

# **POLITECNICO DI TORINO**

I Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

# Caratterizzazione meccanica di una formazione complessa

**Relatori:** 

Prof.ssa Monica Barbero Ing. Maria Lia Napoli Prof. Claudio Scavia

> **Candidato:** Manuel Cerise

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

# Sommario

In	troduz	zione	5				
1	neralità e caratteristiche delle formazioni complesse	7					
	1.1 Genesi del mélange						
	1.2	Caratterizzazione strutturale	11				
	1.2	.1 Indipendenza di scala	13				
	1.2	.2 Dimensione caratteristica del problema	16				
	1.2	.3 Stima della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP)	18				
1.2.4		.4 Stima della distribuzione granulometrica dei blocchi (BSD)	22				
	1.3	Caratterizzazione meccanica	24				
	1.3	.1 Studio sulla resistenza del mélange condotto da Lindquist (1994)	25				
	1.3	.2 Risultati da Bimtest in situ su un mélange italiano	29				
	1.3	.3 Studio sulla resistenza del mélange condotto da Kalender (2014)	31				
	1.4	Opere ingegneristiche nei mélanges	34				
2	Pre	Prelievo di campioni di mélange dell'Oltrepò Pavese					
	Cenni geologici del sito	38					
	2.2	Prelievo dei campioni	39				
3	ratterizzazione di un Mélange dell'Oltrepò Pavese	41					
	Campioni	41					
	3.2	Contenuto d'acqua	44				
	3.3	Limiti di Atterberg	45				
	3.4	Analisi granulometrica	48				
4	Def	finizione della percentuale volumetrica	53				
	4.1	Verifica delle caratteristiche di autosomiglianza	54				
	4.2	Determinazione della percentuale volumetrica reale del blocco	61				
	4.3	Stima della percentuale dei blocchi	63				
5	Coi	Comportamento a compressione monoassiale					

	5.1	Tecnica DIC	73				
	5.2	Campioni sottoposti a compressione monoassiale	76				
	5.3	Analisi dei dati	81				
	5.4	Tecnica DIC      Campioni sottoposti a compressione monoassiale      Analisi dei dati      Osservazioni e interpretazione dei risultati      Comportamento a rottura dei campioni.      Comportamento a taglio.      Prove di taglio diretto      .1.1    Cassero e realizzazione dei campioni      .1.2    Risultati della prova di taglio diretto      .1.3    Osservazioni e interpretazioni dei risultati della prova di taglio diretto.      .1.3    Osservazioni e interpretazioni dei risultati della prova di taglio diretto.      .1.3    Risultati della prova di taglio anulare      .2.1    Risultati della prova di taglio anulare					
	5.5	Comportamento a rottura dei campioni	90				
6 Comportamento a taglio							
	6.1	Prove di taglio diretto	94				
	6.1.	.1 Cassero e realizzazione dei campioni	96				
	6.1.	.2 Risultati della prova di taglio diretto	101				
	6.1.	.3 Osservazioni e interpretazioni dei risultati della prova di taglio dirett	to.103				
	6.2	Prova di taglio anulare	106				
	6.2.	2.1 Risultati della prova di taglio anulare	110				
С	onclus	sioni e sviluppi futuri	112				
В	Bibliografia						
ALLEGATO A 12							
	ALLE	EGATO B	126				
	ALLE	EGATO C	137				
R	Ringraziamenti						

# Introduzione

Il presente elaborato ha come obiettivo quello di definire le proprietà geomeccaniche di un mélange italiano prelevato in affioramenti nell'area dell'Oltrepò Pavese.

Con il termine "mélange" si fa riferimento a formazioni complesse di origine sottomarina composte da blocchi rocciosi di diversa litologia e forma inglobati in una matrice debole e deformata. Queste formazioni complesse (anche note come bimrock) sono masse rocciose eterogenee formate da una componente meno resistente, generalmente di tipo argilloso, che racchiudono blocchi rocciosi con resistenza maggiore, diffuse in tutto il mondo e conosciute, in funzione della loro formazione e componente mineralogica, con diversi nomi attribuiti alle diverse tipologie esistenti. Dal punto di vista ingegneristico, la progettazione e la costruzione in bimrock risultano problematiche a causa dell'enorme variabilità spaziale, litologica e meccanica che li caratterizza, come verrà brevemente indicato nel primo capitolo dello studio che avrà lo scopo di presentare tali materiali sulla base della letteratura di riferimento.

Considerata l'estrema eterogeneità del mélange in analisi, il cui procedimento di campionamento verrà illustrato nel secondo capitolo, si farà ricorso per la sua caratterizzazione a prove non convenzionali, presentate nei capitoli centrali dell'elaborato.

In particolare, in un primo momento il materiale verrà caratterizzato a seguito di un'analisi visiva, della determinazione del contenuto d'acqua, dei limiti di Atterberg e della distribuzione granulometrica.

Successivamente, sarà verificata l'autosomiglianza e l'indipendenza di scala del mélange esaminato su diverse scale di osservazione, a seguito di indagini precedentemente effettuate su alcuni altri materiali bimrock. Utilizzando l'approccio statistico Montecarlo, mediante la simulazione di campagne di sondaggi, si procederà stimando la percentuale lineare dei blocchi che caratterizza le sezioni indagate, mettendo a confronto i risultati con i valori di percentuale volumetrica dei blocchi.

In ultimo verranno eseguite prove di compressione monoassiali e prove di taglio, in modo da ottenere i parametri di deformabilità e resistenza del materiale estratto; così facendo saranno ricavati i valori del modulo elastico, le resistenze a compressione monossiale e quelle di taglio. Si cercherà di analizzare separatamente campioni di mélange costituiti esclusivamente da matrice argillosa e i campioni contenenti una certa percentuale di blocchi, in modo da verificare l'influenza meccanica degli inerti.

I risultati ottenuti dalle prove saranno in ultimo presentati nelle conclusioni.

## 1 Generalità e caratteristiche delle formazioni complesse

Con il termine "Ammassi Rocciosi Strutturalmente Complessi" vengono definite quelle formazioni geologiche che, a causa della loro composizione e struttura, risultano di difficile classificazione e comportano notevoli problematiche in fase di caratterizzazione e definizione dei parametri di resistenza (A.G.I., 1979; Meyerhof, 1982; Houska, 1982; Picarelli, 1986). L'A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana) nel 1979 provò a classificare le formazioni complesse in modo da definire, in maniera univoca, i metodi di identificazione e di caratterizzazione di tali materiali. Tale analisi si focalizzava principalmente su depositi caratterizzati da litologie arenaceo-pelitiche o calcareopelitiche (A/R) e alla complessità della struttura, dovuta sia alla giustapposizione delle due litologie sia alle deformazioni tettoniche come riportato in *Figura 1.1*. Non sempre però, tale classificazione risulta di facile determinazione.



Figura 1.1. Classificazione delle formazioni complesse secondo A.G.I. (A.G.I., 1979)

Inoltre, in geologia esistono un'infinità di termini per classificare questi materiali complicando ancora di più la loro distinzione. Per questo motivo, Medley nel 1994 coniò la parola *Bimrock*, in riferimento al termine block-in-matrix rock introdotto da Raymond (1984), per identificare tutte le formazioni complesse a blocco-in-matrice. Bimrock fu

definito come: "a mixture of rocks, composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture" (Medley, 1994). L'espressione "geotechnically significant blocks" significa che esiste un marcato contrasto tra i blocchi e la matrice debole, e che la distruzione e la percentuale volumetrica dei blocchi influenzano le proprietà dell'ammasso roccioso a tutte le scale di interesse ingegneristico (Medley et al., 1995; Tsiambaos, 2010). Il termine bimrock è quindi geologicamente neutro, ma utile ai fini ingegneristici semplificando la complicata nomenclatura geologica. A sua volta, i bimrocks sono composti da altre ampie sottoclassi: mélange, rocce di faglia, mega breccia, complessi vulcanici e alcune rocce di meteorizzazione. Il mélange (termine francese che significa "miscela") rappresenta il bimrock più problematico e difficile da caratterizzare. Esso è diffuso in 60 paesi del mondo ed è generalmente distribuito nelle regioni montane associate a fenomeni di subduzione tettonica (Medley, 1994), come è possibile osservare in Figura 1.2. Il mélange è formato da frammenti di roccia di varia scala con di litologia e identità cronologica differente mescolati e immersi all'interno di una matrice debole, generalmente argillitica. Data la sua diffusione e le sue problematiche, il mélange rimane il bimrock più studiato e analizzato. Inoltre, si è visto che i risultati ottenuti per i mélange possono essere applicati ad altri bimrock formati da una frammentazione geologica, come ad esempio le rocce di faglia, lahar, rocce di meteorizzazione e brecce (Medley, 2002). Per questo motivo, in letteratura esistono molti documenti che trattano del mélange, in particolare quello proveniente dal Franciscan Complex, nella California del Nord. Tale materiale prende il nome di Franciscan mélange e generalmente è un mélange di origine tettonica.



Figura 1.2. Distribuzione del mélange nel mondo con rappresentate le differenti genesi (Festa et al., 2010)

In parallelo ai bimrock, esiste un'ulteriore grande categoria con caratteristiche simili denominata *bimsoil*. Quest'ultima nomenclatura proviene dal termine block-in-matrix soil ed è preferibile per materiali complessi costituiti da blocchi immersi in una matrice costituita da terreno (Kalender et al., 2014). Fanno parte di questa categoria, ad esempio, i depositi colluviali, alluvionali e tilliti.

La presenza di materiale mélange e altri simili bimrock rappresentano una vera sfida per l'ingegneria geotecnica. L'elevata variabilità spaziale e meccanica di questo tipo di materiale rende difficoltosa l'interpretazione delle indagini in sito e la caratterizzazione geomeccanica complicando la fase di progetto e costruzione. In particolare, per quanto riguarda le indagini in sito, può capitare di non essere consapevoli della presenza di mélange e interpretare erroneamente i vari sondaggi. Infatti, un errore comune è quello di interpretare i carotaggi ottenuti come continui strati di materiale omogenei trascurando la presenza di singoli blocchi immersi in una matrice argillosa (vedi Figura 1.3). Un altro errore comune è quello di interrompere un carotaggio dopo aver scavato qualche metro in dura roccia interpretandola come parte del bedrock. Ad esempio, quest'ultimo errore è stato commesso durante la stabilizzazione di un pendio in Marin Country nella California del Nord descritto da Medley (1999). Infatti, in tale caso studio vennero eseguiti tre fori di sondaggio scavando fino ad una profondità di 2 metri in roccia dura e resistente giudicandola come parte del bedrock. Successivamente si interpolarono i 3 punti delle varie profondità del "bedrock" e si ipotizzò che tale piano rappresentasse la superficie di scivolamento. Essendo tale piano poco profondo, si decise di mettere in sicurezza il pendio andando semplicemente a rimuovere lo strato di terreno superficiale con un costo stimato di circa cento mila dollari. Tuttavia, in questo caso si era in presenza di materiale mélange, con blocchi inglobati al suo interno di dimensioni molto maggiori ai due metri. Si dovette quindi rimuovere uno strato di terreno di spessore molto superiore rispetto a quello previsto inizialmente con l'introduzione di vari disgaggi per alcuni blocchi di roccia. Tali interventi aumentarono i costi di 1,4 milioni di dollari. Tale spesa si sarebbe potuta evitare se fosse stata presa in considerazione sin dall'inizio la presenza di mélange. Inoltre, si potrebbe pensare che i metodi geofisici potrebbero essere utili per stimare la presenza e la geometria dei blocchi nei bimrocks. Tuttavia, i metodi geofisici nei mélanges sono ostacolati dai numerosi blocchi più piccoli che mascherano la risposta geofisica di quelli più grandi (Medley and Zekkos, 2011).



Figura 1.3. I bimrocks non possono essere correttamente interpretati attraverso i fori di sondaggio. In questa immagine è riportato un errore comune nel quale si va a ricostruire il substrato andando a interpolare i vari massi intercettati dai fori di sondaggio come una stratigrafia continua (Medley et al., 2011)

Il riconoscimento di un bimrock diventa quindi fondamentale e deve avvenire attraverso un attento rilievo geologico (Wakabayashi and Medley, 2004).

#### 1.1 Genesi del mélange

Il mélange può essere formato principalmente mediante tre processi geologici: sedimentazione, tettonico e diapiritico. Questi processi danno origine a un diverso assetto bocco-matrice che possono influenzare le caratteristiche meccaniche.



Figura 1.4. Nei tre riquadri sono riportati le tre differenti distibuzioni dei blocchi rappresentati in bianco a seconda del processo geologico subito. In basso a destra è raffigurata la locazione dei tre diversi mélange (Festa et al., 2010)

Il processo per sedimentazione consiste nella miscelazione e compressione di materiale sedimentato in ambiente sottomarino che successivamente subisce un processo di litificazione. Tale fenomeno dà origine a una disposizione altamente disordinata dei blocchi all'interno del tessuto matriciale dando origini a una struttura tipicamente isotropica. Inoltre, i blocchi hanno diversa forma e litologia e generalmente il loro numero e dimensione variano con la profondità. Il materiale originato da tale processo prende il nome di mélange sedimentario o olistostroma.

Viene chiamato mélange tettonico un aggregato di materiale complesso e caotico prodotto in seguito al processo di subduzione della crosta terrestre. I blocchi, appartenenti ad un miscelamento di materiale proveniente dalla demolizione della crosta oceanica, misto generalmente ad altri derivati dallo smantellamento (per attrito tra le placche) di crosta continentale, sono strutturalmente più ordinati secondo dei piani di taglio creati dalla matrice di materiale fine cementato. Tale disposizione conferisce al materiale caratteristiche anisotrope.

La terza tipologia, il mélange diapiritico, consiste nella miscelazione di materiale incorporato a seguito del processo di diapirismo. Tale fenomeno consiste nella risalita di masse rocciose profonde con perforazione delle rocce superiori a causa di contrasti di densità. Il mélange ottenuto è leggermente anisotropo e presenta dei blocchi ordinati (meno rispetto ai mélange di origine tettonica).

Infine, esiste una quarta tipologia di mélange che risulta però essere la combinazione tra il processo di sedimentazione e quello tettonico. Infatti, come rappresentato in *Figura 1.5*, in ambiente sottomarino, a seguito del miscelamento per sedimentazione, il mélange subisce un processo di subduzione. Tale materiale prende il nome di mélange poligenetico.



Figura 1.5. Processo di formazione del mélange poligenetico (Festa et al. 2010)

## **1.2** Caratterizzazione strutturale

A causa dell'elevato contrasto meccanico tra matrice e blocchi che provocano una forte eterogeneità, la caratterizzazione di mélange e altri simili bimrock rappresenta una vera

sfida per l'ingegneria geotecnica. In alcuni casi, a favore di sicurezza, si considerano solo le caratteristiche della matrice sottostimando la vera resistenza del materiale, aumentando di conseguenza i costi di lavorazioni. Diventa dunque importante analizzare le caratteristiche dell'ammasso roccioso e studiare l'influenza della presenza dei clasti. Infatti, se le analisi geotecniche più classiche prevedono la valutazione delle resistenze e delle proprietà deformative, per il mélange è importante tenere in conto di: percentuale volumetrica dei blocchi; litologia dei blocchi e della matrice; proprietà meccaniche del sistema blocchi-matrice; dimensione, forma e orientazione dei blocchi (Wakabayashi e Medley, 2004).



Figura 1.6. Principali caratteristiche mappabili di un mélange (Wakabayashi and Medley, 2004)

Si è infatti dimostrato che il comportamento di un bimrock è fortemente influenzato dalla presenza dei blocchi, in particolare dalla loro distribuzione granulometrica, forma, arrangiamento spaziale e contenuto volumetrico (Lindquist, 1994; Lindquist and Goodman, 1994). Inoltre, la geometria dei blocchi e la tessitura della matrice intorno ad essi devono essere analizzati perché ci si potrebbe imbattere in eventuali blocchi orientati negativamente verso i pendii di scavo o le pareti di una galleria con il rischio di distacco e successivo crollo (Medley and Zekkos, 2011).

Si precisa che di seguito si parlerà sempre di dimensione dei blocchi e non di diametro. Infatti, basandosi solo su dei fori di sondaggio o sul rilevamento delle dimensioni dei blocchi in superficie, non è possibile individuare le reali dimensioni delle inclusioni rocciose e raramente si misureranno i diametri (vedi *Figura 1.7*). Più nello specifico, in un'indagine in superficie, la dimensione del blocco affiorante difficilmente corrisponde alla dimensione massima e la lunghezza misurata prende il nome  $d_{mod}$  (maximum observed dimension). Nel caso monodimensionale, la corda di intersezione tra il foro di sondaggio e il blocco caratterizza la dimensione del blocco.



Figura 1.7. Nel caso bidimensionale un blocco ha una dimensione apparente pari a  $d_{mod}$ , la dimensione massima osservata. In quello monodimensionale, la dimensione del blocco è indicata dalla lunghezza della corda o l'intersezione tra il foro di sondaggio e il blocco. Raramente la  $d_{mod}$  o la lunghezza della corda equivalgono all'effettivo diametro o la massima dimensione del blocco e quindi la dimensione del blocco è generalmente sottostimata (Medley, 2001)

## 1.2.1 Indipendenza di scala

Le caratteristiche di autosomiglianza del mélange vennero individuate per la prima volta da Cowan nel 1985. Infatti, egli notò che confrontando il mélange a varie scale, esso si presentava sempre uguale (vedi *Figura 1.8*). Infatti, i mélanges e in generale i bimrock vengono definiti come sistemi auto simili: data una certa area analizzata, le sotto-aree presentano una distribuzione dei blocchi che risulta essere una replica dell'area madre a diverse scale di osservazione.



Figura 1.8. Indipendenza di scala dei mélanges (Cowan, 1985)

Il requisito fondamentale di un sistema auto simile è che la dimensione frattale, D, sia misurabile (Mandelbrot, 1983). La dimensione frattale viene definita come:

$$D = \log(N(r)) / \log(r)$$

dove la variabile r è intesa come intervallo di classe di frequenza e N(r) rappresenta la frequenza numerica della variabile r. I dati vengono generalmente riportati su un sistema di assi logaritmici e la dimensione frattale corrisponde all'esponente in valore assoluto della legge di potenza o analogamente alla pendenza del grafico N(r) in funzione di r. A tale proposito, Medley (1994) analizzò circa 1900 blocchi disponendo di carte geologiche e affioramenti di *Franciscan Mélange* e ne misurò la dimensione massima osservata  $(d_{mod})$ . Diagrammando tali valori sul grafico bi-logaritmico appena descritto, l'autore notò che la distribuzione di  $d_{mod}$  seguiva una legge di potenza negativa nella forma N = $r^{-D}$  confermando la proprietà di autosomiglianza (vedi *Figura 1.9*).



Figura 1.9. Istogrammi bi-logaritmici della dimensione dei blocchi nel Franciscan Mélange da due diverse scale di osservazione (m<sup>2</sup> e km<sup>2</sup>). (Medley, 1994)

I grafici riportati in *Figura 1.9* sono in apparenza simili sebbene le dimensioni dei blocchi abbiamo ben 4 ordini di grandezza differenti. Conseguentemente, per verificare l'indipendenza di scala, bisogna confrontare tali istogrammi normalizzandoli. Infatti, l'autosomiglianza è un indicatore necessario ma non sufficiente per dimostrare l'indipendenza di scala. Ulteriori studi sono stati eseguiti a diverse scale di osservazione confrontando diversi istogrammi logaritmici ottenuti da scale dal cm<sup>2</sup> fino a 1000 km<sup>2</sup>. Tale lavoro fu eseguito per il *Franciscan Mélange* da Medley (1994) secondo i seguenti passaggi:

- per ciascuna area esaminata, sono state ottenute le frequenze relative  $N(d_{mod})$ calcolate come rapporto tra il numero di blocchi di dimensione appartenente a ciascuna classe e il numero totale dei blocchi all'interno dell'area analizzata;
- sono state normalizzate le classi dimensionali di riferimento rispetto a √A, dove
  A rappresenta l'area indagata. Ciascuna classe è stata definita in modo tale che ciascun gruppo comprendesse un intervallo di dimensione doppia rispetto alla precedente classe;
- sono stati riportati tutti i risultati su un unico diagramma bi-logaritmico che mostra  $N(d_{mod})$  in funzione di  $d_{mod}/\sqrt{A}$ .



Figura 1.10. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi normalizzate del Franciscan Mélange per identificare l'indipendenza di scala (Kalender et al., 2014, after Medley, 1994)

La Figura 1.10 mostra l'insieme dei risultati ottenuti e ha permesso di trarre importanti conclusioni descritti di seguito. I dati ottenuti dall'analisi di ciascuna area formano grafici che hanno una forma simile fra di loro, indipendentemente dall'area misurata. Il picco dei diagrammi è a circa  $0,05 d_{mod}/\sqrt{A}$ , tale punto venne definito come soglia blocco/matrice di ciascuna scala. A causa delle dimensioni troppo piccole in mappa o in foto per essere misurate, i blocchi più piccoli di  $0,05 d_{mod}/\sqrt{A}$  tendono ad avere una frequenza più bassa della realtà e quindi sono sottostimati. Per questo motivo, i blocchi di dimensione maggiore è

approssimativamente pari a  $\sqrt{A}$  ( $d_mod/\sqrt{A} = 1$ ), ma il 99% dei blocchi è minore di  $0,75\sqrt{A}$ , si definisce quest'ultimo valore come dimensione massima del blocco ( $d_{max}$ ) alla scala di interesse.

La caratteristica di indipendenza di scala è molto importante. Se, come in questo caso, viene verificata, i campioni di laboratorio possono essere considerati come modelli in scala dell'ammasso bimrock in situ e tutte le caratteristiche analizzate e studiate su uno spezzone di dimensioni contenute, possono essere attribuite all'intero complesso.

#### **1.2.2 Dimensione caratteristica del problema**

La lunghezza caratteristica del problema  $(L_c)$  viene definita come la lunghezza di un elemento del modello ingegneristico che risulta essere rappresentativa della geometria del problema in esame (Medley, 1994). Una volta individuato tale parametro dimensionale, si è in grado di delineare opportunamente la dimensione dei blocchi che può ritenersi significativa escludendo quelli di dimensione minore. La determinazione di  $L_c$  avviene secondo considerazioni empiriche, facendo riferimento alla dimensione dell'opera e all'interazione opera-terreno durante la fase di progettazione. Più nello specifico, la lunghezza caratteristica dipende dalla scala di interesse e dalla dimensione dell'opera

- profondità media sulla lunghezza di un pendio (Medley and Sanz, 2004);
- diametro della galleria (Button et al., 2003);
- larghezza della fondazione di una diga (Goodman and Alghren, 2000);
- altezza del campione di terreno sottoposto a prove meccaniche in sito (Xu et al., 2007).

Nel caso di prove in laboratorio,  $L_c$  coincide con una dimensione del provino, generalmente di diametro. Se invece si vuole analizzare una superficie coperta da riprese fotografiche oppure da carte tematiche, la lunghezza caratteristica equivale a  $\sqrt{A}$ , dove A corrisponde all'area in esame.

Come citato all'inizio del paragrafo, tale grandezza è fondamentale per la determinazione della soglia tra blocchi e matrice. Medley (1994) insieme a Lindquist (1995) stabilirono che i blocchi di dimensione superiore al 5% della lunghezza caratteristica possono ritenersi significativi per l'interesse geotecnico in funzione della scala di riferimento. Allo

stesso modo, definirono con blocchi di dimensione superiore al 75% di  $L_c$ , la formazione non può essere più considerata come un mélange, ma come un ammasso roccioso.

Esaminando un esempio espresso da Medley (2001) e mostrato in Figura 1.11, è possibile notare l'effetto della scala del problema sulla soglia blocco/matrice. Inizialmente, si considera un quadrato di dimensioni 100 x 100 m<sup>2</sup> in cui è presente del Franciscan Mélange. In questo caso, la lunghezza caratteristica equivale a radice quadrata dell'area, quindi pari a 100 m. La soglia blocco matrice è pari a  $5\%\sqrt{A} = 5 m$  e il blocco ragionevolmente più grande ha dimensione  $75\%\sqrt{A} = 75 m$ . In guesta prima analisi, facendo riferimento a quest'ultime dimensioni e all'immagine, tutti i blocchi sono considerati, ad eccezione di quello indicato con la freccia che viene considerato come matrice. Successivamente, si vuole progettare una strada di larghezza pari a 20 m. Si assume quest'ultimo valore come la nuova larghezza caratteristica dalla quale si ricava la soglia blocco/matrice pari a 1 m e il blocco ragionevolmente più grande è di 15 m. Per il progetto in esame, il blocco più grande può essere considerato come un ammasso roccioso, mentre tutti gli altri blocchi vengono considerati come appartenenti al mélange, compreso il blocco nero più piccolo escluso nella prima scala del sito. Riducendo ancora di più la scala, come ad esempio la costruzione di una condotta allineata sotto la strada, il blocco di 1 metro diventa un ostacolo ancora più significativo.



Figura 1.11. Esempio che dimostra l'influenza della dimensione dei blocchi sulla scala di interesse: il blocco nero di dimensione pari a 1 m influenza considerevolmente la realizzazione di una condotta rappresentata con la linea tratteggiata, mentre viene considerato come parte della matrice se si considera l'intera superficie di 100 x 100 m<sup>2</sup> (Medley,2001)

#### **1.2.3** Stima della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP)

Un'importante proprietà dei bimrock è la percentuale volumetrica dei blocchi (VBP). Infatti, come verrà approfondito successivamente, all'aumentare della percentuale dei blocchi aumenta la resistenza meccanica del mélange. Tale percentuale esprime il rapporto tra il volume dei blocchi ed il volume della massa totale. La stima delle proporzioni volumetriche dei blocchi della formazione complessa considerata è una proprietà di dominio tri-dimensionale che viene valutata in campo bi-dimensionale o monodimensionale. Infatti, la procedura più corretta per la determinazione della VBP è basata sulla vagliatura fisica del materiale. Tale procedura può essere facilmente applicata su campioni di dimensione da laboratorio, ma diventa praticamente impossibile a scale più grandi. Per questo motivo, si sono individuati metodi alternativi per la stima indiretta della percentuale volumetrica:

- metodi 1D: interpretazione delle misure delle corde dei blocchi misurati sulle carote estratte dai fori di sondaggio;
- metodi 2D: analisi digitale di fotografie.

Nel caso monodimensionale, è possibile definire una percentuale lineare dei blocchi (LBP) calcolata come rapporto tra la somma delle lunghezze delle corde dei blocchi intercettati e la lunghezza totale delle carote estratte. Solo in presenza di un'adeguata densità di campionamento, la percentuale lineare dei blocchi coincide con la percentuale volumetrica. Tuttavia, i blocchi non hanno una forma sferica e non hanno una distribuzione uniforme e non sempre si hanno a disposizione sondaggi di sufficiente lunghezza. Per questo motivo, Medley (1997) realizzò quattro modelli di campioni artificiali di percentuale volumetrica nota e valutò l'incertezza nella stima della percentuale volumetrica dei blocchi in un mélange. Egli fabbricò campioni prismatici di altezza 150 mm, profondità 100 mm e larghezza 170 mm. I blocchi sono stati realizzati di plastilina, argilla e riso inglobati all'interno di una matrice realizzata con del gesso. La distribuzione dei blocchi viene modellata utilizzando la dimensione frattale pari a 2,3, tipica del complesso francescano con un orientamento dei blocchi verticale o orizzontale. Le quattro percentuali volumetriche dei campioni realizzati sono pari a 13%, 32%, 42% e 55%. Successivamente, ciascun campione venne segato in 10 fette le quali vennero subito fotografate. Su ciascun fotogramma, vennero tracciate 10 linee di scansioni come riportato in Figura 1.12. Tali linee simulavano, in scala, i sondaggi praticati in cantiere su un bimrock. Per ciascun dei quattro modelli, si sono simulati quindi 100 fori di sondaggio, lungo i quali è possibile calcolare la percentuale lineare dei blocchi.



Figura 1.12. Fetta tipica ottenuta dal modello con percentuale volumetrica pari al 42%, sono inoltre evidenziate le 10 linee di scansione (Medley, 2002)

In *Figura 1.13* sono riportati i valori delle 100 percentuali lineari dei blocchi per il modello con percentuale volumetrica pari al 32%. Si noti che i valori risultano piuttosto variabili, con valori compresi tra il 0% e 61%. Tuttavia, se si esegue la media totale delle 100 scansioni, si ottiene un valore simile alla percentuale volumetrica dei blocchi.

34.7	25.9	6.3	0.0	27.0	13.3	22.5	26.8	31.1	41.7	
40.0	33.3	44.0	29.6	18.5	39.7	42.5	25.3	19.1	40.3	
31.3	24.5	25.3	21.1	27.8	41.3	53.6	23.4	41.4	23.4	
34.0	33.8	10.1	22.9	56.6	39.0	34.0	23.2	52.6	27.0	
27.2	34.2	21.9	17.0	57.0	51.3	42.4	54.8	51.3	42.0	
26.3	28.1	16.3	26.0	46.7	54.3	45.1	46.1	60.9	48.3	
44.2	28.0	29.9	34.2	57.0	58.8	37.5	41.2	46.9	29.6	
31.3	36.7	41.3	39.5	32.6	30.3	21.9	30.7	33.5	32.7	
50.0	41.5	40.7	26.5	28.0	23.8	27.6	13.0	35.9	36.4	
58.9	45.5	30.5	11.1	28.1	23.3	17.6	30.3	32.4	47.6	

Figura 1.13. Matrice in cui vengono riportate le 100 percentuali lineari ottenuti dal modello con percentuale volumetrica pari al 32% (Medley, 1997)

Nella realtà, quando si eseguono delle indagini in un mélange, sia per ragioni pratiche che economiche, non si ha la possibilità di eseguire così tanti fori di sondaggio. I risultati di percentuale lineare quindi potrebbero variare molto dalla percentuale volumetrica dei blocchi. A questo proposito, Medley (1997), utilizzando un approccio statistico, sulla base dei risultati ottenuti dai 4 modelli, considerò molte posizioni di esecuzione dei sondaggi considerando la realizzazione di 2, 4, 6, 8, 10, 15 e 20 fori di sondaggio. I risultati sono stati poi rappresentati su un diagramma riportando sulle ordinate le percentuali lineari cumulate ottenute da ciascuno step e in ascissa la lunghezza di campionamento  $(N \cdot d_{max})$  espressa come multiplo della dimensione del blocco più grande inserito nel modello (vedi Figura 1.14). Inoltre, per ciascuna serie random, sono state calcolate le deviazioni standard. Si è visto che alcuni punti avevano deviazioni standard pari a 2, ma man mano che la lunghezza di riferimento aumentava, le barre di errore diminuivano e i valori di percentuale lineare cumulata tendevano ai valori di percentuale volumetrica dei blocchi. Si è notato che a una lunghezza di campionamento pari a  $10 \cdot d_{max}$ , i valori di percentuale lineare si stabilizzano e possono essere considerati uguali alla percentuale volumetrica dei blocchi.



Figura 1.14. Diagramma delle percentuali lineari cumulate in funzione della lunghezza di campionamento. Le barre verticali rappresentano la deviazione standard dell'insieme dei dati derivanti dalla combinazione casuale delle linee di scansione (Medley, 1997)

Nel medesimo documento (Medley, 1994), si è voluto determinare l'incertezza legata alla stima della percentuale volumetrica dei blocchi andando a considerarla pari alla percentuale lineare cumulata alle varie lunghezze di campionamento. Per determinare il fattore di incertezza, l'autore calcolò il rapporto tra la deviazione standard e la percentuale volumetrica dei blocchi. In funzione della lunghezza di campionamento, i risultati vennero riportati su un diagramma semi-logaritmico e successivamente interpolati. Le varie curve ottenute permisero quindi la stima dell'incertezza in funzione della lunghezza di campionamento e della percentuale lineare dei blocchi. Quest'ultimo grafico è rappresentato in *Figura 1.15* e si può notare che maggiore è la lunghezza di perforazione, minore è l'incertezza e l'errore che si può commettere nell'eguaglianza tra percentuale lineare e volumetrica dei blocchi. Inoltre, più bassa è la percentuale volumetrica reale, maggiore è l'incertezza o l'errore. Ciò è dovuto al fatto che con una percentuale di blocchi bassa, i sondaggi hanno meno probabilità di intercettare le inclusioni rocciose registrando una minore lunghezza delle corde. Con una quantità maggiore di blocchi, si individueranno più corde a parità di profondità di perforazione.



Figura 1.15. Incertezze nella stima della percentuale volumetrica dei blocchi in funzione della lunghezza di campionamento e percentuale lineare dei blocchi (Medley, 2001)

Nel caso bidimensionale, si analizzano principalmente delle riprese fotografiche attraverso il riconoscimento delle proprietà dei blocchi con metodi di analisi digitali (Medley, 1994, Gokceoglu, 2002, Sonmez et al., 2004). In questo tipo di analisi, si osservano su fotografie di un'area esposta le massime e le minime dimensioni dei blocchi, la superficie affiorante di ciascun blocco, la forma, distribuzione spaziale e orientazione. Più nello specifico, si determinano la  $d_{mod}$  e l'area totale dei blocchi. Tale procedura può essere eseguita manualmente o attraverso l'uso di software che consentono la separazione dei blocchi dalla matrice attraverso la conversione dei pixels in una scala di grigi.

L'approccio è stato validato da Medley e Lindquist (1995) su campioni di percentuale volumetrica nota. Il metodo prevede di calcolare una percentuale areale dei blocchi (ABP) attraverso il rapporto tra l'area dei blocchi e quella totale, ipotizzandola simile alla percentuale volumetrica effettiva. Le incertezze dei risultati sono legate alla forma e all'esposizione dei blocchi rispetto al piano analizzato, dalla possibilità di fotografare direttamente degli affioramenti durante le indagini e dal riconoscimento dei blocchi sui fotogrammi. Gli errori commessi in questo tipo di analisi possono raggiungere il 35% per le dimensioni medie dei blocchi ed il 44% per la percentuale volumetrica (Haneberg, 2004).

#### **1.2.4** Stima della distribuzione granulometrica dei blocchi (BSD)

La stima della distribuzione 3D dei blocchi a partire dei soli dati ottenuti dai fori di sondaggio è stata una caratteristica analizzata da Medley (2002) impiegando i fotogrammi scattati sulle sezioni dei campioni artificiali da lui realizzati per la stima della percentuale volumetrica descritti nel paragrafo precedente. Questi quattro campioni sono stati realizzati con diverse percentuali volumetriche dei blocchi pari al 13%, 32%, 42% e 55%. Inoltre, si è modellata la distribuzione dei blocchi impiegando la dimensione frattale pari a 2,3. Da ciascun campione vennero tagliate 10 fette e su ognuna di esse si definirono 10 linee di scansione in modo da simulare dei fori di sondaggio (vedi *Figura 1.12*). Dalle 400 linee di scansione ottenute, vennero misurate le lunghezze delle corde e confrontate con la distribuzione reale dei blocchi.



Figura 1.16. Istogramma convenzionale dell'effettiva distribuzione dei blocchi (barra nera) per i quattro modelli artificiali di mélange, e la distribuzione delle lunghezze delle corde generate dai 400 fori di sondaggio. (Nota:0.8 mm corrisponde in realtà a 0.75 mm). La più spessa di colore grigio mostra che circa il 60% dei blocchi definiti dalla distribuzione delle lunghezze delle corde ha una dimensione inferiore al 5% $\sqrt{A}$ , valore soglia blocco/matrice (Medley, 2002)



Figura 1.17. Frequenza relativa cumulata della distribuzione volumetrica originale e delle distribuzioni delle lunghezze delle corde intercettate dalle linee di scansione (Medley, 2002)

In *Figura 1.16* e *Figura 1.17* è possibile osservare che nonostante l'elevata lunghezza di campionamento (più di  $170 \cdot d_{max}$  per modello), c'è poca corrispondenza tra il modello originale 3D e la distribuzione delle corde intersecanti. Per esempio, sono presenti corde di lunghezza inferiore alla classe dimensionale più piccola dei blocchi corrispondente a 3-6 mm. Inoltre, sebbene la maggior parte dei blocchi appartengono a quest'ultima classe (frequenza relativa pari al 80%), il numero delle corde è nettamente inferiore. Tale fenomeno è dovuto dalla bassa probabilità geometrica di incontrare un blocco di piccola di mensione, anche se di numero nettamente maggiore. Al contrario, i blocchi di dimensione maggiore vengono identificati più facilmente dalle linee di scansione. D'altra parte, la frequenza relativa delle corde più lunghe è maggiore rispetto alla frequenza relativa delle corde più lunghe, in rapporto al numero totale di campionamenti ancora piuttosto basso, porta a un aumento della frequenza.

Tuttavia, nei casi pratici, si eseguono pochi sondaggi per caratterizzare l'ammasso roccioso. Per questo motivo, Medley (2002) ripetette l'analisi considerando solo metà lunghezza delle linee di scansione, simulando i sondaggi che andrebbero eseguiti per la realizzazione di una galleria o uno scavo. In *Figura 1.18* è possibile osservare i risultati ottenuti e affermare che non è possibile stabilire che la distribuzione 1D delle lunghezze delle corde, ricavati da lunghezze di campionamento normalmente scavate, sia uguale alla distribuzione effettiva dei blocchi 3D



Figura 1.18. Distribuzione volumetrica originale e della distribuzione della lunghezza delle corde intercettate durante i fori di sondaggio considerando solo metà sezione (Medley, 2002)

#### **1.3** Caratterizzazione meccanica

Come annunciato più volte, il mélange e in generale i bimrock hanno la caratteristica di eterogeneità strutturale. Il contrasto tra matrice e blocchi di diversa dimensione fanno sì che la fase di caratterizzazione sia ampiamente condizionata dalle caratteristiche del sito e dalla scala d'indagine. Assume quindi fondamentale importanza analizzare campioni rappresentativi del sito costituiti da blocchi e matrice che possano fornire risultati su scala più ampia (l'indipendenza di scala è un fattore importante per questo tipo di assunzione) in modo da considerare l'ammasso di formazione complessa come un continuo equivalente in fase di progetto.

L'elemento più debole all'interno di un mélange è comunemente lo strato di contatto tra blocco e matrice, in corrispondenza del quale si forma generalmente la superficie di rottura che assume conseguentemente un andamento tortuoso attorno ai blocchi.

Per quanto riguarda il contrasto tra blocco e matrice, Lindquist (1994) selezionò un criterio basato sul rapporto tra la rigidezza del blocco e quella della matrice pari a:

$$\frac{E_{blocco}}{E_{matrice}} \cong 2$$

Il rapporto tra gli angoli di resistenza al taglio suggerito da Medley (1994) basatosi sul lavoro di Lindquist (1994), Lindquist e Goodman (1994) e Volpe et al. (1991) è:

$$\frac{\tan(\varphi_{blocco})}{\tan(\varphi_{matrice})} > 1,5 - 2,0$$

In accordo con quanto analizzato da Sonmez (2009), la resistenza a compressione monoassiale (UCS) dei blocchi e della matrice può essere usato per definire un criterio di contrasto basato sulla resistenza tra blocco e matrice:

$$\frac{UCS_{blocco}}{UCS_{matrice}} > 1,5$$

Per rapporti di resistenza e rigidezza inferiori a quelli appena indicati, la superficie di rottura tende ad attraversare i blocchi piuttosto che passarci attorno.

La resistenza globale di un mélange è direttamente proporzionata alla percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) ed è indipendente dalla resistenza dei singoli blocchi (Lindquist, 1994). Infatti, una sufficiente percentuale volumetrica dei blocchi costringe la formazione di superfici di rottura più tortuose aumentando passivamente la resistenza a rottura (Lindquist, 1994, Medley, 2004). Studi più recenti, testimoniano però il fatto che sotto tensioni normali o di confinamento sufficientemente alte, la superficie di rottura può penetrare all'interno dei blocchi indipendentemente dalla presenza del contrasto tra blocco e matrice (Medley e Zekkos, 2011).

#### **1.3.1** Studio sulla resistenza del mélange condotto da Lindquist (1994)

Lindquist (1994) realizzò dei modelli artificiali con lo scopo di comprendere il comportamento meccanico a rottura del mélange. Egli realizzò più di cento campioni facendo riferimento alle caratteristiche strutturali del Franciscan Mélange. Tali campioni erano di forma cilindrica per l'esecuzione di prove triassiali con diametro pari a 150 mm e altezza pari a 300 mm. La matrice è stata realizzata con un mix di sabbia, ceneri volanti, acqua e cemento, mentre i blocchi di forma cilindrica con una malta cementizia e bentonite. Si è fissata una distribuzione frattale della distribuzione dei blocchi pari a 2 (tipico del Franciscan Mélange) e si sono scelte tre percentuali volumetriche diverse pari a: 30%, 50% e 70%. Inoltre, si sono scelte quattro orientazioni dei blocchi pari a 0°, 30°, 60° e 90° (angolo inteso tra la verticale e l'asse maggiore dei blocchi). Vengono dunque realizzati 5 provini per ciascuno dei 4 modelli rappresentati schematicamente nei primi quattro riquadri a sinistra in *Figura 1.19*. Inoltre, per caratterizzare la matrice e i blocchi, si sono preparati sette campioni di diametro pari a 200 mm costituiti da sola matrice e 10 campioni di 70 mm di diametro realizzati con solo materiale impiegato per realizzare i blocchi.



Figura 1.19. Rappresentazione grafica dei modelli fisici impiegati per la determinazione delle caratteristiche meccaniche (Lindquist, 1994)

A seguito delle prove triassiali, si è deciso di caratterizzare la resistenza del materiale con il criterio di rottura lineare definito da Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

dove  $\tau$  rappresenta la resistenza al taglio, c' la coesione efficace,  $\sigma'$  la tensione normale e  $\varphi'$  l'angolo di attrito interno del materiale. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati in funzione della percentuale volumetrica e dell'inclinazione dei blocchi. In particolare, si osserva che i campioni con la percentuale volumetrica più alta presentano una coesione dimezzata rispetto a quella della matrice, mentre l'angolo di attrito interno è maggiore di circa 1,5 volte (vedi *Figura 1.20*). La riduzione della coesione è dovuta principalmente al fatto che, con l'aumentare del contenuto di blocchi, si presentano un quantitativo superiore di superfici di debolezza al contatto tra blocco e matrice che risultando inoltre più continue. Per quanto riguarda l'angolo di attrito interno, l'incremento è dovuto dall'aumento della tortuosità della superficie di rottura.

Le prove evidenziarono, inoltre, un'evidente influenza dell'orientazione dei blocchi mostrando un andamento crescente della coesione con l'aumentare dell'inclinazione, raggiungendo valori massimi con i blocchi posti verticalmente.

In aggiunta, Lindquist osservò che per i campioni con percentuale volumetrica più bassa, intorno al 25-30%, i valori di coesione e di angolo di attrito rimanevo pressoché invariati rispetto alla matrice. Analogamente, per percentuali volumetriche più alte, pari a circa il 70%, l'angolo di attrito interno non variava rispetto al valore determinato per il campione di solo blocco. Tali effetti suggeriscono la presenza delle due soglie: i blocchi con percentuale inferiore minore del 25-30% non contribuiscono alla resistenza dell'ammasso roccioso e possono essere considerati parte della matrice, mentre i blocchi presenti superiormente al 70%, si trascurano gli effetti della matrice e si considera l'ammasso come un unico blocco di roccia.



Figura 1.20. Variazione dell'angolo di attrito (a sinistra) e della coesione (a destra) in funzione della percentuale volumetrica per diverse orientazioni dei blocchi rispetto all'applicazione del carico massimo (Kalender. 2014, after Lindquist, 1994)

Sulla base dei risultati ottenuti, Lindquist (1994) propose il seguente criterio di rottura Mohr-Coulomb generalizzato per materiale Bimrock:

 $\tau_{bimrock} = c_{matrice} \cdot (1 - VBP) + \sigma \cdot \tan(\varphi_{matrice} + \Delta \varphi(VBP))$ 

Dove  $\Delta \varphi(VBP)$  rappresenta l'incremento dell'angolo di attrito interno con l'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi: Lindquist suggerì un incremento di 3° per ciascun aumento di VBP del 10% al di sopra di VBP = 25%. Si osserva che l'equazione rispecchia i risultati ottenuti dalle prove triassiali: la coesione diminuisce all'aumentare di VBP, mentre l'angolo di attrito aumenta. In realtà, la formula non segue perfettamente i dati ottenuti, ma, a favore di sicurezza, i valori sono stati leggermente modificati. Per quanto riguarda la coesione del bimrock, si osserva che per una VBP=100%, il suo valore si annulla. Tale modifica è stata fatta a favore di sicurezza siccome non si conoscono le proprietà meccaniche delle zone di taglio all'interno del mélange. Invece, per l'angolo di attrito, la legge trovata interpola i valori determinati, ma, confrontati con altri valori già precedentemente trovati attraverso ulteriori analisi, la relazione risulta leggermente più conservativa. Infatti, a seguito di uno studio su una frana colluvionale ad Hong Kong, Irfan e Tang (1993) proposero una legge con valori di angolo leggermente più alti, la quale fornisce a sua volta dei valori decisamente più bassi rispetto a quelli ottenuti dai campioni di mélange prelevati durante la fase di progetto della diga di Scott (California). In *Figura 1.22* e *Figura 1.21*, sono riportati i grafici di confronto che testimoniano quanto appena descritto.



Figura 1.21. Interazione della VBP sull'angolo di attrito interno. I risultati sono confrontati con i valori ottenuti da Irfan e Tang (1993) e quelli ottenuti dai test di laboratorio per la diga Scott. (Medley,2001, after Linquist,1994)

Durante le sue analisi di laboratorio, Lindquist analizzò inoltre l'influenza dalla VBP sul modulo di deformazione secante. Egli notò un aumento del modulo al crescere della VBP, con il raggiungimento dei valori massimi per i campioni in cui la direzione dei blocchi è parallela a quella di applicazione del carico. Osservando la *Figura 1.23*, si può notare

come i valori si posizionano tra il modulo medio della matrice (linea orizzontale) e il modulo valutato tramite media ponderata del modulo della matrice e dei blocchi (linea inclinata). A favore di sicurezza, l'autore propose di considerare il modulo di deformazione pari a quello della matrice, per qualsiasi percentuale volumetrica dei blocchi.



Figura 1.23. Modulo di deformazione al variare della VBP e dell'orientazione dei blocchi (Linquist, 1994)

#### 1.3.2 Risultati da Bimtest in situ su un mélange italiano

Ottenere dei campioni di materiale bimorock indisturbati e analizzabili in laboratorio può essere un'operazione molto complicata. Coli et al. (2011) svilupparono un apparecchio per l'esecuzione di prove di taglio in situ, che prese il nome di Bimtest. Tale macchinario fu usato su un tipico mélange tettonico italiano costituto da scisti-calcarei (SLCC) situato nella miniera a cielo aperto di Santa Barbara in Toscana. Altri studi sono stati precedentemente svolti in questa zona. In particolare, D'Elia et al. (1991) determinarono la resistenza meccanica della matrice argillosa sovraconsolidata attraverso delle prove triassiali ottenendo:  $c_{matrice} = 50 \div 100 \, kPa$  e  $\varphi_{matrice} = 20^\circ \div 25^\circ$ . Inoltre, si caratterizzarono le proprietà delle inclusioni rocciose ottenendo:  $c_{blocco} = 31 \, MPa$  e  $\varphi_{blocco} = 43^\circ$ . Tornando al bimtest, una rappresentazione schematica dello strumento è riportata in *Figura 1.24*. L'apparecchio è costituito da una piastra in acciaio frontale la quale viene spinta verso il terreno da un martinetto a una velocità controllata. Un trasduttore LVDT è inoltre posizionato coassialmente al cilindro idraulico del martinetto

e isolato dall'apparecchiatura della prova mediante un cavalletto in alluminio. Il macchinario sollecita il terreno e causa la formazione di una superficie di rottura tortuosa all'interno del materiale bimrock. Coli et al. (2011) eseguirono sei prove e, al loro termine, dopo aver rimosso l'apparecchiatura, si analizzò la superficie di rottura.



Figura 1.24. Rappresentazione grafica del Bimtest. (a) Configurazione iniziale. (b) Configurazione durante il test (Coli et al., 2011)

I parametri di coesione e angolo di attrito sono stati in seguito calcolati applicando un criterio di equilibrio limite semplificato in funzione delle sezioni trasversali della superficie di rottura. Inoltre, venne misurata la VBP per le sei zone analizzate attraverso una setacciatura speciale, in modo da avere una correlazione tra resistenza e percentuale volumetrica dei blocchi. I risultati ottenuti sono riportati in *Figura 1.25*.



Figura 1.25. Correlazione tra angolo di attrito interno (a sinistra) e coesione (a destra) rispetto alla percentuale volumetrica dei blocchi ottenuti dai 6 Bimtet. I valori riferiti alla matrice sono in termini di tensioni efficaci (Coli et.al,2011)

Analizzando i risultati, è possibile osservare che i valori di angolo di attrito interno aumentano con la VBP secondo una buona correlazione lineare. Al contrario, la coesione mostra una brusca caduta in corrispondenza dell'intervallo di VBP compreso tra il 18% e 26%.; dopo di che rimane stazionario su valori bassi senza alcuna correlazione significativa con la VBP. L'improvviso cedimento della coesione ha luogo per valori di VBP pari al 20-25% che rappresenta la soglia al di sopra della quale i blocchi iniziano a influenzare il comportamento meccanico del mélange.

#### 1.3.3 Studio sulla resistenza del mélange condotto da Kalender (2014)

Vista la difficoltà di disporre di campioni indisturbati di bimrock sui quali eseguire prove di laboratorio, Kalender (2014) ideò un approccio empirico preliminare per prevedere la resistenza complessiva. Il suo lavoro fu quello di raccogliere i dati presenti in letteratura sulle caratteristiche meccaniche dei bimrock in funzione della percentuale volumetrica e sviluppare un criterio per la determinazione dei parametri del bimrock considerando il comportamento meccanico dei contatti tra la matrice e i blocchi. I dati sperimentali storici sono ottenuti dai test in laboratorio su campioni artificiali eseguiti da Lindquist (1994) e Altinsoy (2006), e da un recente studio di Afifipour e Moarefvand (2014). Inoltre, sono stati impiegati risultati ottenuti in situ eseguiti da Coli et al. (2011) e dati ottenuti su campioni di mélange reale analizzati in laboratorio da prove triassiali composti da materiale mélange prelevato dalla diga Calaveras (California) da Roadifer et al. (2009). Kalender si è inoltre attenuto agli studi di Sonmez (2009) e Coskun (2010), i quali hanno definito una relazione che tiene in conto il grado di influenza che il contatto blocco-blocco e blocco-matrice hanno sulla resistenza di insieme di un bimrock. Si sono pertanto stabilite le seguenti linee guida che esprimono la relazione tra la resistenza e le proporzioni volumetriche del blocco (VBP) e possono essere sintetizzate come segue:

- I. Tra i valori di VBP compresi tra 0% e circa il 10%, non esiste un incremento dell'angolo di attrito interno del bimrock ( $\varphi_{bimrock}$ ). Tuttavia, questo incremento è marcato tra il 10% e il 75% di VBP. Valori superiori al 75% non comportano un aumento di resistenza.
- II. Si può supporre che  $\varphi_{bimrock}$  sia approssimativamente pari all'angolo a riposo dei blocchi ( $\alpha$ ) quando VBP è maggiore del 75%, dato che per valori più bassi di VBP i contatti tra i blocchi sono assunti quasi nulli o molto bassi.

- III. Al crescere di VBP, aumenta di conseguenza  $\varphi_{bimrock}$  e  $\alpha$  risulta maggiore di  $\varphi_{matrice}$ .
- IV. Per valori di VBP maggiori del 60% si assume che i contatti tra i blocchi siano molto bassi o quasi nulli, assumendo un valore di UCS<sub>bimrock</sub> che tende a discostarsi dal valore di UCS<sub>matrice</sub>, diminuendo fino a zero per valori di VBP compresi tra lo 0% ed il 100%.

Come annunciato in precedenza, in funzione delle relazioni appena descritte, Kalender (2014) definì delle leggi empiriche delle resistenze dei bimrock in funzione della VBP, rappresentate in *Figura 1.26*. e riportate in seguito sottoforma di equazioni considerando la formazione complessa come un continuo equivalente con comportamento omogeneo ed isotropo:

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matrice} \cdot \left[ 1 + \frac{1000 \cdot \left(\frac{\alpha}{\varphi_{matrice}} - 1\right)}{1000 + 5^{\frac{1000 - VBP}{15}}} \cdot \frac{VBP}{VBP + 1} \right]$$

$$c_{bimrock} = \frac{UCS_{bimrock} \cdot (1 - \sin \varphi_{bimrock})}{2 \cdot \cos \varphi_{bimrock}}$$

$$UCS_{bimrock} = \frac{A - A^{\frac{VBP}{100}}}{A - 1} \cdot UCS_{matrice}$$

dove A è un parametro che rappresenta la forza di contatto blocco-matrice ed è in funzione dei valori di  $UCS_{matrice}$  e  $\alpha$ . In *Figura 1.27*. sono riportate varie curve per la determinazione di quest'ultimo parametro. Si osserva che, maggiore sarà il valore di *A* e più alto sarà il legame tra blocchi e matrice. Per previsioni cautelative, l'autore suggerisce di utilizzare A = 0,1.

Le leggi empiriche ottenute sono state poi confrontate con i valori sperimentali di letteratura presi in considerazione. I valori di  $\varphi_{bimrock}$  che si ottengono sono mediamente 4° inferiori rispetto ai dati sperimentali (scostamento a favore di sicurezza). Invece, per quanto riguarda i valori di  $UCS_{bimrock}$  e  $c_{bimrock}$ , esiste una buona somiglianza con coefficienti di correlazione prossimi a 1. Tuttavia, il confronto tra i valori di resistenza a compressione monoassiale ha poco significato in quanto i dati sperimentali sono stati usati per la definizione del parametro *A*.



Figura 1.26. Rappresentazioni grafiche dell'approccio empirico per la determinazione di  $\varphi_{bimrock}$  (a sinistra) e  $UCS_{bimro}$  (a destra) (Kalendere et al., 2014)



Figura 1.27. Guida pratica per la determinazione di "A" in funzione delle proprietà di contatto tra blocchi e matrice (Kalender et al., 2014)

#### **1.4 Opere ingegneristiche nei mélanges**

La distribuzione dimensionale e la proporzione volumetrica dei blocchi rigidi, insieme alla loro litologia, resistenza e le superfici di discontinuità caratteristici dei singoli blocchi, sono senz'altro fattori critici da tenere in considerazione durante la selezione del metodo appropriato di scavo e dell'attrezzatura necessaria per eseguire lo scavo in sicurezza all'interno del mélange.

La distribuzione delle tensioni all'interno dell'ammasso complesso influenza il comportamento durante la costruzione e a lungo termine di fondazioni di dighe, pendii (Medley e Sanz, 2004) e scavi sotterranei (Button et al., 2003; Moritz et al., 2004; Riedmuller e Shubert, 2002). Lo stato tensionale dipende dalle tensioni in situ e dalle varie litologie; distribuzione granulometrica, orientazione e forma dei blocchi; orientazione delle superfici di taglio della matrice e la presenza di falda; dalla geometria e tipologia di costruzione. Durante l'avanzamento degli scavi, le sollecitazioni elevate possono essere trasferite alla matrice che circonda i blocchi e, nel caso di scavo in galleria, tali sollecitazioni, in condizione di elevate tensioni tettoniche in situ e/o da effetti topografici, possono generare problemi di "squeezing" (Hoek, 2001; Button et al., 2003). Inoltre, nel caso di evoluzione del sito, si deve considerare la generale stabilizzazione idrogeologica durante e dopo la costruzione, siccome la falda ha un importante impatto sulle sollecitazioni e sulle proprietà meccaniche. Nei mélange, la permeabilità può variare di diversi ordini di grandezza in breve distanza. Tale caratteristica dipende dalla presenza di blocchi intatti (impermeabili), blocchi fratturati e matrice che possono avere diverse permeabilità. L'impatto di cambiamenti repentini nella permeabilità, così come il potenziale di flusso preferenziale, deve essere considerato nella progettazione siccome può avere un impatto sulla costruzione. L'installazione di piezometri prima della costruzione può aiutare a valutare il regime idrogeologico locale. Tuttavia, la pratica comune di costruzione di utilizzare drenaggi sub-orizzontali forati per abbassare i livelli di acqua per la stabilizzazione di fenomeni franosi, in un ammasso roccioso complesso risulta poco efficace. La matrice, relativamente impermeabile, drena lentamente, mentre i blocchi fratturati permeabili, penetrati dagli scarichi, possono far sgorgare acqua per un certo periodo, fornendo un'illusione di successo dell'intervento, ma in realtà, si è svuotata solamente l'acqua contenuta nelle fratture dei blocchi (Medley e Zekkos, 2011). In aggiunta, nella stabilità di un pendio, è necessario considerare la percentuale volumetrica dei blocchi e il loro grado di orientazione. Infatti, la presenza di blocchi tende a influenzare l'andamento della superficie di rottura e quindi a modificare i volumi instabili (vedi *Figura 1.28*).



Figura 1.28. Alcuni casi di versanti in bimrock dai quali è possibile osservare l'influenza della posizione, numero e orientazione dei blocchi sull'andamento della superficie di rottura (Medley e Sanz, 2004)

# 2 Prelievo di campioni di mélange dell'Oltrepò Pavese

I campioni di materiale impiegati per la caratterizzazione riportata nel presente elaborato sono stati prelevati nella zona dell'Oltrepò Pavese: area della provincia di Pavia in pieno Appennino Settentrionale. Più in particolare, in data 18/04/2018, con l'aiuto del professore geologo Andrea Festa del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, sono stati estratti dei campioni di mélange di origine sedimentaria nell'area dell'Appennino Vogherese tra Borgo Priolo e Ruino.



Figura 2.1. Zona di prelievo dei campioni di mélange nel comune di Borgoratto Mormorolo (Google Maps)

Infatti, in questa zona, alle pendici del Monte Fratello, sono presenti vari affioramenti superficiali dai quali è possibile prelevare dei campioni senza dover rincorrere a operazioni di scavo superficiale. Per il prelievo, si sono scelti due affioramenti vicini dai quali si sono prelevati due tipologie di mélange differenti. Infatti, come verrà descritto nel paragrafo successivo, la formazione complessa in esame è formata da un mélange sedimentario con gradazione dimensionale inversa dando origine a una successione di strati di materiale con diverse caratteristiche. Tale fenomeno implica una diversa percentuale volumetrica dei blocchi alle diverse profondità (più bassa alla base e più alta nella parte sommitale).


Figura 2.2. Pendici del Monte Fratello nel comune di Borgoratto Mormorolo in provincia di Pavia, sono riportati i due affioramenti di prelievo (Google Earth)

Il primo affioramento è caratterizzato da un materiale più omogeno, costituito principalmente da materiale argilloso (vedi *Figura 2.3*). I campioni prelevati in quest'ultima zona saranno quindi studiati per la determinazione delle caratteristiche meccaniche della matrice. Invece, la seconda zona di prelievo è costituita da un materiale locato a una profondità minore ed è caratterizzata da un'evidente presenza di clasti (vedi *Figura 2.4* e *Figura 2.6*). I parametri meccanici ottenuti da quest'ultimo mélange saranno poi confrontati con quelli ottenuti per la matrice argillosa in modo da verificare l'influenza dei blocchi.



Figura 2.3. Affioramento 1 costituito da mélange sedimentario costituito prevalentemente da matrice argillosa, inoltre è possibile osservare lo strato superficiale alterato dagli agenti atmosferici



Figura 2.4. Affioramento 2 costituito da mélange sedimentario composto da numerosi clasti ben visibili

# 2.1 Cenni geologici del sito

Nel settore di prelievo, diversi olistostromi emergono in superficie. Come riportato da Panini et al. (2002) e Festa et al. (2015), la zona è composta prevalentemente da un mélange argilloso della Val Tiepido-Canossa. Esse sono costituite da una matrice argillitica grigia o rossastra, entro la quale sono dispersi clasti riconducibili a argille varicolori, calcilutiti silicee grigie, da areniti di vario tipo e da innumerevoli altri tipi litologici. Tali inclusi sono di taglia estremamente variabile e possono raggiungere alcuni metri cubi. La formazione complessa ha uno spessore di circa 30 metri ed è limitata alla base da una superficie di erosione concava verso l'alto a scala chilometrica, come rappresentato in *Figura 2.5*. Tale base è caratterizzata da uno strato di scorrimento spesso 50 cm, con lo strato di taglio concentrato alla base di spessore 5-10 cm. In questa zona i clasti sono di dimensione dell'ordine del centimetro con una forma allungata e sono allineati parallelamente.



Figura 2.5. Vista panoramica della formazione complessa costituita da mélange sedimentario alle pendici del Monte Fratello (Festa et al., 2015)

La parte superiore è costituita da un impilamento di diversi mélanges che possono variare da alcuni metri a decine di metri di spessore. I singoli olistostromi sono caratterizzati da una graduazione dei blocchi inversa che possono raggiungere 1 metro di dimensione nella parte sommitale, come riportato in *Figura 2.6*.



Figura 2.6. Colonna stratigrafica concettuale di un singolo mélange sedimentario dove è possibile osservare uno spessore di qualche decimetro alla base rappresentate lo strato di scorrimento e la graduazione dimensionale inversa dei blocchi. Inoltre, sono riportate le due profondità di prelievo (Festa et al., 2015)

## 2.2 Prelievo dei campioni

La presenza della matrice argillosa non ha permesso l'estrazione di campioni con le tecniche di carotaggio più classiche: l'uso dell'acqua avrebbe potuto distruggere il tessuto matriciale. Inoltre, non è stato possibile raggiungere l'area con un macchinario da costruzione, quindi non è stato possibile scavare con l'aiuto di un escavatore. In aggiunta, in estrazioni precedenti, si è provato a eseguire una perforazione a secco. Tuttavia, i problemi sono emersi durante l'estrazione del materiale dalla fustella. Infatti, esso è risultato completamente incastrato e si è dovuto rincorrere all'aiuto di un martello, distruggendo inevitabilmente il campione. Per questi motivi, i campioni sono stati prelevati manualmente facendo uso di scalpello e martello. Si è rimosso inizialmente uno strato superficiale di qualche centimetro nel quale era presente del materiale danneggiato

dagli agenti atmosferici (vedi *Figura 2.3*). Successivamente, incuneando lo scalpello nel materiale, aiutandosi con un martello e applicando una leggera leva, si sono estratti degli spezzoni di dimensione dell'ordine di qualche decimetro (vedi *Figura 2.7*). Questa tecnica si è dimostrata sin da subito complicata. Infatti, il materiale poneva molta resistenza all'estrazione data la forte coesione e, se lo si sollecitava troppo, il campione estratto si rompeva in frammenti più piccoli non sufficienti per le prove di laboratorio. I campioni di mélange prelevati sono stati poi avvolti in carta da giornale e sigillati con dello scotch di carta. Tale tecnica si è dimostrata efficace per una buona conservazione del materiale.



Figura 2.7. Estrazione di un campione di mélange (evidenziato in rosso) attraverso l'uso di martello e scalpello in affioramento 1

# 3 Caratterizzazione di un Mélange dell'Oltrepò Pavese

Nella fase iniziale, per avere indicazioni utili sul comportamento del materiale, oltre a un'attenta e accurata descrizione visiva, sono state eseguite varie prove di laboratorio per la caratterizzazione dei campioni di mélange prelevati nell'Oltrepò Pavese. Le prove eseguite riguardano la determinazione del contenuto d'acqua, i limiti di Atterberg e la distribuzione granulometrica. Essendo i campioni costituiti da blocchi di roccia avvolti da una matrice prevalentemente argillosa-limosa molto compatta, il procedimento per la caratterizzazione è risultato più complicato e ha richiesto alcune modifiche rispetto alla caratterizzazione di un terreno standard.

## 3.1 Campioni

Si è dimostrato che i vari processi geologici e la loro reciproca interazione e sovrapposizione contribuiscono alla formazione di diversi tipi di mélanges caratterizzati da una diversa distribuzione dei blocchi e diversa caratteristica strutturale in meso- e macro-scala (Festa et al. 2019). Come visto nel capitolo 1, i processi possono essere tre: tettonico, sedimentario e diapiritico. I campioni scelti per la stesura di questo capitolo sono quattro: due campioni prevalentemente costituiti da matrice con uno di origine sedimentaria e l'altro di origine tettonica, mentre gli altri due contenenti un certo numero di clasti ben visibili, entrambi di origine sedimentaria. Tutti i campioni provengono dall'area dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino prelevati in superficie da tre diversi affioramenti di questa zona. I primi due campioni sono stati prelevati nel 2017, mentre gli ultimi due nel 2018, come descritto nel Capitolo 2. Sono riportati di seguito le descrizioni dei 4 campioni analizzati:

#### Campione 1

Il campione 1 è un blocco di materiale di forma irregolare prelevato nell'ottobre del 2017 con un peso di 3915,1 g. Il campione è di mélange di origine sedimentaria. Infatti, esso presenta un certo numero di clasti di forma subangolare con alcuni grani di forma subarrotondata con disposizione altamente disordinata all'interno del tessuto matriciale. Tali blocchi sono prevalentemente rugosi e di colore grigio, bianco e con alcuni grani di colore marrone avvolti da una matrice di colore grigio. Inoltre, osservando il campione, non è possibile individuare una stratificazione. Il campione si presenta molto fratturato e visibilmente alterato.



Figura 3.1. Campione 1: mélange sedimentario

#### • Campione 2

Blocco prelevato nel 2017, costituito prevalentemente da matrice di forma irregolare e peso di 4722,4 g. Si presenta con caratteristiche altamente diverse rispetto al campione 1. La matrice è di colore grigio/rossastro la quale definisce un'evidente stratigrafia. Lo stato del materiale è molto fessurato e alterato. I grani visibili a occhio nudo sono pochi e di colore prevalentemente grigio scuro e bianco con sfumature di rosso, di forma lamellare subangolare e rugosi. A differenza degli altri tre campioni, il campione 2 è infatti di origine tettonica. Le forti pressioni dovute a fenomeni di subduzione hanno deformato e ordinato i pochi clasti presenti lungo superfici di taglio creando dei piani di fogliazione.



Figura 3.2. Campione 2: mélange tettonico

#### • Campione 3

Campione prelevato nel 2018 (vedi Capitolo 2), di forma irregolare e peso di 4470,5 g. Esso presenta caratteristiche litologiche molto simili al campione 1: colore grigio, non stratificato, con qualche fessura e alterato. Infatti, anche il campione 3 è di origine

sedimentaria. I grani sono di colore grigio e bianco, di forma in prevalenza subangolare con alcuni grani di forma subarrtondata e rugosi. Si suppone quindi che i due blocchi (1 e 3) siano costituiti dallo stesso materiale.



Figura 3.3. Campione 3: mélange sedimentario

#### • Campione 4

Campione prevalentemente costituito da matrice prelevato nel 2018 (vedi Capitolo 2), di forma irregolare e di peso pari a 4166,2 g. In questo caso, il materiale presenta caratteristiche simili al campione 2: matrice di colore grigia/rossastra, con stratificazione netta ondulata, molto fessurato e alterato. I blocchi sono prevalentemente di colore rosa e bianco con qualche sfumatura di colore grigio, di forma lamellare subangolare e rugosi. Da tale descrizione, si potrebbe pensare che il campione corrisponda a un mélange di origine tettonica, tuttavia il campione è stato prelevato nello stesso affioramento del campione 3 e quindi anche esso è di origine sedimentaria. Rispetto al campione 3, il campione 4 è stato prelevato a una profondità diversa presentando quindi caratteristiche litologiche differenti (vedi Capitolo 2). Le caratteristiche di fogliazione sono invece attribuite a fenomeni franosi avvenuti in passato in ambiente sottomarino.



Figura 3.4. Campione 4: mélange sedimentario

### **3.2** Contenuto d'acqua

Un'importante grandezza per la caratterizzazione del materiale è il contenuto d'acqua che definisce la quantità d'acqua contenuta nei vuoti rapportata alla quantità di materia solida. Per definire tale grandezza, da ciascun blocco sono stati ricavati 10 spezzoni più piccoli di circa 100 g l'uno. Ciascun sottocampione è stato pesato prima e dopo 24 ore di essicamento in forno alla temperatura di 100°C. Questo procedimento è stato ripetuto fino a quando la massa finale del campione non si è assestata (si veda la norma ASTM D2216-19<sup>1</sup>). Una volta ottenuta la massa iniziale nel suo stato naturale ( $M_i$ ) e la massa essiccata ( $M_f$ ) è possibile determinare il contenuto d'acqua mediante la formulazione:

$$w = \frac{M_i - M_f}{M_s}$$

dove  $M_s$  corrisponde alla massa solida e, se si considera un terreno, questo parametro corrisponde alla massa essiccata  $M_f$ . Per quanto riguarda il mélange, invece, quest'ultimi due valori non coincidono. Infatti,  $M_s$  corrisponde alla massa della sola frazione fine (sabbia, limo e argilla) depurata quindi dalla massa dei clasti i quali sono impermeabili all'acqua. Per questo motivo, una volta determinata la massa essiccata, i campioni sono stati disciolti in acqua e passati al setaccio ASTM numero 60 in modo da determinare il peso del trattenuto dei grani con diametro maggiore di 0,25 mm e sottrarlo a  $M_f$  per la determinazione della massa solida corretta  $M_s$ . Una volta ottenuto il contenuto d'acqua per i 10 sottocampioni di ciascun campione, è stata computata una semplice media aritmetica in modo da ottenere un unico valore globale di ciascun blocco.

	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Campione 4
w [%]	5,30	4,26	4,41	6,33

Tabella 3.1. Contenuto d'acqua dei quattro campioni analizzati

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ASTM D2216-19, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org

## 3.3 Limiti di Atterberg

Nei terreni a grana fine, i limiti di consistenza o limiti di Atterberg sono valori di contenuto d'acqua corrispondenti a stati fisici ben definiti. Infatti, al contrario di un terreno grossolano, sono la composizione mineralogica e le condizioni ambientali a governare le proprietà delle particelle e la loro interazione con l'acqua. Si definiscono quindi quattro condizioni in cui si può presentare un terreno a seconda del contenuto d'acqua, definiti come stati di consistenza: stato liquido, stato plastico, stato semisolido e stato solido. I valori limite corrispondenti alla transizione da uno stato di consistenza a un altro sono proprio i limiti in esame. In particolare, si definiscono i limiti che delimitano il campo di comportamento plastico del materiale definiti come limite liquido e limite plastico. Nello specifico, un contenuto d'acqua più elevato del limite plastico corrisponde ad uno stato semisolido.

Per la determinazione dei limiti di Atterberg della matrice dei campioni in esame, siccome la prova interessa solo la parte fine del materiale, delle porzioni di mélange provenienti dai quattro campioni sono stati sciolti in acqua distillata e poi vagliati nel setaccio ASTM 40 di apertura 425 µm. Il passante è stato poi accuratamente mescolato con eventuale aggiunta d'acqua distillata, fino a ottenere una pastella omogenea.

Il primo limite ad essere determinato è il limite liquido facendo uso dello strumento noto come *cucchiaio di Casagrande* (vedi *Figura 3.5*). Una parte della pastella ottenuta (circa 100 g) viene messa nel cucchiaio e, tramite un apposito utensile, viene realizzato un solco. Si mette quindi in movimento il cucchiaio e si contano i colpi richiesti per far chiudere il solco per un tratto di circa 10 mm di lunghezza. A questo punto si determina il contenuto d'acqua del materiale misurando la variazione di peso dopo almeno 24 ore in forno a 100°C. Le operazioni descritte vengono ripetute dopo aver fatto evaporare naturalmente una parte dell'acqua contenuta nella miscela, in modo da poter disporre di una nuova coppia di valori (numero di colpi-contenuto d'acqua). Il numero di colpi considerato valido è compreso tra 15 e 30. Ottenuti circa 6 valori di queste coppie, è stato tracciato un diagramma come quello in *Figura 3.6*, e da esso è stato ricavato il limite liquido corrispondente convenzionalmente a un numero di colpi pari a 25.



Figura 3.5. A sinistra è riportata la pastella di materiale fine e acqua distillata usata per la determinazione del limite liquido, a destra il cucchiaio di Casagrande con del materiale e il solco inciso



Figura 3.6. Grafico per la determinazione del limite liquido 1 campione 2

Il limite plastico è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il campione di terra inizia a perdere il suo comportamento plastico, ossia il campione non può più essere modellato senza che si formino fessure o senza che si abbiamo fenomeni di sbriciolamento. In accordo con tale definizione, il limite viene determinato formando manualmente, su una lastra di vetro, dei bastoncini del diametro di circa 3 mm e se ne determina il contenuto d'acqua quando essi iniziano a fessurarsi. Si è assunto come limite plastico la media di 3 misurazioni.



Figura 3.7. Bastoncini di matrice argillosa per la determinazione del limite plastico

La differenza tra il limite liquido e il limite platico fornisce l'intervallo all'interno del quale il materiale ha un comportamento plastico e è definito come indice di plasticità *PI*:

$$PI = w_L - w_P$$

Viene inoltre determinato l'indice di consistenza IC calcolato nel modo seguente:

$$IC = \frac{W_L - W_L}{PI}$$

I passaggi qui sopra descritti sono stati ripetuti quattro volte per ciascun campione da quattro miscele diverse e infine mediati in modo da avere un risultato più affidabile a causa della grande variabilità della prova.

Si riportano di seguito i valori ottenuti in laboratorio dai quattro campioni di mélange in esame già mediati.

	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Campione 4
Limite liquido [%]	61,88	73,82	67,08	90,35
Limite plastico [%]	24,75	20,91	23,49	30,66
PI [%]	37,13	52,91	43,59	59,69
Indice di consistenza	1,52	1,32	1,45	1,41

Tabella 3.2. Risultati ottenuti dai limiti di Atterberg per i quattro campioni dell'Oltrepò Pavese. I valori di limiti sono stati ottenuti mediando i risultati ottenuti su 4 prove eseguite da ciascun campione

Si noti in *Tabella 3.2* che i valori corrispondenti ai campioni 1 e 3 sono simili, confermando l'ipotesi fatta in precedenza nella quale si affermava che si trattasse dello stesso tipo di materiale. I campioni 2 e 4 invece presentano differenti valori di limiti, ma un simile PI. In conclusione, si può affermare che il materiale fine costituente la matrice del mélange presenta una media-elevata plasticità con alti valori di indice di consistenza.

## 3.4 Analisi granulometrica

Per conoscere la composizione di dimensione delle particelle costituenti i campioni studiati, è necessario definire il campo di variazione e la distribuzione di frequenza delle dimensioni delle particelle attraverso un'opportuna procedura, nota come analisi granulometrica. Tale operazione viene eseguita mediante un'operazione di vagliatura meccanica, nel caso di materiale a grana grossa, e con un'analisi per sedimentazione o aerometria, nel caso di materiale a grana fine.

Nell'operazione di vagliatura meccanica (si veda la norma ASTM D422<sup>2</sup>), il materiale grossolano viene inserito all'interno di una pila di setacci con apertura decrescente posti sopra una tavola vibrante. Per una corretta vagliatura, si aziona la tavola per 15 minuti. In seguito, si misura la frazione trattenuta da ciascun setaccio, riportando i risultati in un diagramma, che ha sull'asse delle ascisse il diametro equivalente delle particelle (definito dall'apertura dei setacci) e in ordinate la percentuale (in peso) delle particelle. Le percentuali di passante sono rappresentate in funzione logaritmica in modo da rappresentare tutte le dimensioni delle particelle che si collocano in un intervallo che interessa diversi ordini di grandezza. La curva che così si ottiene viene denominata curva granulometrica.

Siccome la setacciatura è praticabile solo per materiali trattenuti dal setaccio ASTM 200 (apertura di 0,075 mm), per la parte fine si ricorre all'analisi per sedimentazione, basata sulla legge di Stokes, che lega la velocità di sedimentazione di un insieme di sfere in un fluido viscoso al diametro e alla densità delle sfere in sospensione. In particolare, le particelle più piccole sedimentano più lentamente di quelle aventi diametro maggiore. Quindi, misurando la densità della sospensione a istanti di tempo successivi, è possibile determinare la percentuale di particelle corrispondenti a un diametro equivalente e completare la curva granulometrica anche per diametri equivalenti inferiori a 0,075 mm. In modo da avere un'analisi granulometrica più rappresentativa possibile dei quattro campioni di mélange studiati, si è analizzato il materiale non utilizzato per la determinazione dei limiti di Atterberg e quello utilizzato per la determinazione del contenuto d'acqua. Esso è stato prima disciolto in acqua e poi setacciato al setaccio ASTM 200 in modo da suddividere il materiale grossolano da quello fine. Entrambe le frazioni di materiale sono state poi messe in forno a 100°C per far evaporare l'acqua. Il

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

materiale grossolano è stato poi vagliato come descritto precedentemente, mentre per la frazione fine sono stati prelevati 40 g di materiale passante al setaccio ASTM 200 e disciolto nuovamente in acqua distillata per l'analisi mediante sedimentazione.

In *Figura 3.8* a *Figura 3.11* sono riportate le 4 curve granulometriche ottenute. Si noti che nell'angolo in basso a destra di ciascuna curva è riportata la denominazione ricavata. Per tale classificazione è stata adottata la metodologia dell'AGI<sup>3</sup> (Associazione Geotecnica Italiana) che presenta il vantaggio di avere individuato un sistema anche per l'identificazione dei campioni composti da più frazioni granulometriche con la seguente convenzione per la loro denominazione: siano *A*, *B*, *C* i nomi relativi agli intervalli principali (argilla, limo,....), siano *p1*, *p2*, *p3* le percentuali di *A*, *B*, *C* presenti nel terreno in esame; se p1 > p2 > p3 il terreno viene denominato con il nome della frazione *A* seguito dai nomi delle frazioni *B* e *C* preceduti dalla congiunzione "con" se il corrispondente valore di *p* è compreso tra il 50% ed il 25%, seguiti dal suffisso "oso" se *p* è tra il 25% ed il 10%, infine seguiti dal suffisso "oso" e preceduti da "debolmente" se *p* è compreso tra il 10% ed il 5%.



Figura 3.8. Curva granulometrica campione 1

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Associazione Geotecnica Italiana (1977) – "Raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche".



Figura 3.9. Curva granulometrica campione 2



Figura 3.10. Curva granulometrica campione 3



Figura 3.11. Curva granulometrica campione 4

Si noti che, per tutte le curve, la componente maggiore è quella argillosa che costituisce più del 50% dei campioni. Fondamentale è anche il limo che è presente in media al 30%. Per quanto riguarda il materiale grossolano, la componente di sabbia e ghiaia è presente in piccole percentuali, soprattutto per il campione 4. Tuttavia, grazie alla separazione del materiale grossolano, è stato possibile osservare meglio la differenza tra i clasti costituenti i 4 campioni riportati in *Figura 3.12*. Come descritto in precedenza, i blocchi del campione 1 e 3 sono molto simili sia come colore sia come forma. Essi sono infatti prevalentemente di forma subarrotondata a differenza del campione 2 e 4 che sono invece di forma lamellare. Il campione 4 inoltre presenta una colorazione dei blocchi rossastra.



Figura 3.12. Materiale grossolano ottenuto a seguito della vagliatura meccanica dei quattro campioni analizzati

# 4 Definizione della percentuale volumetrica

Come descritto nel primo capitolo, Medley (1994, 1997 e 2001) ha stabilito delle linee guida per verificare l'autosomiglianza e la frattalità del materiale *Franciscan Mélange* riportando alcuni fondamentali risultati descritti nel capitolo 1. Inoltre, lo stesso autore ha effettuato degli studi per la stima della percentuale volumetrica, essendo questa di difficile determinazione e fondamentale per le proprietà meccaniche del materiale. Egli simulò dei fori di sondaggio ricavando una lunghezza di campionamento ideale per la stima della percentuale volumetrica lineare dei blocchi. In questo capitolo, si provano ad utilizzare le medesime considerazioni ideate da Medley per il mélange italiano prelevato nell'Oltrepò Pavese. Per tale operazione si sono utilizzate due foto scattate su due facce dello stesso campione ricavato dal taglio di un blocco di mélange sedimentario riportate in *Figura 4.1* e *Figura 4.2*. Successivamente, il campione è stato distrutto per la determinazione della percentuale volumetrica reale (VBP).



Figura 4.1. Faccia 1 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese utilizzato per la stima della percentuale volumetrica



Figura 4.2. Faccia 2 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese utilizzato per la stima della percentuale volumetrica

#### 4.1 Verifica delle caratteristiche di autosomiglianza

Come descritto precedentemente, si è dimostrato che il *Franciscan Mélange* possiede delle caratteristiche di autosomiglianza e di indipendenza di scala, cioè variando la scala di una certa area di indagine, la disposizione dei blocchi risulta una replica dell'area madre. Questa caratteristica fu provata eseguendo vari studi su diverse aree di osservazione di estensione variabile da circa  $1000 \ km^2$  fino a  $1 \ cm^2$ . Per quanto riguarda il bimrock italiano, Coli et al. (2008) hanno osservato delle caratteristiche di autosomiglianza su un affioramento di un complesso caotico costituto da scisti-calcarei (tipico mélange presente nel nord degli Appennini). In questo caso si sono analizzate fotografie scattate in outcrop naturale e poi studiate con tecniche fotografiche riportando i risultati in un diagramma come quello in *Figura 1.10*. I risultati quindi concordano con quelli ottenuti per il *Franciscan Mélange*.

In questo paragrafo, si segue la procedura utilizzata da Medley (1994), descritta nel paragrafo 1.2.1, con l'obiettivo di verificare le caratteristiche di autosomiglianza e di indipendenza di scala nel Mélange dell'Oltrepò Pavese.

Ciascuna immagine viene importata sul software AutoCad e successivamente scalata usando come riferimento un calibro posto vicino al campione visibile in *Figura 4.3*. Si definisce una finestra di osservazione e successivamente si contornano i blocchi visibili compresi interamente in essa avvalendosi di polilinee chiuse. I blocchi si differenziano dalla matrice principalmente dal colore: la matrice è di colore grigio uniforme mentre i blocchi sono di colore bianco, grigio più chiaro o comunque di tonalità diverse, come è possibile osservare in *Figura 4.1* e *Figura 4.2*. Successivamente, per verificare l'indipendenza di scala del mélange, si individuano varie finestre di osservazione: inizialmente si considera l'intera area fotografata (A=100%) e, in seguito, si fissa uno spigolo di riferimento e la si riduce progressivamente al 25% e al 6,25% dell'originale come rappresentato in *Figura 4.3*.



Figura 4.3. Faccia 1 campione analizzato per determinazione della percentuale volumetrica con il cursore di riferimento e le varie finestre analizzate

Per ciascuna finestra di osservazione si individuano le corde più lunghe di ciascun blocco e, in funzioni di esse, si dividono i blocchi in classi andando ad attribuire colori (layer) diversi alle polilinee che li contornano. La corda di dimensione massima definisce la  $d_{mod}$ . Si sono individuate 6 classi dimensionali in funzione della lunghezza caratteristica che, in questo caso, corrisponde alla radice quadrata dell'area considerata ( $L_c = \sqrt{A}$ ). Gli intervalli di ciascuna classe sono riportati in *Tabella 4.1*.

Classe	Intervallo	Layer
1	$5\%\sqrt{A}/8 - 5\%\sqrt{A}/4$	Rosso
2	$5\%\sqrt{A}/4 - 5\%\sqrt{A}/2$	Giallo
3	$5\%\sqrt{A}/2 - 5\%\sqrt{A}$	Verde
4	$5\%\sqrt{A} - 2 \times 5\%\sqrt{A}$	Ciano
5	$2 \times 5\%\sqrt{A} - 4 \times 5\%\sqrt{A}$	Blu
6	$> 4 \times 5\%\sqrt{A}$	Viola

Tabella 4.1. Classi dimensionali dei blocchi considerate per lo studio della frattalità

Si noti che la classe 4 corrisponde al valore soglia blocco-matrice individuato da Medley  $(5\%L_c)$ . Per quanto riguarda la classe 1, si ha una variazione di intervallo quando si considera l'intera area. Infatti, in questo caso, si impone un limite inferiore ipotizzato pari a  $5\%\sqrt{A}/8$  e tutte le inclusioni al di sotto di questo valore sono escluse. Questa soglia viene imposta perché i blocchi più piccoli non sono distinguibili con precisione a causa

della risoluzione fotografica che impedisce la suddivisione dei blocchi in ulteriori sottoclassi.

Successivamente, si determina la frequenza relativa delle diverse classi contando i blocchi appartenenti ai diversi intervalli e dividendoli per il numero totale dei clasti. Si riportano di seguito gli elaborati grafici ottenuti. Su ciascuna immagine è riportata una quota che rappresenta la  $d_{mod}$ .



Figura 4.4. . Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 100% della finestra intera Faccia 1. La quota della  $d_{mod}$  è espressa in millimetri



Figura 4.5. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 25% della finestra intera Faccia 1. La quota della  $d_{mod}$  è espressa in millimetri



Figura 4.6. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 6,25% della finestra intera Faccia 1. La quota della dmod è espressa in millimetri

Soltanto per la faccia 1 si è considerato anche un secondo vertice per la determinazione delle sottofinestre di osservazione siccome, riducendo l'area di studio, i risultati diventano maggiormente dipendenti dalla particolare distribuzione locale dei blocchi. Tale procedura non è stata eseguita sulla faccia 2 perché di forma molto irregolare e con clasti di grande dimensione, che rendono difficoltosa l'individuazione di un secondo vertice che racchiuda un sufficiente numero di blocchi per l'analisi.



Figura 4.7.Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 25% della finestra intera Faccia 1 secondo vertice. La quota della d<sub>mod</sub> è espressa in millimetri



Figura 4.8. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 6,25% della finestra intera Faccia 1 secondo vertice. La quota della  $d_{mod}$  è espressa in millimetri



Figura 4.9. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 100% della finestra intera Faccia 2. La quota della d<sub>mod</sub> è espressa in millimetri



Figura 4.10. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 25% dela finestra intera Faccia 2. La quota della  $d_{mod}$  è espressa in millimetri



Figura 4.11. Blocchi individuati considerando l'area di osservazione pari al 6,25% della finestra intera Faccia 2. La quota della d<sub>mod</sub> è espressa in millimetri

I risultati sono stati poi diagrammati in un piano bi-logaritmico riportando in ordinate le frequenze relative e in ordinate  $d_{mod}/\sqrt{A}$ , dove  $d_{mod}$  rappresenta la massima dimensione osservata dei blocchi per la classe i-esima. Si è associato dunque un valore  $d_{mod}/\sqrt{A}$  per ciascuna delle 6 classi andando a considerare il valore più alto dell'intervallo dimensionale. L'obiettivo di tale rappresentazione è quella di evidenziare le proprietà di autosomiglianza del mélange andando a riportare su uno stesso grafico i risultati di distribuzione dei blocchi normalizzati alle varie scale di osservazione. In Figura 4.12 e Figura 4.13 si sono analizzati i risultati delle due facce separatamente, mentre in Figura 4.14 sono compresi tutti i risultati. Dalle immagini è possibile affermare che le distribuzioni sono simili fra loro sebbene si siano considerate aree di diversa scala e posizione. Il materiale sembra quindi possedere delle caratteristiche frattali, cioè la forma e distribuzione dei blocchi si ripetono allo stesso modo su scale diverse. Il grafico riportato in Figura 4.14 è molto simile a quello ottenuto da Medley rappresentato in Figura 1.10 ed è anche possibile osservare un picco in corrispondenza del valore soglia individuato dallo stesso autore confermando le ipotesi ricavate per il Franciscan Mélange.

Per avere una conferma su quanto appena affermato sul Mélange dell'Oltrepò Pavese, sarebbe però opportuno considerare finestre di osservazione con diverso ordine di grandezza. Usare quindi i dati analizzati in questo documento con aree dell'ordine del centimetro quadro e confrontarli con valori ottenuti con superfici maggiori (dell'ordine del metro quadro o persino del kilometro quadro).



Figura 4.12. Distribuzioni dei blocchi per la faccia 1 alle diverse scale di osservazione, sono riportati i risultati di entrambi i vertici di riferimento con i valori di frequenza relativa in funzione della massima dimensione dei blocchi di ciascuna classe



Figura 4.13. Distribuzioni dei blocchi per la faccia 1 alle diverse scale di osservazione riportando i valori di frequenza relativa in funzione della massima dimensione dei blocchi di ciascuna classe



Figura 4.14. Distribuzioni dei blocchi per la faccia 1 e della faccia 2 alle diverse scale di osservazione riportando i valori di frequenza relativa in funzione della massima dimensione dei blocchi di ciascuna classe

### 4.2 Determinazione della percentuale volumetrica reale del blocco

La procedura seguita è simile a quella descritta da Lindquist e Goodman (1994) usata per i campioni di mélange prelevati nel caso studio della Scott Dam in California. Il primo passaggio consiste nel pesare il campione secco, che nel caso in esame è pari a 415,7 g. Essendo, nel nostro caso, i campioni molto irregolari, si è determinato il volume immergendo il blocco di mélange in un contenitore graduato riempito parzialmente d'acqua misurando lo spostamento del liquido e ottenendo circa  $1,99 \cdot 10^{-4} m^3$ . Quest'ultima procedura è stata eseguita il più velocemente possibile in modo da evitare che il campione potesse assorbire una parte dell'acqua, sottostimando il volume. Successivamente, si è lasciato il campione in ammollo in modo da ammorbidire sufficientemente la matrice argillosa permettendo la separazione tra matrice e blocchi costituiti da clasti. Come descritto da Medley, si definiscono blocchi i clasti con dimensione compresa tra il 5% $L_c$  e il 75% $L_c$ , dove in questo caso la lunghezza caratteristica corrisponde alla radice quadrata della superficie analizzata ( $\sqrt{A}$ ). I limiti appena definiti dovrebbero coincidere con le dimensioni delle maglie dei setacci da utilizzare per separare la matrice dai blocchi. Poiché non esistono i setacci con dimensione uguale ai limiti definiti, si sono scelti quelli che si avvicinano di più a tali

valori: di dimensione inferiore per il setaccio più piccolo e di dimensione maggiore per il setaccio più grande. Nel caso in esame, i limiti delle due facce sono riportati in *Tabella* 4.2 e si sono scelti i seguenti setacci: *ASTM 10* (> 2 mm) per il limite inferiore e *ASTM 3*'' (> 76,2 mm) per quello superiore.

	Α	$\sqrt{\mathbf{A}}$	5%√A	<b>75%√A</b>
	[mm²]	[mm]	[ <i>mm</i> ]	[ <i>mm</i> ]
Faccia 1	6477,05	80,5	4,0	60,4
Faccia 2	4909,75	70,1	3,5	52,6

Tabella 4.2. Limiti inferiori e superiori (secondo Medley) del campione analizzato per la determinazione della percentuale volumetrica prendendo come riferimento la lunghezza caratteristica pari alla radice quadra dell'area A analizzata di ciascuna faccia

In seguito alla setacciatura, si è ottenuto il peso secco dei blocchi corrispondente a 23,6 g, ricavando per sottrazione il peso secco della matrice pari a 392,1 g. Il passaggio successivo è stato quello della determinazione delle densità dei blocchi e della matrice. Per i blocchi è stato prima ricavato il volume seguendo la stessa procedura usata per l'intero campione: i blocchi portati approssimativamente in condizione satura a superficie asciutta (SSA) sono stati immersi in acqua e il quantitativo d'acqua spostato restituisce il loro volume. Facendo il rapporto tra il peso secco e il volume è stato possibile determinare la loro densità.

Peso dei blocchi secchi	Volume dei blocchi	Densità blocchi
[g]	[m³]	[kg/m³]
23,6	1,02E-05	2309,56

Tabella 4.3. Determinazione della densità dei blocchi del campione di mélange analizzato per la determinazione della sua percentuale volumetrica

Infine, dividendo il peso secco della matrice per il suo volume, ottenuto sottraendo il volume dei blocchi da quello iniziale, si è ottenuta la densità della matrice.

Peso secco della matrice	Volume matrice	Densità matrice argillosa
[g]	[m³]	[kg/m³]
392,1	1,89E-04	2074,40

Tabella 4.4. Determinazione della densità della matrice argillosa del campione di mélange analizzato per la determinazione della sua percentuale volumetrica

Tali valori di densità ( $\rho$ ) sono stati presi come valori di riferimento per il calcolo della percentuale volumetrica di altri campioni di mélange simili utilizzati per le successive prove di laboratorio facendo riferimento solo al peso iniziale del campione analizzato ( $m_i$ ) e al peso dei blocchi ( $m_b$ ) mediante la seguente formula:

%volumetrica dei blocchi = 
$$\frac{\frac{m_b}{\rho_{blocchi}}}{\frac{m_b}{\rho_{blocchi}} + \frac{(m_i - m_b)}{\rho_{matrice}}}$$

La percentuale volumetrica reale del campione scelto per tale capitolo risulta essere pari a 5,13%. Tale valore può essere leggermente sottostimato perché alcuni blocchi contenuti nel materiale prelevato nell'Oltrepò Pavese sono costituiti da argilla sovraconsolidata che probabilmente sono andati distrutti a contatto con l'acqua e durante la procedura di vagliatura.

#### 4.3 Stima della percentuale dei blocchi

Come descritto nel primo capitolo, le proprietà geomeccaniche dei bimrock sono influenzate dalla percentuale volumetrica dei blocchi. Tale percentuale è facilmente ricavabile quando si considerano piccoli campioni da laboratorio come quello descritto nel paragrafo precedente. Al contrario, la sua determinazione diventa impossibile quando si considerano volumi molto più grandi, come nel caso di uno studio di stabilità di un pendio oppure per lo scavo di una galleria. La percentuale volumetrica può allora essere approssimata misurando la percentuale areale dei blocchi dallo studio in superficie (ABP), oppure determinando una percentuale lineare (LBP) in seguito a dei carotaggi. La percentuale areale dei blocchi è calcolata sommando le aree dei blocchi e dividendole per l'area totale dell'ammasso roccioso analizzato, mentre la percentuale lineare è il rapporto tra la lunghezza totale dei blocchi intersecati e la lunghezza totale della linea di campionamento. Sia per ABP che per LBP vi è la necessità di disporre di grandi aree di analisi e sufficienti lunghezze di campionamento per assumere che tali valori siano prossimi alla percentuale volumetrica dei blocchi (VBP).

Concentrandosi su LBP, Medley (1997) simulò una campagna di sondaggi usando dei campioni artificiali da lui realizzati con percentuale volumetrica dei blocchi nota in modo da ricavare una lunghezza di campionamento minima espressa come multiplo della dimensione massima osservabile  $(N \cdot d_{max})$  in corrispondenza della quale la percentuale lineare si stabilizza e risulta essere prossima a quella volumetrica. Egli sostenne che tale profondità, per il *Franciscan Mélange*, è pari a  $10 \cdot d_{max}$ . In questo paragrafo si prova a ripetere lo studio andando a verificare se tale grandezza sia valida anche per il materiale prelevato nell'Oltrepò Pavese utilizzando le medesime foto già analizzate per lo studio della frattalità. In seguito, si confrontano la percentuale lineare dei blocchi ottenuta (LBP) con quella areale (ABP) e con quella volumetrica (VBP) in modo da valutare l'errore che si può commettere se si assume VBP=LBP oppure VBP=ABP.

Innanzitutto, come per lo studio dell'autosomiglianza, si procede caricando le foto delle due facce del campione di mélange italiano sul software AutoCad opportunamente scalate facendo riferimento al calibro posto vicino nella foto. Si individuano i blocchi significativi, cioè i clasti che influenzano la resistenza meccanica del bimrock di dimensioni maggiori del valore di soglia blocco/matrice, pari a  $5\%L_c$ , e inferiori a  $75\%L_c$ . In questo caso,  $L_c$  corrisponde a  $\sqrt{A}$  e i blocchi appartenenti all'intervallo appena citato rientrano nelle classi 4, 5 e 6 definite nel *paragrafo4.1*. Si calcola la percentuale areale dei blocchi (ABP), ottenuta come rapporto tra l'area totale dei blocchi maggiori della soglia dimensionale minima e l'area totale coperta dalla fotografia. Si individua per la faccia 1 una ABP pari a 23,2%, mentre per la faccia 2 si è calcolato un valore più alto pari a 34,2%.

In seguito, si simula la realizzazione di fori di sondaggi verticali tracciando delle scanlines equidistanti numerate come riportato in *Figura 4.15* e *Figura 4.16* rappresentate con linee numerate di colore arancione. Tali linee hanno una lunghezza costante per la faccia 1 pari a 60,4 mm, mentre per la faccia 2, essendo la geometria irregolare, le linee di scansione hanno una lunghezza che varia da 35,1 mm fino a 50,0 mm. Per entrambe le sezioni, si valutano le corde di lunghezza massima, definite come  $d_{max}$  e quotate in *Figura 4.15* e *Figura 4.16*.



Figura 4.15. Foto campione faccia 1 con evidenziati i blocchi di dimensione superiore alla soglia blocco-matrice appartenenti alle classi 4, 5 e 6. In arancione vengono riportate le 37 linee di scansione verticali che simulano i fori di sondaggio



Figura 4.16. Foto campione faccia 2 con evidenziati i blocchi di dimensione superiore alla soglia blocco-matrice appartenenti alle classi 4, 5 e 6. In arancione vengono riportate le 43 linee di scansione verticali che simulano i fori di sondaggio

Successivamente, si misura la lunghezza delle corde intersecanti i blocchi di ciascuna scanline e si procede con il metodo di randomizzazione. Tale procedimento simula diverse campagne di indagine svolte mediante l'esecuzione di diversi fori di sondaggio rappresentate dalle linee di scansione. Per stimare la percentuale lineare dei blocchi, le scanlines sono prese con ordine casuale usando l'approccio "Montecarlo". Per ciascuna faccia, si ipotizzano, quindi, dieci serie random di disposizione dei sondaggi e si valuta la percentuale lineare cumulata in funzione della lunghezza di campionamento. Nello specifico, grazie all'ausilio di un codice Matlab, si estrae con una funzione random la prima linea di scansione e si divide la lunghezza delle corde intersecanti i blocchi di tale linea (Lc1) per la lunghezza della scanline (Ls1): Lc1/Ls1. In seguito, si estrae una seconda linea di scansione, diversa dalla precedente, e si prende in considerazione sempre la lunghezza delle corde intersecanti i blocchi (Lc2) e la sua lunghezza (Ls2). Successivamente, si calcola la somma dei valori di lunghezza delle corde (Lc1+Lc2) e la si divide per la lunghezza delle due linee di scansione (Ls1+Ls2): (Lc1 + Lc2)/(Ls1 +Ls2). Si ripete quest'ultima procedura fino a considerare la n-esima linea di scansione:  $(Lc1 + Lc2 + \dots + Lcn)/(Ls1 + Ls2 + \dots + Lsn)$ . Infine, si redige l'intera analisi altre nove volte considerando in totale dieci serie random diverse.

Ad ogni valore di percentuale lineare cumulata dei blocchi sopra calcolata, si associa un valore di lunghezza di campionamento ottenuta come rapporto tra la lunghezza totale delle linee di scansione prese in considerazione e  $d_{max}$ . I risultati vengono poi rappresentati su un piano cartesiano con la percentuale lineare cumulata dei blocchi sulle

ordinate e la lunghezza di campionamento sulle ascisse. Tali grafici sono riportati in *Figura 4.17* per la faccia 1 e *Figura 4.18* per la faccia 2. Da tali rappresentazioni è possibile osservare un'ampia dispersione dei valori di percentuale lineare cumulata per lunghezze di campionamento piccole, al contrario, per distanze maggiori, i valori tendono a una percentuale comune prossima al valore di ABP (Areal Block Proportion). Per sottolineare tale fenomeno, in *Figura 4.19* viene rappresentato l'andamento medio e la deviazione standard della percentuale lineare cumulata in funzione di  $N \cdot d_{max}$  per le due facce analizzate.



Figura 4.17. Percentuale cumulata dei blocchi in funzione della lunghezza di campionamento faccia 1. Il grafico, oltre a riportare le 10 serie random che simulano la LBP (linear block proportion) all'aumentare della lunghezza di un ipotetico sondaggio, mostra la differenza con i valori di ABP (areal block proportion) pari a 23,2% e VBP (volumetric block proportion) ottenuta con il procedimento di vagliatura e corrispondete a 5,13%



Figura 4.18. Percentuale cumulata dei blocchi in funzione della lunghezza di campionamento faccia 2. Il grafico, oltre a riportare le 10 serie random che simulano la LBP (linear block proportion) all'aumentare della lunghezza di un ipotetico sondaggio, mostra la differenza con i valori di ABP (areal block proportion) pari a 34,2% e VBP (volumetric block proportion) ottenuta con il procedimento di vagliatura e corrispondete a 5,13%



Figura 4.19. Percentuali lineari cumulate medie ottenute dalla 10 serie random in funzione della lunghezza di campionamento per le facce 1 e 2. I segmenti verticali rappresentano le deviazioni standard dei risultati ottenuti. Sono riportartati inoltre i valori di ABP e VBP

Dal grafico in Figura 4.19 è possibile affermare che, per entrambe le facce analizzate, i valori medi di percentuale lineare cumulata tendono ai valori di ABP, mentre si discostano molto dalla VBP. Tale differenza può essere giustificata dal fatto che si sono considerate solo due facce appartenenti a un solo campione con lati inferiori a 10 centimetri analizzando dunque un'area piuttosto ristretta. Infatti, come annunciato in precedenza, tali analisi andrebbero fatte su spezzoni o aree di dimensioni maggiori in modo da considerare al meglio la distribuzione dei blocchi. Ad esempio, in riferimento alla faccia 2, si possono notare un elevato numero di blocchi appartenenti alla classe più grande che occupano buona parte dell'area analizzata, ma in realtà, a seguito del procedimento di vagliatura, essi appartengono solo al 5,13% del volume totale. Lo stesso Medley durante il suo studio del 1997 ripetette l'analisi considerando lunghezze di campionamento pari a 1/3 dell'altezza totale dei campioni artificiali pari a 150 mm. Egli volle simulare sondaggi più superficiali rispetto a tutta la profondità di interesse. I risultati furono i seguenti: le scanlines più corte fornirono valori diversi rispetto a quelle più lunghe e le loro percentuali lineari cumulate si rivelarono generalmente differenti dalle percentuali volumetriche reali. La procedura di questo paragrafo andrebbe quindi ripetuta su campioni di taglia maggiore.

Assumendo che i valore di ABP coincidano con i valori di VBP su aree si studio maggiori, in riferimento ai risultati ottenuti da Medley, i valori medi di percentuale lineare cumulata rappresentati in *Figura 4.19* sembrano stabilizzarsi proprio a una lunghezza di campionamento prossima a  $10 \cdot d_{max}$ , valore al di sopra di cui si osserva una deviazione standard ridotta e pressoché costante e pari a ABP. Per lunghezze di campionamento superiori a tale valore le percentuali cumulate dei blocchi oscillano tra 19,8% e 22,3% per la faccia 1 e tra 36,3% e 33,8% per la faccia 2.

Si considera come parametro di incertezza il rapporto tra la deviazione standard (SD) dei valori di percentuale lineare cumulata e l'ABP. In *Figura 4.20* sono riportati i valori di SD/ABP in funzione di  $N \cdot d_{max}$  per le due facce analizzate. Al contrario dei risultati ottenuti da Medley (1997), i valori dei parametri di incertezza non seguono una distribuzione logaritmica ma sembrano seguire maggiormente una funzione esponenziale. Si è dunque tentato di aumentare il numero di analisi eseguendo 5000 serie random invece di 10 per entrambe le facce. Naturalmente, l'andamento medio delle due percentuali lineari cumulate risultano stabilizzarsi subito anche per valori di lunghezza di campionamento più piccole. Al contrario gli andamenti di deviazione standard e di

conseguenza del parametro di incertezza riportati in *Figura 4.21* assumono una distribuzione esponenziale più definita rispetto all'analisi precedente. Inoltre, entrambe le curve risultano praticamente sovrapposte come se avessero lo stesso andamento:  $SD/ABP = 0,69 \cdot (N \cdot d_{max})^{-0,585}$  per la faccia 1 e  $SD/ABP = 0,739 \cdot (N \cdot d_{max})^{-0,618}$ . Si è quindi deciso di considerare una sola distribuzione ottenuta dalla media delle due funzioni:

$$SD/ABP = 0.7145 \cdot (N \cdot d_{max})^{-0.6015}$$

La legge appena ricavata suggerisce che all'aumentare della lunghezza di campionamento, il rapporto *SD/ABP* diminuisce perché si considerano più blocchi. Inoltre, è possibile osservare che a una lunghezza di campionamento pari a  $10 \cdot d_{max}$ , l'incertezza è pari a 0,178 che essendo un valore molto basso conferma quanto annunciato prima: la percentuale lineare cumulata si stabilizza a  $10 \cdot d_{max}$ . Se i valori di ABP coincidessero con il valore di VBP, la curva potrebbe essere anche utilizzata come fattore correttivo per stimare la percentuale volumetrica dei blocchi a diversi valori di profondità di campionamento. Ad esempio, si suppone di perforare un ammasso roccioso a una profondità di  $5 \cdot d_{max}$  e, prendendo casualmente la serie random numero 1 della faccia 1 utilizzata per la costruzione del grafico in *Figura 4.17*, si ha una percentuale lineare cumulata dei blocchi pari circa al 35%. Applicando la relazione prima ottenuta, si ricava un'incertezza pari a 0,27. Applicando tale fattore alla percentuale lineare dei blocchi si ottiene:

$$35\% \pm 0.27 \cdot 35\% \rightarrow 35\% - 0.27 \cdot 35\% = 25.5\% \cong ABP_{faccia1} = 23.2\%$$

Tuttavia, rimane il fatto che tale curva è stata ottenuta su un solo campione, si mostrano quindi necessari ulteriori studi su campioni provenienti dalla stessa formazione per ampliare il database a disposizione e verificare i risultati ottenuti.



Figura 4.20. Incertezza dell'ABP stimata dalla percentuantuale lineare cumulata in fuonzione della lunghezza di campionamento. Grafico ottenuto considerando 10 serie random



Figura 4.21. Incertezza dell'ABP stimata dalla percentuantuale lineare cumulata in fuonzione della lunghezza di campionamento. Grafico ottenuto considerando 5000 serie random

# 5 Comportamento a compressione monoassiale

L'obiettivo di questo capitolo è quello di ricavare i parametri meccanici dei campioni di mélange italiano e di studiare il loro comportamento a compressione. Per tale operazione, è necessario eseguire una prova di compressione triassiale, dove un campione cilindrico di dimensioni prestabilite viene sottoposto a un confinamento laterale costante e a uno sforzo assiale crescente fino a rottura. Nel caso del materiale studiato, quest'ultima prova non può essere eseguita perché il mélange in oggetto non è campionabile e quindi non vi è la possibilità di estrarre campioni cilindrici di dimensioni ideali per la prova. Infatti, come descritto in precedenza, il materiale prelevato nell'Oltrepò Pavese si presenta come un materiale roccioso con una certa resistenza, ma in realtà si sgretola facilmente sotto sforzo e soprattutto si discioglie in acqua. Queste problematiche impediscono l'estrazione di campioni con le tecniche più classiche come carotaggi o seghe che fanno uso d'acqua e/o solventi. Si deve quindi ricorrere a seghe a taglio secco, in modo tale che il taglio non sia influenzato dal passaggio in materiale tenero definito dalla matrice argillosa e nei clasti con una rigidezza nettamente maggiore.



Figura 5.1. Sega a nastro con lama diamanta usata per il taglio dei campioni di Mélange

A questo proposito, si è scelta una sega a nastro con lama diamantata (vedi *Figura 5.1*) che ha permesso di ricavare alcuni campioni di mélange con una certa difficoltà. Infatti, alcune parti si fratturavano e si sgretolavano durante la fase di taglio. Con l'intento di

ricavare campioni di dimensioni geometriche più regolari possibile, sono stati ottenuti dei prismi rettangolari di forma diversa. Data l'irregolarità dei provini ottenuti, con l'obiettivo di determinare un modulo di deformazione, si è optato per sottoporre i campioni ad una prova di compressione monoassiale, meno limitativa dal punto di vista geometrico. I risultati di quest'ultima prova non forniscono il vero comportamento a compressione del materiale, ma con buona approssimazione si possono considerare come tali.

Un'ulteriore problematica è emersa nella determinazione delle deformazioni interne. Infatti, in questo tipo di prove, vengono normalmente inseriti sulle facce dei campioni degli estensimetri elettrici sia in direzione verticale sia in direzione orizzontale per la misura delle deformazioni. A causa però dell'elevata fragilità dei campioni, l'applicazione di questi strumenti avrebbe potuto causarne la rottura ancora prima dell'inizio della prova. Si è usato dunque un trasduttore esterno (LVDT: linear variable differential transformer) che, attraverso una centralina di acquisizione dati, ha permesso la determinazione dello spostamento della piastra caricata associato al relativo valore di forza assiale fornito dalla cella di carico con una frequenza di 100 Hz. In questo modo, conoscendo il valore dell'altezza iniziale del campione, vi è la possibilità di ottenere la deformazione assiale nel tempo. I valori ottenuti possono essere utili per stimare il comportamento del materiale indagato, ma non sono esaustivi perché la deformabilità delle piastre è differente da quella delle rocce e quindi si formano delle tensioni tangenziali di contatto che causano l'insorgere di zone con condizioni triassiali di compressione che possono compromettere i risultati. Per questo motivo, si è aggiunto un ulteriore sistema di monitoraggio per la determinazione delle deformazioni locali: la correlazione digitale di immagini (in inglese Digital Image Correlation o DIC). Si tratta di una tecnica ottica di recente sviluppo che si sta rapidamente diffondendo in tutti i settori dell'ingegneria poiché permette di valutare, in modo non distruttivo e senza contatto, lo stato deformativo di un'intera superficie (Gabrielli et al., 2013). Per associare il valore di carico corrispondente a ciascun fotogramma, sono stati posizionati un cronometro e un trigger azionati ad inizio prova vicino al campione, in modo tale da essere ripresi dalle foto (vedi Figura 5.4). Conoscendo infatti il tempo di scatto, mediante i dati registrati dalla centralina di acquisizione dati della cella di carico, è stato possibile ricavare il valore corrispondente di forza assiale.
## 5.1 Tecnica DIC

La correlazione digitale di immagini è una tecnica che si basa sul confronto di immagini digitali, acquisite mediante 1 o 2 fotocamere, per ricavare mappature ad alta definizione, 2D o 3D, di spostamenti e deformazioni dell'elemento considerato. Si posiziona la fotocamera di fronte all'oggetto da indagare e si imposta un determinato intervallo di scatto che deve essere sufficientemente piccolo da cogliere gli spostamenti durante la prova, ma sufficientemente lungo da permettere la durata necessaria per lo scatto e la memorizzazione delle foto: si è scelto un intervallo pari a 5 secondi. Inoltre, sulla superficie di ciascuna faccia esaminata, sono stati tracciati dei punti con un indelebile in modo più casuale possibile, come mostrato in *Figura 5.2*. Proprio grazie a questo pattern di punti che crea una sorta di mappatura della superficie, ogni pixel in esame può essere riconosciuto e distinto in tutti i fotogrammi.



Figura 5.2. Pattern di punti realizzato su due facce di un campione di mélange per l'analisi con la tecnica DIC

Conoscendo i parametri intrinsechi delle fotocamere, la loro distanza relativa e il loro orientamento rispetto alla superficie inquadrata possono essere calcolate le coordinate di un qualsiasi punto della superficie stessa. Le coppie di immagini digitali registrate da ciascuna fotocamera, prima e durante la deformazione dell'elemento considerato, sono poi confrontate pixel a pixel, mediante un algoritmo di correlazione (vedi *Figura 5.3*). Per tale operazione, si è usato uno specifico software open-source denominato DICe (*Digital Image Correlation engine*)<sup>4</sup>. Fornendo in input al programma il fotogramma

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> DICe: [https://dice.sandia.gov/]

iniziale di riferimento, i fotogrammi successivi e impostando pochi parametri per la distinzione dei pixel, il software è in grado di determinare l'intero campo di spostamenti e di deformazione dalla sequenza di immagini digitali. Infatti, il campo di spostamento è determinato attraverso la corrispondenza di punti delle immagini e da questo si può risalire al campo di deformazione al variare del carico.



Figura 5.3. Riconoscimento e confronto dei pixel tra due fotogrammi successivi eseguiti dal software DICe

L'accuratezza della tecnica dipende da diversi fattori tra cui gli algoritmi di interpolazione, la distorsione della lente, l'uniformità della distribuzione della luce e la qualità della punteggiatura (Gabrielli et al., 2013). I primi due parametri sono dipendenti dalla strumentazione impiegata, mentre la luminosità e il pattern di punti sono invece controllati e definiti dall'operatore. In particolare, per la luminosità, sono stati tarati i parametri della macchina fotografica (tempi, ISO e diaframma) in modo tale da avere una corretta esposizione. Purtroppo, però, questi valori sono limitati. L'ISO, cioè la sensibilità del sensore alla luce, in caso di scarsa luminosità deve essere sufficientemente alto, ma questo implica un'amplificazione del segnale ricevuto dal sensore e quindi anche del rumore che si manifesta con una perdita di nitidezza e la comparsa di macchioline colorate. Siccome, per questo tipo di analisi vi è la necessità di una qualità di immagine maggiore possibile, si sono limitati i valori ISO a 200. L'apertura del diaframma, invece, regola la quantità di flusso luminoso che passa all'interno dell'obiettivo e permette la

gestione della profondità di campo. Essa viene indicata in valori numerici anticipati dal prefisso "f/" e corrispondono alle seguenti caratteristiche:

- un numero di diaframma basso corrisponde ad una apertura molto ampia e quindi il passaggio di molta luce, ma permette la messa fuoco dei soli elementi presenti nel piano focale, mentre lo sfondo e gli altri elementi rimangono sfocati;
- un numero di apertura alto corrisponde ad una apertura molta piccola (passaggio di poca luce), però consente una messa a fuoco più globale.

Siccome si ha la necessità di avere una foto sufficientemente luminosa, ma allo stesso tempo si vuole che il cronometro e il trigger posizionati su un diverso piano focale siano leggibili: i valori di diaframma non devono essere né troppo alti né troppo bassi. Sono state scelte aperture comprese fra f/7 e f/11. Infine, i tempi di scatto, cioè il tempo durante il quale l'otturatore della macchina fotografica rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere il sensore, devono essere inferiori a un centesimo di secondo cioè al tempo di acquisizione della centralina di raccolta dati, in modo da poter associare il carico a ciascun fotogramma. Poiché, i parametri appena descritti sono vincolati, è stato necessario introdurre della luce artificiale proveniente da delle lampadine in modo da illuminare le facce fotografate e avere una corretta esposizione. Si è preferito non usare il flash per evitare che le batterie delle macchine fotografiche si scaricassero troppo in fretta siccome le prove potevano durare un paio d'ore.



Figura 5.4. Strumentazione usata per la prova di compressione con la tecnica DIC

### 5.2 Campioni sottoposti a compressione monoassiale

I campioni di mélange analizzati sono 5 più un campione di malta per la validazione del software. Per ciascuno di essi, sono state misurate le dimensioni geometriche medie e sono stati tracciati i pattern di punti sulle facce da analizzare con la tecnica DIC. Successivamente, a prova terminata, si è misurata la percentuale volumetrica dei blocchi con la metodologia già descritta nel *paragrafo 4.2*, usando come lunghezza caratteristica  $L_c$ , la dimensione media delle basi di ciascun campione. Si riportano di seguito le descrizioni dei vari blocchi.

#### • Campione 9:

Campione prelevato nel 2017, costituito in prevalenza da matrice argillosa di mélange di origine tettonica. Esso è di colore rossastro e presenta delle striature lungo la direzione di compressione. Le caratteristiche sono approssimativamente le seguenti:

Altezza media [mm]	53,6
Superficie media di compressione [mm <sup>2</sup> ]	1385,75
Percentuale volumetrica dei blocchi [%]	0,17

Tabella 5.1. Dimensioni medie e percentuale di clasti Campione 9



Figura 5.5.Facce analizzate campione 9 costituito prevalentemente da matrice rocciosa. Si denominano Faccia 2 a sinistra e Faccia 1 a destra. In alto sono riportate le dimensioni in millimetri

#### • Campione 4G

Campione prelevato nel 2018, costituito in prevalenza da matrice argillosa di mélange di origine sedimentaria. Esso è di colore grigio e presenta delle striature lungo la direzione di compressione. Le caratteristiche sono approssimativamente le seguenti:

Altezza media [mm]	53,9
Superficie media di compressione [mm <sup>2</sup> ]	1175,71
Percentuale volumetrica dei blocchi [%]	0,08

Tabella 5.2. Dimensioni medie e percentuale di clasti Campione 4G



Figura 5.6. Facce analizzate campione 4G costituito prevalentemente da matrice rocciosa. Si denominano Faccia 2 a sinistra e Faccia 1 a destra. In alto sono riportate le dimensioni in millimetri

#### • Campione 4P

Campione proveniente dallo stesso blocco del campione 4G, quindi presenta il medesimo materiale. Striature perpendicolari alla direzione di compressione. Le caratteristiche sono approssimativamente le seguenti:

Altezza media [mm]	37,5
Superficie media di compressione[mm <sup>2</sup> ]	720,18
Percentuale volumetrica dei blocchi [%]	1,43

Tabella 5.3. Dimensioni medie e percentuale di clasti Campione 4P



Figura 5.7. Facce analizzate campione 4P costituito prevalentemente da matrice rocciosa. Si denominano Faccia 2 a sinistra e Faccia 1 a destra. In alto sono riportate le dimensioni in millimetri

#### • Campione 3

Campione prelevato nel 2018, costituito in prevalenza da matrice con blocchi di clasti calcarei ben visibili proveniente da un mélange di origine sedimentaria. Esso è di colore grigio con prevalenza di clasti di colore bianco e grigio scuro. Le caratteristiche sono approssimativamente le seguenti:

Altezza media [mm]	87,4
Superficie media di compressione [mm <sup>2</sup> ]	2378,12
Percentuale volumetrica dei blocchi [%]	5,13
	5,15

Tabella 5.4. Dimensioni medie e percentuale di clasti Campione 3



Figura 5.8. Facce analizzate campione 3 costituito da blocchi di clasti inglobati in una matrice argillosa. Si denominano Faccia 1 a sinistra e Faccia 4 a destra. In alto sono riportate le dimensioni in millimetri

## • Campione A

Campione prelevato dal sito del 2018, costituito in prevalenza da matrice con blocchi calcarei ben visibili, proveniente da un mélange di origine sedimentaria. Esso è di colore grigio con prevalenza di clasti di colore bianco e grigio scuro. Le caratteristiche sono approssimativamente le seguenti:

Altezza media [mm]	92,6
Superficie media di compressione [mm <sup>2</sup> ]	3331,9
Percentuale volumetrica dei blocchi [%]	6,88
	1.0 1

Tabella 5.5. Dimensioni medie e percentuale di clasti Campione A



Figura 5.9. Facce analizzate campione A costituito da blocchi di clasti inglobati in una matrice argillosa. Si denominano Faccia 1 a sinistra e Faccia 2 a destra. In alto sono riportate le dimensioni in millimetri

#### • Campione di boiacca

campione costituito da boiacca cementizia composta da sola acqua e cemento portland 32,5R con rapporto acqua su cemento pari a 0,4. La prova di compressione è stata eseguita dopo 19 giorni dal getto. L'uso di questo materiale omogeneo e facilmente modellabile ha come obiettivo quello di validare il software.

Altezza [mm]	160	
Superficie di compressione [mm <sup>2</sup> ]	40x40=1600	
Tabella 5.6. Dimensioni Campione di boiacca		



Figura 5.10. Campione di boiacca cementizia

## 5.3 Analisi dei dati

Sin da subito, sono stati analizzati i valori forniti dalla cella di carico e dal trasduttore LVDT in modo da studiare il comportamento del materiale e stimare dei primi valori di modulo di deformazione anche se, come descritto in precedenza, non possono essere considerati risultati esaustivi. Per ciascun campione, a fine prova, si ha a disposizione un file Excel con i valori di tempo in secondi, spostamento in millimetri e carico in kN

acquisiti con una frequenza di 100 Hz dalla centralina di acquisizione. Fa eccezione il campione di boiacca, per il quale è stata impostata una frequenza di 50 Hz. Si è dimezzata la frequenza in modo da dimezzare la mole di dati essendo la boiacca un materiale sicuramente più resistente rispetto al mélange. I valori di spostamento e deformazione sono stati poi trasformati rispettivamente in deformazioni assiali e tensioni avendo note le altezze e le superfici trasversali medie dei campioni:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{LVDT}{h_i}$$
  $\sigma_{yy} = \frac{F}{S}$ 

con:

- $\varepsilon_{yy}$  deformazione assiale;
- LVDT spostamenti ricavati dal trasduttore in [mm];
- *h<sub>i</sub>* altezza media iniziale del campione in *[mm]*;
- $\sigma_{yy}$  tensione in corrispondenza della superfice media trasversale in [MPa];
- *F* carico fornito dalla cella di carico in [*N*];
- S area superficie media trasversale in  $[mm^2]$ .

In questo modo, è stato possibile determinare i diagrammi di sforzo-deformazione riportati in ALLEGATO A.

In primo luogo, sono stati ricavati per ciascun campione i valori di resistenza a compressione monoassiale ( $C_o$ ) definita come tensione calcolata in corrispondenza del picco (rottura del campione). Dopodiché, sono stati individuati dei tratti lineari iniziali in modo da determinare il modulo di deformazione tangente ( $E_t$ ) interpolando i dati in quell'intervallo scelto e riportati in ALLEGATO A. I risultati ottenuti sono riassunti in *Tabella 5.7*.

Campione	C₀ [ <i>Mpa</i> ]	Et <i>[Mpa]</i>		
9	2,20	294,94		
4G	0,98	330,00		
4P	1,56	42,92		
3	1,96	196,03		
А	2,40	173,40		
Boiacca	17,46	2197,80		

Tabella 5.7. Valori di resistenza a compressione monoassiale e moduli di deformazione tangente

Ottenuti tali valori, sono stati analizzati i dati ricavati con la tecnica DIC per la determinazione dei moduli di deformazione considerando deformazioni locali. In prima battuta, sul software DICe, si è tracciata una matrice di punti regolare sulla faccia analizzata, come riportato in *Figura 5.11*, e si è lanciata l'analisi. Al termine, il programma fornisce in output i valori di spostamento e deformazione di tutti i punti che compongono la matrice. In seguito, si sono analizzate direttamente le deformazioni fornite dal software DICe, dove, grazie al cronometro e al trigger posizionati vicino ai campioni, è stato possibile associare i relativi valori di tensione.



Figura 5.11. Matrice di punti scelti per la faccia 1 del campione 9. I punti analizzati sono stati disposti equidistanti, in una zona possibilmente omogenea e sufficientemente lontana dai bordi e dalle piastre

Tuttavia, costruendo il diagramma sforzo-deformazione, ci si è accorti che i valori non seguivano un andamento ben preciso, ma si presentavano come una nuvola di punti, come riportato, a titolo di esempio, in *Figura 5.12*.



Figura 5.12. Diagramma sforzo-deformazione campione 9 faccia 1 punto 0 ottenuto andando a diagrammare direttamente i valori di deformazione forniti dal software DICe con la tecnica DIC

Non essendo possibile determinare un andamento di sforzo-deformazione e di conseguenza il modulo di deformazione, si è ricorso a un secondo procedimento di analisi. Si è notato che diagrammando gli spostamenti verticali ottenuti dai punti della matrice mediante la tecnica DIC, al posto delle deformazioni, si è ottenuto un comportamento molto simile a quello ottenuto con i valori LVDT.



Figura 5.13. Diagramma sforzo-spostamenti campione 9 faccia 1 punto 0. Spostamenti in pixel forniti dal software DICe con la tecnica DIC

Si è ritenuto quindi che i valori di spostamento verticali ottenuti fossero affidabili e usufruibili per la determinazione delle deformazioni. Infatti, conoscendo la distanza verticale iniziale e gli spostamenti di due punti successivi, è possibile determinare la deformazione assiale mediante la seguente relazione, considerando, ad esempio, come punti successivi i punti 0 e 1:

$$\varepsilon_{yy,i} = \frac{S_{y,punto\ 1,i} - S_{y,punt} \quad 0,i}{d_{01,iniziale}}$$

con:

- $\varepsilon_{yy,i}$  deformazione assiale all'istante *i*;
- *s<sub>y,punto 0,i</sub>* e *s<sub>y,punto 1,i</sub>* gli spostamenti rispettivi del punto 0 e punto 1 all'istante
  *i*;
- $d_{01,iniziale}$  distanza iniziale tra i punti 0 e 1.

Come nel caso dell'analisi fatta con i valori di macchina, si è individuato un intervallo lineare dal quale sono stati interpolati linearmente i valori di spostamento (vedi *Figura 5.14*).



Figura 5.14. Linearizzazione dei valori di carico-spostamento dei punti successivi 6 e 7 nell'intervallo tra 0 e 0,1 kN

Ottenuti gli spostamenti linearizzati, usando la relazione descritta precedentemente, sono stati ricavati i valori di deformazione nell'intervallo di carico scelto con relativo diagramma di sforzo-deformazione e valore di modulo di deformazione.



Figura 5.15. Diagramma sforzo-deformazione ricavato dagli spostamenti verticali linearizzati tra il punto 6 e 7 con relativo modulo di deformazione pari a 141,83 MPa

Si è ripetuta l'analisi per tutti i punti ricavando i vari valori di modulo di deformazione. Tuttavia, si è notato che all'interno di una stessa faccia i moduli di deformazione tra i punti variavano molto (da 30 a 1200 *MPa*). Di conseguenza, si è escluso anche questo tipo di analisi.

Si è deciso quindi di provare un terzo metodo di studio, andando a modificare la procedura già dall'analisi dei fotogrammi. Infatti, ripetendo il primo tipo di analisi anche per il campione di boiacca, ci si è accorti che il problema persisteva e quindi le problematiche erano legate a fattori esterni e non alla tipologia di materiale eterogeneo oppure dalla geometria del campione. Inoltre, analizzando i primi tre fotogrammi in corrispondenza dei quali la pressa non era ancora stata azionata, il software forniva dei valori di deformazione inesistenti. Si è quindi scelto di analizzare questi primi fotogrammi per ricavare un probabile errore attraverso un approccio di tipo statistico. Questa volta, non si è analizzata una matrice di pochi punti, ma all'interno di una specifica superficie, si è analizzata una mesh molto più fitta (un punto ogni 5/10 pixel), come rappresentato in *Figura 5.16*, in modo da avere una distribuzione di valori più ampia.



Figura 5.16. Superficie analizzata scelta (in verde) con all'interno i punti analizzati (in giallo) a una di distanza di 9 pixel, campione 9 faccia 1

Dopodiché si è lanciata l'analisi solo per i primi tre fotogrammi. In questo modo, sono stati ottenuti diversi valori di deformazione verticale riferiti a ciascun punto nei tre diversi

istanti. Si è quindi analizzato il singolo fotogramma e si è costruita una distribuzione normale delle deformazioni andando a scartare i valori per il calcolo della media e deviazione standard compresi nel decimo percentile e maggiori del novantesimo percentile, essendo questi troppo distanti dal valore medio. Si è ripetuta l'analisi per i due fotogrammi successivi ottenendo 3 distribuzioni normali simili (vedi *Figura 5.17*).



Figura 5.17. Distribuzioni normali standard delle deformazioni assiali dei primi 3 fotogrammi a macchina di compressione non ancora azionata, campione 9 faccia 1

Si può notare in *Figura 5.17* che le medie delle distribuzioni non corrispondono al valore nullo, come ci si potrebbe aspettare. Sono state quindi mediate le tre medie delle distribuzioni e, assumendo la deformazione verticale costante in tutti i punti della superficie, si è considerato tale risultato come un errore del software da depurare nei fotogrammi successivi. A tale proposito, usando i medesimi punti e avvalendosi di un codice Matlab, sono state calcolate le medie delle deformazioni di ciascun fotogramma andando sempre a scartare il decimo e novantesimo percentile. Tali valori, depurati dall'errore iniziale, possono essere considerati come valori di deformazione ai diversi istanti e, attribuendo il relativo valore di tensione, è stato possibile costruire il diagramma sforzo-deformazione, riportati in ALLEGATO B. Successivamente, linearizzando i tratti lineari sono stati determinati i valori di modulo di deformazione riassunti in *Tabella 5.8*.

	E <sub>t</sub> [MPa]	
	Faccia 1	Faccia 2
Campione 9	1475,7	5113
Campione 4G	2226,8	1941,9
Campione 4P	120,94	78,44
Campione 3	ampione 3 821,37	720,26
Campione A	1155,8	1026
Campione di boiacca	11207	

Tabella 5.8. Valori di modulo di deformazione tangente ottenuti con la tecnica DIC, per il campione di malta è stata analizzata sola una faccia

Osservando i valori appena ottenuti, è facilmente riscontrabile che essi differiscono di ben un ordine di grandezza rispetto ai valori riportati in Tabella 5.7. Focalizzandosi sul valore di modulo di deformazione del campione di boiacca, si nota che il valore ricavato dalla misurazione esterna è pari a circa 2,2 GPa, mentre si ottiene un valore 5 volte più grande (circa 11,2 GPa) mediante l'analisi DIC. Per verificare tali risultati, è stato necessario svolgere una ricerca in letteratura. Purtroppo, sono stati trovati diversi studi riferiti a classi di cemento maggiori rispetto a quella utilizzata per la realizzazione del campione di boiacca, ma, in compenso, con un rapporto acqua/cemento uguale. I valori riportati nei diversi documenti sono comunque coerenti e attribuiscono a una boiacca, con un rapporto acqua su cemento pari a 0,4, un modulo di deformazione compreso tra 15 e 20 GPa (Bottani et al, 2014; Valenza et al., 2012; Yue Li et al., 2017; Zhao et al., 2014). Considerando che il cemento impiegato è di una classe inferiore rispetto a quella trovata in letteratura, il valore di modulo di deformazione ricavato dall'analisi statistica con la tecnica DIC sembra essere più attendibile. Si considera quindi il metodo di analisi statistico corretto. La differenza tra i valori di modulo di deformazione interni e quelli esterni può essere attribuita al fatto che esiste una diversa deformabilità tra la piastra e il campione, e la presenza di forze di attrito che nascono in corrispondenza delle piastre causando l'insorgere di condizioni triassiali. Infatti, nel caso di prove triassiali su sabbie, se si determinano i moduli di deformazione in campo di piccole e medie deformazioni utilizzando misure esterne alla cella di pressione, si può commettere un errore anche del 60%. Se invece si utilizzano misure interne l'errore massimo che si può commettere scende a valori di circa il 30% (Pallara, 1995). Inoltre, i moduli di deformazione possono variare di qualche ordine di grandezza al variare delle deformazioni assiali di riferimento. Tuttavia, a seguito del metodo di analisi scelto in questo capitolo, è impossibile ricavare il modulo in corrispondenza della medesima deformazione assiale tra le letture esterne e

quelle interne. Infatti, le misurazioni interne sono state ricavate da fotogrammi ottenuti con un intervallo di 5 secondi, al quale si somma un'imprecisione tra la correlazione temporale dei fotogrammi con i tempi reali della prova. A tutto questo, si aggiungono inoltre i fattori geometrici dati dall'irregolarità dei campioni e le caratteristiche eterogenee del materiale mélange. Di conseguenza, i moduli di deformazione ottenuti con il metodo DIC hanno comunque una certa aleatorietà, malgrado il modulo ottenuto per la boiacca risulti prossimo ai valori trovati in letteratura. Per tale motivo, sono necessari ulteriori studi in modo da verificare sia il metodo di analisi sia i moduli elastici ricavati.

#### 5.4 Osservazioni e interpretazione dei risultati

Innanzitutto, si analizzano i risultati di resistenza a compressione monoassiale ottenuti dai vari campioni di mélange, riportati in *Tabella 5.7*. I valori variano tra 1 e 2,4 MPa. Tali valori sono stati diagrammati in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi in modo da valutarne l'influenza.



Figura 5.18. Valori di resistenza a compressione monoassiale in funzione della VBP. La retta interpolante è stata calcolata escludendo il campione 9

Si nota in *Figura 5.18* che, ad eccezione del campione 9, la  $C_0$  aumenta linearmente con il crescere della VBP. Infatti, il campione 9 presenta una resistenza maggiore rispetto agli

altri campioni di matrice. Tale anomalia può essere associata alla differente tipologia di mélange rispetto agli altri campioni (mélange tettonico).

Escludendo quindi il campione 9, i valori si interpolano linearmente con un coefficiente di correlazione pari a 0,94. La legge lineare ottenuta e indicata sul grafico, presenta un'intercetta pari a 1,1 MPa e, in questo caso, corrisponde alla resistenza a compressione monoassiale della matrice (VBP = 0%). Quest'ultimo valore aumenta proporzionalmente con la VBP con un coefficiente pari a 0,1851. Tale fenomeno è in accordo con quanto analizzato da Linquist (1994), tuttavia, in questo caso, si manifesta un aumento delle caratteristiche meccaniche già per piccole percentuali volumetriche dei blocchi.

Per quanto riguarda i moduli di deformazione ottenuti, non è presente una correlazione con la percentuale volumetrica dei blocchi e i valori oscillano tra 0,72 e 2,23 GPa. Tale intervallo è stato ottenuto dai risultati indicati in *Tabella 5.8*, eliminando i valori del campione 4P e della faccia 2 del campione 9. Infatti, i valori ricavati da quest'ultimi campioni, si discostano molto rispetto agli altri, probabilmente a causa di fattori geometrici. Precisamente, il campione 4P risulta estremamente tozzo, mentre per la faccia 2 del campione 9, osservando il grafico sforzo-deformazione riportato in Allegato B, le deformazioni assiali risultano positive fino a rottura, come se il campione fosse in trazione. Quest'ultimo fatto è dato dall'irregolarità delle basi del campione che non sono completamente parallele rispetto alle piastre della pressa, causando quindi degli sforzi di trazione sulla faccia non perfettamente caricata.

## 5.5 Comportamento a rottura dei campioni

In parallelo, i risultati del programma *DICe* sono stati analizzati con un secondo software open-source chiamato *ParaView<sup>5</sup>*. Il programma analizza un file di tipo "*E*" fornito in output da *DICe* contenente le deformazioni analizzate nei vari fotogrammi e, attraverso una rappresentazione grafica della mesh dei punti analizzati, consente di visualizzare i risultati ottenuti facendo uso di una mappatura dei valori con una tabella di colori. Il programma è stato utilizzato per valutare la disposizione delle concentrazioni di deformazioni assiali nel tempo con la successiva nascita di fratture. I risultati delle facce principali dei campioni analizzati sono riportati in ALLEGATO C. Si può subito notare

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> ParaView: [https://www.paraview.org/]

che le deformazioni non sono uniformemente distribuite come ipotizzato nel paragrafo precedente per la determinazione del modulo di deformazione, ma si concentrano in determinati piani dove successivamente si forma la frattura. Per quanto riguarda i campioni di matrice, le deformazioni si concentrano nei piani che compongono la stratigrafia. Si può notare questa particolarità specialmente nei campioni 4G e 9, dove le fratture seguono perfettamente i piani stratigrafici (*Figura 5.19*).

Fa eccezione il campione di matrice 4P: in questo caso la stratigrafia è perpendicolare rispetto al carico e oltre a formarsi una frattura semi-verticale centrale, se ne creano ulteriori orizzontali parallele alla stratigrafia (*Figura 5.20*)

Grazie alle foto riportate di seguito e all'analisi con *ParaView*, si può enunciare che i piani stratigrafici sono superfici di debolezza con valori di resistenza al taglio inferiore rispetto al tessuto matriciale omogeneo.



Figura 5.19. Campione 9 a destra e Campione 4G a sinistra post rottura, entrambi presentano fratture semi-verticali che seguono la stratigrafia



Figura 5.20. Campione 4P post-rottura. Presenta fratture centrali semi-verticali e fratture orizzontali in corrispondenza dei piani stratigrafici

Per quanto riguarda i campioni con i blocchi, le fratture si formano parallele all'asse principale e seguono la tortuosità dei clasti, come nel caso del campione 3 riportato in *Figura 5.21*. Questo fenomeno conferma i dati trovati in letteratura: la superficie che collega i blocchi con la matrice argillosa è un piano di debolezza e influisce sulle proprietà meccaniche del materiale.



Figura 5.21. Campione 3 a fine prova, si può notare una frattura principale sub-verticale che segue la tortuosità dei blocchi

## 6 Comportamento a taglio

Si vuole determinare un criterio di rottura che possa descrivere la resistenza al taglio del Mélange dell'Oltrepò Pavese. In tale capitolo, si farà riferimento al criterio di rottura di Coulomb espresso come combinazione critica tra tensione tangenziale e tensione normale efficace. Tale inviluppo è dunque espresso nel piano delle variabili ( $\sigma', \tau$ ) definito come Piano di Mohr. In quest'ultimo piano vengono infatti riportati i cerchi di Mohr che esprimono lo stato tensionale in un punto. La condizione di rottura è raggiunta quando il cerchio di Mohr risulta tangente all'inviluppo di rottura. Sicuramente, per un materiale di questo tipo, tale inviluppo di rottura risulterà caratterizzato da una marcata curvatura e quindi non sarà lineare. Si semplifica tale comportamento e lo si linearizza tramite la retta di equazione:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

Tale retta costituisce l'espressione più generale del criterio di Coulomb e stabilisce che affinché possa prodursi la rottura, la tensione tangenziale deve superare un contributo "attritivo", rappresentato dal termine ( $\sigma' \cdot \tan \varphi'$ ), e un contributo che esprime la resistenza in assenza di tensioni efficaci normali, rappresentato da *c'*. Questo secondo contributo è solitamente indicato con il termine coesione e rappresenta semplicemente l'intercetta dell'inviluppo di rottura linearizzato.

L'obiettivo di questo capitolo è quindi quello di determinare i valori di coesione c' e angolo di resistenza al taglio  $\varphi'$  caratteristici della matrice del mélange analizzato. L'attrezzatura normalmente più utilizzata a tale scopo è l'apparecchio triassiale già citato nel capitolo 5. Tale strumento consente di realizzare prove di compressione su provini cilindrici soggetti a una tensione assiale crescente e a una tensione radiale fissa e prestabilita dall'operatore. Quest'ultime tensioni corrispondo inoltre alle tensioni principali e consentono la costruzione dei cerchi di Mohr. Il cerchio di maggiori dimensioni individua il raggiungimento della condizione di rottura. In questo modo, eseguendo almeno tre diverse prove variando la tensione radiale, è possibile ottenere il criterio di rottura andando a costruire sul piano di Mohr una retta tangente ai cerchi di rottura ottenuti. Tuttavia, come già visto nel precedente capitolo, non è possibile realizzare campioni cilindrici di mélange necessari per la prova triassiale. Si è quindi deciso di fare riferimento all'apparecchio di taglio diretto. Inoltre, in modo da studiare le caratteristiche post-picco e ricavare i parametri residui della matrice argillosa del mélange, sono state eseguite delle prove di taglio anulare. La condizione residua è caratterizzata da spostamenti relativi elevati che consentono uno isorientamento delle particelle argillose all'interno di una banda di taglio (di spessore compreso tra 10 e 50  $\mu$ m). Il raggiungimento di questa condizione può essere ottenuto da una prova di taglio diretto andando a eseguire numerosi cicli con le stesse condizioni di carico. Data l'irregolarità dei campioni di mélange impiegati per la prova di taglio diretto, si è preferito eseguire delle prove con di taglio anulare, che offre il vantaggio di imporre uno scorrimento continuo nella stessa direzione.

#### 6.1 Prove di taglio diretto

La macchina per le prove di taglio diretto, riportata in *Figura 6.1*, si compone delle seguenti parti fondamentali: scatola di taglio detta anche scatola di Casagrande, sistema di applicazione del carico verticale e sistema di applicazione dello sforzo di taglio. La scatola di taglio è costituita da due parallelepipedi a sezione quadrata contenente un foro dalle pareti rigide, in questo caso circolare ma può anche essere di forma quadrata, avente la funzione di accogliere il provino. Le due parti sono perfettamente uguali e sono in grado di scorrere una rispetto all'altra in direzione orizzontale creando uno sforzo di taglio nel provino contenuto al loro interno. Infatti, durante la fase di taglio, la parte superiore rimane ferma, essendo questa collegata all'anello dinamometrico, destinato a registrare il carico applicato dalla pressa. La parte inferiore, invece, è contenuta in una vaschetta che, collegata alla pressa orizzontale, è in grado di scorrere a velocità costante su apposite guide sferiche. Prima della fase di taglio, le due parti sono saldamente sovrapposte mediante apposite viti di bloccaggio.

Il sistema di applicazione del carico verticale è costituito da un apposito bilanciere la cui parte inferiore è in grado di accogliere i pesi necessari per trasferire direttamente o mediante sistema di leve il carico verticale al provino. Conoscendo il rapporto della leva dell'apparecchiatura, pari a 10, le tensioni agenti nella direzione verticale sono pari a:

$$\sigma_v = \frac{Carico_v \cdot g}{Area} \cdot 1000 \ [kPa]$$

dove:

- *Carico<sub>v</sub>* è la massa dei piatti moltiplicati per il rapporto di leva pari a 10 [kg];

- g è l'accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s<sup>2</sup>;
- Area è la sezione dei campioni [mm<sup>2</sup>].

Il collegamento tra bilanciere e provino avviene mediante un'apposita piastra di distribuzione del carico.

Infine, il sistema di applicazione dello sforzo di taglio consiste in una pressa orizzontale che è in grado di far avanzare il provino a velocità costante compresa tra 0,0005 e 2 mm/min.

Siccome la prova dev'essere condotta in maniera tale da garantire a-priori le condizioni drenate, per evitare la formazione di sovrapressioni interstiziali intern, le velocità della prova sono fortemente influenzate dal tipo di materiale. A tale proposito, in letteratura sono reperibili indicazioni che suggeriscono l'ordine di grandezza della velocità da adottare. In particolare, nel caso di prove su campioni di argilla, si consiglia una velocità dell'ordine di 0,001 mm/min. In realtà, l'Associazione Geotecnica Italiana (AGI,1994) suggerisce un procedimento per la corretta determinazione della velocità. Infatti, nella prima fase della prova, prima di azionare il carico orizzontale e quindi dell'inizio della prova a taglio diretto, si applica la forza assiale e l'apparecchio opera in modo analogo a un edometro. In tale fase di consolidazione, si diagramma la riduzione di altezza del provino in funzione della radice quadrata del tempo e, da tale diagramma, si stima l'istante di fine consolidazione  $t_{100}$ , ottenuto come punto di intersezione tra la tangente al primo tratto lineare e l'asintoto orizzontale della curva. Determinato tale valore, il tempo minimo richiesto per il raggiungimento della rottura in condizioni drenate è assunto pari a  $t_f \cong 10 \cdot t_{100}$ . Infine, in funzione di tale tempo e dello spostamento orizzontale a rottura  $\delta_f$  stimato tra 1 e 5 mm per le argille sovraconsolidate, si ottiene il limite superiore della velocità di prova:  $v = \delta_f / t_f$ .

Nel caso in esame, come si vedrà in seguito, nella fase di consolidazione, la curva non segue un classico andamento edometrico e non presenta un asintoto orizzontale. Tale fenomeno, come si vedrà in seguito quando verrà descritta la realizzazione dei campioni, lo si attribuisce al non completo riempimento del volume disponile e dal fatto che i due sbalzi di malta si deformano maggiormente rispetto al campione di mélange. Siccome non è possibile ottenere una velocità con il metodo appena esposto, si è deciso di applicare una velocità pari a 0,1666 mm/min. Tale valore, sebbene piuttosto alto, può essere

giustificato dato il basso il contenuto d'acqua ottenuto nel paragrafo 3.2, per cui si suppone che le sovrapressioni che nascono all'interno del campione siano irrisorie.

Poiché le uniche componenti di sforzo note sono costituite dalla tensione assiale e dalla tensione tangenziale agenti sul piano sub-orizzontale, lo stato di sforzo non è completamente determinato in questo tipo di prova. Non è pertanto possibile costruire il cerchio di Mohr, né definire i percorsi di carico. Pertanto, per interpretare i risultati della prova, si riportano direttamente sul piano di Mohr i valori della tensione tangenziale in funzione della tensione normale, agenti all'istante di rottura, rappresentato, nel caso di argille sovraconsolidate, da un picco corrispondete al massimo valore di tensione tangenziale. Le coppie di punti ( $\sigma', \tau$ ) così individuate appartengono al luogo dei punti a rottura e, tramite la loro linearizzazione, permettono di definire l'inviluppo di rottura fornendo i valori di  $c' e \varphi'$ .



Figura 6.1. Apparecchio di taglio diretto

## 6.1.1 Cassero e realizzazione dei campioni

Siccome non è possibile ottenere una porzione di mélange con le dimensioni uguali alla forma del foro della scatola di taglio, si è dovuto progettare un procedimento alternativo per la costruzione dei campioni. A questo proposito, si è progettato un cassero polimerico realizzato prima con il software di disegno AutoCad e poi stampato mediante una stampante 3D. Tale cassero ha l'obiettivo di accogliere uno spezzone di materiale mélange irregolare e poi di inglobarlo in due blocchi cilindrici di boiacca cementizia perfettamente allineati e di diametro pari al foro della scatola di Casagrande. I blocchi di boiacca hanno il compito di fissare il campione e riempire gli spazi vuoti non interessati alla prova di taglio all'interno del foro.



Figura 6.2. Modello finale del cassero progettato per la realizzazione dei campioni per la prova di taglio diretto

La progettazione del cassero ha richiesto la realizzazione di alcuni dettagli costruttivi in modo da soddisfare eventuali problematiche prima, durante e dopo il getto di boiacca cementizia. Innanzitutto, il progetto si è sviluppato partendo dalle misure del provino finale, cioè un cilindro di diametro pari a 60 mm e altezza pari a 39 mm. Le due porzioni di malta devono essere alte 17 mm in modo da non coprire il campione di mélange nella parte centrale soggetta a taglio, di altezza pari a 5 mm. Si è scelto di dividere il modello in 4 parti distinte in modo da semplificare il più possibile la fase di getto e la fase di scassero del campione: due porzioni laterali e due tappi per le basi (vedi Figura 6.2). Si è dunque cercato di realizzare un sistema di incastro in grado di allineare perfettamente tutti i componenti durante la fase di montaggio e evitare spostamenti relativi in direzione verticale e orizzontale una volta montati. Per quanto riguarda le due porzioni centrali che realizzano il cilindro, il sistema di incastro è costituito da quattro blocchi rettangolari che, durante la fase di montaggio, si innestano all'interno di due cavità aventi le medesime dimensioni. Invece, i due tappi che costituiscono le due basi del cilindro, si incastrano mediante delle scanalature circonferenziali. Nella parte centrale del cilindro, nella fascia di taglio, sono state realizzate quattro finestre in modo da consentire il getto e distribuire la boiacca cementizia quando il cassero viene completamente montato.

Per migliorare la fase di scassero, sono state inserite delle scanalature sui bordi del pezzo, mediante le quali si può imprimere una forza tale da vincere la coesione che si è venuta a creare durante la fase di maturazione tra il provino e le pareti del cassero.

Tra i vari blocchi è stato inoltre realizzato un sistema di tenuta idraulica. Infatti, se i vari pezzi non fossero perfettamente aderenti, si avrebbe un moto di filtrazione verso l'esterno da parte della malta nella fase fluida iniziale. Tale accorgimento è stato realizzato creando delle piccole scanalature di 3x3 mm dove al loro interno è stato inserito un'o-ring. Quest'ultimo oggetto è un anello di elastomero a sezione circolare, garantisce una tenuta idraulica elevata, a patto che esso venga ben immorsato tra le due facce degli elementi. Tale immorsamento è garantito da due sistemi di bulloni e viti. Alcuni dettagli costruttivi appena descritti sono visibili in *Figura 6.3*.

Prima della realizzazione di ciascun campione, il cassero deve essere lubrificato utilizzando del semplice grasso industriale in modo da non fare aderire la boiacca alle pareti.



Figura 6.3. Alcuni dettagli costruttivi del cassero realizzato per le prove di taglio diretto



Figura 6.4. Cassero stampato e montato. Sono stati rimossi alcuni difetti di stampa attraverso l'uso di lamette e acetone (il materiale usato per la stampa è solubile in questo tipo di prodotto)

Una volta stampato il cassero, si sono realizzati diversi campioni per l'esecuzione di prove a taglio diretto. Innanzitutto, si sono scelti spezzoni di matrice di mélange dell'Oltrepò Pavese prelevato nell'anno 2018. Tali blocchi sono stati scelti sufficientemente piccoli per essere contenuti all'interno del cassero, ma allo stesso tempo, sufficientemente grandi in modo da occupare il maggiore volume. Siccome il materiale presenta una stratificazione data da antiche colate sottomarine, si è cercato di orientare gli strati parallelamente alla direzione di taglio. Infatti, come confermato nelle prove di compressione monoassiale discusse nel capitolo precedente, tali piani rappresentano delle superfici di debolezza e risultano condizionanti per le caratteristiche meccaniche del materiale. Per questo motivo si è preferito orientare i campioni e ottenere le resistenze a taglio di tali piani di debolezza.

In seguito, si è voluto impermeabilizzare gli spezzoni per evitare che andassero distrutti a contatto con l'acqua contenuta nella boiacca cementizia. A tale scopo, si è applicato un sottile strato di semplice smalto per le unghie. Quest'ultimo prodotto è stato scelto essendo di facile reperibilità e consente una perfetta impermeabilizzazione del campione senza influire sui risultati della prova a taglio. Inoltre, l'alcool contenuto al suo interno permette una veloce evaporazione dei liquidi senza che questi vadano ad attaccare la matrice argillosa.

Una volta essiccato lo smalto, il blocco di mélange è stato inserito all'interno del cassero accuratamente montato e lubrificato con grasso industriale, si è riempito la prima base di boiacca. Siccome non si vuole che le basi influiscano meccanicamente compromettendo le prove di taglio, si è scelto un cemento ad alta resistenza di classe 42,5R. Inoltre, si è usato un elevato rapporto acqua su cemento pari a circa il 45%, in modo da ottenere un composto sufficientemente fluido in grado di riempire con facilità gli interstizi del cassero e di fluire facilmente all'interno dell'imbocco di una siringa di diametro inferiore ai 2 mm. Quest'ultimo strumento è stato infatti utilizzato per creare la seconda base di malta. In particolare, per creare la prima base si è montato il cassero impiegando solo uno dei due tappi disponibili sigillando la sola base inferiore. Successivamente, si è gettato un certo quantitativo di boiacca dall'alto e si è immerso il campione di mélange come descritto in precedenza. Tuttavia, per quanto riguarda la seconda base, la procedura è risultata più complicata. Precisamente, una volta sufficientemente indurita la prima base, si è sigillato il secondo coperchio, si è capovolto il cassero e si è iniettata la boiacca cementizia attraverso un tubicino sigillato all'imbocco di una siringa da 100 ml in

corrispondenza delle finestre realizzate in mezzeria del cassero. In seguito al secondo getto, si sono lasciati i campioni maturare per almeno due settimane. In *Figura 6.5* si sono riassunte le varie fasi di realizzazione dei campioni.



Figura 6.5. Principali fasi di realizzazione dei campioni per l'esecuzione delle prove a taglio diretto

Normalmente, per le prove di taglio diretto sono sufficienti 3 campioni. In questo caso, essendo il materiale di origine complessa, si è preferito realizzare 6 campioni in modo da coprire eventuali incertezze.

#### 6.1.2 Risultati della prova di taglio diretto

I risultati ottenuti dalle varie prove presentano un comportamento tipico delle argille sovraconsolidate. Infatti, evidenziano anzitutto l'esistenza di un picco, raggiunto a uno spostamento pari a circa 2 millimetri. Dopodiché, si manifesta un'instabilità meccanica caratterizzata da un improvviso collasso, con concentrazione delle deformazioni in una zona di spessore modesto e successiva formazione di una superficie di discontinuità. Di fatto, gli spostamenti post-picco sono il risultato di uno scorrimento relativo tra le due parti formatosi a seguito della rottura e i parametri di resistenza tendono ai valori residui. Come verrà descritto meglio nel prossimo paragrafo, la prova di taglio diretto è utile al fine di determinare l'inviluppo di rottura (di picco) del materiale, ma non è indicata per la determinazione dei parametri residui. Per questo motivo, in questo paragrafo si analizzeranno solo i valori di tensione di picco.

Una volta ottenuti i dati della cella di carico, LVDT orizzontale e LVDT verticale acquisiti a intervallo pari a 1 secondo, sono stati analizzati i valori, andando principalmente a rappresentare su un diagramma gli sforzi di taglio  $\tau$  ricavati dai valori forniti dalla cella di carico, in funzione degli spostamenti orizzontali. Prima di eseguire questa operazione, è stato necessario determinare la superficie del campione soggetta a taglio. Essendo la sezione ottenuta di forma irregolare, si è scelto di determinare il suo valore mediante un'analisi grafica. Infatti, è stata scattata una fotografia alle due sezioni ottenute per ciascun campione ponendo un parametro di scala (righello) vicino al campione (vedi Figura 6.6). Successivamente, caricando tali fotogrammi sul software da disegno AutoCad e scalandoli opportunamente in riferimento al righello posto vicino, si è determinata la sezione tracciando una semplice spline. Tale metodo risulta molto approssimato, infatti le superfici ricavate non risultano perfettamente piane e presentano rilevanti asperità. Inoltre, le distorsioni fotografiche potrebbero variare le dimensioni reali del campione. Si è ritenuto che gli errori di questo metodo possono ritenersi trascurabili. Si nota che le sezioni in Figura 6.6 non risultano perfettamente specchiate, infatti, una parte del materiale viene sgretolato nella fase di post-rottura andando a variare la geometria delle due sezioni. Per questo motivo, l'area di riferimento viene presa pari alla media delle due superfici ottenute per ciascun campione. Per ovviare a questo problema, gli ultimi campioni di mélange analizzati sono stati tagliati in modo da ottenere una superficie regolare di forma rettangolare.



Figura 6.6. Parte superiore e inferiore di un campione irregolare soggetto a taglio diretto. Si è evidenziato in giallo la superficie di rottura



Figura 6.7. Parte superiore e inferiore di un campione regolare soggetto a taglio diretto

Ottenuta la superficie di riferimento è stato possibile determinare le tensioni verticali con la formula descritta nel paragrafo 6.1, e quelle di taglio ottenute dal rapporto tra il carico fornito dalla cella di carico e la superficie. Successivamente, si sono diagrammati i grafici sforzo-spostamento per le differenti situazioni di carico verticale, riportato in *Figura 6.8*.



Figura 6.8. Curve di sforzo-spostamento ottenute dai vari campioni con differente sforzo verticale

Come scritto in precedenza, si è interessati a i valori di picco. Vengono quindi considerati i valori massimi di tensione tangenziale  $\tau_P$  in riferimento ai valori di tensione verticale  $\sigma$ , riassunte in *Tabella 6.1*.

Campione	1	2	3	4	5	6
σ' <sub>ν</sub> [kPa]	20,19	68,35	123,53	181,80	226,13	386,27
$ au_P$ [kPa]	121,03	503,48	450,57	330,12	546,25	518,65

Tabella 6.1. Valori di sforzo tangenziale a rottura (di picco) in funzione dello sforzo verticale agente per i diversi campioni sottoposti a prova di taglio diretto

# 6.1.3 Osservazioni e interpretazioni dei risultati della prova di taglio diretto

Con l'obbiettivo di determinare l'inviluppo di rottura alla Mohr Coulomb, le coppie di valori ( $\tau$ - $\sigma$ ), riportati in *Tabella 6.1*, sono stati poi riportate sul piano di Mohr in modo da ricavare l'inviluppo di rottura. Bisogna prima notare che, la curva arancione ( $\sigma'_v = 68,35$  kPa) rappresentata in *Figura 6.8*, presenta un valore di tensione tangenziale di picco anomalo dato il suo basso carico verticale. Questo fenomeno può essere attribuito alle caratteristiche geometriche dei campioni. Infatti, il materiale non presenta una stratigrafia

ordinata con dei piani perfettamente paralleli, ma manifesta delle superfici ondulate che ne aumentano la resistenza a taglio. Per tale motivo, si assume che il campione 2 abbia subito un incremento di resistenza e quindi è stato escluso dall'analisi. Osservando i restanti risultati sul piano di Mohr, riportato in *Figura 6.9*, è possibile osservare che i punti descrivano un andamento non lineare, tipico di un'argilla sovraconsolidata. L'andamento è stato enfatizzato con un'interpolazione esponenziale a scopo raffigurativo.



Figura 6.9. Valori di sforzo tangenziale a rottura (di picco) in funzione dello sforzo verticale sul piano di Mohr. I valori sono stati interpolati con una legge esponenziale in modo da sottolineare l'andamento non lineare dell'inviluppo di rottura

Al fine di ottenere un angolo di resistenza al taglio di picco  $\varphi_P$  e una coesione *c* rappresentativi del materiale, si è linearizzato l'inviluppo di rottura dei campioni 3, 4, 5 e 6. Quindi, oltre al campione 2, si è escluso il campione 1 in quanto troppo vicino all'origine. Il grafico ottenuto è riportato in *Figura 6.10*.



Figura 6.10. Inviluppo di rottura ottenuto interpolando linearmente le coppie di punti riportate in Tabella 6.1 escludendo i campioni 1 e 2

Dalla legge lineare ottenuta è possibile ricavare i parametri di resistenza di picco. Infatti, l'intercetta rappresenta la coesione in kPa, mentre dal coefficiente angolare è possibile ottenere l'angolo di resistenza al taglio mediante il seguente calcolo:

$$\varphi_P = \arctan(0,4226) = 23^\circ$$

In conclusione, i parametri di resistenza ottenuti dall'inviluppo di rottura di picco per la matrice del mélange in esame sono pari a:

-  $\varphi_P = 23^{\circ};$ -  $c = 364 \, kPa.$ 

I risultati appena ottenuti sono simili ai valori presenti in letteratura descritti in Capitolo 1:  $\varphi_{matrice} = 20^\circ \div 25^\circ e c_{matrice} = 50 \div 100 kPa$  (Coli et al., 2011). Fa eccezione la coesione, che risulta sovrastimata rispetto ai valori ottenuti da Coli et al. (2011), tale discrepanza può essere dovuta dalla differente tipologia di materiale.

Si sottolinea la necessità di determinare ulteriori punti in modo da definire con maggiore precisione l'inviluppo di rottura e scartare eventuali punti influenzati dall'irregolarità stratigrafica delle superfici costituenti la stratigrafia.

#### 6.2 Prova di taglio anulare

La resistenza al taglio residuo rappresenta la resistenza di un terreno sottoposto a grandi spostamenti come, per esempio, avviene lungo un piano di rottura di una frana oppure in una zona di faglia. Come accennato in precedenza, la prova di taglio diretto non è molto indicata per la determinazione dei parametri residui nelle argille perché non consente il corretto riordinamento delle particelle e di conseguenza il raggiungimento della condizione residua. Per questo motivo si è deciso di eseguire prove di taglio anulare che, rispetto alle prove di taglio diretto, hanno il vantaggio che il carico verticale e la superficie di taglio sono applicati sempre sulla stessa area durante la prova. Tale prova consente di ricreare le condizioni in sito e di ottenere valori di resistenza al taglio residua estremamente accurati. L'apparecchio impiegato è noto anche con il nome di Bromhead, dal nome del Dr. E. Bromhead, dell'Università di Kingstone, che la progettò per ovviare agli svantaggi che si presentavano con le scatole di taglio convenzionali e permette di eseguire prove di taglio su provini anulari rimaneggiati. Al provino è applicato un carico verticale (tramite la leva di rapporto 10:1) e un movimento rotazionale con velocità costante. Le deformazioni durante la fase di consolidazione e di taglio sono monitorate tramite un trasduttore lineare. La torsione trasmessa al provino è misurata da due anelli dinamometrici (o celle di carico). Trasduttore lineare e celle di carico sono collegati a un calcolatore per l'acquisizione ed elaborazione dei dati.

La prova prevede l'esecuzione di tre cicli di carico (consolidazione-rottura), per ogni provino. I carichi verticali  $\sigma'_{\nu}$  sono applicati in successione geometrica. In seguito, la caratterizzazione geomeccanica avviene tracciando l'inviluppo di resistenza residua per ogni singolo campione, sottoposto a più cicli di carico a rottura. Le fasi della prova seguite sono quelle consigliate dalla normativa British Standard (BS 1377: Part 7: 1990) e sono riportate in seguito:

- 1. applicazione del carico verticale  $\sigma'_{\nu}$ , cui segue la fase di consolidazione;
- rottura (veloce): in questo step si crea la superficie di rottura tramite la rotazione della porzione superiore del campione;
- 3. dissipazione delle sovrapressioni create all'interno del materiale;
- rottura (lenta) fin al raggiungimento dei parametri residui (stabilizzazione della τ).

Si ripetono tutte le fasi almeno altre due volte incrementando il carico verticale.



Figura 6.11. Apparecchio di taglio anulare

Innanzitutto, si è dovuto procedere con la preparazione del campione. Si deve ottenere un certo impasto con una certa consistenza che deve poi essere spalmato all'interno di una corona circolare che costituisce la macchina. Per tale operazione si è preso uno spezzone di matrice di mélange, prelevato nell'anno 2018 e successivamente pestellato in modo da eliminare le unioni tra i gradi. Questa lavorazione è stata condotta con particolare cura in modo da non frantumare i singoli grani. Successivamente, in modo da non avere grani di grande dimensione, data la ridotta sezione del provino (da 5 mm di altezza nella fase iniziale e circa 2 mm nella fase finale), si è vagliato il materiale ottenuto al setaccio ASTM 40 scartando il trattenuto di granulometria maggiore a 0,425 mm. Il passante è stato poi inserito all'interno di un forno a 100 °C in modo da eliminare l'umidità contenuta al suo interno. Dopodiché, il fine ottenuto è stato impastato con una certa quantità d'acqua distillata fino a ottenere una consistenza ottimale. La percentuale d'acqua deve essere compresa tra il limite platico e quello liquido. Per il materiale analizzato, facendo riferimento ai limiti del campione 4 riportati in Tabella 3.2 e alla consistenza durante la lavorazione, si è ottenuto un contenuto d'acqua ottimale pari al 48%. L'operazione di impasto è stata eseguita con particolare cura in modo da ottenere un composto omogeneo.

Tale materiale è stato poi lasciato riposare in frigorifero avvolto da una pellicola per oltre 24 ore.

Ultimata l'operazione di impasto, si può procedere con l'operazione di riempimento del volume della corona circolare della macchina. Questo pezzo è costituito da un disco in acciaio con una scanalatura circolare al cui interno viene posto il campione. Le basi della corona circolare sono inoltre costituite da due pietre porose che permettono la fuoriuscita dell'acqua in eccesso durante le fasi di consolidazione. Prima dell'inserimento del campione, si devono far bollire tali pietre per almeno 15 minuti in modo da eliminare le eventuali impurità. Il materiale è stato inserito con l'ausilio di uno spatolino facendo attenzione a non inglobare bolle d'aria. Terminata quest'ultima operazione, si è ottenuto un campione anulare di diametro esterno pari a 100 mm, diametro interno di 70 mm, una sezione di 40,055 cm<sup>2</sup> e altezza pari a 5 mm.



Figura 6.12. Applicazione del materiale all'interno della corona circolare, è possibile vedere la base costituita da una pietra porosa

Infine, si è posizionata la corona circolare in sede, si è montato il sistema di applicazione del carico verticale e infine calibrato il traduttore verticale. La corona circolare è posta all'interno di una vaschetta in plexiglass la quale viene riempita d'acqua distillata in modo da mantenere le pietre porose sature una volta caricato il campione.

Le pressioni verticali agenti nelle varie prove sono state calcolate andando a moltiplicare i pesi applicati ( $Peso_v$ ) per l'accelerazione di gravità (g) e il braccio di leva con rapporto 10:1, successivamente dividendo il risultato per la sezione del campione (A):
$$\sigma'_{v} = \frac{Peso_{v} \cdot g \cdot 10}{A}$$

A tali valori è stata sommata la tensione data dal tappo stimata pari a 4,4 kPa. I valori di pressione verticale sono riportati nella tabella di seguito:

Prova	Peso <sub>v</sub> [kg]	<b>σ'</b> ν [kPa]	Tensione data dal tappo <i>[kPa]</i>	<b>σ'</b> τοτ [kPa]
1	2	49,0	4,4	53,4
2	4	97,9	4,4	102,3
3	8	195,9	4,4	200,3
4	16	391,7	4,4	396,1

Tabella 6.2. Carichi verticali nelle varie prove

Una volta applicato il carico, inizia la fase di consolidazione primaria. In tale fase vengono misurati i cedimenti nel tempo e può ritenersi conclusa quando la curvacedimenti è tangente ad un asintoto orizzontale, quindi quando si considerano terminate le variazioni di volume legate alla fuoriuscita di acqua per dissipazione di  $\Delta u$ . Per il materiale in esame, la consolidazione primaria è durata 24 ore ad ogni step.

Successivamente, segue la fase di rottura veloce: si applicano delle rotazioni rapide al campione al fine di creare in breve tempo una superficie di rottura ben definita. Tale passaggio prevede la rotazione della parte superiore della corona circolare di almeno due giri completi (720°) con una velocità di 6°/min (durata totale 2 ore). Siccome in tale fase di rottura veloce nascono delle sovrapressioni interstiziali, segue una seconda fase di consolidazione di durata minore rispetto alla prima, pari a circa un'ora.

Infine, vi è la fase di rottura lenta dalla quale sono stati misurati i parametri residui. In questo caso si imposta una velocità estremamente lenta, pari a 0,048°/min, in modo da considerare la rottura in condizioni drenate. La condizione residua viene considerata raggiunta quando la coppia torsionale resistente si assesta, al procedere della rotazione, su un campo di valori ristretto. Generalmente tale fase è durata 24 ore.

Ultimato il primo ciclo di carico e rottura appena descritto, si è ripetuta tutta la procedura sullo stesso campione con i successivi carichi fino ad esaurire l'intera sequenza di prova.

#### 6.2.1 Risultati della prova di taglio anulare

Terminate tutte le fasi della prova, i dati letti dalle celle di carico e dal trasduttore sono recuperati da file di testo che vengono successivamente raccolti in un unico file Excel per poi essere elaborati. In particolare, al fine di determinare l'angolo residuo di resistenza al taglio, si è interessati all'elaborazione dell'ultima fase di rottura lenta. Si vuole infatti ricavare la resistenza a residua di taglio  $\tau_r$  in funzione della tensione verticale in modo da ricavare l'inviluppo di rottura sul piano di Mohr. Questo parametro viene calcolato secondo la seguente formula:

$$\tau_r = \frac{(F_1 + F_2) \cdot L}{4 \cdot \pi \cdot (R_e^3 - R_i^3)} \cdot 1000 \ [kPa]$$

dove:

- $F_1 e F_2$  sono rispettivamente le forze lette sulle celle di carico n°1 e n°2 [N];
- L il braccio della coppia, cioè la distanza tra i due punti di applicazione delle forze
  F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> pari a 152,5 mm;
- $R_e$  il raggio esterno del provino pari a 50 mm;
- R<sub>i</sub> il raggio interno del provino pari a 35 mm.

Tale parametro viene estrapolato quando assume un andamento asintotico costante nel tempo indicando la completa riorientazione delle particelle di argilla lungo la superficie di taglio ed il raggiungimento della minima resistenza residua disponibile sulla superficie stessa, associata al moto laminare delle particelle. In funzione delle pressioni verticali  $\sigma'_{v}$ , si ottengono i seguenti valori di resistenza al taglio residua:

	σ <sub>v</sub> [kPa]	τ <sub>r</sub> [kPa]
Carico 1	53,4	3,1
Carico 2	102,3	10,5
Carico 3	200,3	19,1
Carico 4	396,1	42,4

Tabella 6.3. Valori di sforzo tangenziale residui in funzione dello sforzo verticale agente

Una volta riportate tutte le coppie  $\sigma'_v - \tau_r$  sul piano di Mohr, si interpolano linearmente i valori impostando l'intercetta nulla, essendo la coesione nulla in condizione residua, ricavando l'angolo d'attrito residuo (vedi *Figura 6.13*). Infatti, la legge lineare ricavata è descritta da un coefficiente angolare pari a 0,1039, dal quale si ricava l'angolo di resistenza al taglio residuo pari a:



$$\varphi'_{P} = \arctan(0,1039) = 6^{\circ}$$

Figura 6.13. Inviluppo di rottura ottenuto interpolando linearmente le coppie di punti riportate in Tabella 6.3

L'angolo appena ottenuto risulta essere molto basso, ma coerente con quanto riportato in letteratura. Infatti, tale angolo è giustificato perché se la frazione di argilla è superiore al 50% (in questo caso il materiale ha un contenuto di argilla pari al 77%, vedi *Figura 3.11*), la resistenza residua è controllata quasi interamente dalla mineralogia delle particelle, con valori dell'angolo di attrito che variano da 15° a 5° (Kenney, 1967, 1977).

#### Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente elaborato, a seguito di un iniziale inquadramento teorico centrato sulla caratterizzazione geometrica e meccanica dei bimrock, basato sulla letteratura di riferimento, sono state in un primo momento descritte la zona di prelievo del materiale in analisi e la tecnica di estrazione impiegata. Successivamente, si è cercato di caratterizzare in laboratorio il mélange prelevato, utilizzando le tecniche più classiche tipicamente adoperate per lo studio dei terreni, ovvero la determinazione del contenuto d'acqua, i limiti di Atterberg e l'analisi granulometrica. Per tali prove sono stati analizzati quattro campioni, due costituti prevalentemente da matrice e due con una certa percentuale volumetrica di blocchi: i risultati ottenuti indicano che tutti e quattro i campioni presentano una media-elevata plasticità con alti valori di indice di consistenza e sono costituiti in prevalenza da materiale fine con componente argillosa che supera il 50%.

Nel Capitolo 4 sono state verificate le proprietà di autosomiglianza e di invarianza di scala di un campione di mélange con una certa percentuale di blocchi, in accordo con le linee guida proposte da Medley (1994, 1997, 2001). Si è visto che, come per il Franciscan Mélange, la distribuzione dimensionale dei blocchi si presenta auto-simile per le diverse scale di osservazione indagate. Successivamente, è stata stimata la percentuale lineare cumulata dei blocchi utilizzando l'approccio statistico Montecarlo: in particolare, sono state prese in considerazione dieci serie random di posizioni di esecuzione dei sondaggi, simulati con linee di scansione verticali tracciate su due sezioni di un campione eterogeneo di mélange, considerando la realizzazione di diversi fori di sondaggio scavati in sequenza. I risultati ottenuti indicano che la percentuale lineare dei blocchi tende a stabilizzarsi attorno alla percentuale areale dei blocchi, per lunghezze di campionamento circa pari a  $10 \cdot d_{max}$ , valore già individuato da Medley (1997) svolgendo le medesime analisi sulle sezioni dei campioni di bimrock artificiale da lui realizzati. Tuttavia, i risultati differiscono dalla percentuale volumetrica reale dei blocchi, determinata tramite un processo di vagliatura. La discrepanza dei risultati può essere dovuta ad una sottostima della percentuale reale dei blocchi, siccome il metodo di vagliatura impiegato non permette la determinazione dei blocchi di argilla sovraconsolidata. Inoltre, è stata calcolata l'incertezza in funzione della lunghezza di campionamento, che mostra un andamento decrescente esponenziale. Si evidenzia la necessità di ulteriori studi, utili per aumentare il numero di dati a disposizione e per verificare le stime effettuate per le due sezioni indagate.

Nel capitolo 5 è stato analizzato il comportamento a compressione del materiale mélange in esame. In particolare, data la complessità nell'ottenere campioni di forma ideale per i test, sono state eseguite delle prove di compressione monoassiale su blocchi prismatici non perfettamente regolari e di dimensioni varie ottenuti mediante l'utilizzo di una sega circolare a lama diamantata. Al fine di ottenere il modulo elastico del materiale, sono state misurate le deformazioni assiali durante il corso della prova. Tale operazione è stata eseguita in parallelo da un trasduttore esterno, che determina l'abbassamento della piastra, e da un sistema di correlazione digitale di immagini che utilizza un sistema di confronto di immagini in sequenza scattate durante la prova sulle facce parallele alla direzione di compressione. Quest'ultimo metodo permette la determinazione delle deformazioni in funzione degli spostamenti dei pixel, tuttavia, essendo una tecnica di recente sviluppo e data l'irregolarità dei campioni, ha richiesto l'ideazione di diverse tipologie di analisi al fine di ottenere valori di moduli di deformazione attendibili. A questo proposito, è stata eseguita una prova di compressione su un campione regolare e omogeneo costituto da boiacca cementizia, in modo da verificare il metodo di analisi scelto escludendo le problematiche legate all'eterogeneità del materiale e all'irregolarità geometrica dei campioni. I valori ottenuti di modulo di deformazione, ricavati dalle letture interne e da quelle esterne, differiscono di un ordine di grandezza. In particolare, i moduli determinati dalla correlazione digitale di immagini variano da 0,72 a 2,23 GPa per i campioni di mélange e risultano pari a 11,2 GPa per il campione di boiacca. Grazie ai valori determinati in letteratura, quest'ultimo valore sembrerebbe essere più attendibile rispetto a quello fornito dagli spostamenti letti dal trasduttore esterno, che risulta essere inferiore di un ordine di grandezza. Tale differenza mette in evidenza la problematica relativa alla determinazione di deformazioni ottenute dalle letture esterne. Nonostante quanto appena descritto, tali metodi di analisi necessiterebbero di ulteriori studi per la validazione dei risultati.

Nel medesimo capitolo sono stati inoltre ricavati i valori di resistenza a compressione monoassiale dei vari campioni, dai quali si è osservata una dipendenza lineare con la VBP. In particolare, si è trovata una  $C_0$  pari a 1,1 MPa per la pura matrice, il cui valore aumenta proporzionalmente con la VBP con un coefficiente pari 0,1851. Tale risultato sembra contraddire quanto riportato negli studi presenti in letteratura, i quali descrivono che la resistenza meccanica non mostra una significativa variazione in corrispondenza di percentuali volumetriche inferiori al 25%.

Nell'ultimo capitolo si è voluto determinare l'inviluppo di rottura in grado di descrivere la resistenza al taglio della matrice costituente il Mélange dell'Oltrepò Pavese. A tale proposito sono state eseguite due tipologie di prove: la prova di taglio diretto e la prova di taglio anulare. La prima è utile a determinare i parametri di picco e consiste nel sottoporre degli spezzoni di mélange a sforzi di taglio diretto attraverso l'apparecchio di Casagrande. Essendo il materiale mélange non campionabile, è stato usato un approccio non convenzionale. Infatti, al fine di ottenere campioni di dimensioni perfette pari a quelle del foro della scatola di taglio, è stato realizzato un modellino in 3D con lo scopo di inglobare gli spezzoni di materiale in due basi cilindriche costituite da boiacca cementizia e di diametro coincidente con quello del foro. Siccome la prova di taglio diretto non è indicata per lo studio post-picco, si è deciso di sottoporre il materiale ad alcune prove di taglio torsionale, in modo da ottenere le resistenze residue. Per quanto riguarda i parametri di picco, sono stati ottenuti valori di angolo di resistenza al taglio pari a 23° e coesione pari a 364 kPa. Questi ultimi valori sono stati ricavati a seguito di varie assunzioni e sarebbero necessarie ulteriori prove in modo da verificare tali risultati. Invece, per quanto riguarda l'angolo di resistenza al taglio residuo, è stato ottenuto un valore molto basso, pari a 6°.

In conclusione, in riferimento agli eventuali sviluppi futuri del lavoro, sarà necessario sicuramente eseguire ulteriori prove sul materiale naturale, in modo da validare i risultati ottenuti in questo elaborato. Inoltre, potranno essere eseguite nuove prove di laboratorio su dei campioni ricostituiti, composti da una matrice argillosa realizzata con del caolino consolidato, nella quale si dovranno inglobare dei blocchi calcarei prelevati dai campioni naturali. Tale tecnica permetterà la realizzazione di campioni ideali per l'esecuzione di prove triassiali, condotte in condizioni controllate e ripetibili che consentiranno la configurazione e calibrazione di un modello numerico 3D che simulerà tale prova. Il modello tridimensionale potrà presentare le medesime caratteristiche geometriche del campione ricostituito, utilizzando la tomografia computerizzata ai raggi-x. La tecnica tomografica appena citata permetterà infatti di conoscere esattamente la posizione e dei blocchi all'interno del campione in funzione delle densità. L'uso di campioni di mélange ricostituiti è necessario in quanto la matrice naturale è composta da densità diverse e, in alcuni casi, simili alla densità dei blocchi inglobati al suo interno, e ciò impedisce la corretta individuazione dei clasti; al contrario, la matrice omogenea di caolino si suppone possa evitare tale problema.

#### **Bibliografia**

- A.G.I., 1979. Some Italian experiences on the mechanical characterization of structurally complex Formations. Proc. IV I.C.R.M., Montreaux, 1, 827-846.
- Afifipour, M., Moarefvand, P., 2013. Mechanical behavior of bimrocks having high rockblock proportion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 65, 40–48.
- Altinsoy, H., 2006. A Physical Based Model Investigation for Determination of Shear Strength of Block in Matrix Rocks. (MSc thesis) Hacettepe University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey (91pp).
- Bottani M., Bravirio M., Giustozzi F., 2014. Indagine sperimentale sul calcestruzzo per finitrici a casseforme scorrevoli: mix-design, reologia e campi prova. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano.
- Button, E., G. Riedmueller, W. Schubert and E.Medley, 2003; Tunneling in tectonic Mèlanges: Accomodating the Impacts of Geomechanical Complexities and Anisotropic Rock Mass Fabrics, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, March 2003.
- Coli, N., Berry, P., Boldini, D., and Castellucci, P., 2008, Analysis of the Block Size Distribution in the Shale-Limestone Chaotic Complex (Tuscany, Italy): San Francisco, Proceedings, Symposium of American Rock Mechanics Association, June 27–July 3, 2008, 7 p.
- Coli, Berry, and Boldini., 2011. In Situ Non-conventional Shear Tests for the Mechanical Characterisation of a Bimrock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48.1 (2011): 95-102. Web.
- Coskun, A., 2010. Development of an Empirical Approach to Overcome the Problems for Boundary Condition between Bimrocks and Jointed Rock Masses (MSc Thesis).
   Hacettepe University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey.
- Cowan, D., 1985. Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the western Cordillera of North America. Geological Society of America Bulletin, v.96, April 1985.
- D'Elia B., (1991). *Ricerca sperimentale sul comportamento meccanico delle Argille Scagliose Toscane*, Rapporto Finale. Technical Report, Università Degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, 1991 (in Italian, unpublished).

- Festa, A., Pini, G.A., Dilek, Y., Codegone, G., 2010. Mélanges and mélange-forming processes: a historical overview and new concepts, in Dilek, Y. (Ed.), Alpine Concepts in Geology. International Geology Review, 52 (10-12), pp. 1040-1105. https://doi.org/10.1080/00206810903557704
- Festa, A., Pini, G.A., Ortaga, K., Dilek, Y., Codegone, G., 2015. Late Oligocene-early Miocene olistostromes (sedimentary mélanges) as tecno-stratigraphic constraints to the geodynamic evolution of the exhumed Ligurian accretionary complex (Northern Apennines, NW Italy). International Geology Review, 57:5-8, 540-562, early online, <u>https://doi.org/10.1080/00206814.2014.931260</u>
- Festa, A., Pini, G.A., Ortaga, K., and Dilek, Y., 2019. Diagnostic features and fieldcriteria in recognition of tectonic, sedimentary and diapric mélanges in orogenic belts and exhumed subduction-accretion complexes. Godwana Research, early online, <u>https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.01.003</u>
- E.Gabrielli, C. Colla, 2013. La tecnica della correlazione digitale di immagini per il monitoraggio di provini di muratura sottoposti a prove meccaniche, DISTART Department; University of Bologna, Bologna, Italy.
- Gokceoglu, C., 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara Agglomerates from their petrographic composition. Engineering Geology 66, 39-51.
- Goodman, R.E., Ahlgren, C.S., 2000. Evaluating the safety of a concrete gravity dam on weak rock-Scott Dam. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126, 429-442.
- Haneberg, W. C., 2004. Simulation of 3D block populations to characterize outcrop sampling bias in bimrocks, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September 2004.
- Hoek, E., 2001, Terzaghi lecture: Big tunnels in bad rock: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, p. 726–740, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:9(726).
- Houska, J., 1982. Proceedings of the international symposium on the geotechnics of structurally complex formations. Eng. Geol., 19 (1), 78-79.

- Irfan, T.Y., Tang K.Y., 1993. Effect of the Coarse Fractions on the Shear Strength of Colluvium. GEO report No. 22-Hong Kong Geotechnical Engineering Office, Reprinted, 1995, 223.
- John J. Valenza, Jeffrey J.Thomas, (2012). *Permeability and elastic modulus of cement* paste as a function of curing temperature. In Cement and Concrete Research Volume 42, Issue 2, February 2012, Pages 440-446
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., 2014. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. Engineering geology A. 2014, vol. 183, pp. 65-79
- Kenney T. C., 1967. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. Proc. Geotechnical Conference on the shear strength properties og natural soils and rocks, Oslo, 1, 123-129.
- Kenney T. C., 1977. Residual strength of mineral mixtures, 10<sup>th</sup> ICSMFE, 1, 155-160.
- Lancellotta R., 2012, Geotecnica, quarta edizione, Bologna, Zanichelli.
- Lindquist, E., 1994. *The Strength and Deformation Properties of Melange*. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Linquist ES, Goodman RE., 1994. Srength and deformation properties of a physical model melange. In:Nelson PP, Laubach SE, eds. Proceedings of the 1st North America Rock Mechanics Symposium. Austin, Texas: A.A. Balkema; 1994:843-850.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman and Co, New York, 468 pp.
- Medley, Edmund. (1994). The engineering characterization of melanges and similar block-in- matrix rocks (Bimrocks) /
- Medley, Edmund & S. Lindquist, Eric. (1995). *The engineering significance of the scaleindependence of some Franciscan melanges in California, USA*
- Medley, Edmund. (1999). Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. Felsbau. 17. 152-162.
- Medley, Edmund. (2001). Orderly characterization of Chaotic franciscan melanges. Felsbau. 19. 20-33.
- Medley, Edmund. (2002). Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks). In Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), ed. by Hammah, R., Bawden, W., Curran, J.

and Telesnicki, M. ; July 2002, Toronto, Canada; University of Toronto Press, pp. 509-606

- Medley, E., 2004; Observations on Tortuous Failure Surfaces, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Enginnering Geology; Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September 2004.
- Medley, E., Sanz Rehermann, P.F. 2004. Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixtures) with Application to Slope Stability Problems. Proceedings Eurock 2004
  & 53rd Geomechanics Colloquium Salzburg, Austria October 2004.
- Medley, E., Zekkos, D. (2011). Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. Mélanges: Processes of Formation and Societal Significance, Geological Society of America Special Paper 480. 480. 261-277. 10.1130/2011.2480(13)
- Meyerhof, G.G., 1982. *The geotechnics of structurally complex formations*. Eng. Geol., 19 (1), 63.
- Moritz, B., Grossaeur, K., and Schubert, W., 2004, Short term prediction of system behaviour of shallow tunnels in heterogeneous ground: Felsbau, Journal of Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling, v. 22, p. 44–53.
- Pallara Oronzo, 1995. Comportamento sforzi-deformazioni di due sabbie soggette a sollecitazioni monotone e cicliche. Tesi di dottorato, Politecnico di Torino
- Panini, F., Fiorini, C., Fregni, P., Bonacci, M., 2002. Le rocce caotiche dell'Oltrepò Pavese: Note illustrative della Carta Geologica dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino. In: Atti Ticinenesi Di Scienza Della Terra, v. 43, p. 83-109.
- Picarelli, L., 1986. Caratterizzazione geotecnica dei terreni strutturalmente complessi nei problemi di stabilità dei pendii. Atti XVI Convegno Nazionale Geotecnica, Napoli, 15-16 Maggio.
- Raymond, L.A., 1984. Classification of melanges. In Raymond L.A., ed, Melanges: Their nature, origin and significance. Geological Society of America Special Paper, 198, 7-20.
- Riedmüller, G., and Schubert, W., 2002, Tunnels through fault rocks and tectonic mélanges—A short course for engineering geologists and geotechnical engineers (presentations and fi eld trip guide): San Francisco Sections of the Association of Engineering Geologists and American Society for Civil Engineers, May 31–June 1, 2002, Oakland, California.

- Roadifer, J.W., Forrest, M.P., Lindquist, E.S., 2009. Evaluation of shear strength of melange foundation at Calaveras Dam. Proc. U.S. Society for Dams, Annual Meeting and Conference, 29th, on "Managing OurWater Retention Systems", Nashville, Tennessee, 507–521.
- Sonmez, H., C. Geokceoglu, E. Tuncay, H. Nefeslioglu, and E. Medley, 2004. *Relationships Between Volumetric Block Proportions and Overall UCS of a Volcanic Bimrock*, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Enginnering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September 2004.
- Sonmez, H., K. Kasapoglu, C. Coskun, C. Tunusluoglu, E. Medley and R. Zimmeraman, 2009; A conceptual Empirical Approach for the Overall Strength of Unwelded Bimrocks, in Proc. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions, Karst and Soft Rock, Int. Soc. Rock Mechanics Regional Symposium, Dubrovnik, Croatia, 29-31 October, 2009.
- Tsiambaos, George. (2010). Engineering Geological behaviour of heterogeneous and chaotic rock masses. Bulletin of the Geological Society of Greece. XLIII. 183-195. 10.12681/bgsg.11173.
- Volpe, R.L., Ahlgren, C.S., Goodman, R.E., 1991. Selection of engineering properties for geologically variable foundations. In: Proceedings of the 17th International Congress on Large Dams, Paris, 1991. 1087-1101.
- Wakabayashi, John & Medley, Edmund. (2004). Geological characterization of Melanges for practitioners. Felsbau. 22.
- Xu, W., Hu, R., Tan, R., 2007. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge area, China. Géotechnique. 3, 255-264.
- Yue Li, Peng Wang, Zigeng Wang, 2017. Evaluation of elastic modulus of cement paste corroded in bring solution with advanced homogenization method. In Construction and Building Materials Volume 157, 30 December 2017, Pages 600-609
- Zhao, H., Huang, D., Wang, X. et al., 2014. Dynamic elastic modulus of cement paste at early age based on nondestructive test and multiscale prediction model, J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. (2014) 29: 321. https://doi.org/10.1007/s11595-014-0915-6

### ALLEGATO A

# Diagrammi di sforzo-deformazione ricavati dagli spostamenti misurati dal trasduttore esterno

• Campione 9





## • Campione 4G





## • Campione 4P





## • Campione 3





### • Campione A





### • Campione di boiacca





### ALLEGATO B

# Diagrammi sforzo-deformazione dai dati ricavati dalla tecnica DIC



• Campione 9 faccia 1



### • Campione 9 faccia 2





### • Campione 4G faccia 1





### • Campione 4G faccia 2





## • Campione 4P faccia 1





### • Campione 4P faccia 2





## • Campione 3 faccia 1





### • Campione 3 faccia 2





### • Campione A faccia 1





### • Campione A faccia 2





### • Campione di boiacca





### ALLEGATO C

#### Studio del comportamento a rottura dai dati ricavati dalla tecnica DIC









		- 2.0e-03 - 0.001 - 0 NI 0.001 VI 0.002 05 0.003 0.004 4.7e-03	Si analizza di seguito la posizione della concentrazione delle deformazioni assiali e la conseguente nascita di fratture del <b>Campione A</b> <b>Faccia 2</b> . I risultati relativi a <i>ParaView</i> sono riferiti alla mesh di punti gialle e alla scala di colori qui a sinistra riportati.	
	Tempo: 0 minuti Carico: 0 MPa	Tempo: 10 minuti Carico: 0.39 MPa	Tempo: 20 minuti Carico: 0.79 MPa	Tempo: 30 minuti Carico: 1.18 MPa
ParaView				
Fotogramma				
	Tempo: 40 minuti Carico: 1,55 MPa	Tempo: 60 minuti Carico: 2,15 MPa	Tempo: 80 minuti Carico: 2,38 MPa	Tempo: 90 minuti Carico: 2,12 MPa
ParaView				
Fotogramma				

- 2.0e-03 - 0.001 - 0 X 0.001 VEUS 0.002 S 0.003 0.004 5.0e-03			Si analizza di seguito la posizione della concentrazione delle deformazioni assiali e la conseguente nascita di fratture del <b>Campione di</b> <b>Malta</b> . I risultati relativi a <i>ParaView</i> sono riferiti alla mesh di punti gialle e alla scala di colori qui a sinistra riportati.	
	Tempo: 0 minuti Carico: 0 MPa	Tempo: 10 minuti Carico: 0,69 MPa	Tempo: 20 minuti Carico: 2,04 MPa	Tempo: 30 minuti Carico: 4,13 MPa
ParaView				
Fotogramma				
	Tana 40 minut	Town (0 minut	Turner 90 minut	Turner 110 minut
	Carico: 6,94 MPa	Carico: 12,71 MPa	Tempo: 80 minuti Carico: 17,35 MPa	Carico: 15,08 MPa
ParaView				
Fotogramma				

#### Ringraziamenti

Eccomi giunto alla fine di questo percorso, iniziato quasi per sfida e rivelatosi invece un'esperienza unica che mi ha aiutato a crescere e aprire gli occhi verso il modo; un percorso fatto di tanti momenti belli, spensierati e ricchi di soddisfazioni e di altri brutti, durante i quali ho spesso seriamente pensato di mollare: solo grazie alle persone che ho la fortuna di avere accanto e che desidero ringraziare sono riuscito a superare tutto e ad arrivare alla conclusione.

Ma prima di tutto mi rivolgo a te papà, tu che mi hai dato il più grande insegnamento: mi hai mostrato una grande forza di volontà e non ti sei mai fatto abbattere malgrado le difficoltà della vita. Per questo motivo voglio dedicare a te questa tesi, la conclusione di questi anni in cui non hai mai smesso di credere in me dicendomi "Bravo Popon". Grazie Papà.

Il mio ringraziamento va in primo luogo ai relatori di questa Tesi, Prof.ssa Monica Barbero, Ing. Maria Lia Napoli e Prof. Claudio Scavia per il loro supporto, la loro guida sapiente e l'aiuto che mi hanno dato nella stesura e nella correzione dell'elaborato.

Un ringraziamento ai miei compagni di avventura Lorenzo e Flora che, sotto la guida dell'Ing. Oronzo Pallara e dell'Ing. Giampiero Bianchi, mi hanno aiutato nell'intento di "domare" questo non tanto simpatico materiale mélange.

I ringraziamenti più preziosi li rivolgo a mamma e Laurent, per avermi sempre supportato e per avere creduto in me sin dall'inizio, malgrado i tanti momenti brutti e il mio carattere non sempre facile da interpretare.

Grazie ai nonni, zii e cugine per l'affetto che quotidianamente mi dimostrate e per la vostra presenza costante nella mia vita.

Grazie a tutti i miei amici: a quelli di sempre, compagni di vita; a quelli conosciuti tra i banchi del Poli, che mi hanno aiutato a superare lunghe ore di studio, notti in bianco e momenti di agitazione prima di ogni esame; a quelli con cui ho condiviso quella pazza casa in quel di Porta Palazzo.

In ultimo, ma sicuramente non per importanza, voglio ringraziare Noemi, per il suo amore, il suo affetto, la sua pazienza e i suoi preziosi consigli che mi hanno aiutato a superare tutte le difficoltà e rendere quei momenti felici ancora più felici. Sei stata la più grande fortuna di questi anni. Grazie.