

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOLOGICHE, GEOLOGICHE E
AMBIENTALI

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Relazione di Laurea

Studio Geotecnico e Geomorfologico della frana
a San Clemente (BO)

Candidato:

Rani Rodolfo

Relatore:

Prof. Simoni Alessandro

Sessione Ottobre 2019

Anno Accademico 2018-2019

INDICE

1 Introduzione.....	1
1.1 Fasi del lavoro.....	1
2 Geologia e Geomorfologia.....	2
2.1 Le colate in terra.....	2
2.2 Ubicazione frana.....	4
2.3 Geologia del territorio.....	5
2.4 Geomorfologia.....	8
3 Prove Geotecniche.....	9
3.1 Materiali coinvolti nelle colate in terra.....	9
3.2 Campionamento e preparazione.....	12
3.3 Granulometrie.....	12
3.3.1 <i>Procedimento</i>	12
3.3.2 <i>Risultati granulometrie</i>	14
3.4 Limiti di Atterberg.....	16
3.4.1 <i>Procedimento</i>	16
3.4.2 <i>Risultati limiti di Atterberg</i>	17
3.5 Prova di taglio diretta drenata.....	19
3.5.1 <i>Procedimento</i>	19
3.5.2 <i>Risultati prova di taglio diretto drenata</i>	22
4 Interpretazione risultati.....	24
4.1 Interpretazione.....	24
4.2 Confronto con materiali simili.....	29
5 Conclusioni.....	31
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA.....	33

1. Introduzione

Nell'Appennino Settentrionale le frane per colamento sono piuttosto comuni a causa dell'abbondante presenza di litotipi di natura argillosa e scistosa caratteristica delle unità Liguridi e Epiliguridi presenti nell'Appennino.

Le colate in terra sono fenomeni relativamente lenti e il rischio derivante interessa principalmente le infrastrutture (insediamenti e vie di comunicazione). Le colate sono il meccanismo dominante di evoluzione morfologica del paesaggio in molte vallate appenniniche. Esse possono modificare il paesaggio alterando i modelli di drenaggio e spesso contribuendo all'apporto di sedimento al canale fluviale a valle, tanto da avere un impatto diretto sul flusso ed evoluzione della rete dei canali, trasporto sedimenti, habitat acquatico e infrastrutture (Mackey and Roering, 2011).

La colata in terra situata vicino al paese San Clemente in provincia di Bologna, si è riattivata nel mese di maggio del 2019 per le abbondanti precipitazioni in tempi ristretti. Per indagare la stabilità della frana sono stati eseguiti dei prelievi di campioni rimaneggiati per la determinazione dei parametri intrinseci del materiale coinvolto quali granulometria, limite liquido e plastico, angolo di attrito residuo e coesione drenata. La determinazione di tali parametri, grazie alle prove geotecniche, è utile per la caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali coinvolti. Le prove di laboratorio consistono nella realizzazione della curva granulometrica per setacciatura e sedimentazione insieme alla definizione del limite liquido e plastico del materiale (limiti di Atterberg). La curva granulometrica e i limiti di Atterberg forniscono una primaria informazione sulle proprietà del materiale, ma più significativa è la prova di taglio diretta eseguita per più cicli per determinare la resistenza drenata allo sforzo di taglio applicato. I parametri geotecnici del materiale sono fondamentali per comprendere la stabilità della colata in terra in questione, in oltre i risultati si possono confrontare con dati della letteratura di altre colate relative alla stessa litologia o addirittura stessa formazione geologica così da verificare i risultati ed allargare il database di informazioni relative a tale materiale.

1.1 Fasi del lavoro

1. Fase iniziale di campionamento del materiale di frana e scatto delle foto con drone.
2. Studio bibliografico di frane in particolare di colate in terra.
3. Studio bibliografico delle caratteristiche geotecniche di terreni simili.
4. Studio geologico della zona interessata dalla frana.
5. Studio geomorfologico effettuato in campagna con l'ausilio delle foto con il drone e Google Earth.
6. Prove di laboratorio sul materiale campionato (granulometria, limiti di Atterberg, prove di taglio diretto).
7. Costruzione grafici relativi ai risultati delle prove di laboratorio.
8. Interpretazione dati.
9. Conclusioni.

2 Geologia e Geomorfologia

2.1 Le colate in terra

Il criterio comunemente utilizzato per classificare le frane è stato introdotto e definito da Cruden e Varnes nel 1996 e si basa sul movimento e materiale che interessa la frana. Le frane sono associate e quindi classificate con due nomi, il primo descrive il tipo di materiale coinvolto (Rock, Debris, Earth) e il secondo ne descrive il movimento (Falls, Topples, Slides, Spreads, Flows). A causa delle svariate tipologie di movimento che possono interessare le frane complicandone la loro nomenclatura, non è possibile descriverle con un unico nome, per questo s'inseriscono i termini "complex" per frane caratterizzate da più movimenti e "composite" per frane che coinvolgono materiale di composizione differente prima del nome generico come ad esempio "complex earth slide" (Cruden and Varnes, 1996).

Il termine colata in terra (in inglese earthflow) definisce una tipologia di frana dominata da un movimento del materiale, spesso argilloso, come un fluido viscoso da cui ne deriva che ha solitamente un trasporto continuo nello spazio. La morfologia risultante è segnata a monte da un'area di origine a forma di scodella, da una zona di trasporto molto allungata e da una zona di accumulo a valle a forma lobata, chiamata piede. Le colate in terra si possono unire e intersecare con altri flussi o colate in terra formando colate coalescenti. Le colate in terra a differenza di frane di scivolamento (slide in inglese) non presentano una superficie di rottura ben riconoscibile, oppure è molto ridotta perché si preserva molto difficilmente. La superficie di rottura separa il corpo di frana mobilitato e quello ancora integro e stabile.

Una colata in terra presenta una deformazione interna del corpo di frana poichè il materiale si comporta come un fluido viscoso quindi deformabile, mentre nel caso di frana di tipo slide si riescono a distinguere molto meglio i margini laterali della frana e la superficie di rottura ma presentando una deformazione interna minore perché il terreno si comporta in maniera rigida. Con queste caratteristiche morfologiche è possibile distinguere le differenti tipologie di frane in campagna, ma spesso si trovano situazioni intermedie di deformazione interna e margini laterali più o meno visibili che denotano una frana complessa slide-flow che ha avuto differenti tipologie di movimento contemporaneamente.

La velocità di trasporto del materiale nelle colate varia molto a seconda delle stagioni ma generalmente ha un andamento lento (0,005 mm al secondo) o estremamente lento (0,00005 mm al secondo) in fase di quiescenza (Cruden and Varnes, 1996). Le colate possono avere una rapida accelerazione, se innescate da alcuni fattori esterni o interni, provocando possibili danni a strade ed edifici nelle vicinanze. Le differenti velocità di movimento in base alle stagioni spesso dipendono dalle fluttuazioni della superficie piezometrica e dalle precipitazioni atmosferiche che aumentando la pressione dei pori diminuiscono lo sforzo efficace così da aumentare la velocità di movimento. In alcuni casi la pressione di poro è così elevata da ridurre lo sforzo efficace a tal punto da provocare un aumento di velocità più consistente, come avvenuto nel mese di Maggio per la colata di San Clemente. Questi eventi di riattivazione con elevata rapidità di movimento (metri al giorno) sono definiti parossismi e sono innescati da svariati fattori che inducono quasi sempre la formazione di una nuova superficie di rottura a monte nella direzione opposta del flusso, formando così multipli regressivi distacchi della scarpata (headscarp) principale

verso monte (Simoni et al., 2013). La riattivazione della frana induce un importo maggiore di materiale che mobilita i depositi pre-esistenti con un meccanismo di carico non drenato inducendo lo spostamento del piede della frana verso valle. Il meccanismo di riattivazione provoca un allargamento della zona a forma di scodella da cui inizia il movimento della frana (zona di alimentazione). Questo può essere un fattore di pericolo per eventuali infrastrutture sia al piede della colata che nell'immediata area a monte vicino alla scarpata. I Parossismi delle colate in terra possono essere molteplici come per tutte le frane, principalmente dovuti a (Mackey and Roering, 1996):

- Rimozione supporto laterale o ai piedi della frana; rimozione di materiale ai piedi della colata da parte di agenti naturali come corsi fluviali o ghiacciai; attività antropiche (scavi e miniere). La mancanza di un supporto al piede provoca un aumento di sforzo di taglio totale incrementando il rischio di riattivazione.
- Sovraccarico sopra il corpo di frana; per cause naturali come forti nevicate, piogge intense o ghiacciai; attività antropiche come la formazione di laghi artificiali, discariche e costruzioni. Ovviamente l'aumento del carico sopra il corpo di frana provoca un aumento dello sforzo totale e di conseguenza efficace.
- Uplift o Tilting; per movimenti tettonici di orogenesi o scioglimento ghiacciai che provocano uplift (risalita crosta per isostasia) che produce una maggiore erosione nelle zone vallive. La maggiore erosione di conseguenza determina una rimozione più spinta del materiale alla base della frana provocando dilatazione nel corpo di frana che diventerà più instabile e soggetta a riattivazione.
- Debole forza di resistenza intrinseca nel materiale (Low Strength); dipende dalle caratteristiche interne del materiale. Molto comune per materiali argillosi che hanno una debole resistenza al taglio per via della ridisposizione delle particelle come descriveremo più avanti nel paragrafo 3.1 geotecnico. Si presentano situazioni di "low strength" intrinseco non solo in argille ma anche in ammassi rocciosi che presentano fratture, faglie importanti, clivaggio pervasivo e superfici deboli che possono diventare superficie di rottura in una frana.
- Riduzione della resistenza allo sforzo di taglio totale; Comunemente provocata dalla sovrappressione dell'acqua nei pori che riduce la resistenza in materiali grossolani e fini come vedremo nel paragrafo 3. La riduzione di resistenza in materiale argilloso può essere indotta anche dalla perdita di coesione per via di scambi di ioni come nel caso delle argille sensitive.

L'evoluzione Geomorfologica di una singola colata in terra è distinguibile in quattro fasi distribuite nel tempo (Picarelli et al., 2005):

- Fase A: Rapido movimento del flusso di materiale, immediatamente dopo si presenta una superficie molto soffice ed irregolare con gradini e crepe. La velocità di movimento generalmente misurata varia da molto rapida (5mm al secondo) a moderata (0,005mm al secondo).
- Fase B: La colata inizia a fluire in maniera più definita e incanalata, si riesce a distinguere il margine di deformazione laterale. Velocità di movimento in continua decrescita fino a lenta (0,0005 mm al secondo).
- Fase C: Superficie del corpo di frana sempre più arrotondata e regolare e il corpo di frana si irrigidisce progressivamente. Elementi distintivi di una colata come margine di deformazione laterale e scarpata principale tendono a scomparire perché poco preservabili. Velocità di movimento in decrescita fino a estremamente lento

(0,0000005mm al secondo).

-Fase D: L'intera morfologia di una colata è difficilmente distinguibile rispetto al fianco della montagna e il movimento talmente lento fino ad arrivare a fermarsi.

Il tempo che impiega una colata a passare ogni fase può variare molto ma generalmente impiegano centinaia di anni. Si è riscontrato che in base allo stadio evolutivo una colata in terra presenta differenti condizioni drenanti che possono influire sul flusso delle acque sotterranee.

2.2 Ubicazione frana

La colata in terra in esame è situata nella frazione San Clemente del comune Monterenzio in provincia di Bologna. Coordinate Geografiche 44°18' nord 11°29' est. La frana si trova nella valle del fiume Sillaro sul versante sud di questa porzione di valle. Si può notare dalla immagine Fig.1 presa da Google Earth, data al settembre del 2018, come ai piedi della colata è presente un'abitazione e una strada che ha dovuto modificare il suo percorso a causa della frana. Questo sottolinea quanto effettivamente possano portare disagi le Colate in terra e genericamente le frane anche se di piccole dimensioni. Immediatamente dopo la riattivazione avvenuta a maggio 2019 della colata sono state scattate delle foto di ottima qualità utilizzando un drone in volo (Fig.2).



Fig. 1 - Immagine aerea da Google Earth (30/09/2018).



Fig. 2 - Foto della frana scattata con il drone dopo la riattivazione di maggio 2019 con visione verso nord.

2.3 Geologia del territorio

La colata in terra di San Clemente si forma sulle colline bolognesi che sono parte della catena montuosa Appenninica. Il sistema Appenninico, come sappiamo dai larghi studi di correlazioni stratigrafiche si è formato per lo scontro tra il blocco sardo-corso in rotazione antioraria verso est con l'appendice della placca africana Adria, inizio dell'orogenesi datata al Neocene e continua tuttora. In particolare nella regione Emilia-Romagna si trovano gli Appennini settentrionali che sono delimitati a nord dalla linea Sestri-Voltaggio (direzione N-S) che gli separa dalle alpi liguri, mentre a sud sono delimitati dalla linea Ancona-Anzio (andamento NNE-SSW) che separa gli Appennini settentrionali da quelli centrali. Gli Appennini settentrionali sono formati da due domini distinti di litologie; il dominio Ligure e quello Toscano-Umbro-Marchigiano. Il dominio Ligure è formato dai resti del fondale oceanico Ligure-Piemontese (presente fra il continente europeo e quello africano durante la collisione) quindi di prevalentemente litologia a matrice fine con presenza di ofioliti di età Giurassico medio-Eocene, mentre quello Toscano-Umbro-Marchigiano è costituito da depositi marini che si sono depositati dal Triassico al Miocene all'interno di bacini di pertinenza adriatica, quindi litologicamente più diversificato. La geologia presente nel luogo dove si instaura la colata in terra, quindi a piccola scala è stata studiata usufruendo della legenda della sezione cartografica: 238060 -San Clemente (regione Emilia-Romagna). Dalla carta geologica 1:10000 della regione Emilia-Romagna (Fig. 3) si denota come la frana si formi attraverso due litologie differenti; le Marne di Antognola e le Argille Varicolori della Val Samoggia che appartengono relativamente alla successione Epiligure e alla Unità Ligure.

Le due litologie sono descritte nella legenda della carta geologica della regione Emilia-Romagna edizione del 2011 come:

-Marne di Antognola: Marne argillose e marne siltose verdognole o grigie con patine manganesifere; fratturazione concoide o con tipiche superfici concentriche; frequenti i microfossili e talora i bioclasti. Stratificazione da molto sottile a media, talora difficilmente percepibile, sia per scarsa classazione granulometrica che per bioturbazione. Sono presenti rari livelli torbiditici di arenarie vulcanoclastiche, arcosiche e quarzoso-feldspatiche, da sottili a medi, e strati sottili e sottilissimi, discontinui, di cineriti biancastre, tipicamente alterate in giallo o giallo ocra. Localmente si osservano anche orizzonti caotici e livelli di breccie con clasti extraformazionali. Ambiente di sedimentazione di piattaforma esterna, scarpata e base scarpata con apporti torbiditici. La potenza totale della formazione raggiunge alcune centinaia di metri. (Rupeliano terminale - Burdigaliano?).

- Argille Varicolori della Val Samoggia: Argilliti, talora siltose, rosse, grigio scure, nere, verdi sottilmente stratificate, con intercalati sottili livelli di arenarie fini e medie grigio scure e violacee, marne verdi, grigie o biancastre, calcari micritici silicizzati grigio-verdastri, grigio chiari o biancastri, talora a patine manganesifere. Locali evidenze di trasposizione, talora pressochè totale, foliazione e "layering tettonico" alla scala metrica, boudins di siltiti brune e verdastre, manganesifere, caotiche per intensa tettonizzazione. All'interno della formazione sono talora stati cartografati lembi di breccie ofiolitiche (bo). Potenza geometrica della formazione di qualche centinaio di metri. (Cretacico inf. - Eocene inf.).

Il contatto fra le formazioni è di natura tettonica ed è rappresentato nella carta geologica della regione come un sovrascorrimento delle Argille Varicolori della Val Samoggia (Unità Ligure) sopra le Marne di Antognola (Successione Epiligure), questo riflette il sistema dell'orogenesi appenninica caratterizzato da un impilamento di unità geologiche con immersione generale degli strati, spesso ripiegati come nel caso delle Argille Varicolori, verso W.

Riporto un ritaglio della carta geologica regionale (Fig.3) con cerchiato in nero la colata in terra studiata. Essendo la carta aggiornata all'edizione del 2011 ci sono alcune differenze rispetto alla situazione attuale della frana, infatti da come si nota dalla fotografia satellitare da Google Earth (Fig. 1), la colata dal 2011 si è mossa ed è avanzata. Lo si intuisce molto bene dalla posizione del piede della colata a forma lobata e della modifica portata al percorso della strada per il progressivo avanzamento della colata in terra. Quindi tale avanzamento è relativo a riattivazioni precedenti al maggio 2019, che suggerisce una netta instabilità della frana. Al fondo valle del Sillaro si trovano i depositi quaternari definiti come il Subsistema di Ravenna che sostanzialmente è un deposito di ghiaie passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali, mentre il deposito alluvionale in evoluzione è composto da materiale detritico generalmente non consolidato (ghiaie, talora embriciate, sabbie e limi argillosi) di origine fluviale. Il corpo di frana della colata in terra attiva è costituito da materiale per lo più coesivo. Il deposito è costituito in prevalenza da una matrice pelitico-sabbiosa. Presenza abbondante di aggregati di argille e scaglie argillose. Ovviamente il materiale di frana deriva dal substrato sottostante quindi ne è del tutto simile.

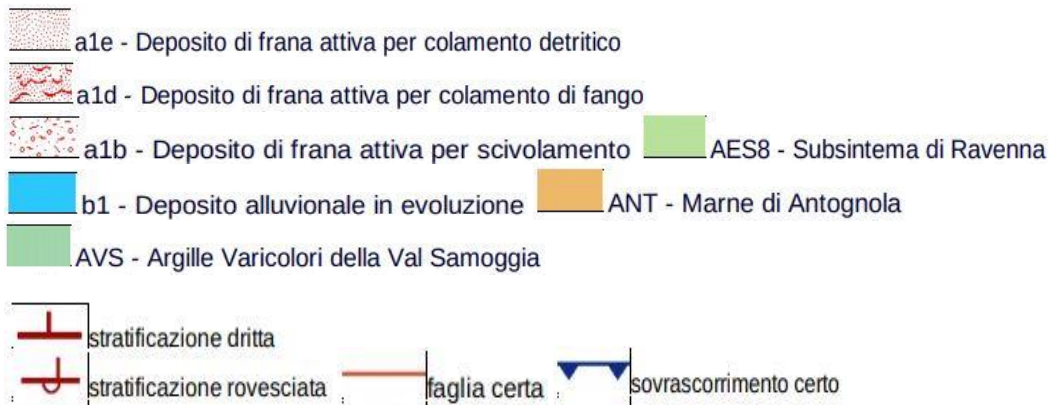
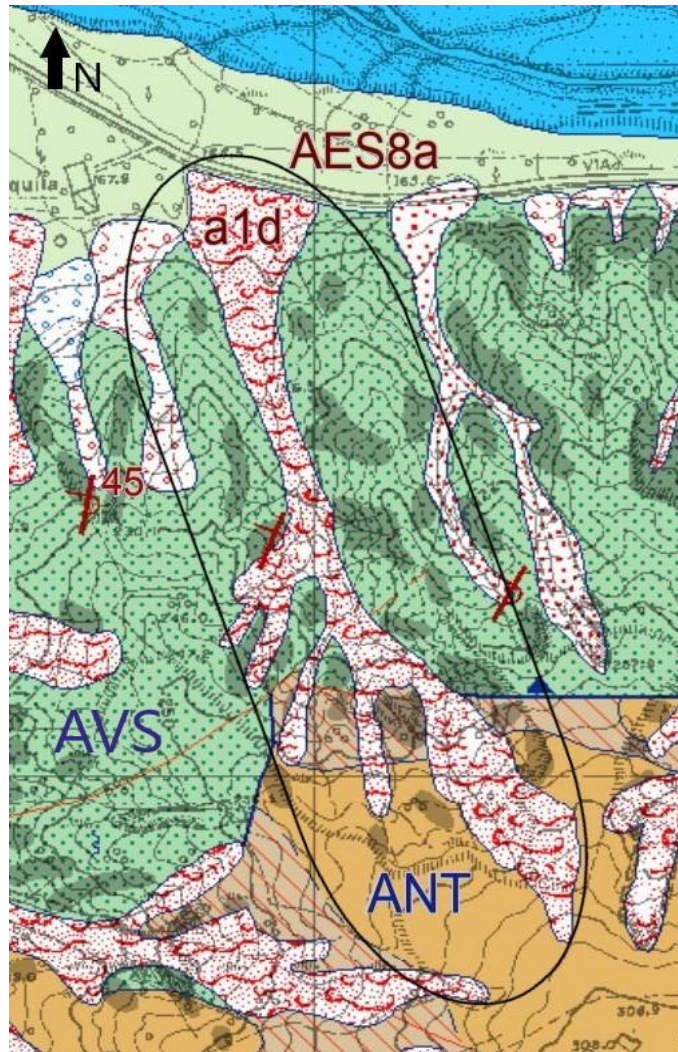


Fig. 3 - Riquadro della colata in terra cerchiata di nero sulla carta regionale 1:10000 edizione 2011. In basso la relativa legenda.

2.4 Geomorfologia

L'evoluzione morfologica del paesaggio montuoso nelle litologie rocciose deboli, come quelle argillose e marnose delle unità Liguri ed Epiliguri è in gran parte controllato dai movimenti del tipo di colate di terra e scivolamenti. Spesso si tratta di frane complesse che evolvono da movimenti di scivolamento (slide) a movimenti di colamento (flow) e viceversa.

La riattivazione di maggio 2019 della frana a San Clemente provoca un arretramento della scarpata a monte ed un avanzamento del piede a valle. La frana a monte presenta un deposito con deformazione interna minima caratteristica di movimenti di tipo scivolamenti. Mentre nella zona mediana della frana il deposito ha un aspetto completamente differente con una deformazione interna elevata e una forma allungata che denota un movimento di tipo colamento. Nella zona terminale, il piede della frana non è pervaso dalla stessa deformazione interna della zona mediana ma si muove prevalentemente per scivolamento retrogradazionale indotto dall'accumulo di materiale di materiale sovrastante. Interessante notare come la frana si formi attraverso due litologie differenti; le Argille Varicolori e le Marne di Antognola che si pongono geometricamente sopra. La differenza di litologia riscontra una differente pendenza del versante, più pendente dove il substrato è marnoso per la resistenza maggiore all'erosione. Non solo varia la pendenza ma anche la il contenuto di acqua, le Marne di Antognola si presentano più umide al tatto rispetto alle Argille Varicolori sottostanti, questo perché il substrato argilloso funge da acquiclude e mantiene l'acqua all'interno delle Marne di Antognola.

Grazie al sopralluogo effettuato a settembre e alle foto scattate con il drone a maggio (Fig. 2) è stato possibile sviluppare una carta geomorfologica relativa ai movimenti avvenuti con la riattivazione in maggio 2019 della frana a San Clemente (Fig.4). Nel deposito di colata si distingue una netta differenza di colori del terreno franato, nei bordi del deposito il colore è di un grigio chiaro mentre all'interno il colore persistente è di un giallo-ocra, la motivazione può essere accreditata dal fatto che al centro si trovi materiale franato in precedenza e quindi più alterato mentre ai lati del deposito ci sia materiale "fresco" integrato dall'ultima mobilitazione. La carta geomorfologica (Fig. 4) è stata elaborata con il software Qgis sulla Carta Tecnica Regionale (CTR) 1 a 5000 e sulla Carta Geologica di sintesi esportate dal sito WMS della regione Emilia-Romagna. I colori verde chiaro e rosso chiaro dello sfondo rappresentano rispettivamente la formazione delle Argille Varicolori (Dominio Ligure) e le Marne di Antognola (Dominio Epiligure).

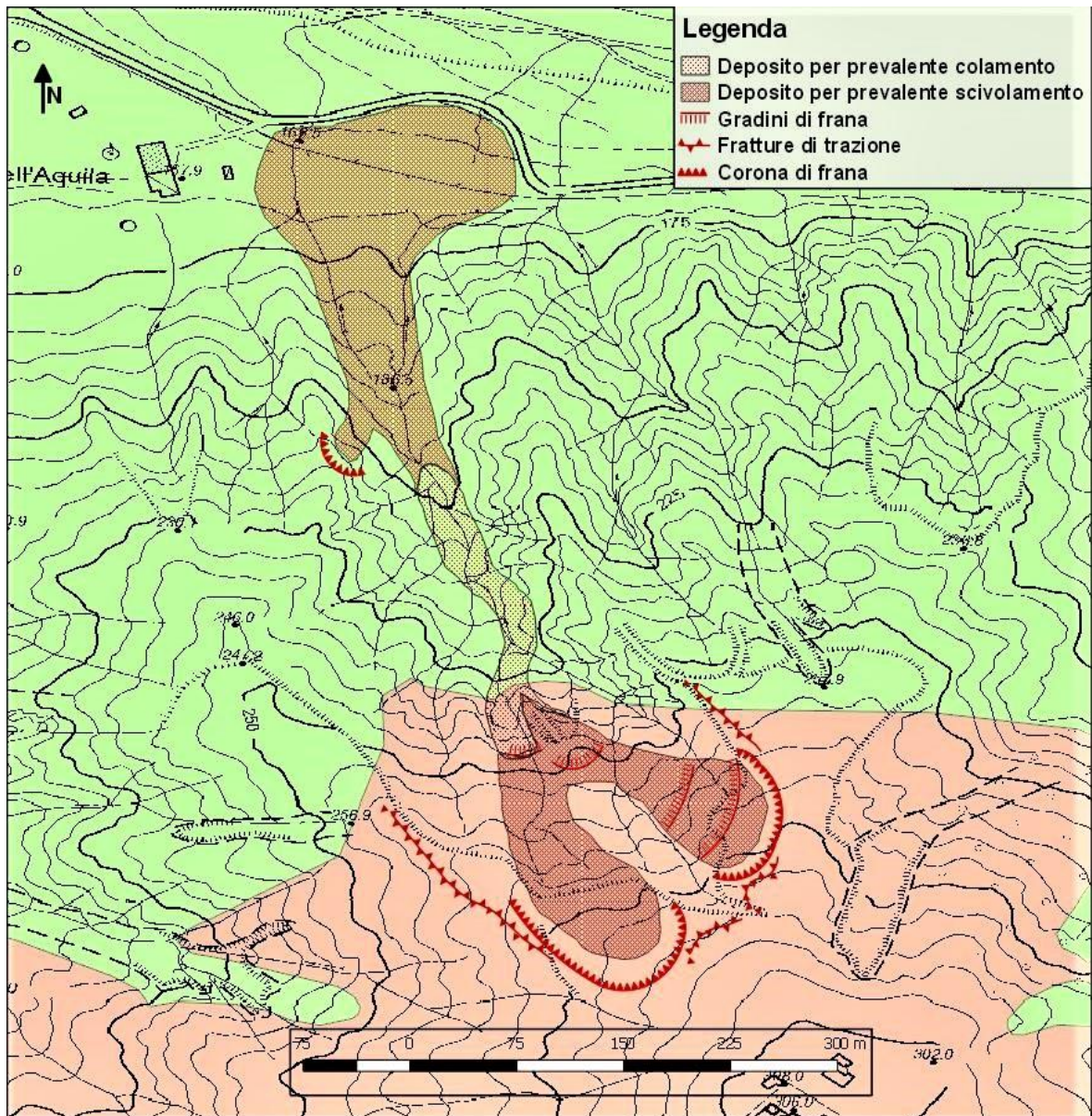


Fig. 4 - Carta Geomorfologica riferita alla riattivazione di maggio 2019 della frana di San Clemente con relativa legenda.

3 Prove Geotecniche

3.1 Materiali coinvolti nelle colate in terra

I materiali coinvolti nelle colate in terra sono generalmente di tipo argilloso questo è dovuto al fatto che i materiali fini hanno generalmente una minore resistenza al taglio. Ancora non si è riuscito a comprendere appieno il processo di transizione solido-fluido che avviene nelle colate in terra. Questo è dovuto in massima parte alla difficoltà di misurare tale processo in sito utilizzando la tradizionale strumentazione geotecnica di monitoraggio. Tuttavia si predispongono di altri metodi di analisi comprese prove di laboratorio che ci possono indicare le caratteristiche fondamentali di un terreno coinvolto in una determinata frana così da comprenderne lo stato di instabilità ed eventualmente trovare le dovute prevenzioni.

Le colate in terra come già espresso possono rimanere quiescenti per decine di anni per poi riattivarsi dando vita a quelli eventi definiti parossistici. Il motivo di questa continua riattivazione possibile bisogna cercarlo nella microscala, di fatto la motivazione più accreditata è che per la loro forma lamellare le particelle di argilla tendono a orientarsi con il lato lungo parallelamente al piano di rottura diminuendo drasticamente la resistenza. Il riorientamento delle particelle piatte del terreno argilloso presso la superficie di taglio provoca un 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. Quindi per terreni di tipo argilloso dove avvengono colate in terra è importante studiare e determinare la resistenza al taglio residua che varia dalla resistenza di picco e dalla resistenza di stato critico. Quando un terreno è sottoposto a deformazione di taglio in maniera drenata la resistenza disponibile varia nel tempo ed è possibile individuare tre stadi successivi al procedere della deformazione. Inizialmente si riscontra per basse deformazioni un aumento notevole della resistenza al taglio, fino al raggiungimento di un valore massimo (resistenza di picco). 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 (argillosi) una ulteriore riduzione della resistenza disponibile, fino al raggiungimento di un valore minimo costante corrispondente alla resistenza residua. Degli studi svolti sulle colate in terra dell'Appennino meridionale da Picarelli (2005) hanno dimostrato come l'orientazione delle particelle di argilla influisca particolarmente sulle caratteristiche generali del materiale e quindi della frana. Concretamente hanno effettuato test di taglio diretto e permeabilità su campioni indisturbati prelevati esattamente nella zona di massimo sforzo di taglio ossia vicino alla ipotetica superficie di rottura di una colata in terra. I test effettuati producono risultati di permeabilità più alta e resistenza al taglio più bassa quando svolti in maniera parallela all'allineamento delle particelle di argilla e quindi della linea di deformazione massima. Mentre se ruotiamo il provino di novanta gradi e facciamo i test di taglio e permeabilità si ottiene che la resistenza al taglio è significativamente più alta e la permeabilità è più bassa. Questi risultati sono dovuti al microfabric orientato dato dalle lamelle di argilla. Per questo in colate in terra riattivate bisogna misurare lo stato di resistenza residuo, dato dalle particelle disposte in maniera parallela allo sforzo di taglio, ed è possibile grazie a più cicli ripetuti di prova di taglio diretto con scatola di casa grande o prova di taglio anulare.

La permeabilità maggiore del terreno parallelamente al microfabric delle particelle di argilla in natura risulta che l'infiltrazione e il movimento dell'acqua sotterranea è incanalato in unica superficie, quella dove presenta la massima deformazione, ossia la superficie di rottura. Questa via preferenziale di movimento dell'acqua sotterranea per via della permeabilità maggiore ha un impatto sul gradiente idraulico del versante affetto da colata in terra. Infatti misure piezometriche, sempre da Picarelli (2004), riportano che il gradiente idraulico misurato sul pendio di una colata è circa il doppio di quello misurato sul versante non franato della stessa litologia.

Nella Fig. 5 sono riportati i grafici riguardanti contenuto d'acqua e sforzo di taglio non drenato degli studi di Picarelli su una colata in terra nell'appennino meridionale. I grafici sono stati costruiti basandosi su più misurazioni e prove effettuate su provini a differente profondità (riportata sull'ordinata) di molteplici carotaggi in successione attraverso il

corpo di frana. Ciò che si evince dal grafico è la presenza di una linea (superficie) dove il contenuto d'acqua è nettamente maggiore rispetto le altre profondità, probabilmente dovuto al fatto che lì il materiale sia più permeabile quindi attribuibile alla superficie di rottura. A confermare l'ipotesi è la presenza di una linea alla stessa identica profondità in cui lo stress non drenato è molto inferiore, spiegabile grazie alla orientazione preferenziale delle lamine di argilla presenti nella zona di massima deformazione.

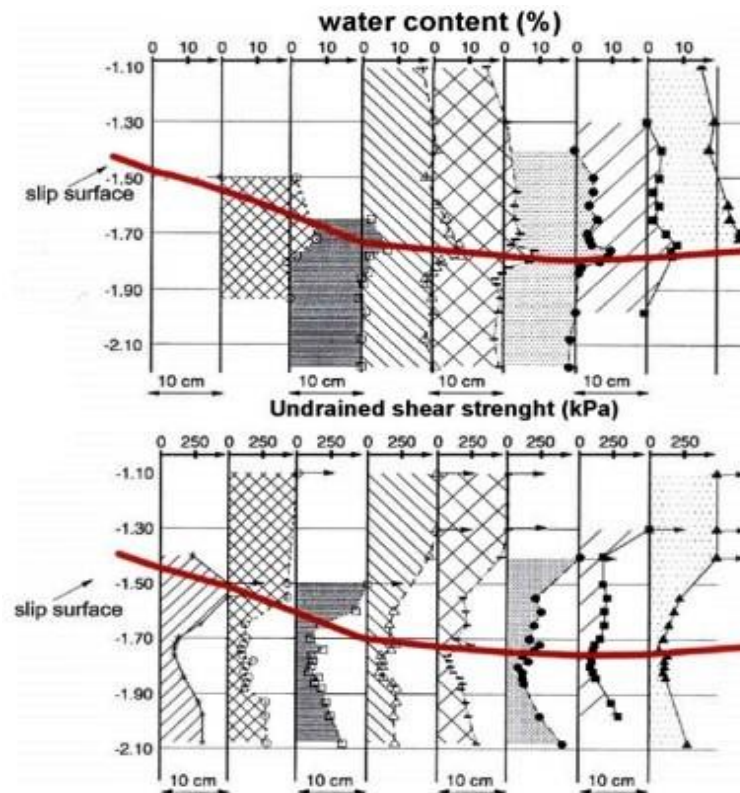


Fig. 5 - L'andamento del contenuto d'acqua e sforzo di taglio non drenato (ascissa) con la profondità (ordinata) della colata di Masseria Marino dati da Picarelli (2005).

La infiltrazione d'acqua genera una pressione di poro che se aggiunto a qualche evento di innesco esterno può diventare molto elevata così da ridurre lo sforzo efficace a zero secondo il principio di Terzaghi (sforzo efficace = sforzo totale - pressione dei pori) e provocare una riattivazione della colata in terra.

Assunto che lo stadio iniziale del movimento del terreno è soggetto a uno stress non drenato perché il terreno non è in grado di drenare così rapidamente l'acqua. Successivamente allo stato non drenato iniziale il materiale è soggetto ad una progressiva dissipazione della pressione di poro. Tuttavia è più complesso di come si può pensare che sia, in realtà è più probabile che si verifichi una successione di stati drenati e non come misurato dai piezometri di Casagrande Masseria Marino dal 1991 al 1993 (Picarelli 2005). Come già detto l'aumento di pressione di poro tale da ridurre lo sforzo efficace quasi a zero non è spiegabile solo con l'infiltrazione di acqua piovana normale anche perché il terreno argilloso è comunemente poco permeabile. Quindi i cambiamenti repentini della pressione di poro sono dati da (Picarelli et al, 2005):

-Sovraccarico (Static Loading): per accumulo di materiale detritico della scarpata a monte sopra il corpo di frana.

-Sovraccarico momentaneo (quasi-static):Aumento del carico per breve tempo causato da attività antropica o eventi climatici importanti.

-Differenza delle forze di resistenza lungo il pendio: Presenza di "neck" zone morfologicamente rialzate che provocano compressione e aumento pressione dei pori, oppure un cambiamento delle proprietà del suolo che producono una redistribuzione dello stress interno e successivo aumento della pressione di poro.

-Effetto del sisma: Una scossa sismica può provocare un aumento di pressione di poro per impulsi compressivi mobilitando così il terreno.

La deformazione reale del terreno in una frana è impossibile da misurare direttamente in campagna per un motivo molto semplice gli strumenti verrebbero distrutti dal movimento rapido della colata in questione. Però è osservabile come i primi stadi deformativi interessano tutto il corpo di una colata in terra (al contrario di una frana di scivolamento) mentre nelle fasi finali quando la pressione di poro diminuisce, progressivamente la deformazione si concentra nella zona di superficie di rottura.

3.2 Campionamento e preparazione

I campioni sono stati prelevati dal corpo di frana nella parte mediana e superiore nei giorni immediatamente seguenti la riattivazione del Maggio 2019. Il campionamento è avvenuto lungo zona di taglio/deformazione dove affiora il materiale direttamente coinvolto nel movimento. Si tratta di campioni rimaneggiati quindi i campioni sono stati prelevati in maniera molto semplice raccogliendo del terreno e ponendolo dentro una busta di plastica resistente. Per determinare i valori di angolo di attrito residuo e caratterizzare il terreno, scopo del lavoro, non è necessario effettuare un campionamento indisturbato quindi si è preferito prelevare in maniera semplice ottenendo dei campioni rimaneggiati perché più pratico e veloce. I cinque campioni rimaneggiati, ancora saturi d'acqua, sono descritti al tatto e a vista come materiale prevalentemente fine con presenza abbondante di aggregati di argilla di varie dimensioni e scaglie sempre argillose e alcuni clasti marnosi di dimensioni minori. I campioni a occhio nudo non presentano differenze sostanziali anche se per il campione numero 3 era facile notare che conteneva una frazione sabbiosa più alta e soprattutto era più abbondante la presenza di clasti marnosi tra cui uno che raggiungeva i 10 centimetri di diametro. Prima di qualsiasi prova di laboratorio i campioni sono stati messi in vassoio insieme ad acqua per una giornata intera, così da far disciogliere gli aggregati di argilla per imbibizione che altrimenti renderebbero le prove inattendibili e falsate. Nel nostro caso è bastato un solo ciclo di imbibizione ma per alcuni materiali servono più cicli. Il processo di imbibizione è sostanzialmente l'assorbimento di un liquido da parte di un corpo o di una sostanza, senza che si verifichi alcuna reazione chimica. Tutte le procedure effettuate in laboratorio sono state svolte seguendo le indicazioni descritte nelle norme ASTM.

3.3 Granulometrie

3.2.1 Procedimento

Determinazione della curva granulometrica attraverso due fasi differenti; La prima fase di setacciatura ad umido e la seconda fase di sedimentazione sul materiale fine passante al setaccio 200.

Setacciatura ad umido consiste nel far passare attraverso i setacci, indicati nella Fig.6, il materiale (circa 250 g) con l'ausilio di un getto d'acqua continuo in modo da disgregare completamente gli aggregati di argilla, strumentazione in Fig.7.

Numero setaccio:	Diametro maglia (mm):
10	2,000
20	0,840
40	0,420
100	0,150
200	0,074

Fig. 6 - Riportati il numero di setacci utilizzati con la rispettiva apertura della maglia.

Il materiale fermatosi su ogni passante viene raccolto separatamente e fatto essiccare completamente in forno a 60°C, non a temperatura più elevata altrimenti la parte di sostanza organica evaporerebbe mentre può essere fondamentale per alcune proprietà del terreno come il limite di plasticità. Il materiale fine passante al setaccio 200 viene raccolto in una vasca, ovviamente insieme all'acqua utilizzata per la setacciatura per via umida, quindi si attende che sedimenti il materiale fini all'interno della vasca così da poter svuotare l'acqua limpida e lasciare essiccare completamente il terreno. Quando il terreno trattenuto ai vari setacci è secco lo si pesa e si può calcolare la percentuale del materiale passante ad ogni setaccio (Massa passante/massa totale per cento).



Fig. 7 - Strumentazione utilizzata per setacciatura via umida.

La seconda fase per la determinazione della granulometria della percentuale fine, si svolge con il metodo della sedimentazione. La prova di sedimentazione si applica a 40 g di materiale passante al setaccio 200 che vengono mescolati a 125 g di una soluzione di acqua distillata e esametafosfato (antiflocculante), questo procedimento svolto su ogni campione per poi lasciare saturare il terreno nella soluzione per almeno 16 ore. Dopodiché si inserisce la soluzione ottenuta e rimescolata all'interno dei cilindri graduati e si porta la soluzione totale fino ad un litro aggiungendo acqua distillata. Prima di svolgere tutta questa procedura è necessario tarare lo strumento utilizzato per misurare la densità ossia il densimetro. La taratura consiste nel misurare la densità dell'acqua distillata e della soluzione con esametafosfato a differenti temperature controllate dalla vasca termostatica, per poi costruire un diagramma delle misure effettuate in funzione della temperatura così da trovare un coefficiente di correzione, perché a temperature elevate corrispondono densità relativamente minori. Quindi dopo aver tarato il densimetro e preparato i cilindri che saranno poi immersi nella vasca termostatica come in Fig. 8 si può procedere con le misurazioni su ogni cilindro (campione) a determinati intervalli di tempo. Tutta la procedura è canalizzata a misurare la velocità con cui cambia la densità all'interno di ogni cilindro perché dalla velocità di sedimentazione si può calcolare il diametro delle particelle di argilla, approssimate però a sfere, grazie alla formula di Stokes (1880). La formula di Stokes 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 40 g di terreno utilizzato per la prova, al peso secco totale del materiale passante al setaccio 200 in fase di setacciatura a umido.



Fig. 8 - I 5 cilindri dei rispettivi campioni immersi nella vasca termostatica.

3.3.2 Risultati granulometrie

Le curve granulometriche riportate nella fig. 9 vengono costruite integrando i valori ottenuti dalla setacciatura ad umido con quelli della sedimentazione. Le curve ottenute dai vari campioni sono coerenti fra loro come ci si doveva aspettare. I risultati rispecchiano quello che si poteva notare ad occhio nudo, di fatto si tratta di

materiale prevalentemente fine con una frazione argillosa (passante al 0,002 mm) che varia tra il 30 % come nei campioni 2 e 4 fino al 40 % nel campione 5. Nei campioni 2 e 3 la percentuale di sabbia raggiunge il 22% ed è più alta degli altri campioni come si intuiva anche al tatto. I campioni vengono così classificati secondo la classificazione British Standard come un "Limo con argilla sabbioso" avendo come risultati medi il 17% sabbia, 49,2% limo e 33,8% argilla. Il fatto che i risultati delle analisi granulometriche mostrino sistematicamente valori di frazione sabbiosa maggiori di quelli stimati qualitativamente, può essere attribuito alla difficoltà di disgregazione (imbibizione) 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.

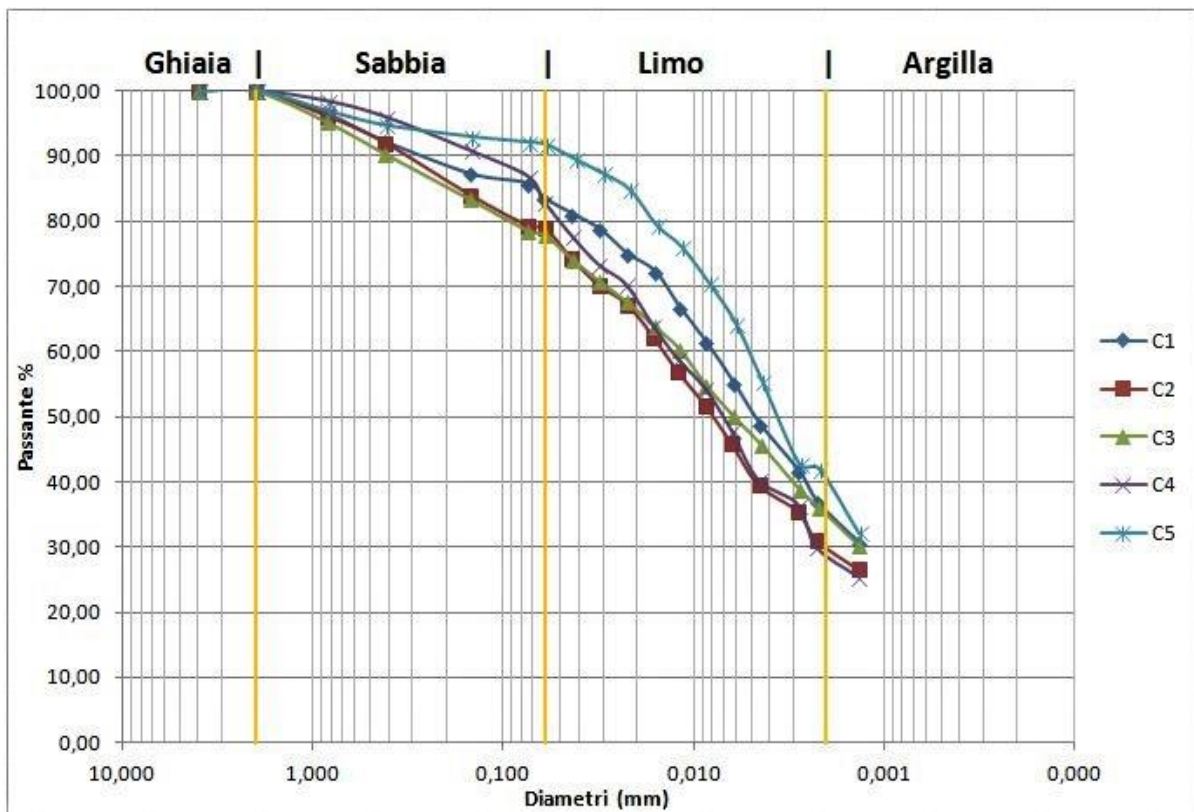


Fig. 9 - Curve granulometriche dei 5 campioni. In ordinate la percentuale del frazione di terreno passante, nelle ascisse il diametro delle particelle in forma logaritmica. In alto la suddivisione in classi granulometriche secondo la British Standard(BS).

L'analisi granulometrica di un terreno non è fine a se stessa ma può suggerire una prima caratterizzazione dell'angolo di involuppo e di resistenza al taglio, come ogni proprietà indice del terreno. In letteratura sono presenti numerosi studi che riguardano la correlazione tra le proprietà indice di un terreno e il suo angolo di attrito di stato critico e residuo. Per la granulometria di un terreno è dimostrato che per valori di frazione argillosa bassi (<20% di CF) l'angolo di attrito residuo di un terreno fine sia molto simile, solitamente leggermente più basso all'angolo di attrito di stato critico dello stesso materiale.

Mentre più aumenta la frazione argillosa più influisce sulla determinazione dell'angolo di attrito residuo per via della riorientazione delle particelle di argilla, per cui deriva un angolo di attrito residuo drasticamente inferiore rispetto all'angolo di attrito di stato critico (Skempton, 1985) (Fig.10).

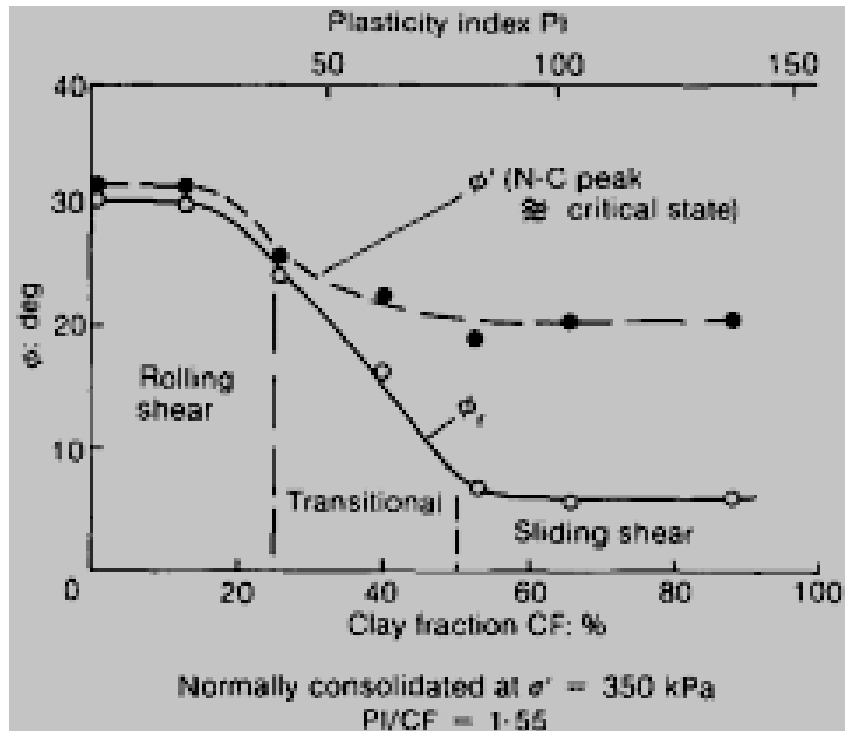


Fig.10 - Relazione tra percentuale frazione argillosa(ascissa) e angolo di attrito(ordinate) (Skempton,1985).

3.4 Limiti di Atterberg

3.4.1 Procedimento

L'analisi granulometrica permette di ottenere valutazioni quantitative per quanto riguarda le dimensioni delle particelle componenti un terreno ma non capta alcuna informazione sulle proprietà dei minerali di argilla, che nel caso di materiali coesivi rivestono una importanza sostanziale e ne influenzano il comportamento fisico-meccanico. Quest'ultimo, nel caso delle argille, è strettamente legato alla presenza di acqua che viene adsorbita dalle singole particelle, creando legami più o meno forti. Quando si aggiunge una certa quantità di acqua ad un terreno argilloso secco, viene a crearsi una sottile pellicola d'acqua adsorbita intorno ad ogni singola particella. Al crescere della quantità di acqua si ottiene una pellicola di spessore maggiore, che ad un certo punto permette alle particelle di scorrere reciprocamente. Il comportamento del terreno è dunque influenzato dalla quantità di acqua presente nel sistema. Per determinare meglio le caratteristiche si determina i Limiti di Consistenza di Atterberg che si basano sul fatto che un terreno argilloso può esistere in uno dei seguenti quattro stati in funzione del contenuto d'acqua: Stato solido, stato semisolido, stato plastico e stato liquido delimitati rispettivamente dal limite di ritiro, limite plastico e limite liquido. I limiti Liquido e Plastico di Atterberg sono stati effettuati su tutti i cinque i campioni sul

materiale passante al setaccio 40, per caratterizzare il terreno a seconda del comportamento e della capacità di assorbire acqua distillata.

Per la determinazione del Limite Liquido si utilizza l'apparecchio di Casagrande che consiste in una coppa (cucchiaio) di determinate misure attaccato ad un meccanismo in grado di far alzare e poi lasciar cadere il cucchiaio da una certa altezza. Prima operazione da svolgere è aggiungere acqua distillata al materiale fino ad ottenere un terreno completamente saturo e malleabile ma non liquido. Dopodiché si pone il materiale all'interno del cucchiaio in modo da avere una superficie piana dove incidere un solco perpendicolare al piano orizzontale con una apposita spatola. Ora si aziona lo strumento che sbatte il cucchiaio sul piano sottostante a ritmo costante fino alla chiusura del solco per un tratto di 13 mm di lunghezza. Appena il solco è chiuso si spegne la macchina e si legge il numero di colpi impressi dallo strumento. Per calcolare il corrispondente contenuto d'acqua bisogna estrarre una parte di quel materiale e pesarlo subito da bagnato e dopo 24 ore in forno da secco. Si ripete questo procedimento almeno tre volte per ogni campione aggiungendo acqua se troppo rigido o facendo essiccare il terreno se troppo liquido in base al numero di colpi ottenuti che deve essere compreso tra 10 e 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 numero di colpi e contenuto d'acqua (w%).

Per la determinazione del Limite Plastico si è riutilizzato il terreno già bagnato avanzato dalle prove con l'apparecchiatura di Casagrande, si prende una quantità di 40 grammi circa e pian piano la si asciuga spalmando il materiale sopra una piastra di vetro. Una volta ottenuto un terreno saturo abbastanza rigido si prova a maneggiare il materiale facendo una sfera con le mani fino a formare un cilindro di circa 3 mm grazie ad un moto di rotolamento impresso con le mani su una piastra di vetro, ora se il cilindretto appena formato si frattura e fessura allora siamo nel campo tra stato plastico e semisolido quindi si pesa 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 4 differenti "sfere" di terreno, facendo in seguito la media (corrispondente al limite plastico) tra i valori di w% ottenuti.

3.4.2 Risultati Limiti di Atterberg

Il Limite Liquido (LL) è ricavato dalla interpolazione lineare dei tre dati ottenuti riportate in un diagramma semilogaritmico che mette in relazione numero di colpi e w%, ricavando così il valore di contenuto d'acqua (w%) al corrispondente numero di colpi 25 (Fig.11).

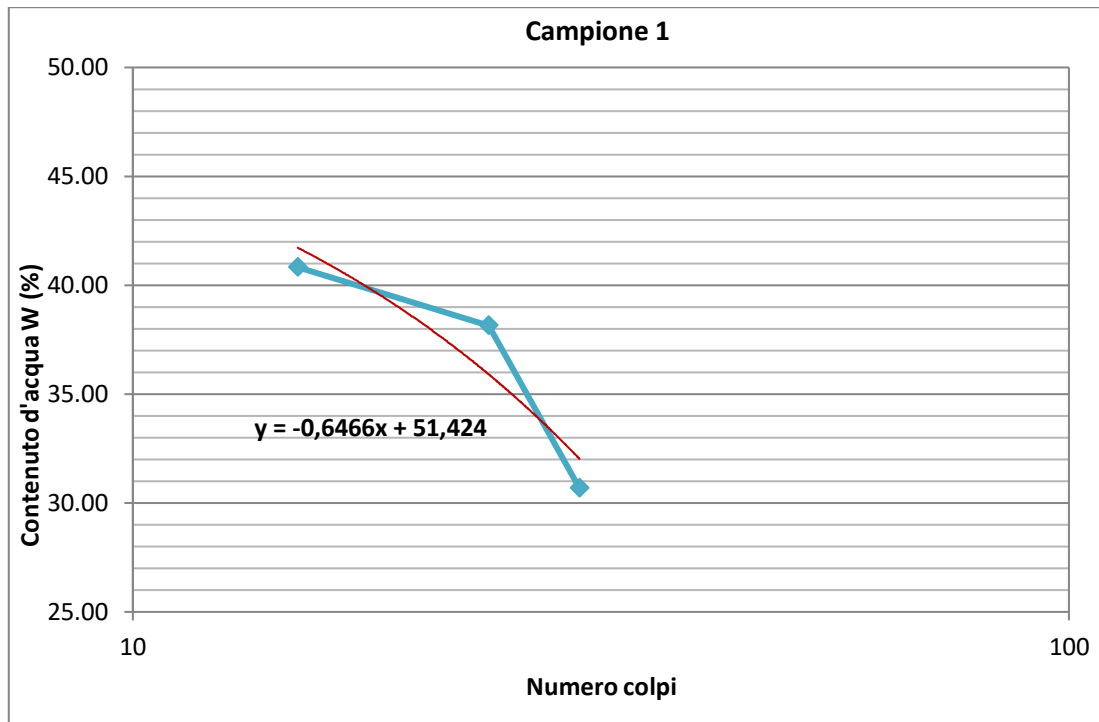


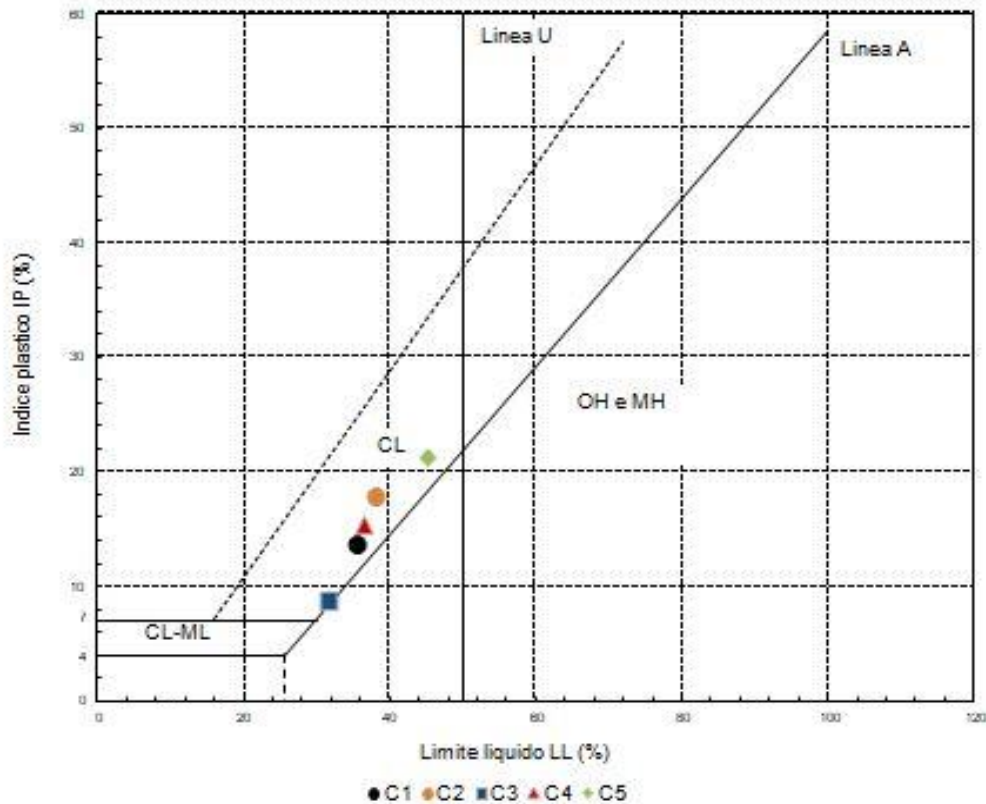
Fig. 11 - Grafico semilogaritmico del campione 1, con nelle ordinate il valore del contenuto d'acqua (w%) e nelle ascisse numero di colpi corrispondente. Nel grafico è inserita anche la linea di tendenza con relativa equazione.

Sostituendo il numero di colpi 25 alla x nella equazione ottenuta dalla linea di tendenza lineare si ricava il contenuto d'acqua w% corrispondente al limite liquido, questo procedimento svolto per tutti campioni. Mentre per calcolare il limite plastico bisogna calcolare la media aritmetica dei 4 valori ottenuti dal contenuto in acqua dei cilindretti. Nella tabella (Fig.12) sono inseriti i valori di limite liquido e plastico calcolati come descritto in precedenza per ogni campione, in più è inserito anche il relativo contenuto in percentuale della frazione argillosa ottenuto dalla granulometria e l'indice di plasticità (IP) e l'indice di attività (A). L'IP si calcola facendo LL meno LP e se risulta; tra 0-5 % materiale non plastico, 5-15 % materiale poco plastico, 15-40 % materiale plastico, >40% materiale molto plastico. Il materiale analizzato risulta essere generalmente poco plastico o plastico. L'indice di attività $A = IP/CF\%$ e descrive l'attività dei minerali argillosi di assorbire l'acqua; $A < 0,75$ minerali argillosi inattivi (esempio Caolinite), $0,75 < A < 1,25$ minerali argillosi normalmente attivi, $A > 1,25$ minerali argillosi molto attivi (esempio Montmorillonite). Nel nostro terreno risultano sempre minerali inattivi.

N°Campione	Limite Liquido(LL):	Limite Plastico(LP)	Contenuto in argilla(CF%)	Indice di Plasticità(IP%)	Indice di Attività(A)
1	35,26	21,54	35	13,71	0,39
2	37,95	20,09	30	17,87	0,60
3	31,61	22,93	35	8,68	0,25
4	36,25	20,84	28	15,42	0,55
5	45,07	23,93	41	21,14	0,52

Fig. 12 - Tabella riportante i valori di ogni campione.

Il grafico di Casagrande ci restituisce una indicazione della tipologia di terreno mettendo in relazione il limite liquido in ascissa e l'indice plastico in ordinate (Fig.13). Nel grafico la retta U indica il limite massimo dei terreni naturali. Dal grafico si legge che tutti i campioni cadono tra l'insieme di terreni definiti come "Limi organici e argille limose organiche a bassa plasticità".



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. 13 - Grafico di Casagrande dove sono riportati i risultati dei 5 campioni.

3.5 Prova di taglio diretto drenata

3.5.1 Procedimento

La prova di taglio diretto drenata utilizzata per trovare l'angolo di attrito residuo del materiale prelevato in campagna, si attua con un'apparecchiatura composta da: -Scatola di taglio (Casagrande) (Fig.14): Una cella quadrata contenente un foro dalle pareti rigide quadrato di dimensione 6 cm per 6 cm, avente la funzione di accogliere il provino. La scatola è formata da due parti quadrate che vengono fissate tra loro con due viti in fase di preparazione del provino e poi lasciate libere di scorrere fra loro così da tagliare il provino al suo interno in fase di taglio.

Il provino all'interno della scatola avrà alla base e sopra una serie di elementi in successione; foglietto di carta filtrante, griglia perforata con apposite scanalature, pietra porosa per favorire il drenaggio.

Per chiudere la scatola alla base vi è una piastra dotata di scanalature mentre sopra una piastra tronco conica di ripartizione del carico dotata di sede sferica su cui viene a gravare il telaio.



Fig. 14 - Immagine delle scatole di taglio utilizzate in laboratorio.

-Macchina di taglio: Sostanzialmente costituita da una pressa orizzontale che viene fatta avanzare a velocità costante, tale velocità ottenuta con un cambio a tre marce e facendo variare in maniera infinitesimale la tensione di alimentazione al motore elettrico. La scatola di taglio inserita nella macchina di taglio rimane fissa nella sua parte superiore e invece è messa in movimento nella sua parte basale così da provocare uno sforzo di taglio al provino al suo interno per una via obbligatoria. La macchina di taglio è in grado di misurare, durante tutto l'arco della prova, la forza di taglio applicata grazie all'anello dinamometrico, la deformazione verticale del provino grazie ad un comparatore bimillesimale e la misura dello scorrimento orizzontale con un comparatore centesimale.

La prova è stata effettuata su tre provini appartenenti al campione 1 perché risultava più rappresentativo. I tre provini sono stati sottoposti a differenti condizioni di consolidazione, rispettivamente a carico verticale σ_n imposto a 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa per indagare la reazione del terreno a diverse stati di consolidazione e ricostruire l'involuppo di rottura. Il materiale come per i limiti di Atterberg è stato fatto passare al setaccio numero 40 perché granuli o aggregati maggiori influenzerebbero troppo la prova di taglio considerando le dimensioni della scatola di taglio. L'esecuzione prevede dunque che una volta inserito il terreno all'interno della scatola ci sia una fase di consolidazione (Fig.15) dove ogni provino viene posto all'interno di una vaschetta che contiene acqua distillata, sopra il banco di consolidazione. Dopodiché viene sistemato il telaio di carico e aggiunti, in base alla taratura delle leve i pesi necessari a raggiungere la consolidazione

desiderata. Per ogni carico aggiunto bisogna aspettare almeno 24 ore per dar modo al terreno di comprimersi liberando l'acqua all'interno.



Fig. 15 - Attrezzatura per la consolidazione di tre provini a differenti sforzi verticali.

Dopo aver verificato che il micrometro posto sopra al provino durante la consolidazione non si muova più e quindi che il provino sia consolidato, si trasferisce il provino all'interno della macchina di taglio facendo attenzione alle varie accuratèzze per non disturbare il provino. Importante che il trasferimento sia effettuato nel minor tempo possibile per evitare il rigonfiamento del provino. Una volta che il provino è sistemato all'interno della macchina di taglio ed è stato imposto il carico verticale costante, uguale a quello di consolidazione, si può far partire la prova collegata al computer. La velocità di taglio con la quale si effettua la prova su materiali coesivi come argille è molto bassa, ordine di 10^{-5} mm al secondo, per permettere che si tratti di una prova drenata. Altrimenti se la velocità fosse troppo elevata, data la bassa permeabilità delle argille, si creerebbero delle sovrappressioni interstiziali che non potendo essere misurate falsificherebbero i risultati non trattandosi più di sforzi efficaci. Dopo circa 24 ore la prova su un provino è terminata dato che ha raggiunto uno spostamento orizzontale di 6-7 mm che equivale al 10 % di deformazione, limite massimo per una scatola di Casagrande. Il dato ottenuto dal primo taglio è la resistenza di picco del terreno, ma per lo studio di un fenomeno di colata in terra riattivata, dove nella superficie di rottura preesistente si instaura un allineamento delle particelle di argilla che alterano la resistenza allo scivolamento, è necessario trovare la resistenza dello stato residuo. Per far ciò o si impongono più cicli di taglio diretto ma comporterebbe un tempo molto elevato di attuazione oppure si estrae la scatola di taglio e si separa in due il provino facendo passare un filo di ferro fra le due parti della scatola dove si è creata la linea di rottura, poi si liscia manualmente la superficie di taglio utilizzando una spatola di ferro (lama rigida). Grazie alla maggiore rapidità è stato svolto il secondo procedimento. Questo procedimento allinea con metodo manuale le particelle di argilla raggiungendo la stessa condizione naturale in minor tempo.

Quindi si ricompone il provino e si inizia la fase di taglio nello stesso identico modo, ottenendo la resistenza al taglio residua. Queste procedure son state effettuate per ogni provino di differente stato di consolidazione a 50,100 e 200 kPa.

3.5.2 Risultati prova taglio diretto drenata

I dati acquisiti dal computer ad intervalli di 15 minuti relativi a spostamento orizzontale, spostamento verticale e sforzo di taglio sono stati utilizzati per costruire i seguenti grafici relativi ai tre provini a consolidazione 50, 100 e 200 kPa. Come generalmente accade il terreno che posto ad uno sforzo di taglio e contemporaneamente ad uno sforzo assiale tende a comprimersi ulteriormente durante la prova come visibile nel grafico sottostante (Fig.16).

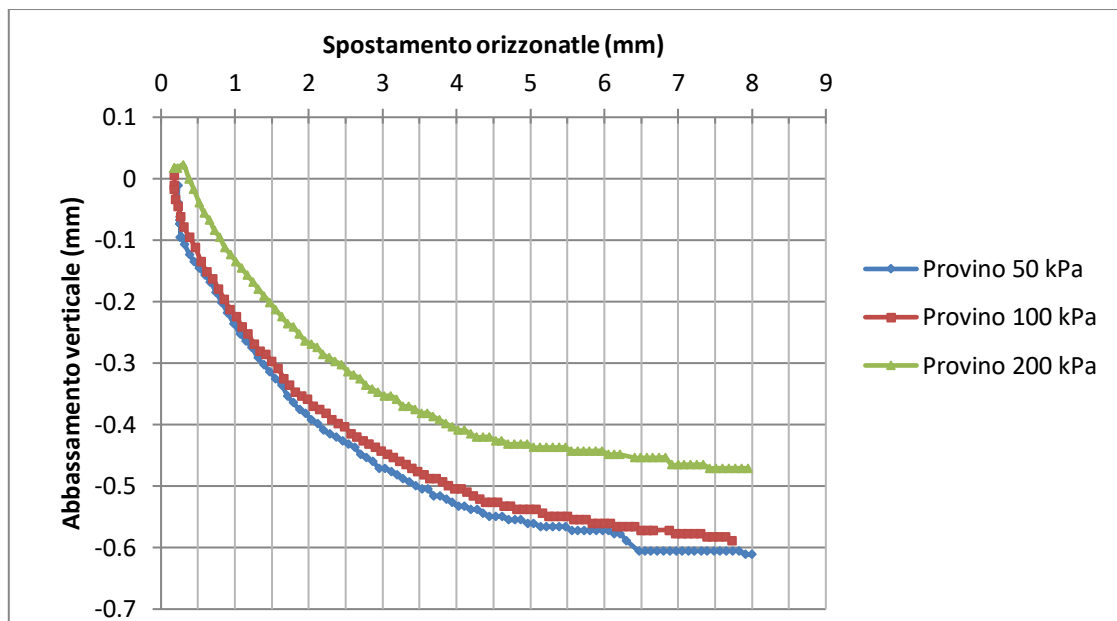


Fig. 16 - Abbassamenti verticali relativi alle prime fasi di taglio di picco dei tre provini del campione 1, alle tensioni normali rispettivamente di 50, 100 e 200 kPa.

Nel campione tutti i provini raggiungono una stabilità, ossia non si comprimono ulteriormente attorno ai 5,5 mm di spostamento. Interessante notare come più il carico normale è maggiore meno il provino si comprime durante la prova, questo probabilmente dovuto al fatto che è più compatto dato che ha subito una consolidazione più prolungata nel tempo e intensa. Dal grafico (Fig.17) che mette in relazione lo sforzo di taglio τ che subisce il provino con lo spostamento orizzontale, si trova il massimo sforzo raggiunto durante la prova che corrisponde allo sforzo massimo che il terreno può sopportare in natura prima di rompersi e quindi provocare una frana. Ma questo sforzo massimo è riferito a quello di picco quindi in condizioni in cui non persiste alcun allineamento delle particelle e un quindi offre una resistenza maggiore. Gli sforzi di picco dei provini 50,100 e 200 kPa rispettivamente sono 28, 51 e 93 kPa.

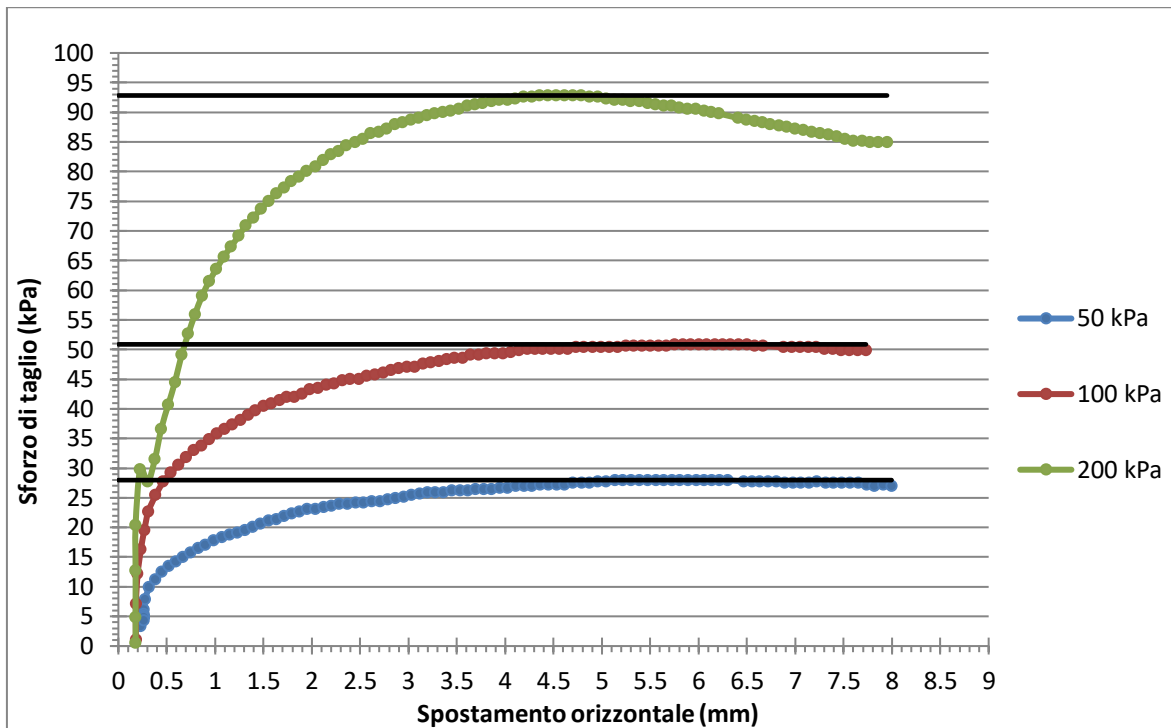


Fig. 17 - Curve sforzo di taglio per spostamento orizzontale riferite alla fase di taglio di picco dei tre provini consolidati a 50,100 e 200 kPa.

Mentre il grafico (Fig. 18) che riporta i dati della seconda fase di taglio riferita alla resistenza residua, ossia successivamente al taglio e lisciatura della superficie di rottura del provino, appare diverso in alcuni aspetti. Infatti presenta un abbassamento molto più rapido ma ugualmente considerevole fino a raggiungere una stabilità già al millimetro 1,2 di spostamento orizzontale per i provini consolidati a 50 e 100 kPa e al millimetro 3 per quello a 200 kPa.

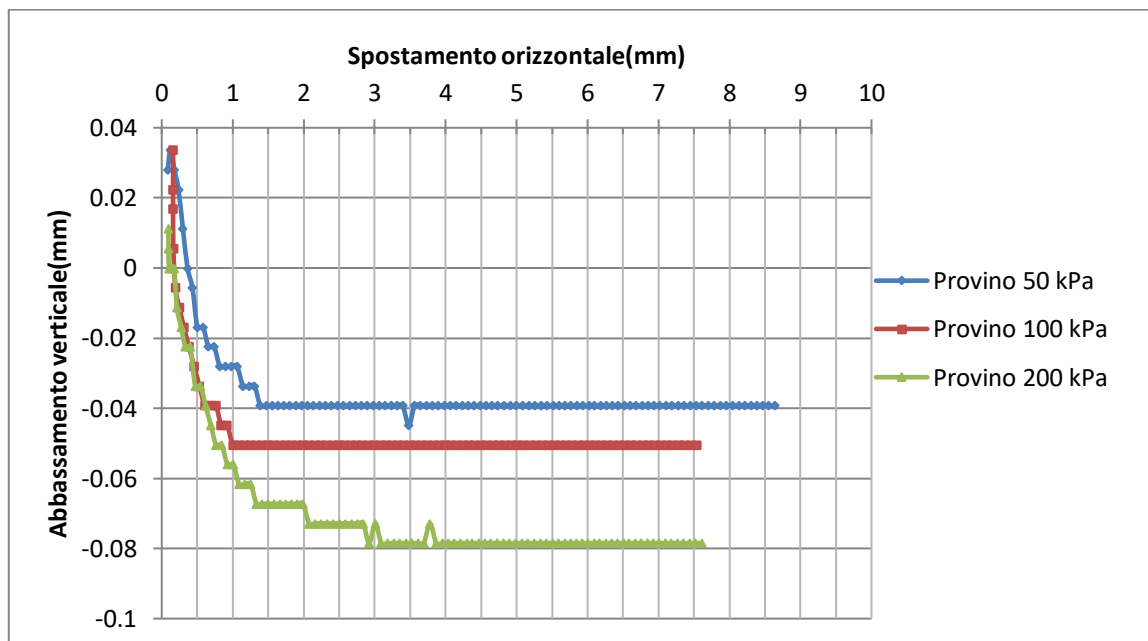


Fig. 18 - Abbassamenti verticali relativi alle fasi di taglio residuo dei tre provini del campione 1, alle tensioni normali rispettivamente di 50, 100 e 200 kPa.

Il grafico (Fig.19) riporta il τ per spostamento orizzontale per ogni provino, dopo che sono stati tagliati con fil di ferro e lisciati con spatola nella superficie di rottura a simulare un allineamento delle particelle di argilla.

Come ci si aspettava i valori di sforzo di taglio residuo sono minori rispetto a quelli di picco, il τ residuo si trova graficamente nel valore finale quando la curva raggiunge teoricamente una stabilità, ossia non diminuisce più nel tempo con lo spostamento. Nel terreno analizzato si ottengono i valori di τ residuo di 22, 36 e 55 kPa relativamente ai provini 50,100 e 200 kPa di carico verticale σ_n .

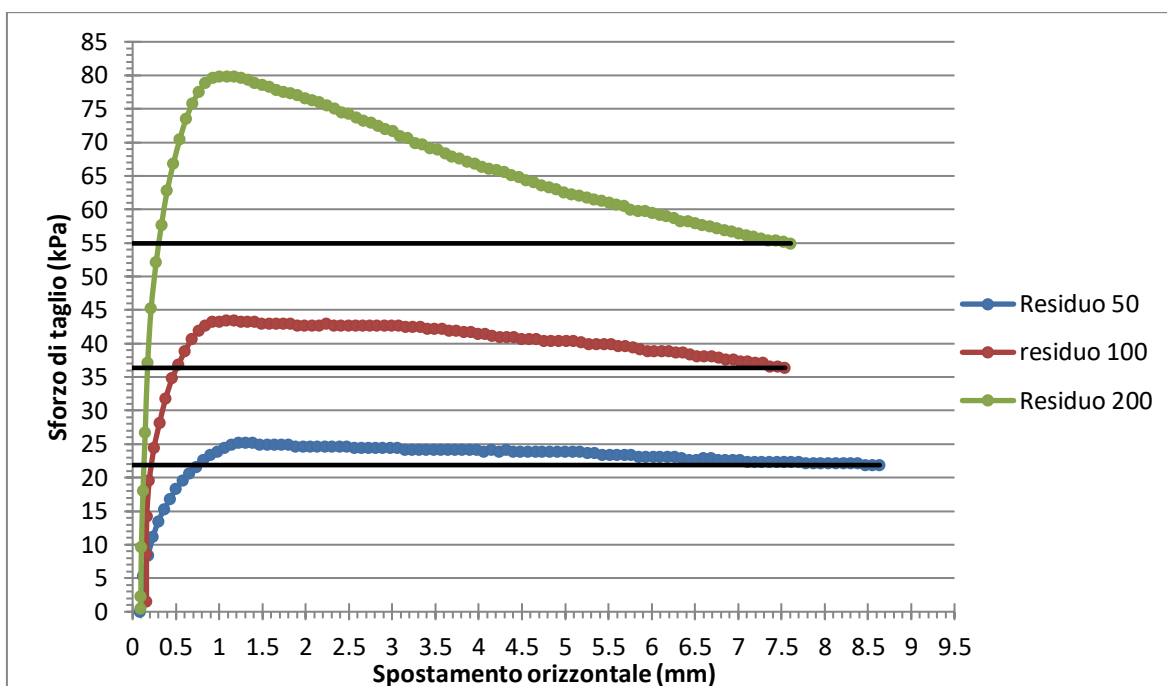


Fig. 19 - Sforzo di taglio per spostamento orizzontale riferite alla fase di taglio residuo dei tre provini consolidati a 50,100 e 200kPa.

4 Interpretazione risultati

4.1 interpretazione

Grazie ai dati ottenuti dalle prove di taglio si riesce a disegnare l'involuppo di rottura nel diagramma di Mohr e Coulomb in termini di tensioni efficaci, perché la prova è stata eseguita a velocità basse così da poter dissipare la pressione di poro ed ottenere risultati di resistenza al taglio efficaci. Nella composizione dei grafici si è imposto il passaggio dell'involuppo sullo zero perché trattandosi di argille normalconsolidate il valore di coesione è zero. Il valore della coesione nel grafico di Mohr-Coulomb corrisponde all'intercetta dell'involuppo col l'asse delle ordinate. Il campione di terreno analizzato essendo rimaneggiato è per forza normalconsolidato di conseguenza imponiamo il passaggio della linea di tendenza sullo zero, sia per quanto riguarda la prova di taglio di picco che quella riferito allo sforzo residuo. In ogni caso graficamente il valore c' di coesione risultava essere sotto i 10 kPa quindi vicino al valore 0 kPa teorico imposto. Queste piccole discrepanze sono dovute al fatto che comunque le prove di laboratorio e le successive interpretazioni comprendono un certo margine di errore intrinseco.

Il grafico (Fig. 20) costruito riportando i valori di τ di picco in relazione al σ_n corrispondente nel piano di Mohr e tracciando la linea di regressione lineare ottenendo l'involuppo di rottura del terreno.

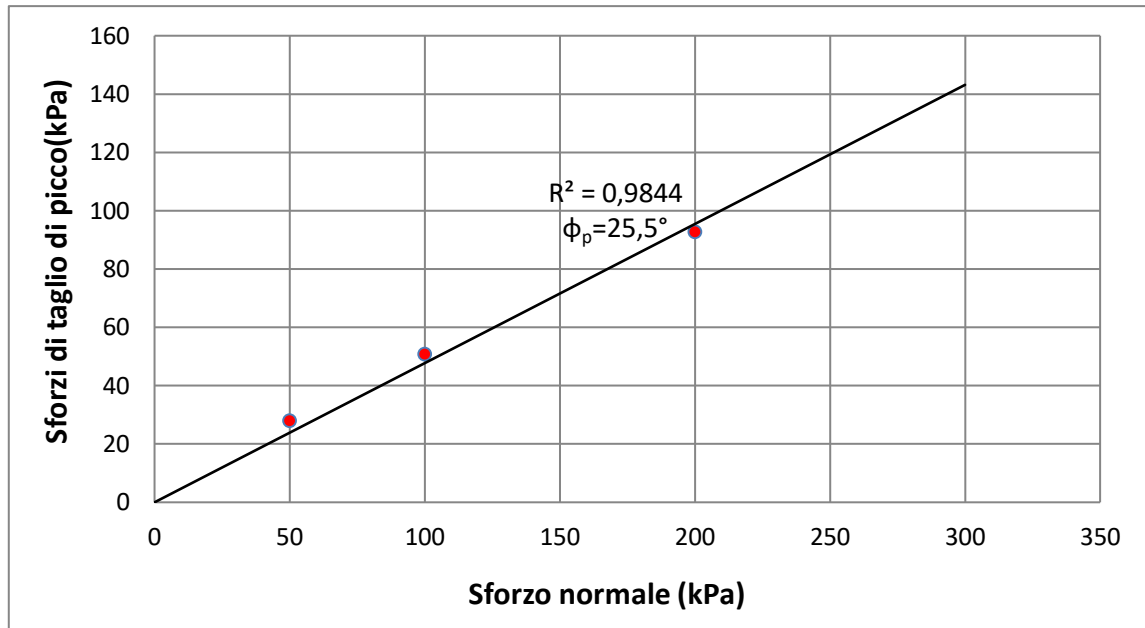


Fig. 20 - Involuppo di rottura di picco ottenuto con il criterio di rottura lineare di Mohr Coulomb per il campione 1.

Dalla equazione relativa alla linea di involucro si ricava l'angolo d'attrito ϕ del terreno, ossia l'angolo massimo di pendenza teorico fino al quale il terreno è stabile. L'angolo ϕ che equivale alla pendenza della linea di involucro è di 25.5° . Nel grafico è presente anche il valore di R^2 che indica la "bontà" della regressione e quanto si discosta dai 3 punti, più si avvicina a 1 e più è attendibile, in questo caso 0,9844 è un valore ottimo. Il grafico (Fig.21) che rappresenta l'involuppo di rottura residuo si ricavano dei risultati differenti come ci si aspettava. L'angolo d'attrito residuo calcolato nella stessa maniera di quello di picco risulta essere $\phi=16,7^\circ$ sempre con il valore di coesione imposto a 0. Per quanto riguarda la attendibilità della linea di tendenza R^2 è 0,7935 quindi meno attendibile rispetto a quella di picco ma comunque significativa.

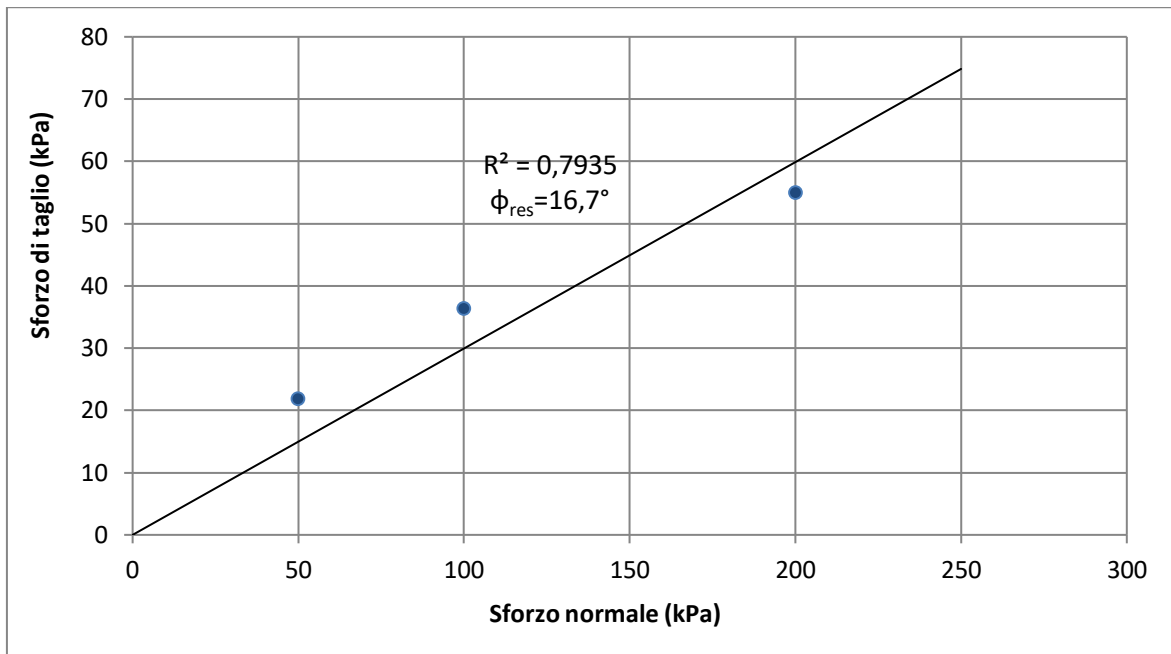


Fig. 21 - Involuppo di rottura residuo ottenuto con il criterio di rottura lineare di Mohr Coulomb per il campione 1.

La differenza che appare tra l'angolo d'attrito di picco=25,5° e quello residuo=16,7° è molto significativa, 8,8° di differenza che sono molto importanti per capire che la possibilità che la colata in terra si riattivi, come successo in maggio di quest'anno, sfruttando la superficie di rottura preesistente dove è avvenuto un allineamento delle particelle di argilla è molto più alta rispetto a quella di formazione di una nuova superficie di rottura. In letteratura sono state proposte numerose correlazioni tra caratteristiche fisiche dei terreni (contenuto in argilla, Limite Liquido, Indice Plastico) e parametri intrinseci di resistenza (angolo di attrito di stato critico o di picco e residuo). Si tratta di correlazioni di natura empirica, basate su dati sperimentali relativi ad argille di varia natura e differente plasticità (Berti M., 2007). Come già visto in precedenza nel paragrafo riguardante la granulometria, la correlazione fra ϕ residuo e di picco con la frazione argillosa del terreno è stata largamente studiata in letteratura ed è stato introdotto un grafico indicativo empirico (Fig. 10) da Skempton nel 1985 che suggerisce i valori di angolo di attrito in base alla frazione argillosa. Considerando il campione 1 su cui è stata effettuata la prova i taglio diretto drenata possiamo verificare se i dati ottenuti sono concordanti con il grafico (Fig.10). Contenuto di frazione argillosa del 35 % del campione 1 suggerisce dei valori di ϕ_{res} intorno ai 18° mentre quelli ϕ_p intorno ai 23-24°. Però i valori di ϕ ottenuti dalle prove di taglio son leggermente diversi, infatti producono un angolo di attrito residuo di 16,7° e un angolo di attrito di picco sui 25,5° con una differenza fra i due valori maggiore rispetto a quella suggerita dal grafico. Questa incongruenza è probabilmente data dal fatto che il grafico è stato costruito empiricamente su certi terreni ma ogni terreno e ogni campione hanno una risposta allo sforzo di taglio differente. Per questo è necessario se fattibile sempre svolgere prove di laboratorio mirate come quella di taglio diretto sul terreno da analizzare, ed utilizzare i grafici in letteratura solo per accompagnare le interpretazione. Oltre alla correlazione con la frazione argillosa, in letteratura si trova la correlazione ipotetica su base empirica che sussiste tra l'angolo di attrito e l'indice di plasticità (Fig. 22).

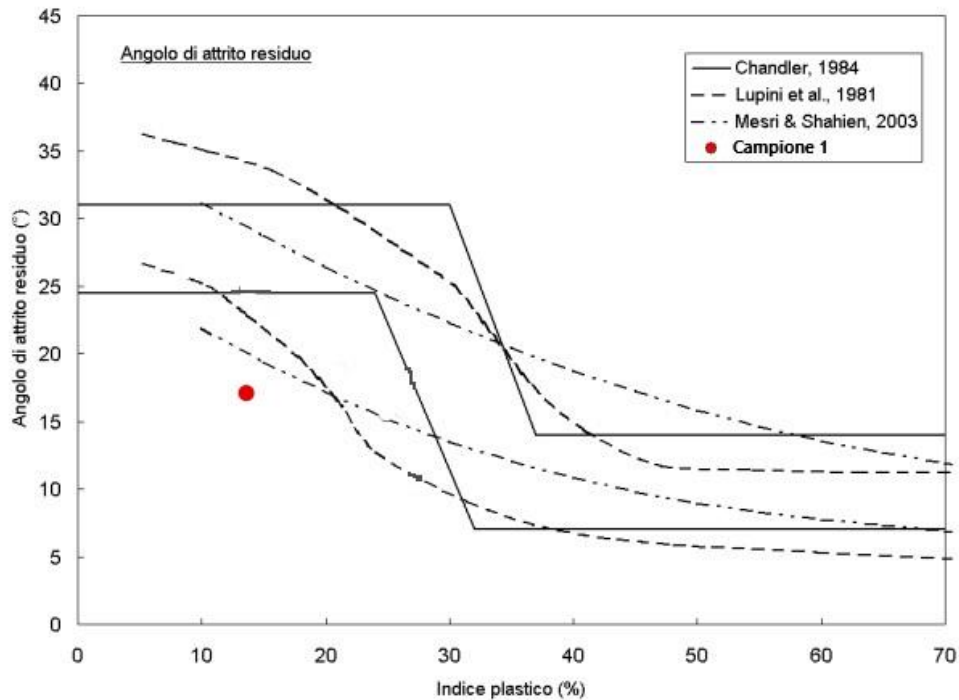


Fig. 22 - Confronto tra il punto sperimentale in rosso del campione 1 e il grafico correlativo che mette in relazione l'angolo d'attrito residuo con l'indice di plasticità.

Il grafico (Fig. 22) mette in correlazione l'IP con l'angolo di attrito residuo secondo curve di correlazione sperimentali, il campione 1 analizzato è segnato all'interno del grafico con un punto rosso che corrisponde al valore di $IP=14$ e di $\phi_r=17^\circ$ (dati ottenuti dalle prove). Il campione in esame risulta al di sotto dalla area del grafico delimitata dalle linee introdotte da Lupini et al. (1981) e Mesri & Shahien (2003), indicata dagli autori come zona possibile di correlazione fra IP e ϕ residuo. La probabile motivazione di questa discrepanza fra le analisi effettuate e la letteratura è proposta nel prossimo paragrafo 4.2.

Fenomeno riconosciuto in letteratura è la dipendenza della resistenza al taglio disponibile in condizioni residue dalla tensione normale efficace da cui deriva una non-linearità dell'involuppo di rottura della fase residua, che risulterebbe invece leggermente curvilinea soprattutto per valori di sforzo normale molto bassi. Lo studio di Eid et al. (2016) mirato a comprendere meglio il cambiamento non lineare dell'involuppo rispetto allo sforzo normale ha sviluppato un grafico (Fig.23) dove mette in relazione il rapporto degli sforzi (τ/σ) con lo sforzo normale. La curvatura dell'involuppo risulta significativa se i provini sono posti a sollecitazioni normali inferiori ai 200 kPa. Per valori di σ_n superiori a 200 kPa i rapporti degli sforzi sono bassi e di conseguenza la linea di involuppo può essere assunta come una retta senza significativi errori.

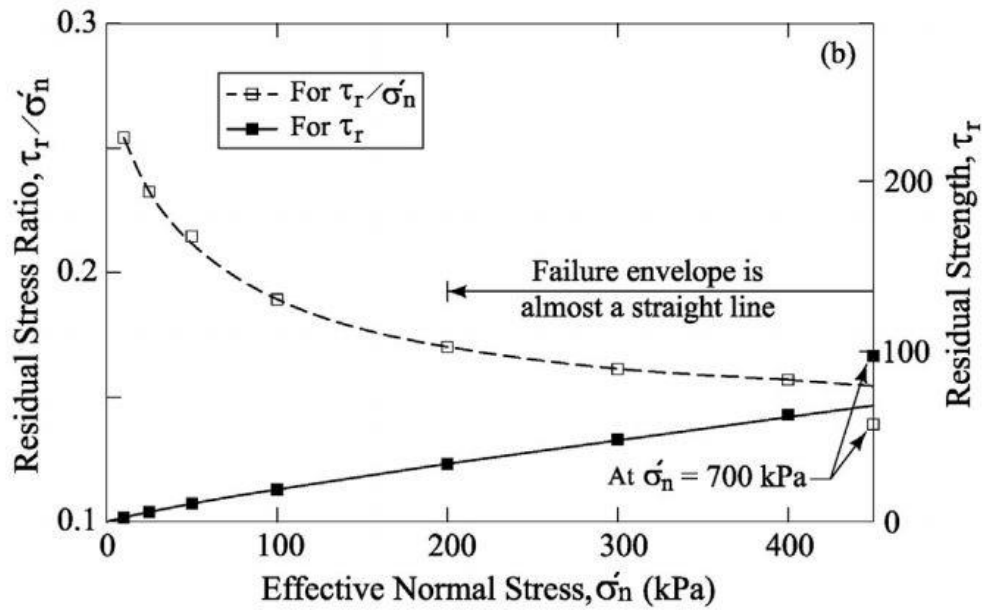


Fig. 23 - Relazione tra rapporto dello stress residuo (τ_r) su sforzo normale efficace (σ'_n) e sforzo normale efficace in kPa (Eid et al.,2016).

Pertanto si è tentato di interpolare nel piano di Mohr i tre punti del campione 1 a differente carico verticale con una curva di tendenza di potenza, così da raffigurare la curvatura dell'involuppo (Fig. 24). Come nel grafico (Fig. 23) introdotto da Eid et al. è stato rappresentato la relazione fra il rapporto di sforzo di taglio (τ_{res}) su sforzo normale efficace (σ'_n) e sforzo normale efficace. Il grafico risultante dalle prove effettuate sul campione 1 sono concordanti con la letteratura e gli studi svolti da Eid et al. nonostante il rapporto τ_{res}/σ'_n risulti leggermente più elevato.

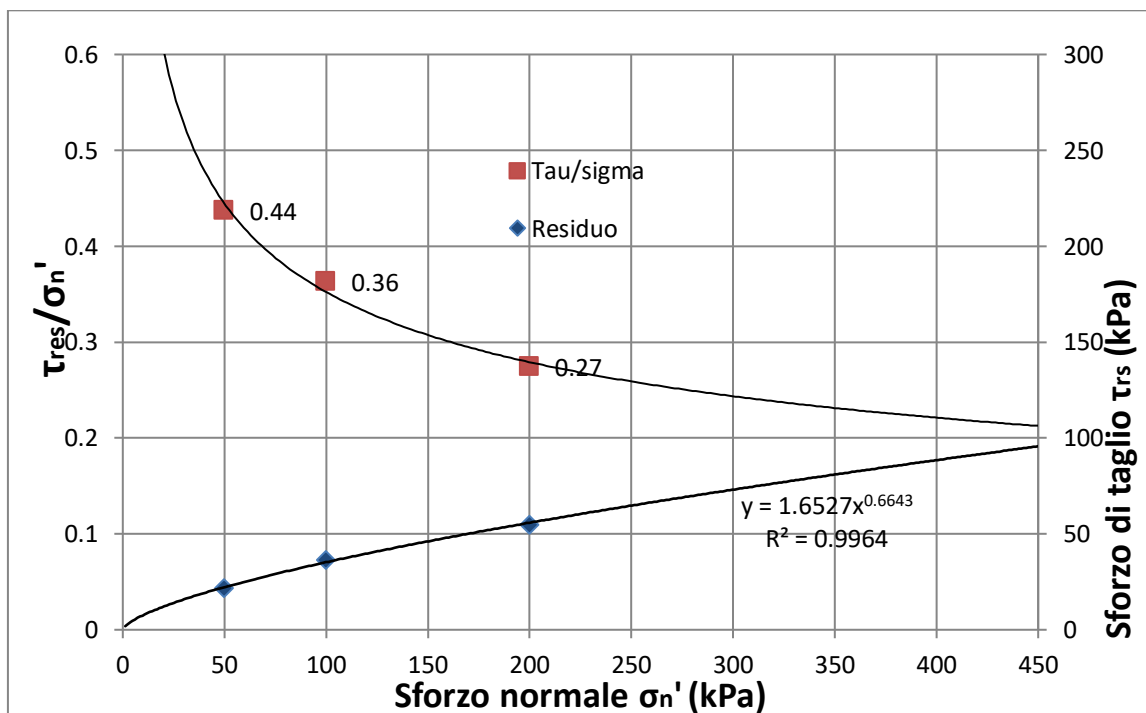


Fig. 24 - Involuppi di rottura residuo curvilineo ottenuto con una linea di regressione potenziale.

Ulteriori informazioni sono state calcolate dai provini del taglio diretto. Al termine di ogni prova di taglio diretto residuo, è stato misurato il volume con un calibro del provino estratto dalla scatola di Casagrande e pesato da bagnato, dopodiché inserito nel forno per 24 ore e successivamente ripesato a secco. Con queste misurazioni si calcola l'indice dei vuoti, il contenuto in acqua, porosità, e PUV totale e a secco. I valori ottenuti sono riportati nella tabella Fig. 25 seguente.

Provino:	Indice dei vuoti e :	Contenuto in acqua(%):	Porosità n :	PUV totale γ_n (KN/m ³):	PUV a secco γ_s (KN/m ³):
Consolidato50kPa	0,67	25,1	0,40	20,17	16,23
Consolidato100kPa	0,67	23,9	0,40	19,98	16,12
Consolidato200kPa	0,61	21,7	0,38	20,41	16,77

Fig. 25 - Tabella riportante i risultati ottenuti dai tre provini a differente consolidazione al termine della prova di taglio.

Come ci si aspettava i risultati riferiti al provino consolidato a 200 kPa di indice dei vuoti e contenuto in acqua sono minori rispetto ai provini a consolidazione minore, logicamente perché sottoposto ad una pressione normale maggiore che produce una compattazione maggiore. Per quanto riguarda il peso sull'unità di volume (PUV) sia totale che a secco non presenta differenze sostanziali, come dovrebbe essere in provini formati dallo stesso materiale.

In ultima analisi possiamo considerare la pendenza media del versante e del copro di frana per stimare la stabilità della frana. Tramite Google Earth è stata calcolata la pendenza media del versante che risulta essere intorno ai 19°, mentre l'angolo di attrito residuo trovato in laboratorio è di 16,7°. Quindi la colata di terra in questione è complessivamente instabile e propensa ad riattivazioni anche per sollecitazioni di entità bassa come le forti piogge di maggio del 2019 che l'hanno riattivata.

4.2 Confronto con materiali simili

Uno studio di più ampio raggio svolto dall'UNIBO nel 2007 sulle argille Liguri degli Appennini bolognesi, presenta risultati molto simili a quelli del materiale di frana studiato. La litologia delle Argille Liguri è di fatto, per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche, identica al terreno di frana infatti le Argille Varicolori della Val Samoggia che sono una formazione delle Unità Liguridi. Lo studio dell'UNIBO è stato attuato su 153 campioni divisi fra Substrato e Coltre, con differenti tipologie di preparazione per le prove, tra preparazione standard, frantumazione meccanica e frantumazione meccanica spinta. I risultati dei limiti di Atterberg sono del molto simili fra substrato e coltre per cui si fa una media generale con un risultato di un $IP=15,2$ perfettamente in ordine con i risultati ottenuti con dai campioni della colata in terra studiata. I risultati sulle argille Liguri sulla composizione granulometrica indicano una composizione media (substrato e coltre) 24.1% sabbia, 41,5% limo e 31,9% argilla che risulta estremamente compatibile con quella ottenuta dai campioni analizzati. Anche l'Indice di Attività uguale a 0,52 è paragonabile ai risultati dei campioni. Quindi in sostanza si tratta di terreni estremamente simili per le proprietà indice del terreno e anche per quanto riguarda i risultati di angolo di attrito e coesione. La coesione ottenuta dalle argille Liguri è molto bassa e tendente allo 0 come ci si aspetta per un'argilla normalconsolidata, per quanto

riguarda l'angolo d'attrito i risultati medi ottenuti su Coltre e substrato, con prove di taglio diretto sono di ϕ di picco=22,4° mentre ϕ residuo=14,6°. Una differenza di quasi 8 gradi di come risulta dal campione 1. Anche nello studio condotto dall'UNIBO si prova a confrontare i dati ottenuti con i grafici presenti in letteratura che mettono in relazione l'IP con l'angolo di attrito residuo (Fig. 26).

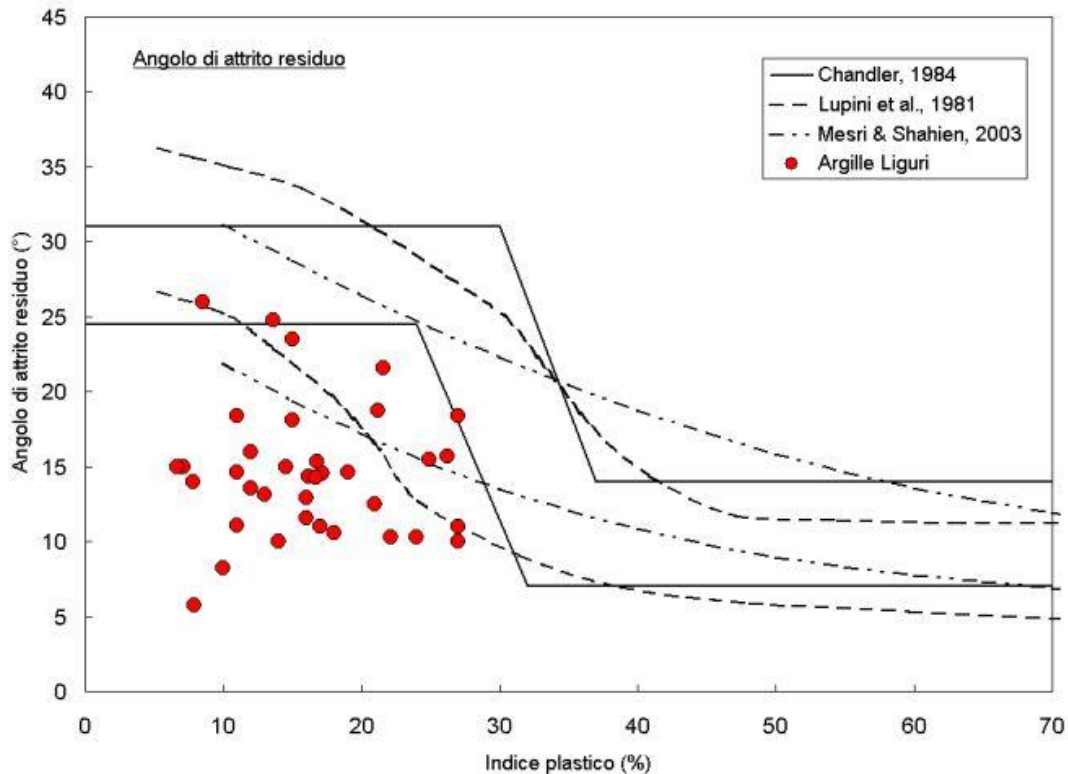


Fig. 26 - Relazioni Indice Plastico-angolo di attrito residuo per i dati delle argille Liguri (punti rossi).

Dal confronto emerge chiaramente che gli angoli di attrito residuo e di stato critico delle argille Liguri sono più bassi di quelli tipici di letteratura. I punti sperimentali si collocano sistematicamente al di sotto delle curve empiriche e la differenza tra i valori medi di ϕ_{cs} e ϕ_{res} ed i limiti inferiori delle distribuzioni di letteratura è di almeno 5°. Questa discrepanza potrebbe essere facilmente spiegata chiamando in causa la presenza di microscaglie e agglomerati argillosi semi-litodi nel terreno: tali agglomerati hanno da un lato la capacità di diminuire l'indice di plasticità (sono essenzialmente inattivi quindi limitano la capacità del terreno di assorbire acqua) ma dall'altro hanno scarsa influenza sui parametri di resistenza (la rottura è comunque controllata dalla frazione argillosa più fine). Se questo fosse vero, tutti i punti sperimentali di Fig.24 andrebbero traslati verso destra (aumento dell'indice di plasticità mantenendo lo stesso angolo di attrito) e potrebbero rientrare nei campi di letteratura. Il problema è però più complesso. Infatti, le analisi condotte con disaggregazione meccanica spinta ed i risultati di ricerche sperimentali (Eid, 2001) mostrano che, nelle argille poco plastiche, anche adottando tecniche di frantumazione estrema i limiti non salgono in modo significativo. In sostanza, pare difficile aumentare i valori di Indice Plastico dei 10-20 punti percentuali necessari per rientrare nei campi di letteratura. Una spiegazione possibile è che anche le tecniche di frantumazione più spinta non riescano di fatto a disaggregare compiutamente gli agglomerati della taglia del limo, che rimangono quindi nel campione abbassandone la plasticità. Dal punto di vista pratico le

ricadute sono evidenti. Le relazioni plasticità-resistenza al taglio proposte in letteratura non sono valide per le argille Liguri visto che i valori previsti di ϕ di picco e ϕ residuo sono decisamente superiori a quelli reali. Ne consegue che tali parametri devono essere necessariamente determinati per via sperimentale (Berti M., 2007).

5 Conclusioni

Le frane sono un fenomeno complesso e possono presentarsi in diverse situazioni morfologiche e geologiche. Per questo per ogni singola frana è richiesto uno studio approfondito che incorpora prove geotecniche in grado di comprendere appieno le condizioni di stabilità della frana e più in generale del versante.

Lo studio della frana in località San Clemente, svolto a caratterizzare il terreno per le proprietà geotecniche e identificare i movimenti della frana relativi alla riattivazione di maggio 2019, è basato su un lavoro a due impronte differenti. Una parte dello studio dedicata alla costruzione della Carta geomorfologica della frana dopo i movimenti di maggio, è caratterizzata dalla uscita in campagna e dal lavoro sul programma di cartografia Qgis. Un'altra parte dello studio dedicata alla determinazione dei parametri geotecnici del materiale coinvolto, è stata effettuata nel laboratorio di Geotecnica utilizzando gli strumenti e le procedure necessarie. Lo studio geomorfologico ha rivelato che la riattivazione di maggio 2019 ha avuto una successione nello spazio di differenti tipologie di avanzamento; scivolamento a monte con formazione di una nuova nicchia di frana, colamento nella parte mediana e scivolamento del piede nel parte terminale.

Oltre allo sviluppo della carta geomorfologica, il sopralluogo alla frana è fondamentale per il campionamento del materiale interessato dalla frana. Il prelievo dei campioni è stato effettuato qualche settimana dopo la riattivazione in maggio, e si tratta di campioni rimaneggiati su i quali sono state effettuate le prove di laboratorio per determinare la granulometria, i limiti di Atterberg e la resistenza al taglio drenata di picco e residua. Le analisi di laboratorio rivelano che i 5 campioni sono piuttosto omogenei tra loro con risultati medi della granulometrie; 17% sabbia, 49,2% limo e 33,8% argilla che definiscono il terreno come un "Limo con argilla sabbioso" secondo la classificazione British Standard. La determinazione del limite liquido e plastico permette di trovare alcune proprietà intrinseche del terreno quali l'indice plastico e il coefficiente di attività dei minerali argillosi. Il terreno risulta essere poco plastico o plastico e generalmente inattivo, significa che è formato da minerali argillosi poco propensi ad adsorbire l'acqua. Inserendo i risultati nella Carta di plasticità di Casagrande, tutti i campioni risultano appartenere al campo dei "Limi organici e argille limose organiche a bassa plasticità". La prova di taglio diretta drenata è stata effettuata solo sul campione 1 per questioni tempistiche. Si tratta della prova di laboratorio più significativa, perché misura direttamente la resistenza al taglio drenata del terreno. I valori di resistenza del terreno sono stati calcolati con l'utilizzando del diagramma di Mohr-Coulomb impostando il valore di coesione a zero perché trattasi di materiale rimaneggiato. Gli angoli di attrito ottenuti sono $\phi_p=25,5^\circ$ e $\phi_{res}=16,7^\circ$. L'angolo di attrito residuo emerge nettamente inferiore a quello di picco come ci si aspettava, ed è fondamentale per la determinazione di stabilità di una frana che subisce fenomeni di riattivazione.

Infine sono stati confrontati i valori ottenuti dalle prove geotecniche con i valori di litotipi simili. Si tratta di litologie appartenenti alle argille liguri presenti negli Appennini settentrionali e i valori geotecnici relativi sono stati ottenuti dalle analisi dell'UNIBO. La resistenza al taglio drenata di picco e residua del terreno a confronto è coerente con quella ottenuta dal campione 1 relativo alla frana di San Clemente. Ma in entrambi i casi si riscontra un valore minore di angolo di attrito residuo rispetto ai grafici presenti in letteratura che mostrano correlazioni fra ϕ_{res} e indice plastico. Questa discrepanza fra i risultati ottenuti e i valori previsti in letteratura è da ricercare nella difficoltà di disgregazione del materiale. Dal quale si deduce quanto in realtà sia importante la fase di preparazione dei campioni e che ogni terreno risponde in maniera differente agli sforzi per questo è consigliato effettuare prove dettagliate su ogni terreno preso in esame.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ASTM, (1985). *Standard method for direct shear test of soils under consolidated drained condition*, Test determination D 3080, Vol. 04.08.
- ASTM, (1998). *Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants*. ASTM International Doc. N. D2217-85.
- Berti M., Simoni A., Biavati G., Marafioti M., (2007). *Studio dei fenomeni franosi di crollo e costruzione di un Database dei parametri geotecnici connessi alle frane*, Convenzione di Ricerca tra la Regione Emilia-Romagna ed il Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università degli Studi di Bologna.
- Carta geologica dell'appennino emiliano-romagnolo a scala 1:10.000, edizione 2011, Sezione: 238060, Toponimo: San Clemente. Acquistabile on-line sul sito geoportale.regione.emilia-romagna.
- Cruden D. M., Varnes D. J., (1996). *Landslide types and processes in Landslides: Investigation and Mitigation*, 36-75.
- Eid T. H., Rabie H. K., Wijewickreme D., (2016). *Drained residual shear strength at effective normal stresses relevant to soil slope stability analyses*, *Engineering Geology*, 94-107.
- Lupini J.F., Skinner A.E., & Vaughan P.R. (1981). *Drained residual strength of cohesive soils*, *Geotechnique* 31, 2, 181–213.
- Mackey H. B., Roering J.J., (2011). *Sediment yield, spatial characteristics, and the long-term evolution of active earthflows determined from airborne LiDAR and historical aerial photographs*, Eel River, California in *Geological Society of America Bulletin*, 1560-1567.
- Mesri G, & Shahien M. (2003). *Residual shear strength mobilized in first-time slope failures*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129, 1, 12–31.
- Picarelli L., Urciuoli G., Ramondini M., Comegna L., (2005). *Main features of mudslides in tectonised highly fissured clay shales*, Springer-Verlag, 15-30, DOI 10.1007/s10346-004-0040-2.
- Simoni A., Ponza A., Picotti V., Berti M., Dinelli E., (2013). *Earthflow sediment production and Holocene sediment record in a large Apennine catchment*, *Geomorphology*, 42-53.
- Skempton A. W., (1985). *Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory*, *Geotechnique* 35: 3 – 18.
- Stark T. D., Choi H., McCone S., (2005). *Drained shear strength parameters for analysis of landslides*, *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.* 131: 575 – 588.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il professore Alessandro Simoni che è sempre stato disponibile durante la stesura della tesi per chiarimenti e dubbi, e soprattutto è stato in grado di trasmettermi sapienza e serietà da applicare sul lavoro. Inoltre vorrei ringraziare anche il tecnico di laboratorio Antonio Calafato che mi ha seguito durante le prove Geotecniche.

Un grande ringraziamento va alla mia famiglia che durante i 3 anni passati mi ha sempre dato la disponibilità di studiare al meglio e mi ha appoggiato in tutto.

Ringrazio la mia fidanzata Nikita che mi è stata affianco per l'ultimo anno e mi è stata di aiuto e conforto sempre.

Ringrazio anche i miei coinquilini Enrico, Jacopo e Sebastiano nonché amici di una vita che mi hanno accompagnato in questa esperienza.

In ultimo vorrei ringraziare i miei compagni di università che hanno reso questi tre anni universitari un'esperienza incredibilmente positiva.