

# GEOLOGIA

## TECNICA & AMBIENTALE

### In questo numero

Modellazione della piana di Prato

La grande deformazione gravitativa territoriale profonda della Sila Nord-Occidentale

La determinazione della resistenza residua dei terreni

Geologi sul territorio: il sisma in Centro Italia

Quadrimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi

Poste Italiane S.p.A. - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 40) art. 1 comma 1 DCS - ROMA Contiene l'P. In caso di mancato recapito, rinviare a Ufficio Poste Roma Formanina per la restituzione al mittente previo addebito. Contiene l'P.



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEI GEOLOGI

# La determinazione della resistenza residua dei terreni: limiti connessi all'applicazione delle diverse metodologie di laboratorio

Determination of residual strength of soils: limitations connected to the application of different methods of laboratory

Raffaele Carbone, Clemente Marco Tucci Geotest S.a.s. – Melfi (PZ) - Laboratorio Geotecnico Autorizzato Min. LL.PP.

## Termini chiave:

Resistenza residua dei terreni coesivi, condizioni di equilibrio dei pendii, parametri di resistenza al taglio in condizioni residue, apparecchio di Taglio Diretto (Scatola di Casagrande) con inversione del moto, apparecchio di Taglio Torsionale su provino anulare, valori di resistenza residua partendo dalle caratteristiche di plasticità dei terreni analizzati

## Keywords:

*Residual strength of cohesive soils, equilibrium conditions of the slopes, shear strength parameters in residual conditions, direct shear apparatus (box of Casagrande) with a direction reversal, torsional shear apparatus on annular specimen, residual strength values starting from the soil plasticity characteristics*

## Abstract

*As well known, the residual resistance of the cohesive soils is an extremely interesting geotechnical parameter to analyse the equilibrium conditions of the hillsides. It has a real importance in evaluating the stability of the old landslides and the risk of progressive breaking which is connected to the stability of natural and artificial hillsides and slopes. In laboratory there are different methods of testing parameters of the cutting resistance in residual conditions and, in particular, the most used ones are: the instrument of Direct Shear (Casagrande box) with the motion reversal and the instrument of Torsional Shear stress on specimen ring.*

*The aim of the study is to try to establish the validity of the experiments and the limits in application of different laboratory methods.*

*Comparisons and analysis of different and correlated experiments are carried out in the laboratory in the last few years. During these laboratory works, we are trying to develop a first approach methodology to evaluate the residual resistance capacity taking the plasticity stress conditions of the soil and land into consideration.*

## Introduzione

È ormai noto che la resistenza residua dei terreni coesivi è un parametro geotecnico di grande interesse per lo studio delle condizioni di equilibrio dei pendii. Esso assume importanza fondamentale nella valutazione della stabilità di vecchie frane e nella valutazione del rischio di rottura progressiva connesso alla stabilità di pendii naturali ed artificiali. I metodi per l'acquisizione in laboratorio dei parametri di resistenza al taglio in condizioni residue sono diversi e, in particolare, quelli più utilizzati sono l'apparecchio di Taglio Diretto (Scatola di Casagrande) con inversione del moto e l'apparecchio di Taglio Torsionale su provino anulare. Lo scopo dello studio è proprio quello di tentare di stabilire la validità delle sperimentazioni e i limiti connessi all'applicazione delle diverse metodologie di laboratorio. Infine, si tenta di elaborare, confrontandola con analoghe correlazioni e sulla base di una serie numerosa di sperimentazioni di laboratorio effettuate dagli scriventi negli ultimi anni, una metodologia di primo approccio per l'individuazione dei valori di resistenza residua partendo dalle caratteristiche di plasticità dei terreni analizzati.

Dissesti  
e alluvioni

Rischio  
sismico

Risorsa  
acqua

Attività  
estrattive

Geoscambio  
ed energie

Università

Pianificazione

Bonifiche siti  
inquinati e  
discariche

Protezione  
civile

Professione  
& Società

**Il Geologo  
progettista**

Geositi,  
Geoparchi  
& Geoturismo

## Le prove geomeccaniche e il comportamento dei terreni a deformazione di taglio

Le prove geomeccaniche servono a misurare i parametri di resistenza al taglio dei terreni e i parametri geotecnici – *rappresentati generalmente dall'Angolo di resistenza al taglio  $\phi$  e dalla Coesione  $c$*  – non sono delle caratteristiche intrinseche del terreno, ma sono funzione di molti fattori, fra cui: storia tensionale, indice dei vuoti, livello di tensione e di deformazione, tipo di struttura, composizione granulometrica, etc... La scelta del tipo di prove geomeccaniche da eseguire è condizionata, quindi, dai due seguenti aspetti:

- Tipo di terreno (modello geomeccanico);
- Tipo di stress indotto dall'opera in progetto.

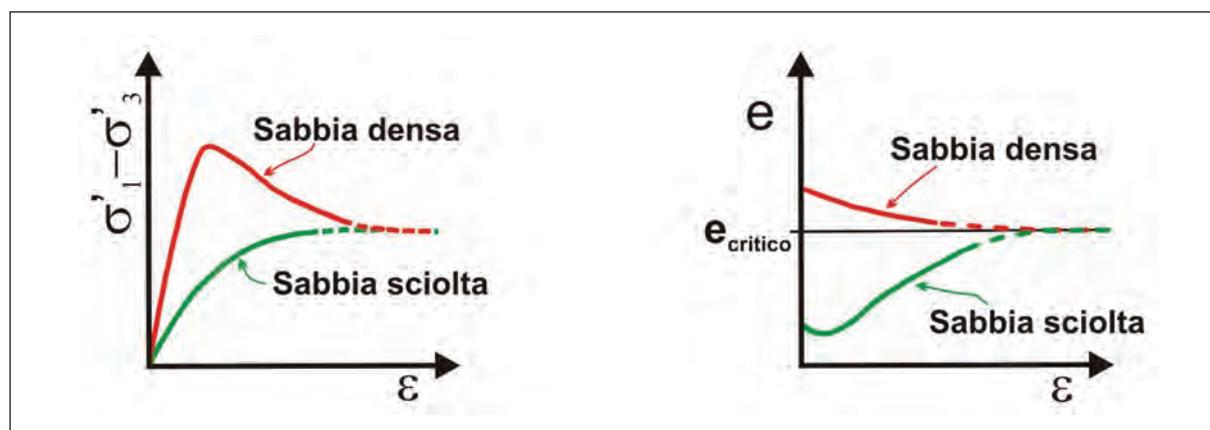
Le caratteristiche di resistenza al taglio dei terreni coesivi è legata sostanzialmente alla variazione delle tensioni efficaci, sia interne all'ammasso, sia alla scala del provino sottoposto a prova in laboratorio. In un terreno su cui intervengono tensioni totali dovute a carichi supplementari il primo effetto è l'alterazione delle pressioni interstiziali che, se il terreno ha caratteristiche di permeabilità medio-basse, tendono lentamente a dissiparsi in regime transitorio, conducendo ad un conseguente aumento delle tensioni efficaci. Nei terreni prettamente granulari, invece, specie se molto permeabili, la dissipazione delle pressioni interstiziali è molto rapida e alla variazione delle tensioni totali corrisponde quasi istantaneamente la variazione di quelle efficaci, rimanendo pressoché inalterate le pressioni interstiziali. Pertanto, mentre nei terreni a grana fine è complessa la valutazione del decorso nel tempo e l'entità delle variazioni delle pressioni interstiziali e, conseguentemente, di quelle efficaci, nei terreni a grana grossa è sufficiente la conoscenza dell'entità e la geometria degli incrementi di tensione totale per una valutazione corretta della resistenza al taglio in ciascun punto del volume significativo dell'ammasso interessato, noti, naturalmente, i parametri caratteristici di resistenza al taglio. Per i terreni a grana fine, fondamentale risultano essere le

condizioni di saturazione. Non a caso nella comune pratica di laboratorio le più diffuse sperimentazioni delle caratteristiche geomeccaniche (taglio diretto, prove triassiali, etc.) vengono eseguite su materiale opportunamente saturato. Se il terreno è saturo, infatti, è possibile ripercorrere tutte le condizioni in cui si trova sottoposto il terreno sotto l'aggravio di tensioni totali indotte dall'applicazione di carichi: all'istante di applicazione del carico il sistema risulta *chiuso*, con deformazioni volumetriche praticamente nulle, e le condizioni risultano *non drenate o a breve termine*; alla fine del processo di dissipazione delle pressioni interstiziali (esaurimento della fase di consolidazione) le tensioni totali risultano praticamente coincidenti con quelle efficaci e la resistenza al taglio risulta stabilizzata su un valore finale e definitivo (*condizioni drenate o a lungo termine*). In estrema sintesi, quindi, mentre nei terreni a grana grossa la resistenza al taglio praticamente rimane costante nel tempo di applicazione del carico, in quelli a grana fine è estremamente importante stabilire a priori, per una corretta valutazione delle condizioni di sollecitazione e di risposta meccanica del terreno, qual è la situazione soggetta a verifica: in una situazione, per esempio, del tipo realizzazione di un rilevato, se è verificata la stabilità subito dopo la sua costruzione, il manufatto sarà stabile a maggior ragione con il passare del tempo perché il processo di consolidazione permette *a lungo termine* l'aumento delle tensioni efficaci e, quindi, della resistenza al taglio del terreno; se invece, come accade nella realizzazione di uno scavo, le tensioni efficaci con il passare del tempo decrescono, le condizioni più critiche saranno proprio quelle *a lungo termine* e lo scavo, stabile appena realizzato, potrà essere instabile con il passare del tempo, anche di molto tempo nel caso di terreni argillosi. Come si vede, nella scelta delle più opportune prove di laboratorio non si può prescindere dal problema in questione, non si può non tenere conto del tipo di opera per cui si è chiamati a dare un *supporto* al tecnico progettista delle strutture. Troppo spesso viene richiesto al laboratorio un'analisi *completa*, senza specificare

alcunché: è un concetto che non ha senso, dovendo il tecnico incaricato della progettazione geotecnica *mirare* opportunamente il tipo di sperimentazione dei cui risultati si dovrà avvalere nello studio dell'interazione terreno-struttura. Nella pratica di laboratorio è possibile determinare le condizioni al contorno dei provini in modo da ripercorrere le situazioni geometriche, di drenaggio, di carico e di deformazione dell'ammasso che rappresentano, purché, ovviamente, si possieda una buona base di certezza sulla rappresentatività dei provini stessi, cosa tanto più sicura quanto le operazioni di campionamento, trasporto ed estrusione sono effettuate secondo le *attenzioni* raccomandate dalle Normative nazionali ed internazionali e tanto più non ci si limiti ad indagare porzioni troppo esigue del volume significativo (esiguo numero di campioni). Questi concetti, come vedremo, risultano fondamentali per qualsiasi studio, ma lo sono ancor di più quando l'attenzione è rivolta alla stabilità dei pendii che, per definizione, spesso implicano valutazioni che possono, se non fatte con le dovute cautele e perizia tecnica, rischio per manufatti anche di importanza strategica, se non di vite umane.

### Il comportamento meccanico dei terreni non coesivi e la dilatanza

È noto come spesso, per l'impossibilità di prelevare campioni indisturbati, nei terreni non coesivi si ricorra a prove in sito. Comunque, come già detto, un inquadramento del comportamento del materiale può aversi solo attraverso le prove di laboratorio, perché solo in tali prove è possibile controllare le condizioni al contorno di tensioni e deformazioni. Consideriamo il comportamento di un campione di **sabbia sciolta** e quello di un campione di **sabbia densa** (il grado di addensamento è misurabile dal differente valore dell'*indice dei vuoti*) nel corso di prove di rottura in condizioni drenate. I risultati riportati in **figura 1** possono essere ottenuti sia da Prove Triassiali, sia da Prove di Taglio Diretto. Per le Triassiali le variabili di riferimento sono il rapporto delle tensioni principali  $\sigma'_1/\sigma'_3$ , la variazione di volume  $\Delta V$  e la deformazione assiale  $\epsilon$ . Per il Taglio Diretto, l'obliquità  $\tau/\sigma'$ , la deformazione di taglio  $\gamma$  e la variazione di altezza  $\Delta H$ . Durante la fase di rottura, i singoli grani del campione di **sabbia sciolta** si spostano dalla loro configurazione iniziale per raggiungere un assetto più denso e più stabile. L'**indice dei vuoti iniziale**  $e_0$  si riduce progressivamente col procedere delle deformazioni fino a un valore critico, definito **indice dei vuoti**



**Figura 1** – Andamento delle curve sforzo-deformazione e indice dei vuoti-deformazione per due provini della stessa sabbia, a diverso grado di addensamento, in cella triassiale per prova TXCID e per uguale pressione di confinamento.

**Figure 1** – Trend of stress-strain curves and empty-strain index for two specimens of the same sand, to varying degrees of densification, Triaxial cell for TXCID and test for containment pressure equal.

**critico** ( $e_{CRIT}$ ), corrispondente a uno stato ultimo raggiunto il quale il materiale può continuare a deformarsi senza variazioni di volume e resistenza. Nel caso invece di una **sabbia densa**, le deformazioni non possono avvenire se non con un aumento di volume e per portare a rottura il provino occorre spendere energia per compensare, oltre le forze di attrito interno, l'aumento di volume stesso. Nel caso di sabbia densa, quindi, la resistenza che ne deriva è sensibilmente maggiore di quella di una sabbia sciolta e l'istante di rottura è ben evidenziato. Una volta superato il valore di picco, si ha una graduale perdita di resistenza, imputabile ad una diminuzione del grado di *mutuo incastro delle particelle* per effetto della dilatazione, fino al raggiungimento di un valore ultimo che si mantiene costante col procedere delle deformazioni.

**Lo stato critico è unico per i due tipi di sabbia (densa e sciolta) e la struttura finale del materiale presenta lo stesso indice dei vuoti critico  $e_{CRIT}$ , cui compete lo stesso valore di resistenza finale, indipendentemente dalla densità iniziale.** Il valore dell'angolo di resistenza al taglio  $\phi'$ , quindi, può essere interpretato come somma di tre contributi:

- L'attrito tra i grani (angolo  $\phi'_m$ );
- Il lavoro dovuto alle variazioni di volume (dilatanza) (angolo  $\phi'_{cv}$ );
- Il lavoro dovuto al riassetamento dei grani.

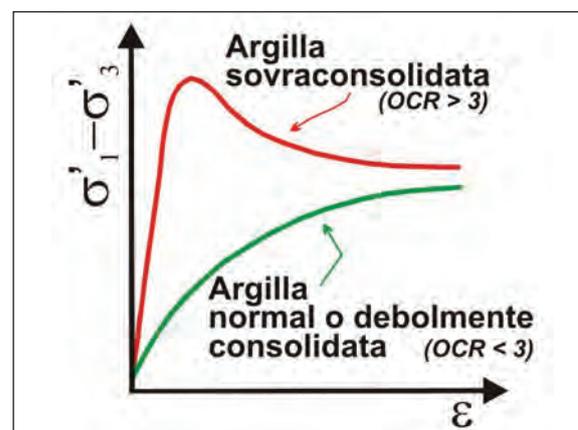
Per una sabbia densa il massimo valore di  $\phi'$  è raggiunto prima che si abbiano sensibili spostamenti relativi fra i grani, per cui risulta minimo o nullo il contributo dovuto al riassetamento dei grani ed è massimo quello dovuto alla **dilatanza**.

Per una sabbia sciolta in corrispondenza del valore critico dell'indice dei vuoti è nullo il lavoro dovuto alla dilatanza ed è massimo quello svolto sotto forma di riassetamento dei grani.

### **Il comportamento meccanico dei terreni coesivi e la resistenza residua**

I fattori che influenzano maggiormente il

comportamento meccanico di un terreno a grana fine sono il grado di sovraconsolidazione OCR e le condizioni di drenaggio. Le argille normalconsolidate (o leggermente OC:  $OCR < 2$ ) sottoposte a prove consolidate drenate presentano curve sforzi-deformazioni di tipo incrudente; mentre le argille sovraconsolidate manifestano un comportamento rammollente. Analogamente al caso dei terreni non coesivi, lo stato ultimo che viene raggiunto è indipendente dal valore di OCR (**figura 2**).



**Figura 2** – Andamento delle curve sforzo-deformazione per due provini di argilla, a diverso OCR (Over Consolidation Ratio), in cella triassiale per prova TXCID e per uguale pressione di confinamento.

**Figure 2** – Trend of stress-strain curves for two clay specimens, with different OCR (Over Consolidation Ratio), in triaxial cell for test TRX CID and confinement cell with equal pressure.

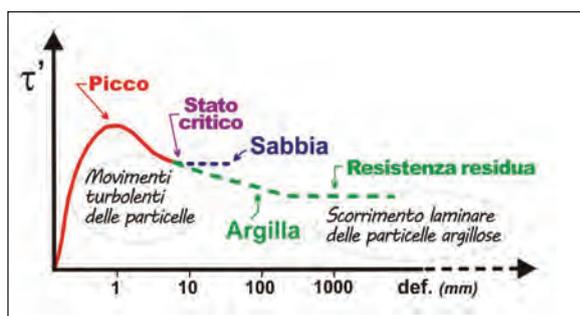
Il criterio di Mohr-Coulomb per un terreno a grana fine normalconsolidato si riduce a:

$$\tau_R = \sigma'_n \cdot \tan \phi'$$

Mentre per un terreno a grana fine sovraconsolidato il contributo di natura coesiva non è nullo:

$$\tau_R = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi'$$

In corrispondenza dello **stato critico** (per spostamenti relativi dell'ordine dei 10 mm o deformazioni di taglio dell'ordine del 10%) i movimenti delle particelle che ricadono nella zona di taglio sono essenzialmente turbolenti e comportano sia nel caso dell'argilla sia nel caso della sabbia rotazioni e scorrimenti fra le particelle. In corrispondenza di spostamenti relativi più elevati le deformazioni tendono a localizzarsi in zone di intense deformazioni



**Figura 3** – Movimenti delle particelle e “stati di resistenza” in prove di Taglio Diretto su provini di Sabbia densa e Argilla sovraconsolidata sottoposti alla stessa pressione verticale.

**Figure 3** – Particle Movements and “States of resistance” in Direct shear tests on specimens of thick sand and of clay over consolidated subjected to the same vertical pressure.

distorsionali ed il valore di tensione tangenziale che l’argilla può sostenere diminuisce. Il valore minimo della tensione tangenziale che l’argilla può sopportare si ottiene per grandi spostamenti relativi e viene detta **resistenza residua**. La resistenza residua è associata allo scorrimento laminare delle particelle argillose, di forma appiattita, che al progredire della deformazione si allineano parallelamente alla direzione dello scorrimento.

**Come già detto, per i terreni come le sabbie le cui particelle sono di forma arrotondata, la condizione di flusso laminare non può realizzarsi e la resistenza residua coincide con quella critica (figura 3).**

**In condizioni residue** un’argilla rammollente, presenta:  $c' = 0$  e  $\phi'_R < \phi'_{cr} < \phi'_p$ ; **in stato critico**:  $c' = 0$  e  $\phi'_{cr} < \phi'_p$ ; **in condizioni di picco**:  $c' \neq 0$  e  $\phi' = \phi'_p$ . Dall’analisi di un elevato numero di argille si è potuto rilevare che la caduta di resistenza cresce con il grado di sovra consolidazione, con il contenuto di argilla e con l’indice di plasticità e che l’angolo  $\phi'_R$  per un argilla OC è inferiore che per un argilla NC. Esso dipende principalmente dalla natura mineralogica del materiale.

## La scelta della tipologia delle prove geotecniche di laboratorio per la verifica di stabilità dei pendii in terra secondo le NTC

La Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 617/2009, conseguente al D.M. 14.01.2008, al **punto C6.3.3 Modellazione geotecnica del pendio** recita testualmente: “Le prove di laboratorio devono permettere la determinazione delle caratteristiche di resistenza nelle condizioni di picco, di post-picco e nelle condizioni residue”. E ancora, al **punto C6.3.4 Verifiche di sicurezza**: “Nelle verifiche di stabilità si utilizzano i valori caratteristici dei parametri di resistenza ( $c'_k, \phi'_k$ ). Il coefficiente di sicurezza è definito dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento e lo sforzo di taglio mobilitato lungo di essa. Il suo valore minimo deve essere scelto e motivato dal progettista in relazione al livello di affidabilità dei dati acquisiti, ai limiti del modello di calcolo utilizzato, nonché al livello di protezione che si vuole garantire (§ 6.3.4 NTC). Nei pendii interessati da frane attive o quiescenti, che possano essere riattivate dalle cause originali o da un’azione sismica, bisogna fare riferimento alla resistenza al taglio a grandi deformazioni, in dipendenza dell’entità dei movimenti e della natura dei terreni. Le caratteristiche di resistenza devono quindi intendersi come valori operativi lungo la superficie di scorrimento”. Da ciò si evince quanto la resistenza residua dei terreni coesivi è un parametro geotecnico di grande interesse per lo studio delle condizioni di equilibrio dei pendii. Pertanto, in sintesi, riguardo alla scelta della tipologia delle prove geotecniche di laboratorio più adatte per la verifica di stabilità dei pendii in terra è possibile adottare il seguente schema:

| Condizioni di rottura  | Parametri geotecnic       | Prove di laboratorio  |
|--|---------------------------|---|
| condizioni di picco  | $c'$ (SLU), $\phi'$ (SLU) | Triassiale CID, Taglio diretto  |
| condizioni di rottura con dislocazione limitata                  | $\phi_{cv}$ (SLU)         | Taglio diretto rimaneggiato al LL, Taglio diretto in modalità reverse |
| condizioni di rottura con dislocazione estesa su terreni coesivi | $\phi_r$ (SLU)            | Taglio Torsionale su provino anulare                                  |

### La determinazione della resistenza residua: il Taglio Diretto di Casagrande con inversione del moto e ripetuti cicli di taglio e il Taglio Torsionale su provino anulare

Nei terreni coesivi le particelle di argilla presentano forma appiattita e orientamento casuale. Quando si verifica lo scorrimento lungo una superficie di taglio, al crescere delle deformazioni le particelle lamellari tendono a orientarsi parallelamente alla superficie di scorrimento e la resistenza al taglio si riduce, come già detto, fino ad un valore residuo inferiore, e talvolta molto inferiore, al valore della resistenza al taglio di stato critico. In una fascia a cavallo della superficie di scorrimento, detta *banda di taglio*, il terreno risulta rammollito, ovvero con indice dei vuoti e contenuto in acqua superiore a quello del terreno indisturbato. Durante un movimento franoso la resistenza lungo la superficie di scorrimento può dunque decadere molto, sia per l'insorgere di sovrappressioni interstiziali, e quindi per riduzione delle tensioni normali efficaci, sia per riduzione dell'angolo di resistenza al taglio fino al valore residuo. Una volta cessato il movimento (frana quiescente), le sovrappressioni interstiziali nel tempo si dissipano e vi è un recupero di resistenza al taglio, ma le particelle di terreno rimangono orientate e l'angolo di resistenza al taglio ha il

valore residuo. La determinazione sperimentale dell'angolo di resistenza al taglio residuo richiede di imporre grandi deformazioni al provino, non possibili con l'apparecchio triassiale. Si ricorre perciò all'apparecchio di *Taglio Diretto*, imponendo numerosi cicli di taglio (totalmente invertiti) al provino o all'apparecchio di *Taglio Torsionale*, in cui un provino cilindrico cavo viene portato oltre la rottura con una rotazione continua e monotona lungo una superficie orizzontale di taglio. È ampiamente dimostrato che le sperimentazioni con l'apparecchio di Taglio Torsionale forniscono valori della resistenza residua più *affidabili* di quelli ricavati con la scatola di Casagrande e l'inversione del moto a seguito di ripetuti cicli di taglio. L'affidabilità del Taglio Torsionale su provino anulare è legata al fatto che la distribuzione delle tensioni sul piano di rottura è molto prossima ad essere uniforme, proprio come accade nella maggior parte dei fenomeni di rottura progressiva nei pendii di limitate dimensioni, quelli cioè più frequenti nei terreni del nostro Appennino. Inoltre, prevedendo la sperimentazione di operare, come vedremo, su materiale rimaneggiato e sotto pressioni normali molto basse, è possibile valutare, anche se in maniera qualitativa, quei parametri, come ad esempio la capacità di orientarsi delle particelle di argilla, i quali, pur non intervenendo direttamente nei calcoli, danno una spiegazione

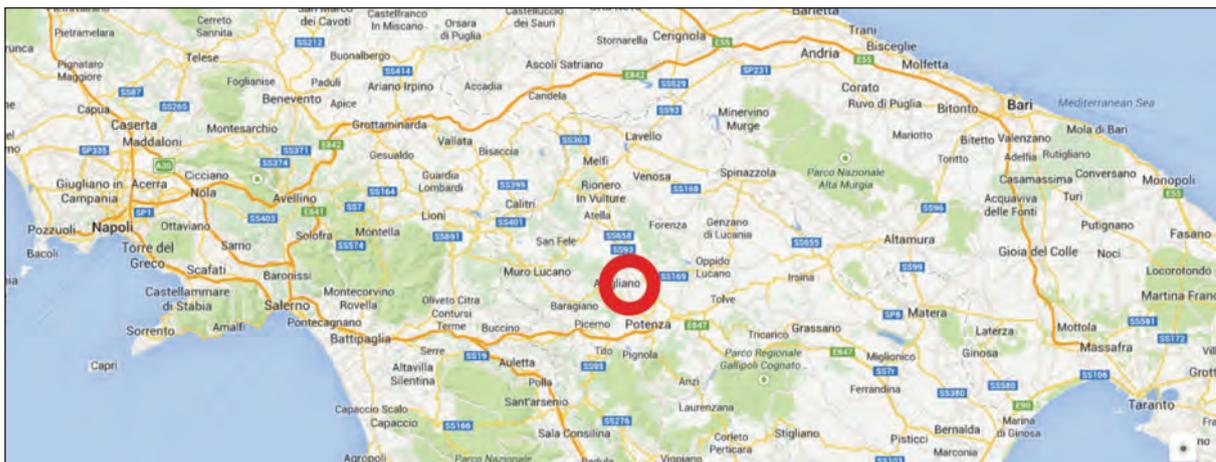


Figura 4 – Area di prelievo dei campioni sottoposti a prova di Taglio residuo in Scatola di Casagrande e a Taglio Torsionale su provino anulare.

Figure 4 – Withdrawal area of samples tested with residual cutting in Casagrande box and Torsional Shear apparatus on annular specimen.

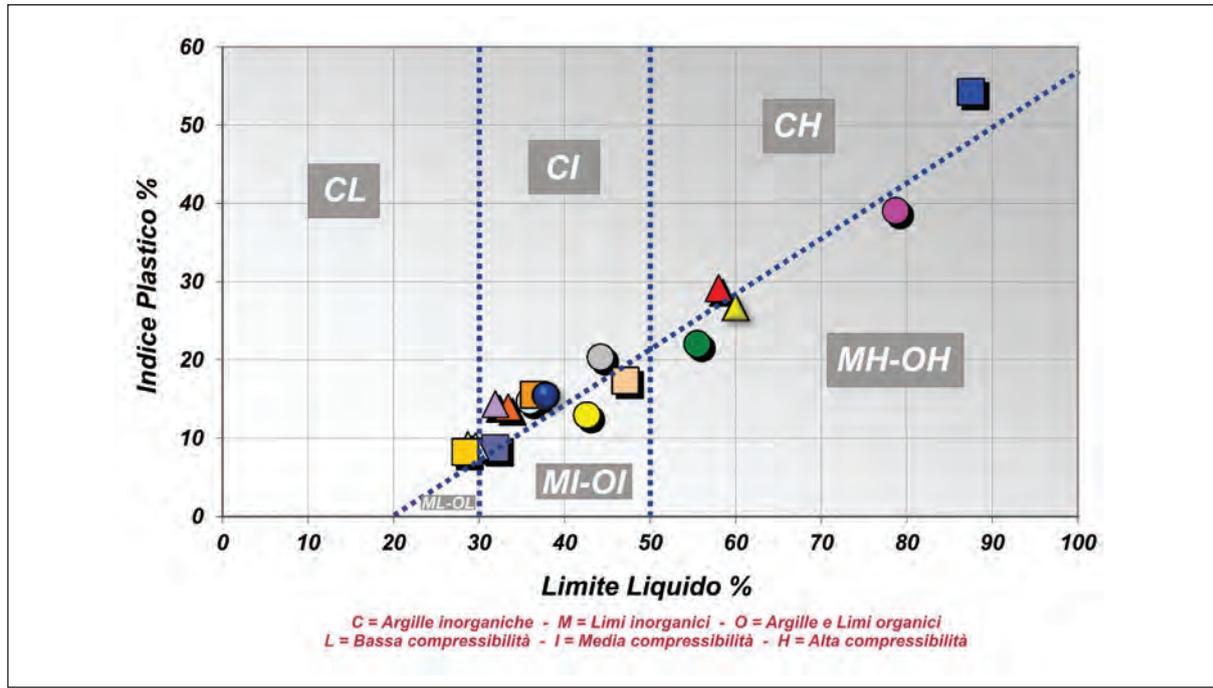


Figura 5 – Caratteristiche di plasticità dei campioni sottoposti a prova di Taglio residuo in Scatola di Casagrande e a Taglio Torsionale su provino anulare.  
 Figure 5 – Characteristics of plasticity of the tested samples with residual cutting in Casagrande box and in Shear Torsional Ring finger.

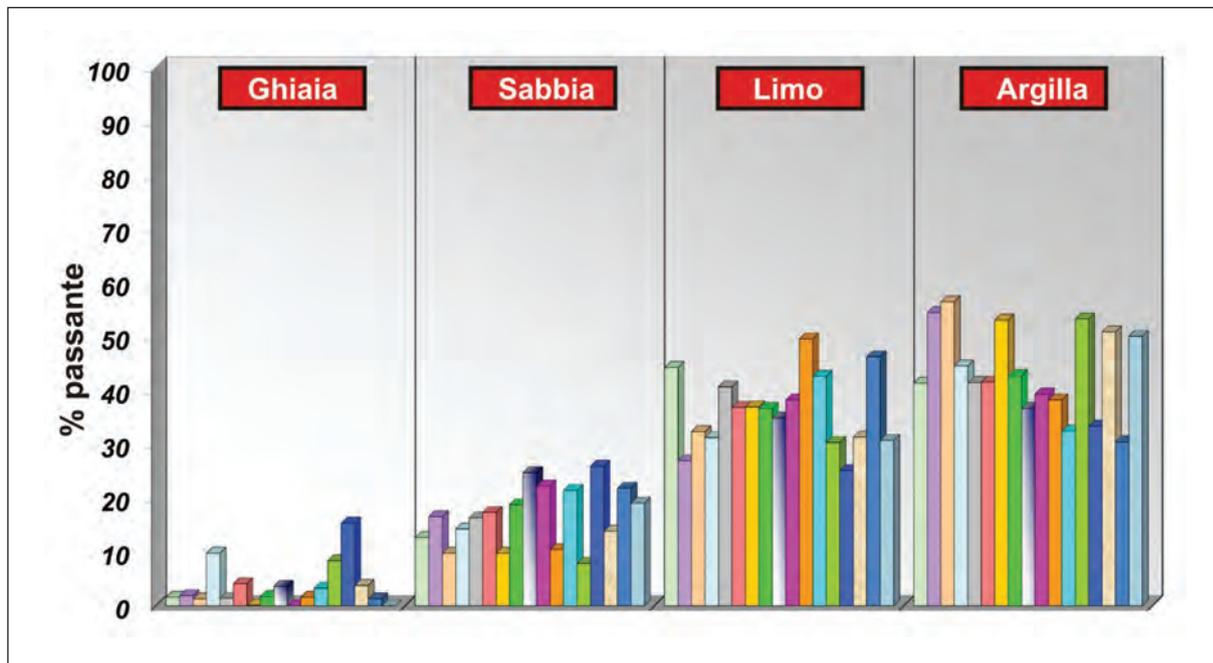
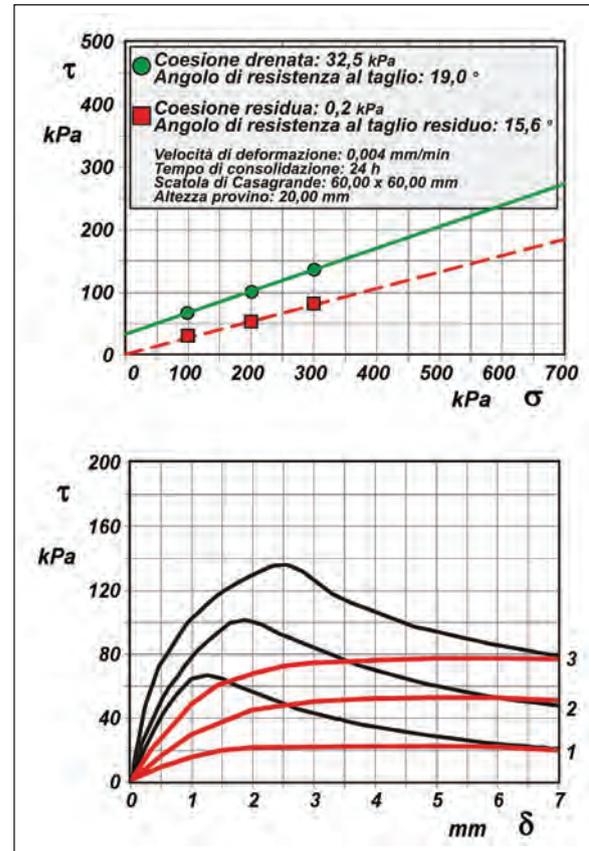


Figura 6 – Caratteristiche granulometriche dei campioni sottoposti a prova di Taglio residuo in Scatola di Casagrande e a Taglio Torsionale su provino anulare.  
 Figure 6 – Characteristics of grain size of the tested samples with residual cutting in Casagrande box and Torsional Shear apparatus on annular specimen.

del comportamento del terreno.

Su campioni prelevati a varie profondità (fino a 20 m dal p.c.) lungo il tracciato in fase di progettazione della Strada di Collegamento dell'abitato di Avigliano (PZ) e la SSV Potenza-Melfi in Basilicata (**figura 4**) sono state determinate in laboratorio le principali caratteristiche fisiche e le proprietà indice, nonché le caratteristiche geomeccaniche di 17 campioni di terre. I campioni appartengono al **Gruppo delle argille variegata** - (cfr. "Argille varicolori lagonegresi" Auct.): *Argille, argilliti marnose, marne silicifere ed argille marnoso-siltose grigie e policrome, con intercalazioni in strati e banchi di marne calcaree, calcilutiti e calcareniti bioclastiche, variamente silicizzate ed alterate, talora con selce e diaspri*. Ovviamente i campioni analizzati sono stati prelevati nella componente terrigena (peraltro preponderante) della Formazione ed hanno caratteristiche di Plasticità, elemento come vedremo fortemente influenzante la resistenza residua, tali da essere considerate fondamentalmente *Argille inorganiche a media compressibilità* (**figura 5**).

Solo 5 campioni sono *Argille inorganiche o Argille e Limi organici ad alta compressibilità*. Inoltre dal punto di vista granulometrico i campioni sono considerabili sostanzialmente, pur nelle dovute differenze derivanti dalla disomogeneità della Formazione geologica, *Argille sabbiose con limo* (**figura 6**). Bassa o bassissima risulta la percentuale di ghiaia, comunque consistente in elementi litici marnoso calcarei e calcarenitici di dimensioni massime 2-3 cm. I campioni sono stati sottoposti a prove di Taglio Diretto e successivamente a cicli di taglio invertiti in numero totale di 5. La prova di taglio finale (6° ciclo) è stata presa come indicativa della resistenza residua del campione di terreno. Nelle **figure 7a e 7b** sono riportati rispettivamente i risultati, sia in forma grafica che analitica di una prova di Taglio diretto, eseguita a velocità di 0,004 mm/min, relativa ad uno dei campioni analizzati (S3-C4, profondità di prelievo 15,00 - 15,50 m) con la successiva elaborazione della prova di resistenza residua in Scatola di Casagrande (**7a**) e



**Figura 7a** – Prova di Taglio Diretto e Residuo in Scatola di Casagrande (in rosso la prova di Taglio residuo).

**Figure 7a** – Direct shear test and residual shear test in Casagrande box (in red the residual shear test).

la rappresentazione grafica dei 5 cicli di taglio precedenti il taglio residuo (6° ciclo - prova eseguita alla stessa velocità del Taglio Diretto) (**7b**). Per la presente ricerca, gli stessi campioni sono stati sottoposti a Taglio torsionale su provino anulare. La strumentazione utilizzata è il modello T 800 della Tecnotest di Modena. La macchina ha le seguenti caratteristiche fondamentali: azionamento elettro-meccanico; motore passo-passo e riduttore di precisione; momento torcente massimo all'utilizzo 100 Nxm; velocità di rotazione selezionabile in campo continuo (massimo 12°/s, min 0,00002°/s); visualizzazione in continuo della deformazione di taglio; anelli di compressione in bronzo sinte-rizzato permeabile, con dentature radiali; dispositivo di carico verticale con pistone pneumatico

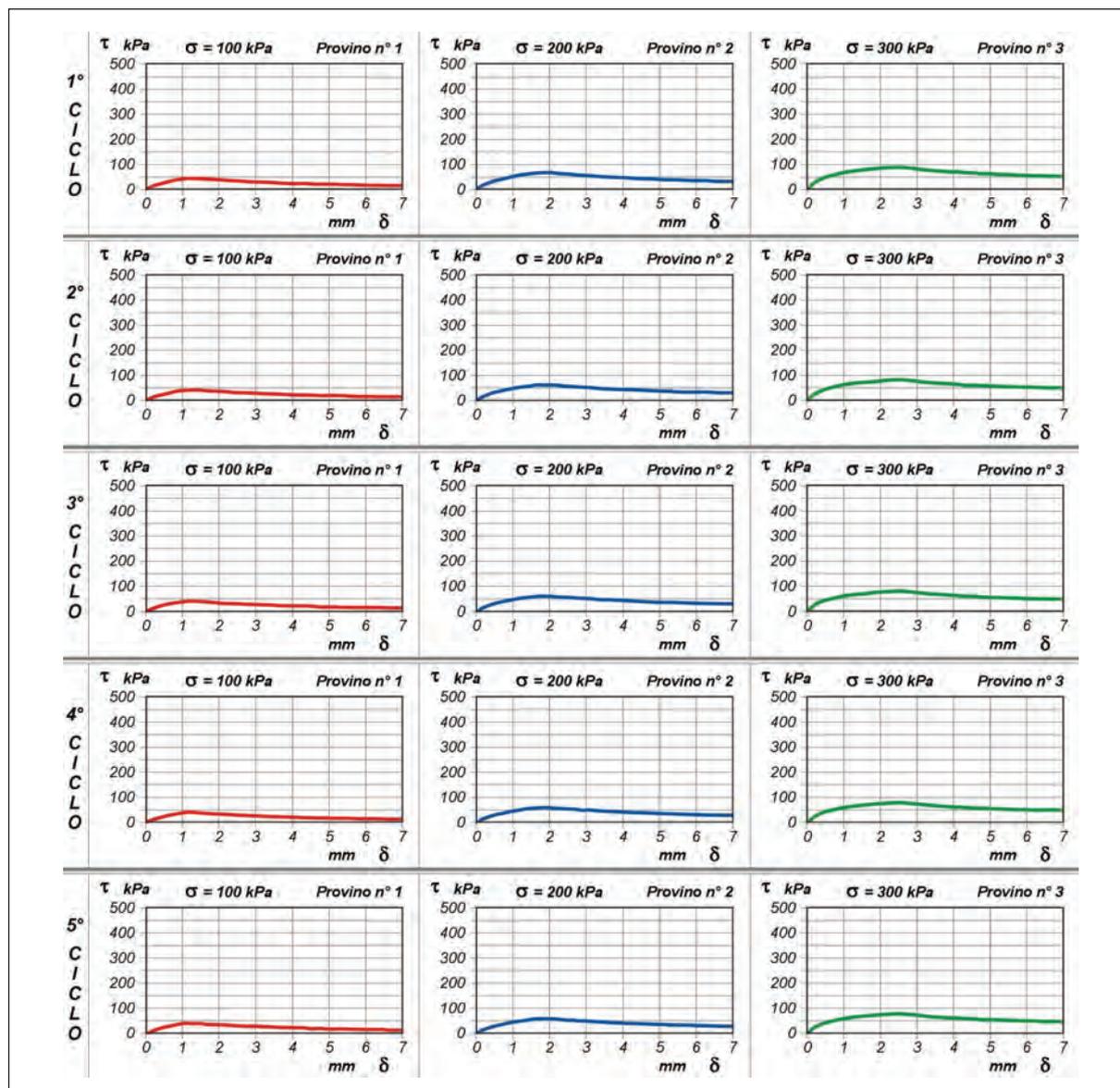
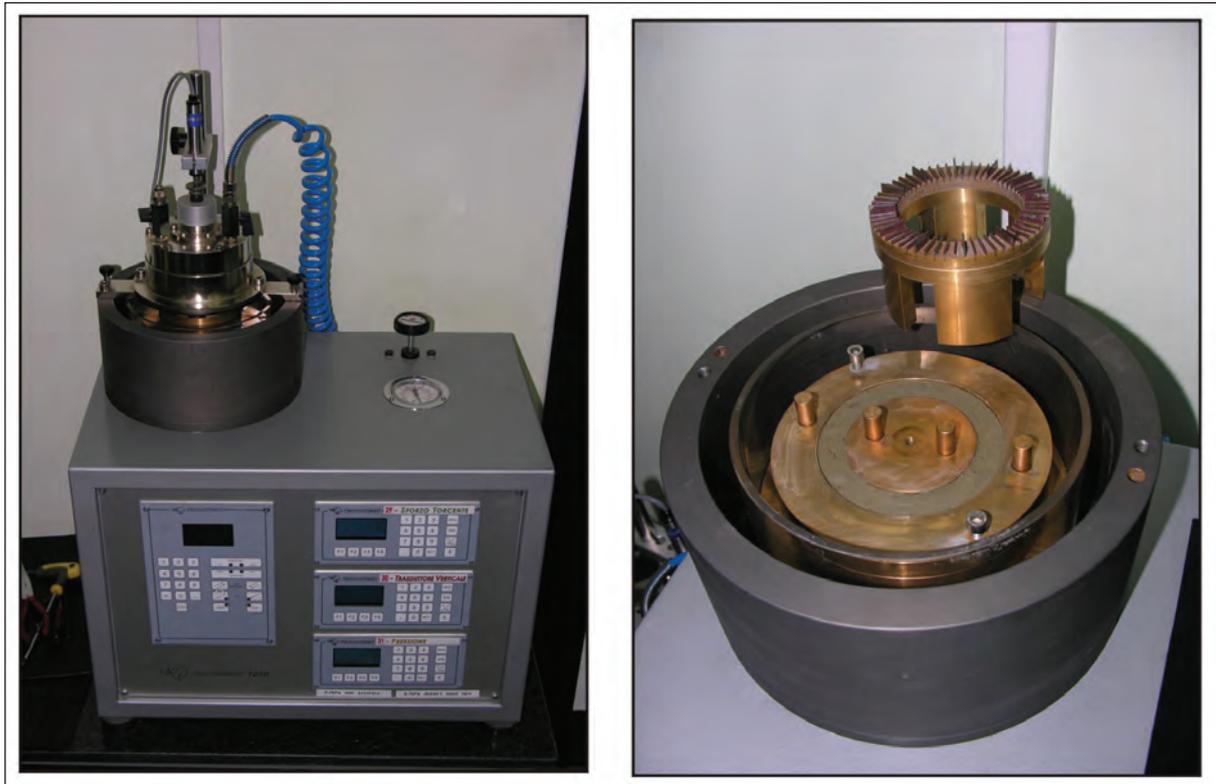


Figura 7b – Cicli di taglio “preventivi” alla Prova di Taglio Residuo in Scatola di Casagrande eseguiti alla velocità di 0,5 mm/min.

Figure 7b – Cycles of cutting executed before the residual shear test in Casagrande box performed at a speed of 0.5 mm/min.

a basso attrito (membrane a rotolamento); valvola pneumatica di precisione per regolare e mantenere il carico; sensori e visualizzatori torsionometro ad estensimetri per la misura della coppia torcente, non-linearità compresa nello 0.3%; trasduttore lineare per la misura della deformazione verticale corsa 10 mm, non-linearità compresa nello 0.3%;

trasduttore estensimetrico di pressione per la misura del carico verticale capacità 1000 kPa, non linearità compresa nello 0.3%. In **figura 8** sono riportate immagini della strumentazione. In tutte le prove eseguite il materiale utilizzato era allo stato rimaneggiato, con contenuto d’acqua prossimo alla metà del valore del Limite Liquido. La



**Figura 8** – Immagini della strumentazione T 800 Tecnotest - Modena per prove di Taglio Torsionale su provino anulare in dotazione alla Geotest S.a.s. di Melfi (PZ).  
**Figure 8** – Pictures of instrumentation T 800 - Tecnotest Modena for Torsional Shear apparatus on annular specimen owned of the Geotest S.a.s. di Melfi (PZ).

pressione normale massima è stata di 150 kPa dal momento che oltre tale valore la resistenza residua si mantiene pressoché costante con il crescere della pressione normale stessa (Skempton e Petley, 1967). La pressione normale minima invece è stata di 50 kPa. La velocità di deformazione imposta è stata di 0,02°/min (circa 2 cm di deformazione al giorno). Si tratta pressappoco della velocità dei *mudflow* lenti (Hutchinson, 1970). Le prove sono state spinte fino all'ottenimento di un valore di resistenza al taglio rigorosamente costante al procedere della deformazione, appunto il valore della *resistenza al taglio residua*. In genere tale valore viene raggiunto con buon grado di sicurezza entro i primi 60° di deformazione del provino anulare (circa 2 giorni di applicazione del momento torcente per ogni carico). In **figura 9** sono riportati i risultati, sia in forma grafica che analitica, della prova di Taglio torsionale su provino anulare

eseguita sullo stesso campione di cui precedentemente sono stati presentati i risultati della prova di Taglio Diretto e Residuo in scatola di Casagrande (S3-C4).

Dal confronto dei valori di resistenza residua ricavati in Scatola di Casagrande e con le prove di Taglio Torsionale su provino anulare per i 17 campioni di Avigliano (PZ) risulta chiara una considerazione che già A.A. avevano evidenziato: **la resistenza residua determinata con l'apparecchio di Taglio Diretto risulta superiore al valore determinato con l'apparecchio di Taglio Torsionale su provino anulare**. Nel nostro caso tale differenza va da un minimo di 1,4° ad un massimo di 4,2°, con una differenza media di 2,7° (**figura 10**). Il fatto che la resistenza residua determinata in laboratorio con l'apparecchio di Taglio Diretto risulti più elevata di quella determinata con l'apparecchio di Taglio Torsionale su provino anulare è stato fatto rilevare

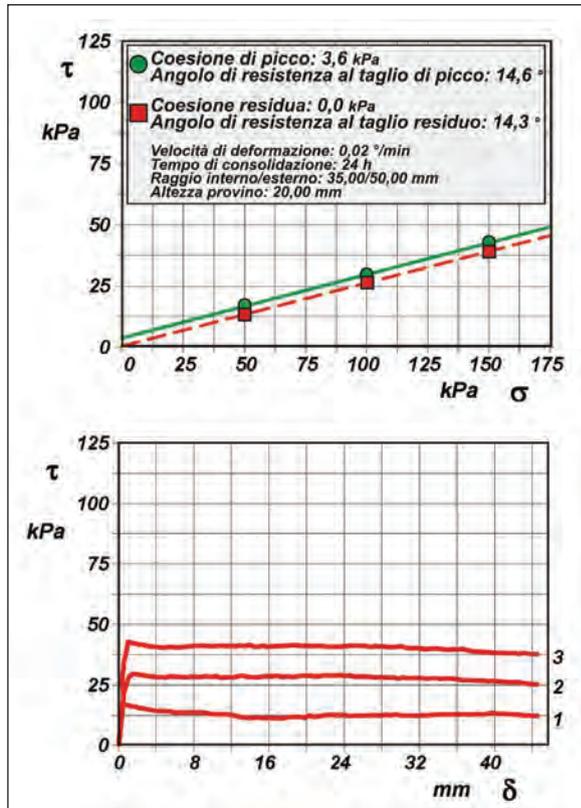


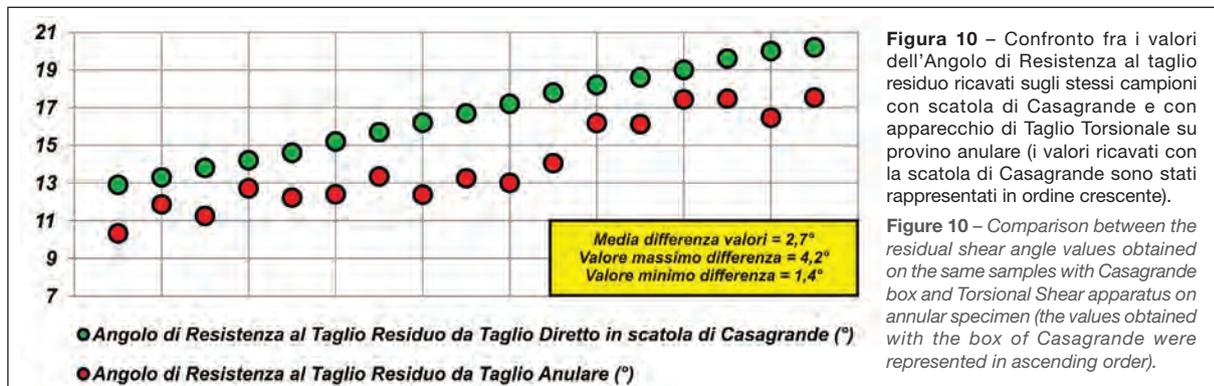
Figura 9 – Prova di Taglio Torsionale su provino anulare.  
 Figure 9 – Torsional shear test on the annular specimen.

da diversi autori (Petley, 1969 – Garga, 1970 – Bellino e Maugeri, 1985). La spiegazione principale di tale fenomeno risiede nella maggiore o minore capacità delle particelle argillose di orientarsi sotto carico. A questo proposito si può ipotizzare che i caratteri macro e micro strutturali dei terreni sottoposti a prova esercitano una maggiore influenza

sui valori di resistenza residua determinati con l'apparecchio di Taglio Diretto con inversione del moto, poiché l'orientamento delle particelle sotto l'azione degli sforzi taglianti non è completa; tale influenza risulta minima nell'apparecchio di Taglio Torsionale su provino anulare, dove a causa dell'orientamento assunto dalle particelle, la struttura originaria viene in qualche modo ad essere distrutta. È evidente quanto il Taglio torsionale su provino anulare rappresenti una *più adeguata* sperimentazione di laboratorio per la determinazione della risposta meccanica dei terreni nello studio delle condizioni di equilibrio dei pendii.

#### I fattori che influenzano i valori di resistenza residua

A prescindere dalle modalità di sperimentazione, i fattori da cui dipende la resistenza residua dei terreni sono il contenuto percentuale di argilla presente nei campioni analizzati e la velocità di scorrimento con cui vengono eseguite le prove. L'esistenza di una correlazione tra la resistenza residua e la percentuale di argilla ormai è acclamata: **a maggior percentuale di argilla corrisponde in linea di massima una diminuzione della resistenza residua**. Inoltre, esiste una significativa correlazione fra l'Indice Plastico e l'Angolo di resistenza al taglio residuo: **maggiore è l'indice plastico minore è l'angolo  $\phi'_R$** . Tale angolo, infatti, è indipendente dalla storia dello stato tensionale, e quindi dal grado di sovra consolidazione OCR, ma dipende dalla composizione granulometrica



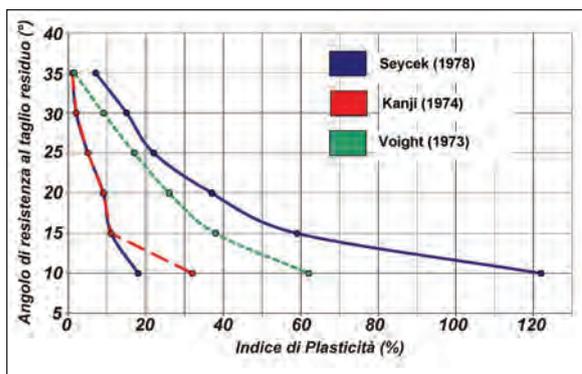


Figura 11 – Correlazioni empiriche fra l'indice di plasticità e l'angolo di resistenza al taglio residuo dei terreni.

Figure 11 – Empirical correlations between the plasticity index and residual soil shear strength angle.

del terreno, dalla mineralogia dell'argilla (e quindi dall'indice di plasticità e dai limiti di Atterberg dalla frazione argillosa) e dalla tensione efficace normale sul piano di rottura. In passato numerosi autori hanno tentato di stabilire correlazioni empiriche fra il valore dell'Angolo di resistenza al taglio residuo e le caratteristiche di plasticità del terreno in esame. Tali correlazioni sono state espresse attraverso formule:

$$\phi'_r = 46,6 / IP^{0,446} \quad (\text{Kanji, 1974})$$

$$\phi'_r = 453,1 / LL^{0,85} \quad (\text{Cancelli, 1977})$$

o in forma grafica (figura 11).

Da sperimentazioni eseguite dagli scriventi negli anni dal 2009 al 2013 su circa 400 campioni di terreno provenienti da diversi siti dell'Italia meridionale (figura 12) è stata tentata una correlazione dei valori ottenuti per l'angolo  $\phi'_r$  e l'Indice Plastico dei campioni stessi. La correlazione ha tanto più valore perché basata su un numero molto significativo di dati e perché i siti di prelievo dei campioni sono distribuiti su una vasta superficie. Questa considerazione, inoltre, rimanda al fatto, di primaria importanza ai fini della validità della ricerca, che i campioni analizzati appartengono a situazioni geologiche e strutturali estremamente variegata e ciò diminuisce fortemente l'influenza che fattori particolari, legati alle caratteristiche mineralogiche, deposizionali e geologiche generali di un sito o di un'area ristretta, possono avere sulla resistenza residua dei terreni in esame (figura 13). La correlazione restituisce una linea di tendenza che rappresenta la seguente equazione:

$$\phi'_r = 0,0148 \cdot IP^2 - 1,2571 \cdot IP + 37,775$$

L'equazione ha un coefficiente di determinazione, proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato,  $R^2 = 0,9173$ .

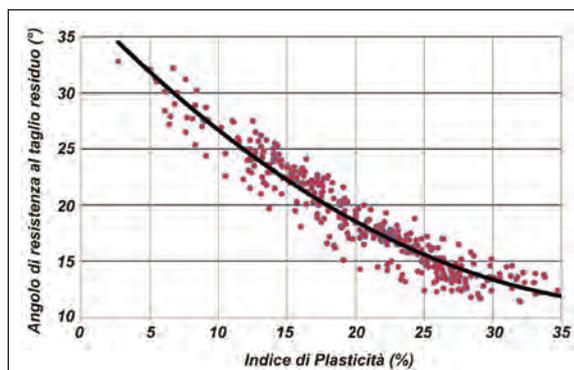


Figura 12 – Siti di prelievo dei campioni sottoposti a Prova di Taglio Residuo con Scatola di Casagrande o con Prova di Taglio Torsionale su provino anulare.

Figure 12 – Soils sampling locations tested with Residual cutting in box of Casagrande and with Torsional Shear apparatus on annular specimen.

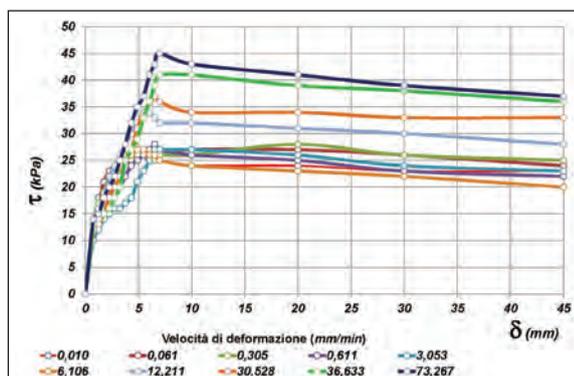
Riguardo alla velocità di esecuzione delle sperimentazioni, questa è stata, secondo prassi usuale del Laboratorio, la stessa già presentata negli esempi dei paragrafi precedenti: 0,004 mm/min per le prove in Scatola di Casagrande; 0,02°/min quando le prove sono state effettuate con la macchina per il Taglio Torsionale su provino anulare. Il fattore velocità ha una significativa importanza sulla determinazione della resistenza residua dei terreni in laboratorio. Infatti, in generale si riscontra una tendenza ad un certo incremento della resistenza residua al crescere della velocità. Questo spiegherebbe come nei cicli di taglio *preventivi* alla prova di Taglio residuo in Scatola di Casagrande (figura 7b), effettuati a velocità elevata (0,5 mm/min), la curva sforzo-deformazione tende a mantenere una *evidenza al picco*, denotando una resistenza più elevata di quella che ci si attenderebbe da un terreno ormai in condizioni residue. Recenti sperimentazioni (Vassallo R., Vallario M., Di Maio C., 2011) hanno dimostrato che per Velocità  $\leq 5$  mm/min non si riscontrano variazioni di resistenza significative. Al contrario, per Velocità  $\geq 10$  mm/min, si possono registrare notevoli incrementi di resistenza, fino all'80%, con la velocità. Tali risultati risulterebbero in buon accordo con quelli di Tika et al. (1996). Per la presente ricerca, il campione S3-C4 di Avigliano (PZ), di cui già si sono riportati i risultati di Prove di Taglio, è stato sottoposto in Taglio Torsionale su provino anulare e per una tensione verticale di 50 kPa a numerosi tests eseguiti a crescenti velocità di deformazione. In **figura 14** sono riportate le curve sforzo-deformazione relative ai singoli tests. Come si può notare, al crescere della velocità di deformazione cresce la resistenza residua e, in particolare, la *tendenza* risulta molto evidente per valori  $> 10$  mm/min. L'andamento della resistenza residua con la velocità di esecuzione della prova è ancora più evidente nel grafico di **figura 15**, dove è possibile valutare un aumento che raggiunge progressivamente, per velocità superiori a 10 mm/min, il 40% fino a circa il 70%.

Questo aspetto delle sperimentazioni di laboratorio assume importanza rilevante nello studio dei pendii potenzialmente soggetti a rischio sismico. Il significativo aumento della resistenza residua



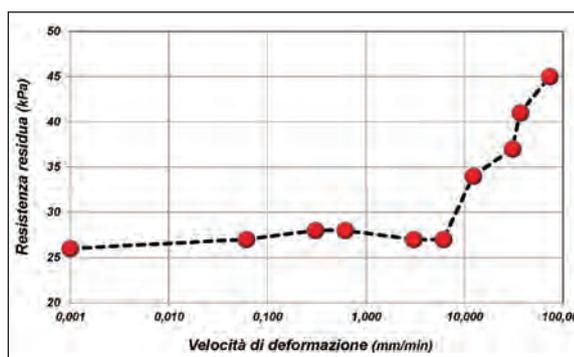
**Figura 13** – Correlazione fra l'indice di plasticità e l'angolo di resistenza al taglio residuo dei terreni analizzati nella presente ricerca.

Figure 13 – Correlation between the plasticity index and angle of residual shear strength of analysed soil in this research.



**Figura 14** – Curve sforzo-deformazione in prove di Taglio Torsionale su provino anulare eseguite alla pressione di consolidazione di 50 kPa con diverse velocità di deformazione (Campione S3-C4 prof. 15,00-15,50).

Figure 14 – stress-strain curves in tests with Torsional Shear apparatus on annular specimen and on specimen consolidated at pressure of 50 kPa with different strain rate (specimen S3-C4 Prof. 15.00 -15.50).



**Figura 15** – Influenza della velocità di deformazione sul valore della resistenza residua per il provino di figura 14 testato con l'apparecchiatura di Taglio Torsionale su provino anulare.

Figure 15 – The influence of strain rate on the value of residual strength for the test specimen of the Figure 14 tested with Torsional Shear apparatus on annular specimen.

all'aumentare della velocità di deformazione, infatti, fa ritenere che in generale i valori della resistenza residua ricavati normalmente in laboratorio, dove le velocità applicate sono decisamente inferiori ai 10 mm/min, nel caso di verifica in condizioni sismiche sono sottostimati e cioè in un'ottica significativamente cautelativa.

### **Bibliografia**

---

- YEN B.C., 1969. *Stability of slopes undergoing creep deformation*. J. S. Mech.&Found. Eng.,95(4), 1075-1096.
- BROMHEAD E.N., 1979. *A simple ring shear apparatus*. Ground Eng., vol. 12.
- D'ELIA B. (1983). *La stabilità dei pendii naturali in condizioni sismiche*. Atti del XV convegno nazionale di Geotecnica, Spoleto, maggio 1983, Vol. III, pp. 125-135.
- IVERSON R.M., 1985. *A constitutive equation for mass-movement behaviour*. Journal of Geology, 93(2),143-160.
- TIKA T.E., VAUGHAN P.R. E LEMOS L.J.L.J., 1996. *Fast shearing of pre-existing shear zones in soil*. Géotechnique, Vol. 46 (2), 197-233.
- LO PRESTI D. E FROIO F. (2002). *Determinazione sperimentale e involuppi di rottura della resistenza al taglio residua delle rocce tenere*. Incontro annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2002 - IARG 2002. Napoli, 20-21 Giugno 2002
- STARK T.D., CHOI H., MCCONE S., 2005. *Drained shear strength parameters for analysis of landslides*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, n° 131, 575-588.
- CARRUBBA P. E DEL FABBRO M., 2008. *Laboratory investigation on reactivated residual strength*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, n° 134, 302-315.
- STARK T.D. E HUSSAIN M., 2010. *Shear strength in pre-existing landslides*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, n°136, 957-962.
- VASSALLO R., VALLARIO M., DI MAIO C., 2011. *Geometria e cinematica di una frana lenta in argille consistenti*, IARG 2011, Torino, 4-6 Luglio 2011.
- FACCIORUSSO J., MADIÀI C., VANNUCCHI G. (2011). *Dispense di Geotecnica*. Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Sezione Geotecnica. Rev. Settembre 2011.
- CALCATERRA S., DI MAIO C., GAMBINO P., VALLARIO M. E VASSALLO R. (2012). *Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: a case study in Southern Apennines, Italy*. Natural Hazard. 61: 257-266. DOI 10.1007/s11069-010-9633-3.
- SCARINGI G., TELESCA G., VASSALLO R., DI MAIO C. (2013). *Resistenza residua a taglio di un'argilla illitica: influenza della velocità di scorrimento, della composizione del fluido interstiziale, della modalità di taglio*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013- IARG 2013. Perugia, 16-18 settembre 2013.

### **Ringraziamenti**

---

*Un doveroso ringraziamento per il fattivo contributo dato a questa ricerca va ai Tecnici di laboratorio Geom. Antonello Di Lucchio, Geol. Giuseppe Mario Graziano e Geol. Susy Maio.*