

Analisi di prove di taglio su argille a scaglie con un approccio di mezzo discontinuo

Paolo Tommasi

CNR – Istituto di Geologia ambientale e Geoingegneria, Roma

paolo.tommasi@uniroma1.it, paolo.tommasi@cnr.it

Marco Mastruzzi

Studio SPERI, Roma

Tatiana Rotonda

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Sapienza Università di Roma

tatiana.rotonda@uniroma1.it

Sommario

Per meglio comprendere il comportamento in prove di taglio diretto di argille a scaglie (AS), i risultati di laboratorio provenienti da diversi terreni sono stati confrontati con quelli di modelli 2D ad elementi distinti, in cui i blocchi rappresentano le scaglie. È stato indagato l'effetto della giacitura orientata delle scaglie e di resistenza e rigidità sia delle scaglie che delle loro superfici. Il confronto tra il comportamento osservato e quello desunto dalle analisi numeriche ha fornito utili elementi per legare le evidenze sperimentali alla struttura del materiale, ben assimilabile a un discontinuo.

1. Introduzione

Col termine “argille a scaglie” (AS) si intendono materiali costituiti da scaglie argillose molto consistenti aventi tra loro legami più o meno forti. Le AS sono un costituente di formazioni geologiche di diversa origine (Vannucchi et al. 2003), definite “strutturalmente complesse” (AGI 1979): i) corpi geologici massivi (*melanges* o *disrupted rocks*); ii) spesse zone e fasce di taglio; iii) estesi e continui interstrati di formazioni rocciose. La resistenza delle AS influisce sulla stabilità delle opere di ingegneria e dei pendii naturali.

La componente AS nelle diverse formazioni ben si apprezza nella classifica delle formazioni di Esu (1977) (Fig. 1), la cui classe A₂, sia caotica che ordinata, rappresenta anche la struttura alla scala del provino. Le AS possono essere meglio descritte alla scala del provino dalla classifica di Walker (1987) basata sulle fessure, che in gran parte corrispondono alle superfici delle scaglie. Queste ultime sono costituite da materiali assimilabili ad argille molto consistenti o rocce argillose tenere, e possono essere sia legate tra loro, sia facilmente separabili, specie se sottoposte a scarico tensionale.

2. Tessitura e proprietà delle scaglie

I materiali studiati differiscono per: 1) orientazione e geometria delle scaglie (tessitura), 2a) resistenza e rigidità delle scaglie, 2b) scabrezza, alterazione e “legami” lungo i contatti tra le scaglie. Questi caratteri variano sia tra le formazioni sia nella stessa formazione. Le caratteristiche tessiturali e le proprietà delle scaglie e dei contatti sono frutto della storia geologica (diagenesi, deformazioni di taglio e fenomeni di alterazione/ammorbidimento) e dell'iniziale composizione mineralogica e tessitura.

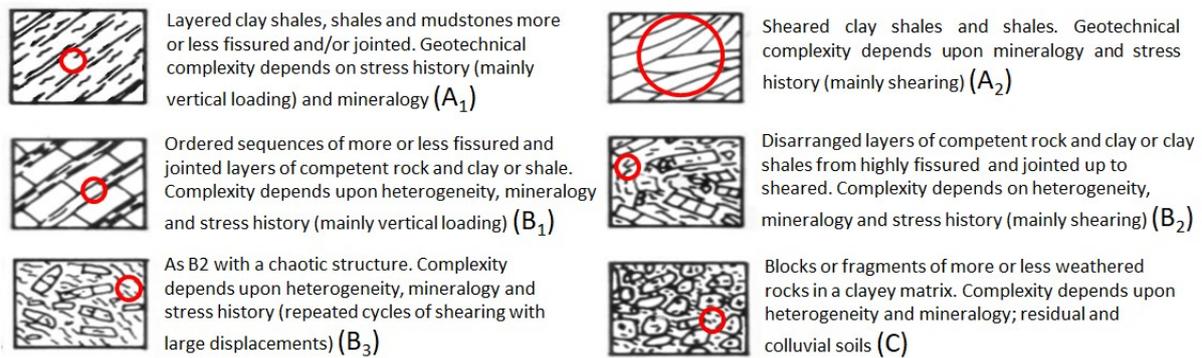


Fig 1. Classifica di Esu (1977, modificata). I cerchi indicano la componente AS.

Alcuni esempi di forma, orientazione e condizioni delle superfici delle scaglie sono mostrati nelle foto dei campioni studiati dagli Autori (Fig. 2, siti di prelievo in Fig. 3). Tutti i materiali hanno uguale struttura generale ma con una diversa incidenza dei vari fattori tessiturali. L'orientazione è definita secondo lo schema di Fig. 4.

3. Risultati sperimentali

Tra gli anni '70 e '90 sono state studiate AS da formazioni italiane (ad es. Bilotta e Umità 1981, Fenelli et al. 1982, Airò Farulla e Nocilla 1984, Bilotta 1987). Gli autori hanno utilizzato provini con angolo \mathcal{G}_D di 0 o 90°, tranne Airò Farulla e Nocilla (1984), che hanno indagato più valori di \mathcal{G}_D . Secondo Walker (1987) in tutti i materiali le fessure tra le scaglie sono connesse (da *continuous* a *discontinuous with many intersections*) e ravvicinate (2 - 40 mm). La scabrezza è bassa alla scala delle scaglie (da *smooth* a *slickensided*) ma varia a scala del provino (da *planar* a *undulose*).

Nonostante gli studi sperimentali si concentrino su singoli aspetti, i risultati delle prove sono dispersi per la variabilità dei caratteri tessiturali e meccanici e i loro effetti contrastanti. In sintesi si osserva che: i) gli involuppi sul piano di Mohr non sono lineari (incluso $\mathcal{G}_D=0^\circ$) e le resistenze di provini con maggior angolo \mathcal{G}_D giacciono al di sopra di quelle con \mathcal{G}_D minore; ii) i provini con $\mathcal{G}_D \approx 0^\circ$ hanno tutti comportamento duttile, eccetto qualcuno testato a valori più alti di σ'_n ; iii) la fragilità cresce al crescere di \mathcal{G}_D . Non univoca è la relazione di σ'_n con fragilità e comportamento dilatante/contraente.

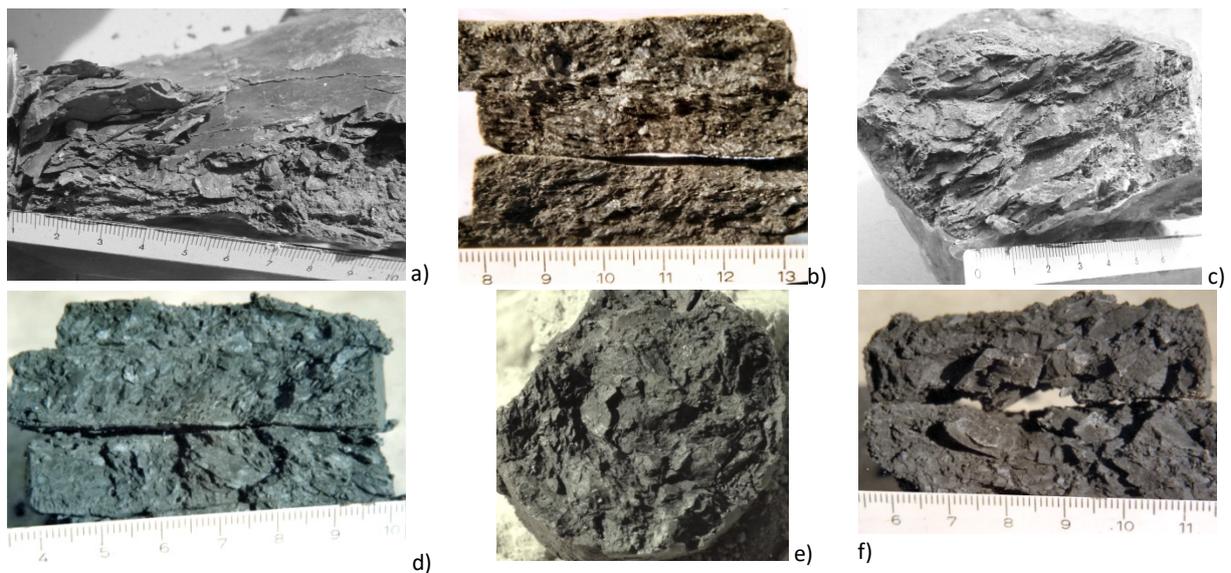


Fig. 2. Tipico aspetto dei materiali studiati (in Fig. 3 i siti di prelievo): a) scaglie piatte e iso-orientate con superfici lucide e frequenti piani di taglio (sito 9); b) piccole scaglie piatte iso-orientate e con superfici lucide (sito 7); c) e d) scaglie lenticolari iso-orientate con superfici lucide (siti 9 e 7, rispettivamente); e) scaglie lenticolari a giacitura variabile (sito 9); f) scaglie prismatiche iso-orientate con superfici opache (sito 7).

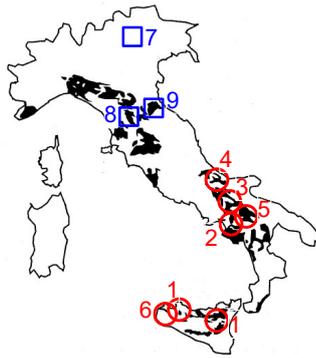


Fig. 3. Siti di prelievo di AS da letteratura (cerchi rossi) e studiate dagli autori (quadrati blu). In nero, affioramenti di formazioni con AS in AGI (1979).

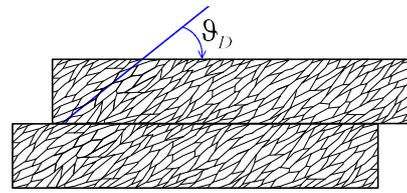


Fig. 4. Angolo ϑ_D che definisce la direzione di iso-orientamento delle scaglie in prove di taglio diretto.

Bilotta (1987) riscontra comportamento dilatante in quasi tutti i provini, sia con $\vartheta_D \approx 0^\circ$ che $\vartheta_D \approx 90^\circ$ anche se con dilatanza, d , maggiore per i secondi. Sporadici i campioni in cui al crescere di σ'_n diminuisce d o compare contraenza. Viceversa, Airò Farulla e Nocilla (1984) osservano che per $\vartheta_D \approx 0^\circ$ il comportamento duttile si accompagna a quello contraente, tranne a bassissimi valori di σ'_n . Per valori di ϑ_D intermedi tra 0° e 90° il comportamento è duttile per $\sigma'_n \geq 300$ kPa, associato sia a contraenza che dilatanza. Infine, per $\vartheta_D \approx 90^\circ$ il comportamento è sempre fragile ed associato a dilatanza o contraenza, rispettivamente a bassi o alti valori di σ'_n .

Le prove condotte dagli autori di questa nota hanno riguardato interstrati della formazione dei *Calcari Grigi* (7 in Fig. 3) (Rovereto), delle *Argille Scagliose* toscane (8 in Fig. 3) (galleria San Donato) e delle *Argille Varicolori* romagnole (9 in Fig. 3) (San Leo, RN) entrambe delle unità *Liguridi*. Tutti i materiali sono costituiti da scaglie lenticolari irregolari di alcuni mm, con diversi valori di ϑ_D : $\sim 0^\circ$ (scaglie più piccole) e 35° (scaglie più grandi) per il materiale (7), $\sim 35^\circ$ per il materiale (8) e $\sim 50^\circ$ per il materiale (9). La consistenza delle scaglie cresce da (7) a (9). Nel complesso si osserva (Fig. 5) fragilità crescente passando dal materiale (7) al (9), associata alla progressiva diminuzione della contraenza o crescita di d . All'aumentare di σ'_n invece cresce la contraenza o si riduce d . In particolare, un calo della contraenza, un passaggio da comportamento dilatante a contraente e una riduzione della dilatanza si osservano rispettivamente nei materiali (7) (8) e (9).

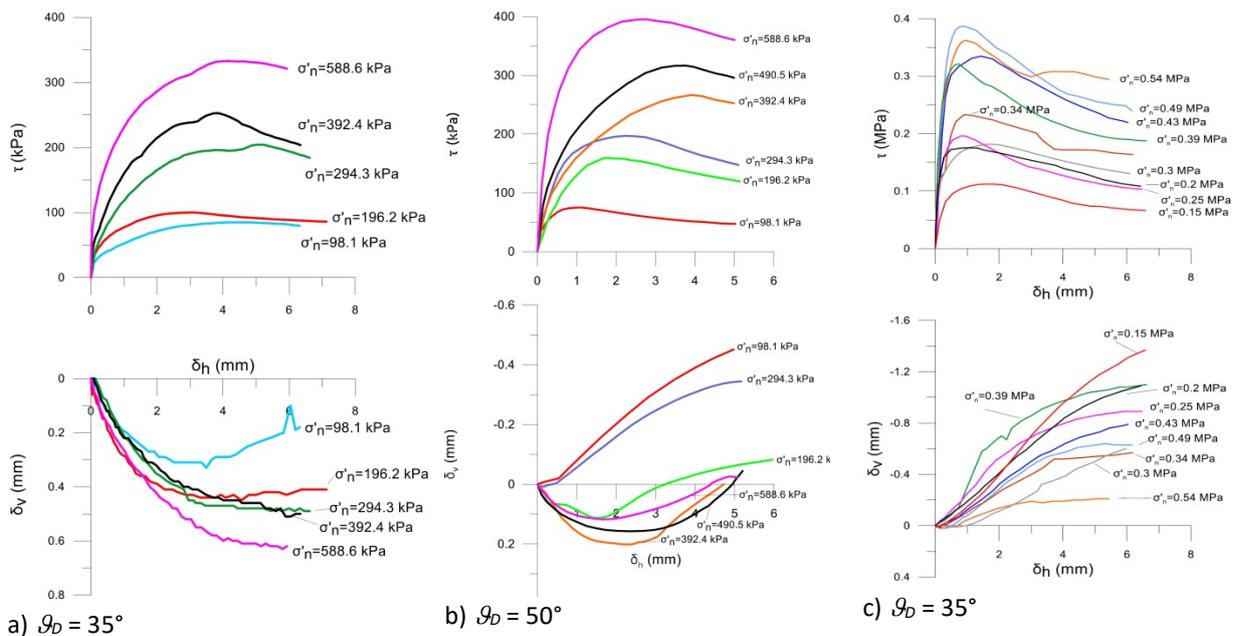


Fig. 5. Grafici sforzi-spostamenti tangenziali e spostamenti verticali-tangenziali da prove su interstrati dei *Calcari Grigi* (a), *Argille Scagliose* Toscane (b) e *Argille Varicolori* marchigiano-romagnole (c).

4. Modello ad elementi distinti di una prova di taglio diretto

Il modello DEM 2D, realizzato col codice UDEC (Itasca 2018), riproduce una prova standard con gap tra le due semiscatole (Fig. 6). Dopo la fase di carico verticale, si incrementa lo spostamento tangenziale ad intervalli di tempo piccoli rispetto a quelli di integrazione e si registra il carico orizzontale. Le proprietà dei materiali della scatola (Fig. 6) sono corrette per prevenire eccessive deformazioni, distacchi e rotazioni della scatola e *overlap* tra gli elementi. Lo sforzo di taglio medio è calcolato assumendo sempre la lunghezza iniziale del provino; infatti la resistenza si mobilita in una larga banda, più lunga della superficie di contatto tra le due metà del provino.

Le scaglie (Fig. 6) sono modellate con blocchi esagonali per ridurre l'*overlap* tra blocchi ed evitare scorrimenti lungo allineamenti fittizi delle loro superfici. Sono stati usati due fattori di forma ($F=l/t$) e due dimensioni. I valori di θ_D considerati sono: 0, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 90°.

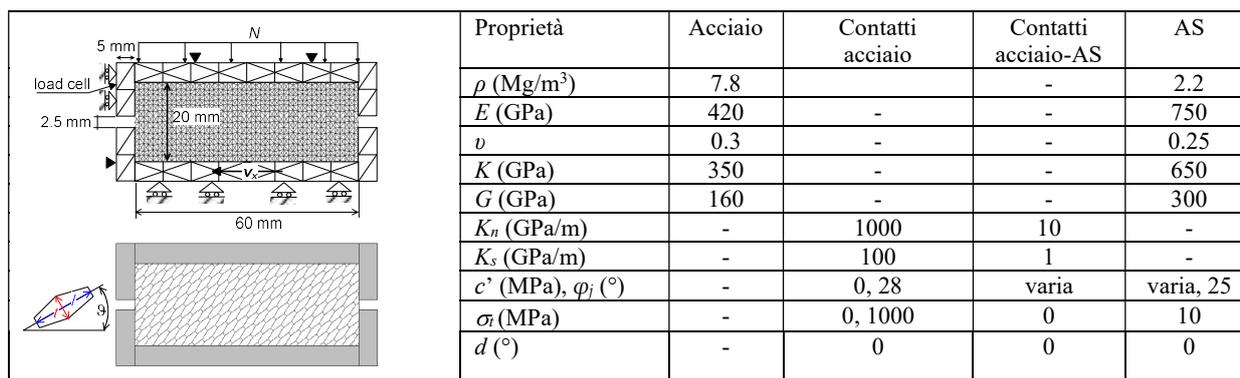


Fig. 6. Schema del modello (i triangoli indicano i punti di "monitoraggio") (sin) e proprietà meccaniche (dx)

La prova è riprodotta assumendo la completa dissipazione delle sovrappressioni interstiziali durante il taglio (parametri in tensioni efficaci e assenza di fluidi interstiziale tra e nelle scaglie). Le scaglie e i contatti sono modellati col legame di Mohr-Coulomb (M-C) per una più facile interpretazione delle analisi, mirate in primo luogo a studiare l'influenza della tessitura. I parametri di rigidezza (Fig. 6) derivano da modelli DEM per argille consistenti (D'Elia et al. 1998). Ai contatti scaglia-scatola è stata assegnata la stessa rigidezza dei contatti scaglia-scaglia. L'angolo di resistenza al taglio del materiale costituente le scaglie è rimasto invariato per tutti i modelli (25°). La sua rigidezza tipica (vedi ad es. Nardelli et al. 2016) è stata incrementata per rendere minimo l'*overlap*. In ogni caso il modulo edometrico di provini con $\theta_D=0^\circ$, calcolato in fase di carico verticale per $\sigma'_n=0.6-1.0$ MPa, è risultato confrontabile con quelli di letteratura (16 MPa del modello contro i 17 MPa in Bilotta 1984).

5. Analisi numeriche

Le analisi hanno mirato ad indagare l'influenza sul comportamento a taglio della coesione delle scaglie (c_m), la coesione e l'angolo di resistenza al taglio lungo le superfici delle scaglie (c_j and φ_j), del rapporto l/t e dell'orientazione delle scaglie (θ_D). I parametri adottati sono riportati in Tab. 1.

Tab. 1. Parametri geometrici e meccanici adottati nelle analisi (A-F) con $l=5\text{mm}$

Modello	A	B	C	D	E	F
c_m (kPa)	50	100	50	50	50	50
c_j (kPa)	0	0	25	0	0	25
φ_j (°)	10	10	10	10	16	16
l/t	8/3	8/3	8/3	5/3	8/3	8/3

Lo sforzo normale varia tra 100 e 500 kPa oltre il quale si nota un elevato *overlap* tra le scaglie prima del picco. I valori di φ_j utilizzati si riferiscono sia a scaglie lucide (A-D), sia a scaglie più scabre (Nardelli et al. 2016).

5.1 Esempio di applicazione: effetto dell'inclinazione delle scaglie

Il modello utilizzato è quello A in Tab. 1 (fattore di forma 2.7). Dal grafico di Fig. 7 relativo al piano di Mohr, fino a che \mathcal{G}_D raggiunge un valore compreso tra 65° e 70° le coppie a rottura $\tau_p - \sigma'_n$ possono essere interpolate con una funzione bi-lineare (BL) e, sull'intero intervallo di sforzi normali, la resistenza al taglio mobilitata cresce all'aumentare dell'inclinazione delle scaglie. Per valori maggiori di \mathcal{G}_D (vedi modello a scale verticali) si osserva marcata non linearità ed un abbassamento dell'intero inviluppo. Inoltre, nel modello a scaglie orizzontali il cambiamento di pendenza si osserva ai più alti valori di sforzo normale. Un aiuto all'interpretazione deriva dagli indicatori plastici del modello lungo (*slip*) e internamente alle scaglie, in corrispondenza dello sforzo di taglio massimo.

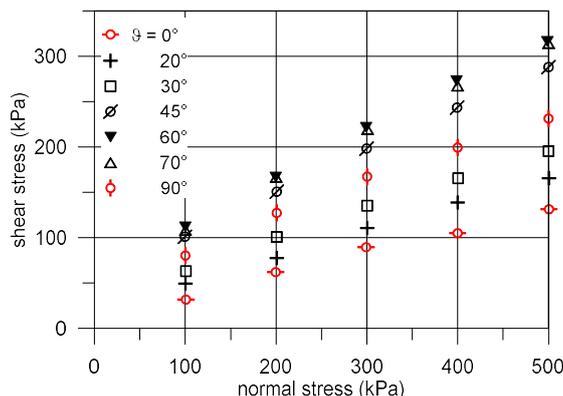


Fig. 7. Coppie a rottura $\tau_p - \sigma'_n$ da analisi con il modello A per differenti inclinazioni \mathcal{G}_D delle scaglie

Per bassi valori di \mathcal{G}_D (0° - 30°), a bassi valori di σ'_n , lo scorrimento tra le scaglie prevale sulla loro plasticizzazione interna (Fig. 8a) e riguarda una spessa banda (Fig. 8b). Viceversa ad elevati sforzi normali, molte scaglie sono plasticizzate (Fig. 8c) e lo scorrimento si concentra sul piano di taglio imposto (Fig. 8d). Per valori maggiori di \mathcal{G}_D (45° - 60°), lo scorrimento tra le scaglie, a cui si deve buona parte della resistenza mobilizzabile, si ha solo per σ'_n molto basse, ovvero quando le scaglie non si plasticizzano, e coinvolge gran parte del provino (Fig. 8e). Incrementando σ'_n , le scaglie tendono a “tranciarsi” (Fig. 8g) con un modesto contributo dilatante alla resistenza al taglio. Infine per scaglie subverticali ($\mathcal{G}_D=70^\circ$ - 90°), la plasticizzazione delle scaglie è il meccanismo dominante sin da σ'_n molto basse (Fig. 9) con il conseguente appiattimento generale dell'inviluppo di resistenza al taglio. Nonostante la modesta rigidità e resistenza delle scaglie, l'inviluppo di resistenza è ben approssimato dal modello bilineare di giunto a dente di sega di Patton, con pendenze $\text{tg}\phi'_1$ e $\text{tg}\phi'_2$, rispettivamente prima e dopo un valore “critico” σ'_n^* . Alle basse σ'_n la pendenza della retta è la somma dell'angolo di attrito tra le scaglie e di \mathcal{G}_D . Il valore di sforzo normale a cui inizia la plasticizzazione delle scaglie, σ'_n^* , è più alto per $\mathcal{G}_D=0^\circ$ (~ 50 kPa), diminuisce e si mantiene praticamente costante fino a $\mathcal{G}_D=45^\circ$ e diminuisce nettamente per $\mathcal{G}_D>45^\circ$. Il valore di $\text{tg}\phi'_2$ cresce progressivamente dal valore dell'attrito tra le scaglie per $\mathcal{G}_D=0^\circ$ fino ad un valore dell'angolo di resistenza al taglio del materiale delle scaglie per $\mathcal{G}_D\sim 65^\circ$.

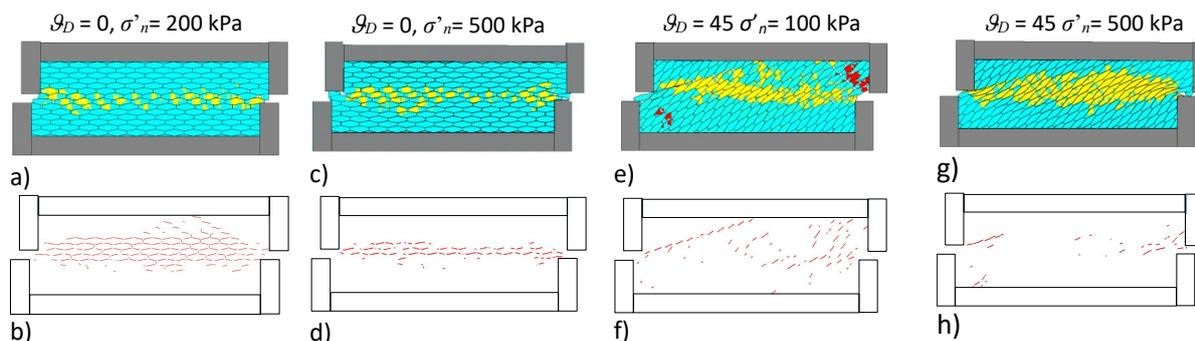


Fig. 8. Indicatori plastici nelle scaglie (giallo: taglio; rosso: trazione) e scorrimento ai contatti, per $\mathcal{G}_D=0$ e 45°

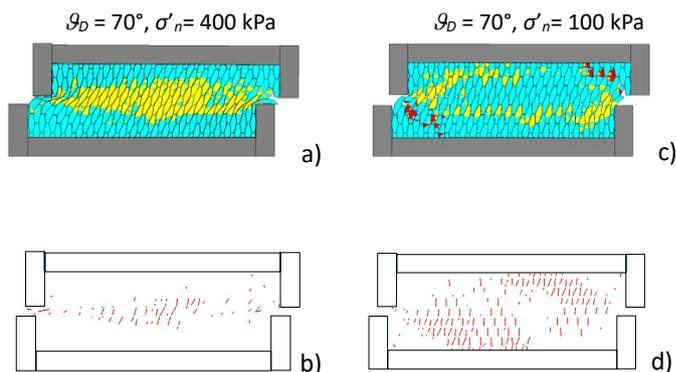


Fig. 9. Indicatori plastici nelle scaglie (giallo: taglio; rosso: trazione) e scorrimento ai contatti, per $\vartheta_D = 70^\circ$

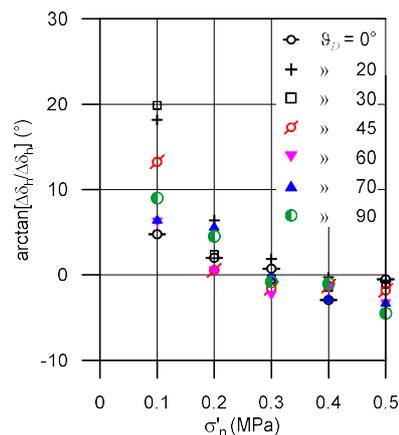


Fig. 10. Dilatanza in funzione dello sforzo normale per diversi valori di ϑ_D

L'andamento di d in funzione di σ'_n (Fig. 10) mostra che solo a bassi valori di sforzo normale si ha dilatanza (come indicato dalla pendenza del primo tratto degli involucri di resistenza) e che inoltre questa diminuisce all'aumentare dell'inclinazione, per l'effetto "tranciamento".

6. Considerazioni conclusive

Il confronto tra risultati sperimentali di prove di taglio diretto e quelli dei modelli agli elementi distinti, dei quali la nota descrive un esempio relativo all'effetto dell'inclinazione delle scaglie, indicano che le AS possono essere rappresentate come un mezzo discontinuo. In particolare, per scaglie con legami nulli o modesti, si osserva come la resistenza sia delle scaglie che dei contatti e l'orientazione delle scaglie influenzino l'andamento non lineare dell'involucro di resistenza al taglio. Nel caso di approssimazione dei risultati del modello con involucro bilineare ben si prestano anche i concetti relativi al comportamento dei giunti in roccia scabre. L'impiego dei modelli può essere esteso anche all'analisi dell'influenza di altri fattori meccanici, che sarà discusso in altre sedi con più ampio spazio di esposizione.

Bibliografia

- A.G.I. (1979). "Some Italian experiences on the mechanical characterization of structurally complex formations", Proc. IV Int. Congr. ISRM (Montreux) 1, 827–846.
- Airo' Farulla C., Nocilla N. (1984). "Assetto strutturale e resistenza di campioni di argilla a scaglie". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3:148-158.
- Bilotta E. (1987). "Contributo allo studio della resistenza al taglio di argille a scaglie con prove di laboratorio". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4:133-143.
- Bilotta E., Umiltà G. (1981). "Indagini sperimentali sulla resistenza a rottura di argille a scaglie". *Rivista Italiana di Geotecnica*. 1: 15-26.
- D'Elia B., Esu F., Bertuccioli P. (1998a). "Displacements and stability of a cut in a hard jointed clay". 2nd Int. Symp. HSSR, Napoli, 2, pp. 1067-1074.
- Esu (1977). "Behaviour of slopes in structurally formations". Proc. I.S. The Geotechnics of Structurally Complex formation, 2:292-304, AGI, Roma.
- Fenelli G. B., Paparo Filomarino M., Picarelli L., Ripa F. (1982). "Proprietà fisiche e meccaniche di argille varicolori dell'Irpinia". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3:110-124.
- Itasca (2018) UDEC - Universal Distinct Element Code, Ver. 7.0. Minneapolis: Itasca.
- Nardelli V., Coop M.R., Vitone C., Chen S. (2016). "The inter-scale behaviour of two natural scaly clays", *Geotechnique Letters*, 6:205–210.
- Vannucchi P., Maltman A., Bettelli G., Clennell B. (2003). "On the nature of scaly fabric and scaly clay", *Journal of Structural Geology*, 25:673–688.
- Walker B.F., Blong R.J., McGregor J.P. (1987). "Landslide classification, geomorphology and site investigation". In Soil Slope Instability and Stabilisation, Balkema, Rotterdam, 1–52.