

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Studio del comportamento meccanico di una formazione complessa

Relatori:

Prof.ssa Monica Barbero
Ing. Maria Lia Napoli

Candidato:

Lorenzo Padula

Anno accademico 2018/2019

Sommario

Introduzione.....	3
1. Caratteristiche principali delle formazioni complesse	5
1.1. Aspetti generali sulle formazioni strutturalmente complesse	6
1.2. Caratteristiche geometriche e geomeccaniche dei bimrocks	11
1.3. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi.....	20
1.4. Interpretazione delle caratteristiche dei bimrocks mediante modelli	24
1.4.1. Modello fisico di Lindquist	25
1.4.2. Modello fisico di Medley	33
1.5. Descrizione geologica di un Mélange dell'Oltrepò Pavese.....	37
2. Caratterizzazione di un Mélange dell'Oltrepò Pavese.....	39
2.1. Descrizione dei campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese.....	39
2.2. Determinazione del contenuto d'acqua	42
2.3. Determinazione dei limiti di Atterberg.....	44
2.4. Analisi granulometrica	48
3. Determinazione della percentuale volumetrica di un Mélange d'Oltrepò Pavese	53
3.1. Verifica delle proprietà di autosomiglianza e invarianza di scala	53
3.2. Determinazione della percentuale volumetrica dei blocchi	66
4. Prova di compressione monoassiale.....	72
4.1. Descrizione della tecnica DIC (Digital Image Correlation).....	73
4.2. Descrizione dei campioni utilizzati per la prova di compressione monoassiale.....	76
4.3. Analisi dei risultati ottenuti tramite prova di compressione monoassiale	79
4.4. Analisi del comportamento a rottura dei campioni sottoposti a prova di compressione monoassiale	105
5. Modellazione numerica della prova di compressione monoassiale.....	107
5.1. Descrizione del software Rocscience RS2.....	108
5.2. Descrizione della modellizzazione su RS2	109
5.3. Analisi dei risultati della modellazione numerica.....	113
Conclusioni	131

Indice delle figure	133
Indice delle tabelle.....	138
Bibliografia	139
Allegato A.....	141

Introduzione

Le “formazioni complesse” sono quei materiali, ammassi rocciosi o terreni, che presentano proprietà meccaniche e geologiche molto variabili nello spazio e spesso sono caratterizzate da un’organizzazione caotica e disorganica. Tali formazioni comprendono le cosiddette “formazioni rocciose strutturalmente complesse”, costituite da una struttura detta a “blocco in matrice” di cui fanno parte i “bimrocks” e i “mélanges”. Con il termine bimrock (block-in-matrix rock), introdotto da Medley (1994) per indicare materiali eterogenei, sono indicati quei materiali caratterizzati da blocchi di roccia all’interno di un materiale meno resistente, più fine e cementato. Nonostante in letteratura (Lindquist, 1994) i termini *mélange* e bimrock siano usati indistintamente, nella realtà è stato lo stesso Medley a suggerirne una differenziazione. Medley (2002), infatti, identifica i *mélanges* come un sottogruppo dei bimrocks che mostra maggiori problematiche dal punto di vista ingegneristico, essendo presente di solito in zone montuose e le cui origini derivano da fenomeni tettonici di subduzione. In questo studio, per indicare gli ammassi eterogenei e le formazioni rocciose strutturalmente complesse si utilizzeranno senza distinzioni termini come bimrock e *mélange*. Essendo queste “formazioni complesse” caratterizzate da materiali aventi proprietà geomeccaniche molto differenti, l’eterogeneità costituisce la caratteristica più rilevante per la seguente trattazione. L’eterogeneità e quindi l’elevata variabilità spaziale, litologica e meccanica possono causare notevoli problematiche nella fase di progetto di opere ed interventi in presenza di formazioni strutturalmente complesse, essendo la caratterizzazione geotecnica molto difficoltosa. Per questi motivi è comune semplificare il problema andando ad assumere che il comportamento meccanico dei bimrocks sia completamente governato dalle proprietà della sola matrice, trascurando la presenza delle inclusioni; ma è risultato evidente nel tempo che questa scelta non appaia né la più realistica né tantomeno la più cautelativa (Medley, 2004). Ultimamente, infatti, si è mostrato grande interesse per lo studio e l’analisi di questi materiali. L’obiettivo del presente elaborato di tesi è quello di eseguire un’accurata analisi e un’adeguata caratterizzazione meccanica per poter avere una più vasta conoscenza delle proprietà di questi materiali, per evitare ostacoli nella fase di progettazione ed esecuzione di opere ed interventi di natura ingegneristica.

Il Capitolo 1 si propone come obiettivo quello di descrivere le caratteristiche principali delle formazioni complesse, partendo dalla loro definizione e classificazione, focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche geologiche e meccaniche del materiale in esame "Mélange dell'Oltrepò Pavese", fino alla trattazione delle principali problematiche legate a tali tipologie di materiale.

Il Capitolo 2 si focalizza sull'esecuzione, essendoci state delle modifiche rispetto alla caratterizzazione di un terreno standard, e sui risultati ottenuti di varie prove di laboratorio per la caratterizzazione del "Mélange dell'Oltrepò Pavese", ovvero la determinazione del contenuto d'acqua, dei limiti di Atterberg e della distribuzione granulometrica.

Il Capitolo 3 ha l'obiettivo di analizzare l'influenza della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) sulle caratteristiche meccaniche e quindi sul comportamento di un "Mélange dell'Oltrepò Pavese".

Nel Capitolo 4 viene analizzato il modulo di deformazione attraverso una prova di compressione monoassiale e un sistema di monitoraggio DIC (Digital Image Correlation) per la determinazione delle deformazioni locali.

Nel Capitolo 5 viene effettuata una modellazione numerica della prova di compressione monoassiale, attraverso un approccio agli elementi finiti FEM (programma RS2 di Rocscience), utilizzando i valori delle proprietà meccaniche del "Mélange d'Oltrepò Pavese" ottenute attraverso l'esecuzione di prove di laboratorio, quali la prove di compressione monoassiale e la prova di taglio diretto.

1. Caratteristiche principali delle formazioni complesse

Le “formazioni complesse” sono quei materiali, ammassi rocciosi o terreni, che presentano proprietà meccaniche e geologiche molto variabili nello spazio e spesso sono caratterizzati da un’organizzazione caotica e disorganica (Barla and Perello, 2014). A causa della loro complessità ed eterogeneità si sono riscontrati problemi per la classificazione, soprattutto in fase di caratterizzazione e definizione dei parametri di resistenza. Queste formazioni sono note come “strutturalmente complesse” per i loro differenti processi di genesi, fenomeni di origine tettonica e sedimentaria. Lo studio delle formazioni complesse risulta problematico in quanto la loro caratterizzazione non può essere effettuata attraverso le procedure classiche della Meccanica delle Rocce e della Meccanica delle Terre, non potendo essere definite né come ammassi rocciosi, né come terreni. Grazie agli studi condotti da Medley (2001), è possibile considerare le formazioni complesse come rocce eterogenee se la matrice presenta minore resistenza rispetto ai blocchi; al contrario se la matrice è costituita da materiale sciolto si parla di terreno eterogeneo. Nel campo delle formazioni complesse sono presenti le “formazioni rocciose strutturalmente complesse”, che includono a loro volta quelle costituite da una struttura a “blocco in matrice” (bimrocks e mélanges). Medley (1994) utilizzò per la prima volta il termine bimrocks (block-in-matrix rock) per quei materiali eterogenei, composti da blocchi di roccia in un materiale cementato più fine e meno resistente; nel caso in cui la matrice presenti una struttura non compatta e non cementata si parla di bimsoils. La variabilità del comportamento meccanico globale comporta grandi difficoltà per la caratterizzazione di questi materiali sia su scala reale che su quella di laboratorio. In funzione del problema da analizzare è possibile scegliere un modello geomeccanico di riferimento, anche se è molto influenzato dalla grande variabilità delle proprietà meccaniche.

1.1. Aspetti generali sulle formazioni strutturalmente complesse

Lo studio su un materiale eterogeneo, come le formazioni complesse, deve essere effettuato attraverso la valutazione dei parametri principali dell'intero ammasso roccioso. Per definire dei metodi di identificazione e caratterizzazione, e quindi di classificazione, sono stati effettuati numerosi studi su queste formazioni complesse. Lanzica (1988, 1989) ha proposto un metodo di classificazione, Universal Rudrock Code, basato sulla distinzione tra ammassi rocciosi fratturati e ammassi rocciosi con struttura a blocco in matrice. Un altro metodo per la classificazione delle formazioni complesse, soprattutto per depositi caratterizzati da litologie arenaceo-pelitiche o calcareo-pelitiche, è stato ideato dall'Associazione Geotecnica Italiana (1979), basato sul rapporto arenaria-calcareo-pelite e sulla complessità della struttura, data dall'accostamento delle due differenti litologie e dalle deformazioni tettoniche (Figura 1.1).

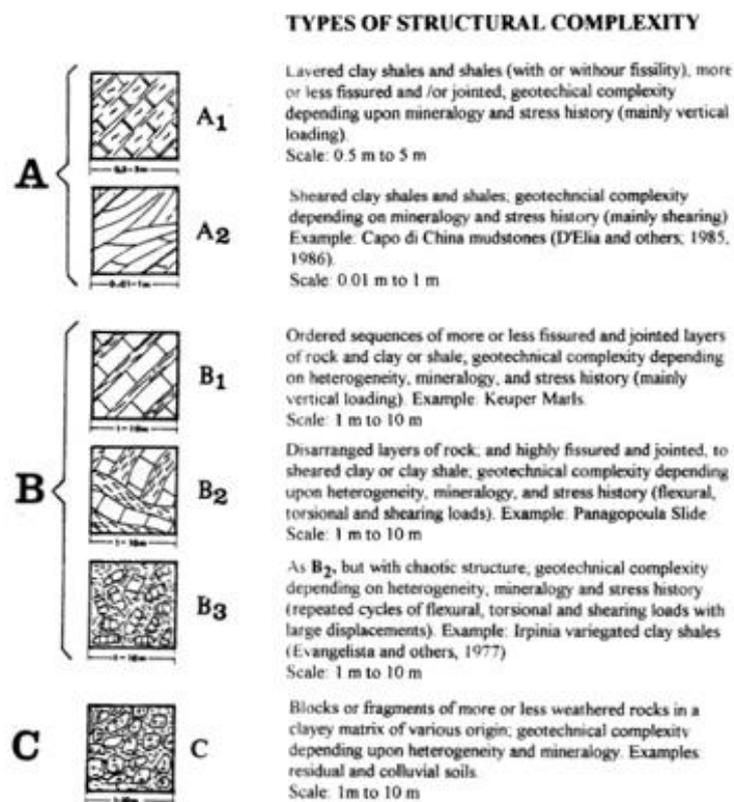


Figura 1.1. Classificazione delle Formazioni Strutturalmente Complesse proposta dall'Associazione Geotecnica Italiana (1979).

Un'ulteriore classificazione è basata sull'indice GSI (Marinos & Hoek, 2001 e Hoek et al., 2005) (Figura 1.2). Le componenti più fini, in particolari strutture rocciose, presentano una forte anisotropia causata dalla presenza di una struttura a scaglie, dovuta a sua volta dalla presenza di fogliazioni.

A causa delle deformazioni tettoniche, si possono verificare delle ridistribuzioni spaziali dei vari componenti, e quindi, insieme alle strutture sedimentarie iniziali, l'insorgere di strutture secondarie come zone di taglio e fratture, con modifiche della struttura dell'ammasso roccioso (struttura caotica). La modifica delle componenti litologiche può essere causata anche dagli agenti atmosferici, che ne alterano la morfologia e le caratteristiche meccaniche, aumentandone la complessità.

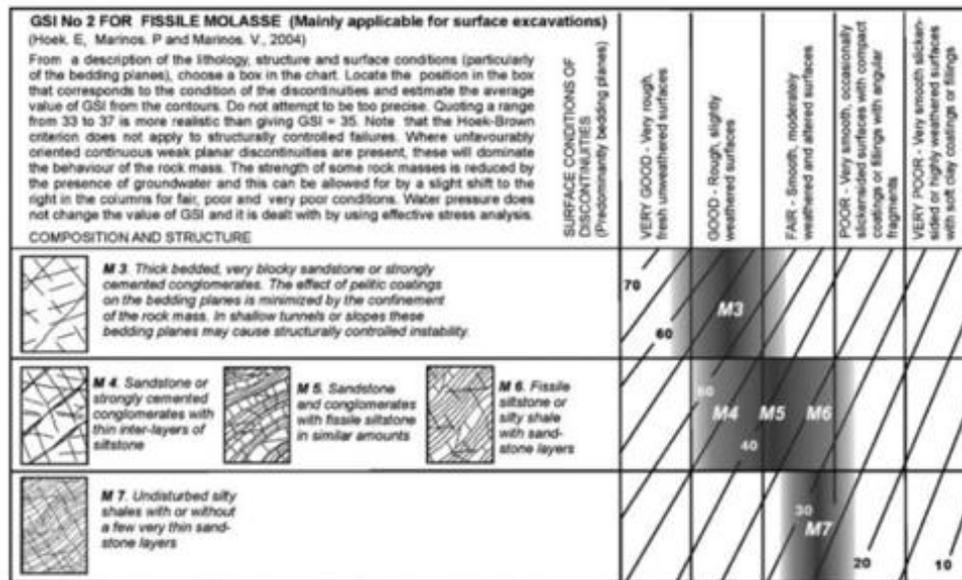


Figura 1.2. Classificazione GSI per ammassi complessi (Hoek et al., 2005).

Le proprietà e i parametri di resistenza, oltre a variare in un ampio range, sono condizionate dalla limitata possibilità di ottenere campioni indisturbati, ma soprattutto di dimensioni sufficienti da comprendere quantità rilevanti rappresentative della formazione in situ. Le formazioni complesse, essendo molto diffuse in natura, sono ragione di molte indagini e studi relativi a problematiche di ingegneria civile e difesa del territorio. Medley e Lindquist, dell'Università di Berkley in California, grazie ad un lavoro di ricerca incentrato sulla stima del comportamento di ammassi rocciosi eterogenei, sono i principali esponenti dello studio sulle formazioni a blocco in matrice (bimrock). Come già detto, questi depositi eterogenei presentano una componente rocciosa, clasti di natura calcarea o arenaria, immersa in una struttura argillosa, a granulometria più fine. Nonostante in letteratura (Lindquist, 1994) i termini mélanges e bimrock vengano spesso utilizzati per descrivere la stessa tipologia di materiale, Medley (2002) fece una distinzione, classificando i mélanges come quel sottogruppo di bimrocks presente soprattutto in zone montuose, la cui formazione è dovuta a fenomeni tettonici di subduzione e che presenta grosse problematiche dal punto di vista ingegneristico.

Medley (1994) definì la prima mappatura, su scala mondiale, delle formazioni rocciose complesse a blocco di matrice, in particolare dei *mélanges* (Figura 1.3).

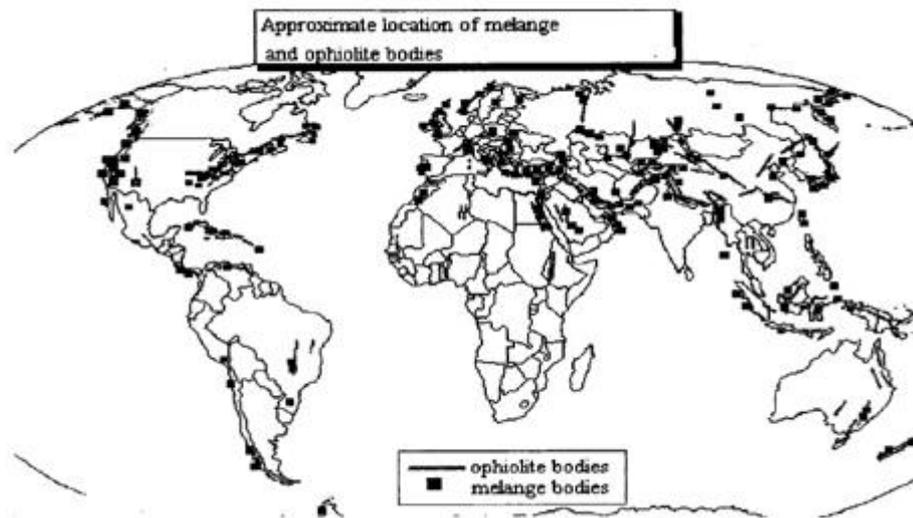


Figura 1.3. Mappatura su scala mondiale dei *mélanges* (Medley, 1994).

Queste formazioni rocciose sono presenti, maggiormente, vicino le aree di contatto lungo le placche tettoniche, come nel caso del Franciscan Complex. Nel Nord della California è stata osservata un'elevata presenza di franciscan *mélange*, grazie all'organizzazione litologica e all'identificazione delle zone di separazione tettonica. Il Franciscan Complex presenta la tipica conformazione strutturale dei *mélanges*; contiene blocchi eterogenei arenacei disposti in maniera caotica all'interno di una matrice argillosa, caratterizzata da deformazioni di taglio (Figura 1.4).

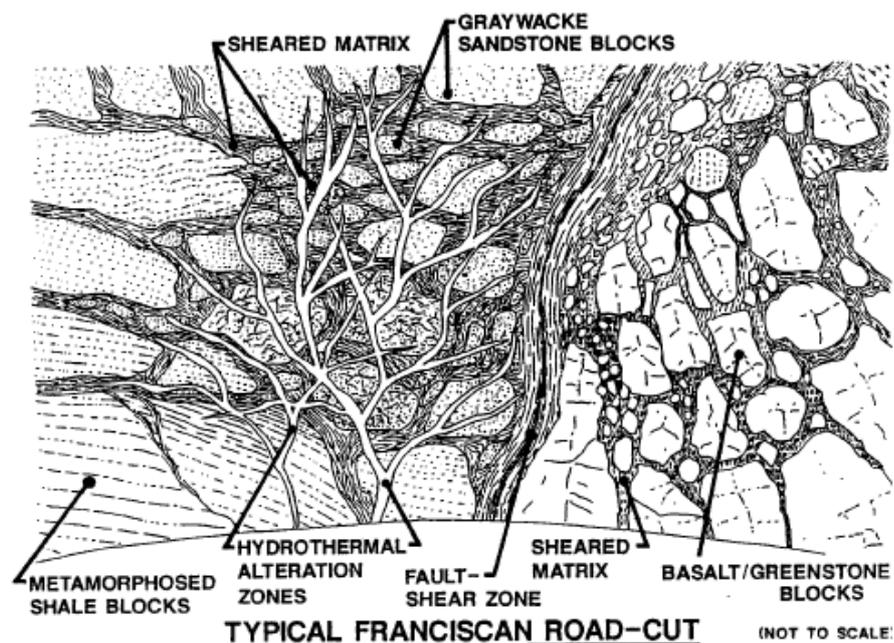


Figura 1.4. Conformazione strutturale del Franciscan Complex (Medley, 1994).

Medley (2001), grazie agli studi effettuati, ha constatato una notevole variabilità della litologia dei materiali presenti all'interno del Franciscan Complex; in particolare ha osservato che i blocchi all'interno del mélangé sono di differenti tipologie. Partendo dal caso studio del Franciscan Complex, sono stati effettuati ulteriori indagini e studi sulle formazioni rocciose complesse, anche in altre località. Nel territorio italiano si è focalizzata l'attenzione sull'analisi delle argille scagliose situate nell'Appennino Tosco-Emiliano e in alcune zone del sud Italia (Medley, 2004 e Coli, 2011).

Un aspetto molto importante delle formazioni rocciose complesse è la presenza di blocchi all'interno della matrice; in quanto presentano dimensioni molto variabili che vanno dal centimetro fino alle decine di metri. Queste formazioni eterogenee definite da Medley (1994) "self similar system", inoltre, mostrano un'invarianza di scala; ciò vuol dire che sono costituite da elementi che sono riproduzioni dell'intero e per questo, al variare della dimensione della scala di interesse, la presenza delle inclusioni rimane identica. Per ogni scala di analisi, inoltre, è doveroso introdurre una soglia di riferimento, in modo tale da distinguere ciò che è matrice e ciò che è ritenuto blocco (Medley e Goodman, 1994). La grande eterogeneità dei bimrocks, come già detto, è dovuta alla presenza di inclusioni rocciose all'interno di una matrice, avente proprietà meccaniche differenti.

Durante lavori di progettazione di opere civili non è cautelativo né tantomeno realistico assegnare all'intero ammasso roccioso le caratteristiche della sola matrice; per queste ragioni è

fondamentale determinare la presenza di una formazione complessa ed effettuare una caratterizzazione meccanica della stessa. Le principali problematiche si osservano maggiormente nella fase di caratterizzazione meccanica di tutti i materiali coinvolti nella formazione rocciosa eterogenea, in quanto, oltre ai problemi di carattere generale, per i bimrocks vi è anche la difficoltà nel determinare una modalità di prelievo consona per ottenere campioni indisturbati; questo implica una grande difficoltà nello studio dei mélanges. Per avere una visione più ampia di una formazione rocciosa complessa, in un determinato deposito, si devono effettuare interventi come lo studio della storia geologica, l'andamento geomorfologico del deposito, la mappatura del deposito con annesse analisi di foto e la programmazione della campagna di indagini. La storia geologica e l'andamento geomorfologico del sito si ottengono, attraverso l'utilizzo di foto e carte topografiche, andando a raccogliere quante più informazioni possibili, utili per definire i limiti geologici del sito in esame. Medley (2001) suggerisce dei metodi per l'individuazione dei mélanges grazie ad un'attenta osservazione del sito; suggerisce che è possibile individuare le aree caratterizzate da carenza di blocchi negli avvallamenti e nelle zone franose, al contrario, è possibile identificare la presenza di blocchi lungo gli argini fluviali, lungo le costiere marittime, nelle zone ricche di affioramenti resistenti all'erosione e su promontori rocciosi. Alcuni segnali fondamentali per l'individuazione delle formazioni rocciose complesse sono la presenza di alberi sui blocchi, mentre sulla matrice è spesso osservabile una coltre vegetale. Sebbene siano operazioni indispensabili, l'identificazione e la mappatura dei bimrocks rappresentano attività piuttosto complesse. Generalmente un'adeguata campagna di indagini comprende:

- indagini in situ, che forniscono informazioni dello stesso ordine di grandezza del problema affrontato poiché i risultati si riferiscono a materiali situati nella loro originaria collocazione naturale;
- indagini in laboratorio, eseguibili su piccoli campioni precedentemente prelevati, i quali in genere subiscono dei disturbi durante la fase di prelievo e di trasporto.

1.2. Caratteristiche geometriche e geomeccaniche dei bimrocks

Medley (1994) definì i bimrocks come "a mixture of rocks, composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture". Per essere definiti tali devono essere rispettati alcuni criteri fondamentali: deve esistere una differenza di resistenza meccanica tra matrice e blocchi, le proprietà dell'ammasso, alla scala della dimensione ingegneristica caratteristica (L_c), ovvero la grandezza rappresentativa del problema in esame, devono essere condizionate dalle dimensioni minime e massime dei blocchi e la percentuale volumetrica deve essere inclusa tra il 25% e il 70%. La distinzione tra matrice e blocchi viene effettuata valutando, indipendentemente, le caratteristiche meccaniche mediante modulo elastico (E), angolo di attrito (ϕ), resistenza a compressione non confinata (q_u) e coesione (c). La caratterizzazione meccanica dei bimrocks, come già detto, risulta molto complessa per l'enorme variabilità spaziale, litologica e meccanica di queste formazioni complesse; in virtù di questo il riconoscimento viene effettuato attraverso un attento rilievo geologico. Questi ammassi rocciosi sono caratterizzati dall'alternanza irregolare della matrice e dei blocchi; la matrice, a litologia argillosa, è contraddistinta da una struttura a scaglie, dovuta alla presenza di piani di foliazione che possono assumere diverse orientazioni all'interno dell'ammasso roccioso (Figura 1.5).

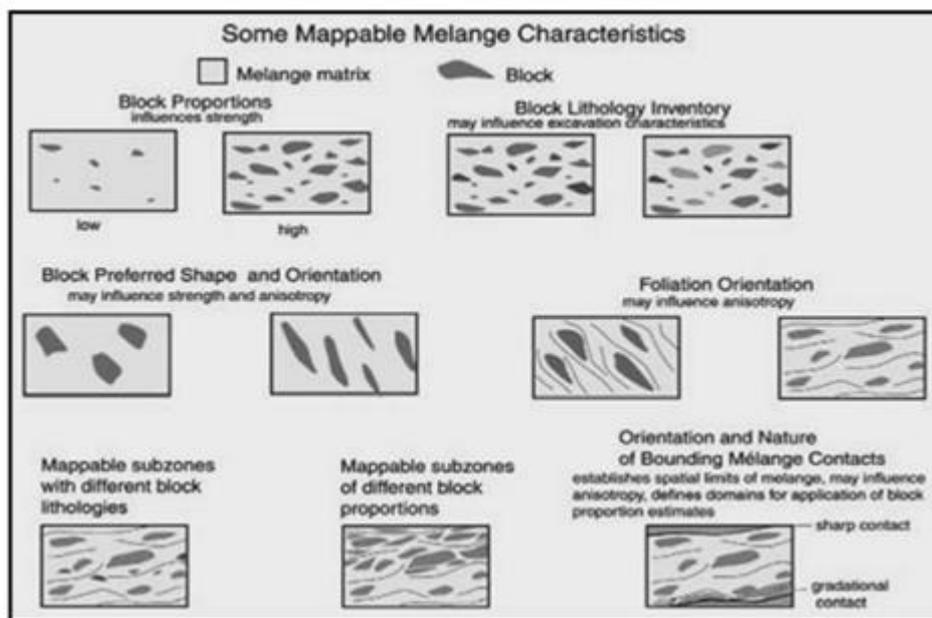


Figura 1.5. Caratteristiche tessiturali tipiche dei bimrock (Wakabayashi & Medley, 2004).

Per effettuare una caratterizzazione meccanica di un bimrock bisogna tenere in considerazione alcuni aspetti fondamentali, ovvero le caratteristiche litologiche, tessiturali e meccaniche della matrice, le caratteristiche granulometriche e meccaniche dei blocchi e, allo stesso tempo, le caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso (contenuto volumetrico di blocchi, distribuzione spaziale dei blocchi, proprietà meccaniche del sistema blocchi-matrice). Per determinare approfonditamente il comportamento di un bimrock, tenendo in considerazione l'influenza dei blocchi, è fondamentale ricorrere a test di laboratorio, prove in situ e modellazioni numeriche.

La configurazione geometrica dei bimrocks è contraddistinta dalla presenza di blocchi rigidi all'interno di una matrice più debole, e ciò, rende abbastanza difficoltosa la stima delle dimensioni, della distribuzione spaziale e della percentuale volumetrica dei blocchi stessi, necessaria per poter descrivere l'eterogeneità della struttura ai fini del progetto ingegneristico. Per questo motivo si deve determinare la posizione e la distribuzione delle inclusioni rocciose all'interno della formazione, andando a definire la percentuale volumetrica tridimensionale dei blocchi. Questa può derivare da una mappatura geologica bidimensionale e da una misurazione monodimensionale delle corde, ovvero la lunghezza di intersezione tra il blocco e il centro della perforazione, attraverso sondaggi. In questa maniera, la percentuale lineare delle inclusioni rocciose rispetto alla matrice si può valutare come rapporto tra la lunghezza delle corde e la lunghezza totale della perforazione. La dimensione massima delle inclusioni osservata (d_{mod}) permette di caratterizzare i blocchi definendone la dimensione attraverso lo studio dei sondaggi, in base alla profondità delle perforazioni, e quello effettuato lungo gli affioramenti.

Mentre d_{mod} , in 2D e 3D, risulta pari alla distanza tra i due punti più lontani misurati sulla porzione osservabile dei blocchi, in 1D, in cui viene definito come corda, potrebbe non coincidere con la lunghezza massima reale (Figura 1.6).

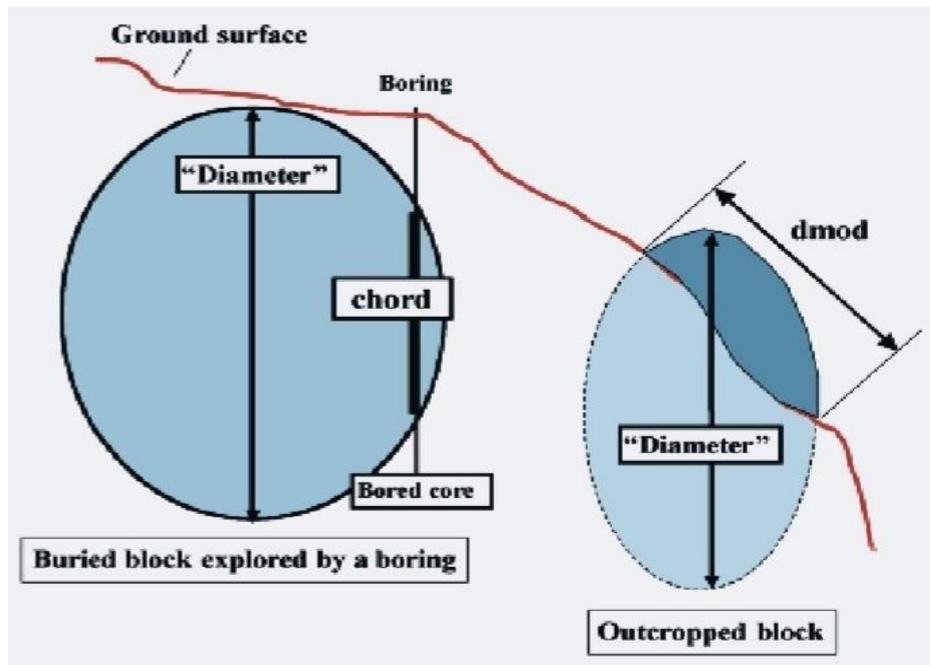


Figura 1.6. Confronto tra la massima dimensione osservata d_{mod} e il diametro di un blocco (Medley, 2001).

In generale è possibile notare come corda e d_{mod} risultano meno estesi del diametro massimo delle inclusioni, dunque, le distribuzioni monodimensionali della lunghezza della corda sottostimano le reali distribuzioni delle dimensioni tridimensionali. La possibilità che il diametro massimo del blocco combaci con la corda è condizionata dall'orientamento dell'inclusione rispetto alla direzione del foro, dalla percentuale volumetrica dei blocchi e dalla lunghezza totale della perforazione. In funzione dei dati raccolti durante le indagini, è possibile stabilire che le dimensioni delle inclusioni più grandi vengono sottostimate; al contrario, quelle dei blocchi più piccoli vengono sovrastimate. Per questa ragione la valutazione delle dimensioni dei blocchi deve essere effettuata con accuratezza. La stereologia consente l'interpretazione e la stima 3D dei blocchi, grazie alle misure effettuate su sezioni trasversali mono e bidimensionali del materiale.

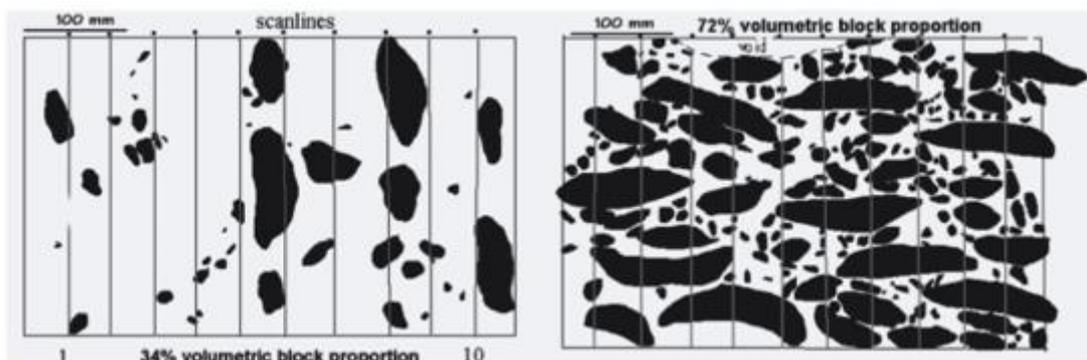


Figura 1.7. Confronto tra provini con differenti percentuali volumetriche e differente orientazione dei blocchi.

Le misure monodimensionali sono eseguite attraverso “linee di scansione” con l’obiettivo di ricavare le percentuali lineari delle inclusioni, per poi ottenere le distribuzioni della lunghezza della corda. Nella Figura 1.7 è possibile notare che il campione di sinistra è caratterizzato da una percentuale volumetrica relativamente bassa e che le linee di scansione sono parallele all’orientamento dei delle inclusioni. Essendo la percentuale volumetrica piuttosto bassa è difficile riscontrare un’intersezione, ma soprattutto che questa intercetti la dimensione massima effettiva dei blocchi. Il campione sulla destra, al contrario, è caratterizzato da un’alta percentuale volumetrica, ma le inclusioni sono orientate in direzione ortogonale rispetto alle linee di scansione; ovviamente, anche se la probabilità che le linee intersechino i blocchi è alta, la distribuzione delle lunghezze della corda non corrisponderà a quella reale dell’inclusione. La stima della distribuzione tridimensionale delle inclusioni sarà quasi sempre caratterizzata da un’elevata incertezza, dal momento che le lunghezze delle corde osservate risultano inferiori alle dimensioni reali (Figura 1.8).

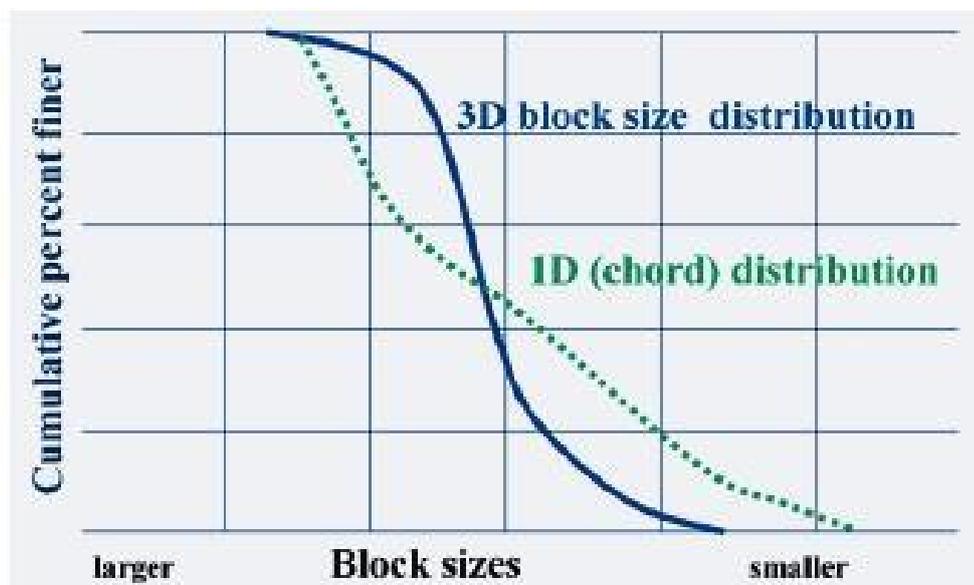


Figura 1.8. Diagramma della distribuzione dimensionale dei blocchi (Medley, 2001).

Pertanto i risultati ricavati da indagini di perforazione in situ sono generalmente lontani dalla realtà a causa della struttura cotica ed eterogenea dei bimrocks. Durante la prova, le lunghezze delle porzioni delle inclusioni intercettate per tutti i fori realizzati, misurate sulle carote, possono essere sommate e divise per la lunghezza totale delle perforazioni, in questo modo si ricava la “proporzione cumulativa lineare dei blocchi”. Questo valore fornisce una stima della percentuale volumetrica dei blocchi e, nel momento in cui la lunghezza della perforazione non rispetti i limiti suggeriti, deve essere sottoposto a correzioni. Medley (1994) propose di considerare una profondità di indagine pari a $(10 \cdot d_{\max})$, dove d_{\max} è la massima dimensione del blocco.

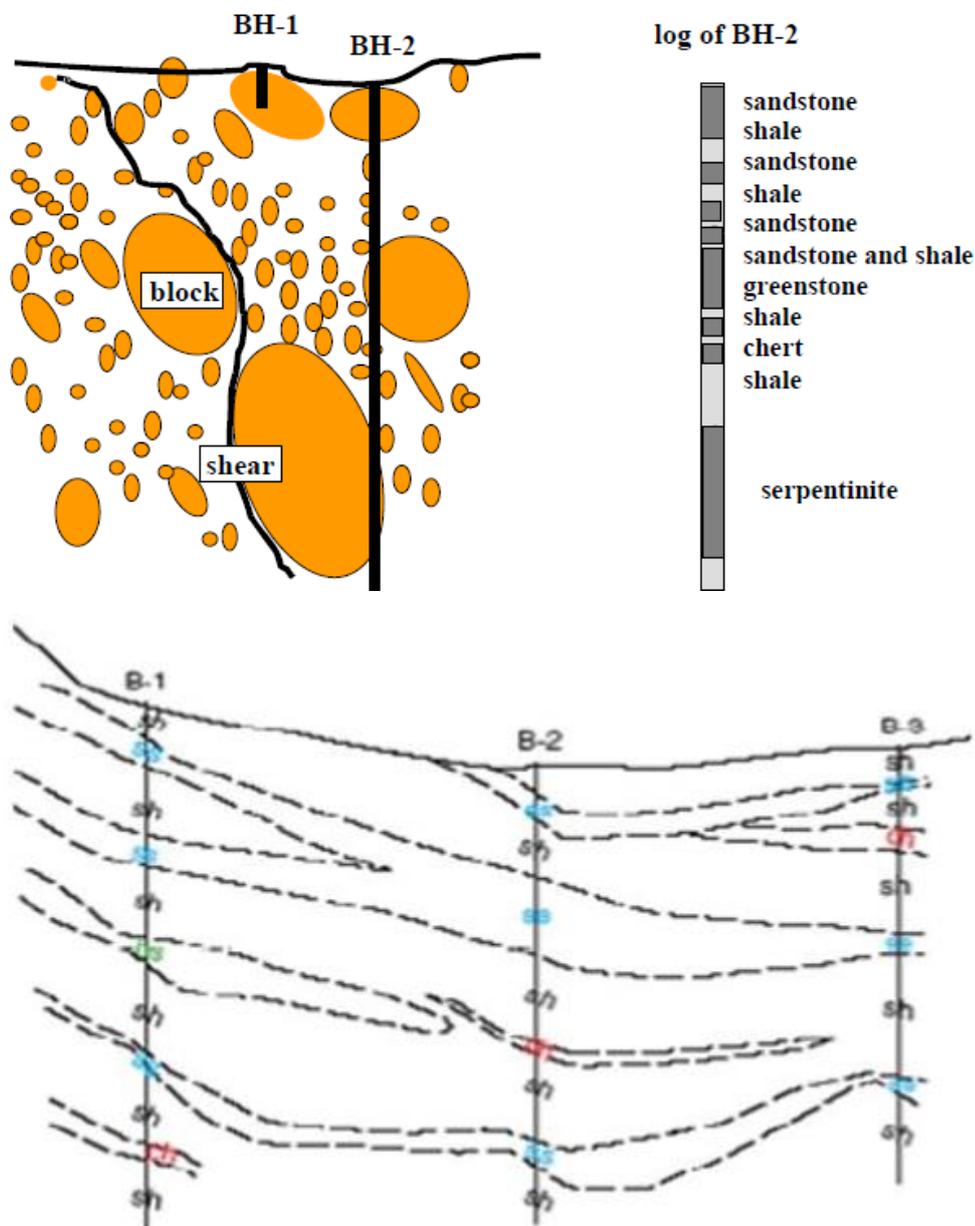


Figura 1.9. Valutazione della proporzione volumetrica a partire da fori di sondaggio (Medley, 2001).

Medley e Lindquist (1995) hanno introdotto un metodo per la determinazione della percentuale volumetrica dei blocchi utilizzando modelli artificiali di bimrock, partendo dalla proporzione lineare e correggendola, successivamente, mediante un fattore dipendente dalla lunghezza totale dei campioni e dalla proporzione lineare stessa.

All'interno di una formazione eterogenea, le dimensioni e il numero delle inclusioni presenti sono legati tra loro secondo una legge di potenza negativa che le classifica come frattali. Le proprietà fondamentali di una distribuzione frattale sono l'autosomiglianza e l'invarianza di scala. Invarianza di scala vuol dire che l'istogramma di frequenza della dimensione degli elementi non varia al variare della scala di osservazione ed è contraddistinto da un numero crescente di elementi al diminuire della dimensione.

Modificando la scala si ha una variazione della dimensione assoluta degli elementi, ma l'istogramma di frequenza rimane costante, con la stessa dimensione frattale; affinché ci sia l'autosomiglianza tra due elementi è fondamentale che la loro dimensione frattale sia misurabile. La dimensione frattale consente di avere un'idea di quando un frattale riempia lo spazio all'aumentare della scala di osservazione. Medley e Lindquist (1995) si dedicarono allo studio delle distribuzioni frattali delle dimensioni dei blocchi del Franciscan mélange, su diverse scale di interesse ingegneristico, dimostrando come il comportamento di questa formazione complessa fosse indipendente dalla scala di interesse. Nel mélange, essendo l'intervallo di variazione delle dimensioni dei blocchi molto grande, risultava fondamentale indicare una soglia di riferimento per poter distinguere la matrice dai blocchi, a seconda della scala di interesse; gli stessi blocchi, in funzione della scala di interesse, potevano essere considerati come inclusioni o come parte integrante della matrice. Medley (1994) analizzò la distribuzione della dimensione delle inclusioni su alcuni campioni artificiali ricostruiti in funzione delle caratteristiche del Franciscan mélange, misurando, attraverso analisi bidimensionali, la dimensione massima osservata d_{mod} di 1900 inclusioni, sapendo che questa non era rappresentativa della lunghezza reale. Sfruttando una serie di fotografie sull'affioramento di mélange e tramite una tecnica digitale di scannerizzazione, che consentiva di calcolare d_{mod} in maniera automatica, vennero eseguite le misure delle dimensioni osservabili delle inclusioni. Questi dati vennero incrementati anche da misure su diverse scale di interesse, potendo così definire le zone interessate dalla presenza di inclusioni, ovvero le zone in cui infittire le misure. Attraverso le analisi condotte da Medley e Lindquist (1995) sul Franciscan mélange, è stato possibile stimare le caratteristiche della distribuzione frattale e quindi realizzare il relativo istogramma di frequenza. La frequenza relativa di ogni classe equivale al numero di inclusioni caratterizzate da valori di d_{mod} appartenenti ad una specifica classe, rapportato al numero di d_{mod} totale. Il numero di inclusioni per ogni classe consentiva di ottenere l'istogramma di frequenza attraverso l'utilizzo di un grafico bilogarithmico; sull'ordinata era indicata la frequenza, ovvero il numero di elementi per ogni classe, oppure la frequenza relativa rapportata al numero totale di inclusioni presenti; mentre sulle ascisse erano riportate le dimensioni massime delle inclusioni (d_{mod}) (Figura 1.10).

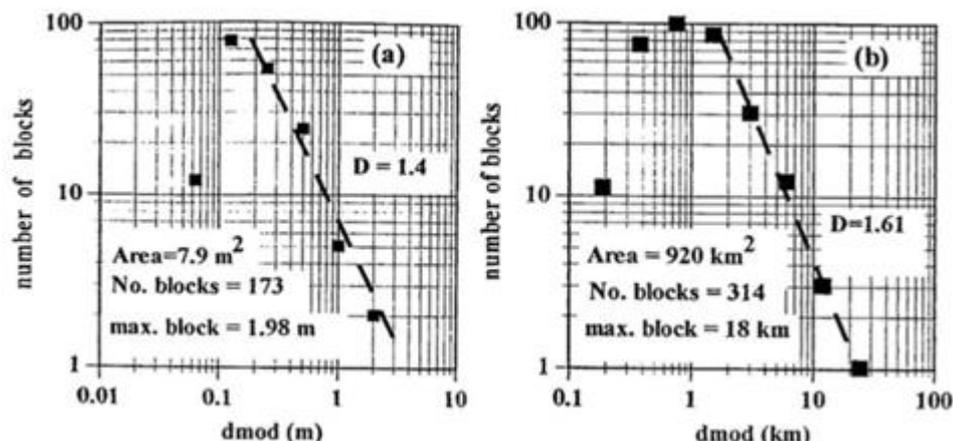


Figura 1.10. Istogramma delle frequenze in scala bilogaritmica della dimensione delle inclusioni per due aree di misura differenti su un affioramento di Franciscan mélangé (Medley-Lindquist, 1995).

L'Istogramma di frequenza risultava essere un grafico di forma parabolica, contraddistinto da una parte ascendente, un picco e una parte discendente. La parte ascendente era dovuta alla sottostima delle inclusioni che risultavano più piccole rispetto alla scala di misura; sottostima dovuta alla bassa risoluzione delle immagini e al contrasto in scala di grigi, così nella mappa geologica potevano essere individuate solo le inclusioni aventi una dimensione minima. Per evitare errori causati dalla grande incertezza legata alle misure e alla qualità delle stesse, i valori di d_{mod} inferiori a $0,025\sqrt{A}$ venivano trascurati. L'andamento discendente della seconda parte della parabola, mostrava come la distribuzione della dimensione dei blocchi poteva essere ritenuta un frattale, in quanto stimabile secondo una legge di potenza con esponente negativo. Per ottenere una visione più ampia dei dati furono analizzati e confrontati molti istogrammi delle frequenze. Essendo il numero delle inclusioni funzione della loro percentuale, venne stimata la frequenza relativa, in cui la dimensione dei blocchi era normalizzata in funzione di \sqrt{A} . Da un'analisi finale si poteva notare come gli istogrammi si distribuivano in maniera omogenea, e si poteva concludere che vi era un ordine nel caos apparente del mélangé e che le semplificazioni geotecniche effettuate per la sua caratterizzazione, ovvero assumere che il comportamento meccanico dei bimrocks sia completamente governato dalle proprietà della sola matrice trascurando la presenza delle inclusioni, non erano più accettate (Figura 1.11).

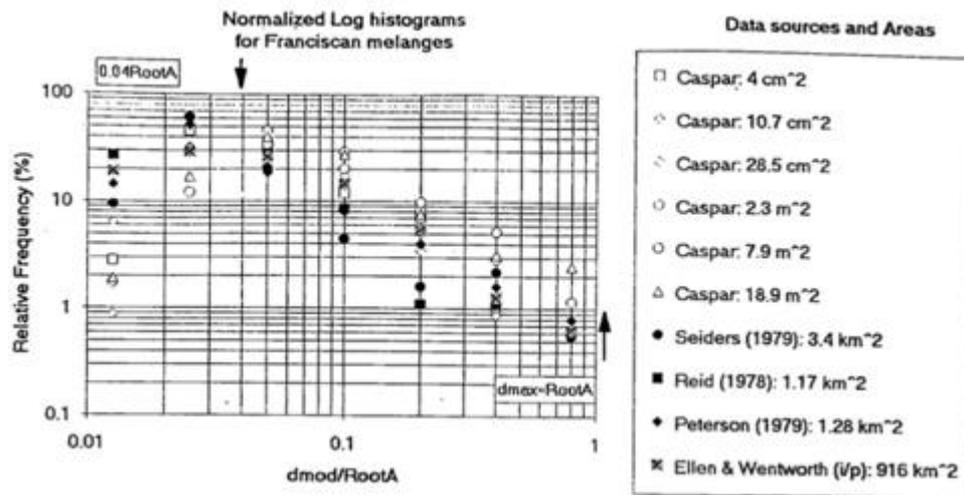


Figura 1.11. Istogramma normalizzato per il Franciscan mélange (Medley-Lindquist, 1995).

L'indipendenza dalla scala implica che, a prescindere dalle modalità di analisi, prove in situ o prove di laboratorio, in un mélange era sempre osservata la presenza di blocchi, la cui percentuale influenzava profondamente la resistenza del materiale. In funzione della distribuzione della dimensione dei blocchi, Medley (1994) indicò le principali caratteristiche che contraddistinguono un bimrock:

- per quanto concerne la distribuzione delle dimensioni delle inclusioni, i bimrocks sono caratterizzati dall'indipendenza della scala, questo significa che la distribuzione delle dimensioni dei blocchi viene mantenuta costante per ogni scala di osservazione;
- la dimensione massima del blocco, per una determinata area di rilevamento (A), è circa uguale a \sqrt{A} e il 99% dei blocchi ha la dimensione massima non superiore a $0,75\sqrt{A}$;
- la distribuzione delle dimensioni dei blocchi segue una legge di potenza negativa;
- la soglia di separazione tra blocchi e matrice, o la dimensione del più piccolo blocco geometricamente significativo, è il 5% di d_{max} , ovvero il 5% della dimensione del blocco più grande riscontrabile alla scala di interesse ingegneristico, la dimensione ingegneristica caratteristica o \sqrt{A} (Medley, 1994) (Figura 1.12).

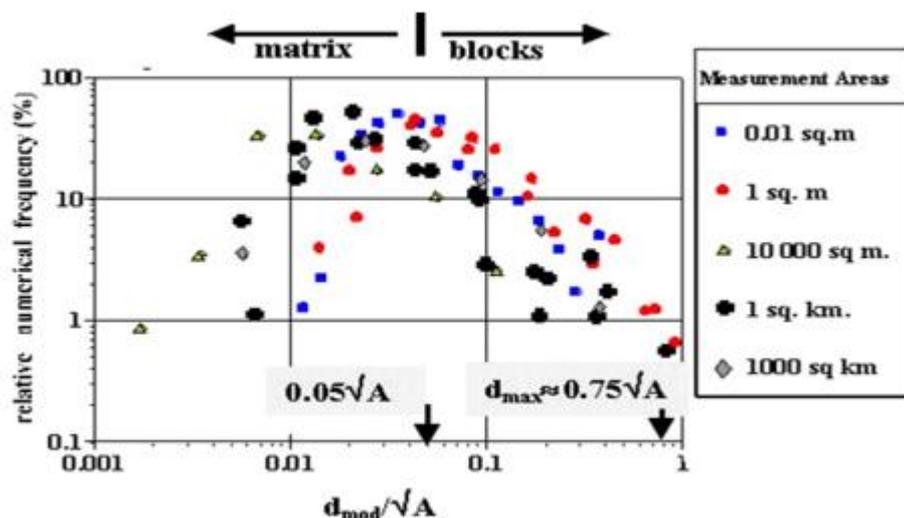


Figura 1.12. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi in un Franciscan mélange per differenti scale di osservazione (Medley, 2002).

Le inclusioni al di sotto della soglia contribuiscono limitatamente all'aumento di resistenza delle caratteristiche meccaniche e possono essere considerate parte integrante della matrice. La soglia può essere definita in funzione della scala di interesse ingegneristico, lunghezza caratteristica (L_c), e risulta essere pari a $0,05L_c$, mentre la massima dimensione dei blocchi risulta pari a $0,75L_c$. La scelta della dimensione ingegneristica viene eseguita, di solito, con molta flessibilità, prendendo sempre in considerazione il problema progettuale in esame e la sua interazione con la massa rocciosa. Una volta fissato il valore della dimensione caratteristica, possono essere definiti l'intervallo di variazione entro il quale la dimensione dell'inclusione risulta significativa e la dimensione limite che separa la matrice dai blocchi. Nel caso di prove di laboratorio, L_c rappresenta la dimensione del campione sottoposto a prova meccanica, mentre alla scala del sito è considerata pari alla radice quadrata della superficie totale coperta da riprese fotografiche o carte tematiche. La dimensione caratteristica varia in funzione della scala di interesse e delle caratteristiche dimensionali del contesto in esame. Medley (2001) decise di intraprendere uno studio considerando un'area progettuale (100m x 100m) costituita da Franciscan Complex. In questo caso, la scala di interesse ingegneristico è stata contraddistinta da una dimensione caratteristica pari a 100 m (\sqrt{A}); di conseguenza la soglia blocco-matrice risultava essere pari a 5 m ($0,05\sqrt{A}$) mentre il blocco più grande aveva dimensioni pari a 75 m ($0,75\sqrt{A}$). Nell'area di progetto in questione è stata prevista la realizzazione di una strada di larghezza di 20 m, dimensione che, per questioni di scavo e progettazione, viene definita come dimensione caratteristica (L_c), modificando così la scala di interesse, la soglia blocco-matrice e la dimensione del blocco ragionevolmente più grande.

Successivamente, dovendo realizzare anche uno scavo per il passaggio di un gasdotto, la scala di interesse diventa ancora più piccola e il blocco di 1 m diviene, in questo caso, un ostacolo non trascurabile (Figura 1.13).

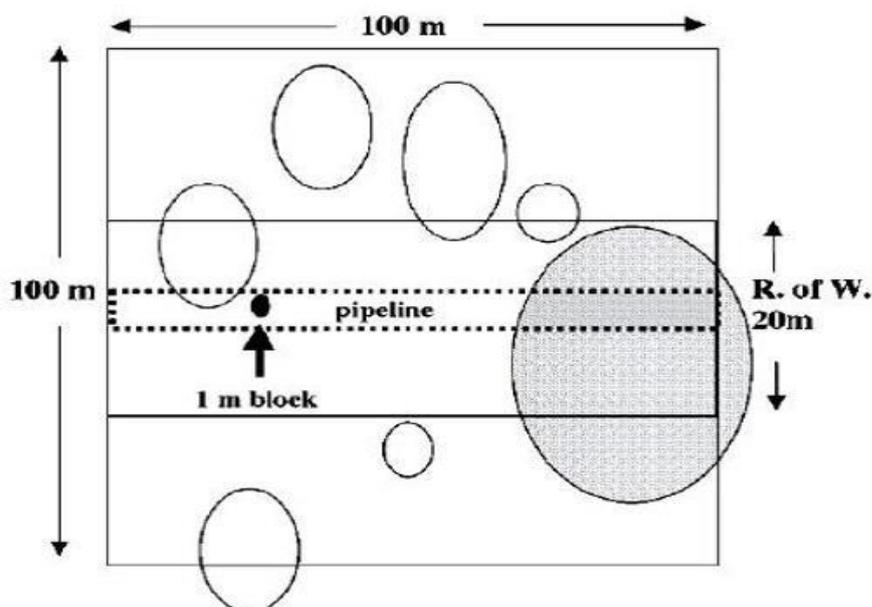


Figura 1.13. Influenza della scala di interesse sulla soglia blocco-matrice in un'area interessata dalla costruzione di una strada e lavori di scavo (Medley, 2001).

1.3. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi

Uno dei principali motivi per il quale risulta fondamentale tenere in considerazione l'eterogeneità presente all'interno delle formazioni rocciose a blocco in matrice, è legato alla variazione delle proprietà di resistenza; in particolare, la successione caotica tra matrice e inclusioni condiziona la resistenza complessiva dell'ammasso roccioso. Dunque, risulta rilevante l'individuazione della litologia e della struttura dei blocchi ai fini della progettazione ingegneristica; in quanto, sia le dimensioni che la quantità delle inclusioni presenti influiscono sul comportamento globale dei bimrocks. Andando a considerare globalmente l'ammasso roccioso, data la distribuzione caotica dei blocchi al suo interno, può essere vantaggioso, attraverso una mappatura, distinguere le zone secondo le diverse litologie, il numero dei blocchi e il tipo di matrice. La "percentuale volumetrica dei blocchi" (VBP) può essere definita come il rapporto tra il volume delle inclusioni all'interno dell'ammasso roccioso e il volume totale della formazione rocciosa complessa. Attraverso delle prove di laboratorio, relative a provini estratti nella diga di Scott nel nord della California (Medley 1994), è stato possibile stabilire il legame tra il comportamento meccanico e la VBP (Figura 1.14).

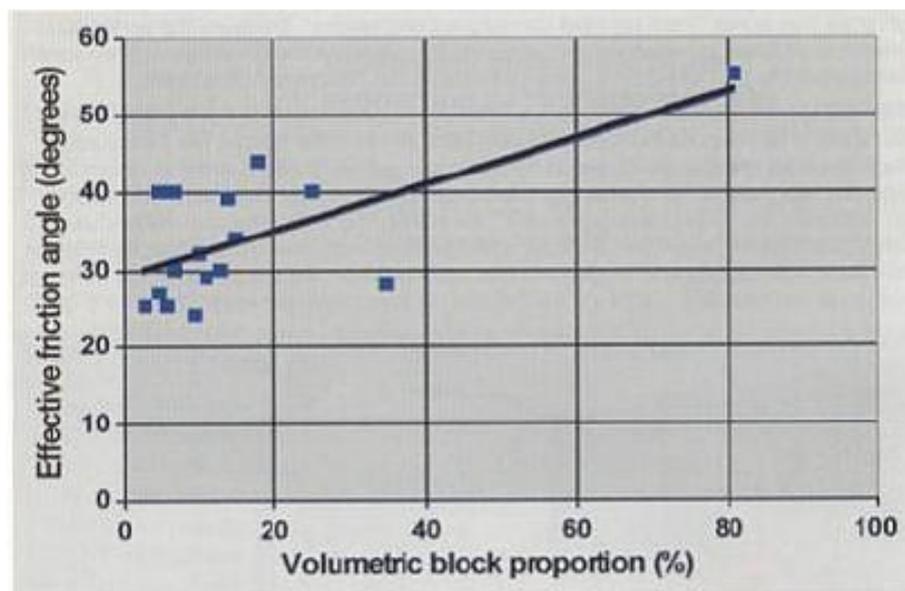


Figura 1.14. Relazione sperimentale tra proporzione volumetrica dei blocchi e angolo di attrito (Medley, 1994).

Dalla Figura 1.14, è possibile osservare che la linea di tendenza non approssima bene i dati, non essendo i campioni indisturbati; nonostante questo, si può notare che, all'aumentare della percentuale volumetrica, il trend presenta un andamento crescente. Tuttavia, dal momento che la percentuale volumetrica influenza in maniera notevole il comportamento meccanico della formazione complessa, è fondamentale un'adeguata e quanto più accurata stima. A questo proposito sono stati sviluppati alcuni metodi di rilevamento per l'analisi morfologica e spaziale delle inclusioni; la percentuale volumetrica dei blocchi può essere valutata attraverso metodologie mono, bi e tridimensionali. Le metodologie monodimensionali, attraverso un'interpretazione stratigrafica derivante da fori di sondaggio, prevedono la misura delle lunghezze d'intersezione blocco-centro di perforazione o delle linee di scansione su fotografie. I metodi bidimensionali, invece, sono basati sull'indagine digitale di immagini. Un'ulteriore tecnica utilizzata per la valutazione della percentuale volumetrica è quella di stimare la densità dei campioni (Lindquist, 1994). Se viene riscontrata una marcata differenza di densità tra le inclusioni e la matrice, allora la densità complessiva dei campioni varierà in maniera proporzionale con la VBP. Questa operazione, eseguita insieme ad un processo di setacciatura, costituisce la metodologia più efficace per la stima delle frazioni di peso e delle frazioni volumetriche. Tuttavia, nella maggior parte delle situazioni, la separazione delle inclusioni dalla matrice risulta un lavoro molto difficile e realizzabile solo ed esclusivamente per indagini di laboratorio. Attraverso la setacciatura, inoltre, è possibile valutare esclusivamente la distribuzione della dimensione dei blocchi in termini di percentuale cumulata in peso; non consente di quantificare altre importanti proprietà come la variabilità spaziale, la forma e l'orientazione delle inclusioni.

Generalmente i blocchi hanno una forma e un orientamento preferenziali; per raccogliere informazioni sulla struttura e sulla direzione delle inclusioni è fondamentale, attraverso fori di sondaggio, effettuare analisi in situ per la determinazione della VBP. Un esempio è rappresentato dalle inclusioni caratterizzate da una forma a disco, disposte nella formazione in modo tale che il piano del disco sia parallelo o sub-parallelo alla foliazione. Così come la foliazione della matrice, anche l'orientamento delle inclusioni influenza la resistenza complessiva della formazione complessa, variandone il comportamento e attribuendo al materiale caratteristiche meccaniche anisotrope. Attraverso le metodologie monodimensionali, in presenza di un'adeguata densità di campionamento, è possibile stabilire la percentuale volumetrica dei blocchi, assumendo che essa sia identica alla percentuale cumulata lineare della stessa litologia misurata nella stratigrafia. Poiché le inclusioni non presentano una forma perfettamente sferica e sono spesso distribuite in modo caotico, non è possibile valutare correttamente la percentuale volumetrica a partire da dati ottenuti attraverso un esiguo numero di campionamenti. Se la lunghezza di campionamento risulta uguale ad almeno dieci volte la dimensione massima delle inclusioni, la percentuale lineare del litotipo può essere correlata con quella volumetrica, commettendo un errore di sottostima. Per quanto riguarda le metodologie bidimensionali, è frequente l'uso di immagini, riferite alla zona interessata dalla presenza di formazioni rocciose complesse, per il riconoscimento delle proprietà dei blocchi: dimensioni osservabili massime e minime, area esposta, percentuali, orientamento e distribuzione spaziale di ciascuna inclusione. Attraverso le analisi delle immagini degli affioramenti, è possibile ottenere modelli grafici di bimrocks e nello stesso tempo è possibile determinare l'area, la distribuzione dimensionale e il d_{mod} delle inclusioni nell'intero deposito. Questa metodologia, nonostante non sia molto accurata, è una delle più utilizzate. Le incertezze dei risultati acquisiti dipendono soprattutto dalla forma e dalla disposizione dei blocchi. La valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi risulta particolarmente difficile; per questo motivo Medley (2001) propose un metodo sperimentale basato sulla stima dell'incertezza nella valutazione della VBP. Il metodo consiste nell'andare a valutare la dimensione ingegneristica caratteristica (L_c) e stabilire il valore limite di separazione tra blocchi e matrice ($0,05 L_c$); attraverso i dati ottenuti dalla perforazione, la VBP può essere calcolata come rapporto tra la lunghezza delle intersezioni con le inclusioni e la lunghezza totale di perforazione (scanline).

L'autore (Medley 2001) propone un diagramma utile per la valutazione della percentuale volumetrica (Figura 1.15), dove:

- d_{max} , ovvero la dimensione massima del blocco, è valutata attraverso analisi e prove in situ;
- N è il fattore moltiplicativo che si ottiene andando a dividere la lunghezza del foro per il valore di d_{max} .

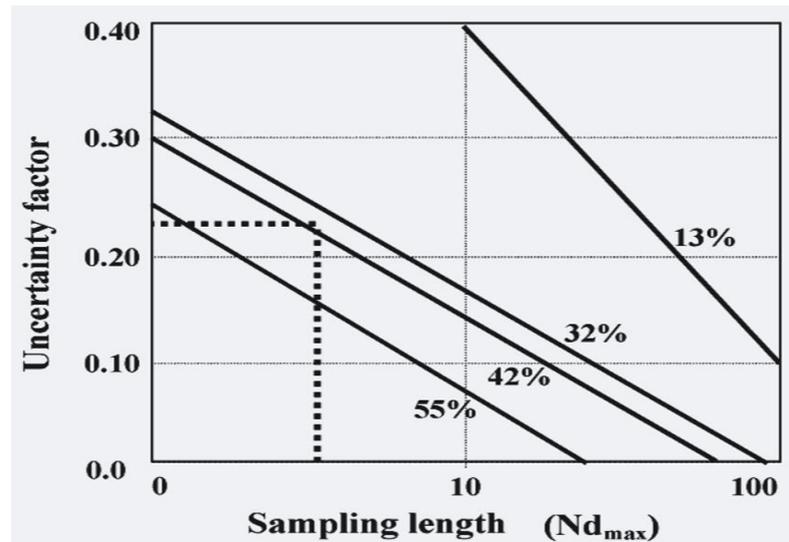


Figura 1.15. Incertezza nella stima della frazione volumetrica dei blocchi in funzione della lunghezza della misura lineare (Medley, 2001).

Si entra nel grafico con la quantità $(N \cdot d_{max})$, si incontra la retta che rappresenta il valore della proporzione lineare dei blocchi e si ricava il fattore di correzione. Medley (2001), grazie agli studi condotti, concluse che la VBP è simile a quella lineare con una variazione pari al prodotto del fattore di incertezza per la percentuale lineare. Per la valutazione della resistenza totale del bimorrock, in funzione della percentuale volumetrica delle inclusioni nella matrice, è appropriato effettuare una scelta cautelativa, utilizzando il limite inferiore stimato con la metodologia sopra descritta. Nel caso in cui, la valutazione della VBP servisse per progetti di scavo, è conveniente sovrastimarla utilizzando nei calcoli il limite superiore.

1.4. Interpretazione delle caratteristiche dei bimrocks mediante modelli

La fase di caratterizzazione di un bimrock, come già detto, è condizionata dalle caratteristiche del sito e dalla scala di indagine del caso studio investigato. Per questo motivo, le indagini di laboratorio e le prove in situ sono utili al fine di ottenere risultati a scala più ampia e rappresentativi del caso in esame. Nonostante, attraverso fori di sondaggio, sia possibile ottenere un elevato numero di informazioni, queste operazioni presentano dei problemi riguardanti l'esecuzione; come la difficoltà di prelievo di campioni indisturbati e l'inaccessibilità all'area di studio. Nel momento in cui si riuscisse a ricavare campioni indisturbati, comunque si potrebbe manifestare il dubbio che questi siano o meno rappresentativi dell'intero ammasso roccioso. Un ulteriore problema potrebbe essere il fatto che la resistenza alla perforazione dei due materiali, costituenti la formazione complessa, risulti differente a tal punto da causare un'interferenza con, eventualmente, perdita di materiale meno consistente. Un'altra problematica delle indagini in situ risulta essere la stima dell'influenza dell'effetto scala per passare dalla dimensione della prova a quella di interesse ingegneristico. Per questo motivo, sono importanti anche le prove di laboratorio dove è generalmente possibile analizzare, separatamente, i due materiali costituenti la formazione complessa e stabilirne le caratteristiche meccaniche. La fase di caratterizzazione dei bimrock appare un quadro estremamente complesso in cui non possono essere utilizzate solamente le classiche tipologie e modalità di indagine in situ e in laboratorio; risulta fondamentale prendere in considerazione la variabilità dimensionale dei blocchi e la scala di interesse. L'analisi della relazione tra la percentuale volumetrica dei blocchi e le proprietà geomeccaniche della formazione complessa è stata approfondita attraverso la realizzazione di due modelli di studio, rispettivamente trattati da Lindquist (1994) e Medley (1994). Questi modelli di bimrock, ottenuti in laboratorio sotto forma di campioni cilindrici, sono stati sottoposti a prove triassiali con l'intento di determinare i parametri geomeccanici, e quindi la posizione e le caratteristiche della superficie di rottura. Solo così è possibile effettuare un adeguato studio della stabilità di un versante e una giusta conoscenza dei problemi legati alla progettazione di dighe e gallerie.

1.4.1. Modello fisico di Lindquist

Molte sono state le analisi effettuate sulle formazioni complesse. Per l'esecuzione di prove triassiali, Lindquist realizzò circa 100 campioni cilindrici di mélange, aventi diametro di 150 mm e altezza pari a 300 mm, portandoli fino a rottura con l'obiettivo di poterne caratterizzare il comportamento meccanico. I campioni artificiali erano caratterizzati da diverse percentuali volumetriche dei blocchi (30%, 50% e 70%) e da diverse orientazioni delle inclusioni di forma ellittica (0° , 30° , 60° e 90°), ovvero l'angolo tra l'asse maggiore delle inclusioni e l'asse verticale dei campioni lungo il quale veniva applicato il carico (Figura 1.16).

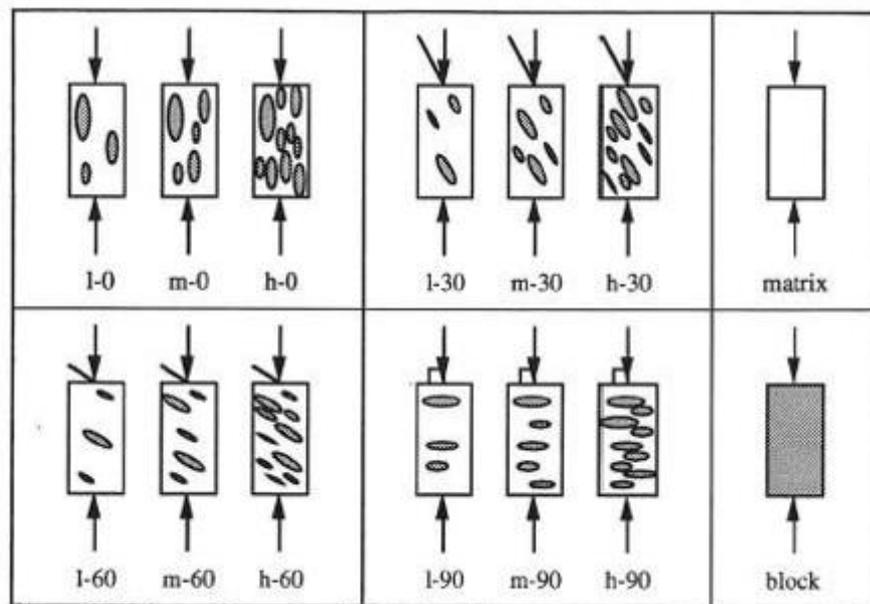


Figura 1.16. Rappresentazione schematica dei campioni (Lindquist, 1994).

La forma, le dimensioni e le proprietà delle inclusioni valutate per i provini sono derivate da osservazioni effettuate su un ampio assortimento di documenti e fotografie riguardanti depositi di formazioni rocciose complesse presenti in molte parti del mondo e, in particolare, quelli di Franciscan Complex situati nel nord della California. Il modello di riferimento è stato realizzato facendo variare, per una stabilita distribuzione dimensionale delle inclusioni (dimensione frattale pari a 2), la proporzione volumetrica e l'orientazione dei blocchi. La forma delle inclusioni variava da lenticolare a tubolare, invece il rapporto tra l'asse maggiore e l'asse minore, per tutte le inclusioni, variava da 2 a 3. All'interno di un mélange, le inclusioni possono avere dimensioni più o meno importanti in funzione del volume di interesse e nel caso di provini cilindrici, la dimensione assiale massima delle inclusioni introdotte era pari alla metà del diametro del provino stesso.

La dimensione media delle inclusioni variava da 165 mm fino ad un valore minimo limite di 12 mm, valutato come soglia dimensionale tra la matrice e le inclusioni. Per l'analisi vennero valutate quattro classi con differenti frequenze relative (Tabella 1.1).

Classe	Dimensione [mm]	Frequenza relativa dei blocchi [%]
1	10 - 19	75,5
2	19 - 38	18,9
3	38 - 75	4,7
4	75 - 150	1,2

Tabella 1.1. Distribuzione dimensionale dei blocchi (Lindquist, 1994).

Per la realizzazione dei provini artificiali di mélange, è stata utilizzata una miscela di sabbia, cemento Portland e ceneri volanti per quanto concerne le inclusioni; per la realizzazione della matrice, invece, è stata adoperata una miscela di bentonite e cemento Portland (Figura 1.17).

<u>Matrix</u>		<u>Block</u>	
Material	Parts by Weight	Material	Parts by Weight
cement	20	sand	70
bentonite	4	fly ash	35
water	17	cement	7
		water	15

Figura 1.17. Frazioni dei materiali per la realizzazione dei campioni artificiali (Lindquist, 1994).

Per simulare le aree di taglio nella matrice sono stati adoperati strati sottili di cera ricoperta da polvere di talco. Per l'esecuzione delle prove triassiali sono stati realizzati 67 campioni con un diametro di 200 mm e 10 campioni con un diametro di 70 mm; sono stati creati 5 campioni per ogni combinazione di percentuale volumetrica e orientazione delle inclusioni, 7 campioni con la miscela di sola matrice (diametro di 200 mm) e 10 campioni con il materiale dei blocchi (70 mm di diametro). Considerando anche le miscele di tentativo, utili per definire il modello dei materiali e i procedimenti di preparazione dei campioni, sono stati utilizzati in totale circa 180 provini. La superficie laterale dei campioni è stata studiata attraverso tecniche fotografiche per controllare se la valutazione dei parametri geometrici, come la percentuale volumetrica e la distribuzione dimensionale delle inclusioni, effettuata con metodologie mono e bidimensionali, poteva essere rappresentativa dei valori reali.

Dalle misure eseguite era possibile ottenere le percentuali lineari delle inclusioni e la distribuzione monodimensionale delle lunghezze delle corde e quindi, attraverso analisi digitali, stimare i diversi parametri. La percentuale volumetrica dei blocchi è stata valutata prima dell'assemblaggio del campione, noto il peso di volume dei blocchi; inoltre, questa è stata confrontata con i valori ottenuti dall'analisi delle scansioni e si è notato che la stima ottenuta sul campione in esame risultava superiore rispetto a quella determinata sulla superficie laterale dei provini di circa il 30%. Questa differenza poteva essere giustificata assumendo che la densità delle inclusioni era maggiore nella parte centrale interna del campione.

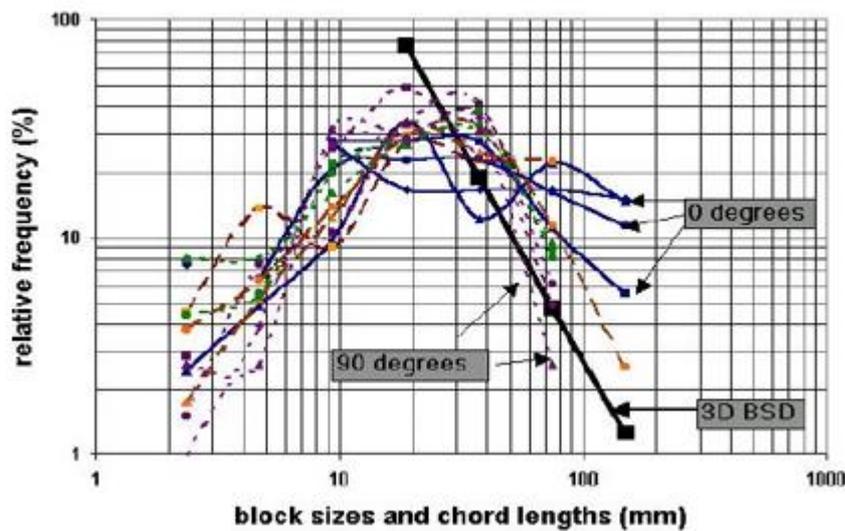


Figura 1.18. Istogrammi delle frequenze relative delle distribuzioni di lunghezza della corda e della dimensione reale dei blocchi (Medley, 2002).

In Figura 1.18 si dimostra come il diagramma (in scala logaritmica) della frequenza relativa delle lunghezze delle corde non poteva essere associato alla distribuzione effettiva tridimensionale della dimensione delle inclusioni. Nonostante ciò, i picchi delle distribuzioni monodimensionali apparivano abbastanza correlabili con la più alta frequenza relativa della dimensione del blocco più piccolo nella distribuzione tridimensionale; da questo si poteva evincere che i picchi della distribuzione monodimensionale potevano determinare il limite tra la matrice e le inclusioni, nonostante ci fosse una grande differenza tra le frequenze relative. Per lunghezze di corda maggiori della dimensione del blocco più piccolo nella distribuzione tridimensionale, i casi con orientazione blocco-linea di scansione a 0° non interpretavano con accuratezza la distribuzione principale, mentre quelli con orientazione blocco-linea di scansione a 90° risultavano più rappresentativi. Questo dipendeva dal fatto che le inclusioni più grandi erano intercettate più volte dalla linea di scansione.

Dalle analisi condotte da Lindquist sono scaturite delle valutazioni in termini di resistenza al taglio e di modulo di deformazione, la cui variazione dipende della percentuale volumetrica e dall'orientazione delle inclusioni. Dopo aver effettuato le prove di compressione triassiale, ottenuti i risultati, è stato possibile osservare che vi è una riduzione della coesione (c) all'aumentare della percentuale volumetrica e che alcuni campioni, con alte percentuali volumetriche, presentano una coesione pari a circa la metà di quella della matrice; si nota anche che i valori dell'angolo di attrito (ϕ) crescono all'aumentare della proporzione volumetrica dei blocchi (Figura 1.19, Figura 1.20).

Specimen Type	Average Block Proportion	c (psi)
matrix	0%	330
block	100%	445
l-0	29%	345
l-30	31%	250
l-60	33%	377
l-90	29%	276
m-0	50%	233
m-30	53%	206
m-60	54%	229
m-90	57%	231
h-0	72%	199
h-30	74%	163
h-60	73%	180
h-90	71%	302

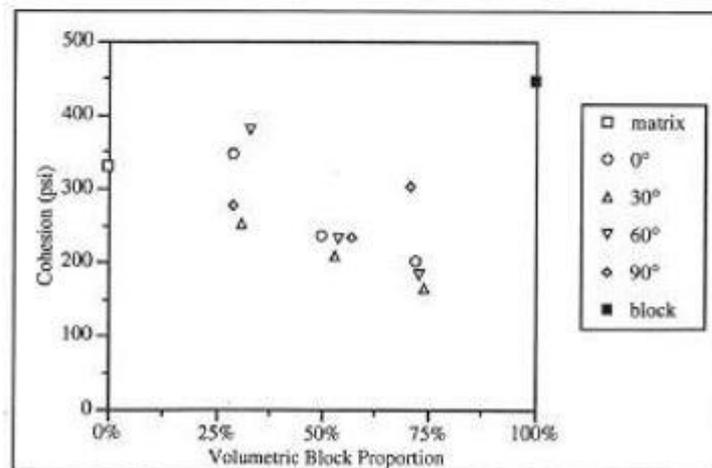


Figura 1.19. Risultati dei test di compressione triassiale in termini di coesione e percentuale volumetrica delle inclusioni (Lindquist, 1994).

Specimen Type	Average Block Proportion	ϕ (°)
matrix	0%	24.7
block	100%	38.3
l-0	29%	26.2
l-30	31%	32.9
l-60	33%	23.4
l-90	29%	32.8
m-0	50%	33.5
m-30	53%	32.3
m-60	54%	33.3
m-90	57%	37.6
h-0	72%	39.6
h-30	74%	38.2
h-60	73%	41.2
h-90	71%	34.0

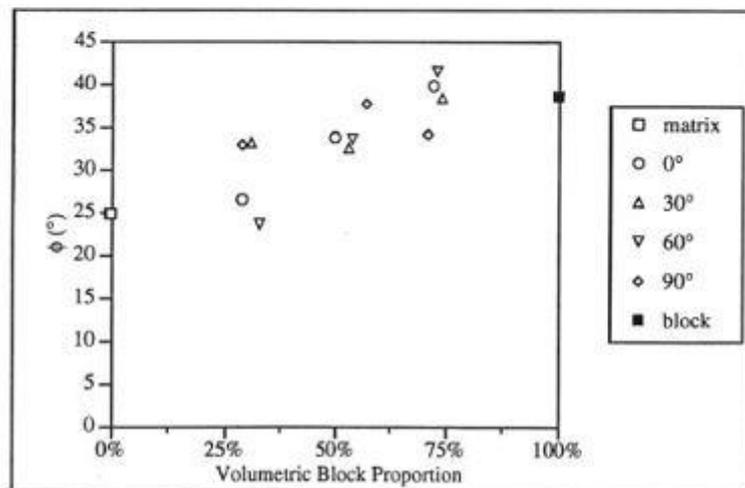


Figura 1.20. Risultati dei test di compressione triassiale in termini di angolo di attrito e percentuale volumetrica delle inclusioni (Lindquist, 1994).

Le formazioni rocciose complesse, come i bimrock, di solito sono caratterizzate internamente dalla medesima orientazione delle superfici di debolezza, causata sia dalle aree di taglio principali che dall'allineamento delle inclusioni. Si è osservato che l'orientazione dei blocchi conferisce alle formazioni complesse proprietà anisotrope; dai dati ottenuti dalle analisi condotte da Lindquist (1994), è stato possibile riscontrare variazioni della coesione in funzione dell'orientazione delle inclusioni. I campioni con inclinazione dei blocchi di 0° e 90° hanno coesione maggiore rispetto a quelli con orientazione 30° e 60°. Si è riscontrato anche che il valore dell'angolo di attrito, valutato in campioni con medio alta percentuale volumetrica, non varia in funzione dell'orientazione dei blocchi. I risultati mostrano l'esistenza di un valore soglia di percentuale volumetrica (30%) al di sotto del quale i parametri di resistenza sono poco influenzati dalla presenza dei clasti rocciosi. Analizzando le superfici di rottura, sviluppate lungo le zone di contatto tra la matrice e le inclusioni, è stato possibile osservare in che modo la percentuale volumetrica influisca sui valori di coesione e angolo di attrito interno.

In particolare, al crescere delle percentuali volumetriche, l'angolo di attrito interno aumenta poiché le superfici di rottura diventano più tortuose; essendo le resistenze delle inclusioni circa il doppio di quella della matrice, le zone di rottura si sviluppano lungo le aree di contatto tra i blocchi e la matrice anziché attraversare i blocchi stessi.

Come già detto, anche il modulo di deformazione varia in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi. Per prima cosa si deve far riferimento a due situazioni differenti: il primo caso mostra il provino soggetto a deformazione uniforme mentre il secondo caso lo considera soggetto ad uno stato tensionale uniforme (Figura 1.21).

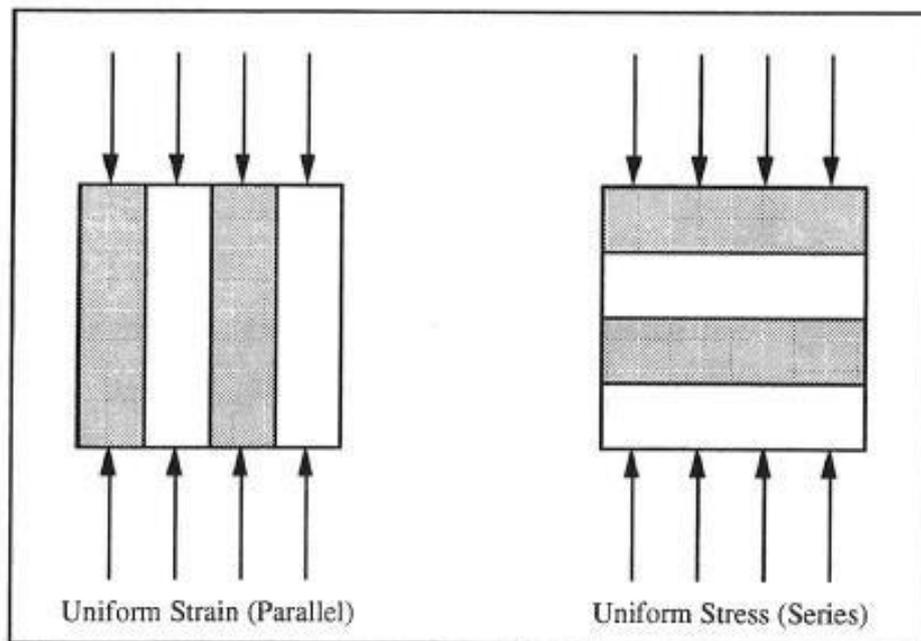


Figura 1.21. Campione sottoposto a stato di deformazione uniforme a sinistra ed a stato di tensione uniforme a destra.

Dalle prove di compressione triassiale è stato possibile ottenere un diagramma di tensioni e deformazioni in cui la pendenza della retta congiungente l'origine del diagramma con il punto corrispondente al 40% della massima tensione deviatorica, rappresenta il modulo di deformazione secante.

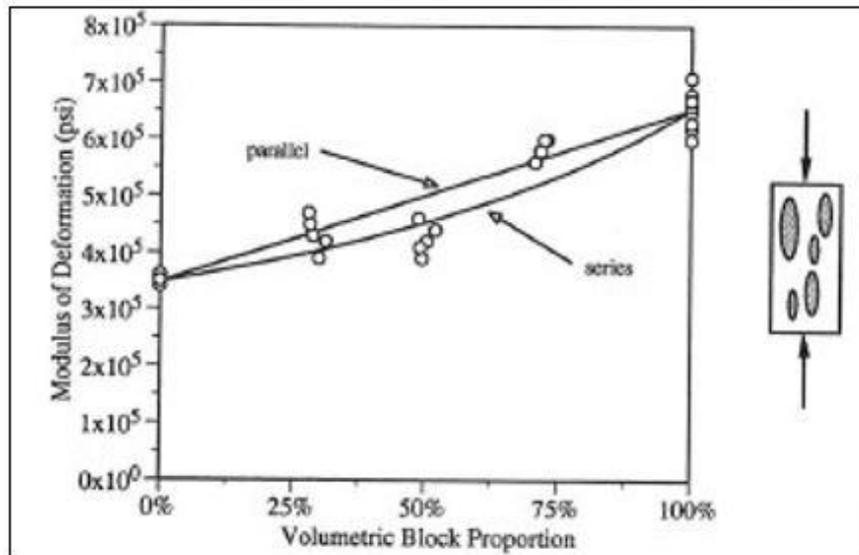


Figura 1.22. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (0°) (Lindquist, 1994).

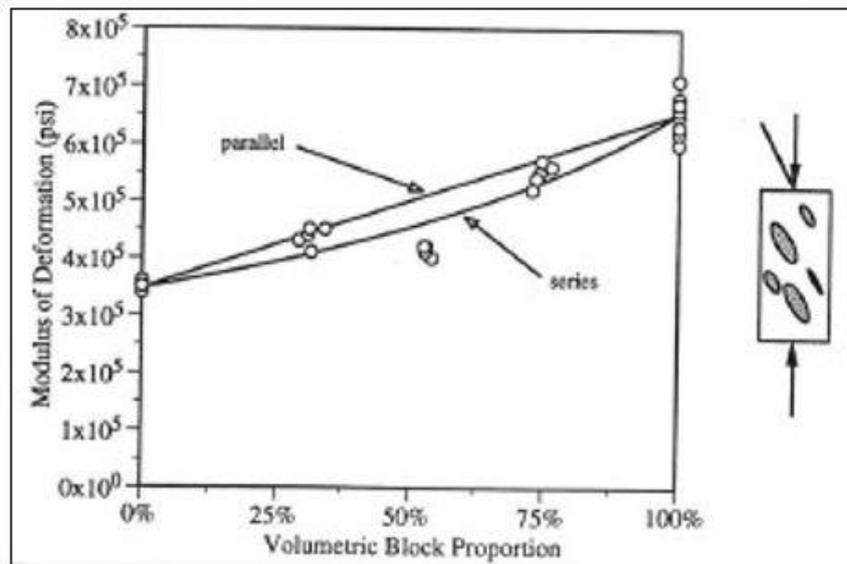


Figura 1.23. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (30°) (Lindquist, 1994).

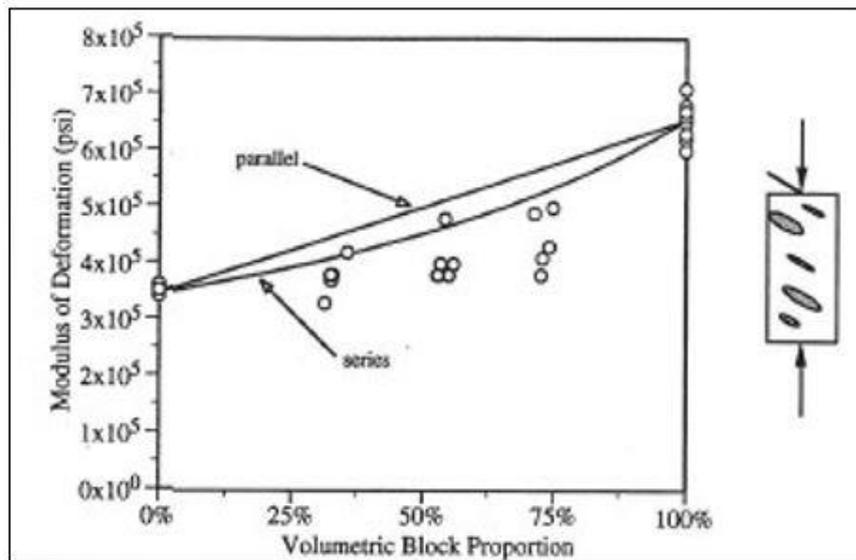


Figura 1.24. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (60°) (Lindquist, 1994).

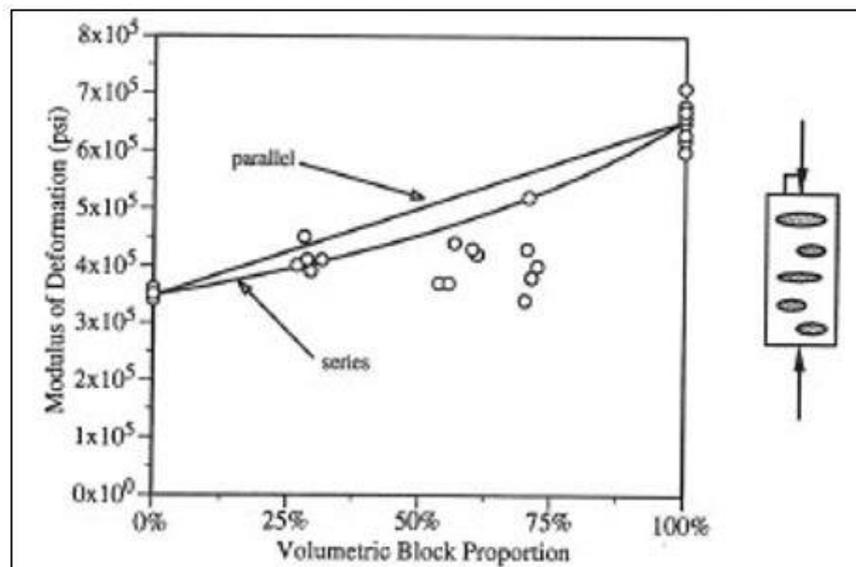


Figura 1.25. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (90°) (Lindquist, 1994).

Attraverso l'analisi dei dati ottenuti dalle prove di compressione triassiale sui campioni, è stato possibile ricavare i valori del modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (Figura 1.22, Figura 1.23, Figura 1.24, Figura 1.25). Si osserva che l'aumento della proporzione volumetrica determina una complessiva crescita del modulo di deformazione dei provini analizzati; questo aumento è causato da un irrigidimento del modello al crescere della percentuale volumetrica. Inoltre, la velocità di incremento del modulo in funzione della percentuale volumetrica diminuisce al variare dell'inclinazione dei blocchi; l'aumento del modulo di deformazione appare minore passando da un'orientazione dei blocchi verticale ad una orizzontale.

Per concludere si può affermare che i moduli di deformazione crescono all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi e, questo incremento è maggiore per i provini con le inclusioni disposte con l'asse maggiore parallelo alla direzione di carico assiale (0°) e minore per campioni con blocchi ortogonali alla direzione del carico assiale (90°). Dunque, i parametri di resistenza e di deformazione delle formazioni complesse studiate da Lindquist (1994) sono molto condizionate sia dalla percentuale volumetrica che dall'orientazione dei blocchi.

1.4.2. Modello fisico di Medley

Medley determinò un nuovo modello fisico, basato sull'analisi di campioni artificiali realizzati con il fine di garantire una stima della percentuale volumetrica delle inclusioni che fosse rappresentativa della realtà. Lo scopo dell'analisi era quello di valutare il grado di incertezza nella stima della distribuzione dimensionale dei blocchi, ottenuta attraverso fori di sondaggio, a partire da quella delle lunghezze della corda. Medley (2002) realizzò quattro campioni, la cui matrice era costituita da gesso, mentre le inclusioni da plastilina, riso nero e argilla. Per l'analisi, furono selezionate quattro percentuali volumetriche dei blocchi differenti (13%, 32%, 42%, 55%), blocchi di forma ellissoidale con orientazione di 0° e 90° rispetto all'asse del campione e una distribuzione dimensionale delle inclusioni simile a quella del Franciscan Complex (con dimensione frattale di 2,3). I campioni presentavano una larghezza di 170 mm, altezza variabile tra i 110 mm e i 150 mm e una profondità pari a 110 mm, per una superficie di base complessiva pari a 17000 mm^2 . La dimensione massima delle inclusioni era pari a circa $0,75\sqrt{A}$ (98 millimetri). I blocchi sono stati divisi in cinque classi dimensionali, variabili tra $0,05\sqrt{A}$ (3 mm-6 mm) e $0,8\sqrt{A}$ (48 mm-96 mm). Tutti i modelli erano caratterizzati dalla stessa frequenza relativa delle inclusioni: 79,7 % per $0,05\sqrt{A}$, 16,2% per $0,1\sqrt{A}$, 3,3% per $0,2\sqrt{A}$, 0,7% per $0,4\sqrt{A}$ e 0,1% per $0,8\sqrt{A}$. Il numero dei blocchi totale in ciascun campione variava da 2200, per il modello caratterizzato da una percentuale volumetrica pari al 13%, fino a 7350 per il modello con percentuale volumetrica pari al 55%. Dopo aver ottenuto i campioni, facendo particolare attenzione nella realizzazione della miscela e nell'attesa dei tempi di essiccazione, ogni modello fu tagliato in dieci porzioni e ognuna di queste è stata fotografata e analizzata attentamente. Su ogni immagine, sono state tracciate dieci linee di scansione verdi che rappresentavano, alla scala di deposito, i fori di sondaggio dai quali era possibile determinare le informazioni relative alla percentuale volumetrica dei blocchi, mentre la linea gialla indicava l'asse del campione (Figura 1.26).

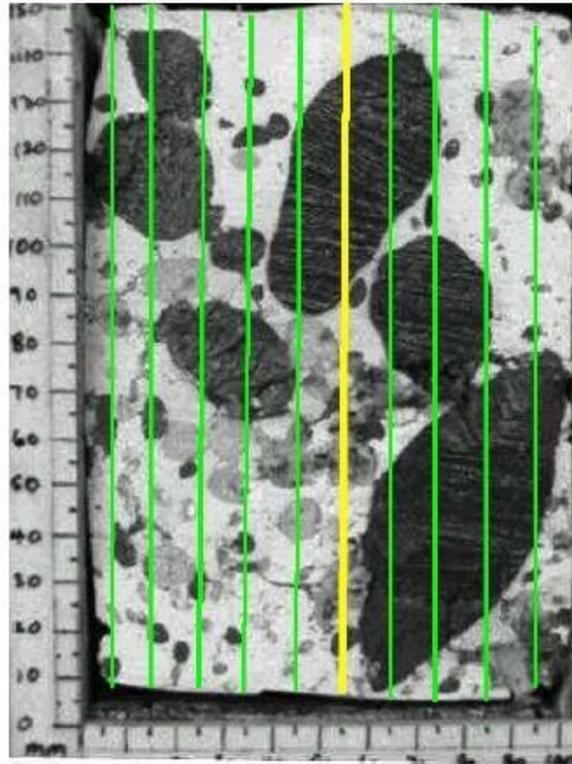


Figura 1.26. Metodo per la determinazione della percentuale volumetrica mediante linee di scansione (Medley, 2002).

Per ciascuno dei quattro campioni con diverse percentuali volumetriche, sono state determinate cento tracce attraverso le quali è stato possibile calcolare le differenti percentuali lineari delle inclusioni; in questa maniera sono stati ottenuti risultati tali da consentire un'elaborazione statistica dei dati, grazie alla quale è stato possibile stabilire l'incertezza nella valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi. Successivamente è stato eseguito il confronto tra la distribuzione tridimensionale delle inclusioni e la lunghezza delle corde intercettate attraverso le 400 scanlines. I risultati ottenuti, tramite queste prove di laboratorio, sono stati raggruppati in un istogramma (Figura 1.27).

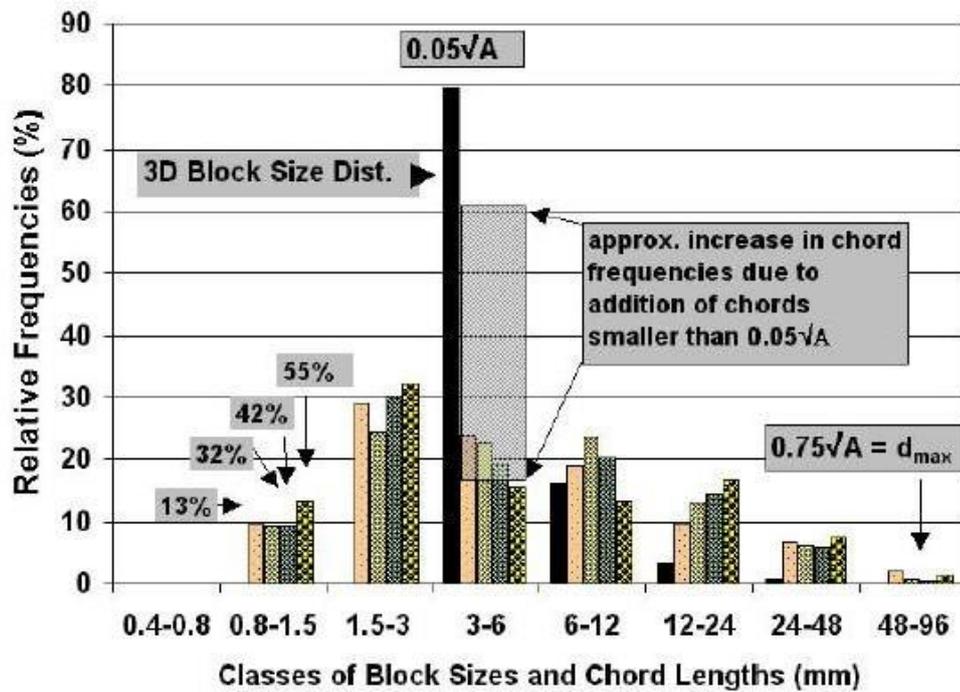


Figura 1.27. Istogramma della distribuzione tridimensionale dei blocchi (barre nere) per 4 campioni e distribuzione della lunghezza della corda (Medley, 2002).

L'istogramma mostra la frequenza relativa delle inclusioni in funzione della loro dimensione, ovvero la corda intercettata dalla scanline, per ognuno dei quattro campioni. Può essere osservato come, nonostante il numero elevato di dati, non ci fosse molta corrispondenza tra la distribuzione tridimensionale dei blocchi originali e la distribuzione monodimensionale delle lunghezze delle corde. Sebbene il numero più elevato di blocchi nel campione apparteneva alla classe (3 mm – 6 mm), con una frequenza relativa pari al 80%, la lunghezza complessiva delle corde di questa dimensione risultava bassa. Per spiegare questo, bastava pensare a quanto era ridotta la probabilità di intercettare elementi di piccole dimensioni sulla porzione della superficie laterale del campione, nonostante la loro numerosità. Al contrario, i blocchi di grandi dimensioni erano più facilmente intercettabili dalle linee di scansione, data la loro estensione, anche se la corda di intercettazione non coincideva con la loro dimensione massima. Dunque, la frequenza relativa delle corde più lunghe era maggiore di quella delle inclusioni appartenenti alla stessa classe dimensionale; questo era causato dal fatto che l'esiguo numero di corde di elevata dimensione era stimato in funzione di un numero totale di dati abbastanza basso. Attraverso i dati ottenuti è stato dimostrato come la distribuzione sarebbe potuta essere determinata andando a considerare tutte le frequenze relative delle corde di dimensioni minori di quelle della più piccola inclusione (0,75 mm-1,5 mm e 1,5 mm-3,00 mm) alle frequenze relative dell'inclusione più piccola (3,0 mm-6,0 mm o $0,05\sqrt{A}$).

Questa decisione risultava plausibile in quanto le corde di dimensioni più piccole derivavano sempre da inclusioni più grandi.

Il fine dell'analisi però, era quello di prendere in considerazione inclusioni maggiori della dimensione limite blocco-matrice, quindi l'aumento di corde più piccole del limite aumentava le frequenze relative della classe (3,0 mm-6,0 mm) di circa il 40% per un totale del 60%, inferiore alla frequenza dell'80 % della distribuzione tridimensionale. I risultati ottenuti sono stati anche rappresentati attraverso la frequenza cumulata della distribuzione tridimensionale originaria delle inclusioni (BSD) e quella delle lunghezze delle corde (CLDs) (Figura 1.28).

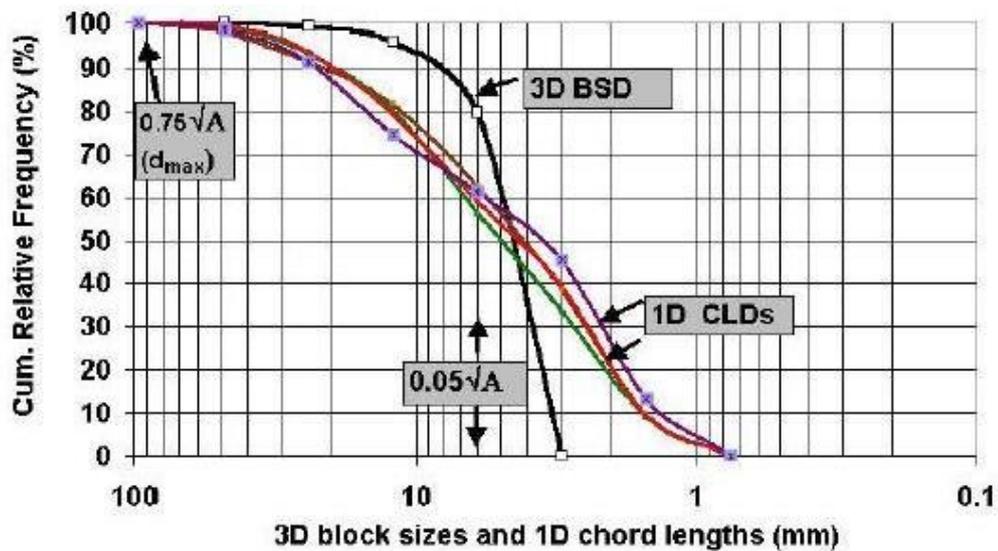


Figura 1.28. Andamento delle distribuzioni granulometriche della lunghezza della corda e della dimensione dei blocchi per i 4 modelli in funzione della frequenza relativa cumulata (Medley, 2002).

La frequenza cumulata della distribuzione delle inclusioni è stata ricavata attraverso l'osservazione monodimensionale delle corde intercettate dalle linee di scansione e della reale distribuzione tridimensionale. Il diagramma evidenzia alcune differenze tra le distribuzioni, nonostante la grande quantità di dati ottenuti dall'analisi. Si osserva che il 60% delle inclusioni (CLDs) presentava una dimensione inferiore al limite tra le inclusioni e la matrice ($0,05\sqrt{A}$); e così la corda, nella maggior parte dei casi, non coincideva con la dimensione massima effettiva dell'inclusione (d_{mod}).

1.5. Descrizione geologica di un Mélange dell'Oltrepò Pavese

Il prelievo del Mélange d'Oltrepò Pavese, caso studio di questo elaborato di tesi, è stato effettuato in un'area dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino, caratterizzata dalla presenza di unità “caotiche” a blocco in matrice (Figura 1.29).

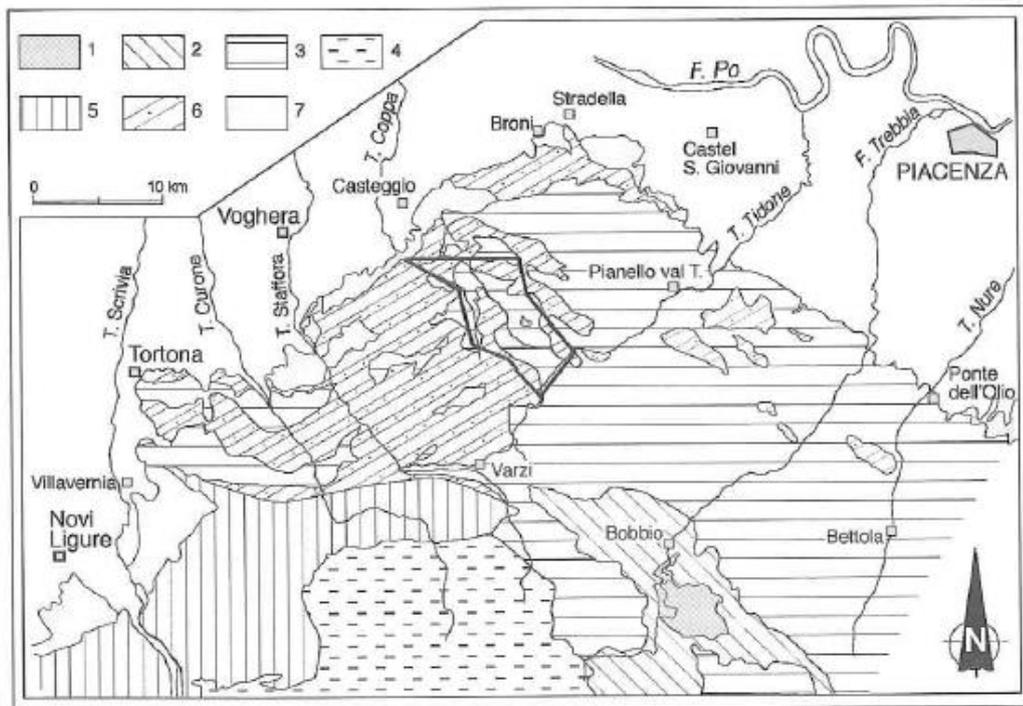


Figura 1.29. Distribuzione delle principali Unità tettoniche e Successioni stratigrafiche dell'Appennino nordoccidentale (Panini et al., 2002).

Le formazioni caotiche, in particolare, sono state suddivise in due “unità litostratigrafiche” (Complesso caotico e Complesso indifferenziato), la cui distinzione principale consiste nel grado o nella effettiva presenza di una “caoticità” (presumibilmente alla scala dell'affioramento) che caratterizzerebbe l'una (Complesso caotico) e non l'altra (Complesso indifferenziato). All'interno di questa area è stato possibile effettuare una distinzione tra elementi derivanti da processi di tipo sedimentario (breccie argillose poligeniche o breccie sedimentarie) e corpi derivanti da fenomeni di origine tettonica. I terreni affioranti in quest'area del vogherese possono, infatti, essere attribuiti a due diversi gruppi rappresentati dalle Liguridi e dalle sovrastanti unità litostratigrafiche della Successione epiligure. All'interno della Successione epiligure sono stati considerati corpi caotici costituiti in prevalenza da breccie poligeniche a matrice argillosa (depositi da colata di fango e detrito, olistostromi). I depositi prevalentemente argillosi, privi degli originari riferimenti stratigrafici, sono stati distinti in due fondamentali categorie di rocce caotiche.

La prima, definibile con il termine di “tettoniti” (monoformazionali o pluriformazionali), è costituita da quei corpi rocciosi riconducibili alle formazioni liguri dei cosiddetti “Complessi di Base” che nell’area studiata sono rappresentate dalle Argille varicolori di Cassio. La seconda categoria di rocce caotiche, invece, è rappresentata da breccie sedimentarie derivate da processi di tipo gravitativo, alla quale appartengono alcune unità litostratigrafiche (Brecce argillose di Baiso e Brecce argillose della Val Tiepido-Canossa). In ogni caso, nell’area studiata, la maggioranza dei contatti di sovrapposizione tra queste breccie argillose poligeniche e le unità sottostanti sono da ritenersi stratigrafici, anche se non in continuità. Tutti i campioni, utilizzati per la caratterizzazione del Mélange d’Oltrepò Pavese, sono stati prelevati in superficie da quattro differenti affioramenti all’interno dell’area dell’Appennino vogherese (Figura 1.30).



Figura 1.30. Affioramento di Mélange d’Oltrepò Pavese nell’area dell’Appennino vogherese.

In termini geologici il materiale in esame può essere definito come una argilla eterometrica ad assetto caotico, caratterizzata dall’alternanza o dalla sovrapposizione di due differenti litozone. La litozona inferiore è costituita da una matrice argillitica rossastra, caratterizzata da una fissilità pervasiva, da una scagliosità e organizzata attraverso superfici planari irregolari tendenzialmente tra loro subparallele. La litozona superiore, invece, è costituita da breccie a matrice argillosa grigia inglobante clasti e blocchi litoidi di natura variabilissima (areniti, calcari, ecc.). Gli affioramenti di queste unità litostratigrafiche sono discretamente acclivi e sono rappresentati morfologicamente da aree boscate.

2. Caratterizzazione di un Mélange dell'Oltrepò Pavese

L'obiettivo del presente elaborato di tesi, come già detto, è quello di eseguire un'accurata analisi e un'adeguata caratterizzazione del "Mélange d'Oltrepò Pavese", per poter ottenere una più vasta conoscenza delle proprietà di queste formazioni complesse. In primo luogo, oltre a un'attenta e accurata descrizione visiva, sono state eseguite alcune prove di laboratorio come la determinazione del contenuto d'acqua, dei limiti di Atterberg e della distribuzione granulometrica. Essendo campioni di una formazione complessa, costituita da inclusioni di roccia all'interno di una matrice argillosa-limosa molto compatta, la procedura per la caratterizzazione è risultata più complicata e ha richiesto modifiche rispetto alle procedure standard per un terreno.

2.1. Descrizione dei campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese

Tutti i campioni, utilizzati per la caratterizzazione del materiale, sono stati prelevati da quattro differenti affioramenti superficiali nella zona dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino. Questi campioni geologicamente sono costituiti da argille eterometriche con distribuzione caotica caratterizzate da due litozone. La litozona superiore è composta da una matrice argillosa grigia inglobante clasti e blocchi litoidi di natura variabilissima (areniti, calcari, ecc.); la misura di questi blocchi è molto variabile e può raggiungere anche alcuni m³. La litozona inferiore, invece, è caratterizzata da una matrice argillitica rosata-rossastra, caratterizzata da una fissilità pervasiva, da una scagliosità e organizzata attraverso superfici planari irregolari tendenzialmente tra loro subparallele (Festa et al. 2015, Panini et al. 2002). Per le analisi di laboratorio sono stati scelti due campioni costituiti prevalentemente da matrice e altri due contenenti una certa percentuale di inclusioni. In seguito sono riportate delle tabelle descrittive dei quattro campioni in esame.

Il campione con blocchi (1), prelevato nell'ottobre del 2017, è fedele alla descrizione del materiale derivante dalla litozona superiore. Osservando il campione non è stato possibile determinare una stratificazione, essendo molto fratturato e visibilmente alterato (Tabella 2.1).



Peso (g)	3915,1 g
Descrizione	Presenta blocchi di forma subangolare con alcuni di forma subarrotondata, in prevalenza rugosi e di colore grigio, bianco e con alcuni grani di colore marrone all'interno di una matrice di colore grigio.

Tabella 2.1. Descrizione del campione con blocchi (1).

Il campione senza blocchi (2), prelevato sempre nell'ottobre del 2017, corrisponde alla descrizione del materiale proveniente dalla litozona inferiore. Osservando il campione, è stato possibile riscontrare una certa stratigrafia anche se appare molto fessurato ed alterato (Tabella 2.2).



Peso (g)	4722,4 g
Descrizione	Presenta grani di forma lamellare subangolare, in prevalenza rugosi e di colore grigio scuro, bianco e con alcune sfumature di rosso all'interno di una matrice di colore grigio/rossastro.

Tabella 2.2. Descrizione del campione senza blocchi (2).

Il campione con blocchi (3), prelevato nell'aprile del 2018, è fedele alla descrizione del materiale derivante dalla litozona superiore. Osservando il campione non è stato possibile determinare una stratificazione, essendo molto fratturato e visibilmente alterato (Tabella 2.3). Avendo caratteristiche simili al campione con blocchi (1) si può pensare che siano costituiti dallo stesso materiale.



Peso (g)	4470,5 g
Descrizione	Presenta blocchi di forma subangolare con alcuni di forma subarrotondata, in prevalenza rugosi e di colore grigio, bianco all'interno di una matrice di colore grigio.

Tabella 2.3. Descrizione del campione con blocchi (3).

Il campione senza blocchi, prelevato nell'aprile del 2018, corrisponde alla descrizione del materiale proveniente dalla litozona inferiore. Osservando il campione, è stato possibile riscontrare una stratigrafia netta ondulata anche se appare molto fessurato ed alterato (Tabella 2.4).



Peso (g)	4166.2 g
Descrizione	Presenta grani di forma lamellare subangolare, in prevalenza rugosi e di colore rosa e bianco con alcune sfumature di grigio all'interno di una matrice di colore grigio/rossastro.

Tabella 2.4. Descrizione del campione senza blocchi (4).

2.2. Determinazione del contenuto d'acqua

Dopo aver fatto un'accurata analisi visiva dei campioni, il secondo passo ha riguardato la determinazione del contenuto d'acqua. Per definire il quantitativo d'acqua, all'interno dei vuoti presenti nella matrice, in relazione alla quantità di materia solida, da ogni macrocampione sono stati ottenuti dieci campioncini più piccoli di peso variabile (Figura 2.1).

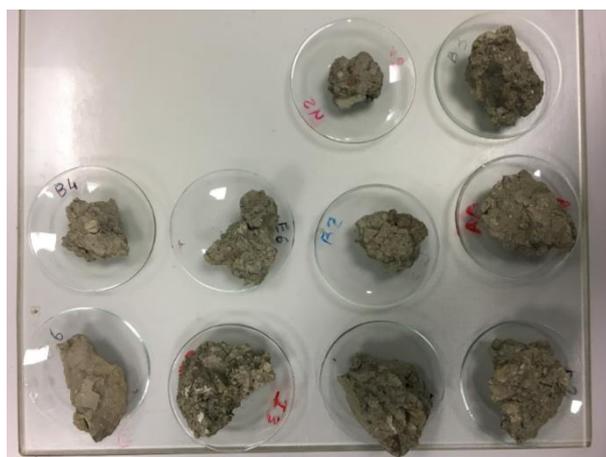


Figura 2.1. Dieci campioncini per la determinazione del contenuto d'acqua.

Ogni campioncino, dopo essere stato accuratamente pesato, è stato essiccato in forno alla temperatura di 100°C per circa 24 ore (Figura 2.2, Figura 2.3).

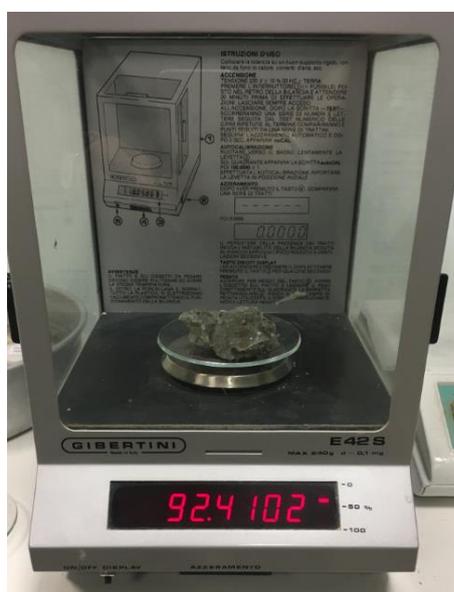


Figura 2.2. Accurata pesatura di un campioncino attraverso una bilancia di precisione.



Figura 2.3. Essiccazione in un forno alla temperatura di 100°C per circa 24 ore.

Secondo la norma ASTM D2216, questa procedura deve essere ripetuta fino a quando la massa finale del campione non risulta costante. Ottenute la massa iniziale nel suo stato naturale (M_i) e la massa essiccata (M_f) del campione è stato possibile determinare il contenuto d'acqua attraverso la seguente formula:

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

dove M_s corrisponde alla massa solida e se si considera un terreno, questo parametro corrisponde alla massa essiccata M_f . Per le formazioni complesse, come il Mélange, questi due valori non coincidono. Infatti, essendo le formazioni complesse a blocco in matrice costituite da inclusioni di roccia impermeabili all'interno di una matrice, il valore di M_s può essere considerato relativo alla massa della sola frazione fine (sabbia, limo, argilla). Così, i campioni sono stati disciolti in acqua e passati al setaccio ASTM 60 in modo da ottenere il peso del trattenuto dei grani, di diametro maggiore di 0,25 mm, e sottrarlo dalla massa totale essiccata (M_f) con il fine di ottenere la massa solida corretta (M_s) (Figura 2.4).



Figura 2.4. Operazione di setacciatura (Setaccio ASTM 60).

Dopo aver determinato il valore del contenuto d'acqua per i dieci sottocampioni, è stata effettuata una media aritmetica in modo da poter ottenere un unico valore per ciascun macroblocco. Nella tabella sono riportati i valori del contenuto d'acqua per i quattro campioni (Tabella 2.5).

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

Tabella 2.5. Valori del contenuto d'acqua dei campioni analizzati.

2.3. Determinazione dei limiti di Atterberg

I limiti di consistenza (o limiti di Atterberg) indicano il valore limite del contenuto di acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico del terreno; sono valori di contenuto d'acqua relativi a determinati stati fisici. Nei terreni a grana fine, infatti, al contrario di un terreno grossolano, sono la composizione mineralogica e la condizione ambientale a controllare le proprietà delle particelle e le loro interazione con l'acqua. A seconda del contenuto d'acqua, un materiale può presentare quattro condizioni, definite come stati di consistenza: stato liquido, stato plastico, stato semisolido e stato solido. La transizione da uno stato di consistenza ad un altro è definita attraverso dei valori limite; nello specifico, si definiscono i limiti che determinano il campo di comportamento plastico del materiale, ovvero il limite liquido e il limite plastico. In particolare, un contenuto d'acqua maggiore del limite liquido comporta un uno stato liquido del materiale, mentre un contenuto d'acqua minore del limite plastico comporta un stato semisolido del materiale stesso.

La determinazione dei limiti di consistenza interessa esclusivamente, come già detto, la parte fine del materiale, ed essendo il Mélange una formazione eterogenea, è stato necessario separare la parte fine dalla parte grossolana attraverso un'operazione di setacciatura; i quattro campioni, infatti, sono stati prima sciolti in acqua distillata (deionizzata) e successivamente vagliati al setaccio ASTM 40. Il materiale passante è stato poi mescolato con aggiunta di acqua distillata con il fine di ottenere un impasto omogeneo (Figura 2.5).



Figura 2.5. Preparazione del materiale per la determinazione del limite liquido.

Il primo limite di consistenza ad essere determinato è stato il limite liquido attraverso l'utilizzo del Cucchiaino di Casagrande (Figura 2.6). Una parte dell'impasto viene inserita all'interno del cucchiaino fino a ricoprire due terzi dello stesso, e con l'utilizzo di apposito arnese viene creato un solco. Successivamente, è stato messo in movimento il cucchiaino ed è stato contato il numero di colpi necessari per far chiudere il solco per un tratto di circa dieci mm di lunghezza.



Figura 2.6. Prova con il Cucchiaino di Casagrande per la determinazione del limite liquido.

Dopo aver determinato il numero di colpi necessari, è stato possibile determinare il contenuto d'acqua del materiale attraverso la variazione di peso dopo circa 24 ore in un forno a 100°C.

Per una più corretta valutazione, la prova viene ripetuta più volte, dopo aver fatto evaporare naturalmente una parte dell'acqua contenuta nell'impasto; in questo modo è stato possibile ottenere diverse coppie di valori “numero di colpi-contenuto d'acqua”, utili per la costruzione del grafico per la determinazione del limite liquido. Il numero di colpi ritenuto valido per l'analisi è compreso tra 15 e 30 e, una volta ottenute circa sette coppie di valori ammissibili “numero di colpi-contenuto d'acqua”, è stato possibile costruire il diagramma per la determinazione del limite liquido (Figura 2.7).

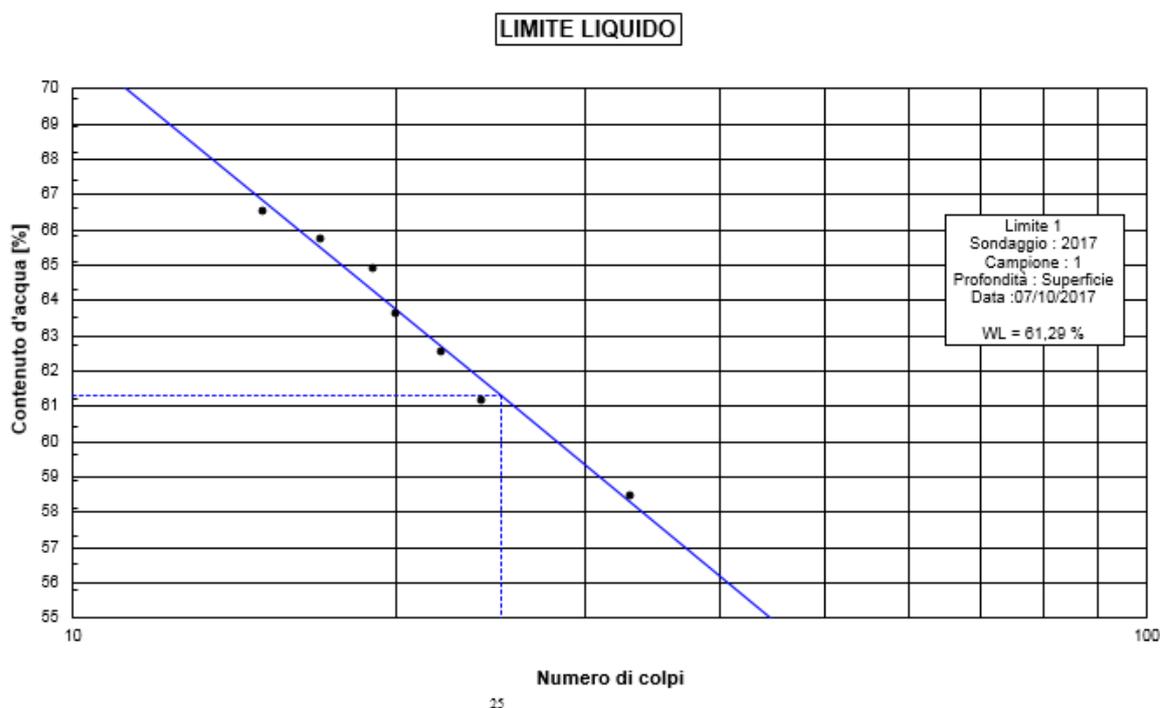


Figura 2.7. Esempio del diagramma per la determinazione del limite liquido.

Attraverso il diagramma è stato possibile ricavare il limite liquido, come il contenuto d'acqua corrispondente convenzionalmente ad un numero di colpi pari a 25.

In seguito, è stato determinato il secondo limite di consistenza, il limite plastico, ovvero il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il materiale inizia a perdere il comportamento plastico; il materiale non può più essere modellato senza che si formino fessure o che si verifichino fenomeni di sbriciolamento. La determinazione del limite plastico, infatti, avviene realizzando e lavorando manualmente dei bastoncini di materiale (3 mm di diametro e 10 cm di lunghezza) su di una lastra di vetro, e andando a determinare il contenuto d'acqua quando questi iniziano a fessurarsi e a sbriciolarsi (Figura 2.8). Si è preso come limite plastico la media di tre misurazioni.



Figura 2.8. Prova per la determinazione del limite plastico.

Dopo la determinazione dei due limiti di consistenza, è stato possibile definire l'Indice di plasticità (PI), che definisce l'intervallo all'interno del quale il materiale presenta un comportamento plastico, come la differenza tra il limite liquido e il limite plastico.

$$PI = w_L - w_P$$

Successivamente è stato determinato l'indice di consistenza (IC) ottenuto attraverso la formula seguente:

$$IC = \frac{w_L - w}{PI}$$

Le procedure per la determinazione dei limiti di consistenza sono state ripetute quattro volte per ciascuno dei quattro campioni e i risultati ottenuti sono stati mediati in modo tale da avere una valutazione più affidabile e precisa, vista la grande variabilità delle prove (Tabella 2.6).

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

Tabella 2.6. Limiti di Atterberg ottenuti per i quattro campioni dell'Oltrepò Pavese.

Dai dati ottenuti, è stato possibile osservare che i valori ottenuti per il Campione 1 ed il Campione 3 sono molto simili, e questo, conferma l'ipotesi fatta precedentemente nella quale si affermava che si trattasse di materiali dello stesso tipo. Al contrario, il Campione 2 ed il Campione 4 presentano valori differenti, ad eccezione dell'Indice di plasticità. In conclusione, si può dire che il materiale fine, costituente la matrice del Mélange d'Oltrepò Pavese, è caratterizzato da una medio-alta plasticità con elevati valori dell'Indice di consistenza.

2.4. Analisi granulometrica

Per la determinazione della curva granulometrica e quindi la composizione dimensionale delle particelle costituenti il Mélange d'Oltrepò Pavese, è stato fondamentale determinare il campo di variazione e la distribuzione di frequenza delle dimensioni delle particelle tramite un'analisi granulometrica. Questa analisi è stata effettuata attraverso una procedura di vagliatura meccanica, per la componente grossolana, e con un'analisi per sedimentazione (aerometria), per la componente fine del materiale. Per l'analisi, il materiale è stato prima disciolto in acqua e poi vagliato al setaccio ASTM 200 in modo tale da poter dividere il materiale grossolano da quello fine; entrambe le frazioni poi sono state essiccate in forno a 100°C. La componente grossolana è stata vagliata meccanicamente, mentre per la frazione fine sono stati prelevati 40 g di materiale essiccato e sono stati disciolti nuovamente in acqua distillata per l'analisi mediante sedimentazione (aerometria). L'operazione di vagliatura meccanica (secondo la normativa ASTM D422) consiste nell'andare ad inserire il materiale grossolano all'interno di una pila di setacci con maglia decrescente collocati sopra una piattaforma vibrante (Figura 2.9); per ottenere una corretta vagliatura la prova deve essere eseguita per almeno quindici minuti.



Figura.2.9. Setacciatura su tavola vibrante.

Successivamente, è stata misurata la frazione trattenuta da ciascun setaccio e sono stati riportati i risultati ottenuti in un diagramma; questo diagramma presenta sulle ascisse il diametro equivalente delle particelle, definito attraverso la maglia dei setacci, e sulle ordinate la percentuale in peso delle particelle con diametro inferiore, ovvero la percentuale di passante per quel determinato setaccio. L'asse delle ascisse è rappresentato in funzione logaritmica per rappresentare tutte le dimensioni delle particelle che si trovano all'interno di un intervallo che interessa molti ordini di grandezza. La curva ottenuta prende il nome di curva granulometrica. Per la componente particellare più fine del materiale, ovvero il passante all'ultimo setaccio ASTM 200 con apertura 0,075 mm, è stata effettuata un'analisi per sedimentazione (aerometria). L'aerometria è basata sulla legge di Stokes, che mette in relazione la velocità di sedimentazione di un insieme di sfere in un fluido viscoso con il diametro e la densità delle sfere in sospensione nel fluido; le particelle più piccole sedimentano più lentamente di quelle con diametro maggiore. In istanti di tempo successivi, è stato possibile misurare la densità di sospensione e determinare la percentuale di particelle relative ad un diametro equivalente; in questo modo è stato possibile completare le curve granulometriche anche per diametri inferiori a 0,075 mm (Figura 2.10).

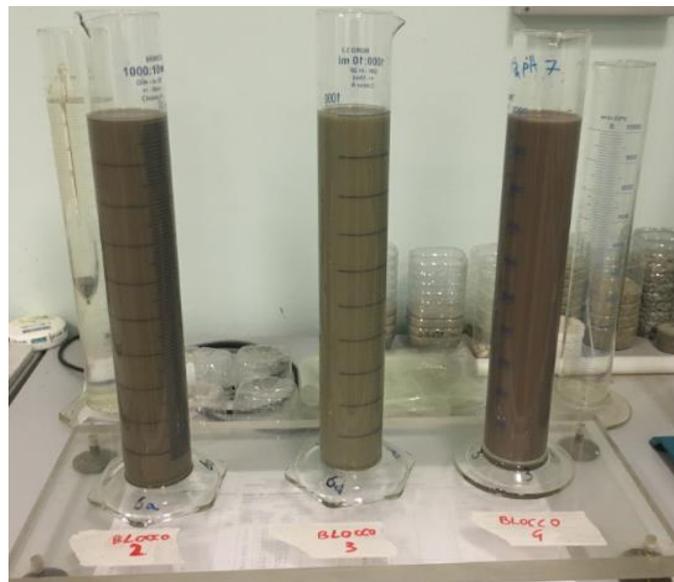


Figura 2.10. Analisi per sedimentazione (aerometria) di particelle con diametro inferiore a 0,075 mm.

In questo modo è stato possibile ottenere delle curve granulometriche molto rappresentative dei quattro campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese (Figura 2.11, Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14).

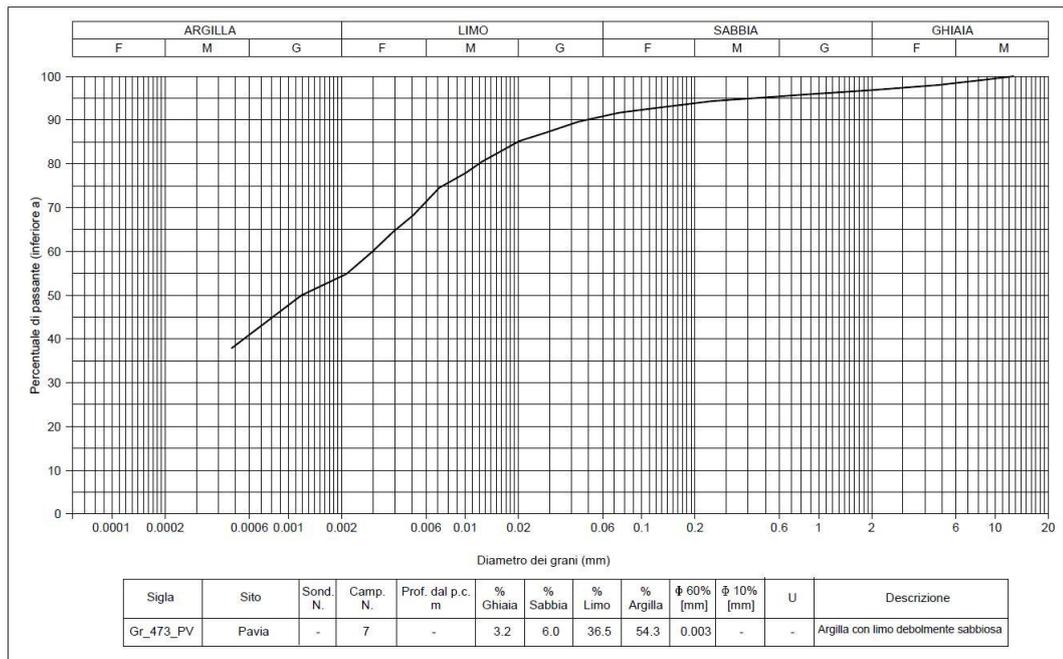


Figura 2.11. Curva granulometrica del campione 1.

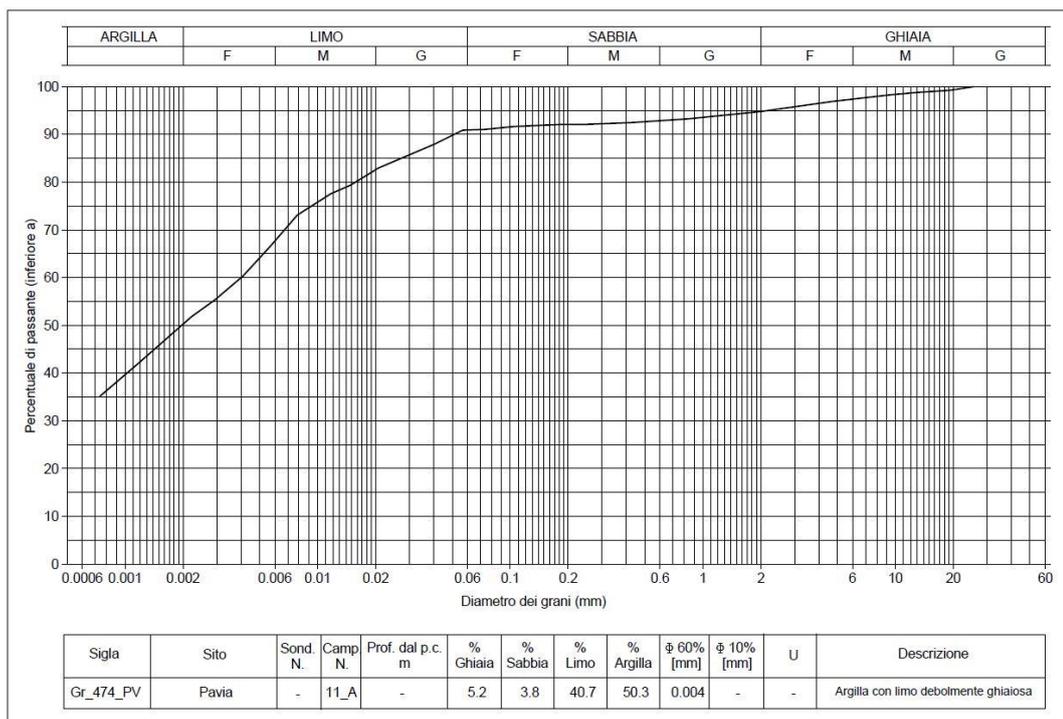


Figura 2.12. Curva granulometrica del campione 2.

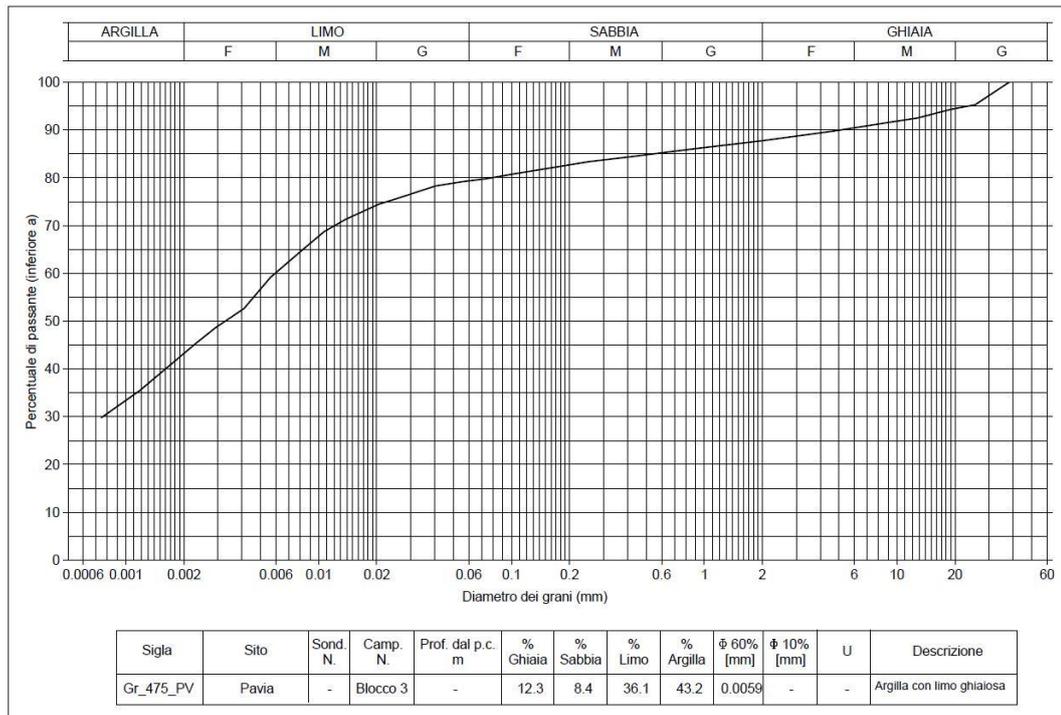


Figura 2.13. Curva granulometrica del campione 3.

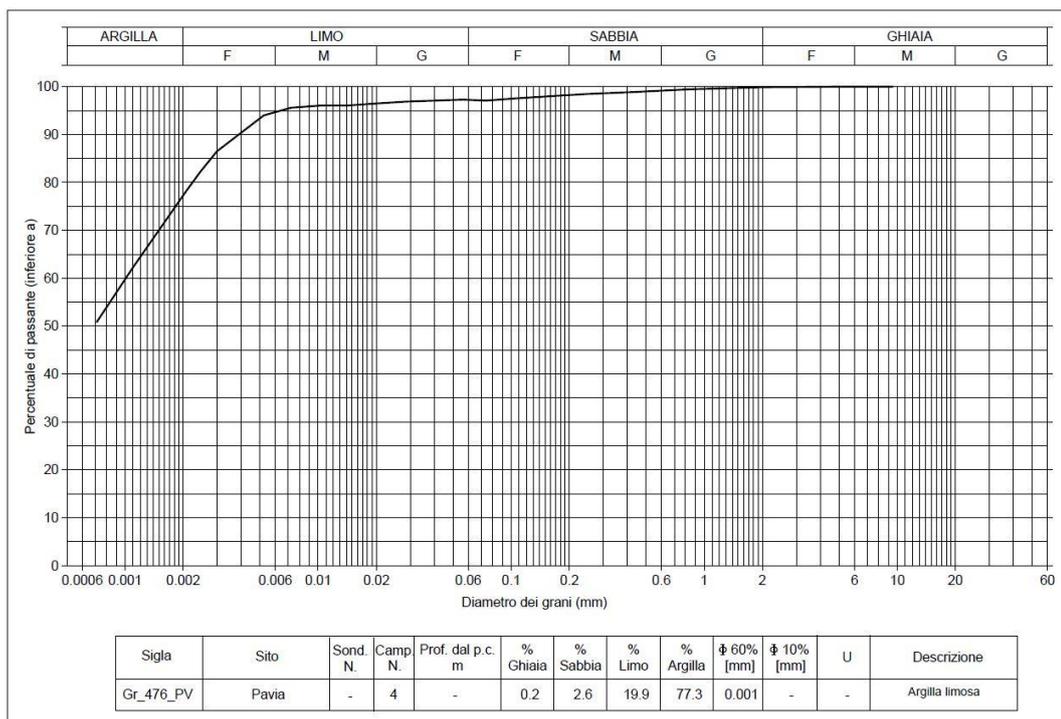


Figura 2.14. Curva granulometrica del campione 4.

In conclusione, per la classificazione dei campioni è stata utilizzata la metodologia dell'AGI (Associazione Geotecnica Italiana), caratterizzata da un sistema per l'identificazione di campioni composti da più frazioni granulometriche. Per l'identificazione di materiali composti da più frazioni granulometriche si segue il criterio: “siano A, B, C i nomi relativi agli intervalli principali (argilla, limo,.....), siano p_1 , p_2 , p_3 le percentuali di A, B, C presenti nel terreno in esame; se $p_1 > p_2 > p_3$ 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%”. Utilizzando questa convenzione è stato possibile attribuire una denominazione a ciascuno dei quattro campioni (Tabella 2.7).

Campione 1	Argilla con limo debolmente sabbiosa
Campione 2	Argilla con limo debolmente ghiaiosa
Campione 3	Argilla con limo ghiaiosa
Campione 4	Argilla limosa

Tabella 2.7. Classificazione dei campioni mediante convenzione AGI (Associazione Geotecnica Italiana).

3. Determinazione della percentuale volumetrica di un Mélange d'Oltrepò Pavese

Per la determinazione della percentuale volumetrica di un Mélange d'Oltrepò Pavese, è stato necessario, una volta prelevato il materiale, effettuare delle analisi sui campioni estratti. Una volta tagliati i campioni, sulla base delle fotografie delle facce del campione è stata effettuata un'analisi sull'autosomiglianza e frattalità del materiale e un confronto tra la percentuale areale e lineare; infine, è stata effettuata una valutazione della profondità di campionamento per ottenere una percentuale lineare dei blocchi costante. In questo capitolo, sulla base delle procedure operative eseguite da Medley (2002), sono state verificate le proprietà di autosomiglianza e indipendenza di scala di un mélange d'Oltrepò Pavese; infine, è stata effettuata una valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi lineare, areale e reale.

3.1. Verifica delle proprietà di autosomiglianza e invarianza di scala

Come già accennato nel primo capitolo, Medley ha stabilito delle linee guida per verificare l'autosomiglianza e la frattalità del Franciscan Mélange, ottenendo alcuni importanti risultati. Andando ad analizzare la frequenza dei blocchi presenti all'interno di un'area e all'interno delle relative sotto-aree di un campione di Mélange d'Oltrepò Pavese, è stato possibile dimostrare che la frequenza relativa delle inclusioni non subisce variazioni per le diverse scale di osservazione. La procedura effettuata da Medley (2002) per la verifica delle proprietà di autosomiglianza e di invarianza di scala, è stata riprodotta attraverso l'uso del software Autocad. Questo software ha consentito di analizzare le immagini dei campioni e di valutare la frequenza relativa delle inclusioni. La prima operazione è stata quella di scalare le immagini, in modo tale da definire le reali dimensioni dei campioni e delle relative inclusioni (Figura 3.1, Figura 3.2).



Figura 3.1. Faccia 1 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese.



Figura 3.2. Faccia 2 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese.

Per la verifica della proprietà di autosomiglianza e di invarianza di scala, è stata effettuata un'analisi dell'intera superficie del campione (100%), andando a rilevare le massime dimensioni di ciascun blocco presente; le inclusioni, in funzione delle loro dimensioni massime, sono state inserite all'interno di sei classi differenti. La stessa analisi è stata eseguita per finestre di osservazione più piccole, facendo riferimento a sotto-aree dell'intera superficie del campione (25%, 6,25%, 1,56%). La lunghezza determinata per ogni inclusione rappresenta la sua massima dimensione osservabile e sulla base di questa misura, è stato possibile inserire il blocco all'interno di una delle sei classi dimensionali.

Queste classi sono determinate in funzione dell'area di riferimento, ovvero la finestra di osservazione.

- Classe 1: $d < 5\% \sqrt{A}/4$
- Classe 2: $5\% \sqrt{A}/4 < d < 5\% \sqrt{A}/2$
- Classe 3: $5\% \sqrt{A}/2 < d < 5\% \sqrt{A}$
- Classe 4: $5\% \sqrt{A} < d < 2 \times 5\% \sqrt{A}$
- Classe 5: $2 \times 5\% \sqrt{A} < d < 4 \times 5\% \sqrt{A}$
- Classe 6: $d > 4 \times 5\% \sqrt{A}$

Nel caso dell'area pari al 100% (Figura 3.3, Figura 3.4), nella prima classe sono state prese in considerazione le inclusioni di dimensione superiore a $5\% \sqrt{A}/8$, perché i blocchi inferiori a questa dimensione potrebbero non essere rilevati perfettamente a causa della risoluzione del fotogramma.

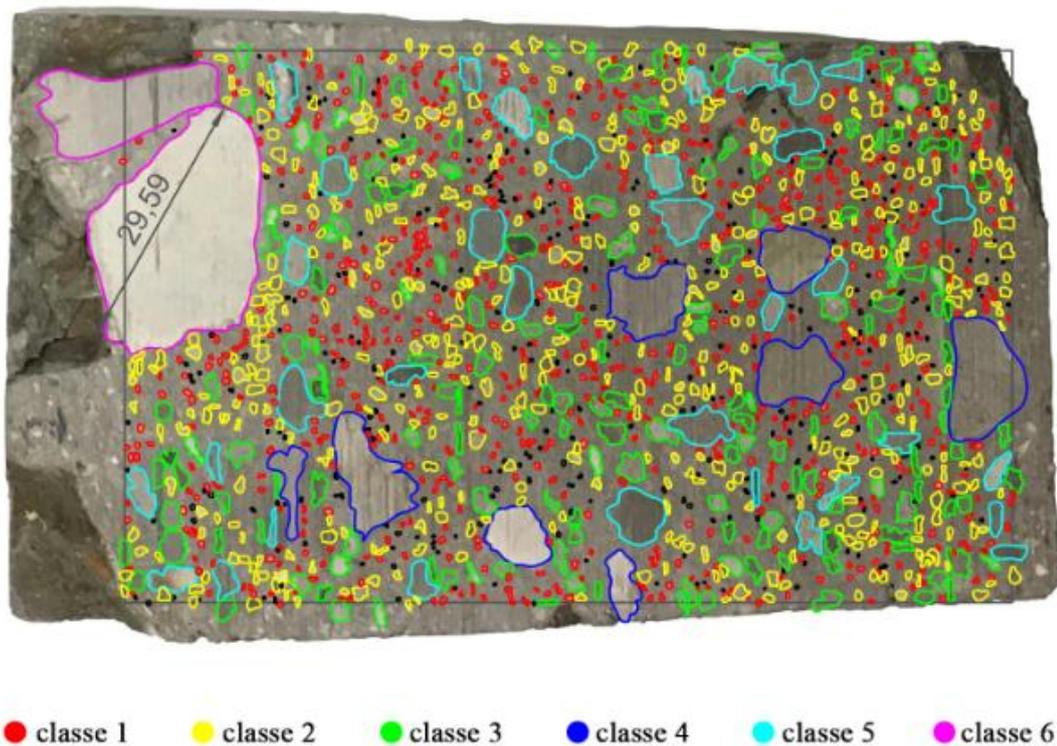


Figura 3.3. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (100%) in funzione della massima dimensione osservabile.

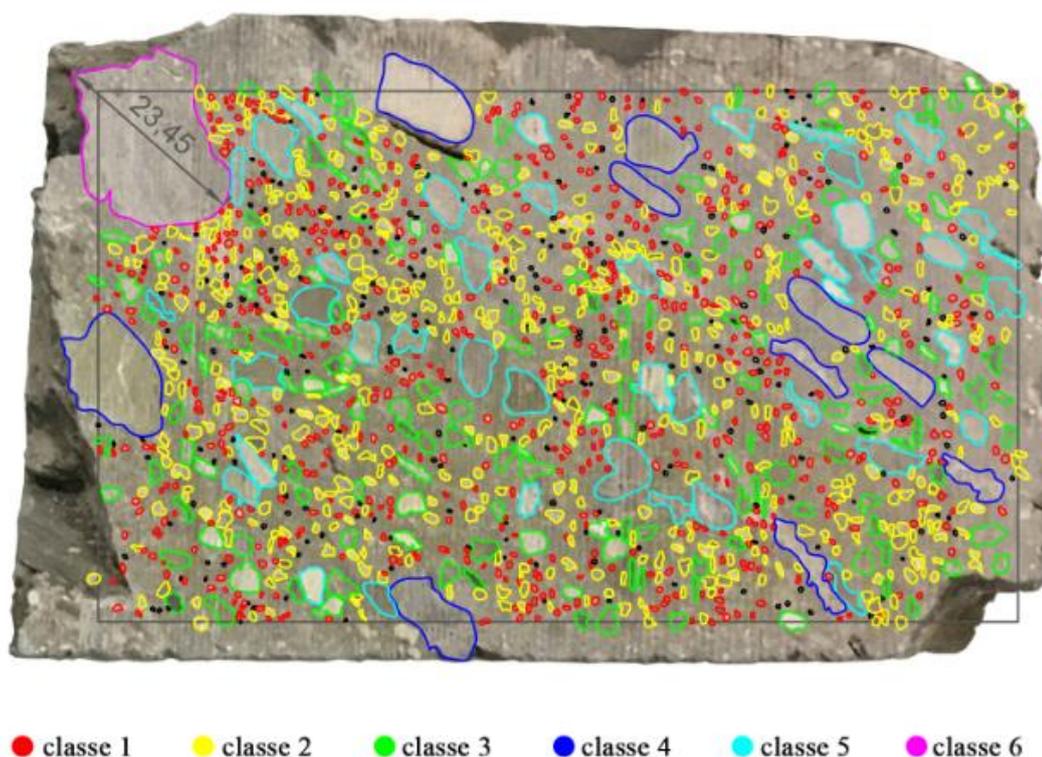


Figura 3.4. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (100%) in funzione della massima dimensione osservabile.

Dopo aver terminato la classificazione, è stato possibile effettuare il calcolo della frequenza assoluta e della frequenza relativa; dove la prima è data dal numero di blocchi individuati per ogni classe, mentre la seconda corrisponde al numero di elementi individuati in ciascuna classe rapportato al numero totale di blocchi presenti all'interno dell'area indagata. Di seguito si riportano i risultati relativi alle due facce per una finestra di osservazione pari al 100% (Tabella 3.1, Tabella 3.2).

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
6365,77	29,59

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,50 - 1,00	721	51,10	0,0125
classe 2	1,00 - 1,99	476	33,73	0,0250
classe 3	1,99 - 3,99	169	11,98	0,0500
classe 4	3,99 - 7,98	35	2,48	0,1000
classe 5	7,98 - 15,96	8	0,57	0,2000
classe 6	> 15,96	2	0,14	0,3709
Tot.		1411		

Tabella 3.1. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A=100%.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
6855,42	23,45

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,52 - 1,03	634	46,28	0,0125
classe 2	1,03 - 2,07	518	37,81	0,0250
classe 3	2,07 - 4,14	164	11,97	0,0500
classe 4	4,14 - 8,28	43	3,14	0,1000
classe 5	8,28 - 16,56	10	0,73	0,2000
classe 6	> 16,56	1	0,07	0,2832
	Tot.	1370		

Tabella 3.2. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A=100%.

Analogamente, sono state effettuate le analisi per le altre finestre di osservazione. Di seguito si riportano i risultati relativi alle due facce per finestre di osservazione pari a 25%, 6,25% e 1,56%.

A_i = 25%A

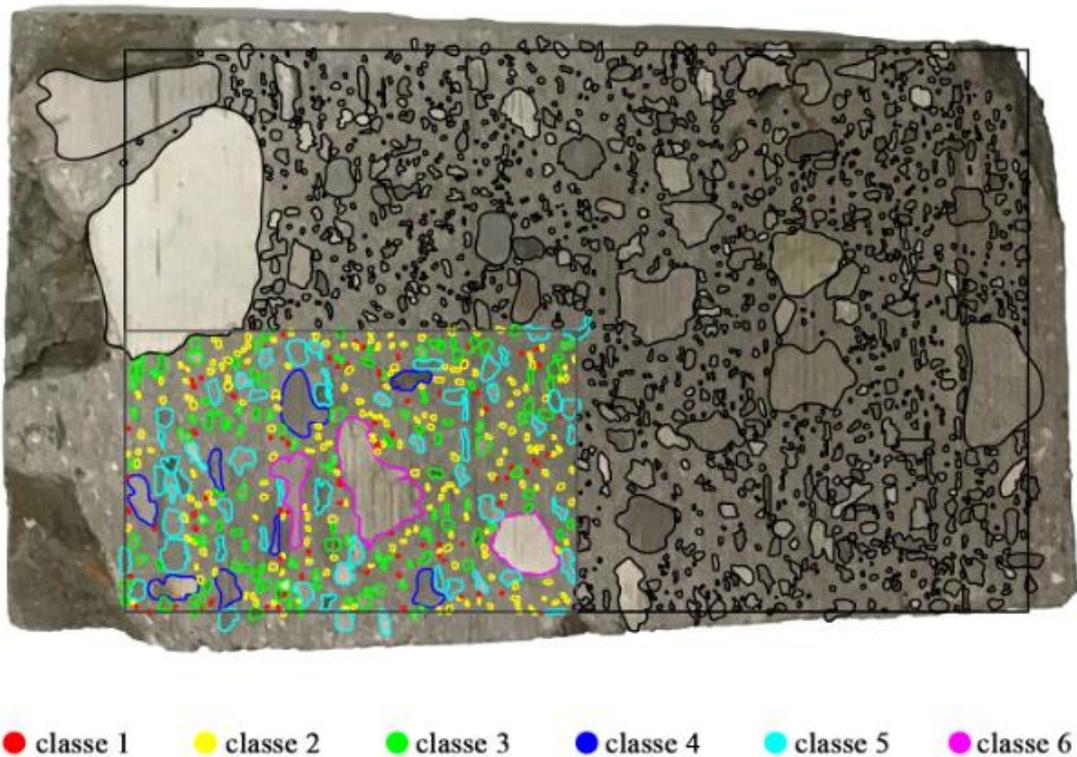
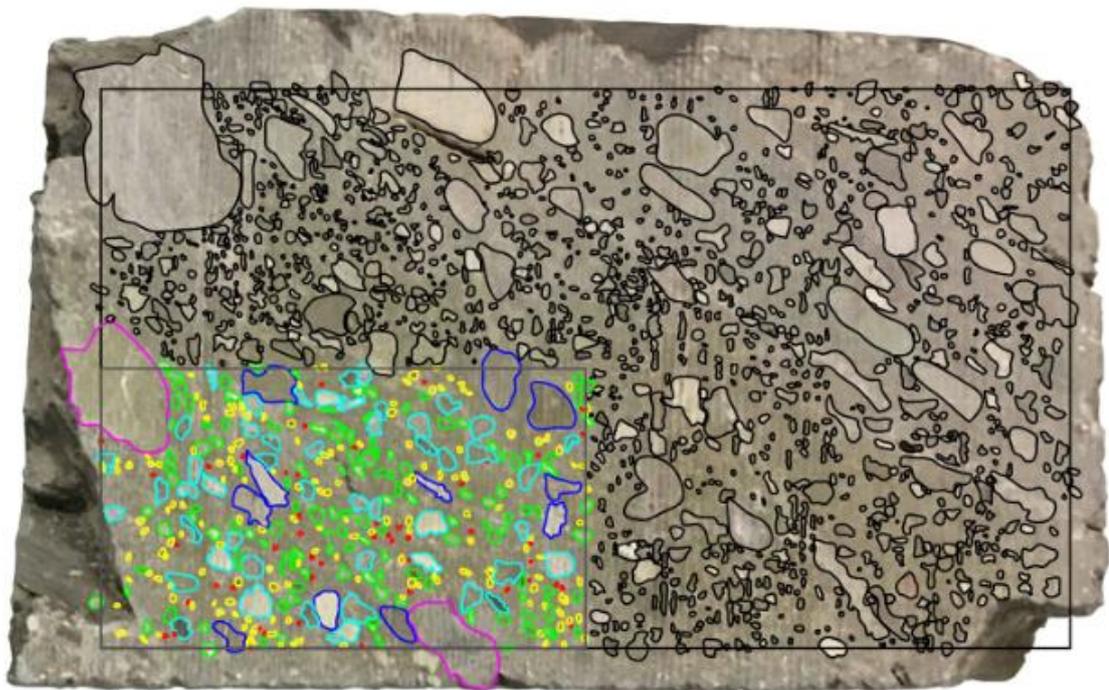


Figura 3.5. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (25%) in funzione della massima dimensione osservabile.



● classe 1 ● classe 2 ● classe 3 ● classe 4 ● classe 5 ● classe 6

Figura 3.6. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (25%) in funzione della massima dimensione osservabile.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
1591,44	14,60

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,50	80	17,35	0,0125
classe 2	0,50 - 1,00	192	41,65	0,0250
classe 3	1,00 - 1,99	122	26,46	0,0500
classe 4	1,99 - 3,99	56	12,15	0,1000
classe 5	3,99 - 7,98	8	1,74	0,2000
classe 6	> 7,98	3	0,65	0,3660
	Tot.	461		

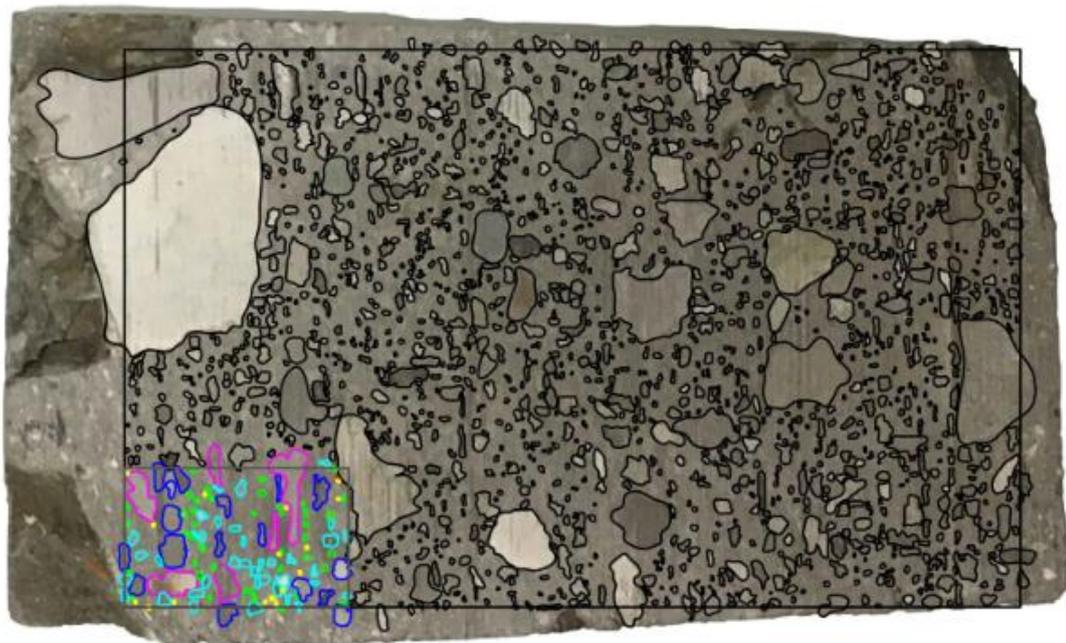
Tabella 3.3. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A=25%.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
1713,86	15,52

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,52	49	12,16	0,0125
classe 2	0,52 - 1,03	161	39,95	0,0250
classe 3	1,03 - 2,07	132	32,75	0,0500
classe 4	2,07 - 4,14	48	11,91	0,1000
classe 5	4,14 - 8,28	11	2,73	0,2000
classe 6	> 8,28	2	0,50	0,3749
	Tot.	403		

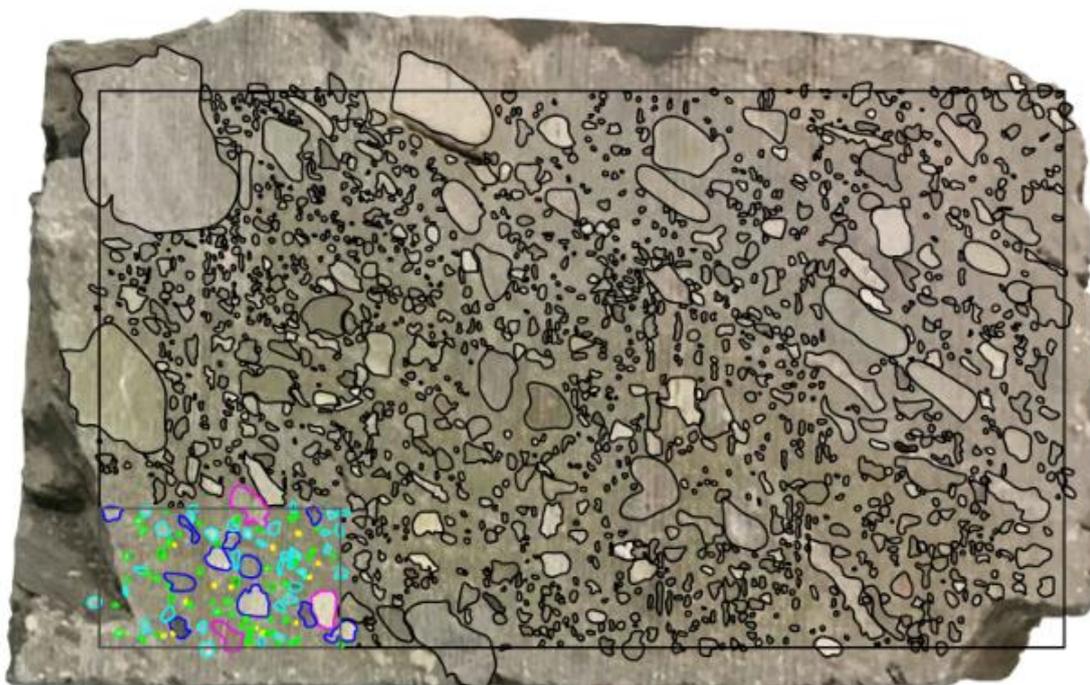
Tabella 3.4. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A=25%.

A_i= 6,25%A



● classe 1 ● classe 2 ● classe 3 ● classe 4 ● classe 5 ● classe 6

Figura 3.7. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (6,25%) in funzione della massima dimensione osservabile.



● classe 1 ● classe 2 ● classe 3 ● classe 4 ● classe 5 ● classe 6

Figura 3.8. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (6,25%) in funzione della massima dimensione osservabile.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
397,86	10,50

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,250	2	1,64	0,0125
classe 2	0,25 - 0,50	17	13,93	0,0250
classe 3	0,50 - 1,00	42	34,43	0,0500
classe 4	1,00 - 1,99	38	31,15	0,1000
classe 5	1,99 - 3,99	17	13,93	0,2000
classe 6	> 3,99	6	4,92	0,5264
	Tot.	122		

Tabella 3.5. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A= 6,25%.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
428,46	5,52

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,26	0	0,00	0,0125
classe 2	0,26 - 0,52	15	13,04	0,0250
classe 3	0,52 - 1,03	52	45,22	0,0500
classe 4	1,03 - 2,07	34	29,57	0,1000
classe 5	2,07 - 4,14	11	9,57	0,2000
classe 6	> 4,14	3	2,61	0,2667
	Tot.	115		

Tabella 3.6. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A= 6,25%.

A_i = 1,56%A



● classe 1 ● classe 2 ● classe 3 ● classe 4 ● classe 5 ● classe 6

Figura 3.9. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (1,56%) in funzione della massima dimensione osservabile.



● classe 1 ● classe 2 ● classe 3 ● classe 4 ● classe 5 ● classe 6

Figura 3.10. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (1,56%) in funzione della massima dimensione osservabile.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
99,47	5,60

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,12	0	0,00	0,0125
classe 2	0,12 - 0,25	1	3,23	0,0250
classe 3	0,25 - 0,50	3	9,68	0,0500
classe 4	0,50 - 1,00	9	29,03	0,1000
classe 5	1,00 - 1,99	11	35,48	0,2000
classe 6	> 1,99	7	5,74	0,5615
	Tot.	31		

Tabella 3.7. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A= 1,56%.

Area [mm ²]	d _{mod} [mm]
107,12	3,52

		Numero	Freq. Relativa [%]	d _{mod} /√A
classe 1	0,00 - 0,13	0	0,00	0,0125
classe 2	0,13 - 0,26	0	0,00	0,0250
classe 3	0,26 - 0,52	6	26,09	0,0500
classe 4	0,52 - 1,03	9	39,13	0,1000
classe 5	1,03 - 2,07	6	26,09	0,2000
classe 6	> 2,07	2	8,70	0,3401
	Tot.	23		

Tabella 3.8. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A= 1,56%.

Andando ad inserire i risultati ottenuti all'interno un grafico, che presenta sull'asse delle ascisse il rapporto d_{mod}/\sqrt{A} e sull'asse delle ordinate la frequenza relativa, è stato possibile dimostrare la proprietà di autosomiglianza (Figura 3.11, Figura 3.12).

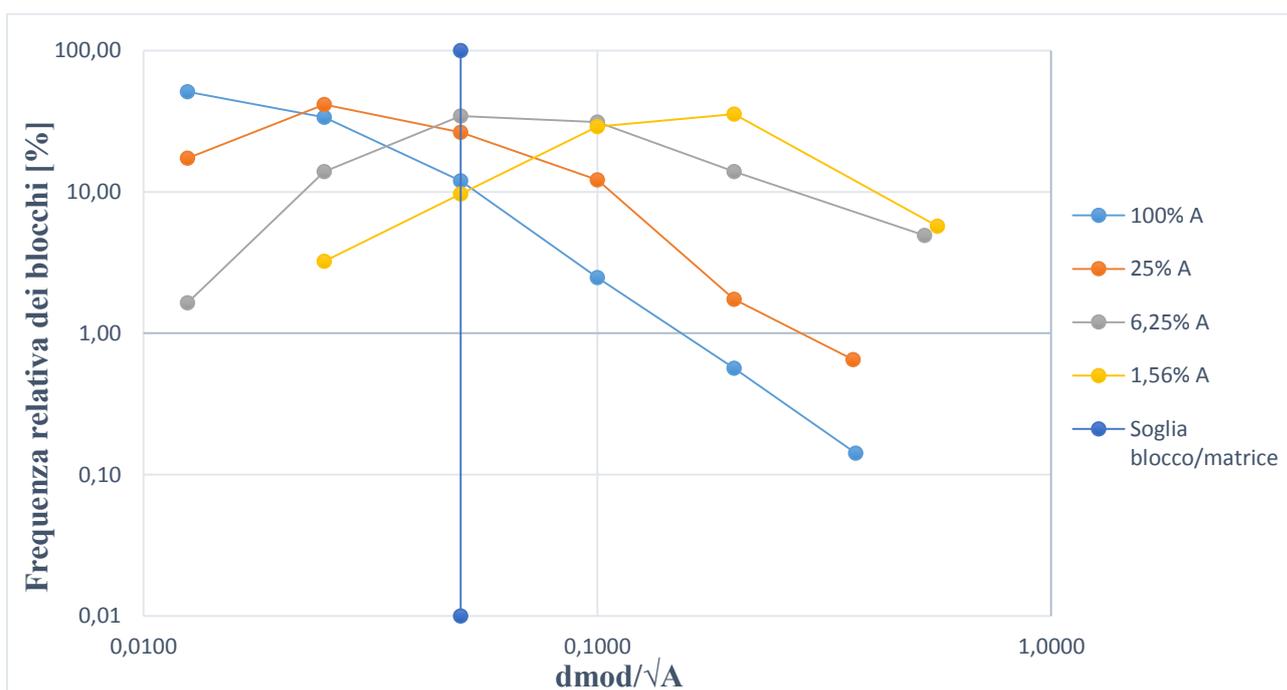


Figura 3.11. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 1.

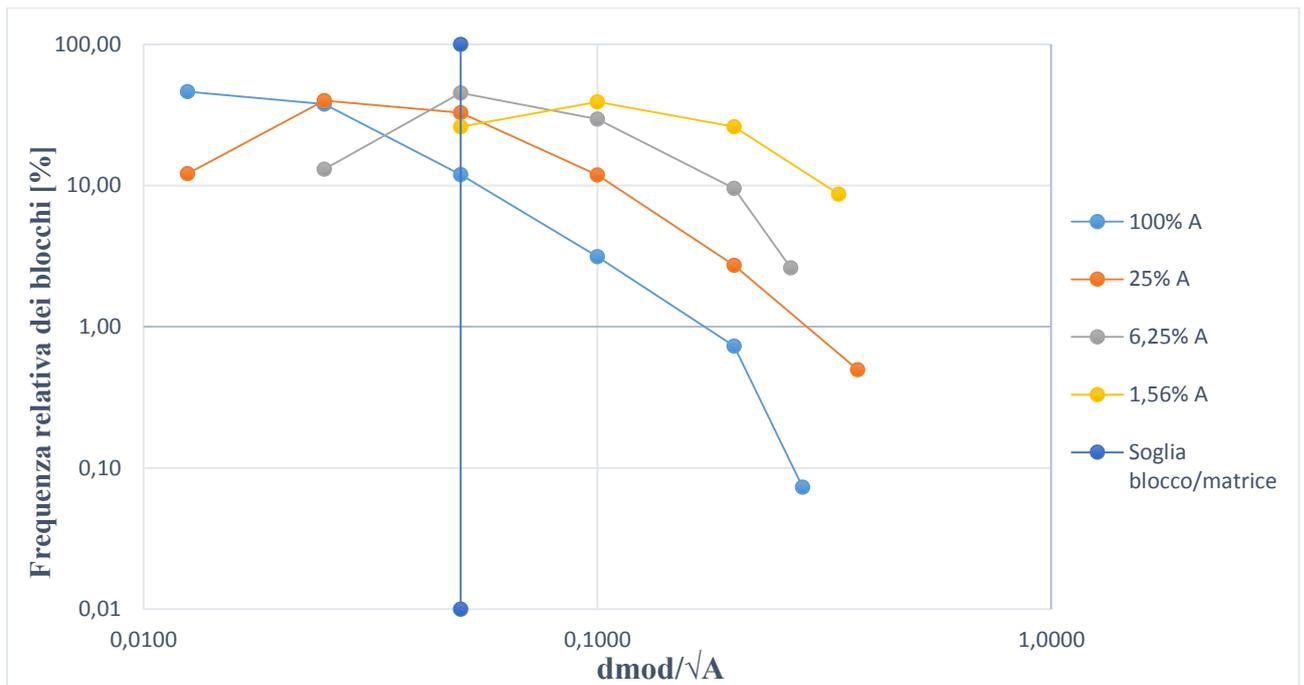


Figura 3.12. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 2.

In entrambi i grafici, nelle varie scale di osservazione, è possibile osservare la somiglianza tra gli andamenti della frequenza relativa. Per ogni area indagata si osserva un gran numero di blocchi appartenenti alle classi 2,3 e 4 nel caso di area di indagine pari a 100%; si può osservare anche che un gran numero di inclusioni rientra nella prima classe e che l'andamento della frequenza relativa è decrescente essendo presenti in un numero esiguo le inclusioni di grande dimensione. Nel caso di finestra di osservazione pari a 1,56% è risultato abbastanza difficile per entrambe le facce trovare blocchi che rientrassero nelle classi 1 e 2, sicuramente a causa di una non sufficiente risoluzione della fotografia. Per avere una visione generale dell'andamento della frequenza relativa, è stato possibile inserire i risultati di entrambe le facce in un unico grafico (Figura 3.13).

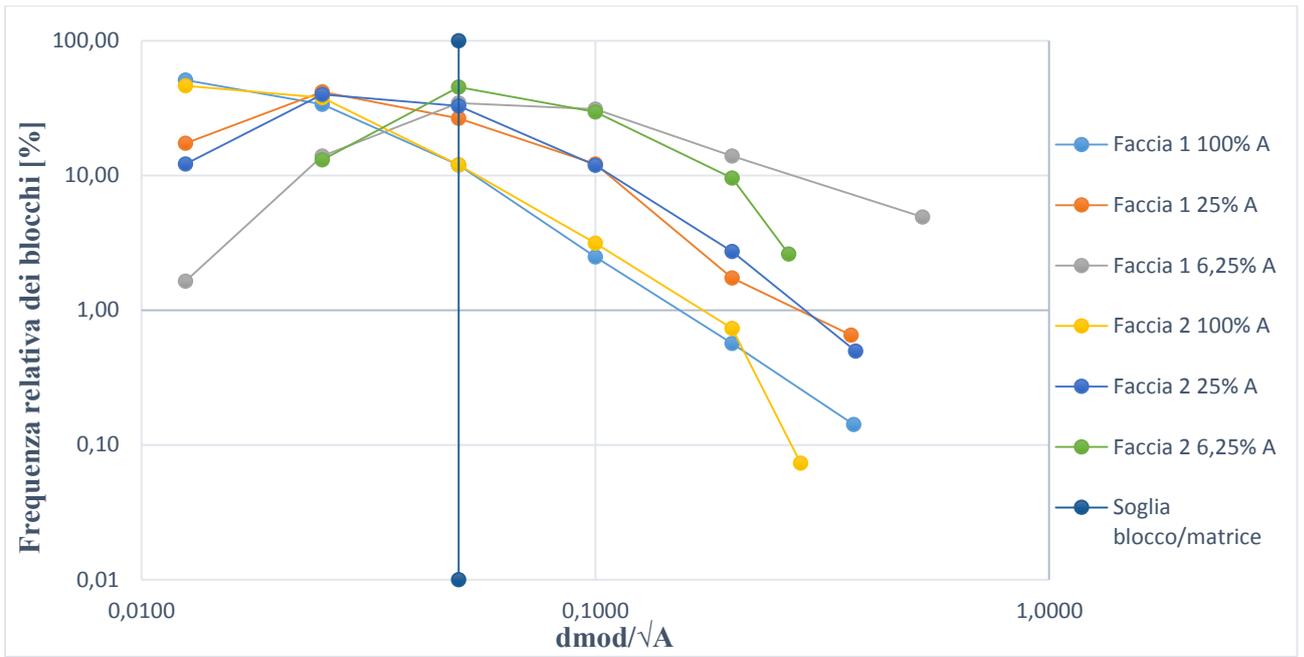


Figura 3.13. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 1 e Faccia 2.

3.2. Determinazione della percentuale volumetrica dei blocchi

Medley, come descritto nel primo capitolo, ha effettuato una valutazione della percentuale lineare delle inclusioni andando a simulare una campagna di sondaggi su campioni artificiali, con percentuale volumetrica nota. Lo stesso autore ha analizzato quaranta immagini, andando ad esaminare le fotografie di dieci porzioni di ciascuno dei quattro campioni; su ogni immagine sono state tracciate dieci linee di scansione con lo scopo di simulare dei fori di sondaggio. Attraverso l'utilizzo dell'approccio statistico di Montecarlo ha realizzato moltissime simulazioni andando a considerare in maniera casuale le linee di scansione; i risultati ottenuti sono stati rappresentati attraverso il grafico in Figura 3.14.

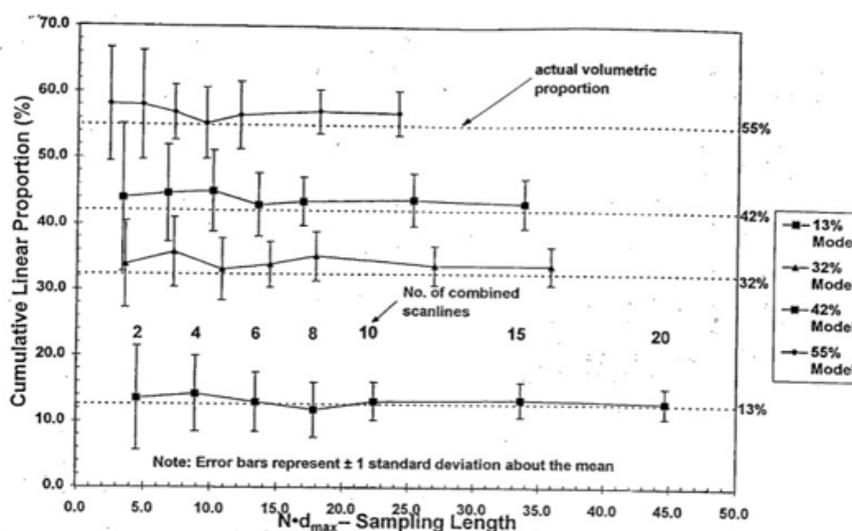


Figura 3.14. Andamento della percentuale lineare cumulata al variare della lunghezza di campionamento $N*d_{max}$ (Medley, 1997).

I risultati sono stati stimati in termini di percentuale lineare cumulata, ovvero il rapporto in percentuale tra la somma di tutte le lunghezze dei blocchi intercettati dalla linea di scansione e la lunghezza totale della linea di scansione stessa, disposta sull'asse delle ordinate; sull'asse delle ascisse, invece, è presente la misura della lunghezza di campionamento ($N*d_{max}$), multiplo della dimensione massima osservabile. Medley ha notato che per valori crescenti di $N*d_{max}$, i corrispettivi valori medi di percentuale cumulata si stabilizzavano mantenendosi costanti; inoltre, ha appurato che per una determinata profondità di campionamento (10 d_{max}) il valore noto di percentuale volumetrica risultava circa uguale a quello di percentuale lineare. In questo elaborato di tesi è stata adottata la medesima procedura, compiendo però un numero inferiore di simulazioni casuali. Sulla base delle immagini adoperate per la verifica delle proprietà di autosomiglianza, con l'aiuto del software Autocad, sono state tracciate venticinque linee di

scansione, andando a considerare esclusivamente le corde intercettate dalle inclusioni di dimensioni superiori alla soglia blocco/matrice e inferiori a $0.75\sqrt{A}$ (Figura 3.15, Figura 3.16).

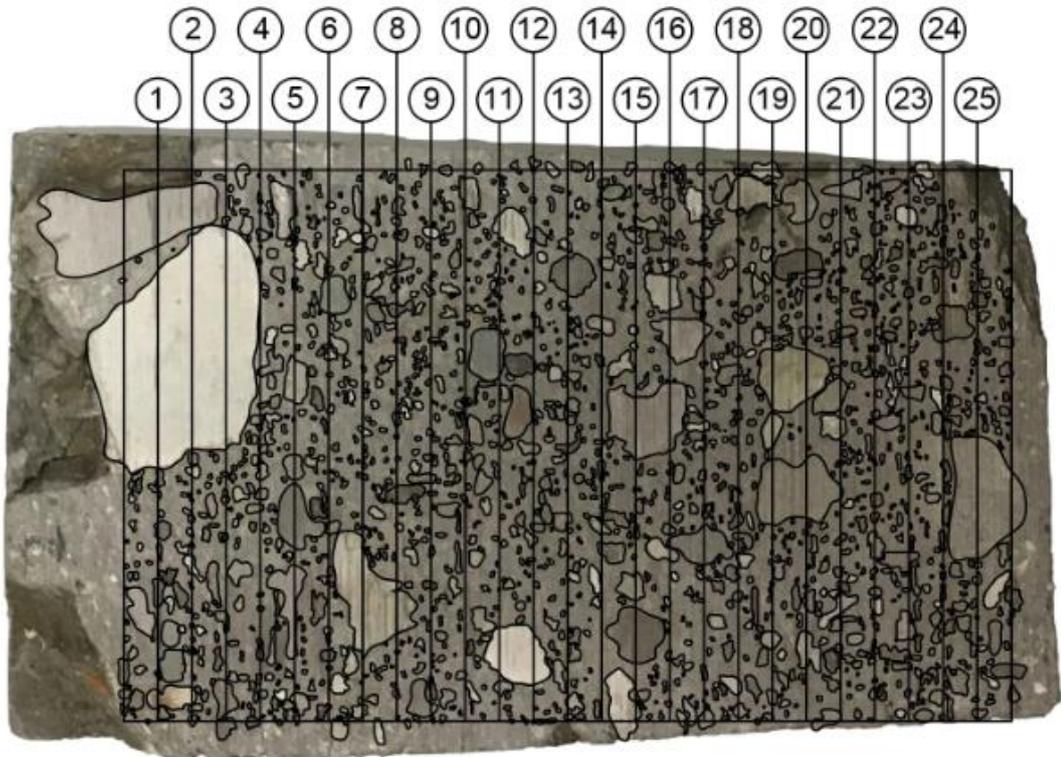


Figura 3.15. Rappresentazione delle linee di scansione (Faccia 1).

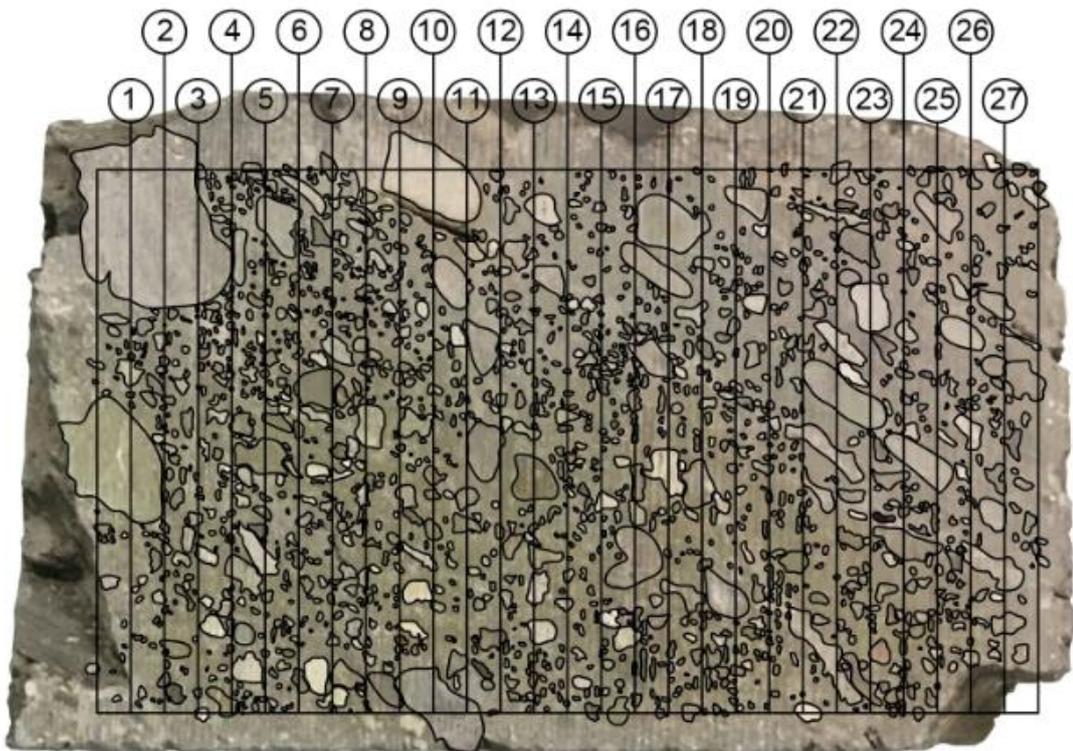


Figura 3.16. Rappresentazione delle linee di scansione (Faccia 2).

La prima operazione è stata quella di valutare la percentuale areale di ogni faccia, andando a dividere la somma delle aree delle inclusioni, di dimensioni comprese all'interno dell'intervallo precedentemente definito, per l'area totale dell'immagine. Queste percentuali sono risultate molto simili e pari a 16,15% e 16,04% rispettivamente per la faccia 1 e 2. L'operazione successiva è stata quella di calcolare la percentuale volumetrica lineare cumulata sulla base della procedura adottata da Medley. Sono stati ipotizzati circa venti scenari differenti di posizione dei sondaggi in modo casuale e i risultati ottenuti sono stati rappresentati in funzione della lunghezza di campionamento. Per ogni serie casuale sull'asse delle ordinate è riportato il valore della percentuale lineare cumulata che è stata valutata nel modo seguente:

- Si ottiene la somma delle corde intersecate dalla prima linea di scansione considerata ($Lc1$) e si divide per la lunghezza della scanline $Ls1 \rightarrow Lc1/Ls1$.
- Si ottiene la somma delle corde intersecate dalla seconda linea di scansione considerata ($Lc2$) e la si somma a $Lc1$, questo risultato viene diviso per la somma della lunghezza delle due scanlines $\rightarrow (Lc1+Lc2) / (Ls1+Ls2)$.
- Si procede allo stesso modo fino alla venticinquesima scanline per ogni serie casuale.

Sull'asse delle ascisse è stata riportata la lunghezza di campionamento, definita per la prima linea di scansione come rapporto tra la lunghezza della prima scanline e d_{max} ($Ls1/d_{max}$). Nel caso di esecuzione di due sondaggi la lunghezza di campionamento è data dal rapporto $(Ls1+Ls2) / d_{max}$, quindi come somma delle linee di scansione considerate rapportata alla dimensione massima osservabile; si procede quindi allo stesso modo fino al venticinquesimo sondaggio. I risultati ottenuti sono stati rappresentati attraverso i grafici in Figura 3.17, 3.18, 3.19, 3.20.

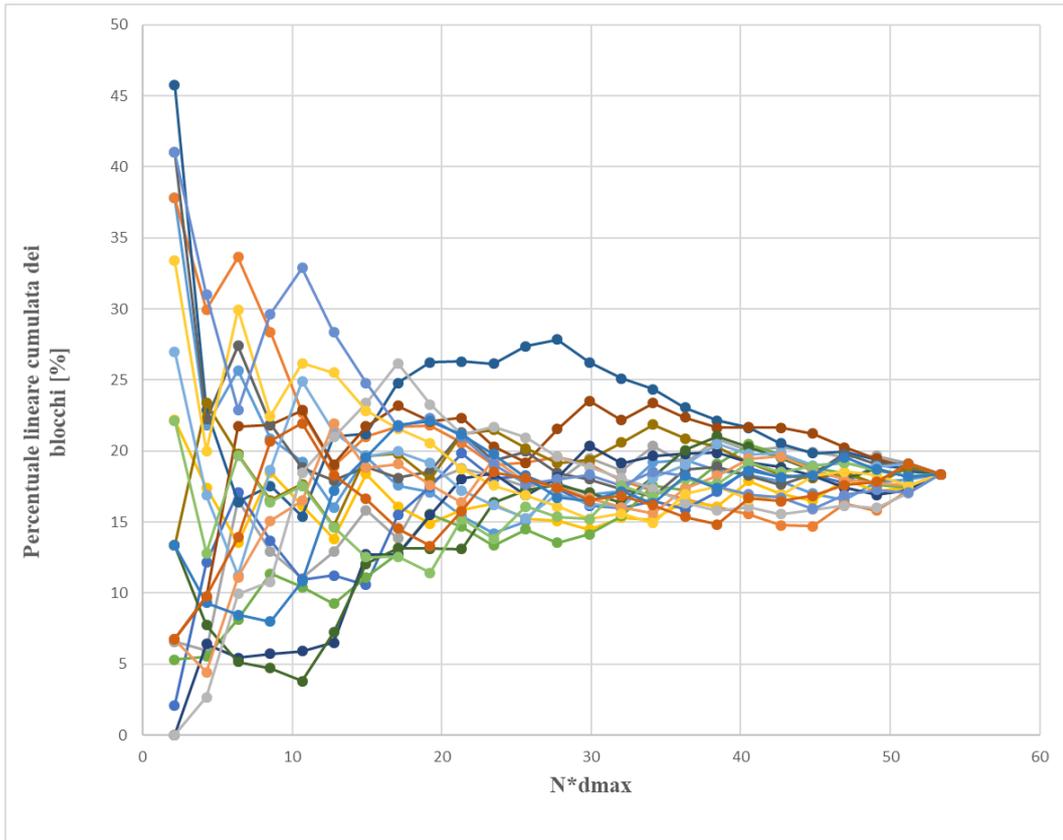


Figura 3.17. Percentuale lineare cumulata in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 1).

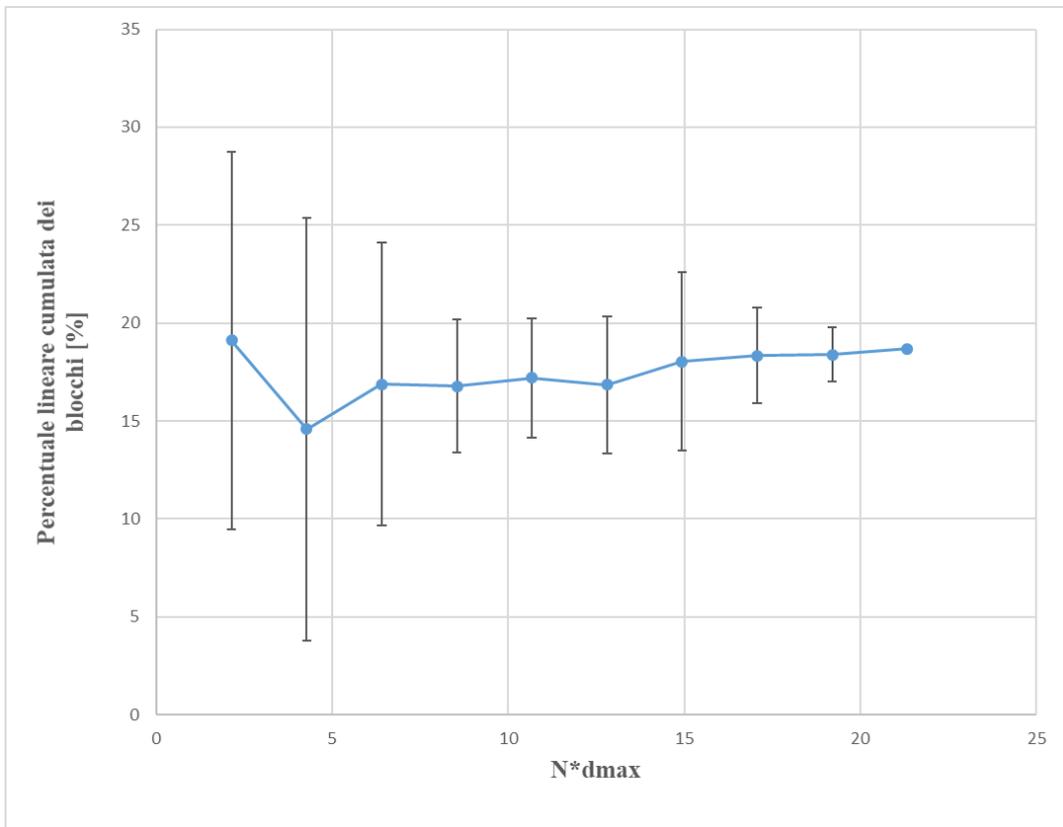


Figura 3.18. Percentuale lineare cumulata media in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 1).

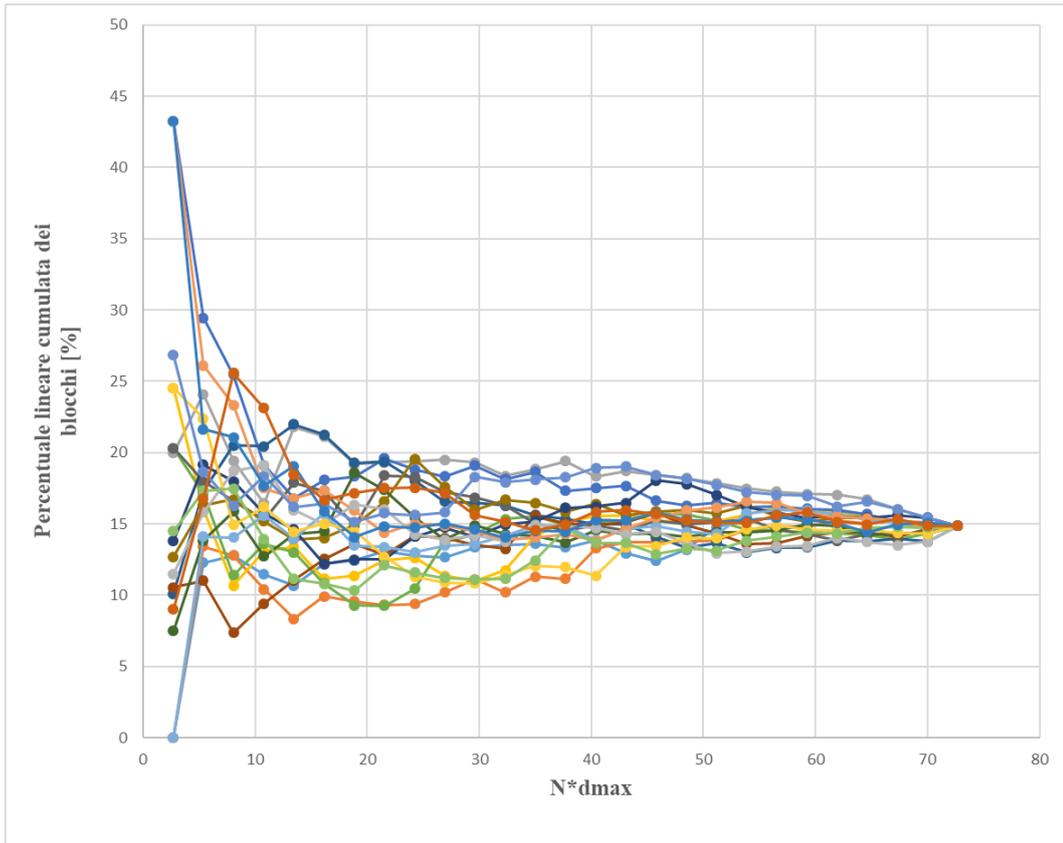


Figura 3.19. Percentuale lineare cumulata in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 2).

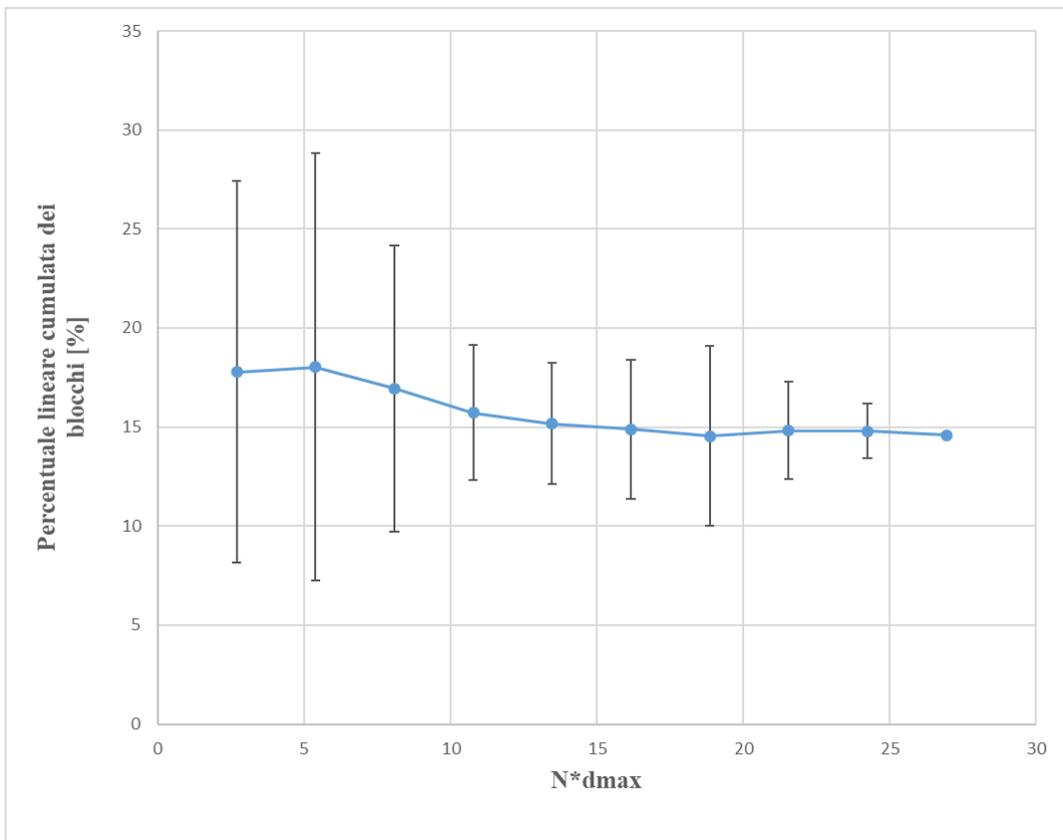


Figura 3.20. Percentuale lineare cumulata media in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 2).

Dai grafici ottenuti, è possibile osservare che gli andamenti della percentuale volumetrica cumulata si stabilizzano in corrispondenza di $20 \cdot d_{\max}$ per la faccia 1 e di circa $25 \cdot d_{\max}$ per la faccia 2 e per dei valori di percentuali lineari del 18 % e del 15%. Si può osservare quindi, per entrambe le facce, una certa corrispondenza tra il risultato di percentuale areale e quello di percentuale lineare. L'ultima operazione è stata quella di determinare la percentuale volumetrica reale del campione, per poi effettuare un confronto con quella areale e quella lineare.

Per la determinazione della percentuale volumetrica reale è stato utilizzato lo stesso campione di Mélange d'Oltrepò Pavese adoperato per le precedenti valutazioni. Essendo il campione molto irregolare, il volume è stato ricavato immergendolo in un contenitore graduato, riempito parzialmente d'acqua, misurando così la variazione di volume. Successivamente, il campione è stato lasciato in ammollo in modo da ammorbidire la matrice argillosa permettendo così la separazione tra matrice e blocchi attraverso setacciatura. La setacciatura, effettuata con setacci ASTM 10 e ASTM 1,5, è stata necessaria per prendere in considerazione esclusivamente le inclusioni di dimensioni superiori alla soglia blocco/matrice e inferiori a $0.75\sqrt{A}$, dove A è la dimensione caratteristica del campione. Una volta ottenuti i blocchi, è stato possibile ricavare il volume degli stessi, immergendoli in un contenitore graduato, riempito parzialmente d'acqua, misurando la variazione di volume. Dal rapporto tra il volume dei blocchi e il volume totale del campione, è stata ricavata la percentuale volumetrica reale, pari a circa 7%. Nonostante alcuni possibili errori nella valutazione del volume e nella setacciatura, questo valore può essere considerato abbastanza corretto, ipotizzando una sovrastima della percentuale volumetrica dei blocchi areale e lineare.

4. Prova di compressione monoassiale

Per studiare il reale comportamento deformativo del materiale è fondamentale effettuare una prova di compressione triassiale, dove ad un campione cilindrico di dimensioni prestabilite, sottoposto ad un confinamento laterale costante, viene applicato uno sforzo assiale crescente fino a rottura. Nel caso del Mélange d'Oltrepò Pavese, la prova di compressione triassiale non può essere eseguita perché, non essendo campionabile il materiale, non è possibile ottenere campioni cilindrici di dimensioni prestabilite per la prova. Il Mélange d'Oltrepò Pavese, come descritto ampiamente nei capitoli precedenti, può essere visto come un materiale roccioso caratterizzato da una certa resistenza, ma nella realtà, sotto sforzo, è facilmente sgretolabile e soprattutto non resistente all'acqua. A causa di queste peculiarità del materiale, l'estrazione dei campioni con le tecniche più classiche, come carotaggi o seghe ad acqua e/o solventi, è impedita. Per il campionamento del Mélange d'Oltrepò Pavese, infatti, è stata adoperata una sega a nastro con lama diamantata a taglio a secco, in modo tale da ottenere un taglio il più omogeneo possibile che non sia influenzato dal passaggio in un materiale tenero, come la matrice argillosa, e dal passaggio attraverso i blocchi che presentano elevata rigidità. Nonostante alcune difficoltà durante la fase di taglio, dovute alla fratturazione e allo sgretolamento del materiale, è stato possibile ottenere dei campioni parallelepipedi abbastanza regolari, anche se di dimensioni differenti. Una volta ottenuti i campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese, per lo studio del comportamento deformativo del materiale e quindi per la determinazione del modulo di deformazione, si è deciso di sottoporre i campioni ad una prova di compressione monoassiale. Sebbene questa prova sia meno limitativa dal punto di vista geometrico, i risultati forniti non descrivono il reale comportamento deformativo del materiale. Durante la prova di compressione monoassiale, vengono applicati, sulle facce dei campioni, degli estensimetri elettrici sia in direzione verticale che orizzontale per la determinazione delle deformazioni. L'elevata fragilità e la non resistenza ai fluidi del materiale non ha consentito l'applicazione degli estensimetri perché avrebbero potuto rovinare i campioni ancor prima dell'inizio della prova. Per la stima delle deformazioni è stato usato un trasduttore esterno (LVDT, linear variable differential transformer) che, attraverso una centralina di acquisizione dati, ha consentito la valutazione dello spostamento della piastra di carico in funzione del corrispondente valore di carico assiale, fornito dalla cella di carico; noto lo spostamento della piastra e nota l'altezza iniziale del campione è stato possibile ottenere una prima stima della deformazione assiale nel tempo. I valori di deformazione assiale ottenuti, anche se validi per la

valutazione del comportamento del materiale analizzato, non sono realistici in quanto, oltre alla distorsione assiale del campione, contengono anche le deformazioni della piastra; la deformabilità della piastra, infatti, essendo differente da quella del materiale, provoca la formazione di tensioni tangenziali. Oltre alla classica apparecchiatura per la prova di compressione monoassiale, è stato associato un aggiuntivo sistema di monitoraggio per la valutazione delle deformazioni locali, ovvero la correlazione digitale di immagini (Digital Image Correlation DIC). Questa tecnica ottica consente di stimare lo stato deformativo di un'intera superficie attraverso la correlazione di immagini. Attraverso l'utilizzo di un cronometro e di un trigger, collocati vicino al campione, in modo tale da essere ripresi dalle foto, e azionati ad inizio prova, è stato possibile associare il valore di carico assiale ad ogni fotogramma.

4.1. Descrizione della tecnica DIC (Digital Image Correlation)

La tecnica di correlazione digitale di immagini è fondata sul confronto di fotogrammi digitali, acquisiti attraverso delle fotocamere, per ottenere le mappature, bidimensionali e tridimensionali, di spostamenti e deformazioni dell'elemento analizzato. Dopo aver ottenuto i campioni e, per ciascuno di essi, scelto le due facce da analizzare, è stato tracciato, sulla superficie di ogni faccia, un pattern di punti, nel modo più casuale possibile (Figura 4.1).



Figura 4.1. Pattern di punti realizzato su un campione di mélange per l'analisi con la tecnica DIC (Digital Image Correlation).

Attraverso l'utilizzo di questo pattern di punti, che realizza una specie di mappatura della superficie, è stato possibile riconoscere ogni pixel in tutti i fotogrammi.

L'operazione successiva, dopo aver posizionato le due fotocamere davanti al campione da analizzare, è stata quella di stabilire uno specifico intervallo di scatto; l'intervallo di scatto è stato scelto di cinque secondi, in quanto questo doveva essere sufficientemente ridotto per individuare gli spostamenti durante la prova, ma sufficientemente ampio da consentire la memorizzazione dei fotogrammi. Una volta noti i parametri intrinseci delle fotocamere, la loro distanza relativa e il loro orientamento rispetto alla superficie analizzata, possono essere valutate le coordinate di qualsiasi punto della superficie stessa. Dopo aver eseguito la prova di compressione monoassiale, le coppie di fotogrammi registrate dalle due fotocamere, prima e durante la deformazione del campione analizzato, sono state confrontate pixel su pixel, attraverso un algoritmo di correlazione; per questa operazione è stato utilizzato un software chiamato DICe (Digital Image Correlation engine). Questo software, dopo aver fornito come dati di input il fotogramma iniziale di riferimento, i fotogrammi successivi e impostato alcuni parametri relativi ai pixel (sssig threshold, subset size, step size e gauge size), è stato in grado di valutare l'intero campo degli spostamenti dalla sequenza di fotogrammi digitali (Figura 4.2); in funzione del campo degli spostamenti, noto attraverso la corrispondenza dei punti dei fotogrammi, è stato possibile ottenere il campo di deformazione al variare del carico assiale.

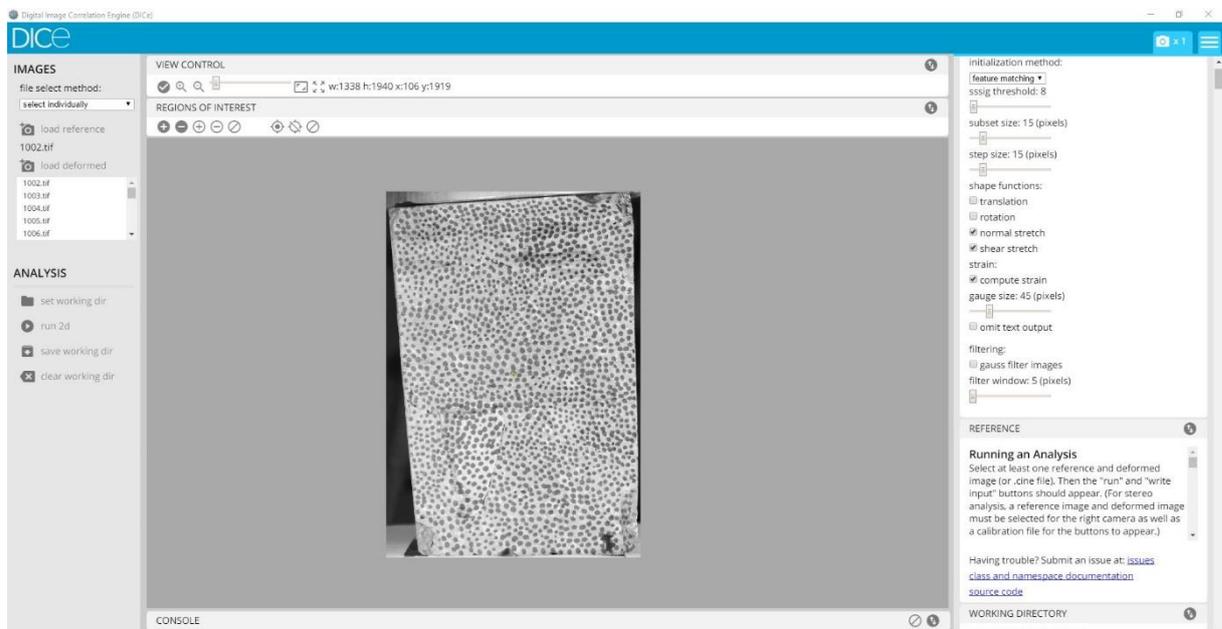


Figura 4.2. Software DICe (Digital Image Correlation engine) per la correlazione digitale di immagini.

La precisione della tecnica di correlazione digitale di immagini dipende da molti fattori come gli algoritmi di interpolazione, la distorsione delle lenti, l'uniformità della distribuzione della

luce e la qualità del pattern di punti; mentre i primi due dipendono dalla strumentazione utilizzata, la luminosità e la qualità del pattern sono parametri che possono essere controllati.

Per avere delle foto sufficientemente nitide e luminose, è stata necessaria l'introduzione di luce artificiale, proveniente da delle lampadine, e la modifica di alcuni parametri delle fotocamere, per avere una corretta esposizione (Figura 4.3).

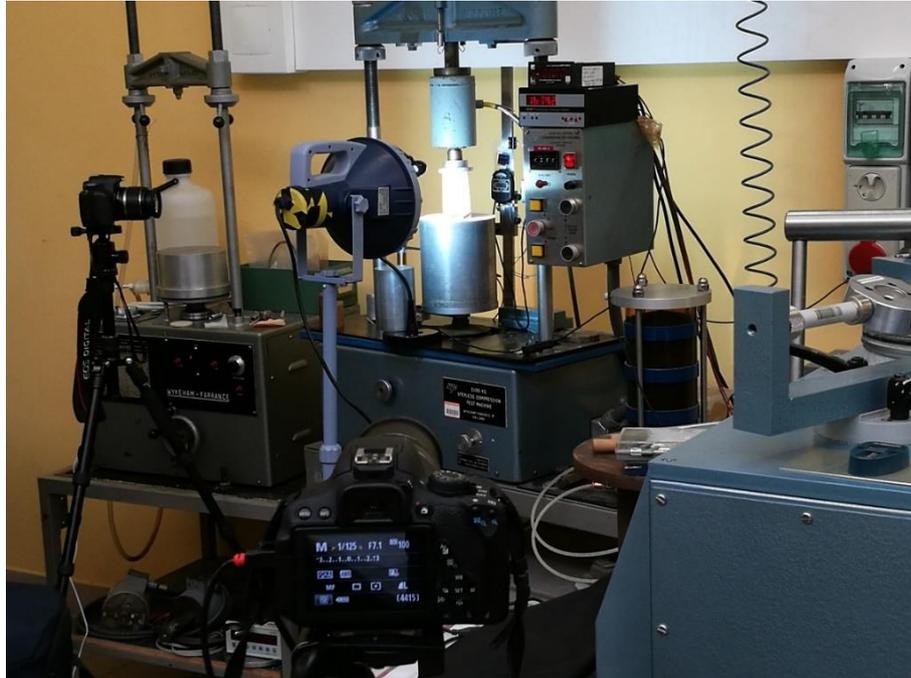


Figura 4.3. Strumentazione per la prova di compressione monoassiale con la tecnica DIC (Digital Image Correlation).

4.2. Descrizione dei campioni utilizzati per la prova di compressione monoassiale

Per la prova di compressione monoassiale, sono stati adoperati cinque campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese più un campione di boiaccia cementizia (rapporto acqua/cemento di 0,4, 160x40x40 mm), di caratteristiche note e utilizzato per la validazione della tecnica di correlazione digitale di immagini (DIC). Per ognuno dei sei campioni, sono state misurate le dimensioni geometriche medie ed è stato tracciato il pattern di punti casuale su ciascuna delle due facce da analizzare.

Campione A

Campione costituito da matrice grigiastra con blocchi di colore bianco e grigio scuro (Figura 4.4).



Altezza media [mm]	92,6
Superficie media di compressione [mm ²]	3331,9

Figura 4.4. Dimensioni medie delle due facce del campione A.

Campione 3

Campione costituito da matrice grigiastra con blocchi di colore bianco e grigio scuro (Figura 4.5).



Altezza media [mm]	87,4
Superficie media di compressione [mm ²]	2378,12

Figura 4.5. Dimensioni medie delle due facce del campione 3.

Campione 9

Campione costituito in prevalenza da matrice di colore rossastro con striature lungo la direzione di compressione (Figura 4.6).



Altezza media [mm]	53,6
Superficie media di compressione [mm ²]	1385,75

Figura 4.6. Dimensioni medie delle due facce del campione 3.

Campione 4G

Campione costituito in prevalenza da matrice di colore grigio con striature lungo la direzione di compressione (Figura 4.7).

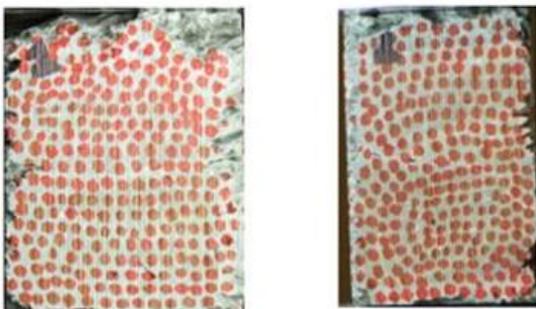


Altezza media [mm]	53,9
Superficie media di compressione [mm ²]	1175,71

Figura 4.7. Dimensioni medie delle due facce del campione 4G.

Campione 4P

Campione costituito in prevalenza da matrice di colore grigio con striature lungo la direzione di compressione (Figura 4.8).



Altezza media [mm]	37,5
Superficie media di compressione [mm ²]	720,18

Figura 4.8. Dimensioni medie delle due facce del campione 4P.

4.3. Analisi dei risultati ottenuti tramite prova di compressione monoassiale

Dopo aver concluso le prove di compressione monoassiale, sono stati analizzati i dati forniti dalla cella di carico e dal trasduttore esterno (LVDT, linear variable differential transformer) per studiare il comportamento del materiale ed effettuare delle prime valutazioni sul modulo di deformazione, anche se non esaustive. Per ogni campione di Mélange d’Oltrepò Pavese, a fine prova, è stato generato un file Excel, contenente i valori di tempo (secondi), di spostamento (mm) e di carico assiale (kiloNewton), con una frequenza di acquisizione di 100 Hz (Figura 4.9). Per l’analisi del comportamento del materiale, e quindi per la determinazione del modulo di deformazione, i valori di spostamento e di carico assiale sono stati convertiti, dividendoli rispettivamente per le altezze e le superfici trasversali medie dei campioni, in deformazioni assiali e tensioni uniformi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	LVDT_Time*	LVDT	Load Cell_Time*	Load Cell								
2	0	9,29787E-05	0	-0,006400228								
3	0,01	0,000408502	0,01	-0,005115536								
4	0,02	-0,000961134	0,02	-0,003584838								
5	0,03	-0,00129577	0,03	-0,003612172								
6	0,04	-0,000827281	0,04	-0,002887824								
7	0,05	2,12755E-05	0,05	-0,000947119								
8	0,06	-0,000322928	0,06	-0,004691861								
9	0,07	-0,000573905	0,07	-0,003434502								
10	0,08	-0,000679084	0,08	-0,002423148								
11	0,09	0,000293767	0,09	-0,001630466								
12	0,1	0,000217274	0,1	-0,002696487								
13	0,11	0,000109716	0,11	-0,001152123								
14	0,12	-0,000497421	0,12	-7,24348E-05								
15	0,13	-0,000382683	0,13	-0,002259145								
16	0,14	-7,6733E-05	0,14	-0,003024494								
17	0,15	0,000317672	0,15	0,000214571								
18	0,16	-0,000112582	0,16	-0,000906118								
19	0,17	-0,00020102	0,17	-0,00067378								
20	0,18	-0,000354003	0,18	0,001198591								
21	0,19	0,000217279	0,19	-0,001275126								
22	0,2	-2,63062E-06	0,2	-0,000578112								
23	0,21	-0,000521318	0,21	0,000938919								
24	0,22	-0,001008941	0,22	0,00097992								

Figura 4.9. Schermata Excel del file fornito dalla macchina.

Deformazione assiale

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\Delta l}{l}$$

con:

- ε_{yy} deformazione assiale;
- Δl spostamenti della piastra ottenuti dal trasduttore (LVDT) [mm];
- l altezza media iniziale del campione in [mm].

Tensioni uniformi

$$\sigma_{yy} = \frac{F}{A}$$

con:

- σ_{yy} tensione uniforme in corrispondenza della superficie media trasversale [MPa];
- F carico fornito dalla cella di carico in [N];
- A area superficie media trasversale [mm²].

Dopo aver ottenuto i valori di deformazione assiale e di tensione, per ciascuno dei campioni, è stato possibile determinare i diagrammi di sforzo-deformazione (Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15).

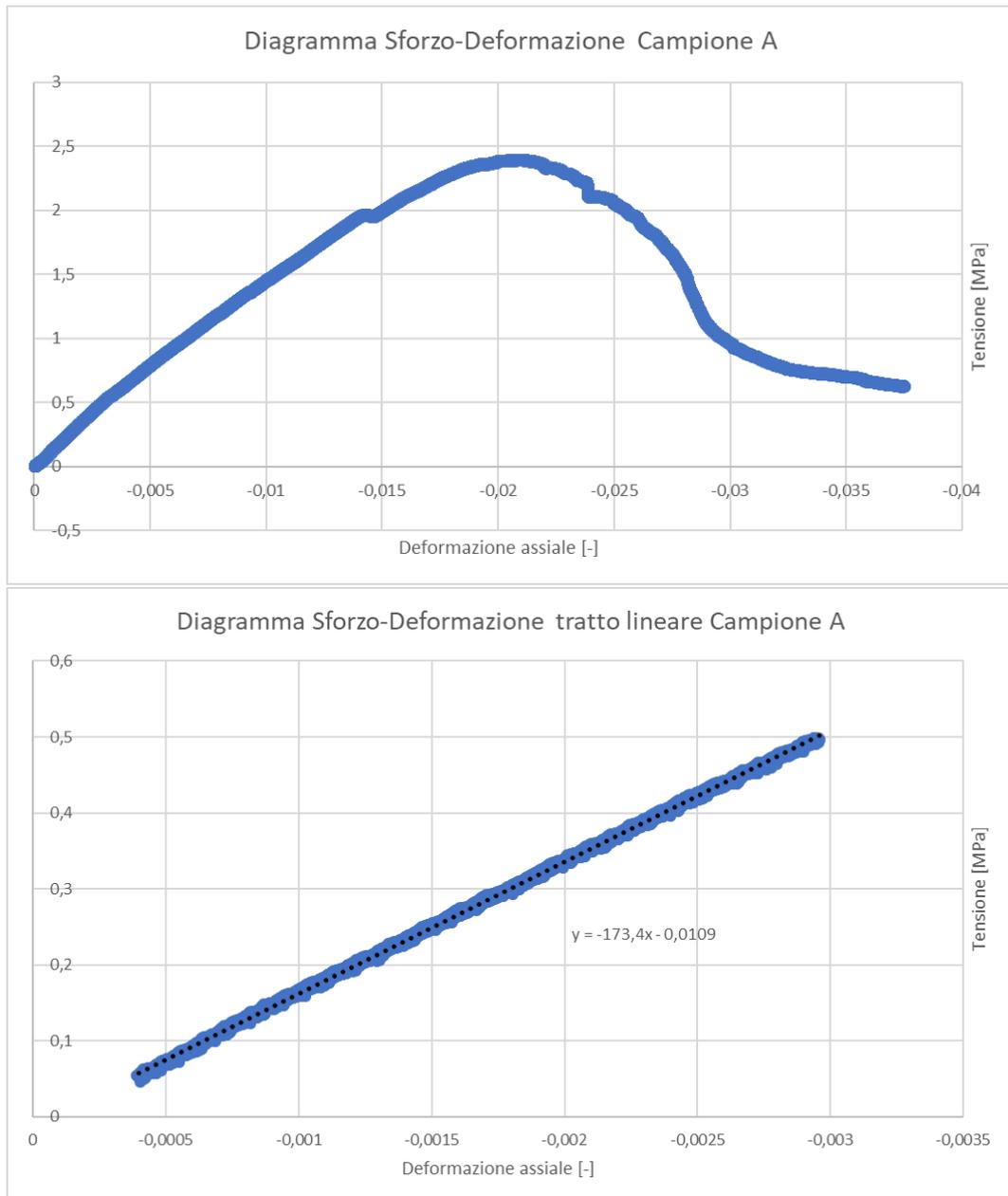


Figura 4.10. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione A).

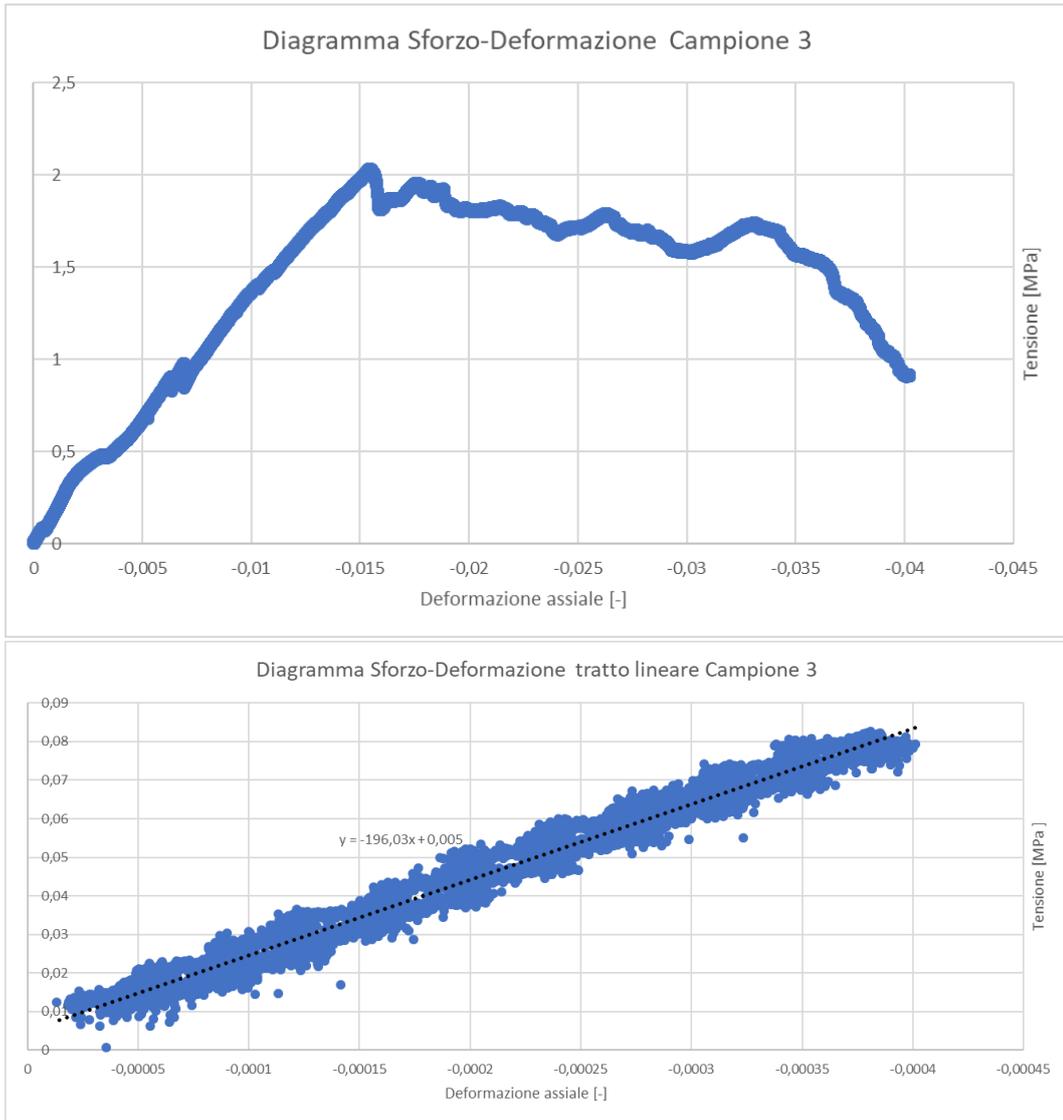


Figura 4.11. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 3).

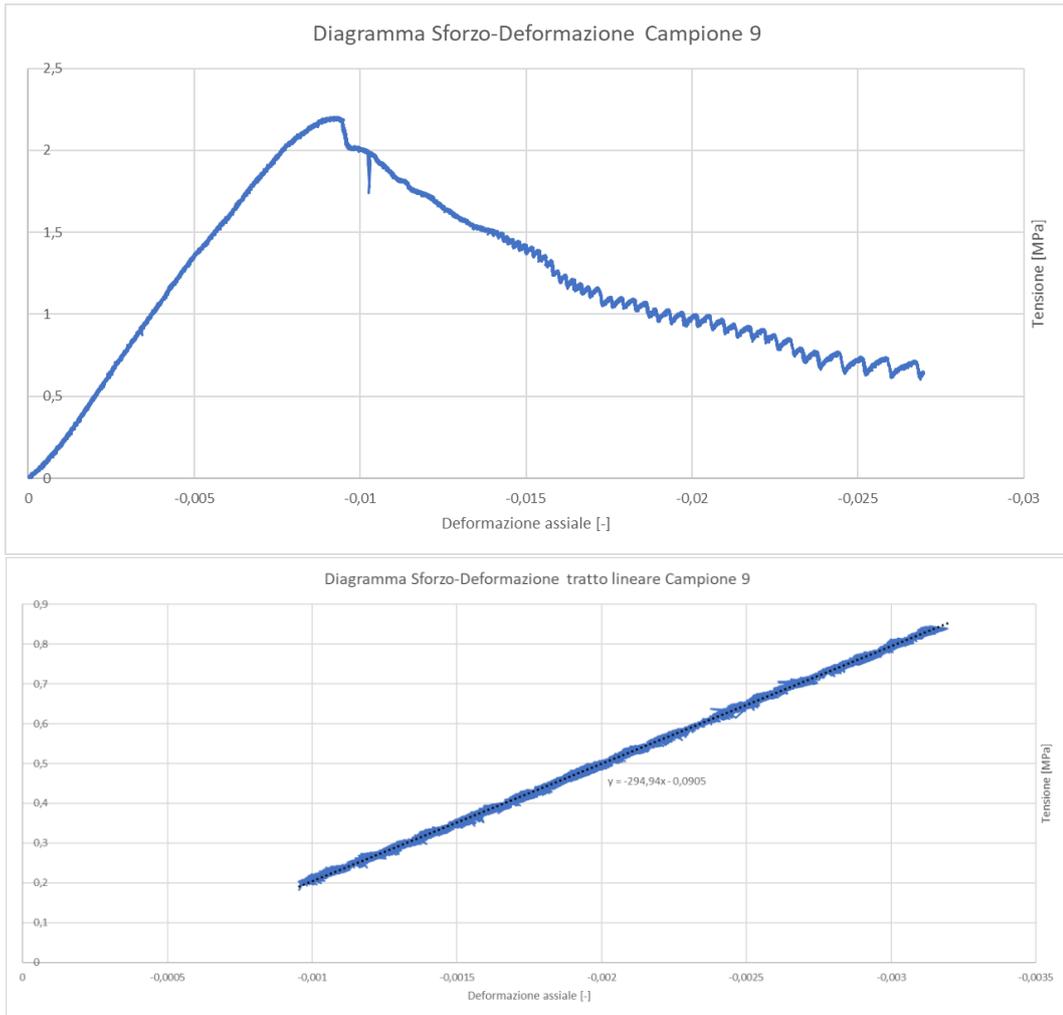


Figura 4.12. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 9).

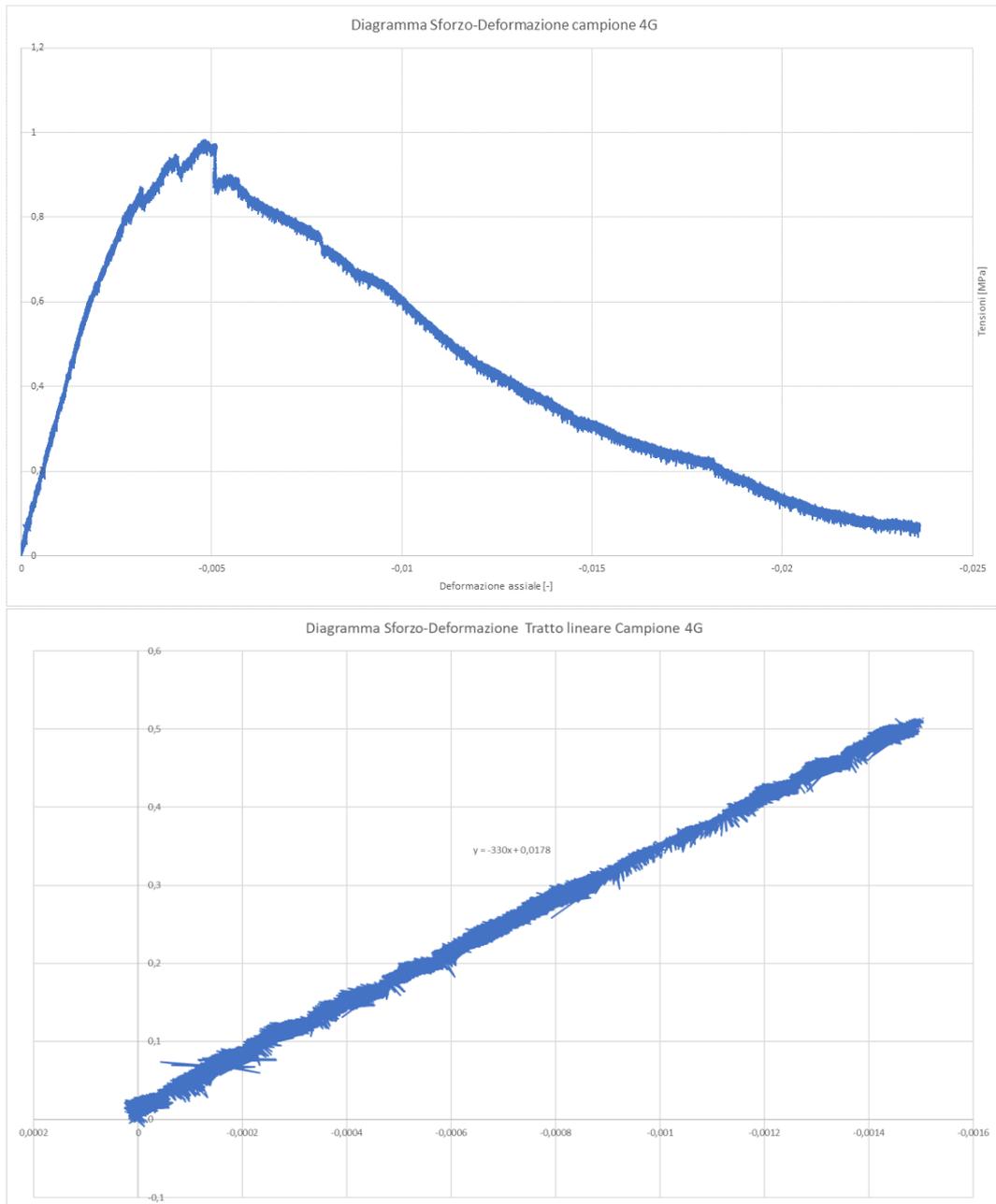


Figura 4.13. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 4G).

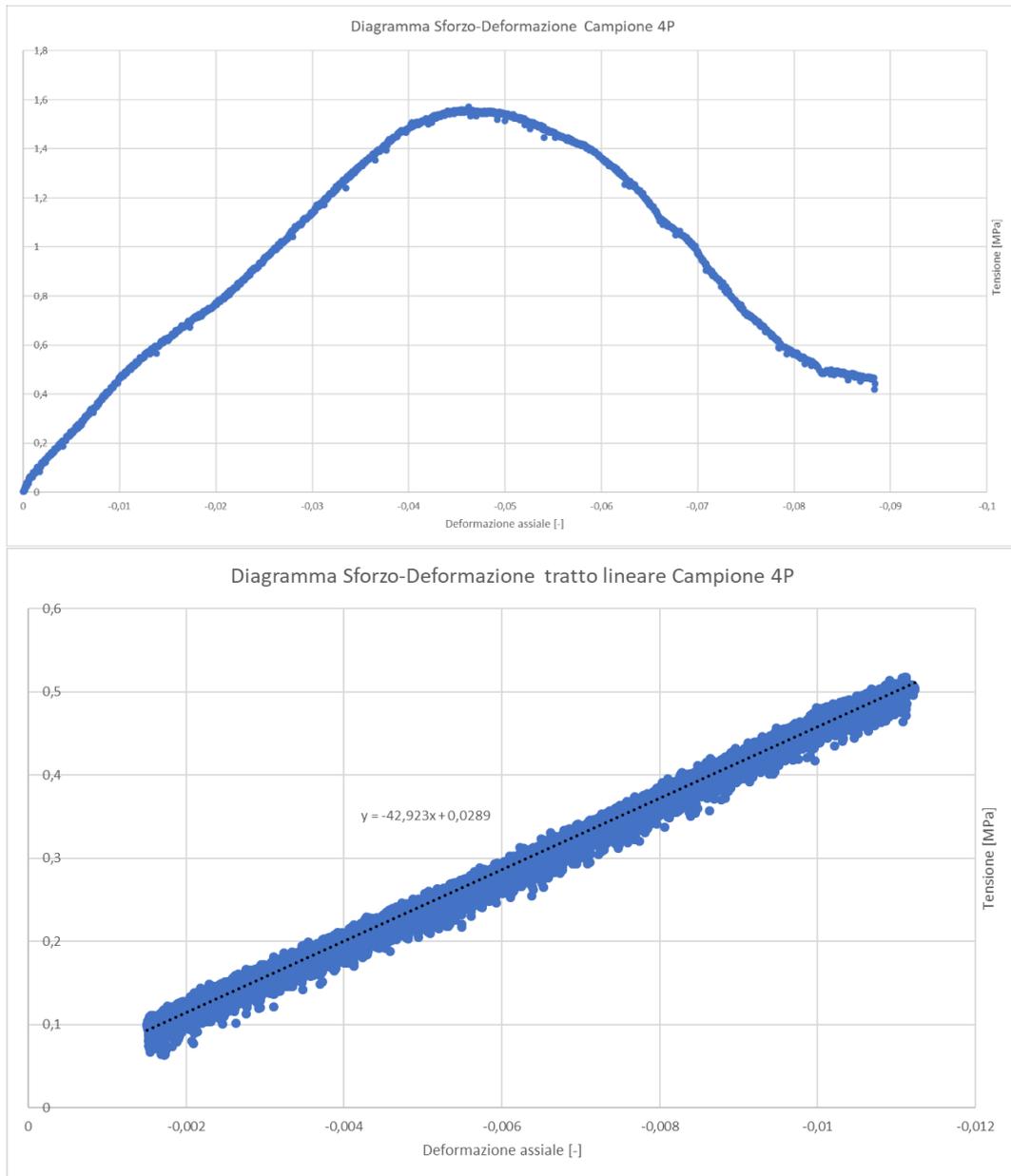


Figura 4.14. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 4P).

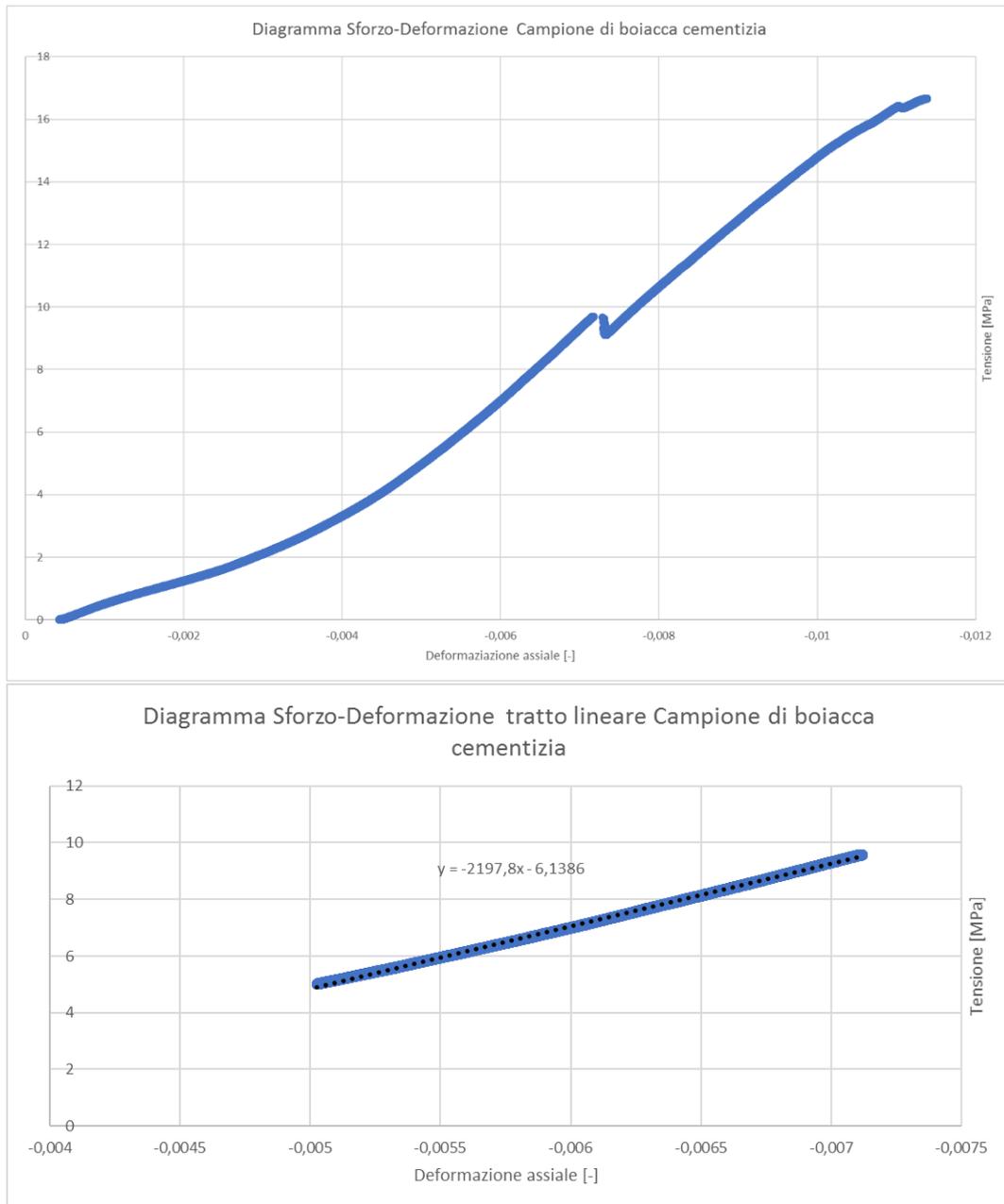


Figura 4.15. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione Boiacca cementizia).

Dai precedenti diagrammi, per ciascun campione sottoposto a prova, sono stati ricavati i valori di resistenza a compressione monoassiale (C_o), ovvero la tensione in corrispondenza del picco (rottura del campione), e il modulo di deformazione tangente (E_t), individuato attraverso i tratti lineari iniziali della curva (Tabella 4.1).

Campione	Tipologia	C_o [MPa]	E_t [MPa]
A	Matrice con blocchi	2,40	173,40
3	Matrice con blocchi	1,96	196,03
9	Matrice	2,20	294,94
4G	Matrice	0,98	330,00
4P	Matrice	1,56	42,92
Boiaccia cementizia	-	17,46	2197,80

Tabella 4.1. Valori di resistenza a compressione monoassiale e moduli di deformazione tangente dei campioni.

Per effettuare uno studio del comportamento deformativo del materiale più approfondito, sono stati analizzati, per ciascun campione, i dati ottenuti con la tecnica di correlazione digitale di immagini (DIC) per la determinazione dei moduli di deformazione locali. Per prima cosa, sul software DICe (Digital Image Correlation engine), dopo aver fornito come dati di input il fotogramma iniziale di riferimento, i fotogrammi successivi e tracciata una maglia regolare di punti disposti equidistanti tra loro e in una zona omogenea e sufficientemente lontana dai bordi e dalle piastre, è stata lanciata l'analisi (Figura 4.16).

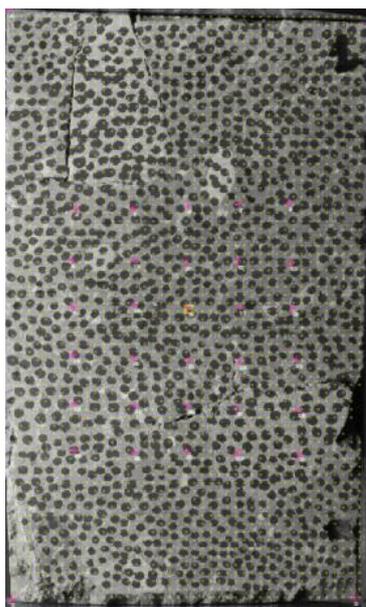


Figura 4.16. Maglia regolare di punti (Faccia 1, Campione 3).

Al termine dell'analisi, il software fornisce come output i valori di spostamento e deformazione di tutti i punti. Successivamente, sono state analizzate le deformazioni fornite direttamente dal software DICe; queste deformazioni, grazie al cronometro e al trigger situati vicino ai campioni, sono state associate ai relativi valori di carico assiale, e quindi di tensione. Diagrammando i valori di deformazione e di tensione, è stato osservato un andamento non lineare, rappresentato da una nuvola di punti (Figura 4.17).

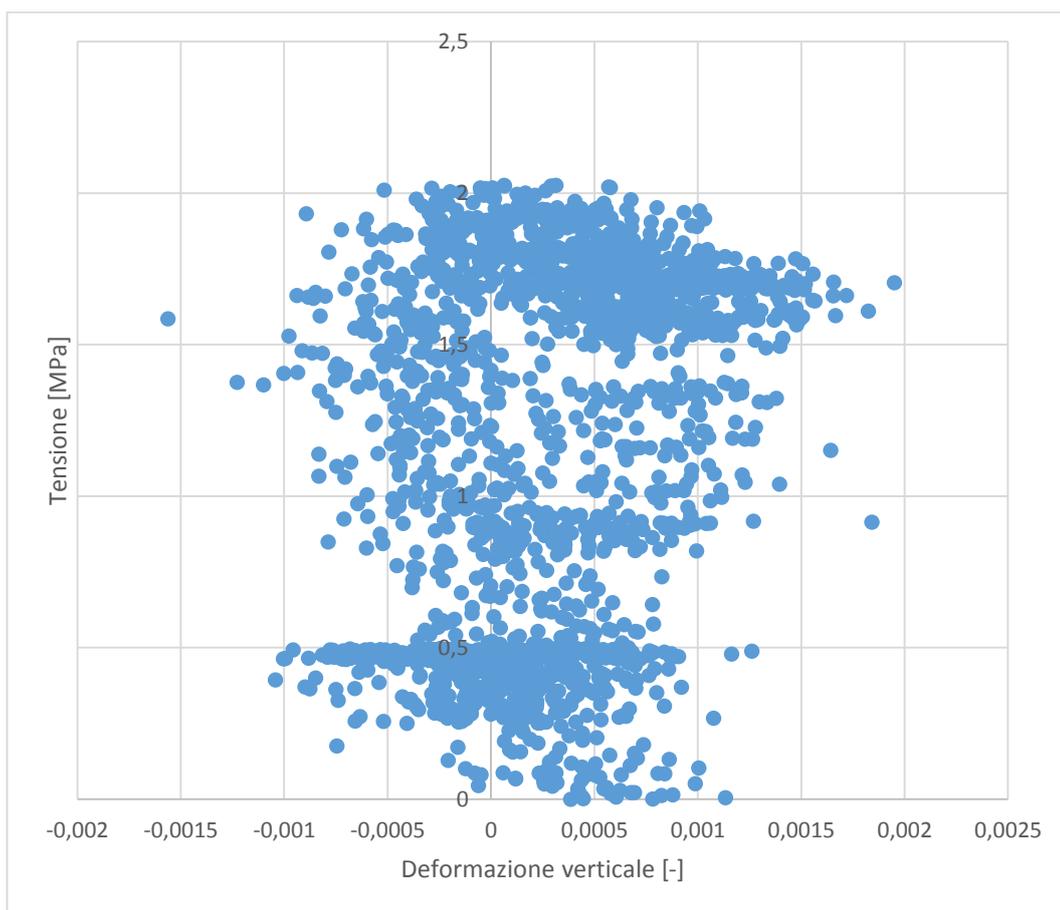


Figura 4.17. Diagramma Sforzo-Deformazione con i valori di deformazione forniti dal software DICe (Faccia 1, Campione 3).

Non potendo ottenere un andamento sforzo-deformazione lineare, e quindi non potendo determinare il modulo di deformazione, è stato valutato un ulteriore metodo di analisi. Questo procedimento di analisi consiste nell'andare a diagrammare gli spostamenti verticali dei punti, forniti sempre dal software DICe, al posto delle deformazioni, ottenendo così un comportamento simile a quello determinato con i dati forniti dalla macchina (Figura 4.18).

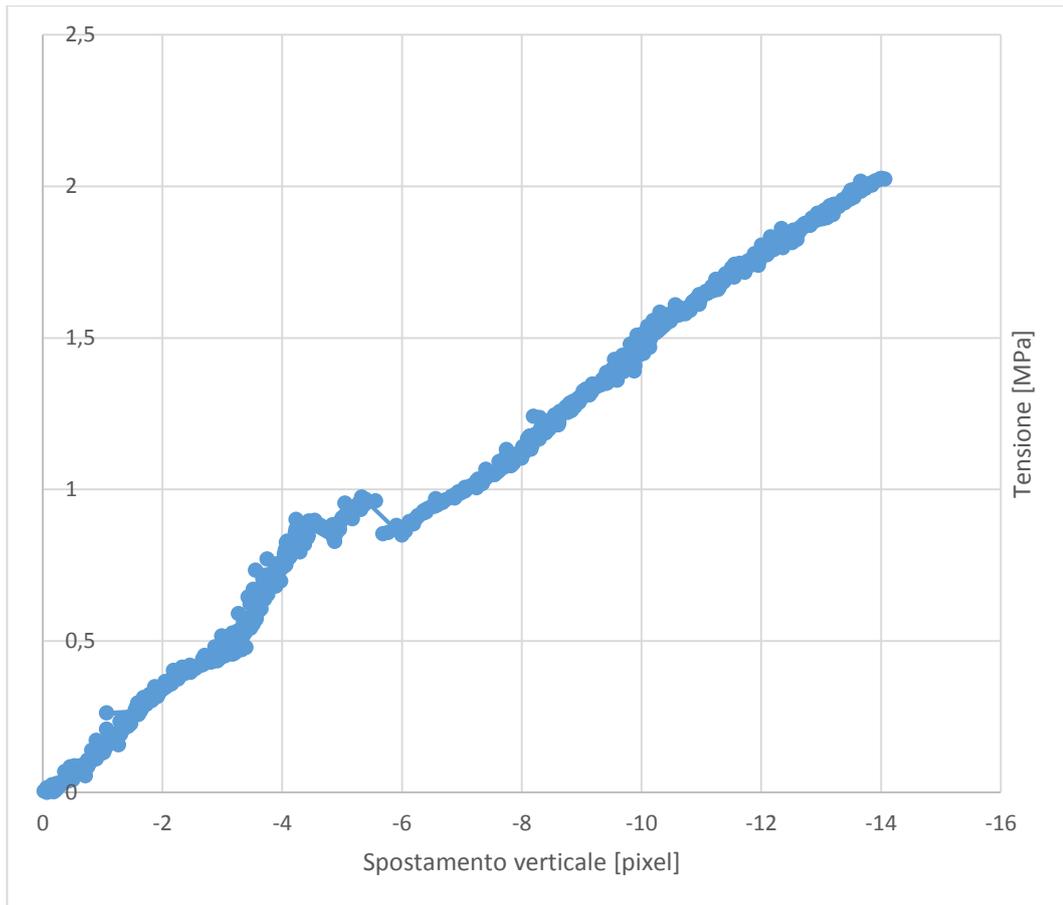


Figura 4.18. Diagramma Sforzo-Spostamento con i valori di spostamento forniti dal software DICe (Faccia 1, Campione 3).

Avendo un comportamento simile, si è pensato che i valori di spostamento verticale, forniti dal software, potessero essere affidabili per la determinazione delle deformazioni. Per questo, conoscendo la distanza verticale iniziale (pixel) e gli spostamenti di due punti successivi (pixel), è stato possibile ottenere la deformazione assiale.

Deformazione assiale

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\Delta s_y}{d_{iniziale}}$$

con:

- ε_{yy} deformazione assiale;
- Δs_y differenza di spostamento tra due punti successivi [pixel];
- $d_{iniziale}$ distanza iniziale tra i due punti successivi.

Dopo aver individuato un intervallo lineare, come nell'analisi eseguita con i dati forniti dalla macchina, sono stati interpolati linearmente i valori di spostamento (Figura 4.19).

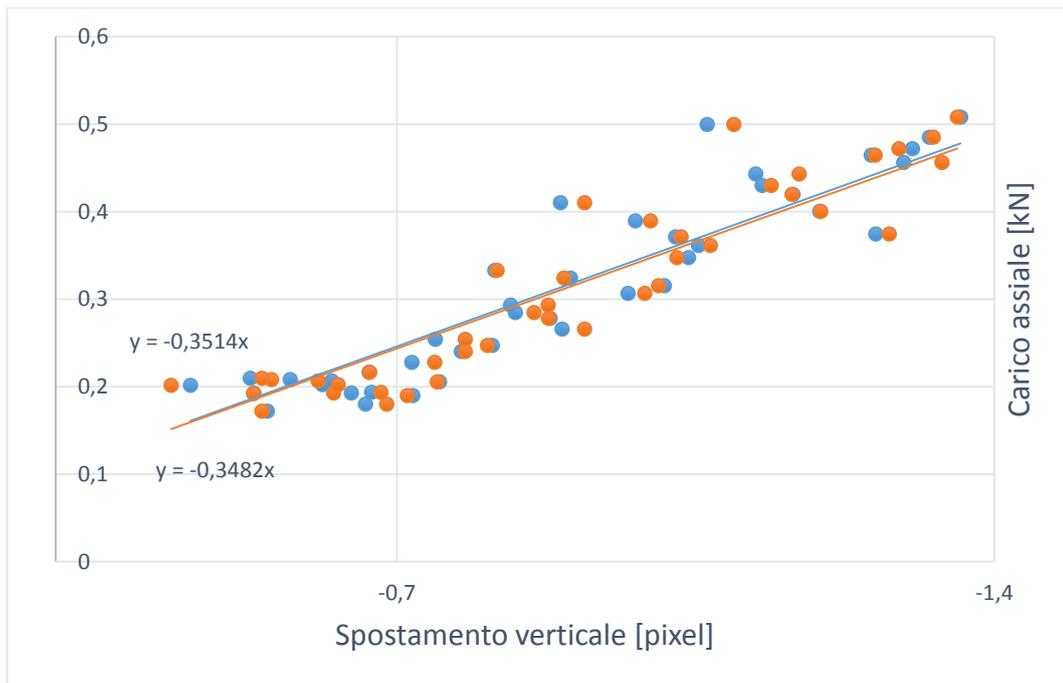


Figura 4.19. Linearizzazione dei valori di carico-spostamento di due punti successivi (Faccia 1, Campione 3).

Dopo aver linearizzato gli spostamenti, nell'intervallo scelto, sono stati ottenuti i valori di deformazione con il relativo diagramma di sforzo-deformazione e il valore di modulo di deformazione (Figura 4.20).

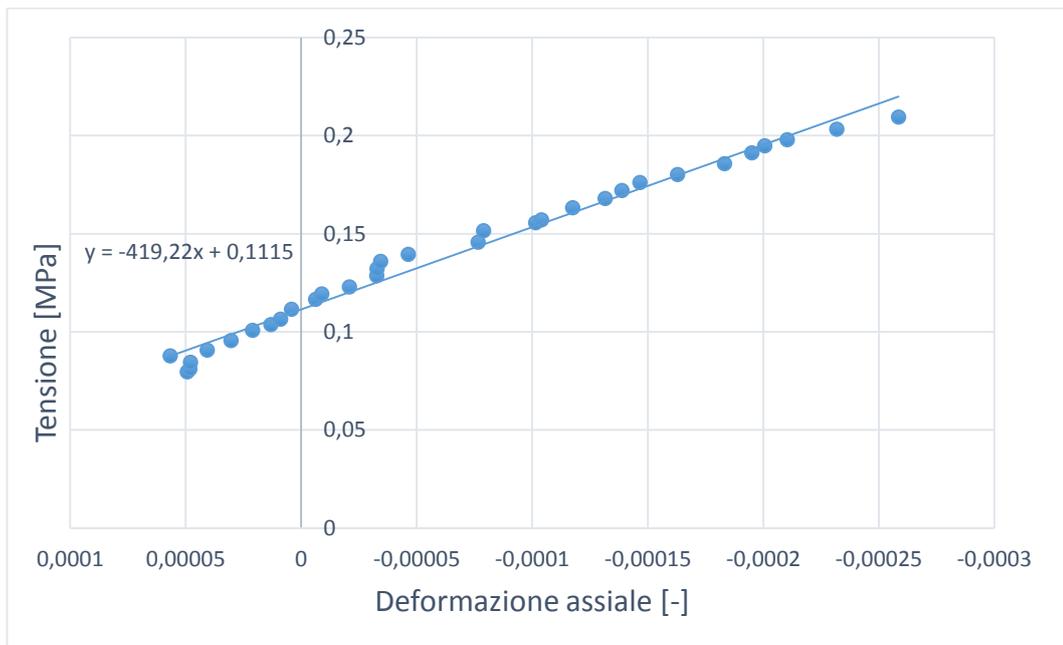


Figura 4.20. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dagli spostamenti verticali linearizzati (Faccia 1, Campione 3).

Successivamente, analizzati tutti i punti di ciascuna faccia di ogni campione, sono stati ottenuti valori di modulo di deformazione molto diversi tra loro; all'interno di una stessa faccia i moduli di deformazione variavano anche di uno-due ordini di grandezza, di conseguenza, questo metodo di analisi è stato scartato. Visti gli scarsi risultati delle analisi precedenti, si è pensato di ripetere la tecnica di correlazione digitale di immagini su un campione di boiaccia cementizia. Dopo aver effettuato l'analisi, visto che il problema persisteva, è stato appreso che le problematiche non erano dovute alla tipologia del materiale eterogeneo e alla geometria del campione, ma erano legate a fattori esterni. Inoltre, dopo aver analizzato in primi tre fotogrammi, in corrispondenza dei quali la macchina non era stata ancora azionata, è stato possibile notare che il software forniva comunque dei valori di deformazione. Si è deciso, quindi, di analizzare questi primi tre fotogrammi per ricavare l'errore attraverso un approccio statistico. Innanzitutto, le analisi sul software DICe sono state eseguite su una superficie più ampia con una mesh molto più fitta, e non soltanto su alcuni punti all'interno della faccia (Figura 4.21).

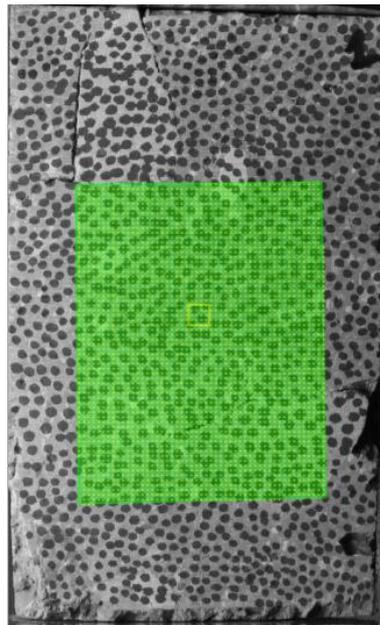


Figura 4.21. Superficie analizzata (Faccia 1, Campione 3).

Dopo aver effettuato l'analisi per i primi tre fotogrammi, sono stati ottenuti diversi valori di deformazione verticale di ciascun punto all'interno della superficie indagata. Analizzando singolarmente i fotogrammi, è stata costruita, per ciascun di essi, una distribuzione normale delle deformazioni, andando a scartare i valori inferiori al decimo percentile e maggiori del novantesimo percentile per la determinazione della media e della deviazione standard (Figura 4.22).

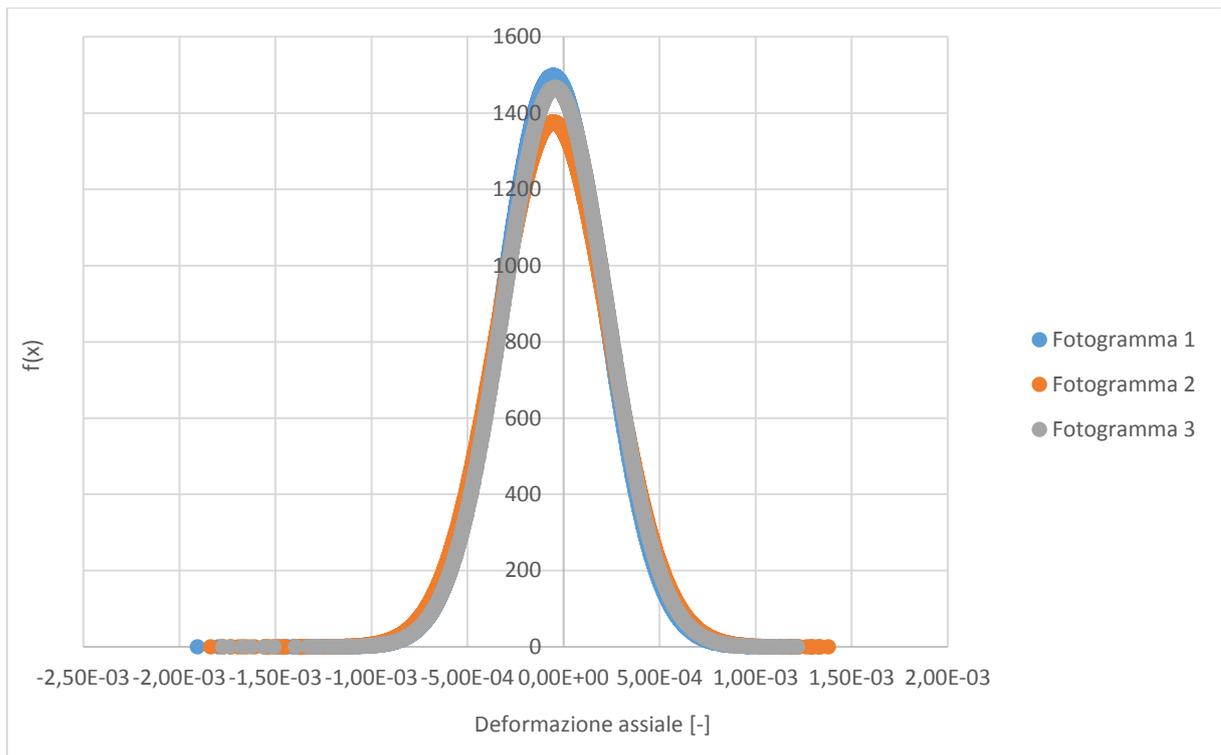


Figura 4.22. Distribuzioni normali standard delle deformazioni assiali dei primi tre fotogrammi (Faccia 1, Campione 3).

Dal diagramma in Figura 4.21 si può osservare che le medie non corrispondono al valore nullo, e quindi, calcolando la media di questi tre valori e assumendo il valore di deformazione verticale costante su tutta la superficie, è stato possibile ottenere l'errore del software DICe da correggere nei fotogrammi successivi. In seguito, scartando sempre il decimo e il novantesimo percentile, sono state calcolate le medie delle deformazioni verticali di tutti i fotogrammi di ciascuna faccia. Questi valori medi, depurati dall'errore iniziale del software, possono essere valutati come le deformazioni verticali ai diversi istanti; associando a queste deformazioni il relativo valore di tensione è stato possibile ottenere il diagramma sforzo-deformazione e, attraverso la linearizzazione del tratto elastico, il modulo di deformazione (Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31, Figura 4.32, Figura 4.33).

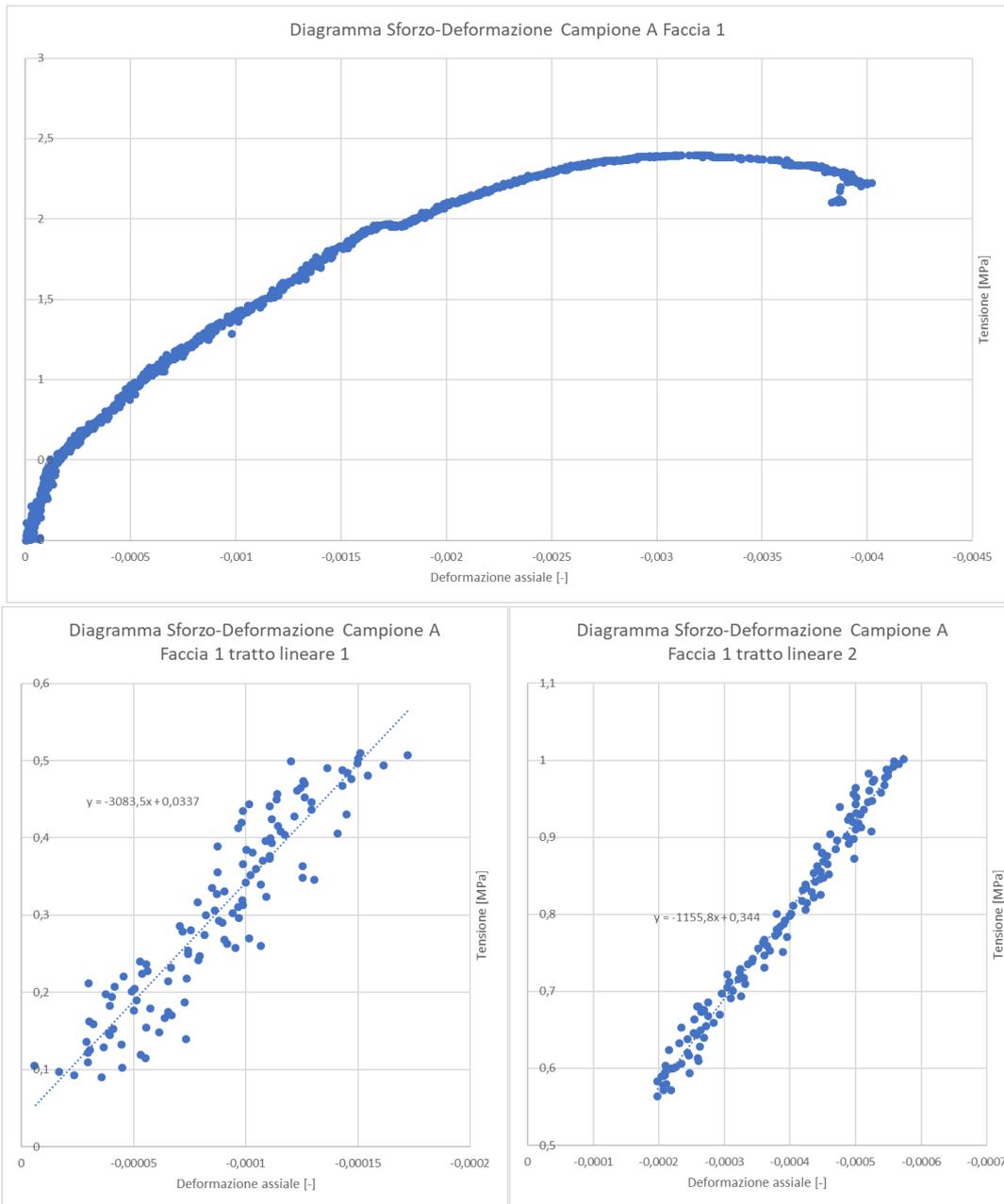


Figura 4.23. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione A).

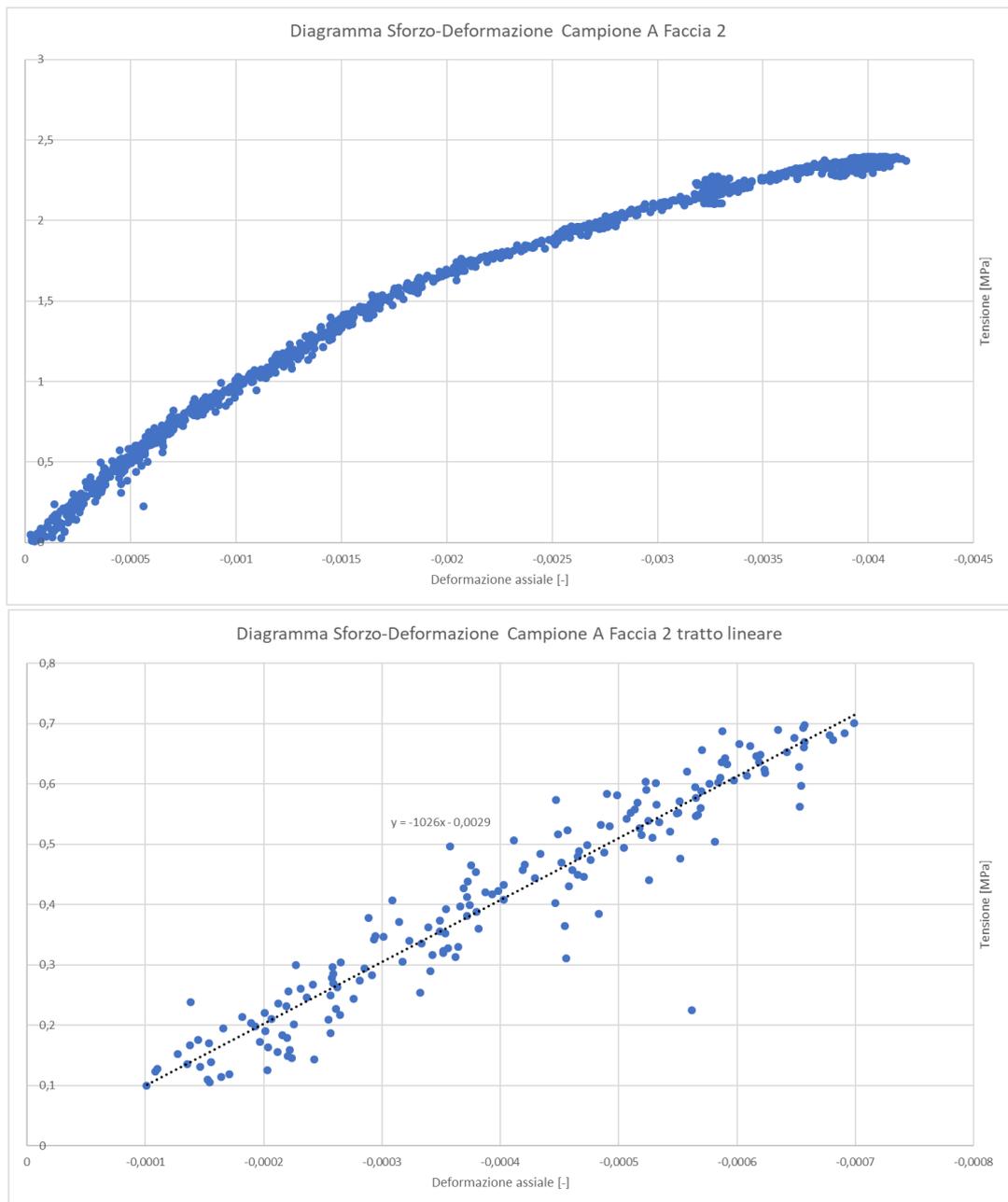


Figura 4.24. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione A).

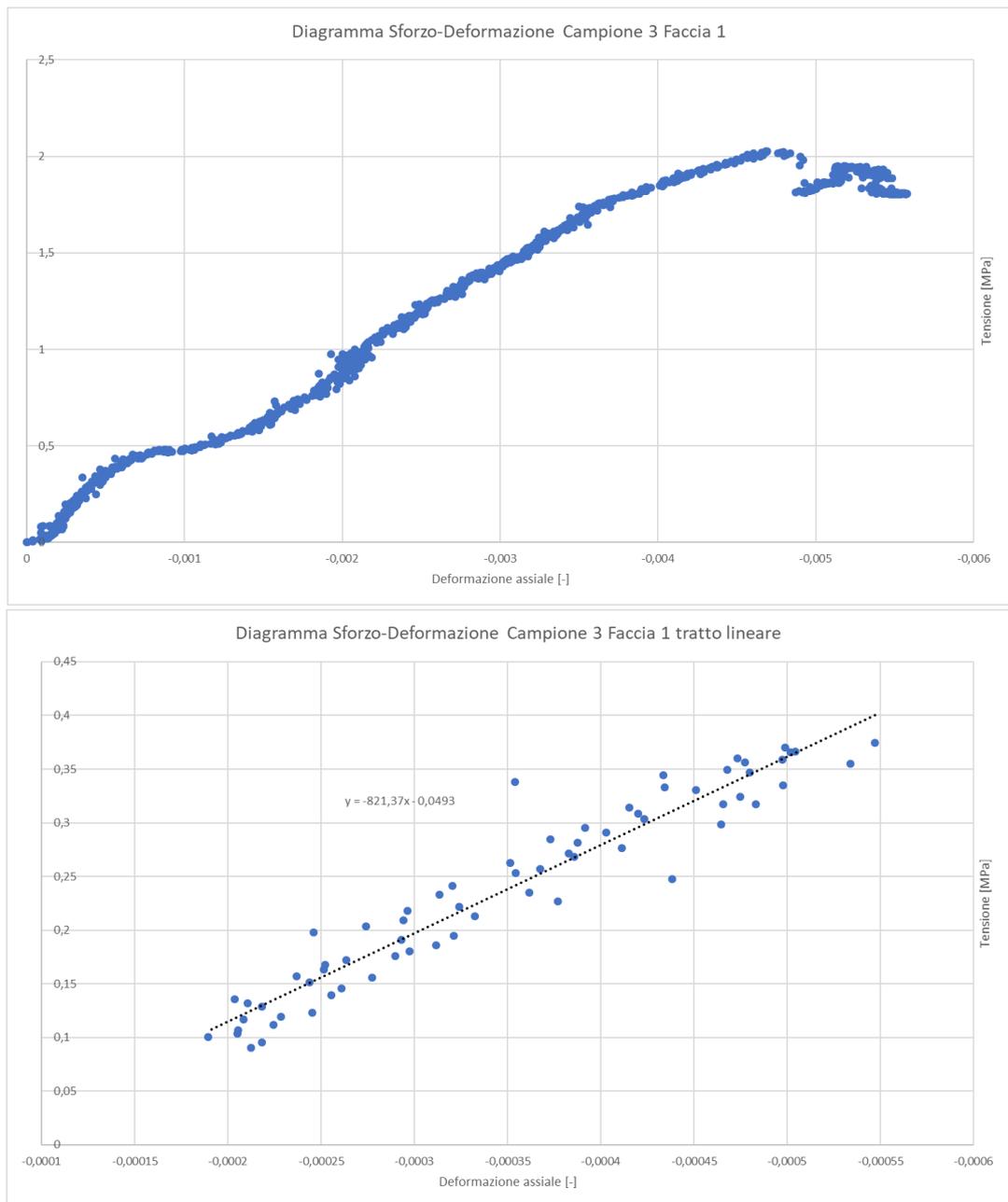


Figura 4.25. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 3).

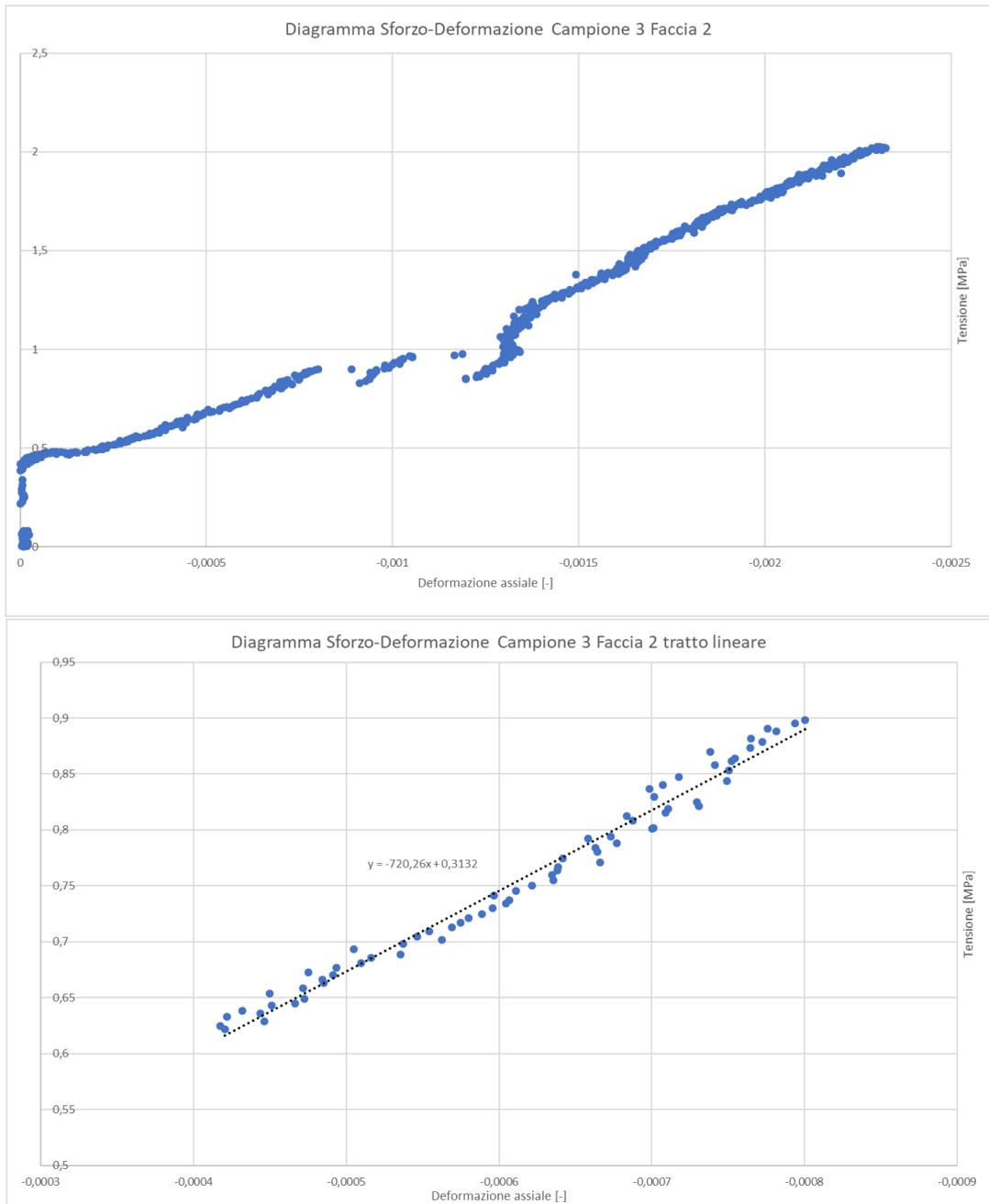


Figura 4.26. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 3).

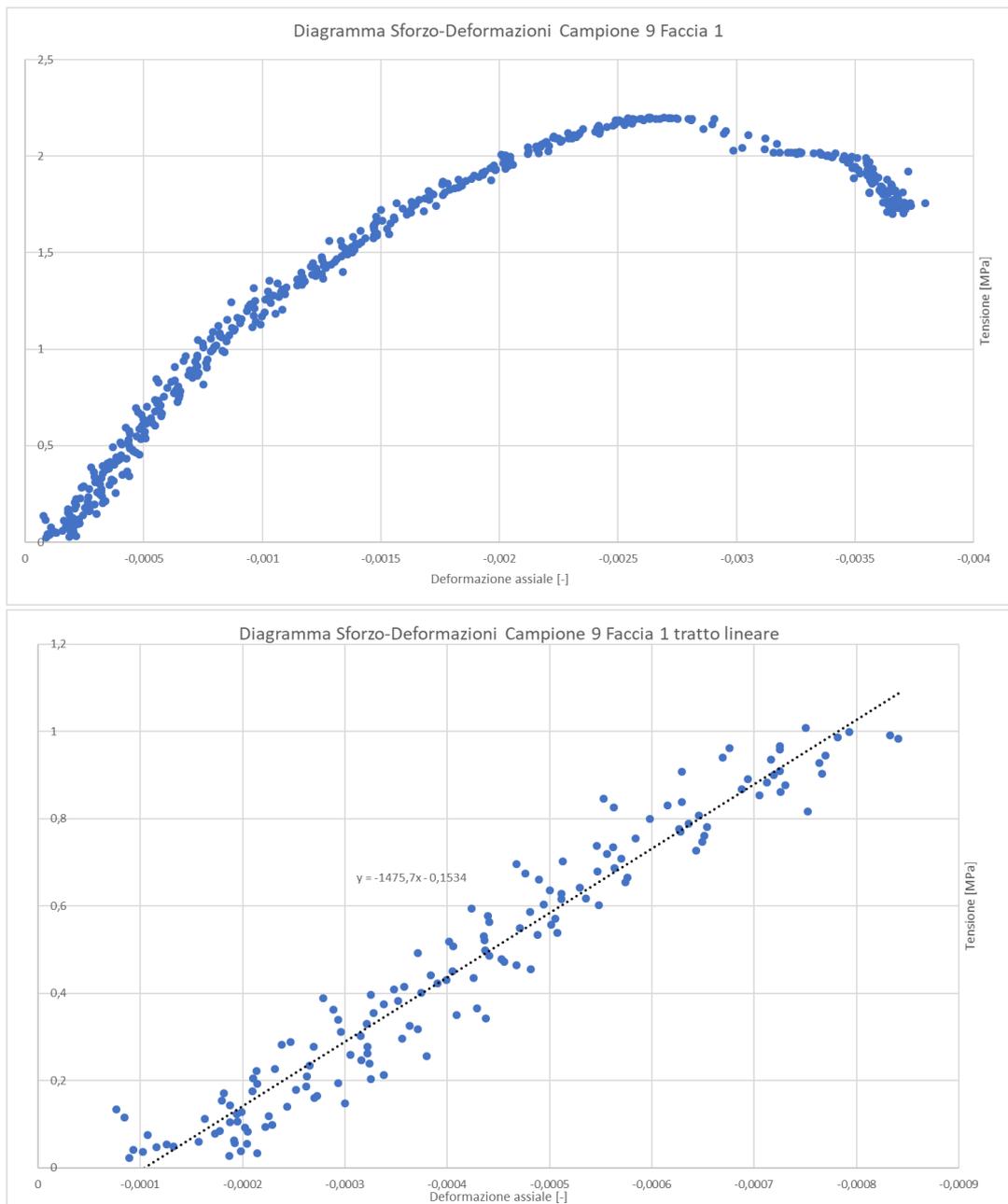


Figura 4.27. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 9).

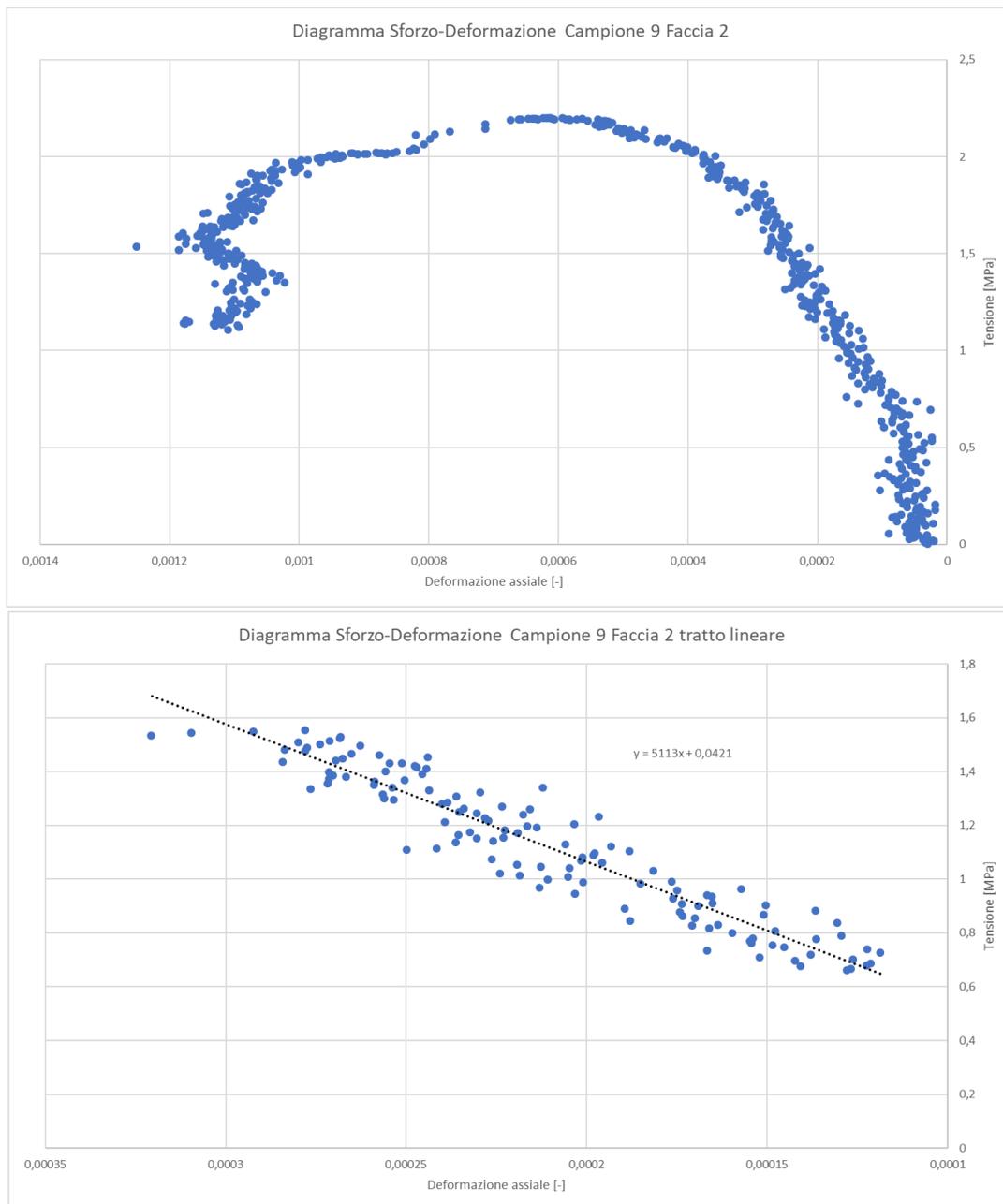


Figura 4.28. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 9).

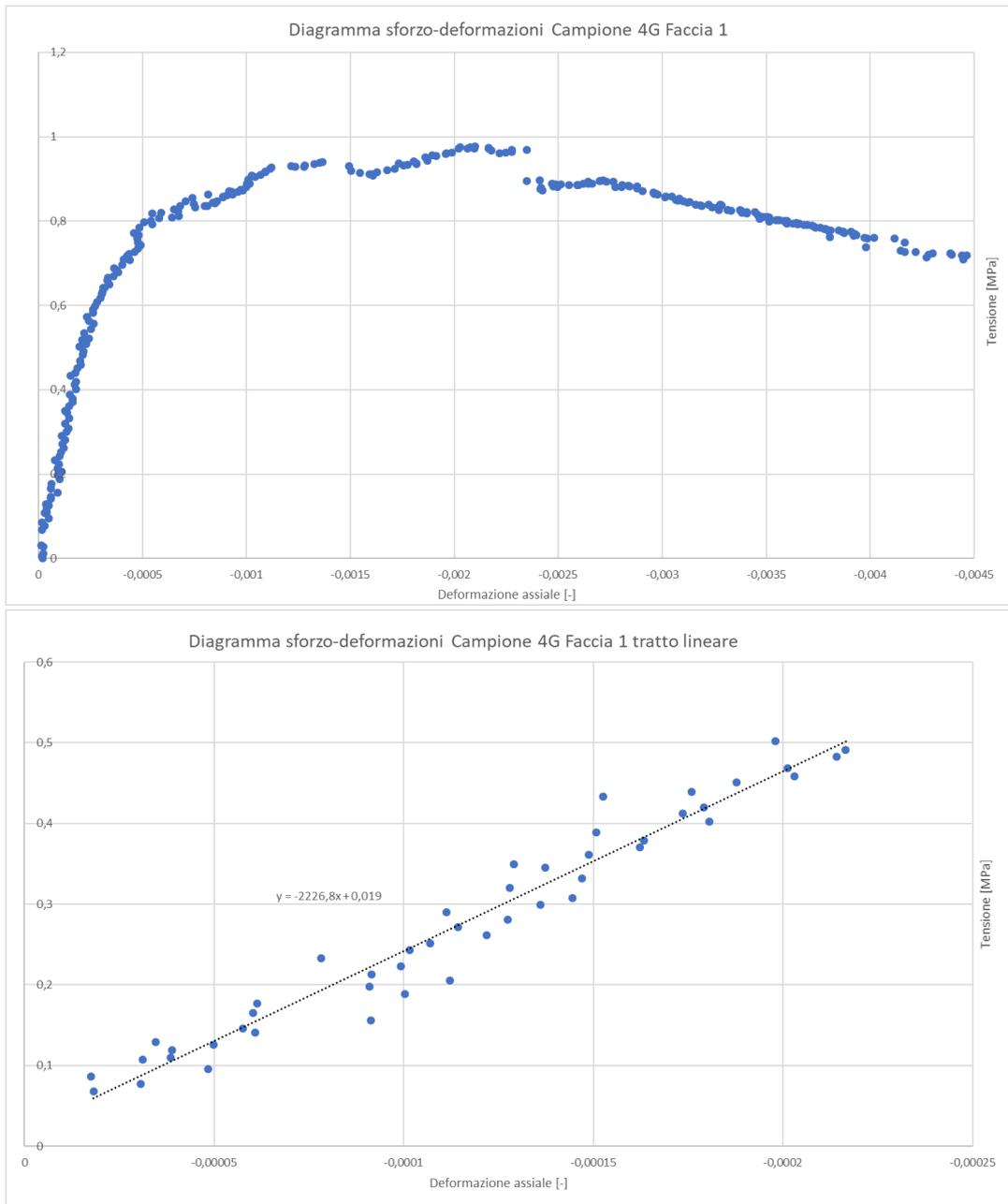


Figura 4.29. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 4G).



Figura 4.30. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 4G).

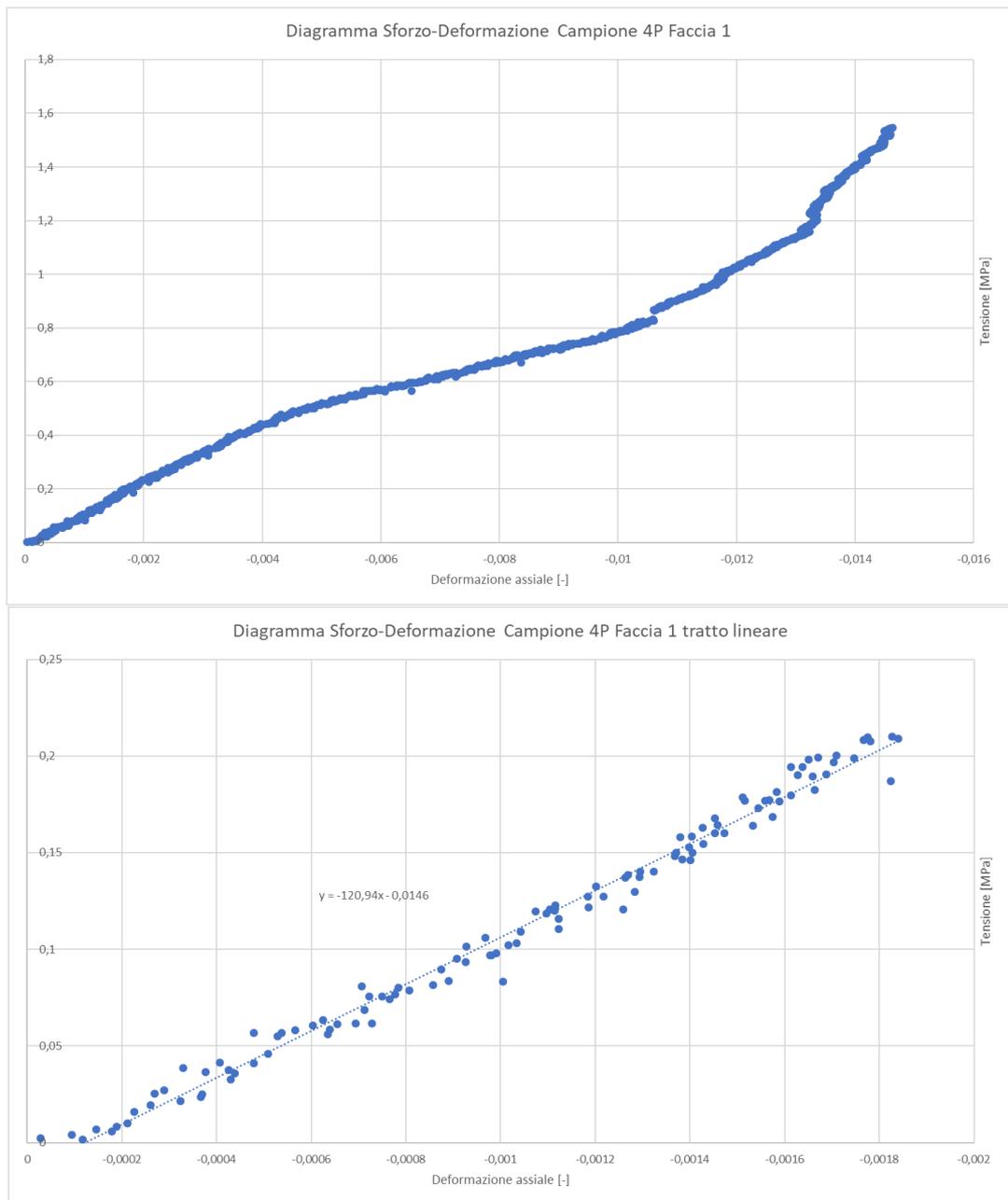


Figura 4.31. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 4P).

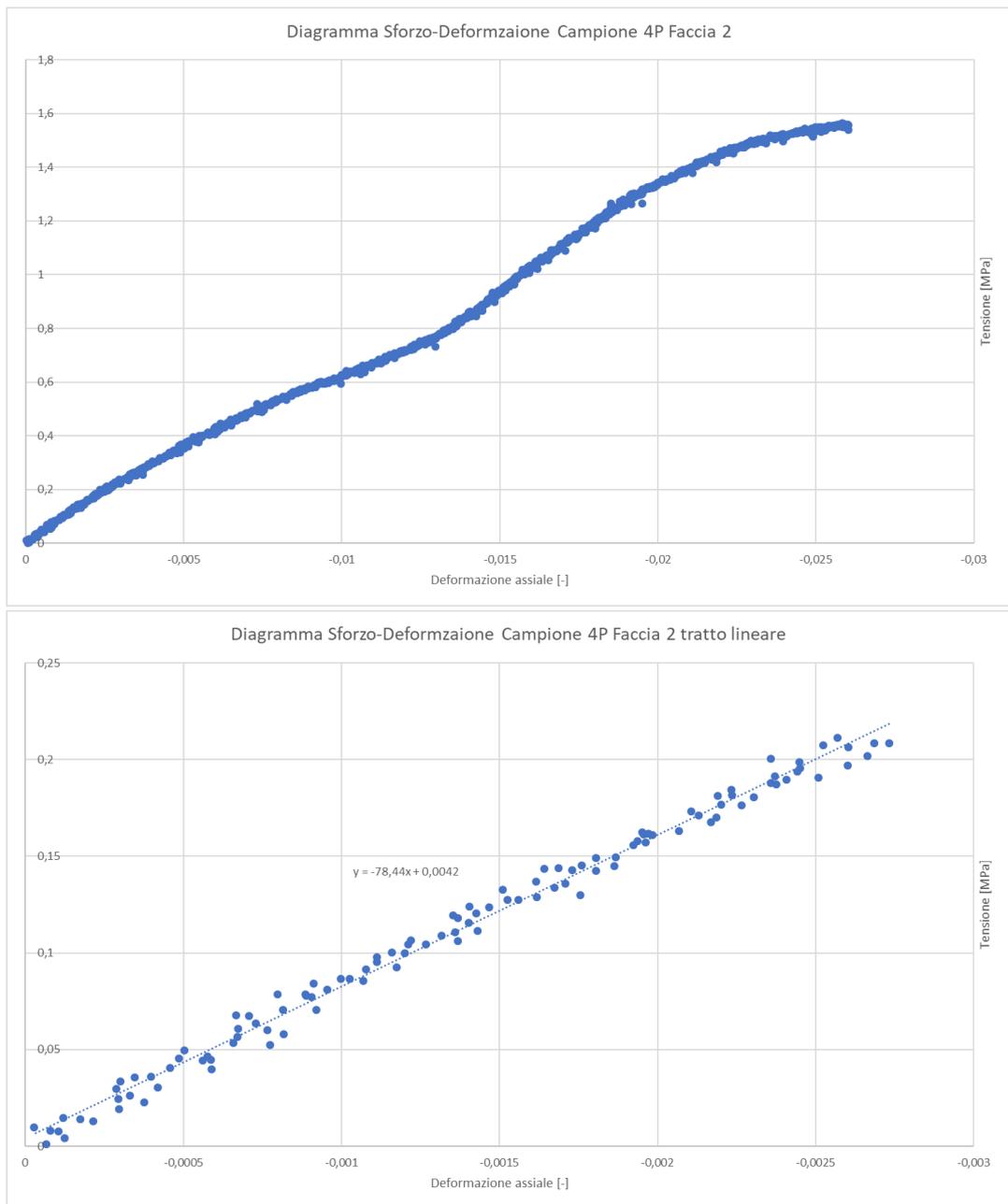


Figura 4.32. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 4P).

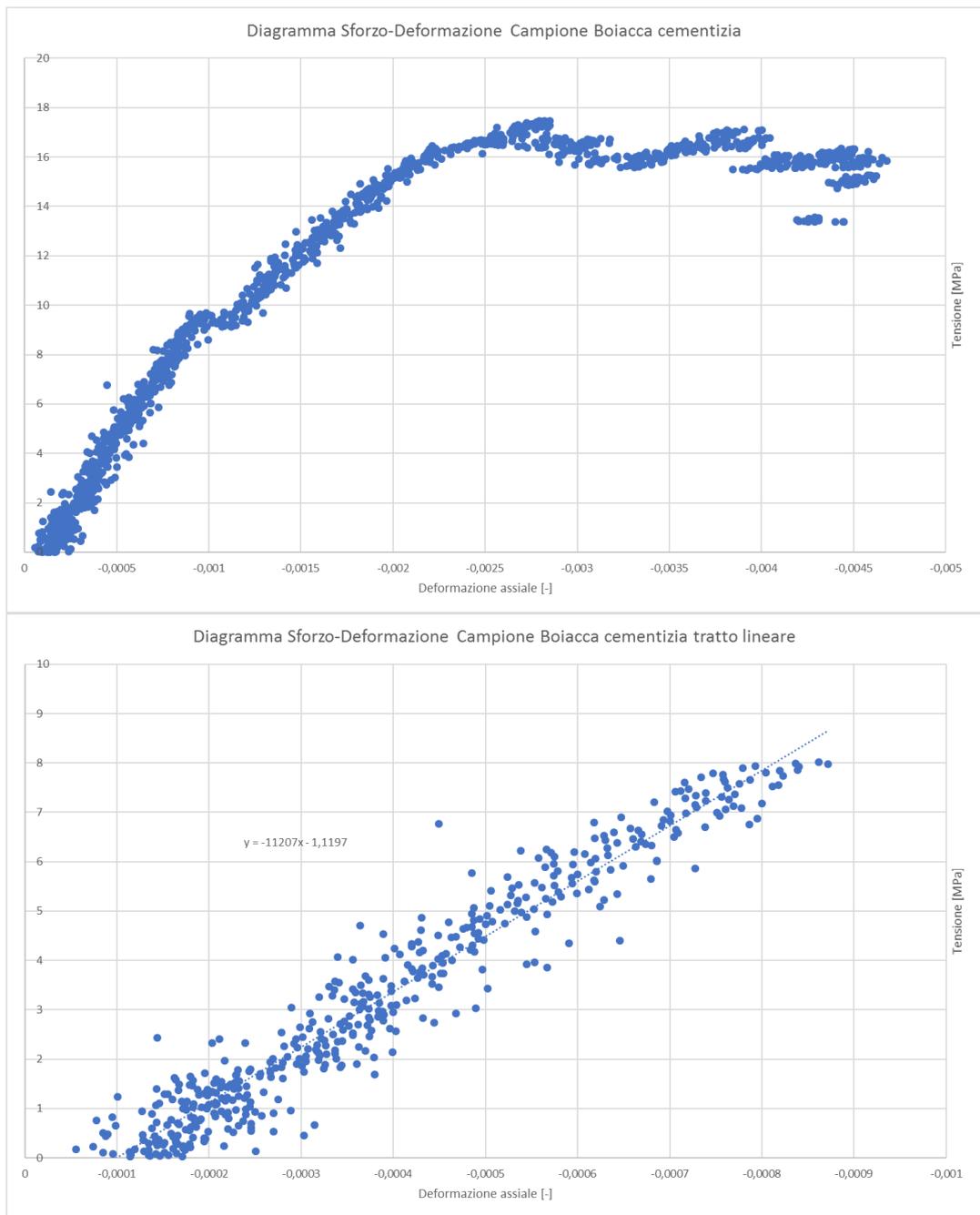


Figura 4.33. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Campione Boiacca cementizia).

I valori di modulo di deformazione tangente ottenuti con la tecnica di correlazione digitale di immagini (DIC), con le necessarie correzioni statistiche, sono riportate nella tabella seguente (Tabella 4.2).

Campione	E _t [MPa]	
	Faccia 1	Faccia 2
A	1475,7	5113
3	2226,8	1941,9
9	120,94	78,44
4G	821,37	720,26
4P	3083,5/1155,8	
Boiaccia cementizia	11207	

Tabella 4.2. Valori di modulo di deformazione tangente ottenuti con la tecnica DIC.

Prendendo in considerazione il valore di modulo di deformazione del campione di boiaccia cementizia, grazie a dati presenti in letteratura (Figura 4.34), è stato possibile fare delle considerazioni sulla validità della tecnica di correlazione digitale di immagini (DIC).

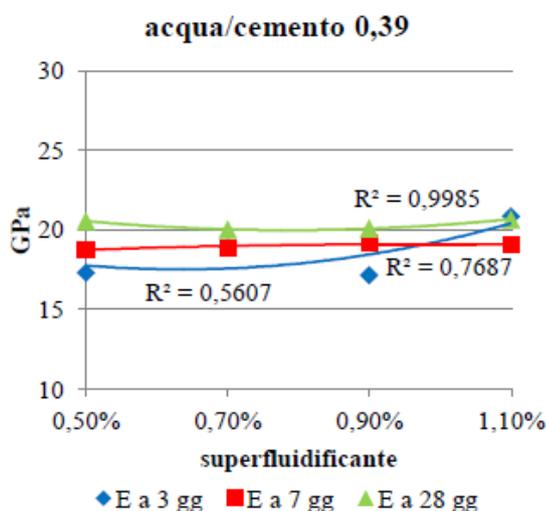


Figura 4.34. Modulo elastico delle boiacce con rapporto acqua/cemento 0,39 (Bottani et al. 2014).

Dalla Figura 4.34 si può notare che il modulo di deformazione per una boiaccia cementizia, maturata ventotto giorni, con un rapporto acqua cemento pari a 0,39 e con un cemento 42,5, è di circa 20 GPa. Essendo il nostro campione di boiaccia cementizia costituito da cemento 32,5 e maturato per diciannove giorni, ed essendo il modulo di deformazione influenzato da questi fattori, è abbastanza realistico attribuirgli un modulo deformazione di circa 12 GPa. Attraverso i dati presenti in letteratura (Bottani et al. 2014), è stato possibile attribuire alla tecnica di correlazione digitale di immagini una certa validità, seppure con qualche incertezza.

4.4. Analisi del comportamento a rottura dei campioni sottoposti a prova di compressione monoassiale

Attraverso l'utilizzo di un ulteriore software open-source, ParaView, sono stati analizzati i risultati forniti dal programma DICe per osservare il comportamento a rottura di ciascun campione. Il software, attraverso una rappresentazione grafica della mesh costituita dai punti analizzati, permette di visualizzare i risultati ottenuti; permette di valutare la distribuzione e la concentrazione di deformazioni assiali nel tempo con la conseguente formazione di fratture (Figura 4.35).

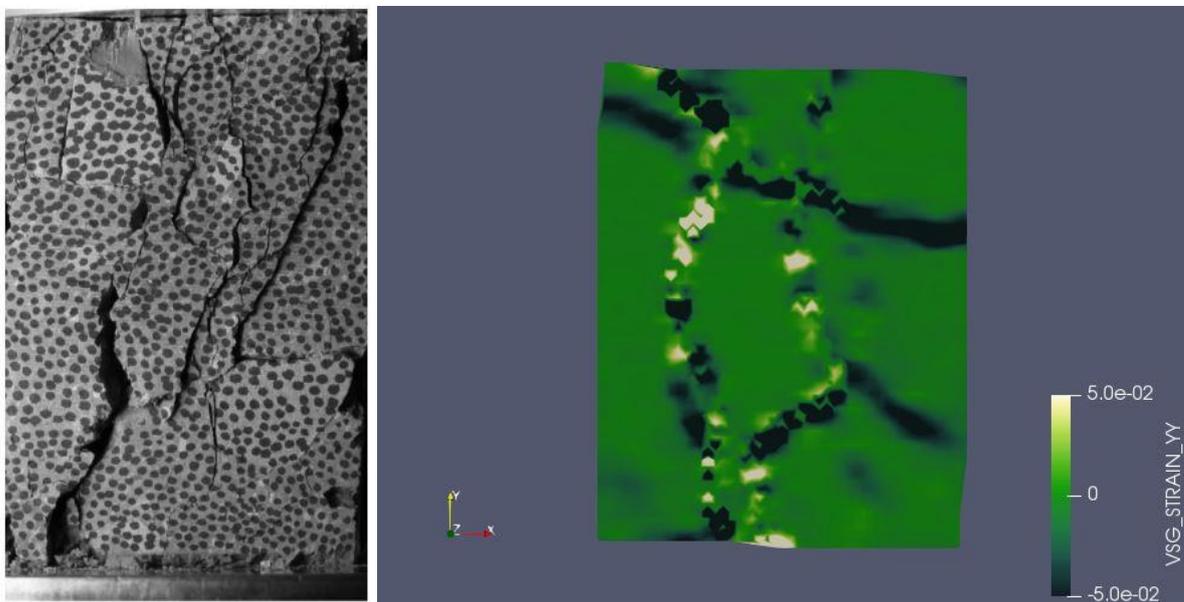


Figura 4.35. Concentrazione delle deformazioni assiali su Paraview (Faccia 1, Campione 3).

Si è osservato che le deformazioni si concentrano in determinati punti dove successivamente si presenta la formazione della frattura, e quindi non risultano uniformemente distribuite come ipotizzato per la determinazione del modulo di deformazione. Per descrivere la distribuzione delle deformazioni assiali nel tempo, è stata fatta una distinzione tra i campioni costituiti prevalentemente da matrice e i campioni con blocchi. Per quanto concerne i campioni con i blocchi, è stata osservata una formazione di fratture parallela all'asse principale e che segue la tortuosità delle inclusioni; la superficie di collegamento tra la matrice argillosa e i blocchi può essere vista come un piano di debolezza che influisce sulle proprietà meccaniche del materiale (Figura 4.36).



Figura 4.36. Formazione di una frattura principale verticale che segue la tortuosità delle inclusioni (Campione 3).

Nei campioni costituiti prevalentemente da matrice, invece, le deformazioni si concentrano nei piani che costituiscono la stratigrafia; le fratture subverticali seguono perfettamente l'andamento dei piani stratigrafici che possono essere considerati superfici di debolezza (Figura 4.37).



Figura 4.37. Formazione di fratture subverticali che seguono l'andamento dei piani stratigrafici (Campione 9).

5. Modellazione numerica della prova di compressione monoassiale

Nel presente capitolo verrà descritto il procedimento di lavoro utilizzato per una prova di compressione monoassiale su un provino di Mélange d'Oltrepò Pavese, costituito prevalentemente da matrice argillosa, eseguita mediante l'utilizzo del software agli elementi finiti RS2 (Rocscience Phase2). Dal momento che, nel capitolo precedente sono stati riportati i risultati di prove di compressione monoassiale realmente eseguite su campioni di Mélange d'Oltrepò Pavese, lo scopo di questa analisi, effettuata mediante software, è quello di validare i risultati, nonostante alcune incertezze sulle caratteristiche intrinseche del materiale. Le problematiche per poter delineare una corretta valutazione ed interpretazione del comportamento deformativo del materiale, sono dovute alla stima dell'angolo di resistenza al taglio (φ) e della coesione (c). Per la determinazione di questi parametri di resistenza meccanica, sono state eseguite delle prove di taglio diretto su campioni costituiti prevalentemente da matrice argillosa, ottenendo risultati con un elevato grado di incertezza. Data questa incertezza, ottenuti diversi valori di angolo di attrito andando a modificare il grafico delle prove di taglio con un criterio del tutto visivo e intuitivo e noto il valore di resistenza a compressione monoassiale, sono stati calcolati i relativi valori di coesione attraverso un'analisi a ritroso (back analysis). Dai risultati ottenuti dal software RS2, è stato possibile osservare che, per ciascuna coppia di valori di coesione ed angolo di attrito e con un incremento dello stato di sollecitazione, il provino di matrice subisce un'elevata deformazione; raggiungendo la completa plasticizzazione per un valore di carico pari alla resistenza a compressione monoassiale. L'analisi effettuata, attraverso la creazione di questo modello, oltre a validare i risultati ottenuti dalla prova di compressione realmente eseguita e, nonostante l'incertezza di alcuni parametri meccanici del materiale, potrà essere implementata in futuro, andando a considerare anche la presenza delle inclusioni all'interno del materiale.

5.1. Descrizione del software Rocscience RS2

RS2, conosciuto anche come Phase 2, è un software di analisi agli elementi finiti di modelli bidimensionali per applicazioni di Meccanica delle Terre e Meccanica delle Rocce. RS2 può essere impiegato per un ampio range di problemi di ingegneria geotecnica, inclusi: prove di compressione, scavi, stabilità di pendii, problemi di consolidazione, analisi di scavi in sotterraneo multistage e analisi del rivestimento di gallerie, oltre che problemi di analisi della stabilità in condizioni di moto di filtrazione, analisi probabilistiche e dinamiche. Possono essere semplicemente modellati e analizzati modelli complessi eseguiti in diverse fasi costruttive per riprodurre il relativo meccanismo di rottura progressivo. I materiali geotecnici possono essere rappresentati con diversi tipi di leggi costitutive: elastica, elastica perfettamente plastica, elastoplastica incrudente o rammollente. Inoltre possono essere impiegati diversi criteri di rottura: Mohr-Coulomb, Generalized Hoek-Brown e Cam-Clay. Il metodo degli elementi finiti (FEM, Finite Element Method) è una tecnica numerica capace di ottenere soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche. In generale, il metodo degli elementi finiti è il metodo di scelta per tutti i tipi di analisi per la meccanica strutturale (per esempio per il calcolo della deformazione e della tensione di corpi rigidi o la dinamica delle strutture). Il Metodo F.E.M. si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione di un dominio attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini bidimensionali). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (shape functions). Da notare che talvolta la funzione viene approssimata, e non necessariamente saranno i valori esatti della funzione quelli calcolati nei punti della mesh, ma i valori che forniranno il minor errore su tutta la soluzione. In altre parole si cerca la soluzione al problema nei nodi della mesh e la si approssima all'interno degli elementi della mesh stessa. L'esempio tipico di funzioni di forma, è quello che fa riferimento a funzioni polinomiali, sicché la soluzione complessiva del problema viene approssimata con una funzione polinomiale a pezzi. Il numero di coefficienti che identifica la soluzione su ogni elemento è dunque legato al grado del polinomio scelto. Questo, a sua volta, governa l'accuratezza della soluzione numerica trovata. Nella sua forma

originaria, e tuttora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi basati su leggi costitutive di tipo lineare; tipici i problemi di sforzi-deformazioni in campo elastico. Alcune soluzioni più raffinate consentono di esplorare il comportamento dei materiali anche in campo fortemente non lineare, ipotizzando comportamenti di tipo plastico o visco-plastico.

5.2. Descrizione della modellizzazione su RS2

Il modello è stato costruito facendo riferimento al Campione 9, costituito prevalentemente da matrice argillosa e di cui sono note le caratteristiche geometriche e, grazie alle prove di compressione monoassiale realmente eseguite, alcune delle caratteristiche meccaniche. In RS2 inizialmente occorre procedere alla definizione della geometria del problema. Preliminarmente, per ogni modello, occorre aprire un nuovo file all'interno del software RS2 e definire le seguenti impostazioni generali (Project Settings → General):

- Condizioni di deformazione piana: si assume che il provino si estenda infinitamente nella direzione normale alla sezione piana in analisi, ipotizzando nulle le deformazioni e gli spostamenti fuori dal piano. Il software considera come tensioni principali σ_1 e σ_3 , rispettivamente la massima e la minima sollecitazione nel piano; vengono forniti anche deformazioni e spostamenti nel piano.
- Tipologia di risolutore: la scelta del tipo di risolutore permette di determinare in che modo il programma risolve la matrice che rappresenta il sistema di equazioni definito dal modello. Sono disponibili tre metodi: eliminazione gaussiana, metodo del gradiente coniugato e metodo del gradiente coniugato preconditionato. Si sceglie di applicare la metodologia di eliminazione gaussiana, stabilita di default, che trasforma la matrice originaria in una matrice triangolare superiore per semplificare la risoluzione delle equazioni originarie.
- Unità di misura: metri per le lunghezze, kPa per le tensioni.
- Le opzioni Interazione solido-fluido, unità di misura del tempo e della permeabilità vengono lasciate pari a quelle di default non essendo importanti per il problema in esame.

Mediante il comando Project Settings è stato necessario specificare anche il numero di stages per la rappresentazione della prova di compressione monoassiale. Complessivamente, per simulare l'incremento di carico a cui è stato sottoposto il provino, sono stati considerati 11 stages; nel primo stage si considera il campione in campo elastico e in assenza di carico, mentre nei successivi 10 stages il campione si ritiene in campo elasto-plastico e attraverso l'incremento di carico si valuta l'andamento del comportamento deformativo del materiale fino a rottura.

Determinazione del modello geometrico, mesh e vincoli

La geometria del modello viene definita utilizzando delle polilinee di delimitazione (Boundaries→Add External), assegnando le reali dimensioni del provino in esame. Dopo aver definito i confini del problema in esame, è stata definita la mesh, la cui qualità influenza in modo importante la convergenza del modello e la bontà dei risultati. Basandosi sulla geometria del problema, il programma genera una discretizzazione in segmenti, a partire dai quali avviene la realizzazione degli elementi finiti. Per la risoluzione del problema, è stata scelta una mesh costituita da elementi triangolari a tre nodi (Mesh→Mesh Setup). Per ottenere una più accurata interpretazione dei risultati, la mesh è stata infittita su tutta la superficie del provino in esame (Mesh→Increase Density). Le condizioni al contorno per la risoluzione delle equazioni che governano il problema agli elementi finiti, sono fissate in termini di spostamenti. Per simulare al meglio una prova di compressione monoassiale, i bordi laterali e la parte superiore sono stati lasciati liberi, mentre lungo il bordo inferiore sono state applicate delle cerniere con agli spigoli dei carrelli, con possibilità di traslazione lungo la direzione orizzontale (Figura 5.1).

Assegnazione delle proprietà dei materiali e delle condizioni di carico

Il comportamento meccanico del modello è stato definito assegnando le proprietà meccaniche e la legge costitutiva al materiale in esame. Le proprietà meccaniche sono state determinate attraverso l'esecuzione di prove di compressione monoassiale, con tecnica di correlazione digitale di immagini, e di prove di taglio diretto. Di seguito è riportata la Tabella 5.1 relativa alle proprietà meccaniche del materiale, assegnate al modello nel presente studio.

Campione 9	
Modulo di Young E [kPa]	1500000
Resistenza a compressione Monoassiale C _o [kPa]	2200
Peso specifico γ [kN/m ³]	21
Coefficiente Poisson ν [-]	0,3
Resistenza a trazione σ_t [kPa]	220
Angolo d'attrito φ [°]	20, 27, 34, 38
Coesione c [kPa]	780, 680, 595, 540

Tabella 5.1. Proprietà meccaniche del Campione 9 di Mélange d'Oltrepò Pavese.

Il coefficiente di Poisson (ν) è stato ipotizzato, mentre la resistenza a compressione monoassiale (C_o) e il modulo di deformazione (E) sono stati stimati attraverso la prova di compressione monoassiale con la tecnica di correlazione digitale di immagini. La determinazione dei parametri di coesione (c) e di angolo di attrito (φ), è stata eseguita, data l'incertezza dei risultati delle prove di taglio diretto, attraverso un'analisi a ritroso (back analysis). Per il materiale in esame, come già detto precedentemente, si è assunto un comportamento elastico dell'intero modello al primo stadio, mentre per i successivi stadi è stato considerato un comportamento elasto-plastico. Secondo la legge costitutiva elastica perfettamente plastica per tensioni minori della tensione di snervamento il comportamento è elastico lineare (la deformazione dipende linearmente dalla variazione di tensione); raggiunta la tensione di snervamento, la deformazione plastica si sviluppa indefinitamente sotto una tensione costante. Tale legge ha il vantaggio di mostrare la capacità del materiale di deformarsi per carichi superiori a quello di snervamento, non richiedendo la conoscenza di alcun parametro aggiuntivo rispetto al caso puramente elastico. Nell'analisi effettuata, infatti, sono stati assunti valori di angolo di attrito (φ) e di coesione (c) uguali sia per il picco che per il residuo; mentre l'angolo di dilatazione è stato assunto nullo. Il criterio di resistenza adottato nel caso in esame corrisponde a quello di Mohr-Coulomb:

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

dove τ indica la resistenza al taglio del materiale, σ' il livello tensionale agente, c' la coesione e φ' l'angolo di resistenza al taglio.

Le condizioni iniziali di sforzo sono state definite con una distribuzione di tipo gravitazionale, il programma permette di rilevare automaticamente la superficie del provino e definire lo stato di sforzo verticale in funzione del peso del materiale assegnato e dell'altezza del provino (Loading → Field stress → Gravity). Dopo aver definito il comportamento del modello, ovvero dopo aver assegnato una legge costitutiva al materiale e aver adottato un criterio di rottura (Mohr-Coulomb), è stato possibile applicare il carico uniformemente distribuito (Loading → Distributed Load), per simulare l'incremento di carico della prova di compressione monoassiale. L'intervallo di carico è stato infittito in prossimità del valore di resistenza a compressione, in modo tale da poter valutare al meglio il comportamento deformativo del provino. Dopo aver completato la costruzione del modello (Figura 5.1), è stato possibile procedere con l'analisi e l'interpretazione dei risultati.

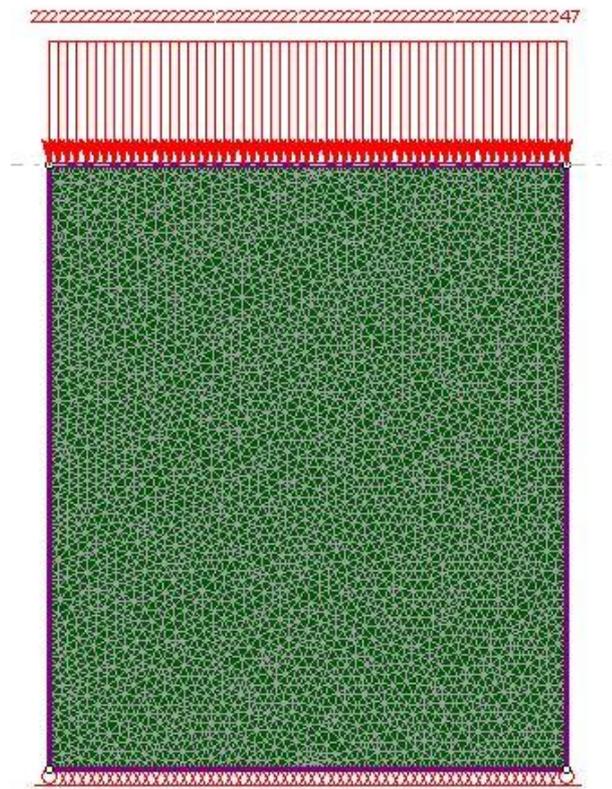


Figura 5.1. Modello per la simulazione di una prova di compressione su RS2 (Campione 9).

5.3. Analisi dei risultati della modellazione numerica

Nel presente lavoro sono state effettuate alcune simulazioni, andando a variare i valori di coesione e di angolo di attrito del materiale, affinché il valore di resistenza a compressione monoassiale risultasse uguale a quello della prova realmente eseguita. Per la valutazione del parametro di coesione, vista l'incertezza dei risultati ottenuti tramite prova di taglio diretto, è stata effettuata un'analisi a ritroso (back analysis), noto il valore di resistenza a compressione monoassiale, facendo variare con criterio il valore di angolo di resistenza al taglio; attraverso questa analisi a ritroso, sono state ottenute quattro coppie diverse di valori di coesione e di angolo di resistenza al taglio (Figura 5.2).

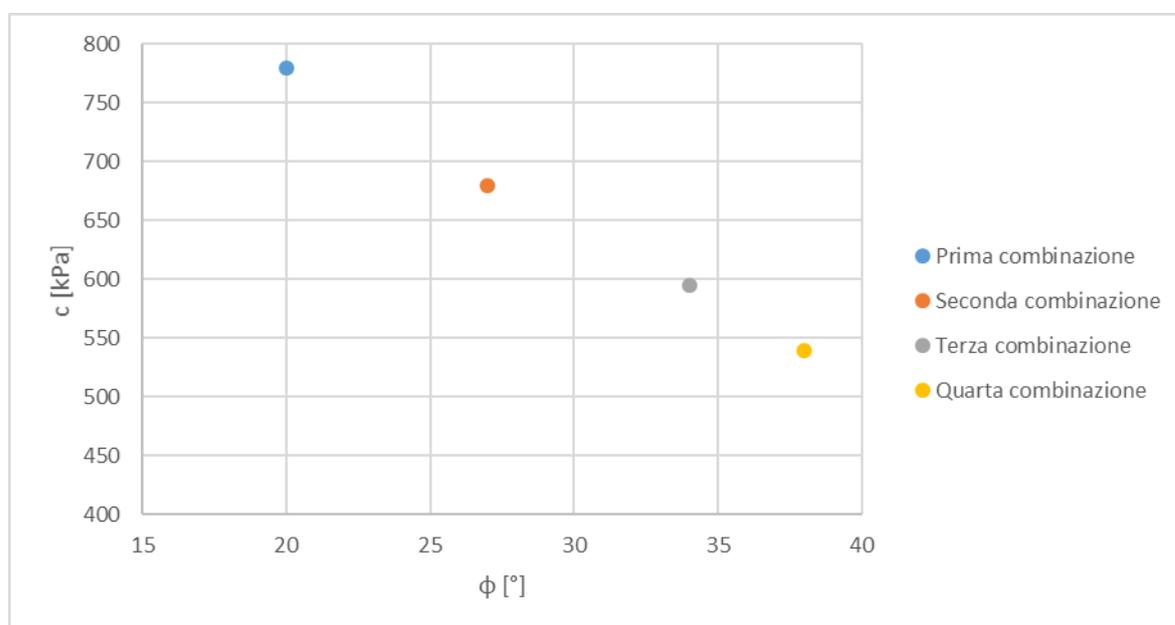


Figura 5.2. Combinazioni di valori di coesione e di angolo di resistenza al taglio ottenute tramite back analysis.

Terminata la computazione del modello analizzato, se questa è andata a buon fine, è possibile investigare graficamente tensioni agenti, deformazioni impresse ed elementi plasticizzati grazie a differenti scale di intensità di colore sul modello, a cui è associata una legenda. Dopo aver verificato la congruenza generale dei risultati forniti dal software con quelli attesi nei vari stages, si focalizza l'attenzione sull'andamento delle massime deformazioni di taglio, che definiscono la posizione della superficie di rottura che si genera all'interno del campione. Nelle figure sottostanti (Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8), è stato riportato l'andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito.

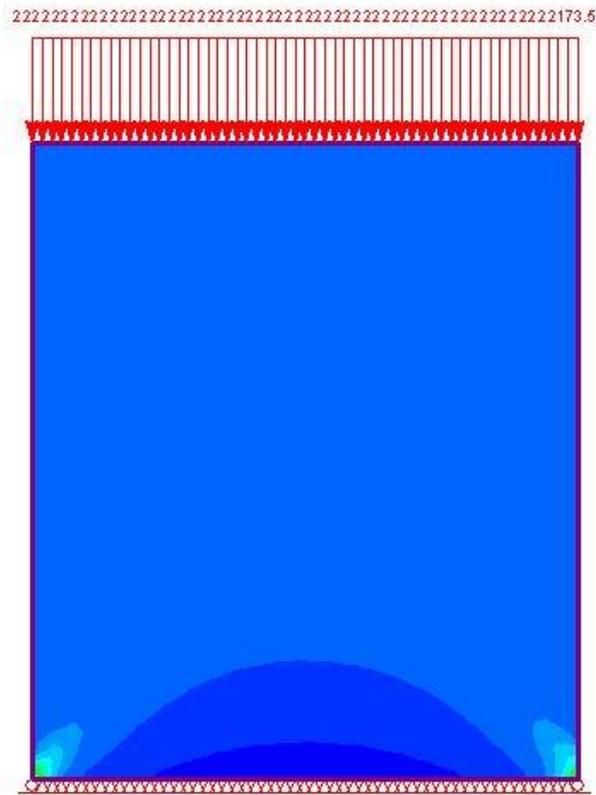


Figura 5.3. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).

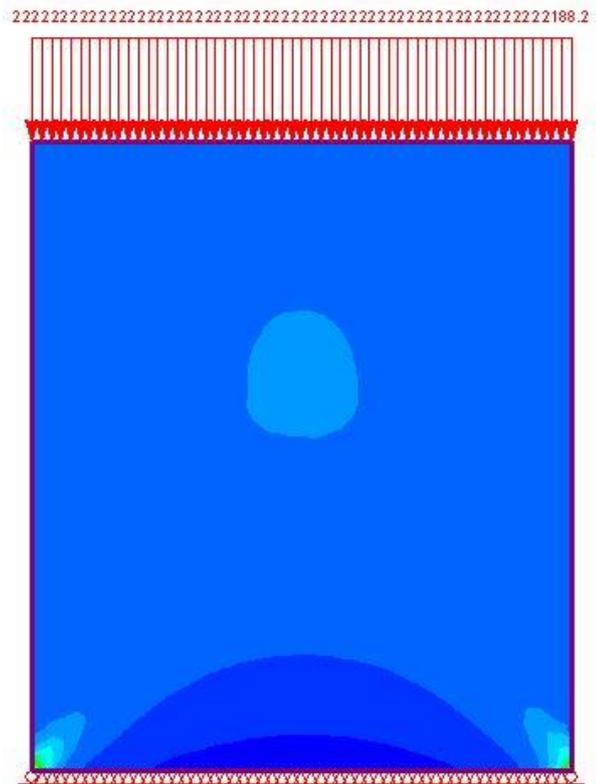


Figura 5.4. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).

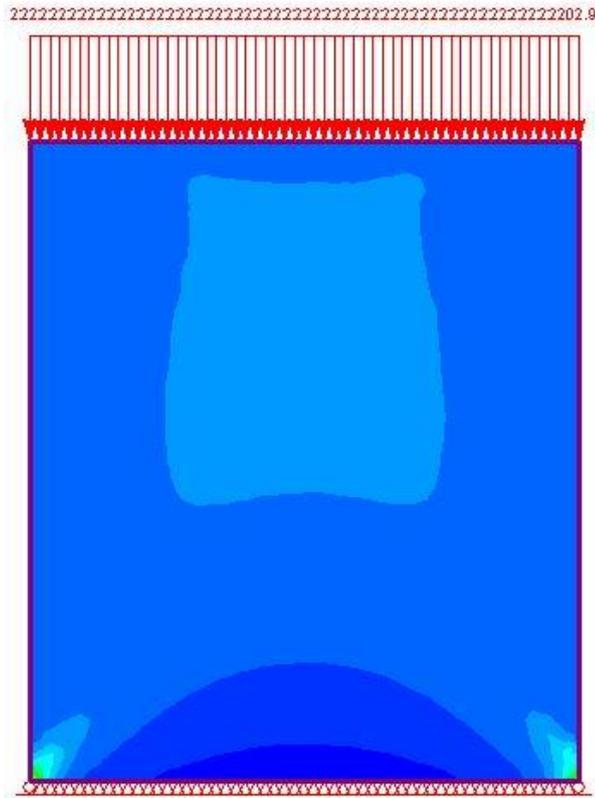


Figura 5.5. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).

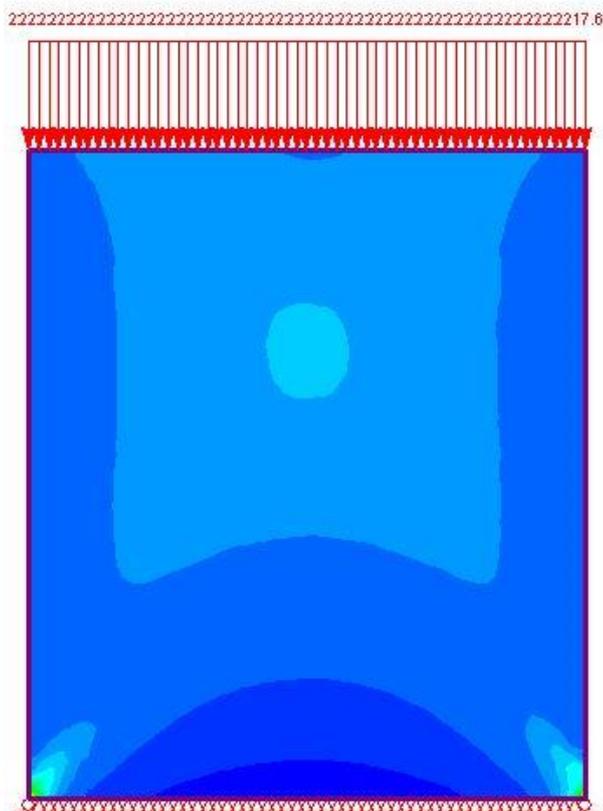


Figura 5.6. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).

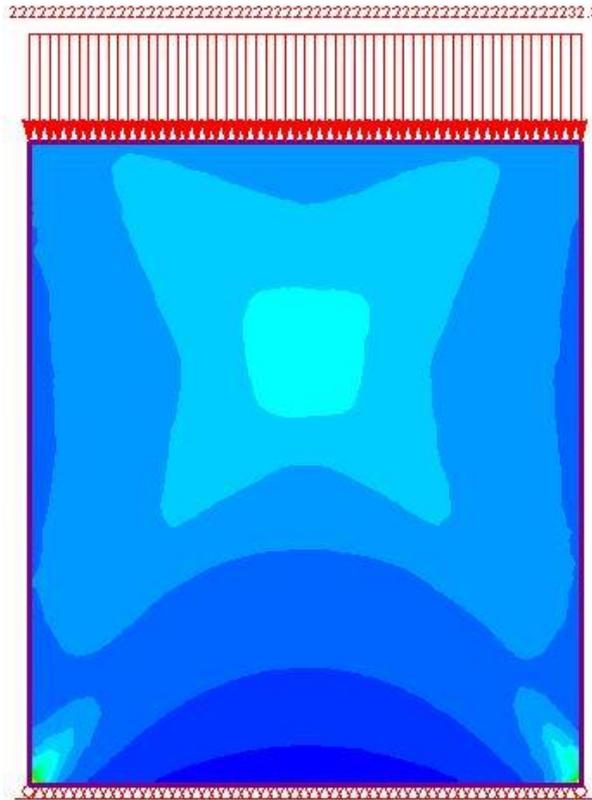


Figura 5.7. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).

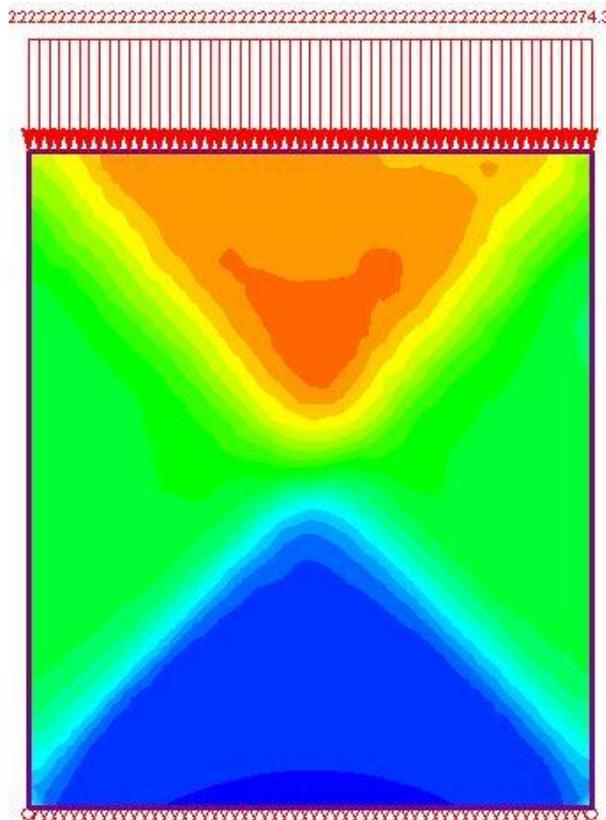


Figura 5.8. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 12, Distributed Loads->2274 kN).

Attraverso i risultati ottenuti dal software RS2, è stato possibile osservare anche che, per una determinata coppia di valori di coesione ed angolo di attrito e con un incremento dello stato di sollecitazione, il provino di matrice subisce un 'elevata deformazione; raggiungendo la completa plasticizzazione per un valore di carico pari alla resistenza a compressione monoassiale (Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15).

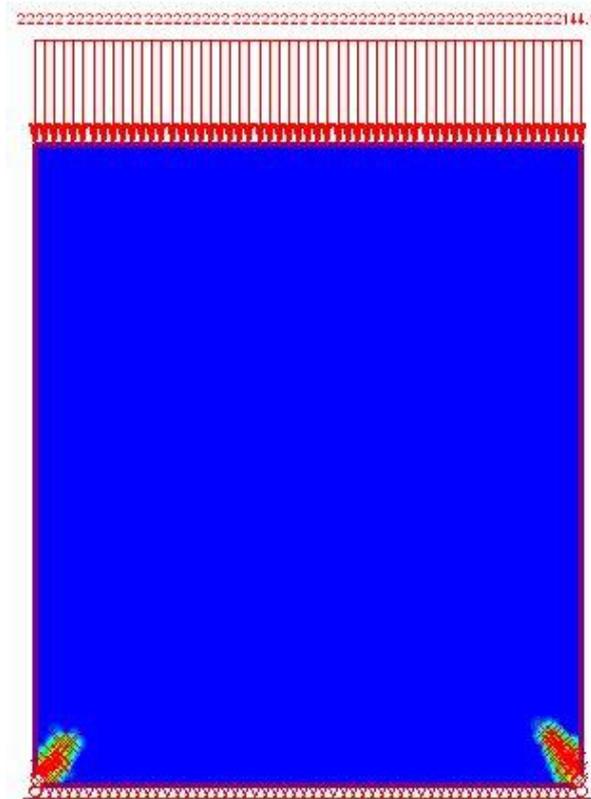


Figura 5.9. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 5, Distributed Loads->2159 kN).

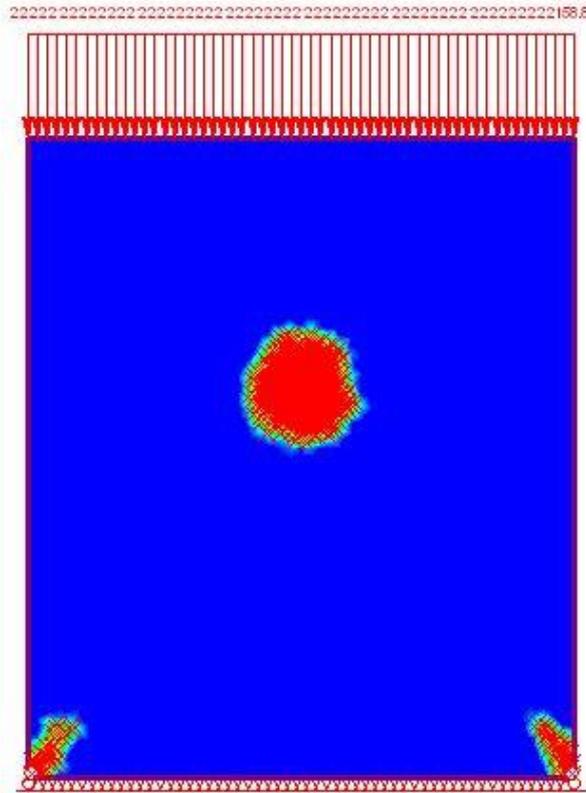


Figura 5.10. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2174 kN).

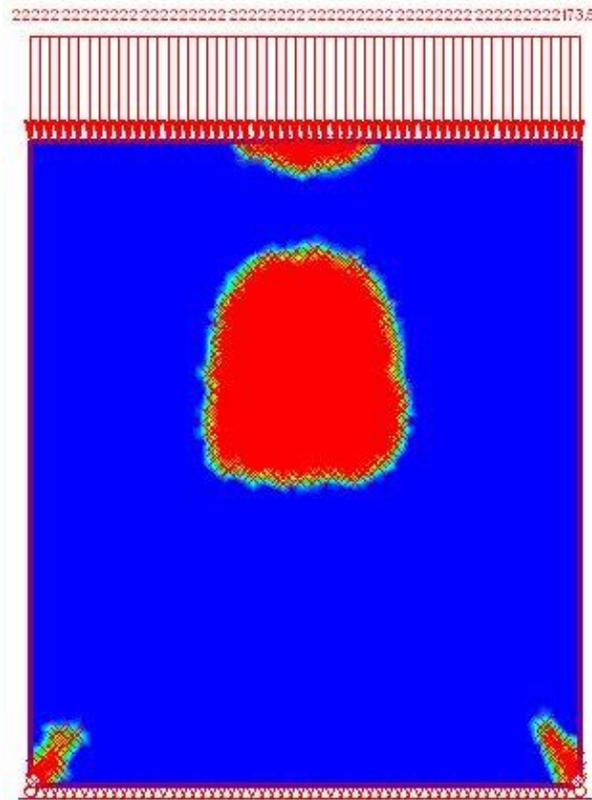


Figura 5.11. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).

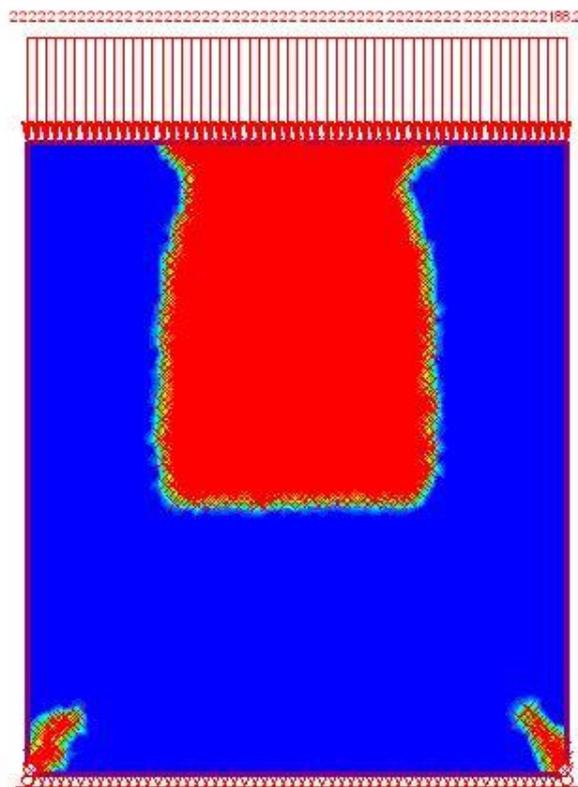


Figura 5.12. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).

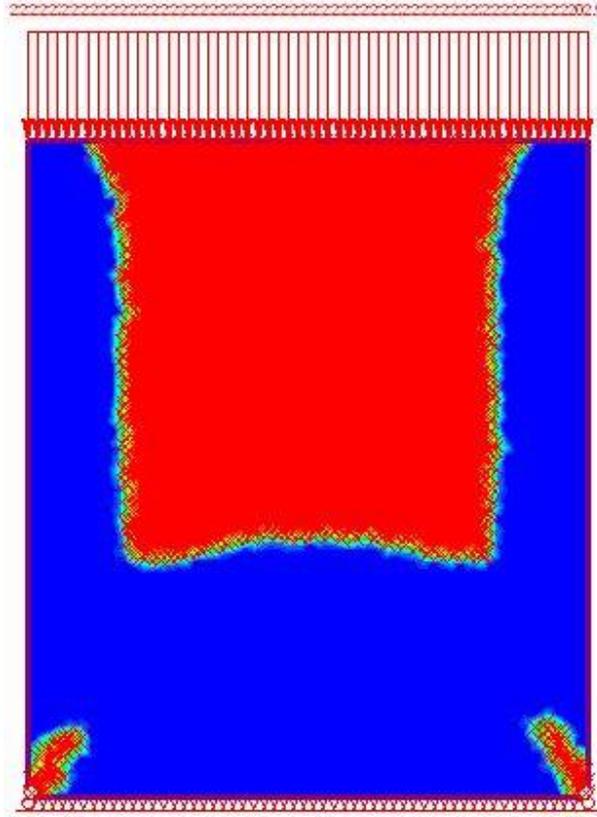


Figura 5.13. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).

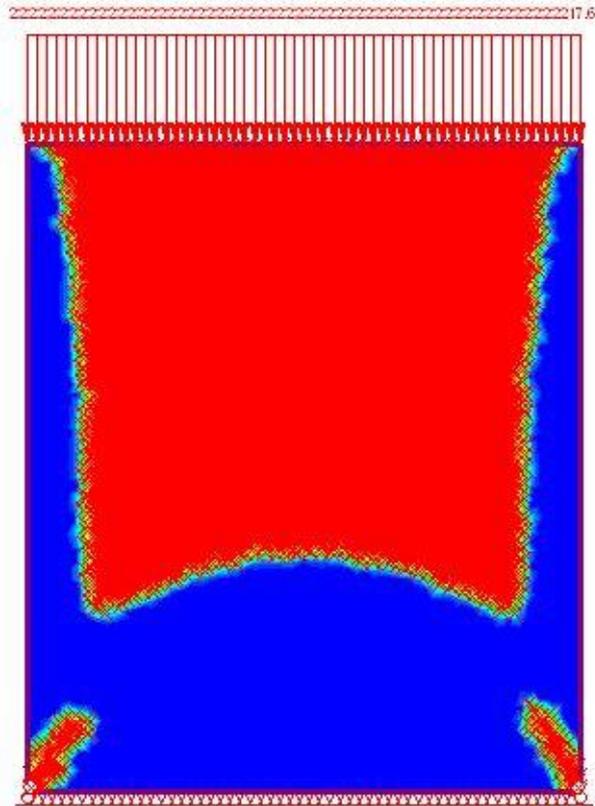


Figura 5.14. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).

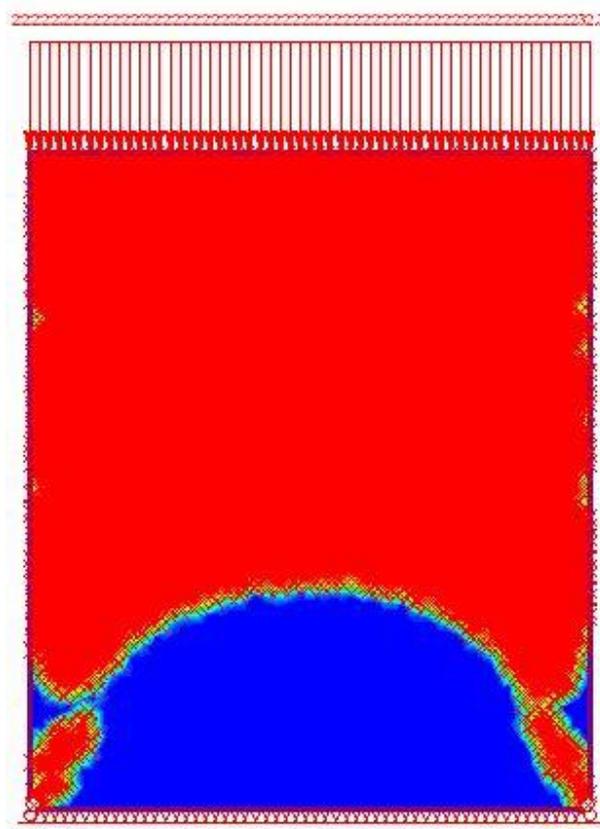


Figura 5.15. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).

Grazie ai risultati ottenuti mediante il software RS2, è stato possibile osservare l'evoluzione delle massime deformazioni di taglio, che definiscono la posizione della superficie di rottura; inizialmente si sono sviluppate nella parte centrale del campione e successivamente, con l'incremento del carico applicato, si sono diffuse su tutta la superficie. Per quanto riguarda l'evoluzione degli elementi plasticizzati, è stato osservato un andamento molto simile alle massime deformazioni di taglio, ma con un iniziale interessamento della porzione superiore del campione. Inoltre, nelle figure sottostanti, è stato riportato anche l'andamento della massima deformazione di taglio e degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20, Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29, Figura 5.30).

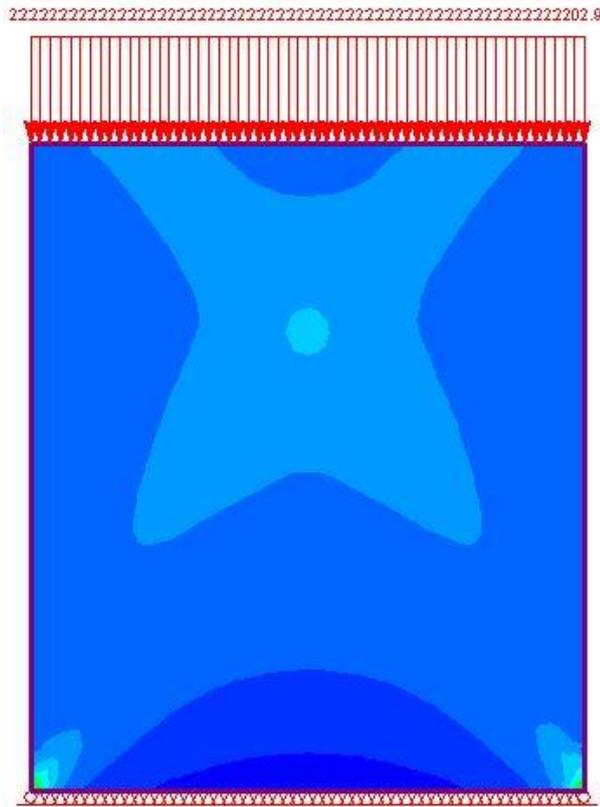


Figura 5.18. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).

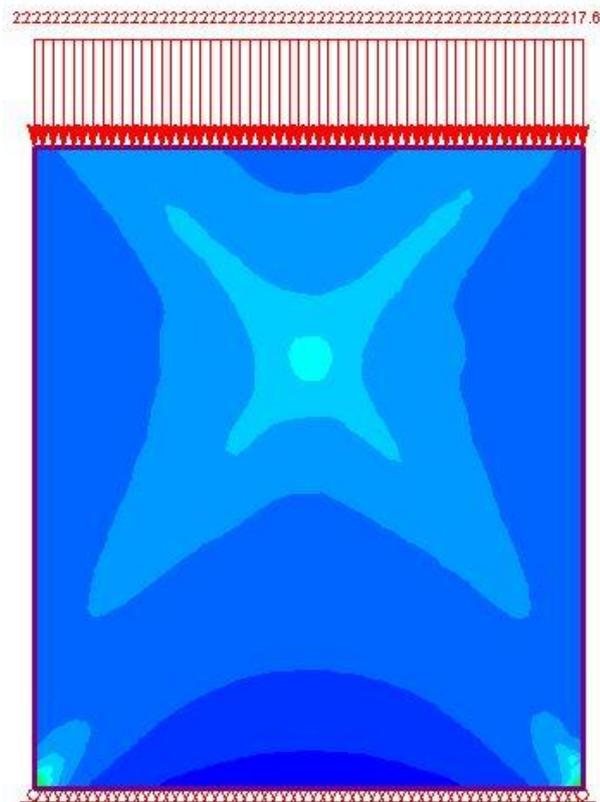


Figura 5.19. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).

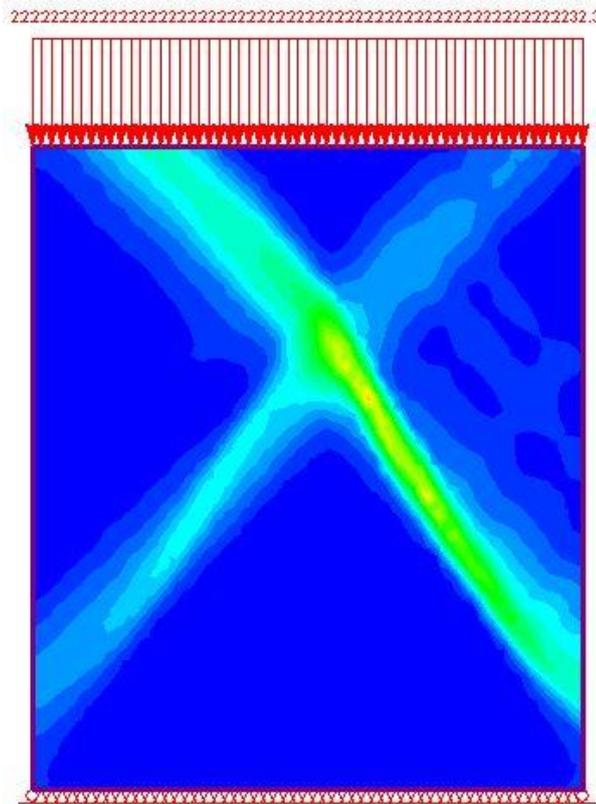


Figura 5.20. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).

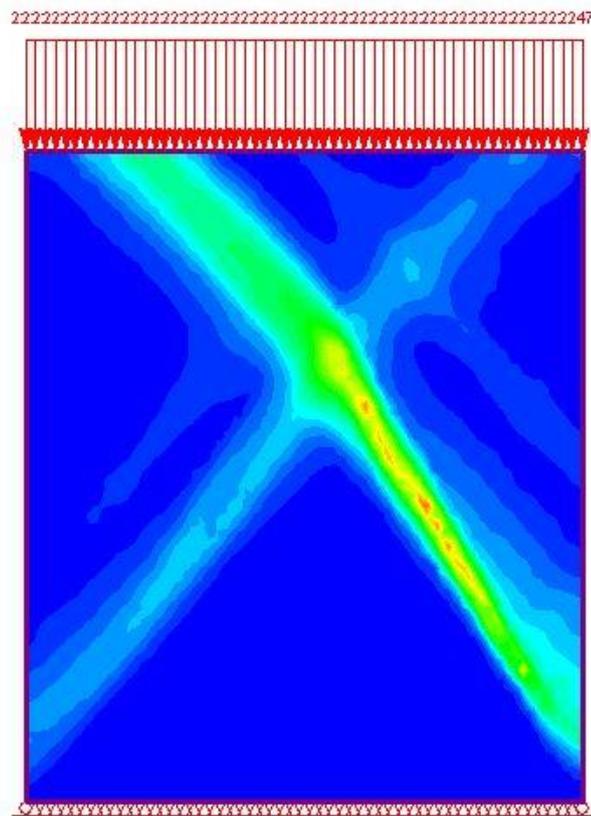


Figura 5.21. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).

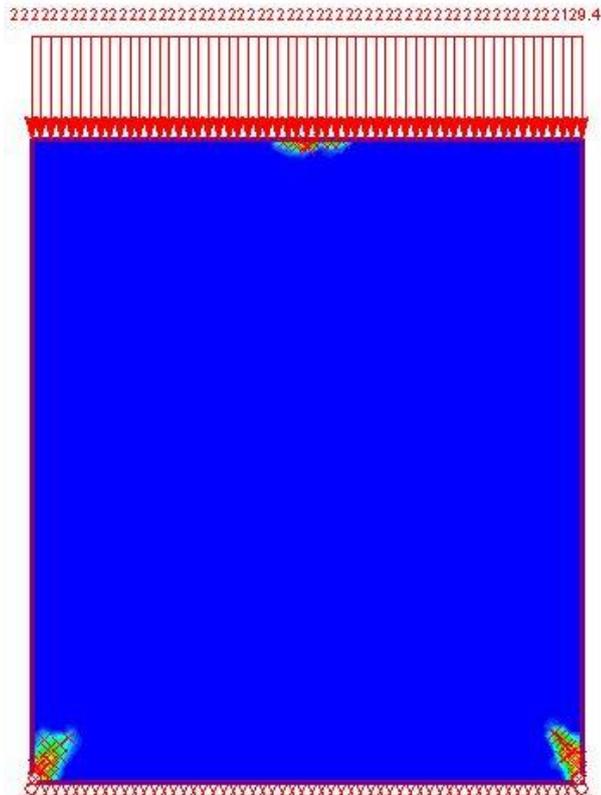


Figura 5.22. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 3, Distributed Loads->2129 kN).

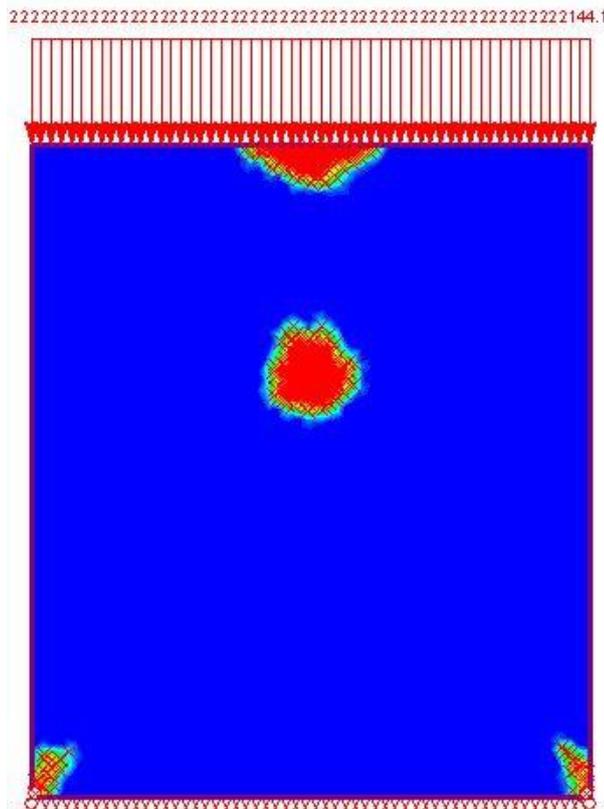


Figura 5.23. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 4, Distributed Loads->2144 kN).

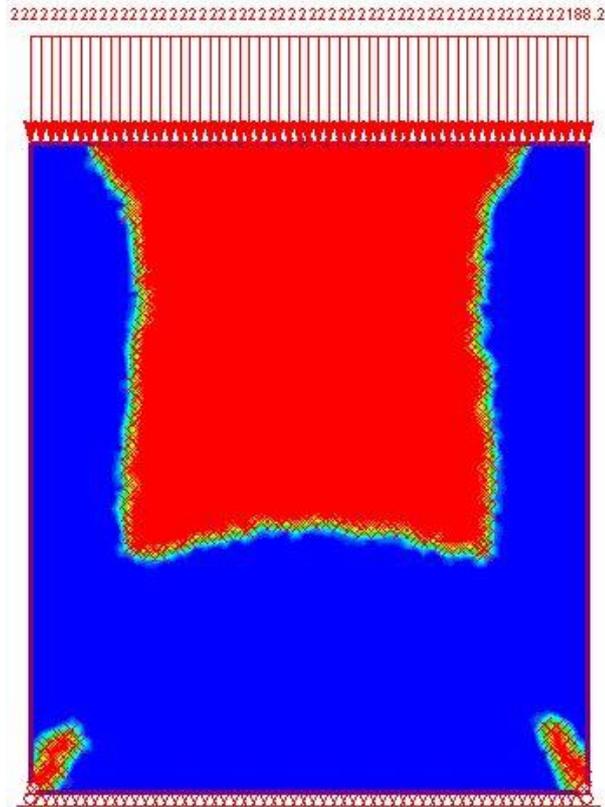


Figura 5.26. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).

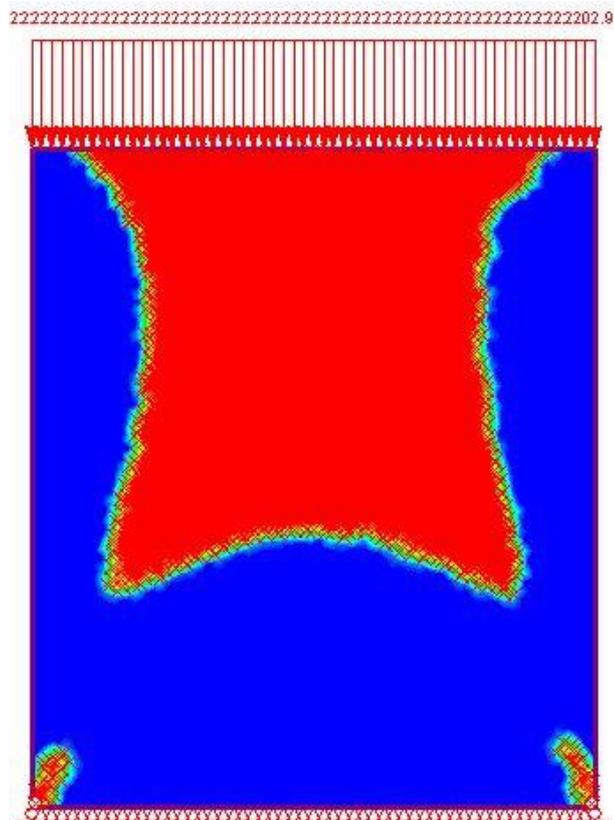


Figura 5.27. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).

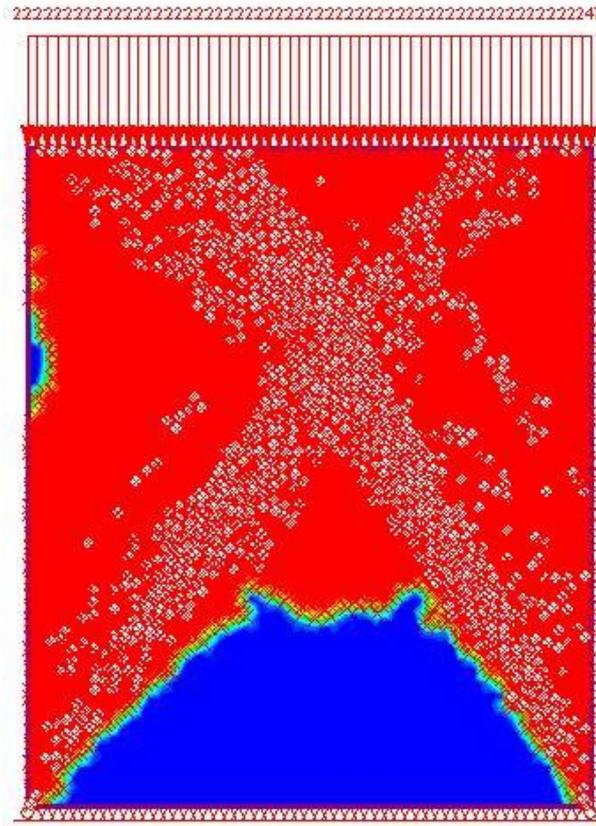


Figura 5.30. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).

A differenza della prima combinazione, in questo caso le deformazioni massime di taglio, dopo un iniziale incremento nella parte centrale del campione, si sono sviluppate obliquamente andando a rappresentare una vera e propria superficie di rottura. Al contrario, per quanto riguarda l'evoluzione degli elementi plasticizzati, è stato osservato un andamento molto simile alla prima combinazione. I risultati ottenuti per le successive combinazioni dei valori di coesione e di angolo d'attrito, ovvero l'andamento della massima deformazione di taglio e l'andamento degli elementi plasticizzati, sono riportati in Allegato A.

Conclusioni

L'obiettivo del presente elaborato di tesi è stato quello di eseguire un'accurata analisi e un'adeguata caratterizzazione meccanica del Mélange d'Oltrepò Pavese per poter avere una più vasta conoscenza delle sue proprietà e per evitare ostacoli nella fase di progettazione ed esecuzione di opere ed interventi di natura ingegneristica. Dopo una descrizione generale delle caratteristiche principali delle formazioni complesse, partendo dalla loro definizione e classificazione fino alla trattazione delle principali problematiche legate a tali tipologie di materiale, il primo passo è stato quello di delineare le caratteristiche geologiche del materiale in esame, con riferimento ad alcuni articoli presenti in letteratura (Festa 2015, Panini et al. 2002). In termini geologici il Mélange d'Oltrepò Pavese, prelevato in un'area dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino, può essere definito come un'argilla eterometrica ad assetto caotico, caratterizzata dall'alternanza o dalla sovrapposizione di due litozone differenti. La litozona inferiore è costituita da una matrice argillitica rossastra, caratterizzata da una fissilità pervasiva, da una scagliosità e organizzata attraverso superfici planari irregolari tendenzialmente tra loro subparallele. La litozona superiore, invece, è costituita da una matrice argillosa grigia inglobante clasti e blocchi litoidi di natura variabilissima (areniti, calcari, ecc.). La caratterizzazione del Mélange d'Oltrepò Pavese ha previsto, oltre a un'attenta e accurata descrizione visiva, l'esecuzione di alcune prove di laboratorio come la determinazione del contenuto d'acqua, dei limiti di Atterberg e della distribuzione granulometrica. Essendo un materiale costituito da una matrice argillosa molto compatta con all'interno inclusioni di roccia, la procedura per la caratterizzazione ha richiesto modifiche rispetto alle procedure standard per un terreno. Attraverso i risultati ottenuti dalle prove in laboratorio, è stato possibile attribuire al materiale un contenuto d'acqua relativamente basso (circa del 5%); inoltre, tramite la determinazione dei valori dei limiti di consistenza, è stato possibile affermare che il materiale fine, costituente la matrice del Mélange d'Oltrepò Pavese, è caratterizzato da una medio-alta plasticità con elevati valori dell'Indice di consistenza. Infine, attraverso un'analisi granulometrica, è stata determinata la composizione dimensionale delle particelle costituenti il materiale. Nel capitolo successivo, dopo aver verificato le proprietà di autosomiglianza e indipendenza di scala di un mélange d'Oltrepò Pavese, sulla base delle procedure operative eseguite da Medley (2002), è stata effettuata una valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) lineare, areale e reale. I valori della percentuale volumetrica lineare e areale sono risultati molto simili tra loro (circa il 16%), mentre il valore della VBP reale, dato dal rapporto

tra il volume dei blocchi e il volume totale del campione, è risultato pari al 7%. Nonostante la possibilità di alcuni errori nella valutazione del volume, questo valore è stato considerato abbastanza corretto, ipotizzando una sovrastima della percentuale volumetrica dei blocchi areale e lineare. Successivamente, per lo studio del comportamento deformativo del materiale e quindi per la determinazione del modulo di deformazione, si è deciso di sottoporre dei campioni di Mélange d’Oltrepò Pavese e un campione di boiaccia cementizia, di caratteristiche note, ad una prova di compressione monoassiale. Oltre alla classica apparecchiatura per la prova di compressione monoassiale, è stato associato un ulteriore sistema di monitoraggio per la valutazione delle deformazioni locali, ossia la correlazione digitale di immagini (Digital Image Correlation, DIC). Questa tecnica ottica ha permesso di stimare lo stato deformativo di un’intera superficie attraverso la correlazione di immagini e, tramite un approccio statistico, ha permesso di valutare il modulo tangente di deformazione dei campioni analizzati, che oscilla da 1 a 2 GPa circa. Confrontando il valore di modulo di deformazione del campione di boiaccia cementizia (circa 12 GPa) con i dati presenti in letteratura (Bottani et al. 2014), è stato possibile attribuire alla tecnica di correlazione digitale di immagini una certa validità, seppure con qualche incertezza. Infine, una modellazione numerica della prova di compressione monoassiale, eseguita mediante l’utilizzo del software agli elementi finiti RS2 (Rocscience Phase2), ha consentito la validazione dei risultati delle prove di compressione realmente eseguite, nonostante alcune incertezze sulle caratteristiche intrinseche del materiale (angolo di attrito (φ) e coesione (c)). Tenendo conto di questa incertezza, si sono ipotizzati diversi valori di angolo di attrito e, tramite un’analisi a ritroso (back analysis), si sono calibrati i corrispondenti valori di coesione in modo che il modello presentasse una resistenza a compressione monoassiale compatibile con quella misurata. L’analisi effettuata, attraverso la creazione di questo modello, oltre a validare i risultati ottenuti dalla prova di compressione realmente eseguita, potrà essere implementata in futuro, andando a considerare anche la presenza delle inclusioni all’interno del materiale.

Indice delle figure

Figura 1.1. Classificazione delle Formazioni Strutturalmente Complesse proposta dall'Associazione Geotecnica Italiana (1979).	6
Figura 1.2. Classificazione GSI per ammassi complessi (Hoek et al., 2005).....	7
Figura 1.3. Mappatura su scala mondiale dei mélanges (Medley, 1994).	8
Figura 1.4. Conformazione strutturale del Franciscan Complex (Medley, 1994).	9
Figura 1.5. Caratteristiche tessiturali tipiche dei bimrock (Wakabayashi & Medley, 2004).	11
Figura 1.6. Confronto tra la massima dimensione osservata d_{mod} e il diametro di un blocco (Medley, 2001).	13
Figura 1.7. Confronto tra provini con differenti percentuali volumetriche e differente orientazione dei blocchi.	13
Figura 1.8. Diagramma della distribuzione dimensionale dei blocchi (Medley, 2001).	14
Figura 1.9. Valutazione della proporzione volumetrica a partire da fori di sondaggio (Medley, 2001).	15
Figura 1.10. Istogramma delle frequenze in scala bilogaritmica della dimensione delle inclusioni per due aree di misura differenti su un affioramento di Franciscan mélange (Medley-Lindquist, 1995). ..	17
Figura 1.11. Istogramma normalizzato per il Franciscan mélange (Medley-Lindquist, 1995).	18
Figura 1.12. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi in un Franciscan mélange per differenti scale di osservazione (Medley, 2002).	19
Figura 1.13. Influenza della scala di interesse sulla soglia blocco-matrice in un'area interessata dalla costruzione di una strada e lavori di scavo (Medley,2001).	20
Figura 1.14. Relazione sperimentale tra proporzione volumetrica dei blocchi e angolo di attrito (Medley, 1994).	21
Figura 1.15. Incertezza nella stima della frazione volumetrica dei blocchi in funzione della lunghezza della misura lineare (Medley,2001).	23
Figura 1.16. Rappresentazione schematica dei campioni (Lindquist, 1994).	25
Figura 1.17. Frazioni dei materiali per la realizzazione dei campioni artificiali (Lindquist, 1994).	26
Figura 1.18. Istogrammi delle frequenze relative delle distribuzioni di lunghezza della corda e della dimensione reale dei blocchi (Medley, 2002).	27
Figura 1.19. Risultati dei test di compressione triassiale in termini di coesione e percentuale volumetrica delle inclusioni (Lindquist, 1994).	28
Figura 1.20. Risultati dei test di compressione triassiale in termini di angolo di attrito e percentuale volumetrica delle inclusioni (Lindquist, 1994).	29
Figura 1.21. Campione sottoposto a stato di deformazione uniforme a sinistra ed a stato di tensione uniforme a destra.	30
Figura 1.22. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (0°) (Lindquist, 1994).	31
Figura 1.23. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (30°) (Lindquist, 1994).	31
Figura 1.24. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (60°) (Lindquist, 1994).	32
Figura 1.25. Modulo di deformazione in funzione della percentuale volumetrica e dell'orientazione dei blocchi (90°) (Lindquist, 1994).	32

Figura 1.26. Metodo per la determinazione della percentuale volumetrica mediante linee di scansione (Medley, 2002).....	34
Figura 1.27. Istogramma della distribuzione tridimensionale dei blocchi (barre nere) per 4 campioni e distribuzione della lunghezza della corda (Medley, 2002).....	35
Figura 1.28. Andamento delle distribuzioni granulometriche della lunghezza della corda e della dimensione dei blocchi per i 4 modelli in funzione della frequenza relativa cumulata (Medley, 2002).	36
Figura 1.29. Distribuzione delle principali Unità tettoniche e Successioni stratigrafiche dell'Appennino nordoccidentale (Panini et al., 2002).....	37
Figura 1.30. Affioramento di Mélange d'Oltrepò Pavese nell'area dell'Appennino vogherese.	38
Figura 2.1. Dieci campioncini per la determinazione del contenuto d'acqua.	42
Figura 2.2. Accurata pesatura di un campioncino attraverso una bilancia di precisione.	42
Figura 2.3. Essiccatura in un forno alla temperatura di 100°C per circa 24 ore.	43
Figura 2.4. Operazione di setacciatura (Setaccio ASTM 60).....	43
Figura 2.5. Preparazione del materiale per la determinazione del limite liquido.....	45
Figura 2.6. Prova con il Cucchiaino di Casagrande per la determinazione del limite liquido.	45
Figura 2.7. Esempio del diagramma per la determinazione del limite liquido.....	46
Figura 2.8. Prova per la determinazione del limite plastico.	47
Figura 2.9. Setacciatura su tavola vibrante.....	48
Figura 2.10. Analisi per sedimentazione (aerometria) di particelle con diametro inferiore a 0,075 mm.	49
Figura 2.11. Curva granulometrica del campione 1.	50
Figura 2.12. Curva granulometrica del campione 2.	50
Figura 2.13. Curva granulometrica del campione 3.	51
Figura 2.14. Curva granulometrica del campione 4.	51
Figura 3.1. Faccia 1 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese.....	54
Figura 3.2. Faccia 2 del campione di Mélange dell'Oltrepò Pavese.....	54
Figura 3.3. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (100%) in funzione della massima dimensione osservabile.	55
Figura 3.4. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (100%) in funzione della massima dimensione osservabile.	56
Figura 3.5. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (25%) in funzione della massima dimensione osservabile.	57
Figura 3.6. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (25%) in funzione della massima dimensione osservabile.	58
Figura 3.7. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (6,25%) in funzione della massima dimensione osservabile.	59
Figura 3.8. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (6,25%) in funzione della massima dimensione osservabile.	60
Figura 3.9. Classificazione delle inclusioni della Faccia 1 (1,56%) in funzione della massima dimensione osservabile.	61
Figura 3.10. Classificazione delle inclusioni della Faccia 2 (1,56%) in funzione della massima dimensione osservabile.	62
Figura 3.11. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 1.....	63

Figura 3.12. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 2.....	64
Figura 3.13. Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, Faccia 1 e Faccia 2.....	65
Figura 3.14. Andamento della percentuale lineare cumulata al variare della lunghezza di campionamento $N \cdot d_{max}$ (Medley,1997).....	66
Figura 3.15. Rappresentazione delle linee di scansione (Faccia 1).....	67
Figura 3.16. Rappresentazione delle linee di scansione (Faccia 2).....	67
Figura 3.17. Percentuale lineare cumulata in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 1).....	69
Figura 3.18. Percentuale lineare cumulata media in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 1).....	69
Figura 3.19. Percentuale lineare cumulata in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 2).....	70
Figura 3.20. Percentuale lineare cumulata media in funzione della lunghezza di campionamento (Faccia 2).....	70
Figura 4.1. Pattern di punti realizzato su un campione di mélange per l'analisi con la tecnica DIC (Digital Image Correlation).....	73
Figura 4.2. Software DICe (Digital Image Correlation engine) per la correlazione digitale di immagini.	74
Figura 4.3. Strumentazione per la prova di compressione monoassiale con la tecnica DIC (Digital Image Correlation).	75
Figura 4.4. Dimensioni medie delle due facce del campione A.....	76
Figura 4.5. Dimensioni medie delle due facce del campione 3.....	77
Figura 4.6. Dimensioni medie delle due facce del campione 3.....	77
Figura 4.7. Dimensioni medie delle due facce del campione 4G.....	78
Figura 4.8. Dimensioni medie delle due facce del campione 4P.....	78
Figura 4.9. Schermata Excel del file fornito dalla macchina.	79
Figura 4.10. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione A).	81
Figura 4.11. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 3).	82
Figura 4.12. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 9).	83
Figura 4.13. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 4G).....	84
Figura 4.14. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione 4P).	85
Figura 4.15. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati forniti dalla macchina (Campione Boiaccia cementizia).	86
Figura 4.16. Maglia regolare di punti (Faccia 1, Campione 3).	87
Figura 4.17. Diagramma Sforzo-Deformazione con i valori di deformazione forniti dal software DICe (Faccia 1, Campione 3).	88
Figura 4.18. Diagramma Sforzo-Spostamento con i valori di spostamento forniti dal software DICe (Faccia 1, Campione 3).	89
Figura 4.19. Linearizzazione dei valori di carico-spostamento di due punti successivi (Faccia 1, Campione 3).....	90

Figura 4.20. Diagramma Sforzo-Deformazione ottenuto dagli spostamenti verticali linearizzati (Faccia 1, Campione 3).....	90
Figura 4.21. Superficie analizzata (Faccia 1, Campione 3).....	91
Figura 4.22. Distribuzioni normali standard delle deformazioni assiali dei primi tre fotogrammi (Faccia 1, Campione 3).....	92
Figura 4.23. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione A).....	93
Figura 4.24. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione A).....	94
Figura 4.25. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 3).....	95
Figura 4.26. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 3).....	96
Figura 4.27. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 9).....	97
Figura 4.28. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 9).....	98
Figura 4.29. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 4G).....	99
Figura 4.30. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 4G).....	100
Figura 4.31. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 1, Campione 4P).....	101
Figura 4.32. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Faccia 2, Campione 4P).....	102
Figura 4.33. Diagrammi Sforzo-Deformazione ottenuto dai dati ricavati dalla tecnica DIC (Campione Boiaccia cementizia).....	103
Figura 4.34. Modulo elastico delle boiacche con rapporto acqua/cemento 0,39 (Bottani et al. 2014).....	104
Figura 4.35. Concentrazione delle deformazioni assiali su Paraview (Faccia 1, Campione 3).....	105
Figura 4.36. Formazione di una frattura principale verticale che segue la tortuosità delle inclusioni (Campione 3).....	106
Figura 4.37. Formazione di fratture subverticali che seguono l'andamento dei piani stratigrafici (Campione 9).....	106
Figura 5.1. Modello per la simulazione di una prova di compressione su RS2 (Campione 9).....	112
Figura 5.2. Combinazioni di valori di coesione e di angolo di resistenza al taglio ottenute tramite back analysis.....	113
Figura 5.3. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).....	114
Figura 5.4. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).....	114
Figura 5.5. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).....	115
Figura 5.6. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).....	115
Figura 5.7. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).....	116

Figura 5.8. Andamento della massima deformazione di taglio per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 12, Distributed Loads->2274 kN).....	116
Figura 5.9. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 5, Distributed Loads->2159 kN).	117
Figura 5.10. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2174 kN).	118
Figura 5.11. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).	119
Figura 5.12. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).	119
Figura 5.13. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).	120
Figura 5.14. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).	121
Figura 5.15. Andamento degli elementi plasticizzati per la prima combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).	122
Figura 5.16. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2174 kN).....	123
Figura 5.17. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).....	123
Figura 5.18. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).....	124
Figura 5.19. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).....	124
Figura 5.20. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).....	125
Figura 5.21. Andamento della massima deformazione di taglio per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).....	125
Figura 5.22. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 3, Distributed Loads->2129 kN).....	126
Figura 5.23. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 4, Distributed Loads->2144 kN).....	126
Figura 5.24. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 5, Distributed Loads->2159 kN).....	127
Figura 5.25. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2174 kN).....	127
Figura 5.26. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).....	128
Figura 5.27. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2203 kN).....	128
Figura 5.28. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2218 kN).....	129
Figura 5.29. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).....	129
Figura 5.30. Andamento degli elementi plasticizzati per la seconda combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 11, Distributed Loads->2247 kN).....	130

Indice delle tabelle

Tabella 1.1. Distribuzione dimensionale dei blocchi (Lindquist, 1994).	26
Tabella 2.1. Descrizione del campione con blocchi (1).	40
Tabella 2.2. Descrizione del campione senza blocchi (2).	40
Tabella 2.3. Descrizione del campione con blocchi (3).	41
Tabella 2.4. Descrizione del campione senza blocchi (4).	41
Tabella 2.5. Valori del contenuto d'acqua dei campioni analizzati.	44
Tabella 2.6. Limiti di Atterberg ottenuti per i quattro campioni dell'Oltrepò Pavese.	47
Tabella 2.7. Classificazione dei campioni mediante convenzione AGI (Associazione Geotecnica Italiana).	52
Tabella 3.1. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A=100%.	56
Tabella 3.2. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A=100%.	57
Tabella 3.3. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A=25%.	58
Tabella 3.4. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A=25%.	59
Tabella 3.5. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A= 6,25%.	60
Tabella 3.6. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A= 6,25%.	61
Tabella 3.7. Classificazione dei blocchi della Faccia 1 per A= 1,56%.	62
Tabella 3.8. Classificazione dei blocchi della Faccia 2 per A= 1,56%.	63
Tabella 4.1. Valori di resistenza a compressione monoassiale e moduli di deformazione tangente dei campioni.	87
Tabella 4.2. Valori di modulo di deformazione tangente ottenuti con la tecnica DIC.	104
Tabella 5.1. Proprietà meccaniche del Campione 9 di Mélange d'Oltrepò Pavese.....	111

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] Associazione Geotecnica Italiana (1977) – “Raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”.
- [3] 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.
- [4] Barla and Perello (2014). XV ciclo di conferenze di Meccanica delle Rocce MIR 2014, Torino 19-20 Novembre 2014.
- [5] Bottani e Breviano (2014), Indagine sperimentale sul calcestruzzo per finitrici a casseforme scorrevoli; mix-design, reologia e campi prova. Politecnico di Milano, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale.
- [6] Coli, N., 2010. Metodi avanzati di indagine di ammassi rocciosi a blocchi in matrice (bimrock). Università di Bologna, Italia, PhD diss. Ciclo XXII.
- [7] Coli, N., Berry, P., Boldini, D., 2011. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock. *Int J Rock Mech Min Sci* 48(1):95–102.
- [8] DICe: [<https://dice.sandia.gov/>].
- [9] Festa et al. (2015), Late Oligocene–early Miocene olistostromes (sedimentary mélanges) as tectono-stratigraphic constraints to the geodynamic evolution of the exhumed Ligurian accretionary complex (Northern Apennines, NW Italy). *International Geology Review* Vol.57, 540–562.
- [10] E.Gabrielli, C. Colla, 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, [<https://www.ndt.net/article/aipnd2013/papers/idn61.pdf>]
- [11] Hoek, E., Marinos, P., Marinos, V., 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 64, 55-56.
- [12] Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., 2014. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks. *Engineering Geology* 183 65-79.
- [13] Laznicka, P. (1988). Breccias and Coarse Fragmentites: Petrology, Enviroments; Ores. Elsevier.
- [14] Lindquist, E.S., 1991. Fractals-Fracture and Franciscan Melange, Term Paper for CE 280, Rock Mechanics instructor: Prof. R.E Goodman, Dept Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- [15] Lindquist, E., 1994. The Strength and Deformation Properties of Melange. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

- [16] Lindquist, E.S., Goodman, R.E., 1994. Strength deformation properties of a physical model melange. Proceedings 1st North American Rock Mech. Symp., Austin, Texas, 843-850. 142 Elena Ravera. "Slope stability analyses in bimrocks: a stochastic approach"
- [17] Marinos, P.G., Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Engg. Geol. Env., 60, 85-92.
- [18] Medley, E., 1994. The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). Dept of Civil Engineering, University of California, Berkley, California, PhD diss., UMI Diss. Svc., Ann Arbor, MI.
- [19] Medley, E., 1997. Uncertainty in estimates volumetric proportions in melange bimrocks. Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, 23-27 June 1997, eds P.G Marinos et al., 267-272.
- [20] Medley E., 1999. Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. Felsbau 17 (1999), No.3.
- [21] Medley, E., 2001. Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges. Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 19, 4,20-4,21.
- [22] Medley, E., 2002. Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in Matrix Rocks (Bimrocks). Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), Toronto, July 2002, 509-606.
- [23] Medley, E., 2004. Observations on tortuous failure surface in bimrocks. Felsbau Vol.22 (2004), No. 5, 35-43.
- [24] Medley, E., 2007a. Bimrocks Article Part 1: Introduction. Newsletter of HSSMGE, No. 7, February 2007.
- [25] Medley E., 2007b. Bimrocks Article Part 2: Case Histories and Practical Guidelines. Newsletter of HSSMGE, No. 8, April 2007.
- [26] Medley, E., Lindquist, E.S., 1995. The engineering significance of the scale independence of some Franciscan melanges in California, USA. Proceedings of the 35th US Rock Mechanics Symposium, Reno, 907-914.
- [27] Medley, E., Wakabayashi, J., 2004. Geological Characterization of Melanges for Practitioners. Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 22(5), 10-18.
- [28] Panini et al. (2002), Le rocce caotiche dell'Oltrepò Pavese: note illustrative della carta geologica dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino. Atti Ticinesi di Scienze della Terra Vol.43, 83-109.
- [29] ParaView: [<https://www.paraview.org/>].
- [30] Phase2. "Theory documentations provided by the developers of the software. "https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/tutorials/Phase2_Tutorials.htm".

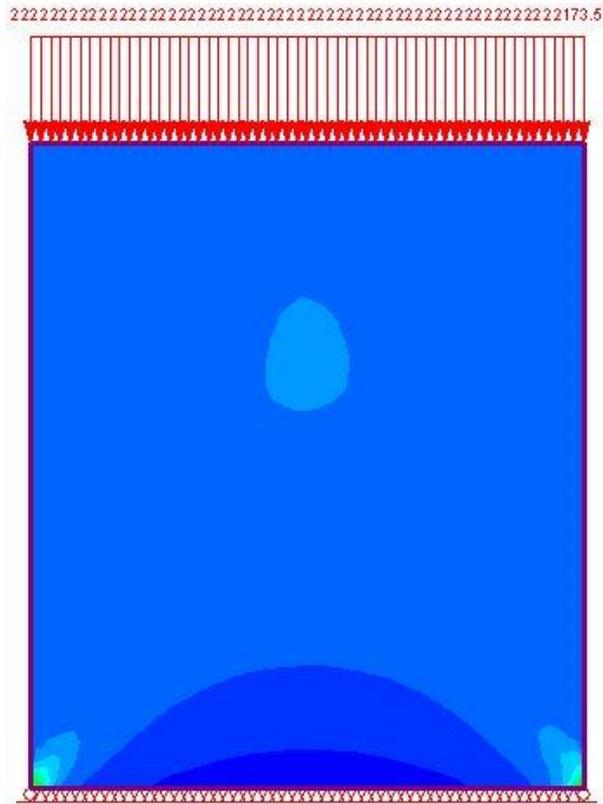


Figura A.2. Andamento della massima deformazione di taglio per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2174 kN).

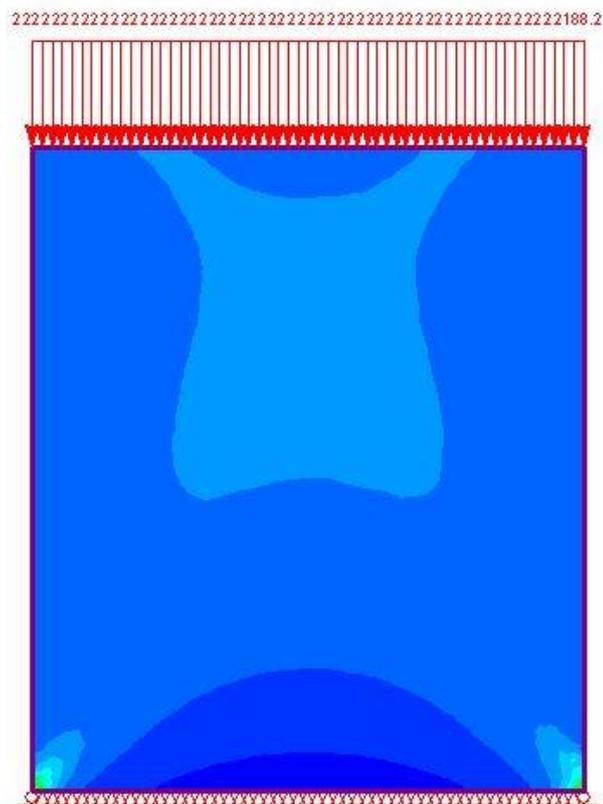


Figura A.3. Andamento della massima deformazione di taglio per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2188 kN).

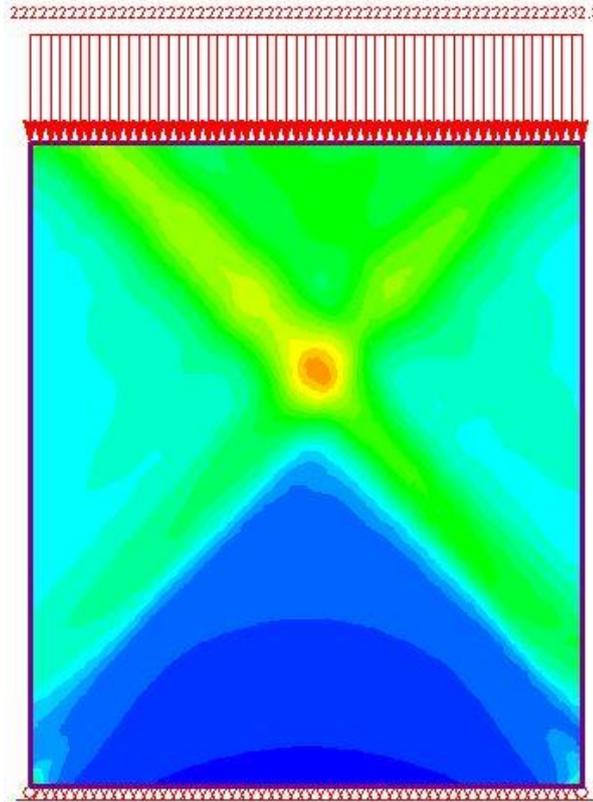


Figura A.6. Andamento della massima deformazione di taglio per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).

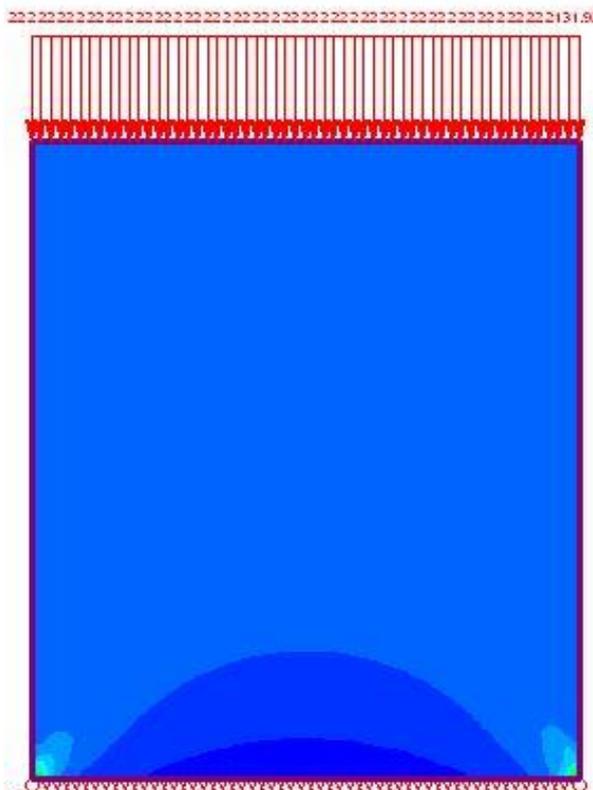


Figura A.7. Andamento della massima deformazione di taglio per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2140 kN).

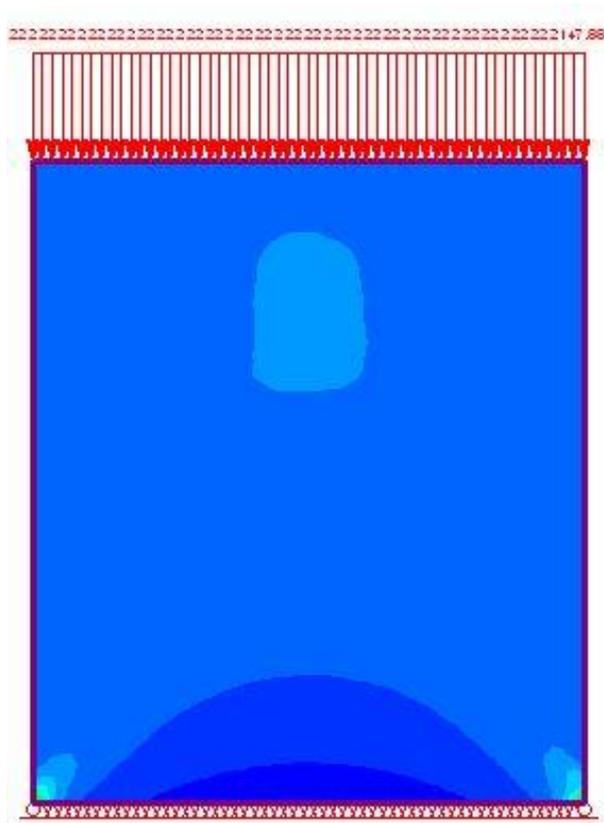


Figura A.8. Andamento della massima deformazione di taglio per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2148 kN).

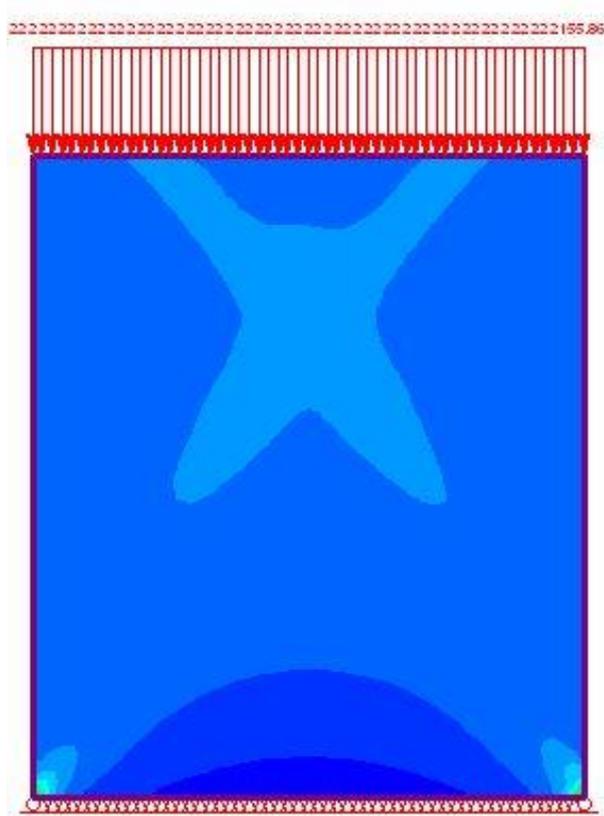


Figura A.9. Andamento della massima deformazione di taglio per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2156 kN).

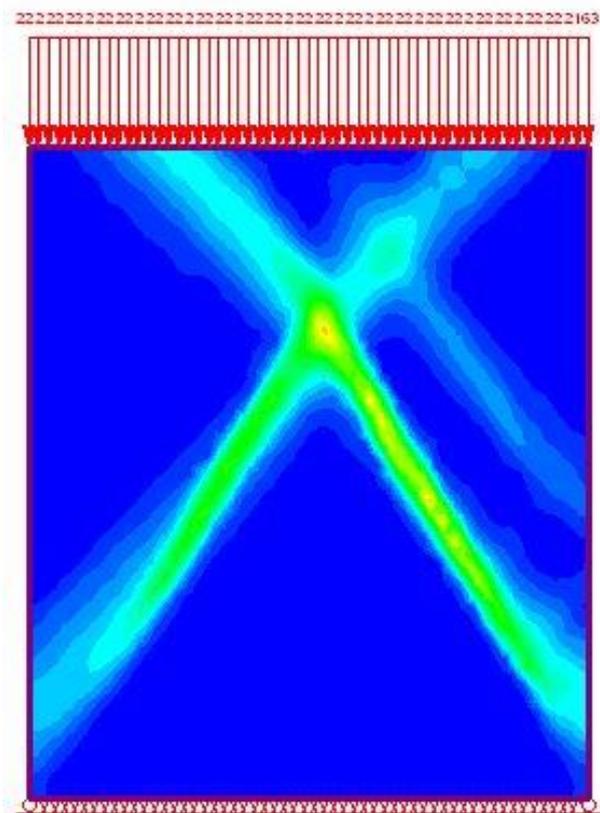


Figura A.10. Andamento della massima deformazione di taglio per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 9, Distributed Loads->2163 kN).

Andamento degli elementi plasticizzati

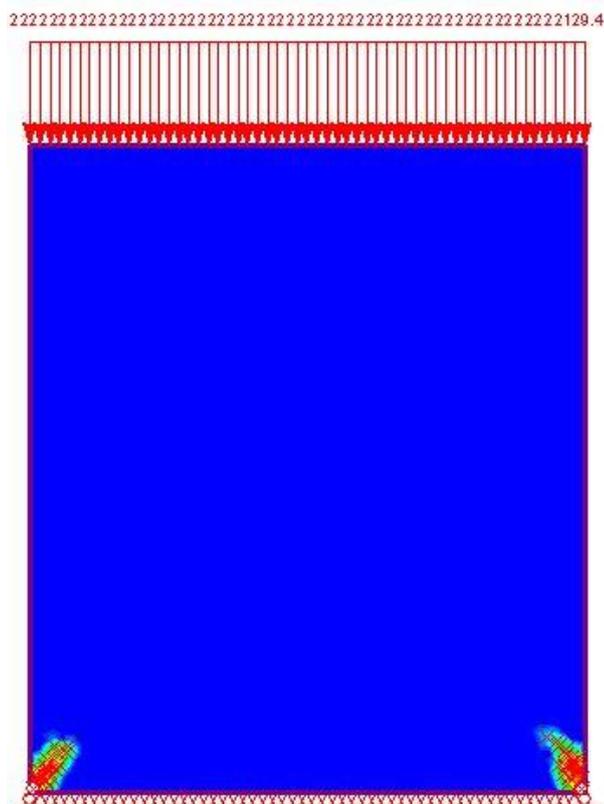


Figura A.11. Andamento degli elementi plasticizzati per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 3, Distributed Loads->2129 kN).

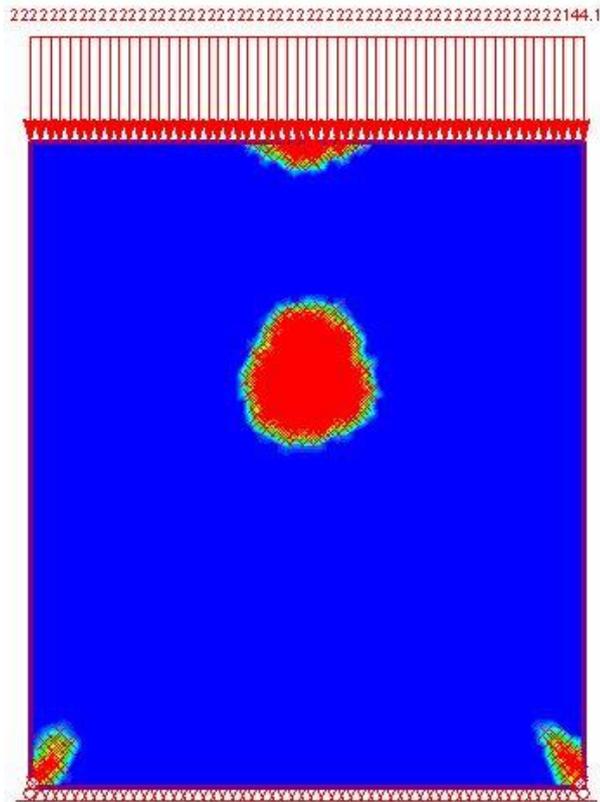


Figura A.12. Andamento degli elementi plasticizzati per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 4, Distributed Loads->2144 kN).

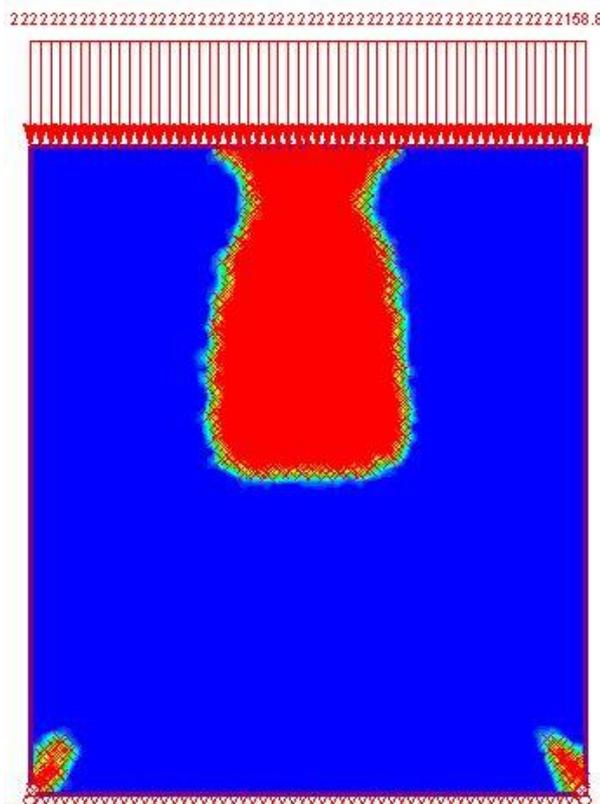


Figura A.13. Andamento degli elementi plasticizzati per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 5, Distributed Loads->2159 kN).

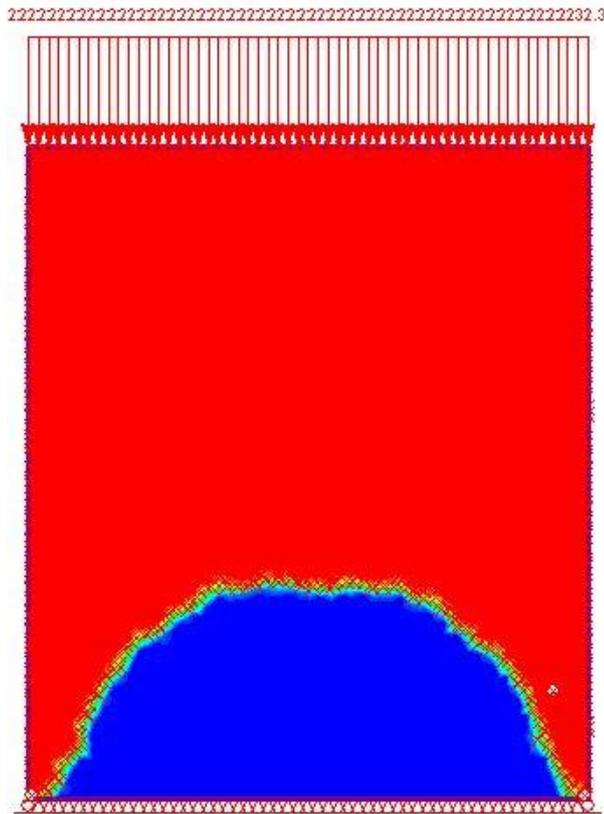


Figura A.18. Andamento degli elementi plasticizzati per la terza combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 10, Distributed Loads->2232 kN).

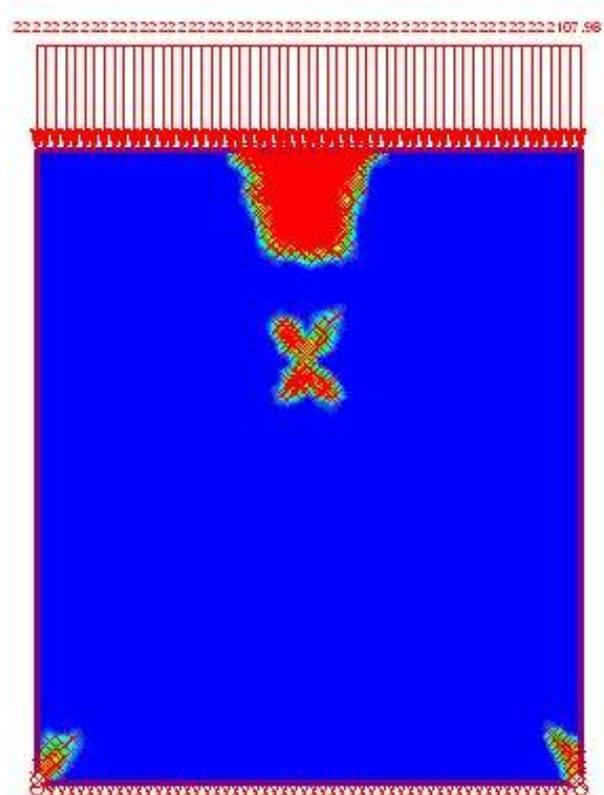


Figura A.19. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 2, Distributed Loads->2108 kN).

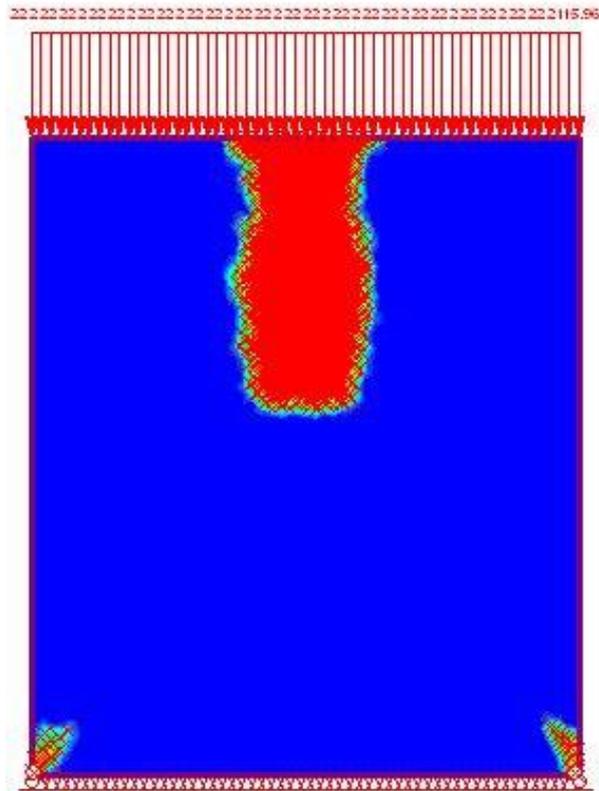


Figura A.20. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 3, Distributed Loads->2116 kN).

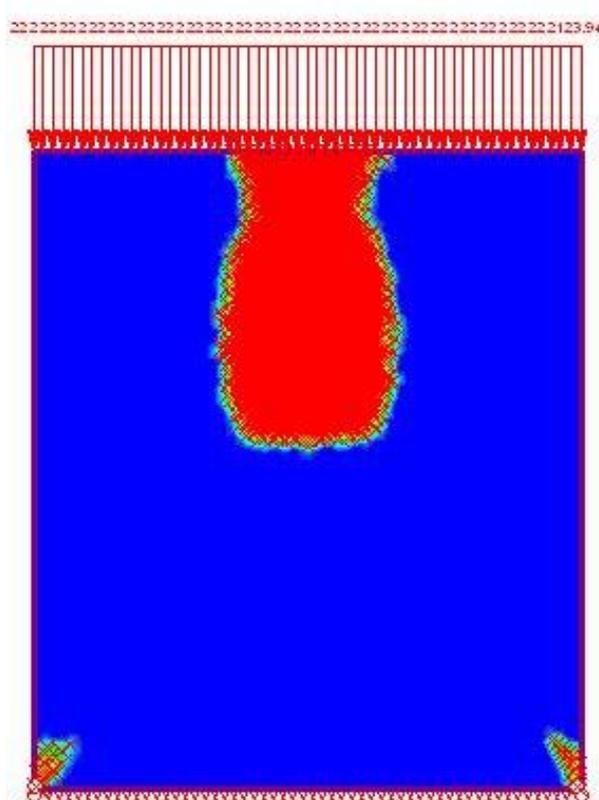


Figura A.21. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 4, Distributed Loads->2124 kN).

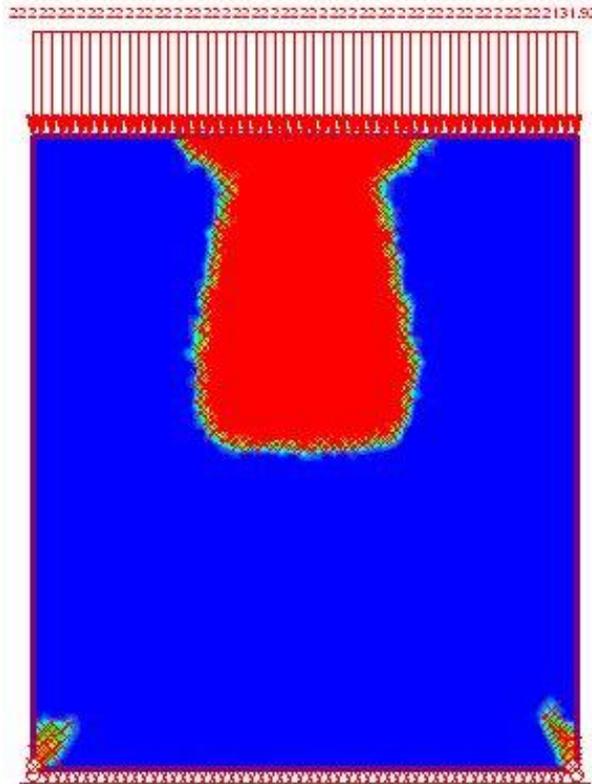


Figura A.22. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 5, Distributed Loads->2132 kN).

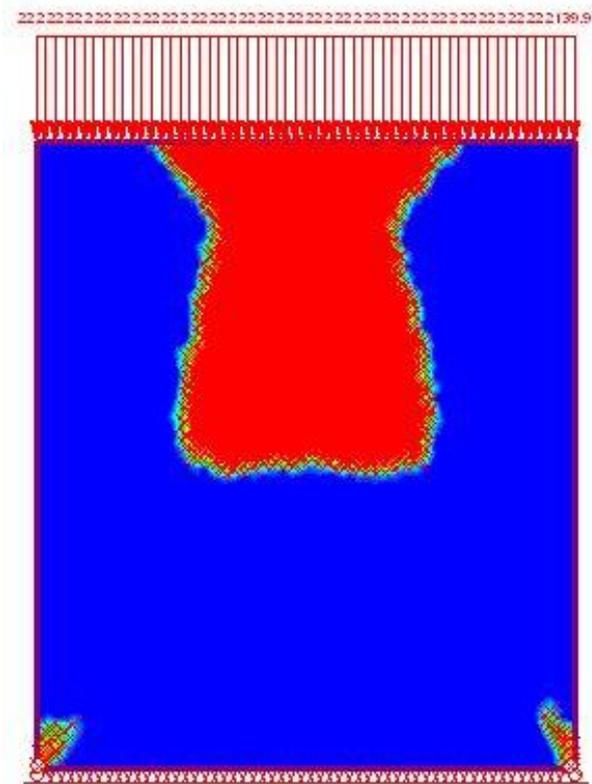


Figura A.23. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 6, Distributed Loads->2140 kN).

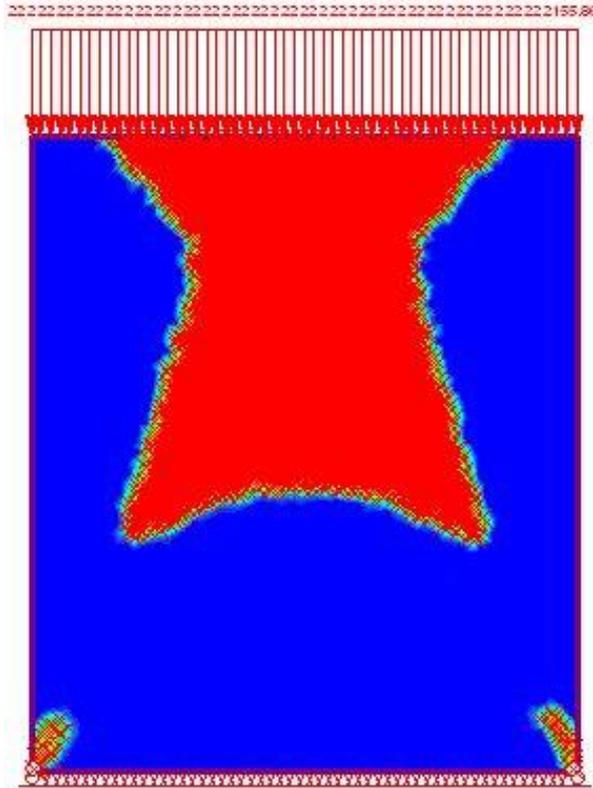


Figura A.24. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 7, Distributed Loads->2148 kN).

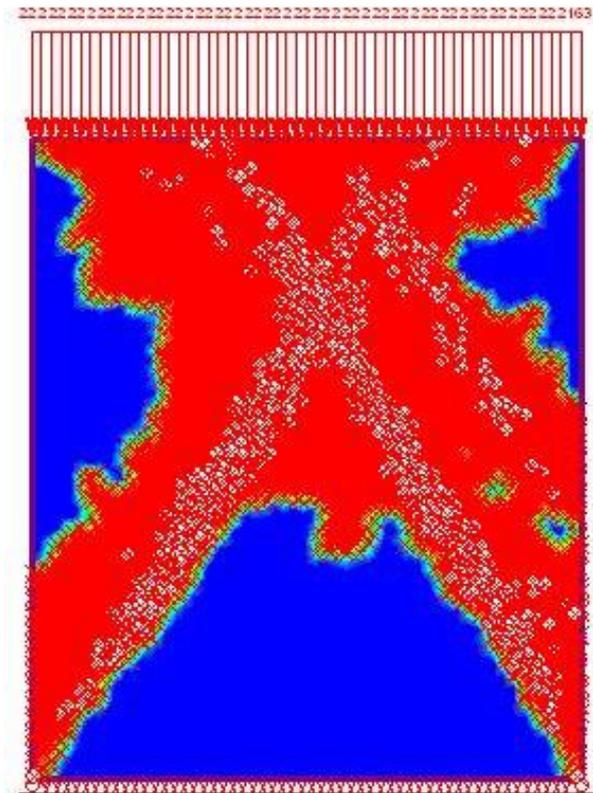


Figura A.25. Andamento degli elementi plasticizzati per la quarta combinazione di valori di coesione e di angolo d'attrito (Stage 8, Distributed Loads->2156 kN).