

PROCESSI DI LOCALIZZAZIONE DELLA DEFORMAZIONE E COMPORTAMENTO AL TAGLIO DI ARGILLE FESSURATE

Claudia Vitone
Politecnico di Bari
c.vitone@poliba.it

Federica Cotecchia
Politecnico di Bari
cotecchia@poliba.it

Cino Viggiani
Laboratoire 3S-R, Grenoble UJF/CNRS/INPG, FRANCE
cino.viggiani@hmg.inpg.fr

Sommario

La nota illustra alcuni risultati di una ricerca svolta presso il Politecnico di Bari ed il Laboratoire 3S-R di Grenoble in cui sono state applicate tecniche di correlazione di immagini digitali a prove in cella piana su provini di argille fessurate. La sperimentazione ha fornito un contributo alla definizione dell'influenza di orientazione ed intensità della fessurazione sullo sviluppo dei processi di localizzazione della deformazione.

Introduzione

Interpretando i risultati di un'ampia sperimentazione di laboratorio condotta su diverse argille fessurate alla luce di strumenti classici della meccanica delle terre, si è verificato che è possibile definire un quadro unico di comportamento meccanico di validità generale, solo se si tiene conto della fessurazione quale nuova variabile interna del materiale.

La fessurazione delle argille per le quali si è verificata la validità di tale quadro è stata caratterizzata e tradotta in classi facilmente riconoscibili attraverso una nuova carta di caratterizzazione della fessurazione per terreni a grana fine omogenei. Al fine di verificare l'estensione del campo di validità del quadro di comportamento succitato, nella presente nota si espongono alcuni risultati di una nuova sperimentazione svolta in cella piana su provini di diverse argille fessurate con acquisizione di immagini interpretate con tecniche di correlazione di immagini digitali (DIC). Le prove mostrano la sensibilità dell'evoluzione dei processi di localizzazione al variare di alcune delle categorie nella carta di caratterizzazione, riconosciute come primarie in termini di effetti sul comportamento meccanico del materiale.

In particolare, è stato possibile riconoscere delle classi soglia all'interno di tali categorie, oltre le quali la fessurazione rende l'evoluzione dei processi di deformazione locale sensibilmente differente da quella osservata in argille non fessurate.

Argille fessurate: caratteri mesostrutturali e comportamento meccanico

Vitone & Cotecchia (2009) hanno mostrato i risultati di prove di laboratorio svolte presso il Politecnico di Bari su quattro argille naturali fessurate. Nonostante la diversa mesostruttura, i

dati mettono in evidenza che le argille seguono un quadro comune di comportamento in compressione ed al taglio (Figg. 1a ed 1b).

In particolare, tale quadro appare ancora interpretabile secondo la meccanica dello stato critico se si tiene conto della fessurazione come nuova variabile interna che agisce sulla sensitività del materiale riducendola anche rispetto a quella dell'argilla ricostituita. L'effetto della fessurazione si traduce dunque nella riduzione del parametro S_σ ($=\sigma'_y/\sigma_{e*}$; Cotecchia & Chandler, 2000) che diventa < 1 (Fig. 1a), ovvero più basso non solo di quello dell'argilla naturale non fessurata (> 1) ma anche di quello della stessa argilla quando ricostituita in laboratorio ($= 1$). La risposta al taglio delle argille fessurate, letta dai percorsi di sforzo durante prove triassiali CIU, sembra inoltre coerentemente confermare che per $S_\sigma < 1$ la superficie di stato limite dell'argilla fessurata è più piccola di quella dell'argilla ricostituita (Fig. 1b; Vitone & Cotecchia, 2011).

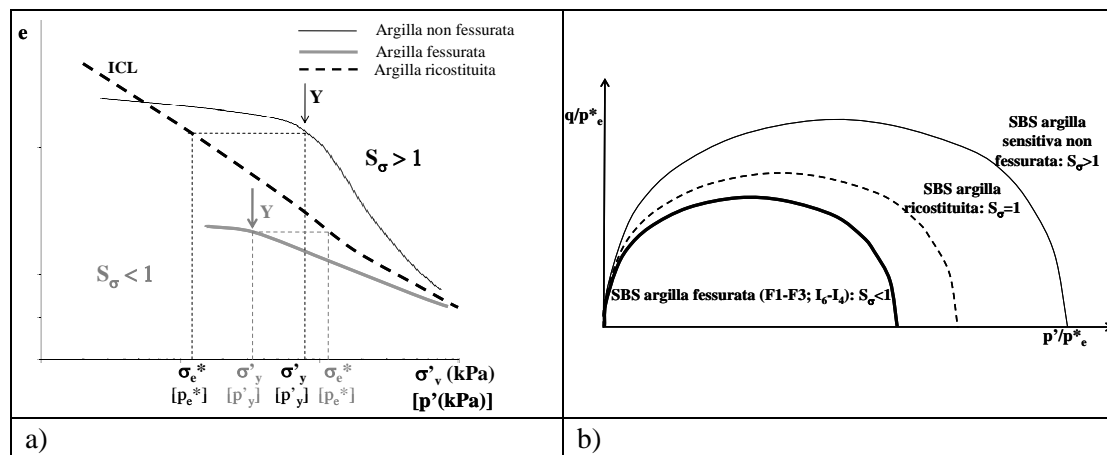


Figura 1. a) Comportamento in compressione e b) superfici di stato limite (SBS) dell'argilla fessurata, dell'argilla ricostituita e naturale non fessurata.

Passaggio successivo dello studio è stato quello di estendere il risultato sperimentale ad intere categorie di argille fessurate di simili caratteristiche mesostrutturali. A tal fine, la mesostruttura di ognuna delle argille oggetto dello studio è stata analizzata e caratterizzata all'interno della carta di caratterizzazione della fessurazione (Vitone & Cotecchia, 2011), basata su alcuni tra i contributi di letteratura più significativi sul tema (Figura 2).

TERRENO INTEGRO		NATURA DELLE DISCONTINUITÀ			ORIENTAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ	GEOMETRIA DELLE DISCONTINUITÀ		
Principale natura del sedimento A	Resistenza non drenata ^a B	Tipo C	Scabrezza* D	Stato E	F	Forma ^c G	Continuità ^d H	Intensità ^e I
1 Argilla	Argillite	Deposizionali	Molto scabre	Inalterate	Singola	Piane	Continue	Molto bassa: < 3 m ² /m ³ - > 1 m ³
2 Limo	Argilla consistente	Rilascio tensionale	Scabre	Poco alterate	Diverse	Curve	Molte intersezioni	Bassa: 3÷10 m ² /m ³ - 0.027÷1 m ³
3 Argilla limosa	Argilla mediamente consistente	Indotte da azioni di taglio	Leggermente scabre	Molto alterate	Casuali	Piane e curve	Alcune intersezioni	Medio-bassa: 10÷30 m ² /m ³ - 0.001÷0.027 m ³
4 Limo argilloso	Argilla soffice		Lisce	Ossidate		Concave e convesse	Pochissime intersezioni	Media: 30÷100 m ² /m ³ - 27÷1000 cm ³
5 Argilla marnosa			Molto lisce	Ricoperte		Concoidale		Mediamente elevata: 100÷300 m ² /m ³ - 1÷27 cm ³
6			Estremamente lisce e traslucide					Elevata: > 300 m ² /m ³ - < 1 cm ³

^a Morgenstern & Eigenbrod, 1974; BS 8004, 1986
^b Fookes and Denness, 1969; ISRM, 1993
^c Area delle discontinuità per unità di volume (m²/m³) e volume medio (m³, cm³) dell'elemento (Fookes & Denness, 1969, mod.)
^d Coffey & Partners in Walker et al. (1987)

Figura 2. Carta di caratterizzazione della fessurazione e classi (caratteri in grassetto) per cui è stata verificata sperimentalmente la validità del quadro di comportamento in Figura 1.

Ad ogni caratteristica mesostrutturale, dalla natura e consistenza dell'elemento interfessura, a natura (ovvero tipologia, scabrezza e stato), orientazione e geometria (continuità, forma e intensità) della fessurazione, nella carta corrisponde una categoria (lettere A-I in Figura 2), a sua volta suddivisa in un numero di classi variabile da 3 (categorie C ed F) a 6 (categoria I).

Caratterizzare la fessurazione di un'argilla consiste dunque nel creare per essa una carta di identità della fessurazione selezionando, tra tutte le categorie che compongono la carta generale, i caratteri specifici (o classi) che meglio ne descrivono la mesostruttura.

Orientazione ed intensità della fessurazione (rispettivamente F ed I in Fig. 2) sono state riconosciute quali categorie primarie rispetto all'effetto sulla risposta meccanica del materiale. La prima può variare da singola (F1) a casuale (F3). Nel caso di singola orientazione, l'inclinazione della fessurazione rispetto all'orizzontale in gradi può essere specificata in aggiunta alla classe (per es. F1/0 e F1/90: fessurazione singola ad orientazione rispettivamente orizzontale e verticale).

L'intensità di fessurazione può variare nella carta da molto bassa (I1: volume medio dell'elemento interfessura, V , maggiore di 1 m^3 e superficie specifica, S_s , inferiore a $3 \text{ m}^2/\text{m}^3$) ad elevata (I6: $V < 1 \text{ cm}^3$; $S_s > 300 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

In Figura 2 sono stati inoltre messi in evidenza i caratteri della fessurazione per i quali si è verificata sperimentalmente la validità del quadro di comportamento in Fig. 1.

Prove triassiali sull'elemento di volume hanno tuttavia mostrato che il comportamento al taglio delle argille fessurate talvolta può discostarsi dal quadro in Fig. 1b a causa dell'innescio di un prematuro meccanismo di scivolamento su superficie.

L'analisi delle deformazioni locali che si sviluppano nei provini di argilla fessurata durante prove di taglio, svolta in una prima fase della ricerca con la tecnica della stereofotogrammetria del falso rilievo (FRS: Butterfield et al., 1970; Desrues, 1984; Desrues & Viggiani, 2004) e, più di recente, con tecniche di correlazione di immagini digitali (DIC: Rechenmacher & Finno, 2004; Viggiani & Hall, 2008; Hall et al., 2010), ha consentito di seguire qualitativamente e quantitativamente l'evoluzione delle deformazioni locali in termini di campi di deformazione incrementali.

Nel seguito si discutono alcuni dei risultati sperimentali di prove in cella piana svolte nell'apparecchio biassiale del Laboratoire 3S-R dell'Université Joseph Fourier di Grenoble su provini di argilla scagliosa (I6; F1) e bentonite fessurata (I5; F3) prelevate a Santa Croce di Magliano (CB). In particolare, si è potuto valutare quanto possano variare le categorie primarie della fessurazione, F ed I, perché i processi di localizzazione della deformazione nel materiale fessurato seguano ancora andamenti simili a quelli rilevati per terreni non fessurati. La persistenza di tale analogia consente infatti di legittimare l'estensione dell'uso di strumenti teorici classici, qual è la meccanica del continuo, anche alle argille fessurate. Va osservato che parte non trascurabile dell'impegno sperimentale è stata dedicata allo sviluppo delle tecniche non convenzionali per il campionamento indisturbato delle argille in sito e per il confezionamento di provini prismatici (si veda per es. Vitone et al., 2009).

Risposta al taglio e localizzazione al variare delle categorie primarie di fessurazione

Il programma sperimentale è consistito nell'indagine dell'influenza della variazione delle categorie F ed I sull'evoluzione dei processi di localizzazione della deformazione durante prove di taglio in cella piana su provini di due diverse dimensioni ($35 \times 75 \times 150 \text{ mm}$ e $35 \times 40 \times 80 \text{ mm}$). Le prove sono state condotte in assenza di confinamento laterale, se non quello fornito dalle facce dell'apparecchio che garantiscono la condizione di deformazione piana.

L'influenza della categoria I è stata investigata seguendo il programma indicato in verde Figura 3a, ovvero facendo variare I e mantenendo per F configurazioni non predisponenti la

rottura. In particolare, sono state svolte prove biassiali su provini di argille scagliose (I6) con scaglie orizzontali (F1/0) e su provini di bentonite con fessurazione ad orientazione casuale (F3) ed intensità variabile da mediamente elevata (I5) a medio-bassa (I4-I3). In quest'ultimo caso, alle fessure di intensità I5 si sovrappone un nuovo pattern, meno intenso ma di maggiore continuità (fessure di II livello, I4-I3).

	≤ I4	I5	I6	
F1/0				a)
F2				
F3				

	≤ I4	I5	I6	
F1/0				b)
F1/30				
F1/55				
F1/90				

Figura 3. Prove biassiali svolte per indagare l'influenza della categoria I (a) e della categoria F (b).

Vitone et al. (2009) hanno mostrato che l'evoluzione delle deformazioni locali in termini di campi di deformazione incrementali calcolati con il metodo FRS su provini di argilla scagliosa (I6) con fessurazione orizzontale (F1/0) segue un processo del tutto analogo a quello osservato per sabbie dense (Desrues & Viggiani, 2004) ed argille non fessurate da Viggiani (1994) e Marellò et al. (2004).

Una più recente sperimentazione (Vitone et al. sub), che ha beneficiato del maggiore dettaglio dell'analisi derivante dall'utilizzo delle più moderne tecniche DIC (si veda al riguardo Hall et al., 2010), ha mostrato risultati simili di prove biassiali (Figura 3a) su provini di bentonite fessurata caratterizzata da intensità elevata (I5) ed orientazione casuale (F3). In particolare, come mostra la Fig. 4, ad una prima fase della prova (incrementi 3-5 e 13-15), in cui le deformazioni di volume e di taglio sono distribuite in modo essenzialmente uniforme, segue una seconda fase in cui esse si concentrano in aree di estensione limitata (23-25, 35-36). Soltanto oltre il picco di resistenza lungo la curva forza-spostamento l'evolversi delle zone di processo si traduce nella definizione completa della superficie di scivolamento e dunque nell'innescò di un cinematismo di scorrimento relativo tra blocchi quasi-rigidi (43-45).

La Fig. 5 mostra invece l'effetto, sulla stessa argilla, di una più bassa intensità di fessurazione (I3-I4) dovuta alla presenza di fessure di II livello (rettangoli nell'incremento 3-5). Appare evidente che il II livello controlla l'intero processo fin dalle prime fasi della prova: i campi di deformazione si distribuiscono dall'inizio in modo disomogeneo e la localizzazione trova innescò proprio nelle fessure di II livello, mentre intere porzioni del provino restano inattive per tutta la durata della prova. Si osserva inoltre che una delle due superfici di scivolamento è già quasi del tutto completa pre-picco (incremento 17-19). La curva forza-spostamento, che in qualche modo restituisce una lettura sintetica media dell'intero processo, sembra risentirne sia in termini di resistenza di picco, che si abbassa, che in un andamento meno fragile post-picco. Per quanto concerne l'indagine dell'influenza della categoria F (Fig. 3b) si riporta, a titolo d'esempio, l'evoluzione delle deformazioni locali in termini di campi di deformazione incrementali calcolati con tecniche DIC su provini di argilla scagliosa (I6) con fessurazione verticale, F1/90 (Fig. 6). Rispetto a quanto mostrano Vitone et al (2009) per pari condizioni al contorno (pressione di confinamento nulla, uguale dimensione dei provini) nella stessa argilla (I6) con fessurazione orizzontale (F/0), il processo si differenzia sensibilmente. Già dalle prime fasi della prova, se la fessurazione è verticale (F1/90 in Fig. 6), ovvero altamente predisponente la rottura, esso è interpretabile come un meccanismo di scivolamento ed apertura tra blocchi pressoché rigidi. Anche in questo caso, analogamente a quanto discusso in precedenza nel caso di intensità predisponente (Fig. 5), la resistenza di picco del materiale si riduce ed il picco diventa meno evidente. Le prove svolte sulle argille I6 (Fig. 3b) hanno dimostrato che l'evoluzione delle deformazioni locali appare fortemente condizionata dalla categoria F per inclinazioni superiori a circa 30° rispetto all'orizzontale.

Conclusioni

Dall'osservazione con tecniche FRS e DIC dei campi di deformazione locale che si sviluppano durante prove in cella piana, si osserva un'analogia tra l'evoluzione dei processi di localizzazione in argille fessurate ed in argille non fessurate *solo se* l'intensità di fessurazione è superiore ad I3 e l'orientazione minore di F1/30. In tal caso, l'interpretazione della risposta meccanica di argille diversamente fessurate alla luce di strumenti classici della meccanica delle terre, conduce alla definizione di un quadro unico di comportamento di validità generale.

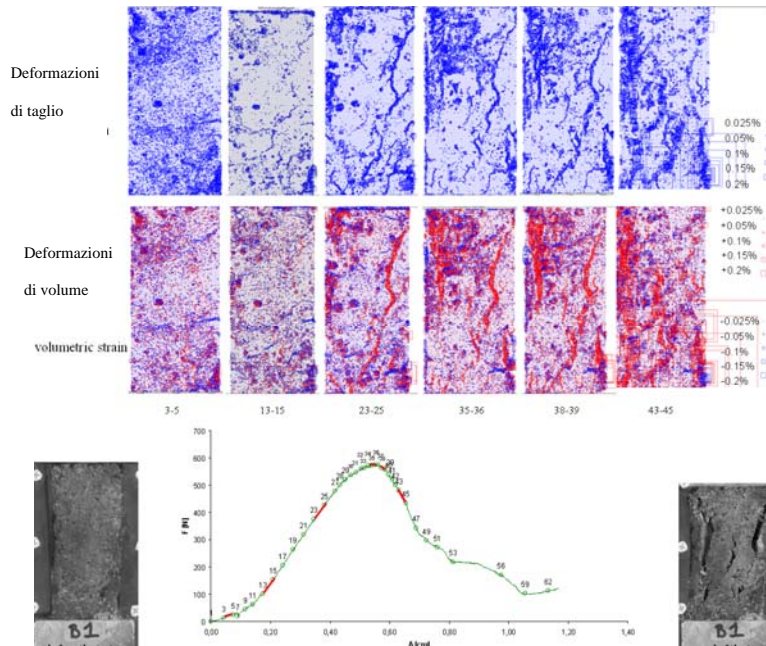


Figura 4. Argilla 15-F3. Dimensioni provino: 35x40x80 mm. Dall'alto: campi di deformazione di taglio e di volume (in blu contraenza) dall'analisi DIC, per gli incrementi di carico in rosso lungo la curva forza-spostamento (n basso): Fotografie del provino ad inizio e fine prova.

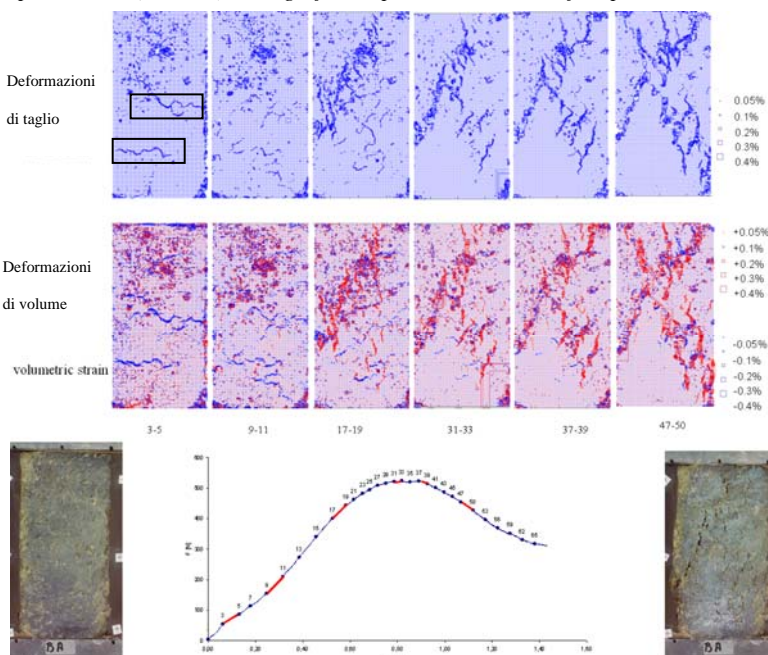


Figura 5. Argilla 13-14-F3. Dimensioni provino: 35x75x150 mm. Dall'alto: campi di deformazione di taglio e di volume (in blu contraenza) dall'analisi DIC, corrispondenti agli incrementi di carico selezionati in rosso lungo la curva forza-spostamento (n basso): Fotografie del provino ad inizio e fine prova.

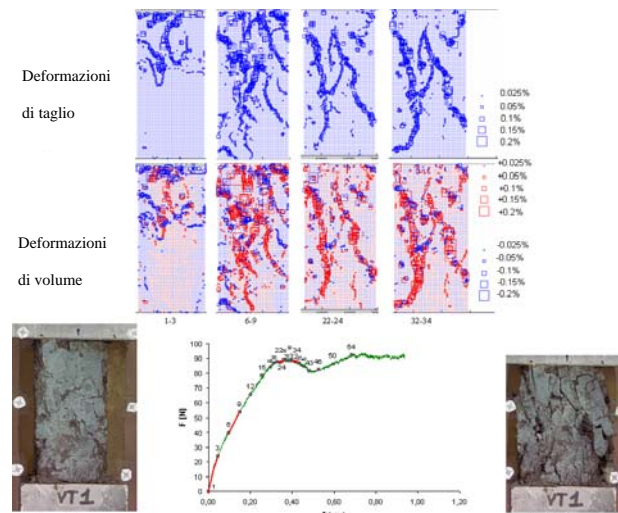


Figura 6. Argilla I6-F1/90. Dimensioni provino: 35x40x80 mm. Dall'alto: campi di deformazione di taglio e di volume (in blu contraenza) dall'analisi DIC, corrispondenti agli incrementi di carico selezionati in rosso lungo la curva forza-spostamento (n basso): Fotografie del provino ad inizio e fine prova.

Bibliografia

- Butterfield, R., Harkness, R.M., Andrawes, K.Z. (1970). A stereophotogrammetric method for measuring displacement fields *Géotechnique*, 20(3): 308-314
- Cotecchia, F. and Chandler, R.J. (2000). A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, 50(4): 431-447.
- Desrues J. (1984). *La localisation de la déformation dans les matériaux granulaires*. Thèse de Doctorat en Science, USMG e INPG, Grenoble (Francia).
- Desrues J. and Viggiani G. (2004). Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech* 28: 279-321.
- Fookes, P.G. and Denness, B. (1969). Observational studies on fissure patterns in cretaceous sediments of South-East England. *Géotechnique* 19(4): 453-477.
- Hall, S.A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G and Besuelle, P. (2010). Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation. *Géotechnique* 60(5): 315-322.
- ISRM (1993). Metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose. *Rivista italiana di Geotecnica*, 2: 151-197.
- Marello S., Lenoir N., Viggiani, G., Bésuelle, P., Desrues, J. and Di Michiel, M. (2004). Shear banding in plane strain compression of Beaucaire Marl studied through post-mortem X-ray micro tomography, J. Otani, Y. Obara (Eds.), X-ray CT for Geomaterials: 139-146.
- Morgenstern, N.R. and Eigenbrod, K.D. (1974). Classification of argillaceous soils and rocks. *Jour. Geotech. Eng. Div. ASCE* 100 (10): 1137-1156.
- Rechenmacher, A.L., and Finno, R.J. (2004). Digital image correlation to evaluate shear banding in dilative sands. *Geotechnical Testing Journal* 27(1): 13-22
- Viggiani G. (1994). *Localizzazione delle deformazioni e fenomeni di rottura nelle argille consistenti sovraconsolidate*. Tesi di dottorato, Università di Roma "La Sapienza" e Napoli "Federico II".
- Viggiani, G. and Hall, S.A. (2008). Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics. Proc., 4th Symp. Deformation Charact. of Geomaterials, Atlanta, USA: 3-26
- Vitone, C. & Cotecchia, F. (2009). Interpretazione del comportamento meccanico di argille da intensamente a mediamente fessurate. IARG, Roma, 9-11 Settembre.
- Vitone, C., Cotecchia, F., Desrues, J., Viggiani, G. (2009). An approach to the interpretation of the mechanical behaviour of intensely fissured clays. *Soils & Foundation Journal*, 49(3): 355-368.
- Vitone, C. and Cotecchia, F. (2011). The influence of intense fissuring on the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique* in print [doi: 10.1680/geot.2011.61.00.1]
- Vitone, C., Cotecchia, F., Viggiani, G., Hall, S.H. (sub.) Localized deformation in intensely fissured clays studied by 2D digital image correlation. *Int.. J for Num. and Anal. Meth. Geomech.* (inviato).
- Walker, B.F., Blong ,R.J. & McGregor, J. P. (1987). Landslide classification, geomorphology and site investigation. *Soil Slope Instability and Stabilisation*, Rotterdam, Balkema: 1-52.