

## Caratterizzazione geotecnica e modellazione numerica ad elementi distinti dei depositi della Sciara del Fuoco (Stromboli, Italia)

Tiziana Apuani<sup>1\*</sup>, Marco Masetti<sup>2</sup>, Andrea Uttini<sup>3</sup>, Luigina Vezzoli<sup>4</sup>, Claudia Corazzato<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Autore corrispondente: 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

<sup>2</sup>Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “Ardito Desio”, marco.masetti@unimi.it

<sup>3</sup>Università degli Studi dell’Insubria Como, Dip.di Scienze Chimiche e Ambientali, andrea.uttini@uninsubria.it

<sup>4</sup>Università degli Studi dell’Insubria Como, Dip.di Scienze Chimiche e Ambientali, luigina.vezzoli@uninsubria.it

<sup>5</sup>Università degli Studi di Milano Bicocca, Dip. di Scienze Geologiche e Geotecnologie, claudia.corazzato@unimib.it

*Geotechnical Characterization and Modeling, via Particle Methods, of the Sciara del Fuoco Volcanic Debris, Stromboli Island, Italy*

**ABSTRACT:** The Stromboli island is one of the most active volcanoes in the world. Its structural evolution has been characterized by four large sector collapses affecting the NW flank, resulting in the creation of the Sciara del Fuoco horseshoe-shaped depression.

In this study the local and general stability of the Sciara del Fuoco recent volcanic debris has been analysed. These loose deposits represent a potential unstable mass that can be mobilized evolving in granular flow running along the Sciara del Fuoco into the sea, eventually forming tsunami waves as in the latest landslide events of December 2002 and January 2003.

The paper presents the first achievements toward the stability analysis of volcanic debris via numerical modeling according to the following steps: 1) geotechnical characterization of materials 2) calibration of the numerical model based on experimental geotechnical data. A set of biaxial tests has been simulated by numerical modelling and compared with the experimental triaxial compression tests. The sensitivity analysis has been focused on finding the particle mechanical parameters that better represent the rheology of the volcanic debris at the macroscopic scale. Specific mathematical relations between mechanical parameters of single particles and particles assembly have been found as a function of the acting stress state. These relations represent the first goal in determining the actual rheology of granular materials and in evaluating its influence on slope dynamics by performing particle based numerical modelling.

*Key terms:* Volcanic debris, triaxial test, particle numerical modeling, PFC2D

*Termini chiave:* depositi vulcanici granulari, prove triassiali, modellazione numerica, PFC2D

### Riassunto

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati delle fasi di studio propedeutiche e necessarie allo sviluppo di un modello numerico ad elementi discreti per la valutazione dell’instabilità dei depositi granulari che riempiono la depressione della Sciara del Fuoco nell’isola di Stromboli. L’utilizzo di questi modelli comporta una attenta e precisa fase di calibrazione e caratterizzazione geotecnica dei materiali coinvolti, che deve preferibilmente essere condotta cercando di ricostruire col calcolo le curve sforzo-deformazioni misurate in laboratorio tramite prove triassiali. Questo permette di trovare i parametri meccanici alla microscala che meglio rappresentano il comportamento dell’aggregato in esame, sia a rottura sia pre-rottura. Attraverso questa fase di calibrazione, unita ad una analisi di sensitività, è inoltre possibile derivare una serie di relazioni quantitative fra i parametri, indispensabili per implementare l’analisi di stabilità generale del pendio, nel modello di calcolo.

### 1. Introduzione

L’isola di Stromboli, nell’arcipelago delle Eolie, è uno dei vulcani più attivi al mondo. Si tratta di uno stratovulcano la cui evoluzione strutturale, negli ultimi 100.000 anni, è stata caratterizzata da fasi distruttive, collassi calderici, collassi laterali e fenomeni di erosione superficiale alternate a fasi di crescita (Pasquarè et al. 1993; Tibaldi, 2001). La depressione della Sciara del Fuoco, nel versante nord occidentale dell’isola, è il risultato di almeno quattro collassi laterali. Il presente lavoro tratta i passi preliminari per l’analisi dei fenomeni di instabilità locale e generale che coinvolgono i depositi recenti della Sciara del Fuoco. Si tratta di flussi di detrito, o “debris flow”, che dal versante possono raggiungere la costa e il fondale marino. Quando queste masse raggiungono il mare, le onde che ne conseguono (tsunami) costituiscono un ulteriore fonte di pericolo per gli abitati di Stromboli e Ginostra, come verificatosi nell’evento vulcanico-gravitativo del dicembre 2002 - gennaio 2003. In aggiunta a questi movimenti di

massa esistono anche una serie di movimenti più localizzati, ma con tempi di ritorno molto bassi, che fanno del versante un sistema ad elevata instabilità. Un approccio che permette di considerare sia la possibilità di franamenti di grandi masse sia quella di piccole frazioni di pendio è quello della modellazione numerica ad elementi distinti. Questa permette di analizzare all'interno di un aggregato le interazioni che avvengono a scala particellare e le conseguenti ripercussioni che esse hanno sulla stabilità locale e generale di un pendio. Una delle difficoltà maggiori nell'utilizzo di questi modelli è la determinazione delle caratteristiche meccaniche delle particelle (microscala), che non possono essere determinate direttamente, ma necessitano una derivazione indiretta che parte dalla conoscenza delle caratteristiche meccaniche dell'aggregato (macroscala). In questo lavoro vengono illustrate le procedure ed i risultati derivanti dall'analisi numerica, condotta per la determinazione del rapporto fra le caratteristiche meccaniche alla micro e macro scala, ed il loro conseguente utilizzo per l'implementazione dell'analisi delle condizioni di instabilità del pendio formato dall'aggregato analizzato nella modellazione.

**2. Caratterizzazione geotecnica dei depositi della Sciara del Fuoco**

Per la caratterizzazione fisico tecnica dei materiali sono stati prelevati campioni nella parte bassa e nella parte alta della depressione della Sciara del Fuoco e per confronto anche in aree esterne ad essa, nella zona delle Fossette e di Rina Grande-Schicciolo (Fig. 1) dove si sono verificati fenomeni di instabilità del materiale granulare comparabili a quelli avvenuti nella Sciara del Fuoco. I dettagli concernenti l'ubicazione dei campioni nel contesto vulcano-stratigrafico sono riportati in Apuani et al. (2005).

I campioni sono rappresentativi delle condizioni fisico-meccaniche dell'attività recente (depositi superficiali, profondità 0÷1 m) e della frazione granulometrica inferiore alla ghiaia. Si tratta di sabbie e sabbie ghiaiose, SP o SW secondo la classificazione U.S.C.S. (Unified Soil Classification System), prevalentemente uniformi (coefficiente di uniformità  $Cu < 7.3$ ). Il contenuto d'acqua allo stato naturale è  $W < 6.3$  %. Il peso specifico dei costituenti solidi è  $G_s = 28.5-30.2$  kN/m<sup>3</sup>, mentre i pesi di volume minimi e massimi, determinati in laboratorio sulla

frazione inferiore a 9.5 mm sono rispettivamente:  $\gamma_{dmin} = 12.9 \div 14.8$  kN/m<sup>3</sup> e  $\gamma_{dmax} = 16.6 \div 17.4$  kN/m<sup>3</sup> da cui si ricavano porosità  $n = 40 \div 55$  %. I parametri di resistenza al taglio, ricavati mediante prove triassiali consolidate-drenate, sono  $c_p = 0$ ,  $\phi_p = 43^\circ \div 51^\circ$  in condizioni di picco e  $c_r = 0$ ,  $\phi_r = 39^\circ \div 49^\circ$  in condizioni di resistenza residua (Tab.1).

**3. Attribuzione dei parametrici fisico-tecnici di base**

I depositi vulcanici sono stati analizzati tramite la teoria degli elementi distinti con il codice di calcolo bidimensionale PFC2D (Itasca 2004) che permette di analizzare il comportamento meccanico di aggregati di particelle di forma sferica o discoidale. Il metodo è basato sull'uso di uno schema numerico esplicito che calcola le forze agenti a livello interparticellare derivandone gli spostamenti reciproci che si hanno fra le particelle stesse. Il codice analizza quindi lo spostamento e la rotazione delle particelle riconoscendo automaticamente la formazione di nuovi contatti col progredire della simulazione ed evidenziando il movimento dell'intero insieme. In questo modo il comportamento alla macroscala del materiale deriva dalle interazioni dei componenti alla microscala di cui quindi necessita definirne le proprietà tecniche.

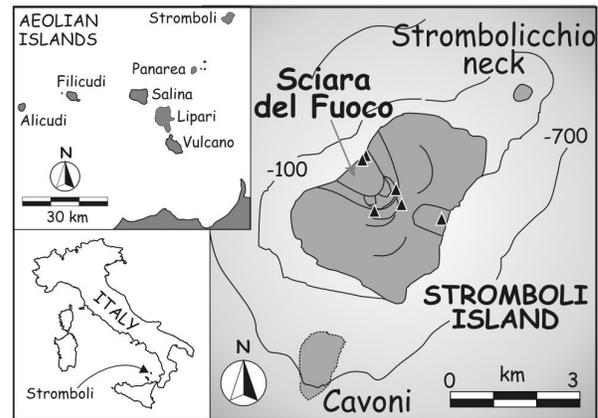


Figura 1. Ubicazione dell'area di studio e dei siti di campionamento (triangoli neri). Location of the Stromboli island and site of sampling (black triangles).

Tabella. 1 Proprietà fisico-meccaniche dei depositi sciolti dell'attività recente del vulcano Stromboli. Physical and mechanical properties of loose deposits related to the present activity of the Stromboli volcano.

sample	AGI description	U.S.C.S.	Cu	W	Gs	$\gamma_d$ max <9.5mm	$\gamma_d$ min <9.5mm	n min	n max	$\phi_p$	$c_p$	$\phi_r$
			-	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	-	-	°	(kN/m <sup>2</sup> )	°
T1	sabbia ghiaiosa	SP	5.68	6.30	28.52	16.65	12.96	0.42	0.55	43.5	0	39.3
T2	sabbia ghiaiosa	SW	6.25	5.20	28.93	17.42	14.58	0.40	0.50	45.3	0	40.2
T4	sabbia con ghiaia	SW	7.30	1.10	30.23	17.26	14.82	0.43	0.51	46.3	0	39.2
T5	sabbia ghiaiosa	SP	3.16	5.05	28.96	16.83	14.34	0.42	0.50	48.7	0	42.3
T6	sabbia debolmente ghiaiosa	SP	2.80	6.03	29.19	17.09	14.51	0.41	0.50	50.8	0	48.9

In particolare i parametri richiesti dal modello per la caratterizzazione tecnica di un materiale sciolto sono: 1) porosità, 2) granulometria, 3) peso specifico dei granuli, 4) coefficiente di attrito interparticellare, 5) rigidità normale e di taglio delle particelle. I primi tre parametri sono derivabili direttamente da prove di laboratorio mentre gli ultimi due devono essere ricavati dalla conoscenza dei parametri meccanici macroscopici ottenuti dalle prove di resistenza effettuate sui materiali.

**3.1 Porosità**

Per l’attribuzione del valore di porosità è stato necessario passare dalla porosità reale in tre dimensioni, calcolata in laboratorio, ad una porosità equivalente in due dimensioni. Per questo passaggio è necessario riferirsi alla relazione esistente tra lo stato reale del deposito e gli stati estremi di addensamento espressi dal parametro D:

$$D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$

dove n, n<sub>max</sub> e n<sub>min</sub> rappresentano rispettivamente la porosità reale del campione, e quella massima e minima teoriche per particelle circolari di diametro analogo a quelle reali. La porosità in due dimensioni equivalente viene quindi espressa dalla relazione (Hainbuchner et al 2003)

$$n_{2D} = n_{2D,max} - D(n_{2D,max} - n_{2D,min})$$

**3.2 Granulometria**

A causa di problemi legati all’instabilità numerica, per la rappresentazione dei depositi è stata selezionata solo una parte della curva granulometrica, con raggio delle particelle compreso tra 15 mm e 23 mm. Il deposito è stato generato attribuendo alla granulometria una distribuzione gaussiana e creando così un deposito a impacchettamento irregolare composto da un numero di particelle in funzione anche della porosità del materiale.

**3.3 Peso specifico**

Per il peso specifico dei granuli è stato utilizzato direttamente il valore trovato in laboratorio. La massa di ogni particella viene poi calcolata considerando le particelle come dischi in funzione del loro peso specifico, del raggio e dello spessore del disco.

**4. Attribuzione dei parametrici meccanici**

L’attribuzione dei valori di coefficiente di attrito interparticellare e di rigidità normale e di taglio delle particelle non può essere fatta direttamente dai parametri di resistenza al taglio a scala del campione, ricavate in laboratorio. Pertanto, al fine di creare un modello concettuale che ben rappresenta il comportamento meccanico del materiale, sono state effettuate, tramite modellazione numerica, una serie di prove biassiali in grado di riprodurre le prove di compressione sperimentali

condotte in laboratorio, per poi confrontarne i risultati ottenuti. Le simulazioni numeriche sono state condotte per gli sforzi di confinamento utilizzati nelle prove di laboratorio, mettendo a confronto le diverse curve sforzi-deformazioni sperimentali con quelle calcolate. In questo modo si è voluto ricercare i parametri a scala del singolo granulo che, non solo si adeguano maggiormente alle condizioni di rottura dei materiali, ma che ben ne descrivono anche il comportamento deformativo nella fase pre e post rottura.

**4.1 Coefficiente di attrito interparticellare**

Il coefficiente di attrito interparticellare μ è il parametro che maggiormente controlla la resistenza al taglio nei materiali non coesivi. Per calcolare il valore del coefficiente di attrito interparticellare che meglio corrisponde al comportamento meccanico generale dell’aggregato e per valutare l’influenza di questo parametro sulle condizioni di resistenza del materiale, sono state simulate una serie di prove biassiali, con proprietà fisico tecniche di base invariate e con un valore anch’esso costante di rigidità normale e di taglio pari a 1e8 N/m.

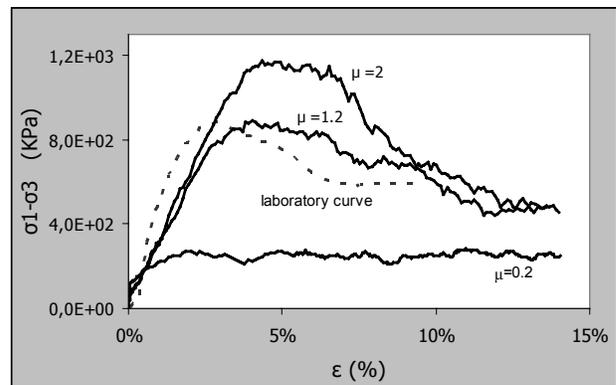


Figura 2. Confronto fra le curve sforzi deformazioni per diversi valori di μ e la curva sperimentale per una pressione di confinamento di 147 kPa

*Comparison among the stress-strain curves for different μ and the experimental curve for a confining stress of 147 kPa.*

Il confronto tra alcune curve sforzo-deformazione ricavate dalle simulazioni numeriche per diversi valori di μ alla pressione di confinamento di 147 kPa e la rispettiva curva sperimentale sono riportate in Fig. 2. Si evidenzia la forte dipendenza della resistenza al taglio di picco del materiale dal valore di μ, con il passaggio da valori di resistenza pari a 200 kPa per μ=0.2 a valori di resistenza pari a 1200 kPa per μ=2. Si nota inoltre come la curva che fornisce lo stesso valore di resistenza di picco misurato (μ=1.2) simili in maniera sufficientemente adeguata l’andamento generale della curva, con il comportamento rammollente del materiale, ma presenti una certa approssimazione nel riprodurre il comportamento del materiale pre-rottura e nell’individuare la corretta entità di

deformazione alla rottura.

Una serie di simulazioni a diversi valori di  $\mu$  sono state inoltre effettuate per verificarne la relazione con l'attrito alla macroscale. Ogni gruppo di simulazioni è stato condotto per diverse pressioni di confinamento in modo da ricavare l'involuppo a rottura del materiale e derivare il corrispondente angolo di attrito macroscopico. La Fig. 3 mostra la relazione trovata fra attrito macroscopico e microscopico, espresso come  $(\phi\mu) \arctan(\mu)$ , che evidenzia come al crescere del valore di  $\mu$  il rapporto fra i due decresca e raggiunga valore unitario per valori attorno a  $50^\circ$ . Tali risultati, che permettono di definire una relazione di potenza fra i due parametri, sono in linea con quanto ottenuto da Herten (1999) e confermano sia la marcata non linearità esistente fra i due parametri sia l'esistenza di un valore di attrito macroscopico diverso da zero quando quello microscopico è nullo (Kruty e Rothenburgh 2004).

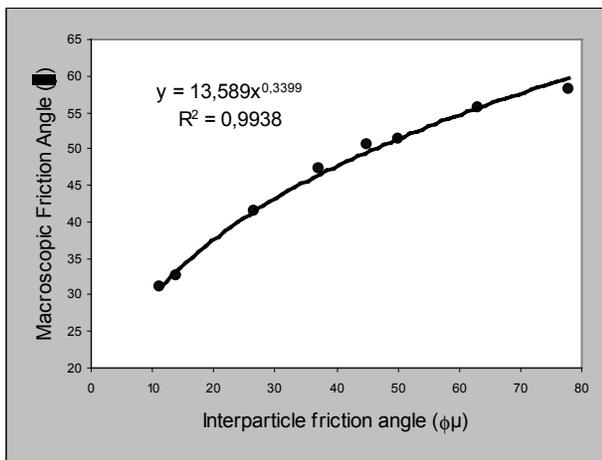


Figura 3. Relazione tra angolo di attrito delle particelle e angolo di attrito macroscopico  
*Relation between interparticles and macroscopic friction angle*

#### 4.2 Rigidità normale e di taglio delle particelle

La deformabilità di un materiale granulare non cementato è principalmente descritta dai valori di rigidità (normale,  $k_n$ , e di taglio,  $k_s$ ) delle singole particelle che lo compongono. Al fine di ridurre il numero di variabili da determinare si è considerata in questo studio l'uguaglianza tra  $k_n$  e  $k_s$  (McGuire e Gallagher 1979). L'analisi di sensitività è stata quindi compiuta facendo variare il valore della rigidità fino ad ottenere l'andamento della curva sforzo-deformazione che meglio approssimasse quello sperimentale. L'analisi dei risultati ha mostrato come la variazione della rigidità influenzi principalmente il comportamento del materiale pre-rottura nella fase di deformazione elastica ma anche, seppur in misura minore, il valore di resistenza al taglio di picco. In Fig. 4 viene riportato come esempio il confronto fra curve calcolate per diversi valori della rigidità delle particelle e la curva sperimentale, per una pressione di confinamento di 147 kPa. Si evidenzia l'effetto della

variazione della rigidità sul comportamento generale tenso-deformativo del materiale. Si noti anche come, per l'influenza della diversa rigidità, la curva di migliore adattamento abbia richiesto una diminuzione del valore di coefficiente di attrito interparticellare rispetto a quello evidenziato in Fig. 2 che soddisfaceva principalmente la corrispondenza dei valori di resistenza di picco calcolati e misurati. La determinazione dei parametri di resistenza a scala particellare basata sulla ricostruzione della curva sforzo-deformazione e non sul solo valore di resistenza di picco, comporta sicuramente maggiori difficoltà ma offre il grande vantaggio di determinare in maniera più realistica l'entità delle deformazioni che il campione alla macroscale è in grado di sopportare prima di arrivare a rottura.

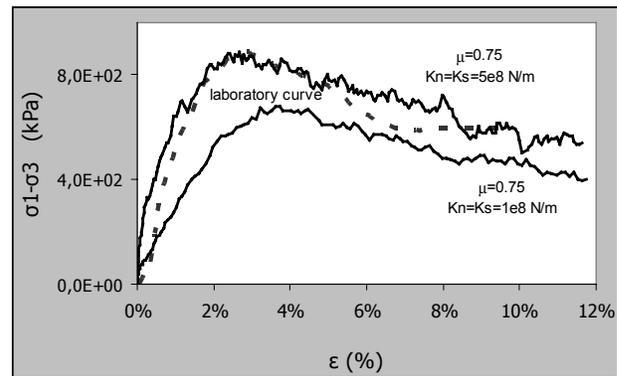


Figura 4 Confronto fra curve sforzi deformazioni per diversi valori di rigidità delle particelle e la curva di laboratorio  
*Comparison between stress-strain curves with different contact stiffness and the laboratory stress strain curve*

#### 5. Discussione

In Fig. 5a,b viene rappresentato il valore della resistenza di picco calcolata in rapporto alle pressioni di confinamento per diversi valori di  $\mu$ , mantenendo la rigidità al contatto costante e pari a  $1e8$  N/m, (Fig. 5a) e della rigidità, mantenendo  $\mu$  costante pari a 0.5 (Fig. 5b). In fig. 5a si nota come il rapporto fra le due variabili tenda a passare da una relazione lineare per bassi valori di  $\mu$ , ad un andamento più marcatamente curvilineo per valori elevati di  $\mu$  ( $\mu=1.2$ ). Sono stati inoltre evidenziati con le caselle quadrate i valori di  $\mu$  che meglio si adattano ai valori di resistenza di picco misurati alle diverse pressioni di confinamento; questo indica che per la parametrizzazione a scala particellare di un assemblato non può essere scelto un singolo valore di  $\mu$  ma che questo deve essere espresso in funzione dello sforzo geostatico a cui è soggetto l'aggregato.

Si ribadisce inoltre come anche la rigidità delle particelle influenzi la resistenza di picco, con variazioni di oltre 200 kPa per corrispondenti variazioni di un ordine di grandezza del valore di rigidità (Fig 5b).

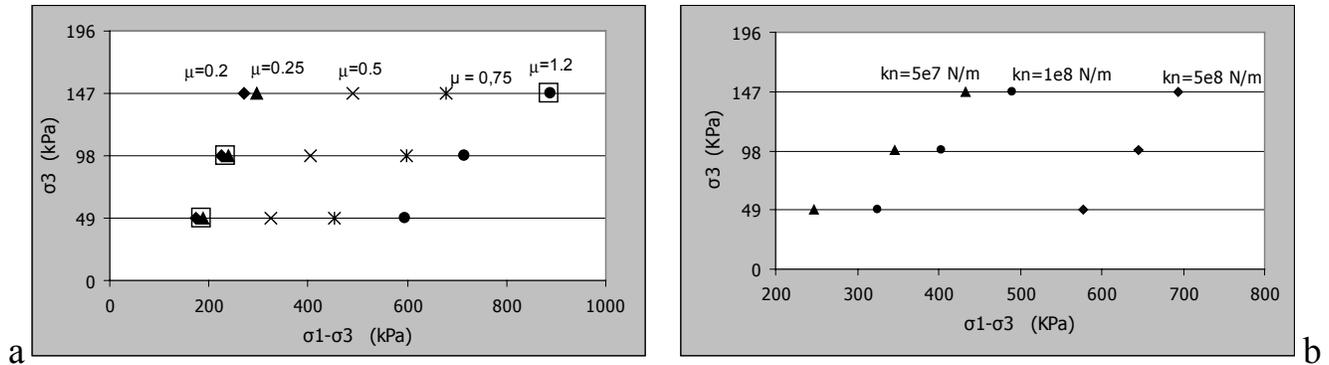


Figura 5 Resistenze di picco calcolate per diversi valori di  $\mu$  con  $K_n=K_s=1e8$  N/m (a) e della rigidità delle particelle per attrito interparticellare=0.5 (b)  
 Calculated peak strengths for different  $\mu$  (a) and particle stiffness (b)

Poiché la resistenza di picco del materiale dipende sia da  $\mu$  sia, seppur in maniera meno sensibile, da  $k_n$  e  $k_s$ , esiste per ogni pressione di confinamento più di una coppia di questi parametri in grado di simulare le condizioni di rottura sperimentali. Tali coppie di valori sono rappresentate in Fig. 6a dove si evidenzia come i parametri siano legati da funzioni di decadimento esponenziale, più marcate per il campo delle pressioni di confinamento <100 kPa. Qualora l'interesse di uno studio fosse concentrato solo sulla determinazione delle condizioni di sforzo che portano a rottura un materiale granulare, tali funzioni potrebbero idealmente essere utilizzate all'interno della simulazione numerica prendendo, per una certa pressione di confinamento, una qualsiasi combinazione di coppie di valori che soddisfi le relazioni matematiche trovate.

Inoltre la somiglianza delle curve a pressioni di confinamento di 49 kPa e 98 kPa indica che a pressioni di confinamento non elevate (< 100 kPa) il modello sia meno sensibile alle variazioni dei due parametri rispetto a pressioni più elevate. Questo fa sì che in fase di modellazione, per questo campo di pressioni, l'attribuzione

di valori dei parametri alla microscala possa tollerare anche qualche approssimazione senza inficiare sensibilmente la qualità dei risultati.

In alcune situazioni, come nel caso in esame, l'interesse è quello di potere analizzare anche il comportamento pre rottura del materiale, per verificare le deformazioni massime che questo può tollerare prima che si raggiungano rispettivamente le condizioni di snervamento e rottura. Per questo tipo di analisi ad ogni pressione di confinamento corrisponde una sola coppia di valori dei parametri in grado di soddisfare completamente il comportamento deformativo anche nel campo elastico (Fig. 6b).

La relazione lineare riscontrata tra queste coppie di valori, seppur basata su pochi punti, risulta di estrema importanza. Essa permette, in fase di modellazione di un pendio costituito dal materiale in esame, di avere la coppia di valori dei parametri che ne determina il comportamento meccanico per qualsiasi valore dello sforzo geostatico o tettonico agente sull'aggregato.

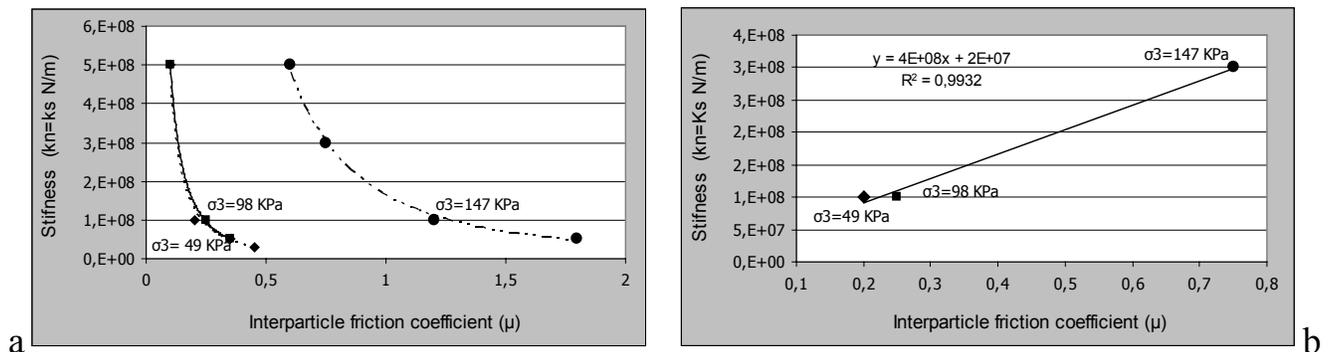


Figura 6 Correlazioni calcolate fra  $\mu$  e rigidità che meglio simulano la sola resistenza al picco dei materiali (a). Relazioni fra i valori dei parametri che meglio simulano sia la resistenza di picco dei materiali sia il comportamento pre rottura (b)  
 Calculated correlation between interparticle friction coefficient and stiffness best fitting only measured peak strengths (a). Correlation among parameters values best fitting both measured peak strength and pre failure behaviour

## 6. Conclusioni

Poiché le relazioni tra attrito a scala delle particelle e attrito alla macroscale note in letteratura (Herten 1999, Hainbuchner et al. 2002) differiscono fra loro, quando si affronta una modellazione numerica ad elementi distinti è necessario ricavare una relazione specifica per il caso in esame che consenta di riprodurre il sistema reale con la minore approssimazione possibile.

Questa relazione può essere ottenuta eseguendo la simulazione numerica di prove di laboratorio attraverso un'analisi di sensitività per individuare i fattori che maggiormente influenzano il comportamento meccanico delle particelle a scala dell'aggregato. Questa fase di calibrazione deve preferibilmente includere non solo l'analisi della resistenza al picco del materiale ma anche delle condizioni pre-rottura in modo da poter rappresentare in maniera più idonea lo stato deformativo del materiale anche in campo elastico. Per tale motivo si ritiene che la calibrazione debba essere basata sulla ricostruzione numerica il più possibile fedele delle curve sforzo-deformazione sperimentali e non sull'osservazione della sola resistenza di picco.

In particolare per raggiungere un buon accordo tra dato calcolato e dato misurato è necessario che la calibrazione delle curve sia fatta considerando sia il coefficiente di attrito interparticellare sia la rigidità delle particelle.

I risultati ottenuti nello studio hanno mostrato che angolo di attrito alla micro e macro scala sono correlati dalla stessa funzione matematica individuata da altri autori

(Herten 1999, Hainbuchner et al. 2003) ma con diversi valori dei parametri della funzione; ciò conferma la necessità di effettuare calibrazioni specifiche per lo studio da eseguire.

Il lavoro ha permesso di quantificare le relazioni esistenti tra i parametri che potranno così essere utilizzate per la successiva implementazione dell'analisi di stabilità dei materiali nel modello.

In generale le relazioni fra i parametri di maggiore interesse sono fortemente influenzate dagli sforzi agenti. Per questo motivo nelle successive fasi di analisi di stabilità ci si deve necessariamente riferire a sistemi multistrato anche in terreni omogenei, così da tenere in considerazione la variazione dei parametri meccanici alla microscala in funzione della pressione geostatica e dell'eventuale presenza di sforzi tettonici.

## Ringraziamenti

La ricerca è stata possibile grazie al supporto dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e del Dipartimento della Protezione Civile nell'ambito del progetto: V2/17 "Monitoring and research activity at Stromboli and Panarea" e del progetto FIRB-MIUR "Relazioni tra grandi frane vulcaniche ed evoluzione degli edifici vulcanici, conseguenze per la stima della pericolosità geologica e per la ricerca idrogeologica, geotermica e mineraria"-Protocollo RBAU01LHEE\_003.

## Bibliografia

- Apuani T., Corazzato C., Cancelli A., Tibaldi A., in press. Physical and mechanical properties of rock masses at Stromboli (Italy): a data set for volcano flank instability evaluation. *Bull. Eng. Geol. Env.*
- Cundall, P. A. and Hart R., 1992. Numerical Modeling of Discontinua. *J. Engr. Comp.*, 9, 101-113.
- Hainbuchner E., Potthoff S., Konietzky L., te Kamp L., 2003. Particle based modeling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand. Numerical modeling in Micromechanics via Particle Methods-Konietzky (ed.), Swets and Zeitlinger, Lisse, 2003.
- Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D, 1999. Particle Flow Code in 2 Dimensions, Theory and Background.
- Herten M., 1999. Raumlicher Erddruck auf Schachtbauwerke in Abhängigkeit von der Wandverformung. *Bergische Universität GH Wuppertal*, 22, p 164.
- Kruyt N.P., Rothenburgh L., 2004. Micromechanical study of macroscopic friction and dissipation in idealised granular materials: the effect of interparticle friction. *Proceeding of the 21st International Conference on Theoretical and Applied Mechanics 2004*, Warsaw, Poland.
- McGuire W., Gallagher R.H., Matrix structural analysis. New York, John Wiley and Sons, 1979
- Morchen N., Walz B., Model generation and calibration for a pile loading in the particle flow model, Numerical modeling in Micromechanics via Particle Methods-Konietzky (ed.), Swets and Zeitlinger, Lisse, 2003.
- Pasquare', G., Francalanci L., Garduno V. H., and Tibaldi A., Structure and geologic evolution of the Stromboli volcano, Aeolian Islands, Italy, *Acta Vulcanologica*, 3, 79 89, 1993.
- Tibaldi, A., Multiple sector collapses at Stromboli volcano, Italy: How they work, *Bull. Volcanol.*, 63, 112 125, 2001.