

**ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088**  
**UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

---

**SCUOLA DI SCIENZE**

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

**Relazione di Laurea**

**Resistenza al taglio residua in terreni argillosi  
appartenenti alla Formazione delle Argille a  
Palombini**

**Candidato:**  
Francesco Parma

**Relatore:**  
Prof. Simoni Alessandro

---

---

**Sessione Novembre 2015**  
Anno Accademico 2014-2015



## INDICE

<b>Introduzione</b> .....	4
<b>1. RESISTENZA AL TAGLIO RESIDUA DEI TERRENI</b> .....	5
1.1 Introduzione .....	5
1.2 Influenza delle proprietà indice .....	5
1.3 Influenza della velocità di spostamento .....	7
1.4 Inviluppo di rottura residuo .....	8
1.5 Metodi di caratterizzazione della resistenza residua .....	9
<b>2. AREA DI STUDIO</b> .....	10
2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico .....	10
2.2 Contestualizzazione delle indagini .....	12
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	14
3.1 Perforazioni a carotaggio continuo .....	14
3.2 Prove di laboratorio.....	15
3.2.1 Preparazione dei campioni .....	15
3.2.2 Determinazione dei limiti di Atterberg .....	15
3.2.3 Analisi granulometriche .....	16
3.2.4 Prove di taglio anulare .....	18
<b>4. RISULTATI E DISCUSSIONE</b> .....	20
4.1 Stratigrafie .....	20
4.2 Analisi granulometriche e limiti di consistenza .....	25
4.3 Prove di taglio anulare .....	28
<b>5. CONCLUSIONI</b> .....	35
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	37

## INTRODUZIONE

L'esecuzione di indagini geognostiche in sito, e la caratterizzazione geologico-tecnica dei terreni mediante prove di laboratorio, costituiscono una base di partenza fondamentale per le fasi progettuali relative alla realizzazione di una qualsiasi tipologia di intervento.

In primo luogo, è necessario eseguire prove in sito che permettano di ottenere una ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, fondamentale per comprendere quali litologie siano presenti, la loro variabilità spaziale e i loro rapporti stratigrafico-strutturali.

A questa fase iniziale deve seguire dunque l'esecuzione di prove di laboratorio che caratterizzino opportuni parametri geotecnici del terreno, al fine di completare il quadro conoscitivo del sito in esame (Lancellotta, 2004).

Scopo del presente lavoro è quello di interpretare la stratigrafia di un'area in frana e caratterizzare dal punto di vista geologico-tecnico campioni di terreno prelevati durante perforazioni di sondaggio, con particolare riguardo alla resistenza residua.

Nel mese di Agosto 2015, sono state eseguite alcune indagini lungo un versante franoso attraversato dalla linea ferroviaria Bologna-Pistoia. Due perforazioni a carotaggio continuo hanno raggiunto la profondità di 20m e hanno permesso di osservare la stratigrafia dei terreni.

La prima fase del lavoro svolto consiste nella descrizione delle carote di terreno, derivanti dai sondaggi, avvenuta contestualmente all'esecuzione delle prove, permettendo la ricostruzione di un profilo stratigrafico lungo le due verticali indagate.

Durante l'esecuzione delle prove di sondaggio sono stati inoltre prelevati dei campioni (complessivamente cinque) corrispondenti a spezzoni di carota, destinati alle successive fasi di caratterizzazione del terreno tramite prove geotecniche di laboratorio.

Su tutti i campioni sono state eseguite analisi granulometriche e sono stati determinati i limiti di consistenza, allo scopo di ottenere una prima classificazione basata sulle proprietà indice di questi ultimi, e successivamente sono stati determinati i parametri drenati di resistenza al taglio residua di uno dei campioni mediante l'esecuzione di una prova di taglio anulare.

La fase finale del lavoro è consistita nell'elaborazione ed interpretazione dei dati derivati sia dalle prove in sito sia dalle prove di laboratorio.

Obiettivo primario del lavoro è la misura della resistenza residua dei terreni argillosi interessati dai movimenti gravitativi e la sua interpretazione, in rapporto alle proprietà indice del terreno, avvenuta grazie ad un confronto con le principali correlazioni esistenti in letteratura.

## **1. RESISTENZA AL TAGLIO RESIDUA DEI TERRENI**

### ***1.1 Introduzione***

Lo studio della resistenza al taglio residua dei terreni, in condizioni drenate, e dei fattori dai quali essa dipende, è una tematica di cui si sono occupati negli ultimi decenni diversi autori.

Quando un terreno è sottoposto a deformazione di taglio, la resistenza disponibile varia ed è possibile individuare tre stadi successivi al procedere della deformazione. Inizialmente si riscontra per basse deformazioni un aumento notevole della resistenza al taglio mobilizzata, fino al raggiungimento di un valore massimo (resistenza di picco).

Il momento di picco è definito dalla plasticizzazione del terreno, dopo la quale si ha una rapida riduzione della resistenza disponibile (momento di stato critico).

Successivamente, se il processo di taglio procede a lungo, per notevoli scorrimenti presso il piano di taglio si riscontra in alcuni tipi di terreno un'ulteriore riduzione della resistenza disponibile, fino al raggiungimento di un valore minimo costante corrispondente alla resistenza residua.

L'instaurarsi di tale condizione è riconducibile al riorientamento delle particelle piatte del terreno presso la superficie di taglio, e all'annullamento di qualsiasi forza di coesione interparticellare (Stark *et al.*, 2005): i parametri di resistenza residua sono pertanto indipendenti dalla storia tensionale del deposito, e sono influenzati unicamente dalle proprietà intrinseche del terreno.

Tuttavia, spesso i risultati sperimentali mostrano, se si interpretano i dati con un criterio di rottura lineare, un valore di coesione apparente diverso da zero: ciò può essere attribuito al fatto che a basse tensioni verticali efficaci l'involuppo di rottura assume un certo grado di non-linearità (Lo Presti & Froio, 2004).

Lo studio della resistenza residua, e delle relazioni tra essa e i principali fattori che la influenzano, è di fondamentale importanza se viene applicato a problematiche di tipo pratico di vario genere, per lo più riconducibili a fenomeni di instabilità di versanti che presentano superfici di discontinuità presso le quali si è verificato uno scorrimento notevole nel tempo.

Di seguito vengono quindi esaminate, su base dello stato attuale delle conoscenze, le modalità con cui la resistenza residua dei terreni viene influenzata dai principali fattori di controllo.

### ***1.2 Influenza delle proprietà indice dei terreni***

In letteratura è largamente riconosciuto il legame tra le proprietà indice dei terreni e le caratteristiche di resistenza al taglio residua.

In primo luogo, queste ultime, sono controllate dalla frazione argillosa (CF) e dai valori dei limiti di Atterberg relativi al terreno: la prima quantifica l'abbondanza percentuale di particelle di terreno con diametro inferiore ai 0,002 mm, mentre i limiti di consistenza dipendono essenzialmente dalla stessa CF e dal grado di attività delle particelle argillose presenti nel terreno.

Tali proprietà influenzano i parametri di resistenza residua secondo un rapporto di proporzionalità inversa: all'aumentare dei valori della frazione argillosa e dei limiti di consistenza si riscontra una riduzione dell'angolo d'attrito residuo (Lupini *et al.*, 1981; Skempton, 1985; Stark & Eid, 1994; Stark & Eid, 1997).

E' dimostrato come per valori molto bassi di frazione argillosa ( $CF\% < 20$ ) l'angolo d'attrito residuo di un terreno fine sia molto simile a quello di una sabbia, per il fatto che in tali condizioni le resistenze residue sono controllate dalle particelle limoso-sabbiose subsferiche, mentre per alte percentuali di frazione argillosa si abbiano valori di  $\phi'_r$  molto bassi controllati unicamente dall'attrito che agisce tra le particelle argillose di forma piatta (Skempton, 1985) (Fig. 1).

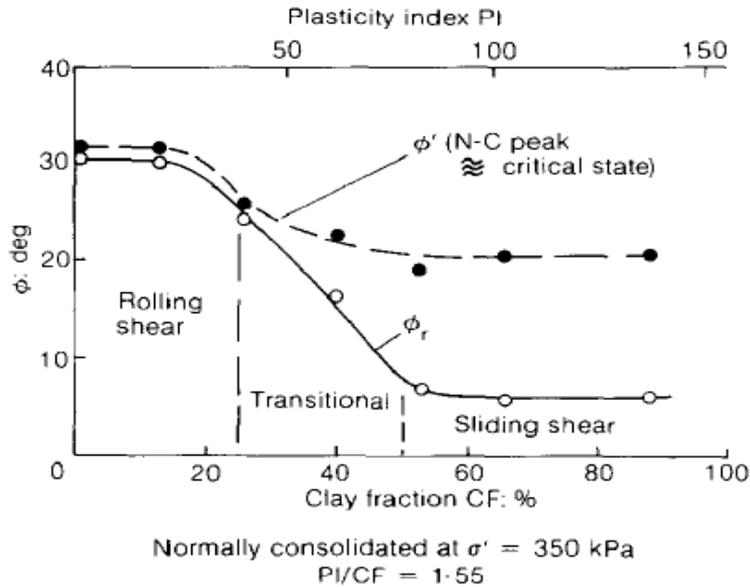


Fig. 1: Relazione tra l'angolo d'attrito residuo e la frazione argillosa (Skempton, 1985).

Un'ulteriore fattore di controllo che gioca un ruolo fondamentale nel determinare i parametri di resistenza residua di un terreno consiste nell'indice plastico (IP). Tale parametro corrisponde alla differenza tra il valore del limite liquido (LL) e il valore del limite plastico (LP) del terreno, quantificandone dunque la capacità delle particelle argillose di assorbire acqua.

La tendenza generale consiste in una riduzione dei valori dell'angolo d'attrito residuo in relazione all'incremento del valore dell'indice plastico del terreno: questa relazione determina variazioni notevoli di  $\phi'_r$  nel range  $0 < IP < 60$ , mentre l'influenza di tale parametro risulta minima nel range  $IP > 60$  (Lupini *et al.*, 1981; Bellino & Maugeri, 1985) (Fig. 2).

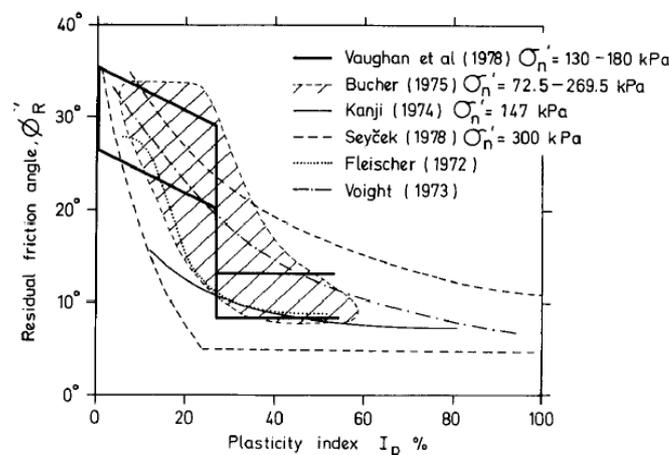


Fig. 2: relazione tra l'angolo d'attrito residuo e l'indice di plasticità (Lupini *et al.*, 1981).

Un parametro di grande importanza, in stretta relazione con la frazione argillosa, nel governare il comportamento del terreno in condizioni di scorrimenti prolungati nel tempo, consiste nella forma delle particelle del terreno.

Infatti, le condizioni residue vengono raggiunte solamente quando, per scorrimenti significativi, ha luogo presso la zona di taglio il riorientamento delle particelle di forma piatta parallelamente alla superficie di scorrimento.

Lupini *et al.* (1981) mettono in luce come il rapporto tra la percentuale di particelle di forma piatta e la percentuale di particelle di forma sferica presenti in un terreno influenzi il meccanismo di taglio che si sviluppa in esso.

Viene dimostrato dagli autori come il processo di taglio, ad elevate deformazioni, avvenga con carattere turbolento (“*turbolent shear*”) in terreni con maggiore percentuale di particelle di forma subsferica o di forma piatta caratterizzate da forte attrito interparticellare<sup>1</sup>, e per scivolamento (“*sliding shear*”) quando prevale la frazione argillosa (ovvero per valori di  $CF > 50\%$ ). Nel primo caso l'angolo d'attrito residuo assume valori maggiori e risulta coincidere con quello di stato critico, influenzato solamente dalla forma delle particelle e dalla struttura del terreno. Nel secondo caso invece raggiunge gradualmente un valore minimo controllato unicamente dalla mineralogia delle particelle e dalle forze di attrito che agiscono tra di esse.

### **1.3 Influenza della velocità di spostamento**

Come dimostrato da più autori, un parametro che può influire sulla resistenza mobilizzabile in un terreno in condizioni residue consiste nella velocità con cui avviene il processo di taglio.

Un fattore limitante nello studio dell'effetto di tale parametro consiste nel fatto che le prove di laboratorio per la determinazione dei parametri di resistenza residua non prevedono la misurazione delle sovrappressioni interstiziali che si generano durante lo scorrimento. Pertanto, affinché siano garantite le condizioni drenate, il campo di velocità di scorrimento indagabile è relativamente ristretto e comprende solo valori di velocità sufficientemente bassi.

Tuttavia sono numerosi gli autori che hanno tentato di spiegare le relazioni tra i parametri di resistenza residua e la velocità con cui avviene lo scorrimento durante il processo di taglio.

Si riscontrano tre tipologie di effetto della velocità di spostamento sulla resistenza residua: positivo, negativo e neutro in funzione del tipo di meccanismo di taglio che si innesca.

I terreni nei quali si genera un meccanismo di taglio “turbolento” presentano un effetto positivo della velocità di spostamento, ovvero un incremento della resistenza residua in funzione di velocità maggiori.

Al contrario, nei terreni in cui il meccanismo di taglio è controllato dalle particelle argillose di forma piatta, che si orientano parallelamente alla superficie di taglio per elevati scorrimenti, la resistenza residua diminuisce all'aumentare della velocità di spostamento (effetto negativo) (Tika *et al.*, 1996; Kimura *et al.*, 2014).

Tale effetto negativo viene interpretato dagli autori come conseguenza dell'incremento dell'indice dei vuoti, nonché del contenuto d'acqua, presso il piano di taglio. È chiaro dunque come, affinché possa manifestarsi una riduzione di resistenza residua all'aumentare della velocità di scorrimento, sia necessaria una certa quantità d'acqua disponibile, e libera di penetrare nel terreno<sup>2</sup>(Tika *et al.*, 1996).

---

1 Sono entrambe condizioni che inibiscono l'orientazione delle particelle presso il piano di taglio.

2 Condizione tipica di terreni fortemente sovraconsolidati, spesso caratterizzati da struttura fessurata.

Inoltre, è importante tenere in considerazione che l'effetto della velocità di scorrimento sul valore dell'angolo d'attrito residuo è dipendente anche dalla tensione normale efficace a cui è sottoposto il terreno. Le variazioni del tasso di deformazione si riflettono in modo significativo sul valore di  $\phi'_r$  soltanto per bassi valori di  $\sigma'_n$  ( $\leq 50$  kPa), a causa della maggiore facilità con cui si altera la struttura del terreno presso la superficie di taglio sotto bassi regimi di tensioni normali efficaci (Kimura *et al.*, 2014).

#### 1.4 Inviluppo di rottura residuo

Un tema piuttosto dibattuto in letteratura riguarda l'inviluppo di rottura residuo che dev'essere adottato in relazione a problematiche di tipo pratico di vario genere, per le quali è necessario prendere in esame le resistenze disponibili nel terreno in condizioni di processi di taglio prolungati nel tempo.

Un aspetto importante da tenere in considerazione, a tale proposito, consiste nella dipendenza delle resistenze residue di un terreno dalla tensione normale efficace alla quale esso è sottoposto: tale dipendenza si riflette in un certo grado di non-linearità dell'inviluppo di rottura residuo, in modo particolare nel campo delle basse tensioni normali.

Ciò può trovare spiegazione nel fatto che per bassi valori di  $\sigma'_n$  le particelle del terreno non riescono ad orientarsi perfettamente lungo il piano di rottura, presso il quale dunque lo scorrimento non avviene in modo perfettamente laminare. Mentre per alti valori di tensione normale efficace l'allineamento delle particelle avviene più facilmente e di conseguenza si riduce la resistenza residua disponibile (Stark & Eid, 1994).

Tuttavia, questo effetto si manifesta in modo significativo soltanto per bassi valori di  $\sigma'_n$ , mentre per alti valori di sforzo normale efficace l'angolo d'attrito tende a diventare costante (Tiwari *et al.*, 2005) (Fig. 3): dunque la scelta dell'inviluppo di rottura da adottare nei singoli casi di studio deve tenere in considerazione lo specifico intervallo di tensioni normali che devono essere indagate.

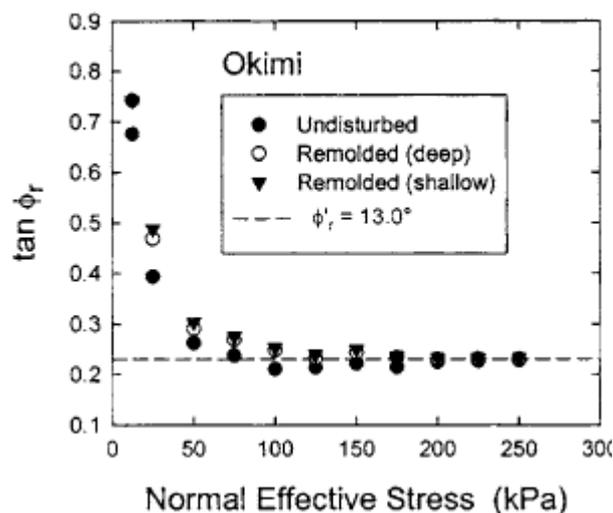


Fig. 3: Dipendenza dell'angolo d'attrito residuo dalla tensione normale efficace (Tiwari *et al.*, 2005).

### ***1.5 Metodi di caratterizzazione della resistenza residua***

La misurazione dei parametri di resistenza residua dei terreni può essere ottenuta, in laboratorio, in due modi: con una prova di taglio diretto a più cicli, ovvero effettuando ripetuti cicli di andata e ritorno dello strumento fino al raggiungimento di un valore minimo costante di resistenza, oppure con una prova di taglio anulare.

Quest'ultima consiste nell'imprimere ad un provino di forma anulare uno scorrimento rotazionale continuo e in un'unica direzione.

Il principale vantaggio, largamente riconosciuto in letteratura, dell'impiego della macchina di taglio anulare, piuttosto che la scatola di taglio diretto, nella determinazione della resistenza residua, consiste nel fatto che imprimendo uno scorrimento unidirezionale si ottiene un perfetto isorientamento delle particelle presso il piano di taglio.

Tale condizione non può essere raggiunta eseguendo una prova di taglio diretto a più cicli, la quale prevede una ripetuta inversione del verso di scorrimento, che inibisce l'orientamento delle particelle.

Ciò si riflette in parametri di resistenza residua  $\phi'_r$  e  $c'_r$  sistematicamente più alti qualora vengano stimati con prove di taglio diretto a più cicli, rispetto ai valori, più conservativi, ottenibili con prove di taglio anulare (Bellino & Maugeri, 1985; Raviolo, 1993).

L'angolo d'attrito residuo, se non viene determinato in modo diretto con prove di taglio, può essere stimato indirettamente mediante le correlazioni esistenti in letteratura. Queste ultime si basano nella maggior parte dei casi sulle proprietà indice del terreno, le quali sono il principale fattore di controllo che influenza le resistenze disponibili in condizioni residue.

## 2. AREA DI STUDIO

L'area di studio è situata al piede del versante su cui si trova l'abitato di Caminata (comune di Castel di Casio, BO), in destra idrografica del fiume Reno (Fig. 4).



Fig. 4: Foto satellitare dell'area comprendente il sito di indagine (Fonte: Google Earth).

### 2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

Secondo un inquadramento geologico a scala regionale, l'area oggetto di studio si colloca nell'Appennino settentrionale, ovvero la porzione di catena appenninica delimitata a Nord dal lineamento tettonico di Sestri-Voltaggio (che separa l'Appennino dalle Alpi liguri secondo una direzione N-S) e a Sud dal lineamento tettonico di Ancona-Anzio (che separa l'Appennino settentrionale da quello centrale, in direzione NNE-SSW).

L'Appennino settentrionale è il tipico edificio orogenico il cui stile strutturale è caratterizzato da un impilamento di falde, corrispondenti ai domini paleo-geografici che sono stati coinvolti durante il processo di orogenesi.

I terreni che costituiscono l'Appennino settentrionale appartengono principalmente a due distinti domini paleo-geografici: il dominio liguride e il dominio tosco-umbro-marchigiano.

Le unità liguridi si sono depositate dal Giurassico medio all'Eocene sui fondali dell'antico oceano Ligure-Piemontese, che si trovava tra il margine continentale Europeo e quello Adriatico-Africano, mentre le unità toscane e umbro-marchigiane sono costituite da depositi marini che si sono depositati dal Triassico al Miocene all'interno di bacini di pertinenza adriatica.

Inquadrando l'area di studio a più piccola scala, essa si colloca nell'alta valle del Reno, nell'Appennino bolognese, in un contesto geologico dominato da litologie riconducibili prevalentemente alle rocce di fondale oceanico del dominio liguride.

La maggior parte del territorio in cui si colloca l'area oggetto di studio è costituita dalla Formazione delle Argille a Palombini, facente parte della successione liguride (Fig. 5).

Tale formazione è costituita da argilliti (talvolta siltose) di colore da grigio scuro a nero, raramente con bande di colore verde o rosso, alternate a calcilutiti grigio-chiare spesso silicee (Botti *et al.*, 2011).

L'ambiente di sedimentazione è di mare profondo, e corrisponde al fondale dell'oceano Ligure-Piemontese.

L'aspetto delle Argille a Palombini è quasi sempre caotico, caratterizzato da una matrice pelitica che ingloba blocchi lapidei competenti, per lo più calcilutitici. Una simile configurazione è implicabile all'intensa tettonizzazione subita in fase orogenica, la quale ha

completamente trasposto l'originaria stratificazione (Botti *et al.*, 2011).

La matrice fine di queste argilliti ha una struttura che è molto spesso caratterizzata da una scagliosità pervasiva, anch'essa dovuta alle forti spinte tettoniche che hanno agito.

Spesso si trovano all'interno della formazione delle porzioni di rocce ofiolitiche (da gabbri, a serpentinitiche, a basaltiche) di fondale oceanico, separate dagli altri litotipi da contatti meccanici: nell'area di studio è presente un affioramento di gabbri a circa 600m a SE dall'abitato di Caminata.

L'età della formazione delle Argille a Palombini risale al Cretaceo inferiore (Botti *et al.*, 2011).



Fig. 5: Stralcio della Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna in scala 1:10.000 (Fonte: sito web della Regione Emilia-Romagna - sezione 251040).

Dal punto di vista geomorfologico l'area in esame si colloca in un contesto dominato dai rilievi dell'Appennino Bolognese, i quali nelle vicinanze del sito che è stato oggetto di studio raggiungono quote di 800-1000 metri.

I rilievi presentano versanti caratterizzati da acclività per lo più modeste, implicabili all'alta erodibilità dei litotipi prevalentemente argillosi che sono presenti nel territorio.

L'idrografia è poco sviluppata ed è rappresentata principalmente dal fiume Reno, il quale attraversa la zona in direzione SW-NE: del resto sono presenti solo alcuni piccoli impluvi che hanno formato nel tempo delle strette incisioni sui versanti.

Al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare in un'area dominata da una litologia di tipo argilloso, non è presente alcuna morfologia calanchiva, presumibilmente a causa dell'elevata abbondanza dei blocchi lapidei competenti che sono inclusi nella matrice argillosa: carattere che contraddistingue la formazione delle Argille a Palombini (Bettelli *et al.*, 2002).

Quello che caratterizza in modo più significativo la geomorfologia dell'area di studio sono i depositi di frana, che ricoprono vaste aree della superficie del territorio, determinando sui versanti una morfologia caratterizzata da dossi e contropendenze.

Le frane rappresentate nelle carta geologica della Regione Emilia-Romagna sono riconducibili a tre tipologie (Fig. 5):

- Frane per colamento di fango
- Frane per scivolamento
- Frane complesse

Le frane complesse sono certamente le più frequenti e rappresentate nell'area in esame, e consistono in depositi derivanti da fenomeni franosi che sono avvenuti secondo una combinazione di più meccanismi di movimento.

L'elevata franosità della zona è imputabile principalmente alle litologie maggiormente affioranti. Infatti le formazioni che costituiscono il substrato sono caratterizzate da litotipi argillitici la cui struttura è quasi sempre interessata in modo pervasivo da superfici di discontinuità, generatesi durante la loro storia geologica.

Tali discontinuità strutturali favoriscono nel tempo l'instaurarsi di una permeabilità secondaria che facilita l'infiltrazione d'acqua e la conseguente instabilità dei versanti (Bettelli *et al.*, 2002).

## ***2.2 Contestualizzazione delle indagini***

Le indagini geognostiche eseguite in sito, che sono state seguite per la realizzazione del presente lavoro, consistono in due prove di carotaggio continuo (S1 ed S2 in Fig. 6).

Esse sono state realizzate entrambe al piede del versante, potenzialmente instabile, sul quale si trova l'abitato di Caminata, e a monte della linea ferroviaria passante tra l'alveo del fiume Reno e il versante stesso (Fig. 6).

Sulla Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna (Fig. 5), presso il versante in esame è cartografato un deposito di frana complessa quiescente di notevoli dimensioni, che si estende dal crinale al piede del pendio. Nonostante nella sezione riportata in fig. 5 non sia presente, nella Carta Geologica consultabile sul servizio di "web-gis" della Regione Emilia-Romagna una parte del versante è indicata come frana complessa attiva (per un'area che ricopre una superficie di circa 0,1 km<sup>2</sup>, comprendente l'abitato di Caminata ed estesa fino i punti in cui sono state eseguite le indagini) (Fig. 6.1).

Dal punto di vista strettamente litologico, il versante oggetto di studio si colloca all'interno

dell'area occupata dai terreni appartenenti alla formazione delle Argille a Palombini. Le prove di sondaggio sono state eseguite in quanto i binari ferroviari, vicini al piede del versante, sono soggetti ad una continua deformazione che ne provoca un dislocamento, ed è necessario dunque ricercare la causa del fenomeno. A questo scopo sono stati installati nei fori di sondaggio, al termine delle operazioni di perforazione, dei tubi inclinometrici, grazie ai quali si potrà stabilire se la causa della deformazione dei binari risieda nell'instabilità del versante oppure nell'azione erosiva operata a valle dal fiume.

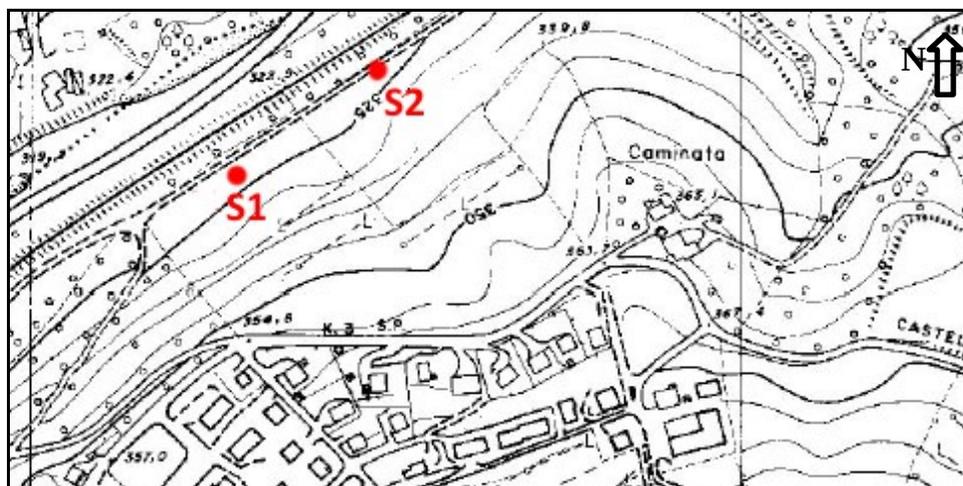


Fig. 6: Stralcio della Carta Tecnica-Topografica Regionale, in scala 1:5000. In rosso vengono ubicati i sondaggi S1 ed S2 (Fonte: Geoportale online della Regione Emilia-Romagna).

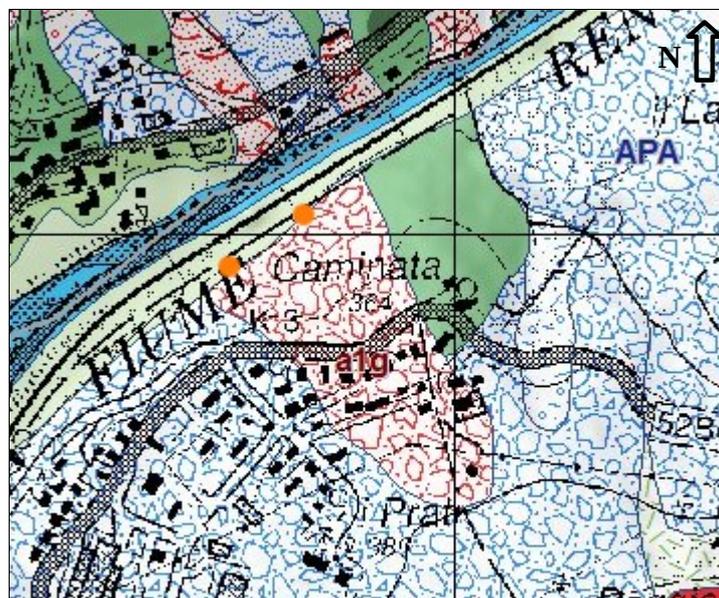


Fig. 6.1: Stralcio della carta geologica consultabile online sul sito della R.E.R. (Per la legenda fare riferimento alla Fig. 6)

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Perforazioni a carotaggio continuo

Le operazioni di sondaggio si sono svolte per mezzo di una perforatrice idraulica montata su un mezzo cingolato di ridotte dimensioni. La perforazione è avvenuta secondo infissione, in serie, di aste cave di 3 m di lunghezza, con impiego di acqua come fluido di perforazione. Il carotiere utilizzato è di tipo semplice con diametro di 101 mm e l'estrazione, a termine manovra, delle carote di terreno da esso isolate è avvenuta mediante iniezione di acqua in pressione.

L'umidità naturale del terreno non è stata dunque preservata, sia per l'utilizzo di acqua come fluido di perforazione sia per l'estrazione delle carote mediante acqua in pressione.

La stabilizzazione del foro di sondaggio è stata ottenuta mediante l'infissione in corso d'opera di una batteria di tubi di rivestimento, con lo scopo di impedire il collasso delle pareti del foro<sup>3</sup>.



Fig. 7: Perforatrice utilizzata per eseguire le prove di sondaggio in sito.

La profondità indagata è di 20 m in entrambi i sondaggi S1 ed S2, e le carote di terreno estratte sono state riposte in opportune cassette catalogatrici.

La descrizione delle carote di sondaggio è stata fatta dopo pochi minuti dalla loro estrazione, secondo una descrizione obiettiva dei seguenti parametri del terreno:

- Caratteristiche tessiturali
- Eventuale presenza di materia organica
- Colore (descritto in condizioni umide delle carote)
- Caratteristiche strutturali
- Eventuale presenza di cementazione
- Consistenza del terreno
- Eventuale presenza di clasti
- Forma, dimensioni e natura dei clasti
- Plasticità

---

3 Il collasso, delle pareti del foro, che si verificherebbe senza un'opportuna stabilizzazione, risulterebbe dall'annullamento della tensione orizzontale e conseguente incremento esponenziale dello sforzo deviatorico.

Inoltre sono stati prelevati complessivamente cinque campioni, due nel primo sondaggio (S1C1 ed S1C2) e tre nel secondo sondaggio (S2C1, S2C2, ed S2C3), al fine di effettuare su di essi prove di laboratorio per caratterizzarne il terreno.

<b>Campione</b>	<b>Profondità (m)</b>
S1C1	2,10 – 2,60
S1C2	12,30 – 12,80
S2C1	8,00 – 8,30
S2C2	12,30 – 12,80
S2C3	14,30 – 14,70

Fig. 8: Profondità corrispondenti ai campioni prelevati dalle carote di sondaggio.

I campioni prelevati sono corrispondenti a tratti di carote di sondaggio: si tratta dunque di campioni disturbati, sia nella struttura del terreno sia nella sua umidità, a causa delle operazioni di perforazione e di estrazione delle carote dal carotiere.

### **3.2 Prove di laboratorio**

Su tutti i cinque campioni di terreno prelevati, sono state eseguite prove di laboratorio per la caratterizzazione della granulometria e dei limiti di consistenza, in aggiunta alle quali è stata eseguita sul campione S2C1 una prova di taglio anulare, per determinarne i parametri drenati di resistenza residua.

#### *3.2.1 Preparazione dei campioni*

Prima di qualsiasi prova di laboratorio è stata necessaria una fase di preparazione del materiale finalizzata alla disgregazione delle particelle di terreno, che altrimenti formerebbero degli aggregati i quali si comporterebbero come clasti o particelle di dimensioni maggiori di quelle reali, alterando così le proprietà fisiche e granulometriche dei campioni da caratterizzare.

A questo scopo è stato innanzitutto disgregato il terreno, fino ad ottenere un materiale costituito da “frammenti” di dimensioni di circa 1-2 cm, mediante l'impiego di una spatola. Successivamente il materiale è stato essiccato in forno per 24h ad una temperatura di 60°C, per poi eseguire su di esso un'ulteriore operazione di disgregazione per via meccanica, con l'utilizzo di pestello e mattarello.

Al termine delle fasi di disgregazione, il terreno è stato fatto passare al setaccio 40 (corrispondente ad un'apertura delle maglie di 0,425mm), al quale è risultato passante per il 100%: le successive prove di laboratorio sono state svolte dunque sul materiale così preparato.

Nel corso della procedura finora descritta, sono stati scartati dal materiale eventuali clasti presenti all'interno della matrice pelitica, in quanto la loro presenza non si considera significativa nel determinare il comportamento del terreno che si vuole caratterizzare.

#### *3.2.2 Determinazione dei Limiti di Atterberg*

Per ogni campione sono stati determinati il limite liquido (LL) e il limite plastico (LP) sul materiale disgregato e passante al setaccio 40, allo scopo di caratterizzare il

comportamento dei minerali argillosi del terreno in relazione alla loro capacità di assorbire acqua.

La determinazione del limite liquido relativo ai cinque campioni è stata ottenuta tramite l'apparecchio di Casagrande.

Ad ogni campione è stata aggiunta acqua distillata, al materiale precedentemente essiccato e disgregato, fino al raggiungimento di un contenuto d'acqua leggermente superiore al limite liquido.

Sul terreno, una volta posto nel cucchiaio di Casagrande, è stato fatto un solco perpendicolarmente al piano orizzontale. Si è poi determinato il numero di colpi impressi dallo strumento necessari alla chiusura del solco per un tratto di 13 mm di lunghezza, e il corrispondente contenuto d'acqua (pesando parte del materiale utilizzato sia subito dopo la prova sia dopo un periodo di essiccamento in forno per 24h).

Lo stesso procedimento è stato ripetuto più volte a differenti contenuti d'acqua (w%), fino ad ottenere tre valori di w% corrispondenti a tre numeri di colpi, non troppo distanti da  $n^{\circ}=25$  (l'intervallo di accettabilità dei dati che è stato considerato è  $10 < n^{\circ} \text{colpi} < 40$ ).

Il limite liquido di ogni campione (definito come il contenuto d'acqua corrispondente alla condizione di chiusura del solco, per un tratto di 13mm, per 25 colpi) è stato dunque determinato secondo un'interpolazione lineare delle tre misure, riportate in un diagramma semilogaritmico che mette in relazione  $n^{\circ}$ colpi e w%.

Per la determinazione del limite plastico è stata aggiunta acqua distillata, al materiale essiccato e disgregato in fase di preparazione, fino al raggiungimento di un contenuto d'acqua di poco superiore al limite plastico.

Quindi sono state formate delle “sfere” di terreno del peso di circa 40 g ognuna, e sono state fatte progressivamente asciugare secondo un moto di rotolamento su una piastra di vetro. Al raggiungimento della condizione per la quale un cilindretto di terreno del diametro di 3mm si fessurasse, si è pesato quest'ultimo prima a umido poi a secco (dopo una fase di essiccamento di 24h in forno) per determinarne il contenuto d'acqua.

Su ogni campione è stato eseguito tale procedimento per tre differenti “sfere” di terreno, facendo in seguito la media (corrispondente al limite plastico) tra i valori di w% ottenuti.

### 3.2.3 Analisi granulometriche

Le analisi granulometriche sono avvenute in due fasi: una prima fase di setacciatura per via umida (in Fig. sono riportati i setacci utilizzati), e una seconda fase di analisi per sedimentazione sul materiale fine ( $D < 0,075\text{mm}$ ).

Entrambe le procedure hanno lo scopo di suddividere il terreno analizzato in più classi granulometriche, alle quali attribuire i corrispondenti valori percentuali (in peso) riferiti al peso totale del materiale utilizzato per la prova (Raviolo, 1993).

<b>N° setaccio</b>	<b>Apertura maglie (mm)</b>
40	0,42
80	0,18
200	0,08

Fig. 9: Setacci utilizzati per la setacciatura a umido, e relativi valori di apertura delle maglie.

Per la setacciatura a umido si è pesato per ogni campione un quantitativo di circa 200g di materiale, messo successivamente in un recipiente con aggiunta di acqua fino al riempimento, agitato e poi lasciato riposare per 24h (in modo che le particelle di terreno assorbissero acqua e fossero eliminati quindi eventuali aggregati).

Successivamente il terreno è stato passato, con ausilio di acqua corrente, sui setacci 40, 80 e 200, raccogliendo la frazione fine passante all'ultimo setaccio ( $D < 0,075\text{mm}$ ) destinata all'analisi per sedimentazione.

Al termine della setacciatura sono state pesate (dopo una fase di essiccamento di 48 ore) le frazioni di terreno trattenute dai singoli setacci.

L'analisi granulometrica della frazione fine è stata svolta, per ogni campione, su 40g circa del materiale di diametro  $< 0,075\text{mm}$ .

Inizialmente si è eseguita la taratura della vasca termostatica in cui avviene la prova, al fine di ottenere le leggi che descrivono la dipendenza della densità dalle variazioni di temperatura, e quindi la determinazione delle correzioni da fare alle successive misure in relazione all'effetto della temperatura e del dispersivo utilizzato<sup>4</sup>.

Successivamente si sono aggiunti 125g di soluzione di esametafosfato di sodio (il dispersivo impiegato) al terreno di ognuno dei cinque campioni, che è stato poi agitato e lasciato riposare per 16 ore.

Sono stati quindi introdotti i materiali nei cilindri di sedimentazione, e questi ultimi nella vasca termostatica, nella quale è avvenuta la prova vera e propria: per ogni campione è stata misurata la densità (sono state fatte 12 letture complessivamente), per mezzo di un densimetro, ad intervalli di tempo prestabiliti.



Fig. 10: Vasca termostatica contenente i cilindri di sedimentazione.

L'elaborazione dei dati ricavati dalle prove di sedimentazione consiste nella derivazione, per ogni lettura di densità, di un valore di diametro (relativo all'apertura delle maglie dell'ideale setaccio), e del corrispondente valore percentuale di terreno passante.

Il calcolo dei diametri si è basato sulla legge di Stokes (1880), che mette in relazione la velocità di caduta delle particelle in un fluido con il loro peso specifico, il loro diametro, la viscosità dinamica del fluido, e la densità del fluido.

Infine per ogni campione sono state rapportate le percentuali, ottenute sui 40g di terreno utilizzato per la prova, al peso secco totale del materiale passante al setaccio 200 in fase di setacciatura a umido.

<sup>4</sup> Il dispersivo ha la funzione di favorire la dispersione delle particelle di terreno nel fluido.

### 3.2.4 Prove di taglio anulare

Per la determinazione della resistenza al taglio residua del campione S2C1 è stata eseguita una prova di taglio anulare su tre provini, consolidati a differenti tensioni normali efficaci, al fine di ottenere il relativo valore dell'angolo d'attrito residuo.

La cella di taglio che ha ospitato i tre provini (di forma anulare) è costituita da due parti separate: una inferiore solidale alla tavola girevole della macchina, la quale le imprime un moto rotatorio a velocità costante prestabilita, e una superiore che durante le prove rimane fissa.

In questo modo, la macchina misura tramite appositi sensori la coppia torcente necessaria a contrastare la resistenza al taglio mobilizzata nel terreno durante la rotazione della tavola girevole.

Caratteristiche del provino (di forma anulare)	
Altezza	20 mm
Diametro esterno	100 mm
Diametro interno	70 mm
Raggio medio	42,5 mm

Fig. 11: Caratteristiche geometriche dei provini sui quali si effettua la prova di taglio anulare.

Per la preparazione dei provini, è stata aggiunta acqua al materiale passante al setaccio 40 (corrispondente al 100% del terreno del campione), precedentemente disgregato, fino al raggiungimento di una consistenza indicativa di un contenuto d'acqua leggermente inferiore al limite liquido.



Fig. 12: A sinistra, la scatola di taglio che accoglie il provino; A destra, la tavola girevole con il pressore applicato su di essa.

Si è dunque posta la scatola di taglio, contenente il provino, sulla tavola girevole della macchina, applicando la tensione normale<sup>5</sup> (mediante un pressore regolato con immissione di aria compressa) e dando inizio dunque alla fase di consolidazione. Durante quest'ultima si è mantenuto, nella cella contenente la scatola di taglio, un livello dell'acqua costante

<sup>5</sup> Tensione applicata in direzione verticale, ovvero ortogonalmente al piano di rottura che si genera nel provino durante la fase di taglio.

superiore all'altezza del provino, garantendone in tal modo la saturazione.

I tre provini sono stati consolidati, rispettivamente, alle pressioni normali di 100 kPa, 200 kPa, e 300 kPa, al fine di indagare un range di  $\sigma'_v$ , nonché di profondità, rappresentativo per la problematica in esame, se si ipotizza che la superficie di scorrimento responsabile dell'instabilità del versante in sito si trovi tra i 10 e i 30 m di profondità dal piano campagna.

Per ogni provino la consolidazione è avvenuta per incrementi di carico successivi (Fig. 12), al fine di evitare l'estrusione parziale del materiale dalle fessure della scatola di taglio, che risulterebbe inevitabile applicando direttamente il carico finale di consolidazione.

I gradini di carico applicati sono, per i tre provini, i seguenti:

Provino 1	25 kPa	50 kPa	100 kPa	-
Provino 2	25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa
Provino 3	37 kPa	75 kPa	150 kPa	300 kPa

Fig. 12: Gradini di carico applicati nelle fasi di consolidazione.

Durante le fasi di consolidazione i dati sono stati acquisiti sottoforma di abbassamenti verticali (Nanometri) in funzione del tempo (Secondi) e della pressione verticale applicata (kPa).

Al termine della consolidazione è stata avviata la fase di taglio, ad una velocità costante di 0,006 °/min, sufficientemente bassa da garantire la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali. Infatti queste ultime impedirebbero l'interpretazione dei risultati della prova in tensioni efficaci, a causa dell'impossibilità nella misura delle  $\Delta u$  con la macchina di taglio anulare.

Durante le fasi di taglio è stata registrata la variazione di momento torcente applicato dalla macchina (N/m) in funzione del tempo (Secondi), con un rilievo costante della pressione normale (kPa) e degli abbassamenti verticali (Nanometri).

Per ogni provino lo scorrimento si è fatto procedere fino al raggiungimento della condizione in cui il momento torcente, applicato dalla macchina, risultasse costante nel tempo, e coincidesse dunque con la resistenza al taglio residua del terreno.

Anche durante il processo di taglio, come per la fase di consolidazione, è stato mantenuto un livello dell'acqua superiore all'altezza del provino, per garantire la saturazione costante del terreno.

## 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

### 4.1 Stratigrafie

Di seguito vengono riportate le foto delle carote di terreno estratte durante le due prove di sondaggio S1 e S2, e i relativi profili stratigrafici (Fig. 13, 14, 15, 16).

<i>Prof. (m)</i>	<i>Descrizione del terreno</i>	<i>Campioni</i>
<b>0 – 2,6</b>	Argilla limosa, debolmente sabbiosa, con contenuto in sabbia che aumenta localmente, di media plasticità. Il colore è grigio nocciola e la consistenza da soffice a soda. Localmente si rinviene materia organica. Sono presenti clasti in abbondanza, inglobati nella matrice argillosa con distribuzione casuale, di dimensioni da millimetriche fino al centimetro, la cui natura è arenacea/calcareo (talvolta serpentinitica). La forma dei clasti è subangolare.	<i>SIC1</i> (2,10 – 2,60m)
<b>2,6 – 3,3</b>	Blocco lapideo corrispondente ad una calcarenite a grana grossa, di colore grigio.	
<b>3,3 – 4,8</b>	Argilla limosa, debolmente sabbiosa, di colore grigio ocraceo fino a 3,8m e grigio da 3,8m a 4,8m. La consistenza è soda e la plasticità media. Non si riconosce una struttura organizzata, ma una matrice argillosa che ingloba clasti subangolari siltitico/calcarei di dimensioni da millimetriche fino a 3 cm di diametro.	
<b>4,8 – 5</b>	Argilla limosa di colore grigio scuro, di consistenza compatta, che presenta a tratti una struttura scagliosa. Sono presenti clasti litici, a distribuzione casuale nella matrice argillosa, da millimetrici a centimetrici, subangolari. La natura dei clasti è siltitico/calcareo.	
<b>5 – 5,5</b>	Campione indisturbato prelevato (SoGeo Srl).	
<b>5,5 – 7,7</b>	Argilla limosa debolmente sabbiosa, di colore grigio scuro, di consistenza soda e media plasticità. L'aspetto è caotico, senza alcuna struttura riconoscibile. Sono presenti clasti, in quantità ridotta, di dimensioni da millimetriche fino a 2cm, di natura siltitico/arenacea/selcifera. La forma dei clasti è subangolare, e la loro distribuzione è casuale all'interno della matrice.	
<b>7,7 – 20</b>	Argilliti con limo, con componente marnosa variabile, di colore grigio scuro, a tratti più chiaro, con locali sfumature verdastre. La consistenza è compatta fino a 10,7m e poi molto compatta, e la plasticità è bassa. È presente una struttura scagliosa pervasiva, con scaglie di dimensioni centimetriche (1-3 cm). Sono presenti pochi clasti, di forma subangolare e dimensioni millimetriche. Da 9,80 a 9,90 m è presente un blocco calcarenitico, a grana medio/grossa, di colore grigio chiaro. Da 18,30 a 18,50 m è presente un blocco litoide di natura calcarea a grana fine, di colore grigio molto chiaro (tendente al bianco), con vene calcitiche di spessore compreso tra 1 e 5 mm. Da 8,20 a 8,70 m vi è un tratto di carota mancante corrispondente al campione indisturbato prelevato (Sogeo Srl).	<i>SIC2</i> (12,3-12,8m)

Fig. 13: Profilo stratigrafico relativo al sondaggio S1.



Fig. 14: Fotografie delle carote di terreno estratte dal sondaggio S1. Ogni cassetta catalogatrice contiene 5m di terreno (profondità crescenti dalla prima foto, in alto, all'ultima foto, in basso).

<i>Prof. (m)</i>	<i>Descrizione del terreno</i>	<i>Campioni</i>
<b>0 – 1,6</b>	Argilla debolmente limosa debolmente sabbiosa, di colore marrone chiaro / ocra, di consistenza soda e bassa plasticità. Di frequente si rinviene materia organica, di colore nero e struttura fibrosa. L'aspetto è complessivamente caotico, senza alcuna organizzazione strutturale. Sono presenti nella matrice argillosa clasti di dimensioni centimetriche (1 – 3 cm) di forma subangolare. La natura dei clasti è arenacea e presentano un colore giallo dovuto all'alterazione.	
<b>1,6 – 1,8</b>	Blocco lapideo calcarenitico, a grana grossa, di colore grigio chiaro.	
<b>1,8 – 10,7</b>	Argilla con limo debolmente marnosa, con una piccola percentuale di sabbia. Il colore è grigio molto scuro, localmente verdastro. La consistenza è variabile, da compatta a molto compatta, secondo intervalli decimetrici, e la plasticità è bassa. La struttura presenta una matrice priva di organizzazione, che ingloba clasti di dimensioni centimetriche, subangolari, prevalentemente arenacei e serpentinitici. Si rinvencono a 8m calcinelli carbonatici, di dimensioni <1cm e colore bianco lattiginoso. A 4,0 – 4,10 m è presente un blocco lapideo, costituito da una calcarenite a grana fine di colore grigio chiaro, con sottili venature calcitiche di colore bianco. A 7,0 – 7,5 m vi è un tratto di carota mancante corrispondente al campione indisturbato prelevato (Sogeo Srl).	<b>S2C1</b> <b>(8,0 – 8,30 m)</b>
<b>10,7 – 20,0</b>	Argilliti con limo marnose, con percentuale di componente carbonatica variabile, di colore grigio (localmente con sfumature di colore verde scuro) e di consistenza molto compatta. La struttura appare pervasivamente scagliosa, con scaglie di dimensione di circa 3 cm. Vi è una percentuale molto ridotta di clasti, che hanno dimensioni per lo più millimetriche e forma subangolare. A 13,5 – 14,8 si nota una maggiore abbondanza di clasti, prevalentemente calcarei a grana fine, che hanno dimensioni anche fino ai 3 cm e forma subangolare.	<b>S2C2</b> <b>(12,3 – 12,8 m)</b>  <b>S2C3</b> <b>(14,3 – 14,7 m)</b>

Fig. 15: Profilo stratigrafico relativo al sondaggio S2.



Fig. 16: Fotografie delle carote di terreno estratte dal sondaggio S2. Ogni cassetta catalogatrice contiene 5m di terreno (profondità crescenti dalla prima foto, in alto, all'ultima foto, in basso).

Dalle prove di sondaggio continuo S1 e S2 non sono emerse differenze significative nei profili stratigrafici ottenuti, ad indicare la continuità laterale litostratigrafica che caratterizza la zona al piede del versante in sito: per entrambi i sondaggi dunque il profilo può essere suddiviso nei medesimi orizzonti.

In entrambe le verticali indagate i primi metri dal piano campagna sono costituiti da terreno (prevalentemente argilloso) con un evidente grado di alterazione, dovuto alla vicinanza con la superficie. La colorazione marrone – ocracea, e la presenza di materia organica e di clasti arenacei chiaramente alterati, sono i caratteri che contraddistinguono maggiormente questo primo orizzonte stratigrafico (che ha spessore di 3,8m in S1 e di 1,6m in S2).

Seguono poi, in entrambi i profili, alcuni metri di terreno caratterizzato nel complesso da un aspetto caotico, corrispondente ad una matrice argillosa priva di ordine strutturale e inglobante clasti distribuiti in essa in modo casuale.

Questo secondo orizzonte (la cui base si trova a 7,70m in S1 e a 10,70m in S2) insiste su un litotipo argillitico-marnoso, caratterizzato da un'evidente struttura scagliosa e da una consistenza piuttosto elevata, che si estende fino a 20 metri di profondità (la massima profondità indagata) in entrambi i sondaggi.

Alcune caratteristiche si riscontrano regolarmente lungo tutto l'intervallo di profondità indagato, come la presenza in più punti di blocchi competenti calcarenitici, la litologia prevalentemente argillosa e il colore generalmente grigio scuro che localmente assume sfumature verdastre. Queste caratteristiche, insieme alla mancanza di evidenze di stratificazione, tendono ad attribuire i depositi indagati alla Formazione delle Argille a Palombini, in accordo con un contesto geologico dominato dalla presenza di queste litologie (Fig. 5).

Tuttavia si riscontra una differenza sostanziale, tra gli ultimi due degli orizzonti sopra descritti, che può assumere importanza rilevante nell'interpretazione dei profili stratigrafici. Infatti, mentre nell'orizzonte più profondo si riscontra una struttura pervasivamente scagliosa ben evidente, nei primi metri (fino a 7,70m in S1 e fino a 10,70m in S2) non vi sono evidenze di alcuna organizzazione strutturale. La causa di ciò può essere il coinvolgimento dello spessore più superficiale di terreno in processi di versante che ne hanno trasposto quasi completamente l'originaria struttura.

Secondo quest'ipotesi, dunque, l'orizzonte più profondo corrisponderebbe al substrato roccioso, delimitato al tetto da una superficie di scorrimento che si trova ad una profondità dal piano campagna di circa dieci metri. Questa interpretazione trova conferma nel fatto che non si è osservata alcuna presenza di materiale sabbioso nell'orizzonte stratigrafico più profondo, al contrario di quanto osservato nei primi due orizzonti. Infatti alla Formazione delle Argille a Palombini, alla quale sono stati attribuiti i terreni descritti, appartengono depositi di mare profondo nei quali è improbabile la presenza di sedimenti sabbiosi, se non in seguito al coinvolgimento in processi di versante.

## 4.2 Analisi granulometriche e limiti di consistenza

Dal punto di vista tessiturale sono stati ottenuti risultati molto simili per tutti i campioni analizzati, che indicano la presenza in sito di terreni prevalentemente argillosi con una significativa percentuale di frazione limosa (Fig. 17).

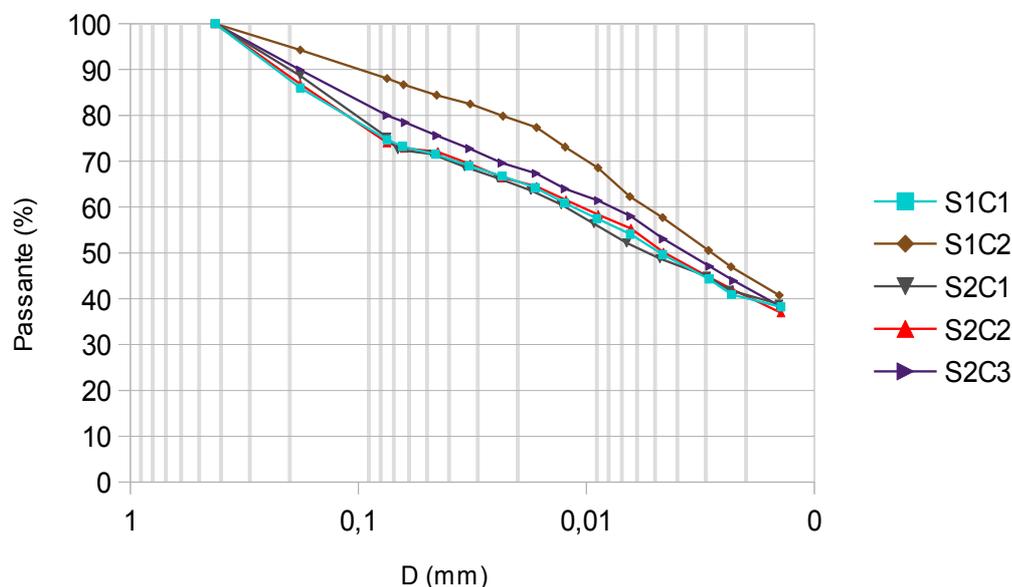


Fig. 17: Curve granulometriche dei cinque campioni analizzati.

Per quasi tutti i campioni di terreno, inoltre, è stata rilevata una frazione sabbiosa  $\geq 20\%$  (Fig. 17, 20), che non è concorde con quanto risultato dalla descrizione diretta delle carote di terreno (Fig. 13, 15), dalla quale si sono classificati i terreni generalmente come “debolmente sabbiosi”, ovvero con contenuto in frazione sabbiosa più basso. Questa evidenza è particolarmente significativa per l'orizzonte stratigrafico più profondo (7,70 – 20,0m in S1 e 10,70 – 20m in S2), nel quale dalla descrizione diretta è risultata una totale assenza di sabbia.

Il fatto che i risultati delle analisi granulometriche mostrino sistematicamente valori di frazione sabbiosa maggiori di quelli stimati qualitativamente in sito, può essere attribuito alla difficoltà di disgregazione del materiale che precede le fasi di setacciatura e di analisi per sedimentazione.

Infatti, se non vengono perfettamente separate le une dalle altre, le particelle fini del terreno formano degli aggregati che si comportano come granuli di dimensioni maggiori del reale diametro delle singole particelle, influenzando in modo significativo la granulometria che risulta dalle prove di laboratorio.

Per confermare questa ipotesi è stato osservato al microscopio ottico il materiale dei vari campioni trattenuto ai setacci 80 e 200. Quello che si è riscontrato è una totale assenza di granuli quarzoso/feldspatici, che effettivamente indicassero la presenza di sabbia, nei campioni S1C2, S2C2 ed S2C3 (i campioni più profondi), e una piccola percentuale di frazione sabbiosa nei campioni S1C1 ed S2C1 (minore comunque di quella risultante dall'analisi granulometrica).

In letteratura sono diversi gli autori che riconoscono la problematica legata alla disgregazione del materiale, soprattutto qualora si tratti di terreni fortemente sovraconsolidati che, come in questo caso, presentano una struttura pervasivamente

scagliosa caratterizzata da un alto grado di adesione delle particelle (Stark *et al.*, 2005).

In base alle considerazioni fatte, molto probabilmente sono stati sottostimati anche i valori di limite liquido e limite plastico, dunque i valori dell'indice di plasticità, che danno indicazioni sulla mineralogia del terreno.

Classificando i cinque campioni nella Carta di Casagrande, infatti, risultano tutti terreni di bassa plasticità, con contenuto variabile in argilla e limo e con una componente sabbiosa (Fig. 19).

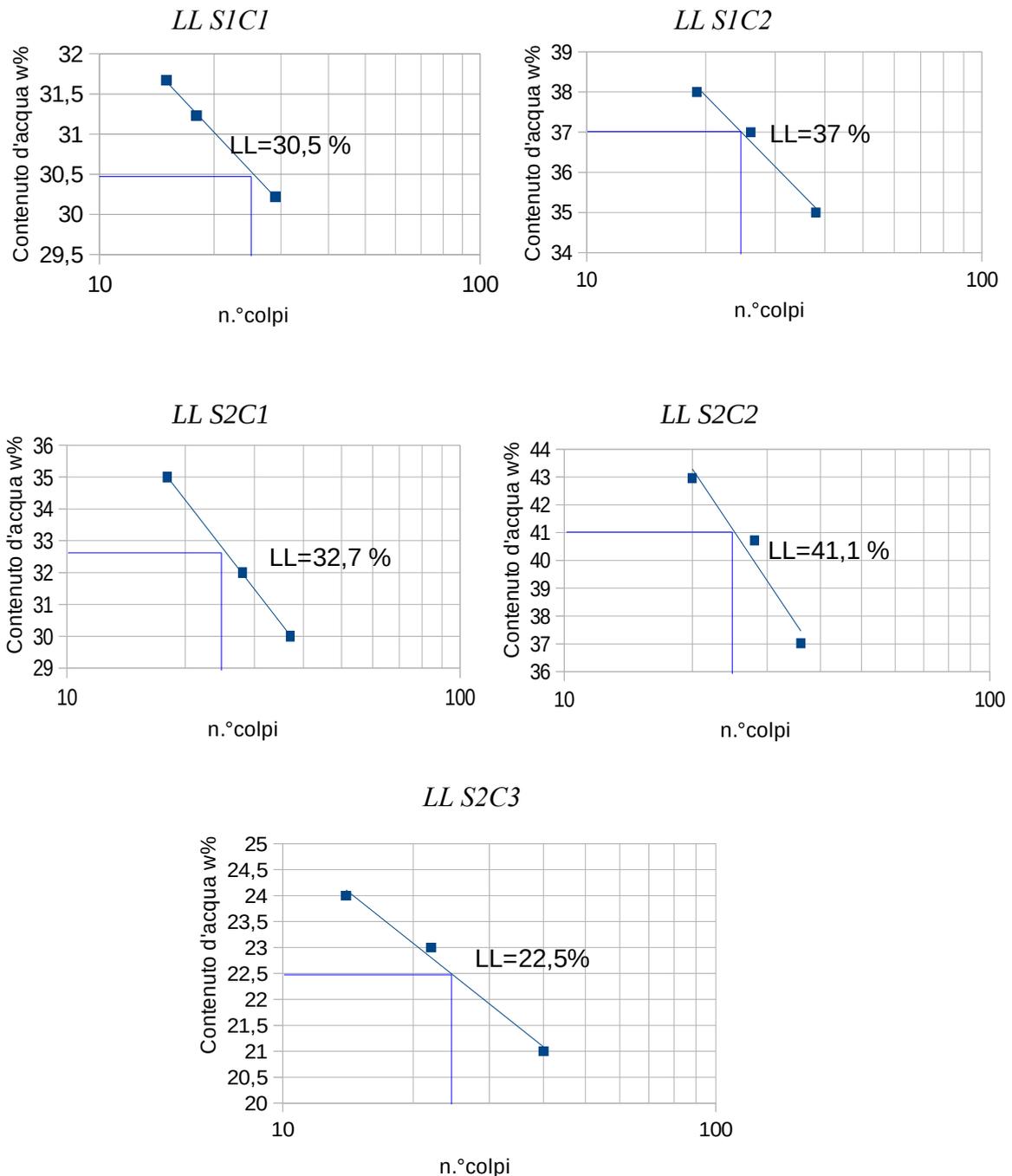
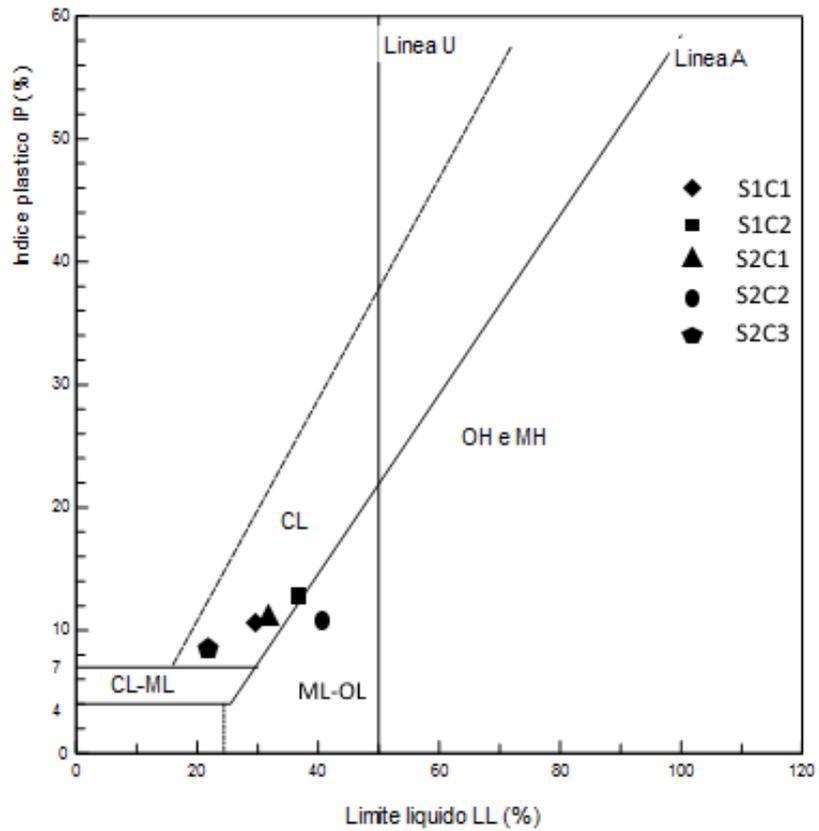


Fig. 18: Grafici relativi alla determinazione dei valori percentuali di limite liquido.



ML	Limi inorganici e sabbie fini siltose o argillose a bassa plasticità
CL	Argille inorganiche, argille sabbiose e argille limose a bassa plasticità
OL	Limi organici e argille limose organiche a bassa plasticità
MH	Limi inorganici e sabbie limose ad alta plasticità
CH	Argille inorganiche ad alta plasticità
OH	Argille e limi organici ad alta plasticità
Linea U:	limite superiore per i terreni naturali

Fig. 19: Classificazione dei campioni con la Carta di plasticità di Casagrande, in base ai valori di LL (%) e IP (%).

Campione	Prof.(m)	LL	LP	IP	CF	Limo	Sabbia	Tipologia di terreno
S1C1	2,1 – 2,6	30,5	19,1	11,4	40	34,7	25,3	Argilla con limo, con sabbia, poco plastica.
S1C2	12,3 – 12,8	37	24,3	12,7	45,5	42,5	12	Argilla con limo debolmente sabbiosa, poco plastica.
S2C1	8,0 – 8,3	32,7	21,3	11,4	41	34,2	24,8	Argilla con limo sabbiosa, poco plastica.
S2C2	12,3 – 12,8	41,1	31	10,1	40,5	33,5	26	Argilla con limo, con sabbia, poco plastica.
S2C3	14,3 – 14,7	22,5	13,9	8,6	43	37	20	Argilla con limo, sabbiosa, poco plastica.

Fig. 20: Tabella riassuntiva dei risultati relativi alle prove di laboratorio di caratterizzazione delle proprietà indice dei terreni. Sono riportati i valori percentuali dei limiti di Atterberg e delle frazioni granulometriche per ogni campione, e le relative profondità.

#### 4.3 Prove di taglio anulare

Le prove di taglio anulare sono state effettuate su tre provini del campione S2C1 (consolidati rispettivamente a 100, 200 e 300 kPa), al fine di determinarne i parametri drenati di resistenza residua.

Sono risultate delle curve sforzo/spostamento (Fig. 23) che non mostrano un incremento di resistenza al taglio mobilizzata perfettamente graduale all'avanzare dello scorrimento, come ci si aspetterebbe idealmente per provini di materiale rimaneggiato. Quello che si riscontra è invece (in particolar modo per il provino consolidato a 100 kPa) un incremento rapido della resistenza al taglio per i primi millimetri di scorrimento, e una successiva riduzione fino al raggiungimento di un valore costante corrispondente alla resistenza ultima del terreno: questi picchi “apparenti” sono probabilmente da attribuire ad un certo grado di coesione assunto dal terreno nelle fasi di consolidazione che hanno preceduto le fasi di taglio.

Inoltre si può notare un piccolo recupero di resistenza, per tutti e tre i provini, tra i 20 e i 35 mm di scorrimento circa. Questa evidenza, manifestandosi indistintamente in tutti e tre i provini, in corrispondenza della stessa entità di scorrimento compiuto, è probabilmente attribuibile maggiormente ad attriti interni alla macchina di taglio piuttosto che alla disomogeneità del terreno.

Se si trascurano questi recuperi di resistenze, la condizione di stato residuo si può considerare raggiunta ad uno scorrimento di circa 35 mm per i provini consolidati a 200 e 300 kPa, mentre per il provino consolidato a 100 kPa la resistenza si è stabilizzata su un valore minimo a soli 15 mm di scorrimento.

Inoltre, dal momento di picco allo stato residuo, si è misurato un decadimento della

resistenza residua del 15% per il provino consolidato a 100 kPa, del 10% per il provino consolidato a 200 kPa, e dell'8% per il provino consolidato a 300 kPa. Si nota quindi una perdita di resistenza, per il raggiungimento delle condizioni residue, che diminuisce all'aumentare della tensione normale efficace alla quale è sottoposto il terreno.

Le curve degli abbassamenti verticali (Fig. 22) mostrano, per tutti e tre i provini, una riduzione in altezza più rapida nei primi millimetri di scorrimento, e più graduale dai 10 mm in poi.

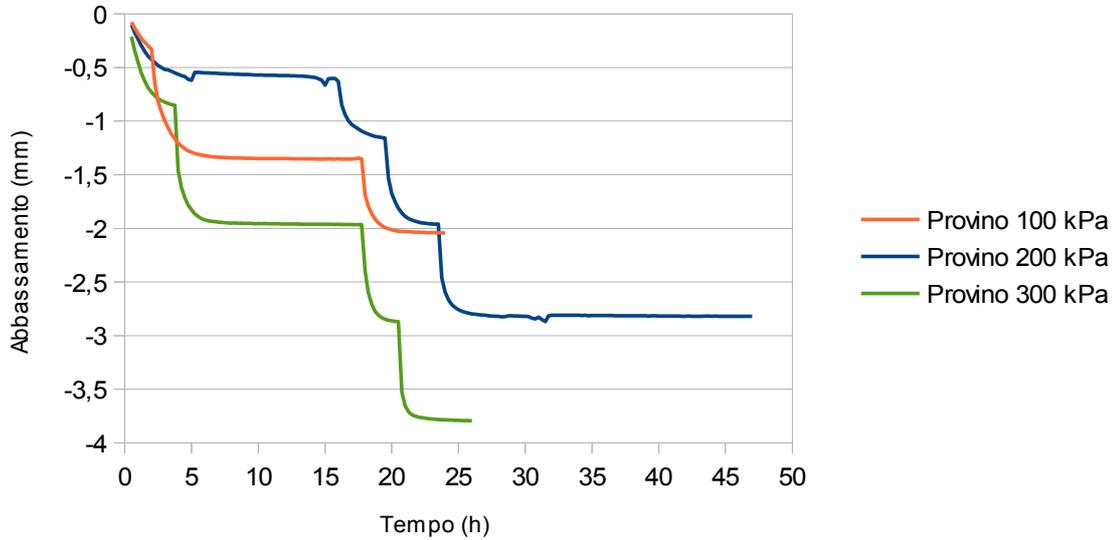


Fig. 21: Abbassamenti verticali relativi alle consolidazioni pre-taglio dei tre provini del campione S2C1, alle tensioni normali rispettivamente di 100, 200 e 300 kPa.

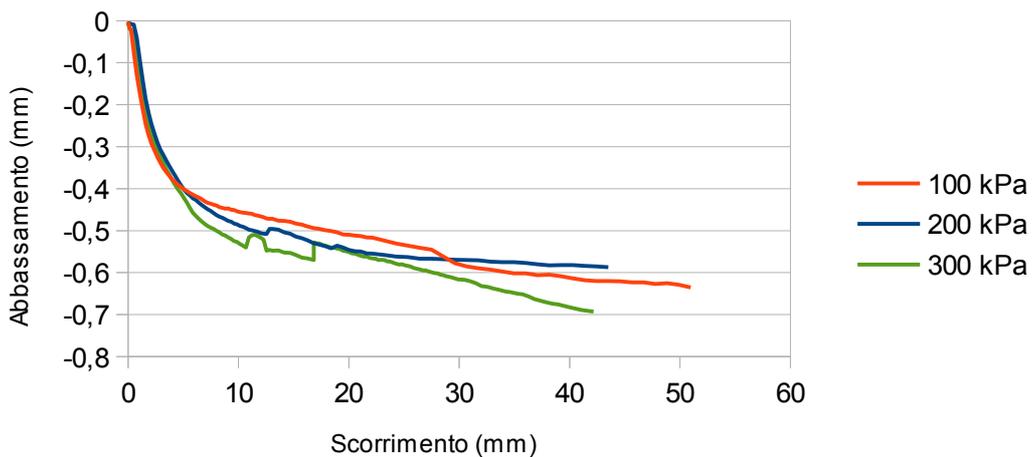


Fig. 22: Abbassamenti verticali relativi alle fasi di taglio dei tre provini del campione S2C1, alle tensioni normali rispettivamente di 100, 200 e 300 kPa.

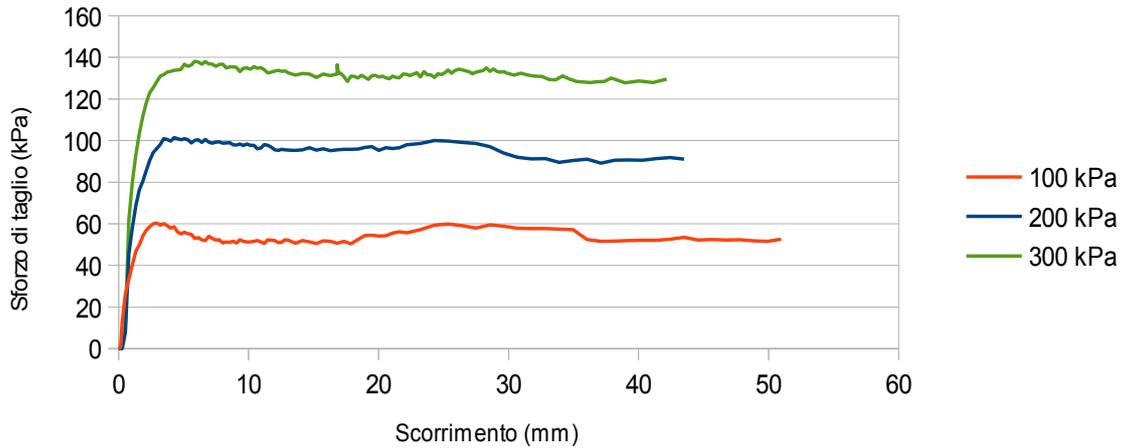
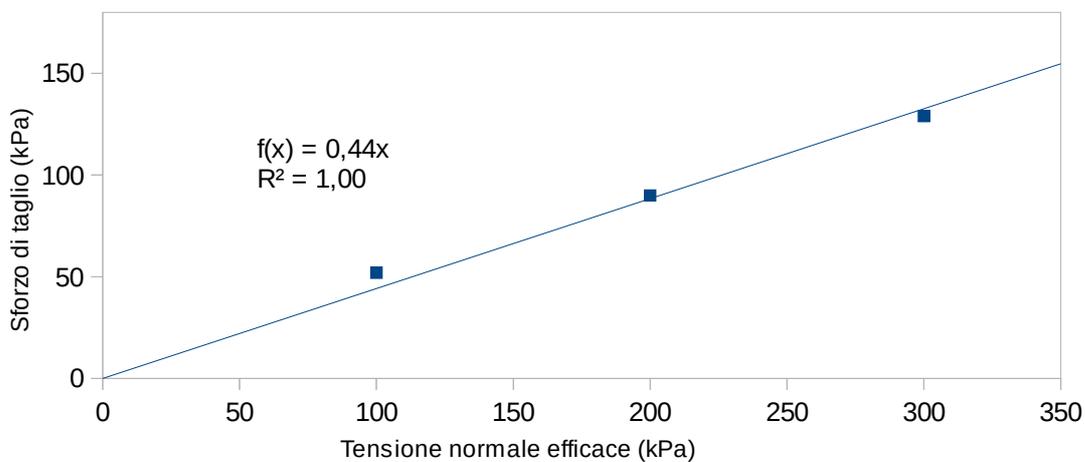


Fig. 23: Curve sforzi / scorrimenti relative alle fasi di taglio dei tre provini del campione S2C1, alle tensioni normali rispettivamente di 100, 200 e 300 kPa.

Per l'interpretazione, in termini di tensioni efficaci, della prova di taglio anulare sono stati riportati nel piano di Mohr i punti sperimentali relativi ai tre provini consolidati a differenti tensioni normali, e sono stati interpolati con una retta di regressione lineare (per soddisfare il criterio di rottura di Mohr-Coulomb) imponendo un valore nullo di coesione. È stato così ottenuto un involucro di rottura residuo caratterizzato da un angolo d'attrito residuo di  $24^\circ$  (Fig. 24).



Campione	Prof.(m)	LL	LP	IP	CF	Limo	Sabbia	$\phi'_r$	$c'_r$ (kPa)
S2C1	8,0 – 8,3	32,7	21,3	11,4	41	34,2	24,8	24	0

Fig. 24: Involucro di rottura residuo ottenuto per il campione S2C1 con il criterio di rottura lineare di Mohr Coulomb, e tabella con le proprietà indice del campione.

Il valore di coesione viene impostato nullo in quanto qualsiasi valore di coesione apparente sarebbe in contrasto con la definizione stessa di resistenza residua, che corrisponde alla condizione in cui significativi scorrimenti hanno interessato il terreno eliminando qualsiasi forza coesiva precedentemente posseduta.

Di seguito si riporta la rappresentazione del punto sperimentale nei campi correlativi proposti dai vari autori, che relazionano le proprietà indice dei terreni ai corrispondenti angoli d'attrito residui (Fig. 25, 26).

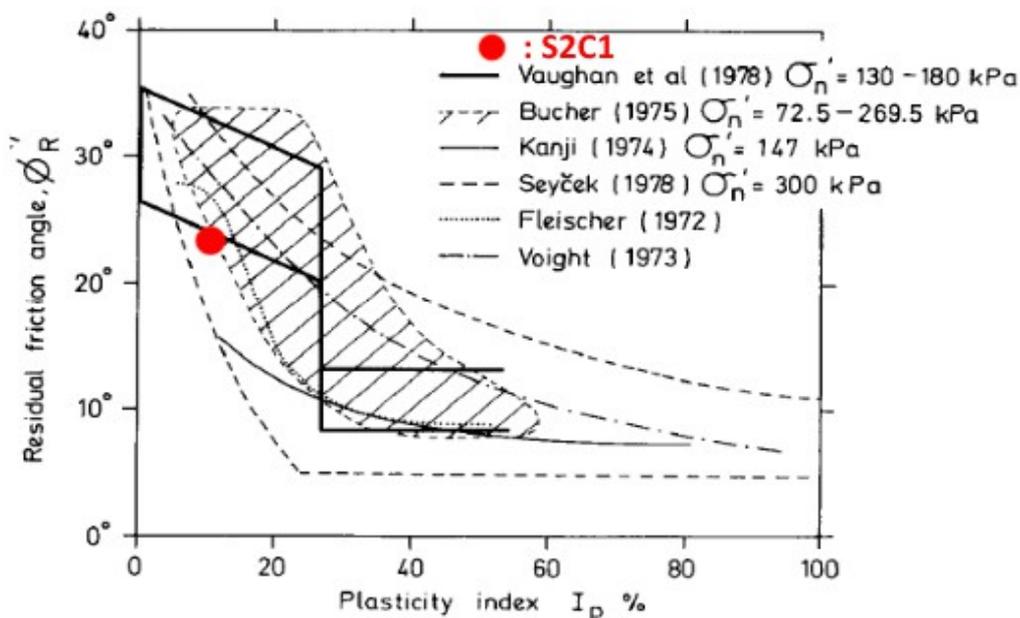


Fig. 25: Confronto tra il punto sperimentale (campione S2C1) e il grafico correlativo proposto da Lupini *et al.* (1981), che mette in relazione l'angolo d'attrito con l'indice di plasticità.

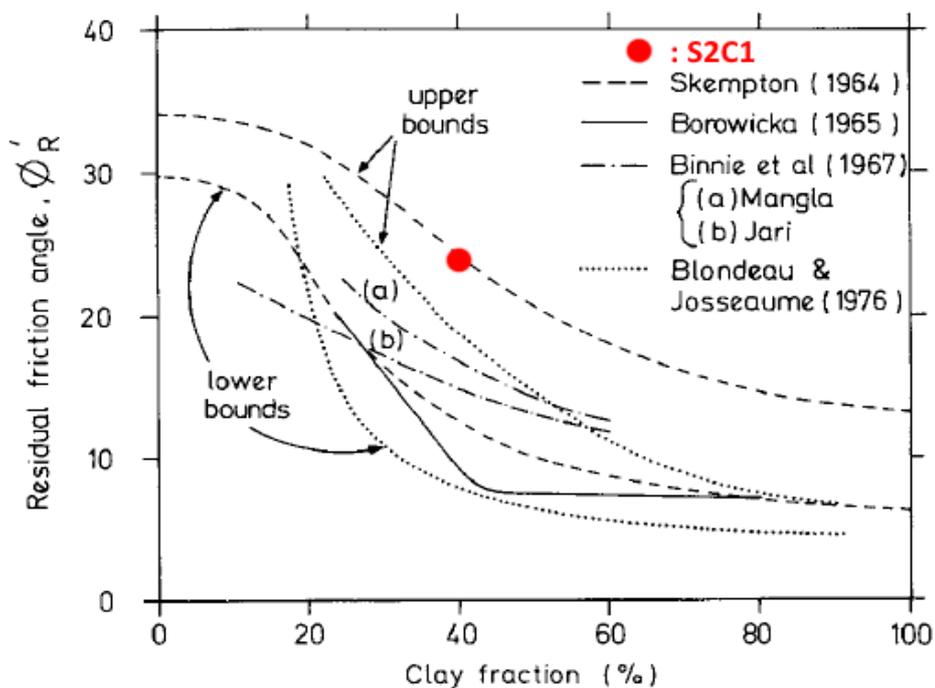


Fig. 26: Confronto tra il punto sperimentale (S2C1) e il grafico correlativo proposto da Lupini *et al.* (1981), che mette in relazione l'angolo d'attrito con la frazione argillosa.

Nel grafico che mette in relazione IP e  $\phi'_r$  (Fig. 25) si osserva che il punto sperimentale ricade all'interno solamente del campo correlativo proposto da Seycek (1978), e presso i limiti inferiori dei campi proposti da Bucher (1975) e Vaughan *et al.* (1978).

Mentre nel grafico che mette in relazione CF e  $\phi'_r$  (Fig. 26) il punto sperimentale ricade presso il limite superiore del campo correlativo proposto da Skempton (1964), e in discordanza con le altre correlazioni.

Da tali osservazioni si può in prima analisi affermare che il terreno del campione S2C1 è caratterizzato da un angolo d'attrito residuo relativamente basso in rapporto all'indice plastico, e alto in rapporto alla frazione argillosa.

Tuttavia è necessario tenere in considerazione la difficoltà incontrata nella disgregazione del materiale che ha preceduto le prove di analisi granulometrica e di determinazione dei limiti di Atterberg.

Tale difficoltà ha determinato probabilmente una sottostima dei valori di IP, dell'angolo d'attrito residuo, e della frazione argillosa, che spiegherebbe la mancata corrispondenza del punto sperimentale con la maggior parte dei campi correlativi proposti dagli autori.

È largamente riconosciuta in letteratura la dipendenza della resistenza al taglio disponibile in condizioni residue dalla tensione normale efficace, che si traduce in un involuppo di rottura non lineare.

Pertanto si è tentato di interpolare nel piano di Mohr i tre punti, relativi ai tre provini del campione S2C1 consolidati a differenti tensioni normali, con una curva di regressione potenziale che esprimesse la non-linearità dell'involuppo di rottura (Fig. 27).

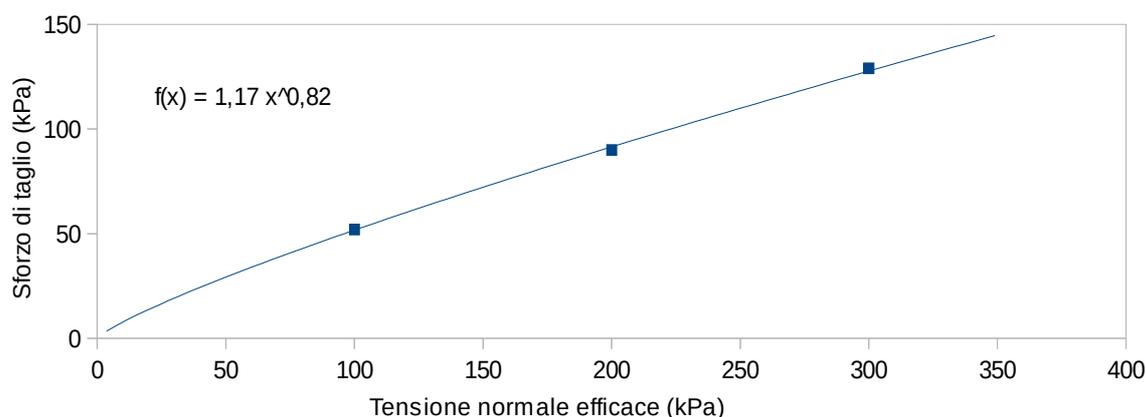


Fig. 27: Involuppo di rottura curvilineo (campione S2C1), ottenuto interpolando i tre punti sperimentali con una curva di regressione potenziale.

Da una semplice analisi per via grafica si può constatare come il grado di curvatura dell'involuppo non sia molto significativo, e si rifletta maggiormente per bassi valori di tensione normale efficace applicata.

Tuttavia, di seguito si vuole trovare conferma di tale constatazione facendo riferimento alla correlazione proposta da Stark & Eid (1994), che esprime il rapporto  $\phi'_r(50)/\phi'_r(700)$ <sup>6</sup> in funzione dei parametri CF e LL.

Riportando il punto sperimentale, relativo al campione S2C1, nella correlazione proposta

<sup>6</sup>  $\phi'_r(50)$  e  $\phi'_r(700)$  indicano gli angoli d'attrito secanti relativi a tensioni normali efficaci rispettivamente di 50 kPa e 700 kPa.

dagli autori, si ottiene un valore del rapporto  $\phi'_r(50) / \phi'_r(700)$  molto vicino all'unità (Fig. 28): questo tende a confermare la non-significatività, in riferimento al terreno in esame, della dipendenza della resistenza residua dalla tensione normale efficace.

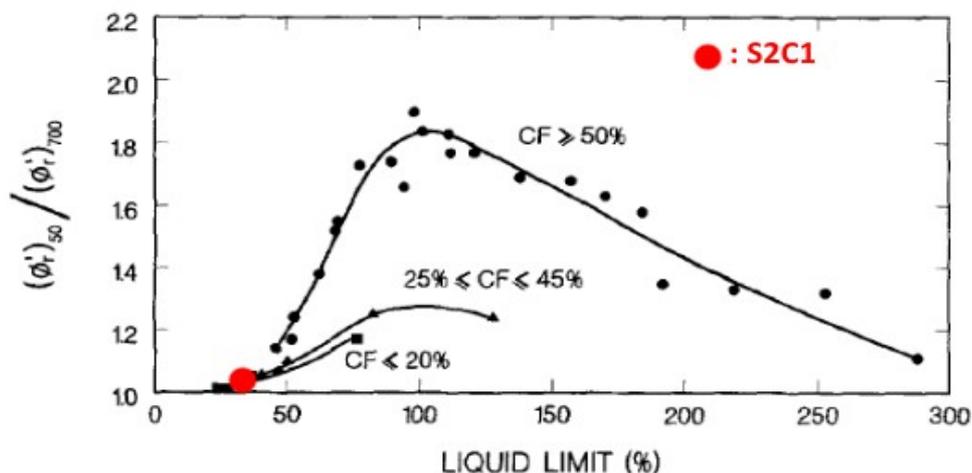


Fig. 28: Rappresentazione del punto sperimentale (campione S2C1) nel grafico correlativo proposto da Stark & Eid (1994), che esprime il grado di influenza della tensione normale efficace sull'angolo d'attrito residuo.

In ultima analisi, si riporta una breve valutazione della stabilità del versante in esame, effettuata rappresentando in un profilo topografico del pendio la potenziale superficie di scorrimento, che si ipotizza parallela alla superficie topografica (Fig. 30). Quest'ultima è stata rappresentata ad una profondità di 10 m dal piano campagna, su base dell'interpretazione derivata dalla ricostruzione stratigrafica.

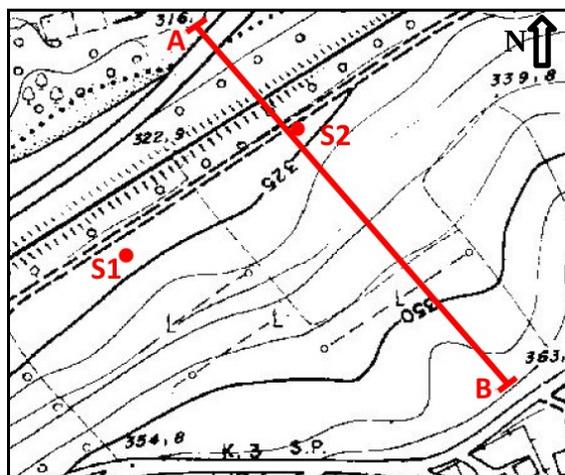


Fig. 29: Carta topografica (scala 1:4000) del versante, in cui sono rappresentati i due sondaggi e la traccia (A-B) lungo la quale è stato fatto il profilo.

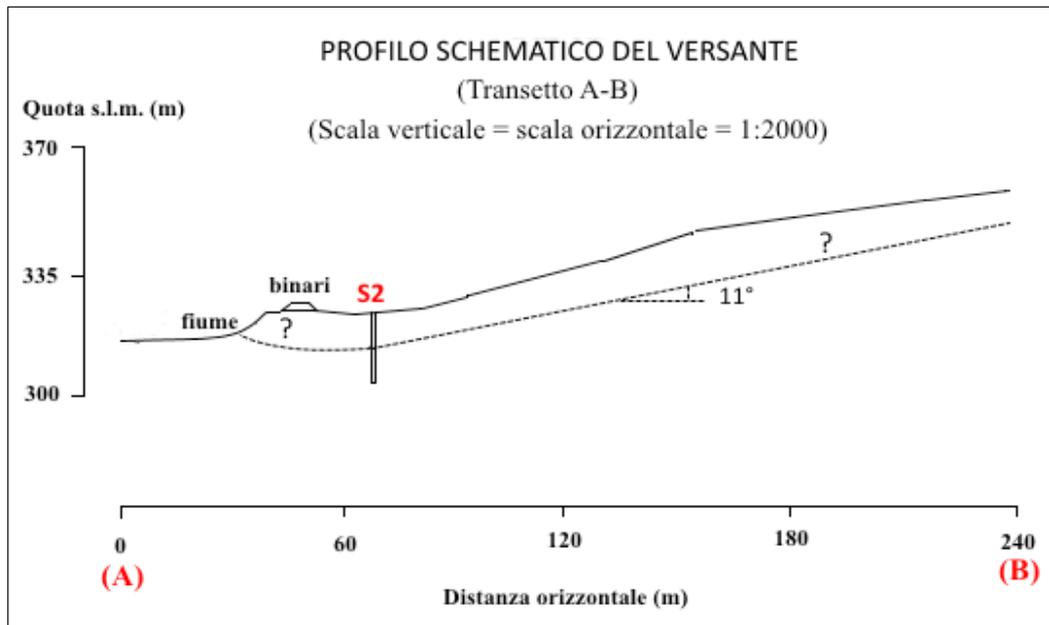


Fig. 30: Profilo schematico del versante con rappresentazione del sondaggio S2 e della potenziale superficie di scorrimento (linea tratteggiata).

Dal profilo del versante risulta una pendenza media della superficie di 11°, valore che viene confrontato con l'angolo d'attrito residuo del terreno, in quanto si ipotizza che siano già avvenuti notevoli scorrimenti nel tempo lungo la potenziale superficie di scorrimento. Infatti, presso il versante è cartografato un deposito di frana complessa attiva, facente parte di una più estesa frana complessa quiescente (Fig. 5).

Dal confronto con l'angolo d'attrito residuo risultato dalle prove di laboratorio ( $\phi'_r=24^\circ$ ), si può quindi concludere che il versante non sia soggetto a fenomeni di instabilità legati alla riattivazione di una potenziale superficie di scorrimento preesistente ( $11^\circ < \phi'_r$ ).

Si sottolinea tuttavia come quest'ultima analisi consista in una semplificazione della problematica in esame, la quale nella realtà è soggetta a più variabili che la complicano.

## 5. CONCLUSIONI

Per lo svolgimento del presente lavoro sono state seguite due perforazioni a carotaggio continuo, realizzate al piede di un versante franoso situato lungo la linea ferroviaria Bologna-Pistoia, che hanno indagato una profondità di 20m.

Una prima fase del lavoro è consistita nella ricostruzione dei profili stratigrafici, risultanti dalla descrizione delle carote di sondaggio, e nel prelievo di cinque campioni di terreno corrispondenti a spezzoni di carota. Successivamente è stato caratterizzato, dal punto di vista geologico-tecnico, il terreno dei campioni, determinandone le proprietà indice e la resistenza al taglio residua (quest'ultima solamente su un campione).

Le perforazioni a carotaggio continuo hanno messo in luce profili stratigrafici molto simili nei due sondaggi S1 ed S2. In entrambi i casi si è riscontrata la presenza di litologie prevalentemente argillose riconducibili alla Formazione delle Argille a Palombini.

La più importante variazione rilevata, con la profondità, consiste nella transizione da un orizzonte più superficiale di circa dieci metri, dove la struttura scagliosa è assente o discontinua (e il colore passa da marrone a grigio con la profondità), ad un litotipo argillitico/marnoso con struttura pervasivamente scagliosa.

Questa distinzione, insieme alla presenza di sabbia solamente nell'orizzonte stratigrafico più superficiale, ha portato ad interpretare quest'ultimo come corpo di frana, ed ipotizzare quindi la presenza di una superficie di scorrimento a circa dieci metri di profondità.

Dalle analisi granulometriche, eseguite su tutti e cinque i campioni prelevati, sono risultati terreni prevalentemente argillosi, classificabili nel complesso come “argille con limo” da “sabbiose” a “con sabbia”.

Dalle prove di laboratorio si sono ottenute quindi percentuali di frazione sabbiosa sistematicamente più alte rispetto a quanto osservato in campagna, in particolar modo per i campioni più profondi. Infatti, dalle osservazioni fatte sulle carote di sondaggio, si sono classificati i terreni generalmente come “debolmente sabbiosi”, ad eccezione dei campioni più profondi nei quali non si è osservata alcuna presenza di materiale sabbioso.

Tali evidenze hanno permesso di mettere in luce l'importanza del processo di disgregazione del materiale, che precede le successive prove di caratterizzazione del terreno. Si ritiene infatti che in fase di disgregazione non si siano separate perfettamente le particelle argilloso-limose le une dalle altre, determinando una sovrastima della frazione sabbiosa.

Quest'ultima ipotesi porta a considerare sottostimati anche i valori dei limiti di consistenza, che dal confronto con la Carta di plasticità di Casagrande classificano i terreni come argille/limi di bassa plasticità e con una certa componente sabbiosa.

Dalla prova di taglio anulare, effettuata su uno dei campioni (campione S2C1, corrispondente ad una profondità di 8-8,3m), interpretando i dati con il criterio di rottura lineare di Mohr-Coulomb si è ottenuto un angolo d'attrito residuo di 24°.

Quest'ultimo valore, se confrontato con diversi campi correlativi (basati sulle proprietà indice del terreno) proposti in letteratura, si colloca marginalmente ad essi nella maggior parte dei casi. Questa mancata corrispondenza viene attribuita alla sottostima, legata alle difficoltà di disgregazione del materiale, dei valori di IP, CF e  $\phi'_r$ .

I dati ottenuti dalla prova di taglio anulare sono stati interpretati anche con un involuppo di rottura residuo curvilineo, per tenere in considerazione la dipendenza delle caratteristiche di resistenza residua dalla tensione normale efficace. È risultato un involuppo caratterizzato da un grado di curvatura molto basso, in accordo con la relazione proposta da Stark & Eid

(1994), che esprime il grado di non-linearità (sottoforma del rapporto  $\phi'_r(50)/\phi'_r(700)$ ) in funzione di LL e CF.

Infine è stata rappresentata, in un profilo topografico schematico del versante in esame, la potenziale superficie di scorrimento, ad una profondità di 10m dal piano campagna e parallela a quest'ultimo. Dal confronto tra l'angolo d'attrito residuo, ottenuto in laboratorio dalla prova di taglio anulare, e la pendenza della potenziale superficie di scorrimento, si è constatata una situazione di stabilità del versante.

## BIBLIOGRAFIA

- Bellino S., Maugeri M., 1985. Confronto tra valori di resistenza residua ottenuti con diverse apparecchiature anulari di taglio. *Rivista Italiana di Geotecnica* 19: 101 – 113.
- Botti F., Daniele G., Baldacci F., 2011. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 251 'Porretta Terme'. Servizio Geologico D'Italia. Regione Emilia-Romagna. SystemCart, Roma: 194 p.
- Kimura S., Nakamura S., Vithana S.B., Sakai K., 2014. Shearing rate effect on residual strength of landslides soils in the slow rate range. *Landslides* 11: 969 – 979.
- Lancellotta R., 2004. *Geotecnica*, 3a ed., Zanichelli, 481 p.
- Lo Presti D., Froio F., 2004. Resistenza al taglio residua di rocce tenere e terreni a grana fine. *Rivista Italiana di Geotecnica* 38: 48 – 84.
- Lupini J. F., Skinner A. E., Vaughan P. R., 1981. The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique* 31: 181–213.
- Panini F., Bettelli G., Pizziolo M., 2002. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 237 'Sasso Marconi'. Servizio Geologico D'Italia. Regione Emilia-Romagna. S.EL.CA. s.r.l., Firenze: 176 p.
- Raviolo P.L., 1993. *Il laboratorio geotecnico*, Editrice Controls, 610 p.
- Regione Emilia-Romagna. Carta Geologica della regione Emilia – Romagna alla scala 1:10.000. Consultabile on-line sul sito della R.E.R. (URL: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/>).
- Regione Emilia-Romagna. Carta Tecnica-Topografica Regionale (multiscala). Consultabile online sul sito della R.E.R. (URL: <http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/>).
- Skempton A. W., 1985. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35: 3 – 18.
- Stark T. D., Eid H. T., 1994. Drained residual strength of cohesive soils. *J. Geotech. Engrg.* 120: 856 – 871.
- Stark T. D., Eid H. T., 1997. Slope stability analyses in stiff fissured clays. *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.* 123: 335 – 343.
- Stark T. D., Choi H., McCone S., 2005. Drained shear strength parameters for analysis of landslides. *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.* 131: 575 – 588.
- Tika T. E., Vaughan P.R., Lemos L. J. L. J., 1996. Fast shearing of pre-existing shear zones in soil. *Geotechnique* 46: 197 – 233.
- Tiwari B., Brandon T. L., Marui H., Tuladhar G. R., 2005. Comparison of residual shear strengths from back analysis and ring shear tests on undisturbed and remolded specimens. *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.* 131: 1071 – 1079.