

EFFETTI DELL'INTRUSIONE SUPERFICIALE DEL MAGMA SULLA STABILITÀ DELLA SCIARA DEL FUOCO (STROMBOLI)

Alessandro Graziani

Sapienza Università di Roma, Dip. Ingegneria Strutturale e Geotecnica

alessandro.graziani@uniroma1.it

Paolo Tommasi, Luca Verrucci

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria

paolo.tommasi@uniroma1.it; lucaverrucci@libero.it

Sommario

Nella nota sono illustrati i risultati di alcune analisi tensio-deformative effettuate per valutare gli effetti delle spinte indotte dall'intrusione superficiale di magma nel fianco NW del vulcano di Stromboli. Il modello 3D alle differenze finite si basa su una caratterizzazione geotecnica appositamente condotta e sulla morfologia e i dati sulla fuoriuscita del magma all'inizio dell'eruzione 2002. I risultati trovano conferma nelle osservazioni eseguite durante i primi giorni dell'eruzione e forniscono indicazioni generali sulla distribuzione dello stato di sforzo e deformazione nel fianco NW del vulcano. Ulteriori riscontri sono stati ottenuti dalle osservazioni effettuate durante la recente eruzione del 2007.

Fenomeni di instabilità sulla Sciara

L'edificio vulcanico di Stromboli ha un'altezza complessiva di circa 4000 m di cui 900 emersi. I colassi vulcano-tettonici succedutisi sull'edificio hanno lasciato grandi nicchie; la più evidente, estesa su tutto il fianco NW emerso e sommerso dell'isola, è stata riempita dai prodotti della recente attività del vulcano, formando la cosiddetta Sciara del Fuoco su cui si concentrano i maggiori fenomeni di instabilità. Il deposito di riempimento, formato da una successione di banchi di materiali vulcanoclastici, colate di lava generalmente sottili e, all'intorno dei crateri, piroclastiti di caduta, poggia su un substrato più rigido e resistente, a sua volta formato da alternanze di spesse colate di lava e piroclastiti cementate.

Le due ultime eruzioni (2002 e 2007) hanno messo in evidenza che in particolari condizioni la risalita del magma è accompagnata da una sua intrusione relativamente superficiale nel versante. La spinta del magma intruso può indurre fenomeni di instabilità che, come nel 2002, possono evolversi in grandi frane.

Nel dicembre 2002 le frane distruttive sulla parte NE della Sciara sono state precedute da un movimento profondo che ha prodotto forti spostamenti alla sommità del versante progressivamente più ridotti procedendo verso mare. Anche nel 2007 si è verificato il movimento di un grande volume della sommità del settore NE della Sciara, che però non si è evoluto in frane distruttive.

Il modello 3D

Le analisi si sono concentrate sullo studio delle modalità deformative del versante a seguito dell'applicazione della spinta del magma. In particolare, è stata indagata l'influenza delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali vulcanoclastici, della distribuzione della spinta e della tridimensionalità del versante.

Il modello 3D alle differenze finite (FLAC 3D, Itasca, 2006) riproduce la metà NO dell'edifi-

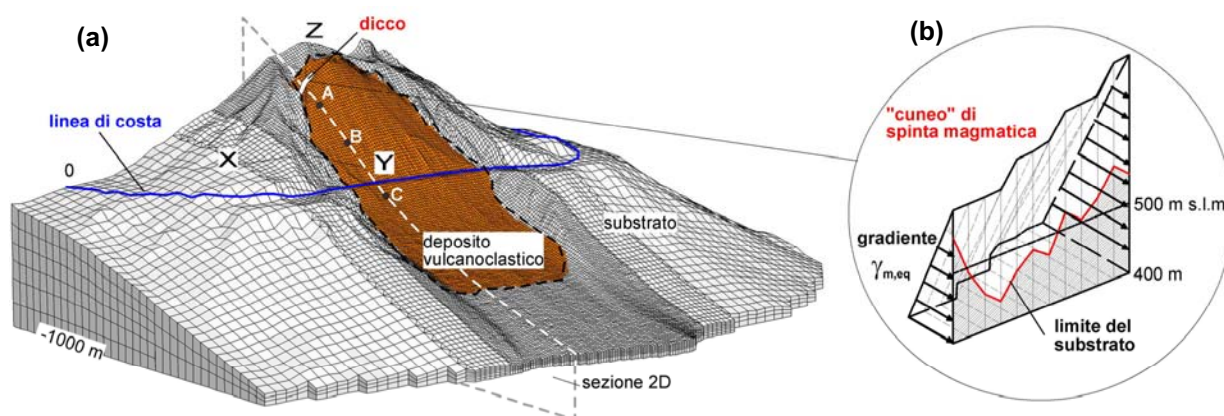


Figura 1. Modello 3D del versante NW dell'isola (a); schematizzazione della spinta del magma (b).

cio vulcanico di Stromboli (Fig.1), fino alla quota di -1000 m s.l.m (Baldi et al., 2005; Chiocci et al., 2006). L'edificio vulcanico è stato modellato con due materiali: a) vulcanoclastiti di riempimento della Sciara; b) substrato, costituito da un unico materiale con resistenza e rigidità elevate in rapporto alle vulcanoclastiti. La superficie piezometrica è stata posta al livello del mare; tutti i materiali della parte subaerea del pendio sono in condizioni asciutte mentre per il materiale saturo sottomarino sono state assunte condizioni drenate. Il tetto del substrato è stato schematizzato con una forma "a sedia", tipica di un'antica nicchia di collasso, la cui geometria è stata definita in base alla morfologia del versante e all'analogia con altri casi.

La spinta del magma, intruso sotto forma di un dicco tabulare a giacitura inizialmente sub-verticale, è stata simulata con una distribuzione di pressioni (Fig.1b) crescenti linearmente con la profondità (gradiente $\gamma_{m,eq}$) fino alla base del dicco (quota +500 m). A causa dell'andamento della superficie topografica, il diagramma di spinta presenta anche un gradiente orizzontale. I risultati delle analisi sono illustrati anche rappresentando gli spostamenti su tre verticali poste lungo una sezione monte-valle passante per la mezzeria del dicco (Fig.1a). La stessa sezione è stata utilizzata per costruire un modello bidimensionale di confronto. La pressione del magma è stata introdotta mediante due diverse procedure:

- annullando gli elementi del dicco ed applicando uno sforzo normale alle pareti del dicco;
- applicando ai nodi del dicco un'analogia distribuzione stazionaria di pressione interstiziale (gradiente $\gamma_{m,eq}$).

Il peso dell'unità di volume γ dei materiali vulcanoclastici, crescente con la profondità, è stato calcolato dalle curve di compressibilità edometrica e dal γ_0 misurato in sito. La relazione tra σ'_v e γ_d è stata estrapolata dai tratti di primo carico: essa risulta lineare con gradiente simile per le diverse prove (Fig. 2a).

Il modello costitutivo adottato è di tipo elasto-plastico ideale. Poiché nel deposito vulcanoclastico sono presenti orizzonti più fini, si è utilizzato un criterio di resistenza con giunti ubiquitari che prevede la presenza di piani di debolezza con orientamento prefissato all'interno di una matrice isotropa. Sulla base delle prove di taglio diretto su campioni ricostituiti di granulometria grossolana, (Fig. 2b), per la matrice è stato assunto un criterio di resistenza bilineare ($c_1=0.02$ MPa, $\phi_1=44^\circ$; $c_2=0.35$ MPa, $\phi_2=26^\circ$). Per i giunti ubiquitari, la cui orientazione segue quella media del versante della Sciara (inclinazione 35° , direzione $N48^\circ O$), è stato invece adottato un criterio di resistenza classico di Mohr-Coulomb ($c_j=0$, $\phi_j=35^\circ$) ricavato da prove di taglio anulare sui materiali più fini. L'angolo di dilatanza è stato assunto nullo.

Il modulo elastico E' , crescente con la profondità, è stato valutato sulla base dei primi gradini di carico delle prove triassiali CU- K_0 sul materiale saturo (Boldini et al., 2007). I valori,

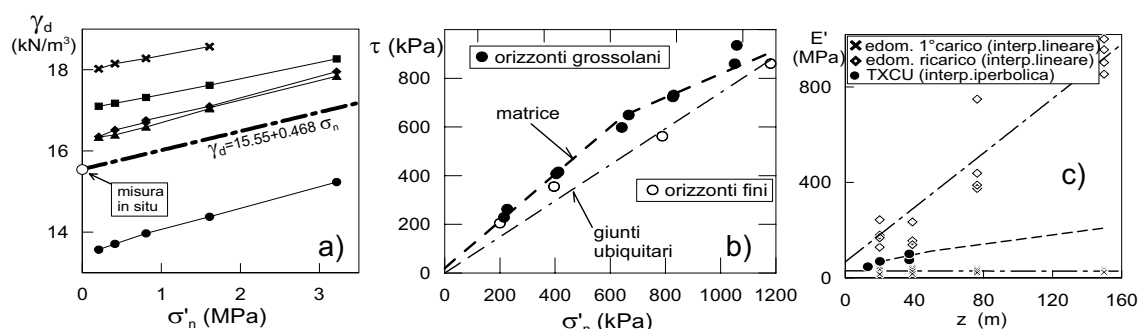


Figura 2. Comportamento meccanico dei materiali vulcanoclastici

estrapolati con legge iperbolica fino a livelli di confinamento maggiori, sono compresi tra i moduli ricavati da prove edometriche su materiale asciutto, assumendo $\nu'=0,3$ (Fig. 2c).

Risultati delle analisi 2D e 3D

Le analisi sono state condotte incrementando per passi il gradiente $\gamma_{m,eq}$ della spinta magmatica, anche al di là del valore corrispondente al peso proprio stimato del magma ($\gamma_{m,eq}=27 \text{ kN/m}^3$), per meglio evidenziare il meccanismo di collasso.

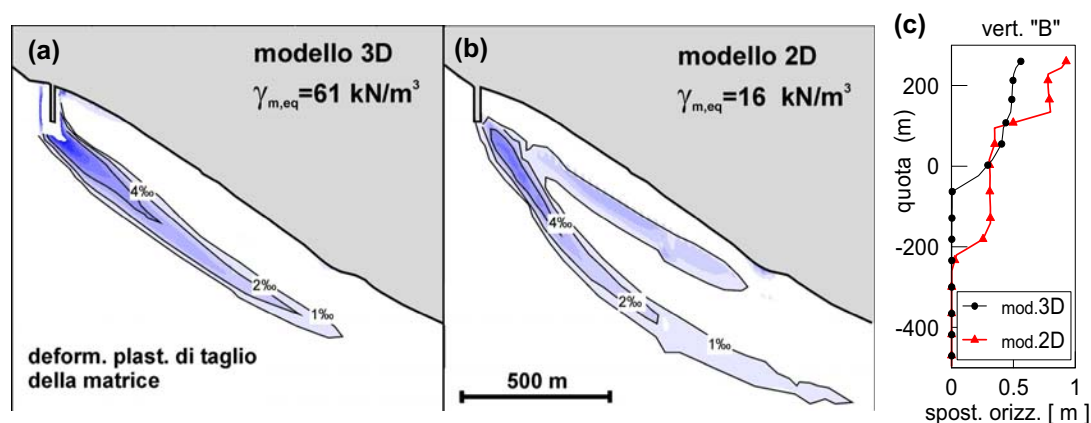


Figura 3. Confronto tra analisi piane e tridimensionali.

L'adozione di un modello bidimensionale introduce evidenti differenze negli effetti della spinta magmatica. Nell'analisi 3D la spinta necessaria al raggiungimento delle condizioni di collasso è circa 5 volte quella del calcolo 2D. Il volume di deposito coinvolto è inoltre nettamente maggiore nel modello 2D, come si desume dal confronto tra le bande di taglio ottenute in due analisi con spostamenti superficiali paragonabili (Fig. 3a e 3b). Il modello 2D evidenzia la tendenza alla formazione, anche per modesti livelli di spinta, di due corpi frana sovrapposti praticamente indeformati (Fig. 3c).

Il confronto tra analisi eseguite con diversi valori di γ_d evidenzia come il peso più elevato determini, a parità di spinta del magma, deformazioni maggiori. L'andamento delle deformazioni lungo tre verticali e la posizione delle fasce di taglio rimangono tuttavia invariati (Fig. 4). Gli spostamenti normalizzati rispetto a quelli di uno stesso punto di riferimento sono, nel modello con peso di volume maggiore, più uniformi lungo il pendio subaereo, indicando una traslazione unitaria dovuta alla plasticizzazione lungo

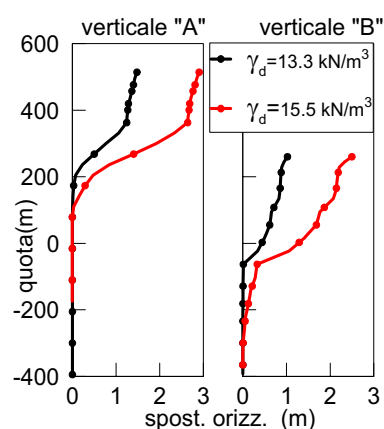


Figura 4. Effetto del peso dell'unità di volume dei materiali vulcanoclastici

la banda di taglio.

Un incremento della rigidità del deposito riduce proporzionalmente l'entità degli spostamenti senza modificarne la distribuzione nel versante: in particolare non cambia la posizione delle bande di taglio.

Analisi eseguite con i due diversi metodi mostrano che gli spostamenti ricavati con la procedura b) sono circa due volte maggiori ma non si notano differenze sostanziali nella deformazione a grande scala del versante (la posizione delle bande di taglio è praticamente coincidente). L'applicazione di una spinta meccanica produce tuttavia una deformazione più localizzata del terreno immediatamente a valle del dicco, assimilabile alla formazione ad un cuneo di spinta passiva.

Analisi svolte con il modello 2D indicano che l'intrusione ha massima influenza (in termini di spostamenti indotti) quando il dicco immerge verso valle, con inclinazione compresa tra la verticale e 75° . L'immersione del dicco verso valle (Fig. 5b) comporta un'inclinazione verso l'alto della spinta, con formazione di un cuneo in condizioni "passive" più netto, delimitato da una superficie in contropendenza che unisce la base del dicco alla superficie topografica a quote elevate. Questa modalità di rottura, che sembra definire un cinematisma a due cunei (Fig. 5c), è in accordo con la dislocazione di un consistente volume di terreno osservata durante l'ultima eruzione del 2007 nella parte alta del pendio.

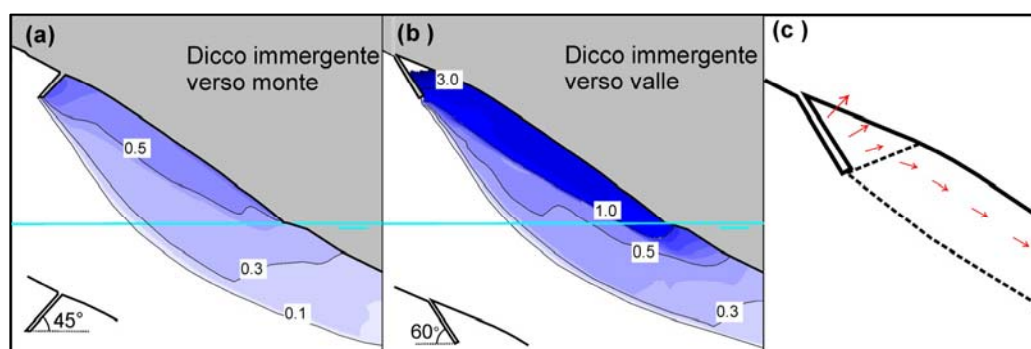


Figura 5. Spostamenti orizzontali (in m) per diverse inclinazioni del dicco (a) e (b); schema a due cunei (c)

L'immersione verso monte del dicco (Fig. 5a) comporta invece una sensibile diminuzione degli spostamenti e una diffusione più omogenea delle deformazioni all'interno del deposito vulcanoclastico: le fasce di taglio a profondità di 100-130 m tendono a scomparire lasciando posto ad una deformazione diffusa di elevati spessori del deposito.

Si sottolinea infine come l'uso di un modello costitutivo con giunti ubiquitari, oltre a riflettere una proprietà meccanico-strutturale del deposito, abbia fornito risultati più rispondenti alle modalità di dissesto, caratterizzate dalla formazione di superfici di scorrimento più corticali che accompagnano le deformazioni di versante più profonde.

Bibliografia

- Baldi, P., Fabris, M., Marsella, M., Monticelli, R. 2005. Monitoring the morphological evolution of the Sciara del Fuoco during the 2002-2003 Stromboli eruption using multi-temporal photogrammetry. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(4): 199-211.
- Chiocci F.L., Romagnoli C., Tommasi P., Bosman A. 2006. The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: characters and failure mechanisms, Submitted to *Journal of Geophysical Research*.
- Boldini D., Rotonda T., Tommasi P. 2007. Caratteristiche di resistenza del materiale vulcanoclastico della Sciara del Fuoco (Stromboli). *Convegno annuale dei ricercatori di ingegneria geotecnica, Salerno*. In stampa
- Itasca 2006. FLAC 3D User's manuals. Minneapolis.