

Applicazione di modelli reologici tempo dipendenti nell'evoluzione di deformazioni gravitative profonde

Tiziana Apuani¹, Marcello Rossi², Marco Masetti²

¹Autore corrispondente: Tiziana Apuani, Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “Ardito Desio”, Via Mangiagalli 34, 20133 Milano, Tel. ++ 39.02.50315565, Fax. ++39.02.50315494, tiziana.apuani@unimi.it

²Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “Ardito Desio”, kalsi3o8@libero.it, marco.masetti@unimi.it

Stress-Strain-Time Numerical Modeling of a Deep Seated Gravitational Slope Deformation

ABSTRACT: A preliminary analysis of the effects of creep on the development of a deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD), carried out by numerical modeling, is described. The slope rock mass evolution has been simulated applying different creep rheological models. The studied DSGSD is located in the Central Italian Alps (Val S. Giacomo). It is characterized by three main scarps, different sets of tensile trenches, and counterscarps, mapped during a detailed geomorphological survey. The mechanical behaviour of the rock masses, in terms of elastoplastic parameters, has been defined on the base of laboratory and in situ tests. In order to simulate this instability process a stress-strain-time numerical modeling has been applied by a finite difference numerical code (FLAC). First, the slope conceptual model was represented by a constant dipping slope, uniform lithology (ortogneiss) and the presence of the water table at different elevations. The effects of different constitutive model laws have been considered: the visco-elastic Maxwell model; the visco-elastic Burger model and the elasto-visco-plastic Burger model. The modeling has been performed simulating the melting of the ancient glacier, starting from its maximum load. Because of the difficulty to determine rock mass creep parameters, for each of the rheological models a sensitivity analysis has been performed, varying the physical-mechanical properties. In accordance with the geological data, milonitic zones, characterized by low mechanical properties, have been introduced in the middle part of the slope, and two weathered superficial layers have been added, identifying new instability processes. The elasto-visco-plastic Burger constitutive model develop a stress/stain system more consistent with the present morphology.

Key terms: Deformazione gravitativa profonda; creep; FLAC.

Termini chiave: Deep Seated Gravitational Slope Deformation, creep, FLAC

Riassunto

Lo studio riguarda l'evoluzione di versanti interessati da fenomeni di deformazione gravitativa profonda (DGPV), attraverso l'applicazione di modelli numerici a differenze finite (codice FLAC), introducendo leggi di comportamento tempo dipendenti. Si prende spunto dal dissesto della Val Vamlera, (SO-Alpi Centrali). Nel modello concettuale di versante le proprietà elasto-plastiche delle unità litotecniche sono state definite sulla base di prove di laboratorio e rilievi geomeccanici. Si è inizialmente considerato un versante a pendenza uniforme, monolitologico e la presenza di falda acquifera a differenti profondità. L'evoluzione del versante è stata simulata applicando, oltre al modello elasto-plastico, differenti modelli reologici di creep (visco-elastico di Maxwell, visco-elastico di Burger e elasto-visco-plastico di Burger) e simulando gli effetti della deglaciazione dell'antico ghiacciaio a partire dalla sua ipotetica massima altezza. La difficoltà nel definire i parametri di creep degli ammassi rocciosi e le complessità dei modelli di comportamento hanno suggerito di procedere attraverso una analisi di sensitività. Successivamente il modello

concettuale di versante è stato complicato introducendo due strati superficiali dalle proprietà meccaniche scadenti e fasce di intensa fatturazione impostate su direttrici strutturali. L'assunzione di un comportamento elasto-visco-plastico di Burger genera nel versante condizioni sforzo-deformazione che meglio si conciliano con le morfologie attuali.

1. Introduzione

L'evoluzione di versanti montani soggetti a deformazioni gravitative profonde (DGPV) è oggetto di studio da decenni. Il mondo scientifico ha dapprima affrontato la definizione degli elementi morfologici caratteristici (Forcella & Orombelli, 1984; Dramis, et al., 1984), individuato le condizioni tettonico-strutturali predisponenti (Di Luzio, et al, 2004; Agliardi, et al, 2001 Dramis & Sorriso Valvo, 1994) e studiato le possibili concause. Analisi sforzo-deformazione sono state applicate a casi specifici. Diversi autori hanno condotto le analisi mediante modellazione numerica alle differenze finite (Forlati et al, 2001a) altri utilizzando codici agli elementi finiti

(Spickermann, et al, 2003, Forlati et al, 2001b). Per lo più l'evoluzione del versante è stata simulata attribuendo agli ammassi rocciosi proprietà elasto-plastiche (Griffiths & Lane, 1999).

L'evoluzione delle DGPV è controllata da meccanismi complessi, in particolare da processi deformativi in condizioni di creep gravitazionale. Diverse leggi di creep sono state attribuite agli ammassi rocciosi. Unendo in serie e/o in parallelo modelli elementari semplici e variandone le proprietà caratteristiche è possibile simulare comportamenti complessi (Dusseault and Fordham, 1993). Crawford and Curran (1983), Pawel A. (1999) e Hamiel et al. (2004) hanno proposto un modello visco-elastico; Song (1993) propone un modello visco-plastico; invece un modello elasto-visco-plastico è stato ipotizzato da Fakhimi and Fairhurst (1994). Solo di recente leggi costitutive complesse e tempo dipendenti sono state introdotte nelle simulazioni numeriche. Tra gli autori si possono citare Forlati et al. (2001a) che hanno utilizzato un modello elasto-visco-plastico, mentre Cristescu et al. (2002) ha proposto un modello Bingham non-omogeneo.

Il presente studio simula l'evoluzione di una DGPV mediante modellazione numerica alle differenze finite. Vengono introdotti modelli costitutivi di comportamento

degli ammassi rocciosi progressivamente più complessi e si valutano gli effetti di leggi tempo-dipendenti.

2. Inquadramento geologico tecnico

Il dissesto gravitativo profondo di versante (DGPV) oggetto dell'analisi si trova in alta Val S. Giacomo (Sondrio) e si sviluppa in Val Vamlera su un'area di circa 1 km² tra i 2450 m s.l.m. ed il fondovalle a 1350 m s.l.m. (Fig. 1). I principali lineamenti strutturali hanno direzione E-O, ENE-OSO, NNE-SSO, SSE-NNO. Il versante di interesse è costituito dalle Unità di basamento e delle coperture metasedimentarie della Falda Tambò del dominio Pennidico medio (Montrasio & Sciesa, 1988; Trumpy & Niggli, 1980); in particolare affiorano gneiss polimetamorfici ricchi in biotite e muscovite con subordinati livelli milonitici e orizzonti anfibolitici. I principali elementi morfologici della DGPV della Val Vamlera sono rappresentati da tre scarpate principali, differenti contropendenze con orientazione N-S, rughe di pressione e set di trincee naturali, con estensione dell'ordine della decina di metri e profondità di qualche metro, poste a differenti quote. Il piede del versante mostra una topografia convessa, con ammassi rocciosi molto fratturati ed estesi depositi di blocchi spigolosi (Fig. 1).

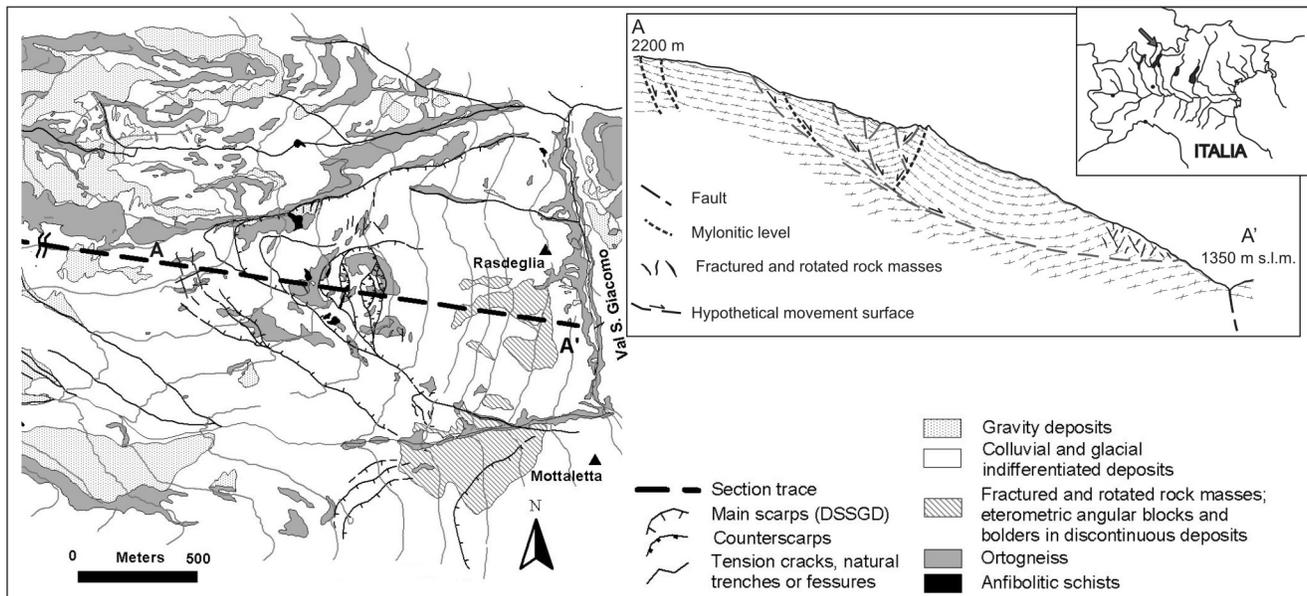


Fig. 1 Ubicazione dell'area di interesse. Carta geologico-morfologica della Val Vamlera. Sezione geologica lungo la traccia AA'. *Val Vamlera location. Sketch of the geological and geomorphological map. Simplified geological section, along A-A' trace.*

La qualità meccanica degli ammassi rocciosi è stata stimata mediante rilievi geomeccanici, eseguiti secondo le normative ISRM (1981), prove di laboratorio su roccia intatta (Point Load test), prove di taglio su giunto e prove di scorrimento (Tilt test). Gli ammassi risultano in generale di "buona qualità": Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989) compreso tra 50 e 69; Geological Strength Index (GSI) (Hoek, et al. 1998) compreso tra 45 e 64. Dai risultati

dei rilievi geomeccanici e delle prove di laboratorio, applicando il criterio di rottura Hoek e Brown (Hoek, 1997; Hoek et al., 2002), si sono stimate le resistenze degli ammassi rocciosi, le proprietà elastiche ed i parametri equivalenti di Mohr-Coulomb (coesione ed angolo di attrito).

Nella costruzione del modello geologico-tecnico, che rappresenta le condizioni attuali, sono stati individuati

quattro domini litotecnici i cui parametri di resistenza e deformabilità sono in tabella 1: 1) gneiss profondi massivi, 2) gneiss di media qualità, 3) gneiss superficiali alterati, 3) orizzonti milonitici.

Tab. 1 Parametri di resistenza a deformabilità calcolati secondo il criterio di rottura Hoek e Brown per valori di σ_3 stimati alla profondità media del dominio, e parametri equivalenti di Mohr-Coulomb.
Rock mass strength, elastic properties and Mohr-Coulomb equivalent parameters calculated applying the Hoek-Brown failure criterion for σ_3 at the average depth of each domain.

PROPRIETA'	UNITA' LITOTECNICA					
	Ghiaccio	Gneiss profondo	Gneiss medio	Gneiss superficiale	Milonite	
modello costitutivo *	EL	MCeq	MCeq	MCeq	MCeq	
Peso di volume [kg/m ³]	900	2900	2900	2900	2900	
Parametri HOEK e BROWN	σ_c [MPa]		166	166 (s)	97 (s)	
	GSI		70	70	60 (s)	20 (s)
	m_i		26	26	26	13
	D		0	0.3	0.6	0
	$m_b=m_r$		8.90549	7.37129	3.37799	0.746624
	$s=s_r$		0.035674	0.024632	0.003866	0.000138
	a		0.501355	0.501355	0.5022841	0.543721
Parametri equivalenti MOHR COULOMB	σ_3 [MPa] **		0÷8.1	0÷1	0÷0.5	0÷3
	Coesione c [MPa]		5.50	2.47	0.97	0.71
	Angolo d'attrito ϕ [°]		57	67	67	39
	Angolo di dilatanza ψ [°]		0	0	0	0
Proprietà di resistenza e deformabilità	Resistenza a trazione σ_t [MPa]		0.66	0.55	0.18	0.02
	Modulo elastico E [MPa]	8500	31623	26879	12448	1751
	Rapporto di Poisson ν [°]	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	Modulo di compressione K [MPa]	7080	26351	22399	10373	1459
	Modulo di taglio G [MPa]	3270	12200	10300	4790	673

* EL elastico; MCeq Mohr-Coulomb equivalente, da Hoek-Brown

** Campo di validità delle proprietà meccaniche

3. Modellazione numerica

L'evoluzione del pendio è stata simulata mediante modellazione numerica bi-dimensionale, avvalendosi del codice di calcolo *FLAC* (Fast Lagrangian Analysis Code) alle differenze finite. Si è assunto un pendio a pendenza costante (36°) suddiviso in celle quadrate di 20 m, nell'area di interesse, e 40 m nelle aree di confine (Fig. 2). Inizialmente si è considerato un versante monolitico (ortogneiss), in condizioni asciutte.

Le fasi di simulazione hanno previsto: 1) il raggiungimento dell'equilibrio elastico sotto il carico di una massa glaciale al suo livello massimo, stimato di 2580 m s.l.m.; 2) assegnazione delle leggi e dei parametri di comportamento dell'ammasso roccioso. In particolare si confrontano quattro modelli reologici: comportamento elasto-plastico equivalente (EP) secondo criterio di rottura Hoek e Brown; modello visco-elastico di Maxwell (VEM); modello visco-elastico di Burger (VEB); modello elasto-visco-plastico di Burger (EVPB). 3) Scioglimento della massa glaciale in tre fasi successive ed istantanee per ciascuno dei modelli comportamentali. Viste le difficoltà nell'attribuzione dei parametri geotecnici di creep

all'ammasso roccioso si è condotta un'analisi di sensitività. Successivamente, scelti i parametri più convincenti, si è considerato l'effetto della falda acquifera ipotizzata a due livelli: falda bassa, emersione al piede del versante, falda alta emersione a circa 1700 m s.l.m.

Successivamente il modello geologico-tecnico è stato complicato introducendo due strati superficiali dalle proprietà meccaniche scadenti e fasce di intensa fatturazione impostate su direttrici strutturali.

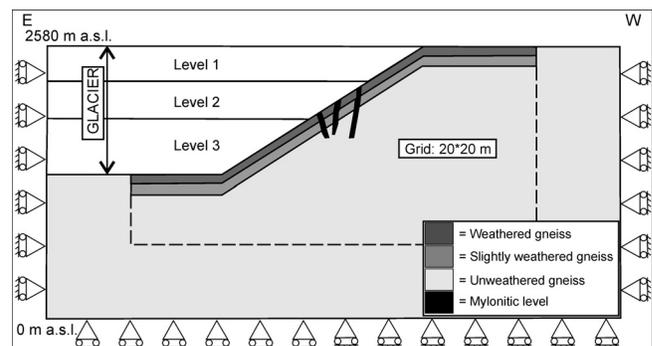


Fig. 2: Modello concettuale di versante.
Idealized natural geometry

3.1. Versante omogeneo – Modello elasto-plastico (EP)

I parametri di resistenza e deformabilità determinati secondo il criterio di rottura Hoek e Brown e i parametri equivalenti di Mohr-Coulomb (Tab. 1) vengono ricalcolati lungo il pendio in funzione dello sforzo principale σ_3 .

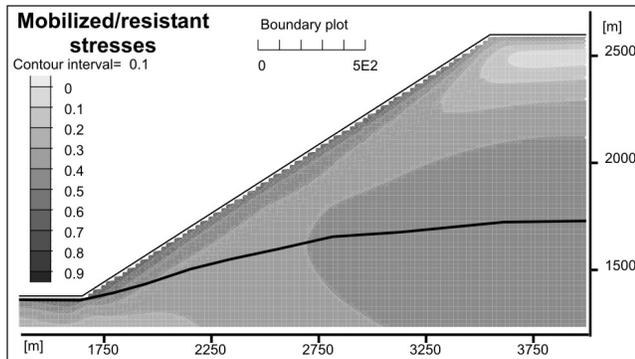


Fig. 3 Rapporto tra sforzi resistenti e sforzi mobilitati al raggiungimento dell'equilibrio alla fine della fase di deglaciazione, con l'introduzione della falda acquifera (bassa) e modello di comportamento elasto-plastico (EP).

Mobilized/resistant stresses at equilibrium at the end of the unloading phase and the introduction of a water table at low level. Elasto-plastic constitutive model (EP).

Alla fine della fase di deglaciazione, la mancanza del carico di confinamento induce un generale sollevamento del versante, senza che si raggiungano condizioni limite di plasticizzazione. Non si generano deformazioni significative nemmeno considerando la presenza di falda acquifera, ne per innalzamento della stessa (Fig. 3).

3.2. Versante omogeneo - Modelli di creep e analisi di sensitività

Per ciascuno dei modelli tempo dipendenti si sono considerate viscosità (η) variabili tra $1e14$ - $1e29$ MPa *s e moduli elastici (K e G) variabili in un campo estremamente ampio.

Modello visco-elastico di Maxwell (VEM) e modello visco-elastico di Burger (VEB)

I modelli non sembrano significativamente sensibili a variazioni di viscosità. Il modello VEM risponde con maggiore sensitività alla variazione dei parametri elastici.

Assumendo valori realistici di elasticità (già in Tab. 1), raggiunte le condizioni di equilibrio dopo oltre 1500 anni dall'inizio della deglaciazione, il versante si comporta in modo simile a quanto simulato in condizioni EP. Non si raggiungono condizioni critiche di deformazione ma si complica lo stato tensionale. Nel modello VEM si genera una regione in trazione al piede del versante fino a 2000 m che non soddisfa le attuali evidenze geomorfologiche; nel modello VEB la distribuzione delle zone in compressione e trazione si inverte (Fig. 4).

Con l'introduzione della falda, ai due livelli considerati, si registra un ulteriore modesto sollevamento del versante (decimetrico), senza tuttavia che si generino incrementi di sforzo di taglio tali da evidenziare fenomeni di instabilità.

Modello elasto- visco-plastico di Burger (EVPB)

Il modello EVPB è più complesso e sensibile a variazioni dei parametri caratteristici.

In particolare l'irrigidimento delle componenti elastiche (K, G) consente di enfatizzare il comportamento visco-plastico del mezzo. In questo caso i parametri plastici sono assunti variabili nei campi $c=2\div15$ MPa e $\phi=50\div66^\circ$.

La figura 5 si riferisce all'equilibrio post deglaciazione raggiunto imponendo le proprietà dell'unità "gneiss profondo" in tabella 2. Alla fine del processo di scarico, il generale sollevamento è accompagnato da incremento delle deformazioni di taglio e volumetriche (Fig. 5a). Anche il rapporto tra sforzi mobilitati e sforzi resistenti e la distribuzione delle aree in compressione e trazione, mostrano stati tensionali e deformativi compatibili con quelli caratteristici delle deformazioni gravitative profonde, individuando le superfici critiche di figura 5b.

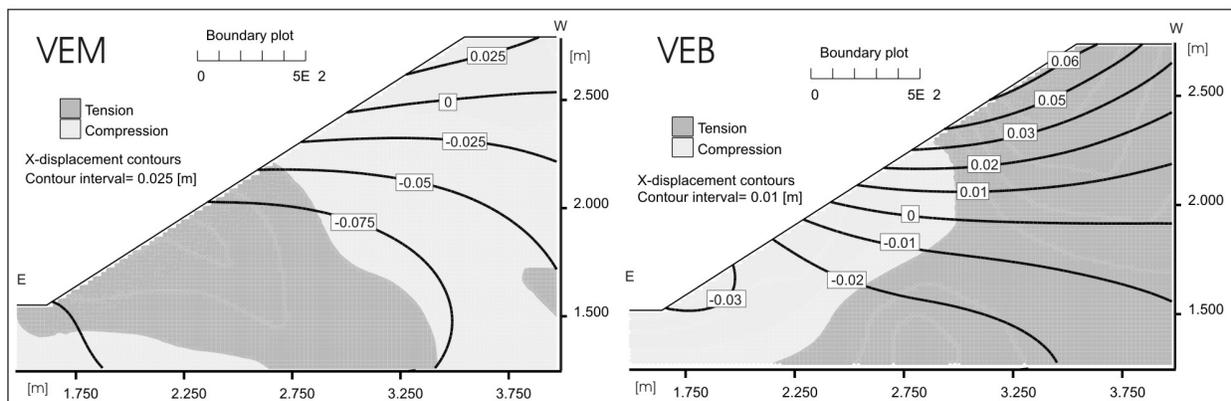


Fig. 4: Confronto tra l'evoluzione del versante in condizioni visco-elastiche di Maxwell (VEM) e di Burger (VEB), all'equilibrio per deglaciazione (condizioni asciutte). Isolinee di spostamento nella direzione x e delimitazione aree in trazione e compressione.

Comparison between Maxwell Visco-elastic (VEM) and Burger Visco-elastic (VEB) behaviour after complete unloading. X-displacement contour lines and tension-compression contours.

3.3. Versante degradato

In accordo con le evidenze geologiche, il modello concettuale di versante è stato complicato introducendo due strati superficiali dalle proprietà meccaniche scadenti e, nella parte mediana del pendio, fasce di intensa fatturazione impostate su direttrici strutturali (orizzonti milonitici). Rispetto al modello omogeneo di versante questa complicazione produce, sia in condizioni elasto-plastiche che con leggi di comportamento tempo dipendenti, un maggior incremento delle deformazioni lungo gli orizzonti superficiale “deboli” e le fasce milonitiche. In condizioni EP, anche introducendo la falda acquifera ai due livelli considerati, non si sviluppano deformazioni significative e il rapporto sforzi mobilitati/resistenti è sempre <0.8 in assenza di plasticizzazione. Nel modello EVPB, assumendo per le nuove unità litotecniche le proprietà di tabella 2, la presenza di orizzonti superficiali degradati accentua la continuità delle ipotetiche superfici critiche che si localizzano a profondità minori (Fig. 6) rispetto a quelle individuate in figura 5. In corrispondenza delle zone deboli subverticali si generano locali stati di plasticizzazione per taglio.

L'introduzione della falda acquifera concentra le deformazioni di taglio, sebbene di modesta entità, lungo la fascia superficiale satura ai piedi del versante (Fig.7).

4. Conclusioni e discussione

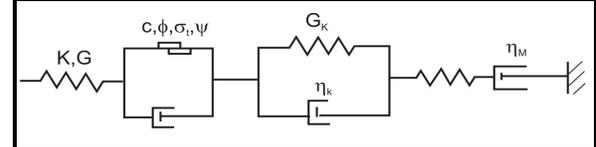
Lo studio ha affrontato il complesso tema della scelta dei modelli reologici nella simulazione dell'evoluzione di versanti interessati da fenomeni di deformazione gravitativa profonda.

I risultati raggiunti mostrano che il modello elasto-plastico, quello più comunemente usato nella modellazione di fenomeni franosi, può non essere sufficiente a spiegare deformazioni profonde, che nella realtà si generano con

velocità estremamente ridotte (fase primaria e secondaria di creep), a meno che non si introducano proprietà eccessivamente scadenti. L'eventuale collasso avviene per accelerazione in fase di creep terziario.

Tab. 2: Proprietà elasto-visco-plastiche delle unità litotecniche. *Elasto-visco-plastic properties of the defined Lithotechnical unit.*

proprietà EVP	Unità Litotecniche			
	Gneiss profondo	Gneiss medio	Gneiss superficiali	Milonite
η [Kg/m ³]	2900	2900	2900	2900
K [MPa]	26351	22399	10373	1459
G [MPa]	12200	10300	4790	673
c [MPa]		2.5	0.97	0.7
η [°]	57	67	67	39
η [°]	0	0	0	0
η_t [MPa]	0.66	0.55	0.19	0.017
G_k [MPa]	12200	10300	4790	673
η_k [MPa*s]	1.00E+29	1.00E+24	1.00E+24	1.00E+20
η_M [MPa*s]	1.00E+29	1.00E+24	1.00E+24	1.00E+20



I modelli visco-elastici sono meno indicati di quello elasto-visco-plastico. Quest'ultimo, nelle medesime condizioni di sollecitazione, genera stati tensionali e deformativi compatibili con quelli che definiscono processi di deformazioni gravitative profonde.

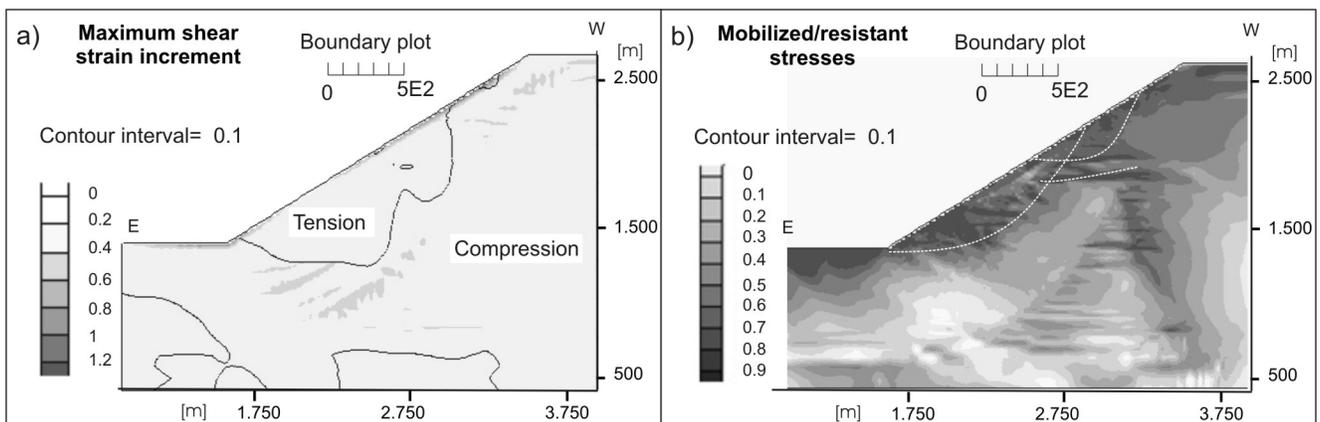


Fig. 5: Equilibrio alla fine della fase di deglaciazione: versante monolitologico e modello di comportamento elasto-visco-plastico di Burger (EVPB). a) isolinee di incremento delle deformazioni di taglio e delimitazione delle aree in trazione e compressione. b) Rapporto tra sforzi resistenti e sforzi mobilitati. Le linee tratteggiate indicano possibili superfici critiche.

Equilibrium state at the end of the unloading phase. Monolithologic slope, elasto-visco-plastic constitutive model (EVPB). a) Maximum-shear stain contour lines and tension-compression contours. b) Mobilized/resistant stresses. The outlined lines indicate possible critical surfaces.

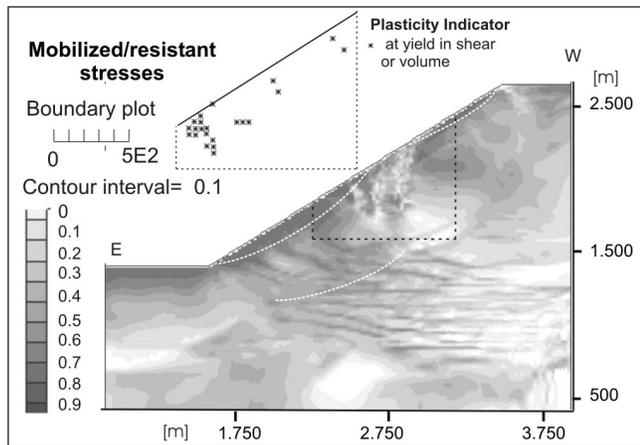


Fig. 6: Equilibrio alla fine della fase di deglaciazione: versante degradato e modello di comportamento elasto-visco-plastico di Burger (EVPB). a) Isolinee di incremento delle deformazioni di taglio e delimitazione delle aree in trazione e compressione. b) Rapporto tra sforzi resistenti e sforzi mobilitati. Le linee tratteggiate indicano possibili superfici critiche.
Equilibrium state at the end of the unloading phase. Monolithic slope, elasto-visco-plastic constitutive model (EVPB). a) Maximum-shear strain contour lines and tension-compression contours. b) Mobilized/resistant stresses. The outlined lines indicate possible critical surfaces.

Bisogna tuttavia considerare che i risultati della modellazione sono molto sensibili alla variazione dei parametri reologici caratteristici, la cui stima è tanto più difficoltosa quanto più complesso è il modello scelto. Prove di creep in laboratorio sui materiali interessati risultano utili ma presentano il problema dell'ingente variazione di scala tra campione e versante, e tra ragionevole durata della prova e tempo di evoluzione del fenomeno.

Nella definizione dei parametri dell'ammasso si ritiene che soprattutto una rete di monitoraggio a lungo termine possa essere utile allo scopo. Bisogna però considerare che, mentre per altri problemi geingegneristici (scavi in sotterraneo, o frane superficiali) i monitoraggi sono di uso frequente, nel problema affrontato (DGPV) appaiono tecnicamente di difficile realizzazione, quanto meno quelli

che raggiungono le profondità di interesse.

La sperimentazione condotta in questo lavoro contribuisce alla comprensione dei fenomeni di DGPV, alla definizione dei modelli di comportamento più rappresentativi, nella consapevolezza dei limiti indotti dall'indeterminatezza dei parametri di comportamento di creep del substrato roccioso profondo.

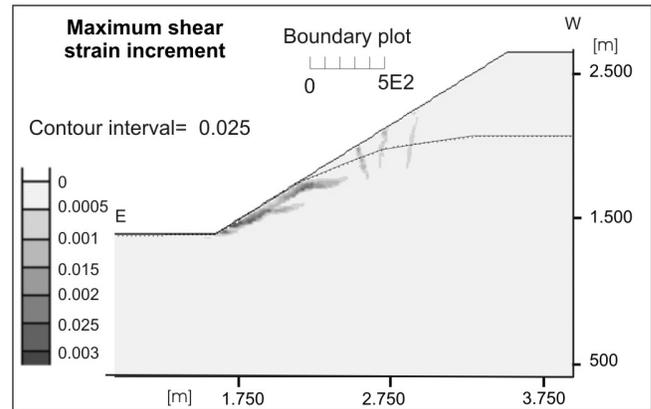


Fig. 7: Effetto dell'introduzione di falda acquifera: versante degradato e modello di comportamento elasto-visco-plastico di Burger (EVPB). Isolinee di incremento delle deformazioni di taglio.
Effect of the introduction of the water table. Monolithic slope, elasto-visco-plastic constitutive model (EVPB). Maximum-shear strain contour lines.

Nella simulazione condotta la sollecitazione principale è stata apportata eliminando il carico e il confinamento garantito al versante dalla massa glaciale. Anche introducendo elementi di debolezza strutturali la sola deglaciazione non sembra sufficiente a generare deformazioni profonde critiche. E' perciò necessario introdurre nella simulazione altre perturbazioni di carattere tettonico-strutturale, sforzi che devono concorrere all'evoluzione del dissesto.

Bibliografia

- Agliardi, F., Crosta, G.B., Zanchi A., 2001. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology* 59, 83-102
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification* Wiley, New York
- Crawford, A.M., Curran, J.H., 1983. A displacement discontinuity approach to modelling the creep behaviour of rock and its discontinuities. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 7, 245-268
- Cristescu, N.D., 1993. *Rock Rheology In Comprehensive Rock Engineering principles, practice & projects* Editor J.A. Hudson, Oxford 1, 523-544
- Cristescu, N.D., Casacu, O., Cristescu, C., 2002. A model for slow motion of natural slope. *Can. Geotech. J.* 39, 924-937
- Di Luzio, E., Saroli, M., Esposito, C., Bianchi-Fasani, G., Cabinato, G.P., Scarascia Mugnozza, G., 2004. Influence of structural framework on mountain slope deformation in the Maiella Anticlinale; central Appenine, Italy. *Geomorphology* 60 (3-4), 417-434
- Dramis, F., 1984. Aspetti geomorfologici e fattori genetici delle deformazioni gravitative profonde nell'area di Monte Gorzano (Monti della Laga, Appennino centrale). *Boll. Soc. Geol. It.* 106, 265-271
- Dramis, F., Sorriso Valvo, M., 1994. Deep seated slope deformations, related landslide and tectonics. *Eng. Geology.* 38, 231-243
- Dusseault, M.B. & Fordham, C.J., 1993. Time-dependent Behaviour of rocks. In *Comprehensive Rock Engineering principles, practice & projects*. Editor J.A. Hudson, Oxford 3, 119-145
- Fakhimi, A.A. & Fairhurst, C., 1994. A Model for the Time-dependent Behaviour of Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31 (2), 117-126
- Forcella, F. & Orombelli, G., 1984. Holocene slope deformation in Valfurva, Central Alps, Italy. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 34, 41-48
- Forlati, F., Bellardone, G., Campus, S., Coraglia,

- B., Sarri, H., 2001b, Rosone Landslide, Orco Valley, Piedmont, Italy. Imiriland, Regione Piemonte, Torino. D2-WP1
- Forlati, F., Gioda, G. & Scavia, C., 2001a. Finite Element Analysis of a Deep-seated Slope Deformation. *Rock Mech. Rock Engng.* 34 (2), 135-159
- Griffiths, D.V., Lane, P.A., 1999. Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique* 49 (3), 387-403
- Hamiel, Y., Liu, Y., Lyakhovsky, V., Ben-Zion, Y. & Lockner, D., 2004. A viscoelastic damage model with applications stable and unstable fracturing. *Geophys. J. Int.* 159, 1155-1165
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of Rock mass. *Int. J. Rock. Mech. Min. sci.* 34, 1165-1186
- Hoek, E., Marinos P., Benissi, M., 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and shared rock masses. The case of the Athens Schist Formation – *Bull. Eng. Geol. Env.* 57, 151-160
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. The Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada, Conference: NARMS-TAC, 2002. 267-271
- ISRM International Society for Rock Mechanics, 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggest Methods*, Pergamon, London
- Montrasio, A., Sciesa E., 1988. *Carta Geologica della Valle Spluga ed aree adiacenti, scala 1:50.000. CNR - Prog. Strat. Crosta Profonda (CROP)*, Milano
- Pawel, A.N., Zenon, M., 1999. A constitutive model for rock accounting for viscosity and yield stress degradation. *Comput. and Geotechnics* 25, 247-280
- Song, D., 1993, Non-linear Viscoplastic Creep of Rock Surrounding an Underground excavation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30 (6), 653-658
- Spickermann, A., Schanz, T., Datcheva M., 2003. Numerical study of a potential landslide in the Swiss Alps, 5th EUROMECH Solid Mechanics Conference, 17-22 August 2003, Thessaloniki, Greece
- Trumpy, R., Niggli, E., 1980. Geology of the Alpine chains born of the Tethys. *Bureau de Recherches Geologiques et Minières*. 295-296 Paris