

Resistenza al taglio residua di rocce tenere e terreni a grana fine

**di D. Lo Presti e F. Froio
(RIG. n. 3/2004)**

Discussione di Luciano Picarelli*

Negli anni '70 ed '80, la resistenza residua delle argille ha rappresentato un argomento di grande interesse scientifico. Questo si spiega col notevole seguito che in quegli anni ebbero gli studi sulla formazione e le caratteristiche delle discontinuità naturali [SKEMPTON, 1964; SKEMPTON, 1966], con la "scoperta" della rottura progressiva e della sua influenza sui meccanismi di rottura dei pendii in argille sovraconsolidate [BISHOP, 1967; BJERRUM, 1967], col ruolo accertato dei meccanismi di riattivazione sulla stabilità di un gran numero di pendii naturali [SKEMPTON, e PETLEY, 1967] e con il problema della stabilizzazione delle frane in argilla, il cui comportamento è controllato principalmente dalla resistenza disponibile lungo la superficie di scorrimento. Una importante implicazione, anche di carattere teorico, di quegli studi, è che in terreni a grana fina consistenti la rottura è generalmente dovuta a meccanismi di localizzazione delle deformazioni, che portano alla trasformazione del "continuo" in un "discontinuo" [CALABRESI, 1980]. Chi si occupa di stabilità dei pendii in argilla e chi insegna questo argomento nelle Università, sa bene che i modelli geotecnici più comunemente utilizzati, in cui il terreno è idealizzato come un continuo, qui cadono in difetto: nelle lezioni dedicate alla instabilità dei pendii essi devono essere necessariamente integrati con considerazioni in cui il discontinuo si prende una significativa rivincita.

Dopo gli anni '80, gli studi sulla resistenza residua hanno avuto minore seguito, se non per questioni particolari, sia pure di grande importanza, come l'influenza sulla stessa resistenza residua, della velocità di spostamento [es. TIKA *et al.*, 1996] o del liquido di porosità [DI MAIO, 1996]. Tra l'altro, non è stata mai seriamente messa in discussione la granitica certezza che la resistenza residua dei terreni sciolti dipende solo dalle loro pro-

prietà indici (v. ad es. SKEMPTON, 1964; KANJI, 1974; LUPINI *et al.*, 1981), e come tale può essere misurata su provini ricostituiti in laboratorio. Utilizzando i risultati delle proprie esperienze, e forte anche di qualche sporadico dato di letteratura, su quest'ultimo aspetto proprio il sottoscritto aveva avanzato qualche dubbio [PICARELLI, 1991], rilevando come, in qualche caso, l'angolo residuo misurato su provini indisturbati di argille a scaglie molto consistenti risulta anche molto maggiore di quello misurato su provini ricostituiti. La causa di queste differenze appariva legata all'influenza della struttura residuale del terreno, anche dopo grandi spostamenti.

Nel lavoro pubblicato sulla Rivista Italiana di Geotecnica, Lo Presti e Froio discutono della resistenza residua di rocce tenere e di limo stabilizzato con calce o cemento. Confermando la già nota dipendenza della resistenza residua dallo stato tensionale, essi l'attribuiscono alla rugosità della superficie di rottura, comprovata mediante alcune misure effettuate dopo le prove. Per questo motivo ritengono che, così come per le rocce [BARTON, 1976], l'inviluppo di resistenza residua dovrebbe essere definito tenendo conto sia dell'angolo di attrito di base del materiale, da misurare su discontinuità perfettamente piane, che della sua resistenza a compressione semplice (JCS) in prossimità della discontinuità, e della rugosità (JRC) della superficie di scorrimento. A questo proposito, è opportuno ricordare che una certa dipendenza della resistenza residua delle argille dalla tensione normale è stata comprovata anche per provini ricostituiti in laboratorio, ed è stata attribuita alla dipendenza dalla tensione normale dell'area di contatto tra le particelle [CHATTOPHADYAY, 1972, anche sulla base dei ben noti studi di BOWDEN e TABOR, 1964]. Sulla base dell'esperienza, chi scrive ritiene che, piuttosto che ad una improbabile rugosità della superficie di rottura, tra l'altro mitigata dalla bassa resistenza a compressione semplice, nel caso di provini di argilla ricostituiti in laboratorio, la dipendenza della resistenza residua dalla tensione normale potrebbe essere dovuta anche alla non planarità (forma) della stessa superficie di rottura.

Un approccio geomeccanico per analizzare anche la resistenza di picco delle argille a scaglie era già stato ipotizzato da FENELLI *et al.* [1982], ed utilizzato più consapevolmente da GUERRIERO *et al.* [1995]. Dando per scontato che la rottura avvenga per scorrimento lungo l'inviluppo delle aree di contatto tra scaglie (Fig. 1), e quindi, di fatto, lungo una vera e propria discontinuità, e che raramente essa è piana e liscia in quanto dipendente

* Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli

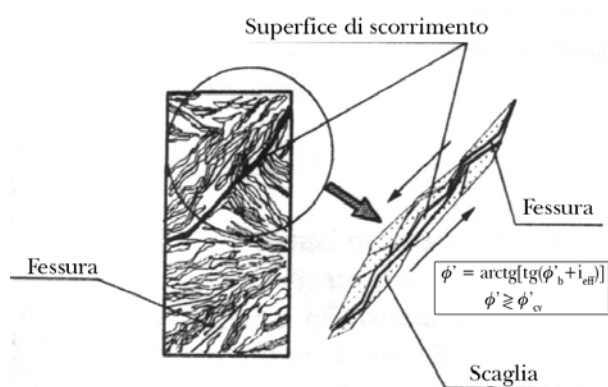


Fig. 1 – Meccanismo di rottura di un'argilla a scaglie [da GUERRIERO *et al.*, 1995].

dalla continuità, dalle dimensioni, dalla forma e dall'orientamento delle scaglie (tessitura), d'accordo con BARTON, GUERRIERO *et al.* hanno assunto che l'angolo di attrito di picco ϕ' delle argille a scaglie sia pari a quello di base ϕ'_b , maggiorato di un angolo di rugosità equivalente i_{eff} , legato alla tessitura ed al rapporto tra tensione normale applicata e resistenza a compressione semplice dell'argilla. OLIVARES e PICARELLI [1999] hanno dimostrato la non linearità dell'involuppo di resistenza di picco delle argille di Bisaccia e la tendenza dell'angolo di attrito verso un valore costante, al crescere della tensione normale (Fig. 2). In particolare, assimilando le superfici delle sca-

glie a delle discontinuità minori di taglio, o *minor shears* [SKEMPTON e PETLEY, 1967; FENELLI *et al.*, 1982], hanno assunto che l'angolo di attrito di base sia sostanzialmente quello residuo. In funzione dei valori assunti da ϕ'_b e da i_{eff} , ϕ' può essere sia maggiore che minore dell'angolo di attrito critico ϕ'_{cv} , con valori decrescenti all'aumentare dello stato tensionale.

Per quanto riguarda poi la stessa resistenza residua, proprio come fu ipotizzato da KRAHN e MORGENSTERN [1974], non è detto che essa sia pari alla resistenza di base, perché in materiali così consistenti gli scorrimenti non sono necessariamente capaci di levigare la superficie di scorrimento fino a farla diventare piana. Come mostra la figura 2 dell'articolo di Lo Presti e Froio, tratta proprio da un lavoro di chi scrive, questo può spiegare il fatto che l'angolo residuo delle argille a scaglie sia maggiore di quello misurabile su provini ricostituiti, la cui superficie di rottura non è condizionata dalla struttura iniziale del materiale, e che, comunque, le differenze tendano a diminuire al crescere della tensione normale. Se poi si fa riferimento a superfici di scorrimento naturali, andrebbe valutata la rugosità a scala più grande di quella di laboratorio [FLEMING, 1983], che non coincide necessariamente con quella che caratterizza provini di piccola dimensione.

Analoghe considerazioni sulla tessitura possono spiegare perché anche la resistenza critica e

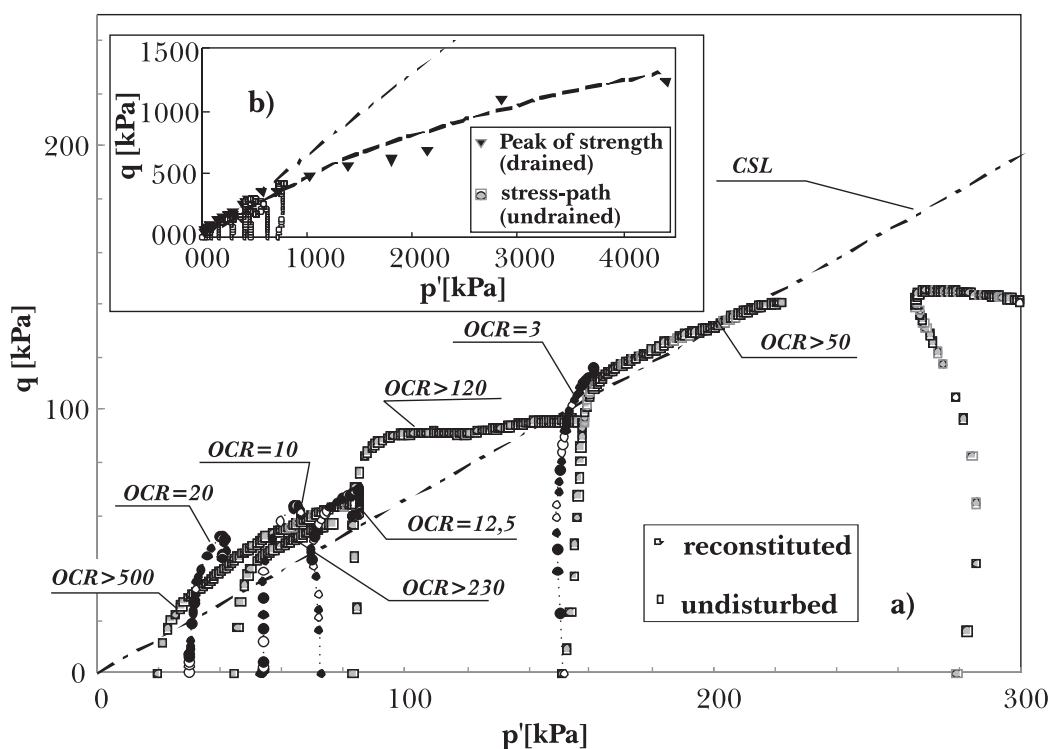


Fig. 2 – Involuppo di resistenza di provini naturali e ricostituiti dell'argilla a scaglie di Bisaccia [da OLIVARES e PICARELLI, 1999].

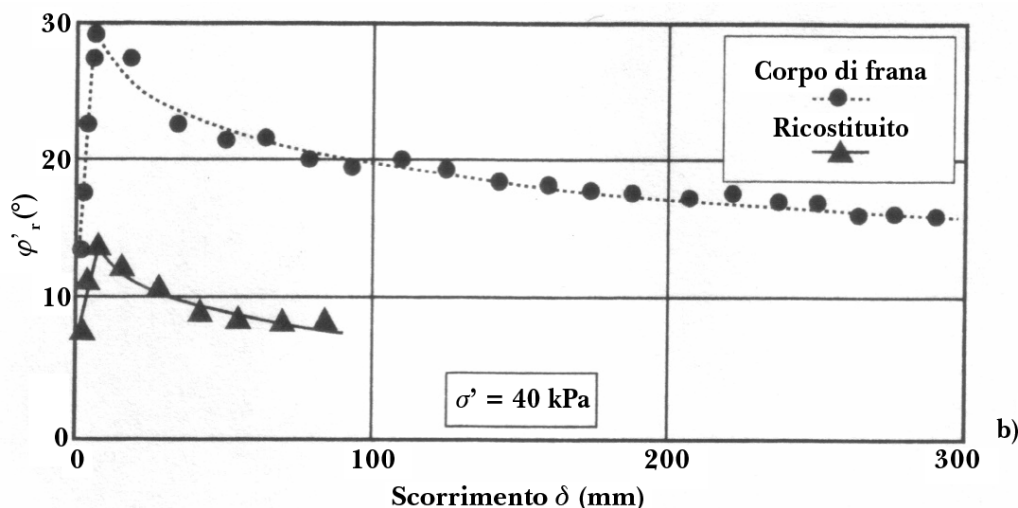


Fig. 3 – Resistenza residua di un provino ammorbidito di argilla a scaglie prelevato da una colata e di un provino ricostituito della stessa argilla [da PICARELLI, 1993].

quella residua delle argille a scaglie alterate o ammorbidite è raramente uguale a quella misurata su provini ricostituiti (Fig. 3). Notoriamente, questi terreni sono costituiti da frammenti di argilla consistente in una matrice più soffice ed apparentemente non strutturata [PICARELLI, 1993; GUERRIERO, 1995]. Per la loro elevata consistenza, i frammenti hanno sostanzialmente la stessa influenza che potrebbe avere la frazione sabbioghiaiosa in un'argilla poco o moderatamente consistente. Per questo motivo, la resistenza al taglio di picco e la stessa resistenza residua dipendono dalla granulometria "efficace" che, per la consistenza dei frammenti, non coincide con quella misurata con le tecniche ordinarie. Essa è responsabile di un comportamento "turbolento", piuttosto che "laminare", inibendo l'orientamento delle particelle argillose della "matrice", e può perciò comportare un angolo critico o residuo di attrito maggiore di quello misurato su provini ricostituiti [LEROUEIL *et al.*, 1997].

Tenendo conto della modesta resistenza residua delle argille, non vanno comunque mai trascurati gli errori sperimentali dovuti alla estrusione del terreno dalla zona di taglio ed alla sua penetrazione tra le due semi-scatolette dell'apparecchiatura e, nel confronto tra provini naturali e ricostituiti in laboratorio, all'influenza dell'acqua di porosità che, nel caso dei provini ricostituiti, è generalmente costituita da acqua distillata. Come mostrato da DI MAIO [1996], nel caso di terreni di elevata plasticità questa tende infatti a ridurre anche considerevolmente la resistenza residua.

In conclusione, la determinazione di un parametro apparentemente così semplice come la resi-

stenza residua pone ancora vari dubbi e perplessità. Tenendo anche conto dei risultati ottenuti da Lo Presti e Froio, nel caso di rocce tenere e di argille molto consistenti, incluse le argille a scaglie, non sembra discutibile il fatto che essa vada misurata su provini indisturbati invece che ricostituiti [PICARELLI, 1991]. Resta comunque da discutere la proposta degli Autori di valutare la resistenza residua mediante l'espressione di Barton ed utilizzando un coefficiente di rugosità, JRC, di 5. Questo dipende infatti dai micromeccanismi di rottura, che influenzano la forma e la rugosità della superficie di scorrimento, e non sembra valutabile a priori; tra l'altro, nel caso di argille di elevata plasticità, che sono dotate di un modesto angolo di attrito di base, una sua anche piccola variazione può causare una grande variazione di φ'_r . Appare infine molto utile l'osservazione, non scontata, che la resistenza residua di discontinuità naturali in rocce tenere dipenda della rugosità delle labbra che, nell'ipotesi di materiale molto consistente o compatto, gioca certamente un ruolo molto importante.

Bibliografia

- BARTON N.R. (1976) – *The shear strength of rock and rock joints*. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. XIII, pp. 205-279.
- BISHOP A.W. (1967) – *Progressive failure with special reference to mechanism causing it*. Atti Geotechnical Conference, Oslo, vol. II, pp. 142-150.
- BOWDEN F.P., TABOR D. (1964) – *The friction and lubrication of solids*. Oxford University Press.

- BJERRUM L. (1967) – *Progressive failure in slopes in overconsolidated plastic clay and clay shale*. J. Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, vol. XCIII, pp. 3-49.
- CALABRESI G. (1980) – *L'influenza delle dimensioni dei campioni sui parametri di resistenza delle argille sovraconsolidate, intatte e fessurate*. Atti 14° Conv. Italiano di Geotecnica, Firenze, vol. II, pp. 393-402.
- CHATTOPHADYAY P.K. (1972) – *Residual shear strength of some pure clay minerals*. PhD thesis, University of Alberta.
- DI MAIO C. (1996) – *The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soils*. Atti 7 ISL, Trondheim, vol. II, pp. 1189-1194, K. Senneset (Ed.) Balkema, Rotterdam.
- FENELLI G.B., PAPARO FILOMARINO M., PICARELLI L., RIPPA F. (1982) – *Proprietà fisiche e meccaniche di Argille Varicolori dell'Irpinia*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. XVI, n. 3, pp. 110-124.
- FLEMING R.W. (1983) – Comunicazione personale.
- GUERRIERO G. (1995) – *Modellazione sperimentale del comportamento meccanico di terreni in colata*. Tesi di Dottorato, Università di Napoli Federico II.
- GUERRIERO G., OLIVARES G., PICARELLI L. (1995) – *Modelling the mechanical behaviour of clay shales: some experimental remarks*. Colloquium Mundanum "Chalk and Clay Shales", Bruxelles, pp. 2.1.20-2.1.30.
- KANJI M.A. (1974) – *The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils*. Géotechnique, vol. XXIV, n. 4, pp. 671-674.
- KRAHN J., MORGENSTERN N.R. (1970) – *The ultimate frictional resistance of rock discontinuities*. Int. J. Rock Mechanics Mining Sciences, vol. XVI, pp. 127-133.
- LEROUEIL S., GUERRIERO G., PICARELLI L., SAIHI F. (1997) – *Large deformation shear strength of two types of structured soils*. Atti int. symp. Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, Nagoya, pp. 217-222.
- LUPINI J.F., SKINNER A.E., VAUGHAN P.L. (1981) – *The drained residual shear strength of cohesive soils*. Géotechnique, vol. XXXI, n. 2, pp. 181-213.
- OLIVARES L., PICARELLI L. (1999) – *Discussione dell'articolo "A laboratory study of the shear strength of four stiff clays" di J.B. Burland, S. Rampello, V.N. Georgiannou, G. Calabresi*, Géotechnique, vol. II, n. 2, pp. 273-283.
- PICARELLI L. (1991) – *Discussione dell'articolo "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks" di S. Leroueil e P.R. Vaughan*, Géotechnique, n. 3, pp. 281-284.
- PICARELLI L. (1993) – *Structure and properties of clay shales involved in earthflows*. Atti int. symp. The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Athens, vol. III, pp. 2009-2019, A. Anastagnopoulos, F. Schlosser, N. Kalteziotis, R. Frank., Balkema, Rotterdam.
- SKEMPTON A.W. (1964) – *Long-term stability of clay slopes*. Géotechnique, vol. XIV, n. 2, pp. 77-101.
- SKEMPTON A.W. (1966) – *Some observations on tectonic shear zones*. Atti 2 Int. Conf. Rock Mechanics, vol. I, pp. 329-335.
- SKEMPTON A.W., PETLEY, D. (1967) – *The strength along structural discontinuities of stiff clays*. Atti Geotechnical Conference, Oslo, vol. II, pp. 29-46.
- TIKA T.E., VAUGHAN P.R., LEMOS L.J. (1996) – *Fast shearing of pre-existing shear zones in soil*. Géotechnique, vol. XLVI, n. 2, pp. 197-233.

Risposta degli Autori

Gli autori ringraziano il Prof. Picarelli per la discussione proposta di cui apprezzano sia l'interesse manifestato per l'articolo in oggetto, sia la breve retrospettiva storica sugli studi riguardanti la resistenza residua. In merito alle osservazioni avanzate gli autori desiderano rimarcare i seguenti aspetti:

- con il termine "resistenza residua" deve intendersi la resistenza disponibile lungo una superficie di rottura già mobilizzata;
- in tale accezione la resistenza residua non rappresenta quindi una proprietà unica del materiale ma è influenzata oltre che da fattori geometrici anche dall'entità degli sforzi normali;
- i fattori geometrici vengono sinteticamente indicati con il termine scabrezza e comprendono sia quelli a piccola scala (rugosità) sia quelli a scala più grande (ondulosità);
- il limite inferiore della resistenza residua è quello che compete allo scorrimento di superfici lisce e piane. In tali condizioni la resistenza viene comunemente indicata come "resistenza di base";
- valori particolarmente elevati dello sforzo normale possono inibire i contributi alla resistenza dovuti alla scabrezza fornendo valori prossimi alla resistenza di base;

Pertanto, gli autori sono d'accordo con il Prof. Picarelli quando raccomanda di ricavare la resistenza residua operando su provini intatti e non su provini ricostruiti in laboratorio.

Per ciò che riguarda la possibilità di rappresentare la resistenza residua dei terreni utilizzando il criterio di Barton con un valore "fittizio" di JRC, indicativamente pari a 5, gli autori comprendono lo scetticismo del prof. Picarelli. Tuttavia, l'unico modo per superare i dubbi sull'applicabilità del metodo semplificato proposto, è quello di verificarlo utiliz-

zando un più ampio database. A questo proposito gli autori fanno osservare che per verificare l'applicabilità del metodo è sufficiente stimare l'angolo di resistenza al taglio in presenza di elevati sforzi normali (assimilabile all'angolo di attrito di base) e la resistenza a compressione monoassiale ricavabile dall'involuppo di picco del materiale intatto.

Infine, gli autori concordano con il prof. Picarelli sulle difficoltà connesse nel valutare gli aspetti geometrici alla scala reale. Quest'ultimo aspetto è certamente il più rilevante dal punto di vista pratico e purtroppo, allo stato attuale delle conoscenze, non sembra agli autori che vi siano possibili approcci per la sua soluzione.