al peggioramento di una situazione già critica.

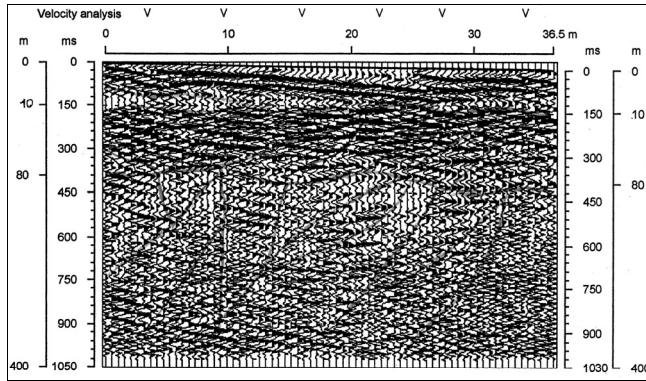


Fig. 8 – Le discontinuità ad andamento sub-perpendicolare rispetto al pendio, derivanti dall'indagine sismica, potrebbero essere attribuite alla fascia di taglio generatasi dalla rottura secondo il modello Mohr-Coulomb

The discontinuities, perpendicular to the slope, deriving from the seismic survey, could be attributed to a shear zone generated from the failure, according to the Mohr-Coulomb model

Un altro interessante confronto può essere realizzato con una delle sezioni sismiche a riflessione più prossime all'area, realizzate nel 2003, in particolare la sezione LnD, come mostrato nella Fig.8: sono ben evidenti i riflettori ascrivibili alle coltri superficiali, interessate da movimenti gravitativi, e al passaggio tra diversi livelli litologici, ma sono altrettanto rilevanti le discontinuità ad andamento sub-perpendicolare rispetto al pendio e che, in alcuni casi, sembrerebbero interessare o comunque condizionare le geometrie delle coltri di copertura. Tali discontinuità potrebbero essere attribuite alla fascia di stress di taglio generatasi dalla rottura secondo il modello illustrato, intercettata dalla traccia della sezione sismica. Dall'analisi di stabilità con il metodo alle differenze finite deriva verosimilmente un quadro più completo delle conoscenze in merito alla stabilità del versante di Marinasco - Strà, per il quale si ritiene di poter proporre un modello che tenga conto

Bibliografia

ANAS, 1997. Compartimento Regionale per la viabilità - Genova (marzo) - S.S. 1 "Aurelia" - Progetto generale della variante tra le località di Ortonovo e Borghetto Vara "Tratto da Seresa a Sprugola di San Benedetto con diramazione in località Buggi (innesto con s.s. n. 530 di Portovenere)" in ordine ai lavori di completamento del tratto compreso tra lo svincolo di S. Benedetto e la località Seresa ed ai lavori necessari per l'apertura al traffico dell'intero tratto tra S. Benedetto - Felettino. Rapporto geotecnico Geodes, inedito.

ANAS, 1997. Compartimento Regionale per la viabilità - Genova (luglio) - S.S. 1 "Aurelia" - Progetto generale della variante tra le località di Ortonovo e Borghetto Vara "Tratto da Seresa a Sprugola di San Benedetto con diramazione in località Buggi (innesto con s.s. n. 530 di Portovenere)" in ordine ai lavori di completamento del tratto compreso tra lo svincolo di S. Benedetto e la località Seresa ed ai

lavori necessari per l'apertura al traffico dell'intero tratto tra S. Benedetto - Felettino. Rapporto inedito.

D'Amato Avanzi, G., Puccinelli, A., 1997. Deep-seated gravitational slope deformations in north-western Tuscany (Italy): remarks on typology, distribution and tectonic connections. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 19, 325-334.

Elter, P., 1960. I lineamenti tettonici dell'Appennino a Nord Ovest delle Apuane. *Boll. Soc. Geol. It.*, 79 (2), 273-312.

Elter, P., 1973. Lineamenti tettonici ed evolutivi dell'Appennino settentrionale. In: *Atti Conv. Moderne vedute sulla geologia dell'Appennino*. Acc. Naz. Lincei, Quad., 183, 97-118.

FLAC_2D, 2000. *Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Version 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota USA.

Hutchinson, J.N., 1988. Morphological and

dei due tipi di analisi effettuate, complementari fra loro. Proprio in base al confronto con le varie indagini svolte in passato, un approccio multidisciplinare permette di correlare in modo soddisfacente i dati locali, derivanti dalle indagini sismiche e inclinometriche e dall'esame delle lesioni superficiali, con le risposte fornite dal modello realizzato per la verifica di stabilità. È comunque probabile che diverse discontinuità, a varie profondità (Fig.7), siano responsabili dell'instabilità del pendio, e che lungo di esse le proprietà meccaniche vadano realmente a decadere in seguito all'infiltrazione delle acque superficiali ed alla conseguente alterazione, in particolare modo lungo le intercalazioni argillitiche. La modellazione numerica ha dunque permesso uno studio più accurato in merito alla stabilità di quest'area; in particolare modo essa ha permesso di ipotizzare lo stato tensionale in ognuno degli elementi in cui è suddiviso il pendio e lo sviluppo di zone allo stato di rottura, oltre che introdurre proprietà costitutive e anisotropie all'interno dei materiali.

Grazie all'approccio per fasi, che simula l'effettivo svolgersi degli eventi nel sito, è stato possibile seguire l'evolversi del processo gravitativo di versante: in questo modo la determinazione della superficie di scorrimento del movimento franoso non è avvenuta con un metodo iterativo di ricerca secondo forme prestabilite, ma studiando le equazioni del moto, ricercando l'equilibrio puntuale e valutando spostamenti, velocità e accelerazioni istante per istante e punto per punto.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Prof. G. Raggi per il suo contributo all'elaborazione del modello geologico-tecnico e i dott. Geol. M. Mangifesta e M. Calista per gli utili consigli forniti nel calcolo numerico.

geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proc. 5th Int. Symposium on Landslides*, Losanna, 10-15/7/1988, 1, 3-35.

Puccinelli, A., Raggi, G., 2002. Dati preliminari sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni di copertura e della rocce presenti nella zona del Cimitero Pieve, presso Marinasco e nella zona di Strà - Case Bertoli. Rapporto inedito per la Prefettura della Spezia 2 pp.

Puccinelli, A., Raggi, G., Pochini, A., 2002. Programma preliminare d'indagini geognostiche sul versante Marinasco-Strà. Rapporto inedito per la Prefettura della Spezia, 4 pp.

Raggi, G., 2002. Relazione geologico-tecnica preliminare sui fenomeni di dissesto che hanno interessato le località Marinasco-Strà. Rapporto inedito per Comune della Spezia, 6 pp.