

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale



**Simulazione del comportamento di un bimrock in compressione monoassiale
mediante analisi 3D**

Relatori:

Prof.ssa Monica Barbero

Prof. Claudio Scavia

Ing. Maria Lia Napoli

Candidato:

Laura Villari

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

*“Quando la tempesta sarà finita,
probabilmente non saprai neanche tu
come hai fatto ad attraversarla e a uscirne vivo.
Anzi, non sarai neanche sicuro se sia finita per davvero.
Ma su un punto non c’è dubbio.
Ed è che tu, uscito da quel vento,
non sarai lo stesso che vi è entrato”
("Kafka sulla spiaggia" di Haruki Murakami)*

*A mio papà e a Peppe,
che mi hanno trasmesso sostegno e forza
per attraversare la tempesta.*

Sommario

| | |
|---|----|
| INDICE DELLE FIGURE | 5 |
| INDICE DELLE TABELLE | 12 |
| INTRODUZIONE | 1 |
| 1. FORMAZIONI COMPLESSE..... | 3 |
| 1.1. Criteri fondamentali..... | 7 |
| 1.1.1. Definizione delle dimensioni dei blocchi | 7 |
| 1.1.2. Indipendenza di scala | 9 |
| 1.1.3. Dimensione caratteristica | 12 |
| 1.1.4. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi | 13 |
| 1.1.5. Resistenza meccanica | 14 |
| 1.2. Mélange dell'Oltrepò Pavese | 16 |
| 1.2.1. Geologia del sito | 16 |
| 1.2.2. Prelievo dei campioni | 18 |
| 1.2.3. Tipologie di campioni | 19 |
| 1.2.4. Caratterizzazione dei campioni | 24 |
| 2. MODELLAZIONE NUMERICA TRIDIMENSIONALE..... | 30 |
| 2.1. Descrizione dei provini esaminati..... | 30 |
| 2.1.1. Composizione dei provini | 31 |
| 2.1.2. Geometria dei provini | 33 |
| 2.1.3. Modellazione dei provini..... | 34 |
| 2.2. Prova di compressione monoassiale | 46 |
| 2.2.1. Prova svolta in laboratorio | 46 |
| 2.2.2. Risultati della prova di laboratorio | 49 |
| 2.3. FLAC3D..... | 51 |
| 2.3.1. Descrizione del modello matematico | 51 |
| 2.3.2. Convenzioni | 52 |
| 2.3.3. Stato tensionale, deformativo ed equazioni del moto | 52 |
| 2.3.4. Condizioni al contorno e condizioni iniziali | 53 |
| 2.3.5. Equazioni costitutive | 53 |
| 2.3.6. Formulazione numerica..... | 54 |
| 2.3.7. Criterio di Mohr Coulomb | 55 |
| 2.3.8. Modello Strain-Softening per il criterio di Mohr Coulomb..... | 58 |
| 2.3.9. Interfacce | 61 |
| 2.3.10. Codice di calcolo FLAC3D analisi a compressione monoassiale | 67 |
| 3. VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA MATRICE | 72 |
| 3.1. Modelli con comportamento elastico perfettamente plastico..... | 73 |
| 3.1.1. Provino 4G | 73 |
| 3.1.2. Provino 9 | 79 |
| 3.2. Modello con comportamento elasto – plastico rammollente | 83 |
| 3.2.1. Provino 9 | 83 |
| 3.3. Superficie di plasticizzazione | 90 |
| 3.3.1. Provino 9 | 90 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4. | RISULTATI DELLA PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE SUL PROVINO 7 | 94 |
| 4.1. | Modellazione tridimensionale senza interfacce | 95 |
| 4.2. | Modellazione tridimensionale con interfacce..... | 100 |
| 4.3. | Confronto tra provino 9 e provino 7 | 107 |
| 5. | CONCLUSIONI..... | 111 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 114 |
| | ALLEGATO 1 | 118 |
| | ALLEGATO 2 | 121 |
| | ALLEGATO 3 | 131 |

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1 –a) Blocchi di granito moderatamente alterato in una matrice completamente alterata; b) Breccia tettonica; c) Mélange ofiolitico (blocchi di penodotiti serpentinite in una matrice vulcanica – sedimentaria); (Tsiambaos, 2010)..... | 3 |
| Figura 2 – Diverse tipologie di formazioni complesse considerate bimrock (Afifipour, 2014). | 4 |
| Figura 3 – Tipica formazione di Bimsoil (Wang et al., 2019). | 5 |
| Figura 4 – a) Tipico Franciscan mélange; b) Franciscan Complex mélange, northern California (foto: di E. Medley). | 6 |
| Figura 5 – Comparazione tra la distribuzione dimensionale reale dei blocchi (3D) e quella analizzata tramite sondaggio monodimensionale (1D), (Medley, 2001). | 7 |
| Figura 6 – Varie tipologie di stima della dimensione massima del blocco (Medley, 2001).... | 8 |
| Figura 7 – Errata descrizione dei blocchi in un sondaggio lineare in situ; a sinistra è riportato la condizione reale del sito mentre a destra è restituita l’interpretazione errata, in cui si considera il substrato roccioso e non i blocchi (Medley, 1999). | 9 |
| Figura 8 – Indipendenza di scala (Cowan, 1985). | 10 |
| Figura 9 – Istogrammi bi-logaritmici della distribuzione dimensionale dei blocchi del Franciscan mélange californiano a due diverse scale di analisi (m ² e km ²). (Medley, 1994) 11 | |
| Figura 10 - Distribuzione dimensionale dei blocchi normalizzata rispetto a A del Franciscan mélange per identificare l’indipendenza di scala al variare dell’area indagata (Kalender et al., 2014, Medley, 1994). | 12 |
| Figura 11- Affioramenti di prelievo presso il comune di Borgoratto Mormorolo (PV). (Immagine reperita tramite Google Earth) | 16 |
| Figura 12 – a) Affioramento 1; b) Affioramento 2. (Immagini reperite tramite Google Earth) | 17 |
| Figura 13 – Affioramento 1: mélange sedimentario caratterizzato principalmente da matrice argillosa (Cerise, 2019). | 17 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 – Affioramento 2: mélange sedimentario con evidenti clasti in superficie (Cerise, 2019)..... | 18 |
| Figura 15 – Campione di mélange in fase di estrazione. Il campionamento viene eseguito incuneando lo scalpello nel materiale e facendo leva con il martello. Zona del prelievo: affioramento 1 (Cerise, 2019)..... | 19 |
| Figura 16 – Curva granulometrica Campione 1 “Argilla con limo debolmente sabbiosa”. (Cerise, 2019)..... | 27 |
| Figura 17 - Curva granulometrica Campione 2 “Argilla con limo debolmente ghiaiosa”. (Cerise, 2019)..... | 27 |
| Figura 18 - Curva granulometrica Campione 3 “Argilla con limo ghiaiosa”. (Cerise, 2019) . | 28 |
| Figura 19 - Curva granulometrica Campione 4 “Argilla limosa”. (Cerise, 2019)..... | 28 |
| Figura 20 – Vagliatura meccanica del quattro campioni analizzati a) Campione 1; b) Campione 2; c) Campione 3 e d) Campione 4. (Cerise, 2019)..... | 29 |
| Figura 21 – Dimensioni in mm e fotografie di due facce del provino 9 di sola matrice. (Cerise, 2019)..... | 31 |
| Figura 22 – Dimensioni in mm e fotografie di due facce del provino 4G di sola matrice. (Cerise, 2019)..... | 32 |
| Figura 23 – Faccia del provino 7 eterogeneo. (Milan, 2020)..... | 32 |
| Figura 24 – Modello del provino 9 con dimensioni in mm, vista prospettica. | 35 |
| Figura 25 – Modello del provino 9 raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 35 |
| Figura 26 - Modello del provino 4G con dimensioni in mm, vista prospettica..... | 36 |
| Figura 27 – Modello del provino 4G raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.... | 36 |
| Figura 28 - Modello del provino 7 con dimensioni in mm, vista prospettica. | 37 |
| Figura 29 – Modello dei blocchi con dimensioni in mm ³ , vista prospettica. a) modalità semitrasparente, b) modalità wireframe. | 39 |
| Figura 30 – Blocchi vista prospettica con modalità semitrasparente, visualizzazione da varie altezze e angolazioni. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 - Modello del provino 7 con dimensioni in mm e inserimento dei blocchi ellissoidici, vista prospettica. a) modalità semitrasparente, b) modalità wireframe..... | 40 |
| Figura 32 - Modello del provino 7 raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 40 |
| Figura 33 - Modello del provino 4G con mesh 2.5 mm, vista prospettica. | 42 |
| Figura 34 - Modello del provino 4G con mesh 2.5 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 42 |
| Figura 35 - Modello del provino 9 con mesh 1 mm, vista prospettica..... | 43 |
| Figura 36 - Modello del provino 9 con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 43 |
| Figura 37 - Modello del provino 4G con mesh 1 mm, vista prospettica | 44 |
| Figura 38 - Modello del provino 4G con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 44 |
| Figura 39 - Modello del provino 7 con mesh 1 mm, vista prospettica..... | 45 |
| Figura 40 - Modello del provino 7 con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino. | 45 |
| Figura 41 – Sega a nastro con lama diamantata usata per la realizzazione dei provini di mélange (Cerise, 2019) | 47 |
| Figura 42 – Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7..... | 49 |
| Figura 43 – Criterio di rottura di Mohr-Coulomb (FLAC3D) | 56 |
| Figura 44 – Domini utilizzati per la definizione delle leggi di flusso per il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (FLAC3D)..... | 58 |
| Figura 45 – Esempio curva tensioni – deformazioni (FLAC3D)..... | 59 |
| Figura 46 – Leggi di variazione di coesione e angolo di attrito (FLAC3D)..... | 60 |
| Figura 47 – Approssimazioni mediante funzioni lineari a tratti (FLAC3D)..... | 60 |
| Figura 48 – Rappresentazione dell’area corrispondente ad un singolo nodo di interfaccia. (FLAC3D) | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 49 – Schema illustrativo delle componenti che caratterizzano il modello costitutivo delle interfacce. (FLAC3D)..... | 63 |
| Figura 50 – Comandi utilizzati per l’assegnazione delle proprietà meccaniche del materiale (provino 9)..... | 67 |
| Figura 51 – Comandi utilizzati per assegnare le condizioni al contorno (provino 9)..... | 68 |
| Figura 52 – Comandi utilizzati per definire i punti nei quali verranno calcolate le tensioni e le deformazioni (provino 9). | 68 |
| Figura 53 – Comandi utilizzati per la definizione delle tensioni (provino 9). | 69 |
| Figura 54 – Comandi utilizzati per la definizione delle deformazioni (provino 9)..... | 69 |
| Figura 55 – Comandi utilizzati per plottare la storia di tensioni e deformazioni e salvare l’analisi (provino 9)..... | 70 |
| Figura 56 – Comandi utilizzati per l’assegnazione del modello costitutivo di tipo “strain – softening” (provino 9)..... | 70 |
| Figura 57 – Comandi utilizzati per individuare le zone plastiche presenti nel modello (provino 9)..... | 70 |
| Figura 58 – Comandi utilizzati per l’assegnazione delle proprietà meccaniche dei blocchi (provino 7)..... | 71 |
| Figura 59 – Comandi utilizzati per creare le interfacce e l’assegnazione delle relative proprietà (provino 7)..... | 71 |
| Figura 60 – Retta interpolante i valori di coesione e di angolo di attrito. | 74 |
| Figura 61 – Confronto tra la curva sperimentale e gli andamenti ricavati dalla back analysis eseguita ad 1 mm (provino 4G)..... | 77 |
| Figura 62 - Confronto tra la curva sperimentale e l’andamento ricavato dalla back analysis eseguita ad 1 mm (provino 9). | 82 |
| Figura 63 – Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7..... | 83 |
| Figura 64 – Legge di decadimento della coesione in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 23..... | 85 |

| | |
|---|----|
| Figura 65 -- Legge di decadimento dell'angolo di attrito in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 23..... | 86 |
| Figura 66 -- Confronto tra la curva sperimentale e gli andamenti ricavati da analisi effettuate con gli stessi coefficienti ma diverse mesh, rispettivamente, 2.5 mm (curva rossa) e 1 mm (curva gialla)..... | 87 |
| Figura 67 -- Legge di decadimento della coesione in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 24..... | 88 |
| Figura 68 -- Legge di decadimento dell'angolo di attrito in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 24..... | 88 |
| Figura 69 -- Confronto tra la curva sperimentale e l'andamento ricavato dalla back analysis sul provino 9 con mesh a 1 mm. | 89 |
| Figura 70 -- Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 2.5 mm (DF:1.5).... | 90 |
| Figura 71 -- Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 2.5 mm. | 90 |
| Figura 72 - Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 1 mm, fattore di deformazione pari a 1.2 (facce "south" e "east"). | 91 |
| Figura 73 - Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 1 mm, fattore di deformazione pari a 1.2 (facce "north" e "west"). | 91 |
| Figura 74 - Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 1 mm (facce "south" e "east"). | 92 |
| Figura 75 - Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 1 mm (facce "north" e "west"). | 92 |
| Figura 76 -- Foto della superficie di rottura lungo le due facce del provino 9, fornita da tesisti che, precedentemente a questo lavoro di tesi, hanno condotto delle analisi sperimentali. | 93 |
| Figura 77 -- Diagramma tensione – deformazione del provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (Output estratto dal FLAC3D)..... | 96 |
| Figura 78 -- Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce "south" e "east"). | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 79 - Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce “north” e “west”). | 97 |
| Figura 80 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (facce “south” e “east”). | 97 |
| Figura 81 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (facce “north” e “west”). | 98 |
| Figura 82 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (facce “south” e “east”). | 98 |
| Figura 83 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (facce “north” e “west”). | 99 |
| Figura 84 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (visualizzazione interna dal basso verso l’alto). | 99 |
| Figura 85 - Diagramma tensione – deformazione del provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (Output estratto dal FLAC3D). | 100 |
| Figura 86 – Interfacce create tra i blocchi e la matrice (Interface 1). | 101 |
| Figura 87 – Interfacce, scivolamento normale. | 101 |
| Figura 88 – Interfacce, scivolamento a taglio. | 102 |
| Figura 89 – Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce “south” e “east”). | 102 |
| Figura 90 – Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce “north” e “west”). | 103 |
| Figura 91 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (facce “south” e “east”). | 103 |
| Figura 92 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (facce “north” e “west”). | 104 |
| Figura 93 - Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (facce “south” e “east”). | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 94 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (facce “north” e “west”). | 105 |
| Figura 95 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (visualizzazione interna dal basso verso l’alto). | 105 |
| Figura 96 – Provino 7 sottoposto a prova di compressione monoassiale in laboratorio. A destra foto originale e a sinistra foto ritoccata, delineando le superfici di rottura e i due blocchi circoscritti. | 106 |
| Figura 97 – Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2, del provino 7. A sinistra modellazione senza interfacce e a destra modellazione con interfacce. | 107 |
| Figura 98 - Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 9 e 7. | 108 |
| Figura 99 - Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce “south” e “east”). | 108 |
| Figura 100 – Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce “north” e “west”). | 109 |
| Figura 101 – Superficie di plasticizzazione. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce “south” e “east”). | 109 |
| Figura 102 – Risultato della prova di compressione monoassiale eseguita in laboratorio. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7. | 110 |
| Figura 103 - Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7. | 112 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|----|
| Tabella 1 – Scheda tecnica del Campione 1 | 20 |
| Tabella 2 - Scheda tecnica del Campione 2..... | 21 |
| Tabella 3 - Scheda tecnica del Campione 3..... | 22 |
| Tabella 4 - Scheda tecnica del Campione 4..... | 23 |
| Tabella 5 -Valori del contenuto d’acqua dei campioni analizzati | 24 |
| Tabella 6 – Valore medio dei limiti di Atterberg ottenuto da prove sui quattro campioni presi in esame..... | 26 |
| Tabella 7 - Caratteristiche geometriche e provenienza dei provini scelti per la modellazione tridimensionale. | 33 |
| Tabella 8 – Risultati resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali..... | 50 |
| Tabella 9 – Parametri che descrivono la risposta elastica dell’interfaccia (FLAC3D). | 64 |
| Tabella 10 – Risultati di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali (provino 4G)..... | 73 |
| Tabella 11 – Risultati della prima analisi con valori massimi e minimi di coesione e angolo di attrito (provino 4G)..... | 73 |
| Tabella 12 –Classi per l’analisi iniziale del provino 4G | 75 |
| Tabella 13 – Risultati back analysis provino 4G (2.5 mm) per le prime sei classi..... | 76 |
| Tabella 14 – Risultati della back analysis sul provino 4G con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie della quinta classe..... | 76 |
| Tabella 15 – Risultati della back analysis sul provino 4G con mesh 1 mm (categorie quattro e cinque). | 77 |
| Tabella 16 – Riepilogo risultati provino 4G | 78 |
| Tabella 17 – Risultati di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali (provino 9). | 79 |

| | |
|--|----|
| Tabella 18 – Risultati della prima analisi con valori massimi e minimi di coesione e angolo di attrito (provino 9). | 79 |
| Tabella 19 – Risultati della back analysis sul provino 9 con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie del modulo di deformabilità con coesione pari a 514 kPa..... | 80 |
| Tabella 20 – Risultati della back analysis sul provino 9 con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie del modulo di deformabilità con coesione pari a 599 kPa..... | 81 |
| Tabella 21 – Set di parametri meccanici ricavati per il provino 9 e risultati in termini di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale in corrispondenza del picco. | 81 |
| Tabella 22 – Riepilogo risultati provino 9..... | 82 |
| Tabella 23 – Coefficienti definiti per la back analysis del provino 9 con mesh a 2.5 mm | 85 |
| Tabella 24 – Coefficienti definiti dopo la back analysis sul provino 9 con mesh a 1 mm..... | 87 |
| Tabella 25 - Valori delle proprietà meccaniche assegnate ai blocchi. (Goodman 1980) | 94 |

Introduzione

Lo scopo del presente lavoro di tesi è la simulazione del comportamento a compressione monoassiale di un materiale complesso con struttura a blocco in matrice, mediante la modellazione numerica tridimensionale. In particolare, le analisi sono state eseguite impiegando il software FLAC3D.

Le formazioni complesse sono caratterizzate da proprietà meccaniche e geologiche molto variabili nello spazio, determinate in larga misura dalla diversità di litologia e dall'organizzazione caotica dei blocchi. Per classificare questa tipologia di materiale, è solito usare i termini, bimrock, bimsoil o *mélange*, definendo così quei materiali eterogenei costituiti da blocchi di roccia inglobati all'interno di una matrice meno resistente.

Nel caso in esame, i provini analizzati tramite modellazione numerica sono stati ricavati da campioni di materiale prelevato nella zona dell'Oltrepò Pavese. Sono stati scelti dei provini sottoposti a prove di laboratorio precedentemente al presente progetto di tesi, per i quali è stata fornita la resistenza a compressione monoassiale con la relativa deformazione assiale e un intervallo variabile delle proprietà meccaniche. Questo tipo di materiale è caratterizzato da un'estrema variabilità dei risultati sperimentali, associata a notevoli problematiche di campionamento, da cui deriva anche un'elevata irregolarità geometrica. Sono stati esaminati due provini costituiti da sola matrice, denominati 9 e 4G, e uno eterogeneo, il provino 7.

In una prima fase di studio, è stata svolta una back analysis basata sui risultati di prove sperimentali per caratterizzare la matrice dei due provini 9 e 4G. Successivamente, considerando che i parametri sperimentali del provino 9 sono risultati prossimi a quelli del provino 7, si è scelto di assegnare come componente matrice del provino eterogeneo, quella caratterizzante il provino 9. Sulla base di questa scelta e al fine di avere una taratura completa del provino 9, è stata condotta una back analysis con lo scopo di approssimare al meglio l'andamento elasto-plastico rammollente osservato sperimentalmente.

Infine, al modello eterogeneo è stata assegnata la matrice le cui proprietà meccaniche derivano dal risultato dell'analisi eseguita sul provino 9. Per i blocchi calcarei, i parametri assegnati si riferiscono a quanto suggerito nel manuale di FLAC3D (Goodman, 1980) per il

materiale limestone. Una volta che sono state assegnate le proprietà al provino 7, è stata eseguita l'analisi numerica.

La valutazione del comportamento a compressione monoassiale si è articolata in base a due diverse tipologie di modellazione. Nella prima, sono state definite soltanto le proprietà della matrice e dei blocchi, senza caratterizzare le zone di interfaccia. Nella seconda, è stata eseguita la modellazione delle interfacce, inserendole tra i blocchi e la matrice. Infine, i risultati del modello numerico eterogeneo sono stati confrontati con quelli ottenuti dalla prova sperimentale.

1. Formazioni complesse

Il materiale analizzato è una formazione complessa con struttura a "blocco-in-matrice", che rientra nella categoria delle formazioni rocciose strutturalmente complesse. Queste sono caratterizzate da proprietà meccaniche e geologiche molto variabili nello spazio e spesso sono rappresentate da un'organizzazione caotica. Il termine "block-in-matrix rocks" è stato originariamente introdotto da Raymond (1984) per indicare "blocks of one lithology enclosed in materials of another lithology", ovvero "blocchi di una litologia racchiusa in materiali di un'altra litologia".

Questo termine si applica a formazioni geologiche complesse, eterogenee, deformate e disturbate tettonicamente, contenenti blocchi caratterizzati da litologie varie incorporati in rocce a matrice più debole con una struttura più fine, come *mélange*, serpentiniti tranciate, olistostromi, rocce di faglia cataclastica, rocce esposte all'aria e piroclastiche grossolane (Tsiambaos, 2010). Alcuni esempi sono mostrati in Figura 1.

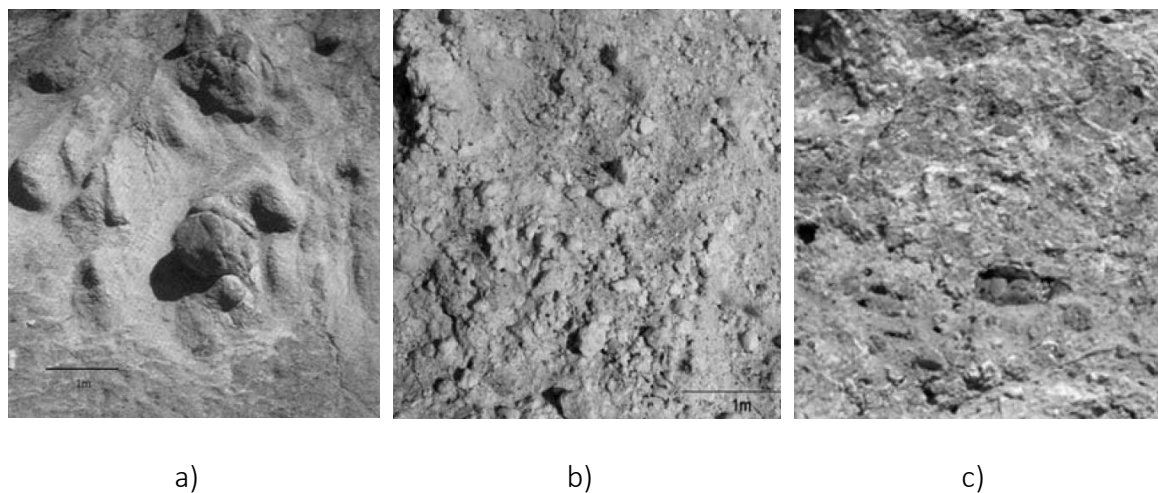


Figura 1 –a) Blocchi di granito moderatamente alterato in una matrice completamente alterata; b) Breccia tettonica; c) Mélange ofiolitico (blocchi di peridotiti serpentinizzate in una matrice vulcanica – sedimentaria); (Tsiambaos, 2010).

Per individuare tutte le formazioni complesse a blocco in matrice, Medley nel 1994, usa il termine "Bimrock" (block-in-matrix rocks), ad indicare "a mixture of rocks, composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture", definendo così quei materiali eterogenei, costituiti da blocchi di roccia in un materiale cementato più fine

e meno resistente in cui si ha un marcato contrasto tra blocchi e matrice debole (Medley, 1994).

Con l'espressione "geotechnically significant", si pone l'attenzione sul ruolo rilevante dei blocchi di roccia (clasti di natura calcarea o arenaria), poiché la loro distribuzione e percentuale tende ad influenzare le proprietà del materiale tra cui la resistenza a compressione uniassiale complessiva e le caratteristiche di resistenza a taglio, a tutte le scale di interesse ingegneristico (dal laboratorio alla scala del sito) (Medley et al., 1995; Tsiambaos, 2010).

Una formazione eterogenea per essere classificata come bimrock deve presentare una netta differenza in termini di resistenza e deformabilità dei materiali presenti. Per questo motivo, Medley (1994) introduce un valore di soglia superiore a 2 considerando il rapporto tra le resistenze dei due elementi, dato φ l'angolo di resistenza al taglio si ha:

$$\frac{\tan\varphi_{\text{blocchi}}}{\tan\varphi_{\text{matrice}}} \geq 2 \quad (1)$$

Nella Figura 2 sono riportate alcune tipologie di formazioni complesse considerate bimrock.

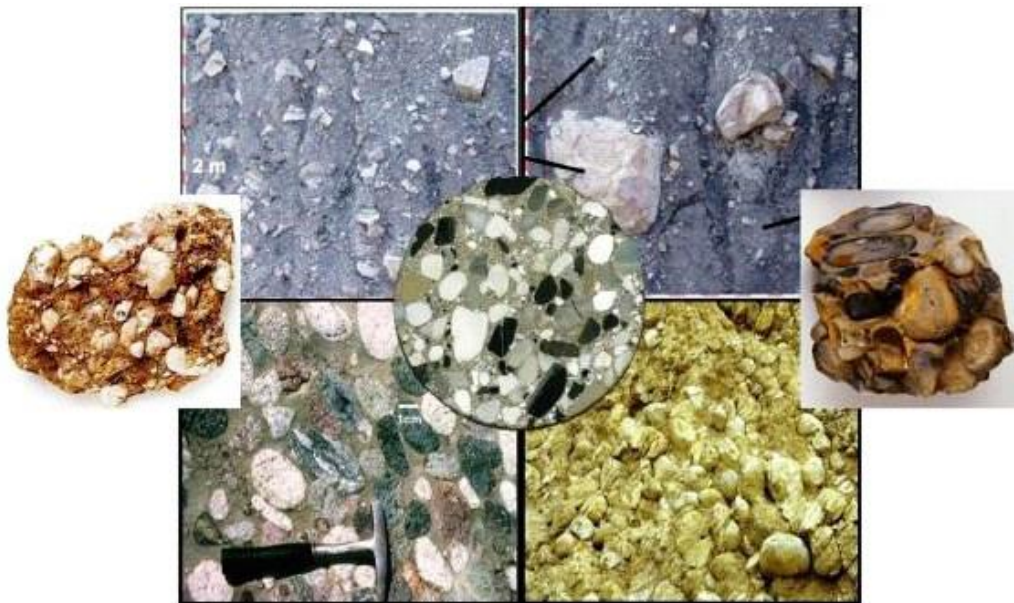


Figura 2 – Diverse tipologie di formazioni complesse considerate bimrock (Afifipour, 2014).

Un'altra categoria di materiale con caratteristiche simili al bimrock è il "Bimsoil" (block-in-matrix soil), con la differenza che in quest'ultimo i blocchi sono inglobati in una matrice costituita da terreno, che risulta non cementata, incoerente e con caratteristiche meccaniche scadenti come ad esempio i depositi alluvionali (Kalender et al., 2014). Nella Figura 3 è rappresentato un esempio di bimsoil.



Figura 3 – Tipica formazione di Bimsoil (Wang et al., 2019).

La categoria dei bimrock è suddivisa in sottoclassi, tra le quali, quella che suscita particolare interesse a livello ingegneristico è il "Mélange", che spesso in letteratura viene utilizzato per descrivere lo stesso bimrock (Lindquist, 1994).

Per questo motivo, Medley distingue i due materiali definendo così il mélange un materiale presente soprattutto nelle regioni montane in più di 60 nazioni, la cui origine è associata a fenomeni tettonici di subduzione (Medley, 2002).

I mélange sono unità caotiche, costituiti da una matrice debole, solitamente argillosa, sabbiosa o ofiolitica, in cui sono immersi blocchi lapidei con litologia e dimensioni variabili. La mancanza di omogeneità in questa tipologia di materiali viene evidenziata da una disposizione caotica degli elementi caratterizzanti. Comunemente sono associati a

subduzione e obduzione di crosta oceanica, collisione continentale e deformazione intra-continentale (Festa et al., 2010).

I *mélange* devono la loro composizione all'evoluzione di diversi processi geologici, quindi possono essere sedimentati, diapiritici e tettonici.

- *mélange* sedimentario o olistostroma, il processo avviene a livello della crosta terrestre, tramite lo spostamento di massa sedimentaria che facilita la disaggregazione e la miscelazione degli strati;
- *mélange* diapiritico, nasce dalla miscelazione di materiale durante il fenomeno di risalita di masse rocciose profonde con perforazione delle rocce superiori a causa di contrasti di densità;
- *mélange* tettonico, si sviluppa tramite un processo di subduzione della crosta terrestre, derivando da zone di faglia e di confine delle placche.

Un *mélange* che è stato oggetto di molti studi presenti in letteratura è quello proveniente dal *Franciscan Complex*, situato nella California del nord e prende il nome di *Franciscan mélange* (Medley, 2007).

La Figura 4 mostra tipiche formazioni del *Franciscan mélange* (Medley, 2002 e 2007).



a)



b)

Figura 4 – a) Tipico *Franciscan mélangé*; b) *Franciscan Complex mélangé*, northern California (foto: di E. Medley).

1.1.Criteri fondamentali

1.1.1. Definizione delle dimensioni dei blocchi

L'individuazione della dimensione massima dei blocchi è fondamentale per caratterizzare un bimrock, poiché il numero, le dimensioni e la forma dei blocchi influenzano l'anisotropia del materiale.

Le dimensioni dei blocchi variano considerevolmente, il range di valori è compreso tra pochi millimetri e centinaia di metri (Medley, 1994).

La determinazione tramite indagini in situ comporta notevoli incertezze, poiché l'interpretazione dei sondaggi (lineari o bidimensionali) e delle carte geologiche non permette di definire la dimensione massima dei blocchi in quanto è poco probabile che venga intercettata lungo il foro di sondaggio. Come mostrato in Figura 5, l'analisi lineare (1D) comporta una sottostima della quantità dei blocchi di grandi dimensioni e una sovrastima di quelli più piccoli, allontanandosi nettamente dalla distribuzione dimensionale reale (3D).

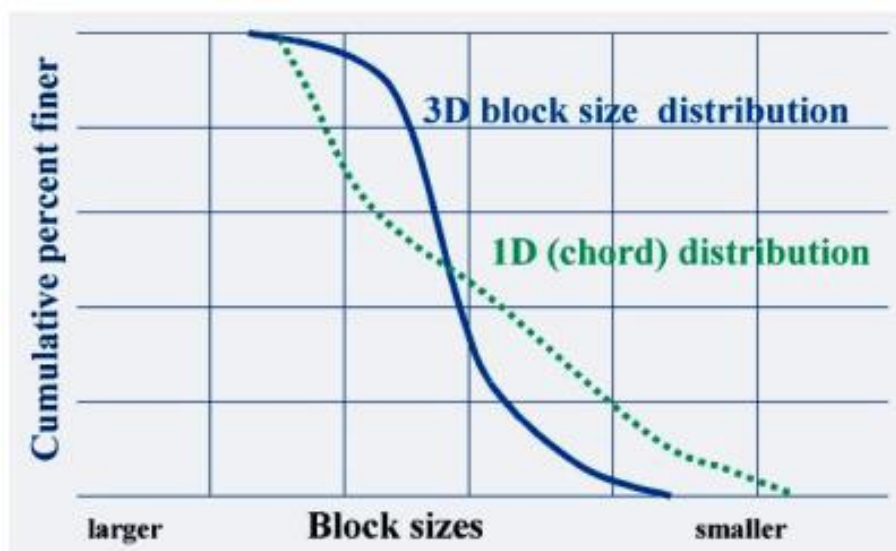


Figura 5 – Comparazione tra la distribuzione dimensionale reale dei blocchi (3D) e quella analizzata tramite sondaggio monodimensionale (1D), (Medley, 2001).

È possibile sottostimare la dimensione dei blocchi anche considerando le misure effettuate nella porzione affiorante.

In Figura 6, sono rappresentate le due tipologie di blocco, una interessata da sondaggio e l'altra affiorante. Nella prima la dimensione della corda intercettata dal sondaggio si discosta notevolmente dalla dimensione effettiva del diametro e, anche nella seconda tipologia, è impossibile ricavare la reale dimensione ma soltanto la dimensione massima osservata (d_{mod}).

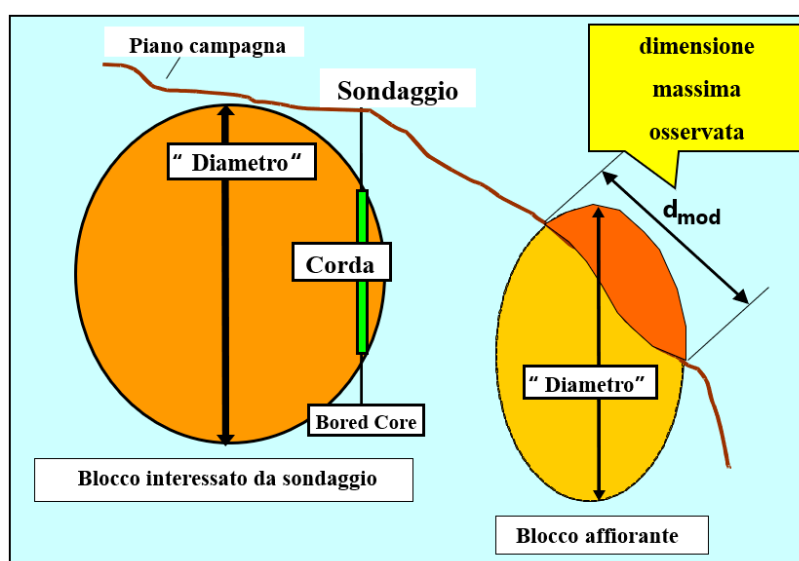


Figura 6 – Varie tipologie di stima della dimensione massima del blocco (Medley, 2001).

Solitamente, per operare in condizioni più sicure e per semplificare le procedure di progettazione, la presenza dei blocchi inglobati nella matrice viene trascurata, considerando il deposito costituito esclusivamente da matrice.

Un'altra imprecisione che si può commettere durante l'interpretazione di un sondaggio lineare, oltre agli errori che sono stati citati, è quella di non riuscire ad identificare il materiale in situ come bimrock ma ipotizzare la presenza di un substrato roccioso (bedrock). Questa ipotesi nasce quando la perforazione viene eseguita soltanto per pochi metri e, quindi, il

materiale incontrato potrebbe appartenere ad un blocco con dimensioni maggiori di quelle ipotizzate (Figura 7).

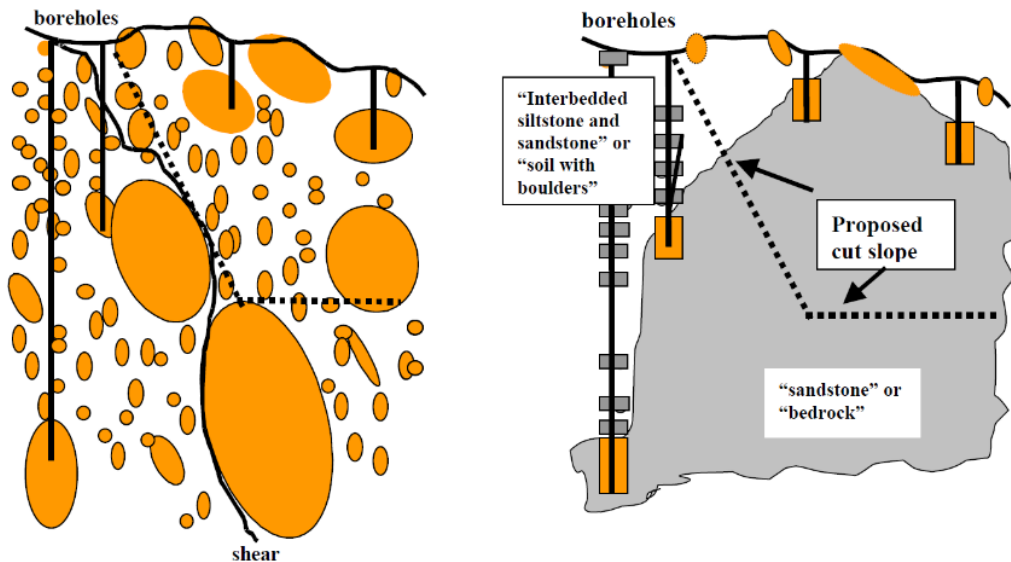


Figura 7 – Errata descrizione dei blocchi in un sondaggio lineare in situ; a sinistra è riportato la condizione reale del sito mentre a destra è restituita l'interpretazione errata, in cui si considera il substrato roccioso e non i blocchi (Medley, 1999).

1.1.2. Indipendenza di scala

Cowan nel 1985 individua nei bimrock la proprietà di autosomiglianza, per cui il materiale presenta una distribuzione delle inclusioni che risulti con una buona approssimazione simile ad una sua parte. Questa caratteristica non garantisce in ogni caso che il bimrock possieda anche la proprietà di indipendenza di scala. Infatti, l'indipendenza di scala si ha solo se, comunque scelta una porzione dell'oggetto in esame, indipendentemente dall'ingrandimento, questa risulta simile all'oggetto complessivo. La distribuzione dimensionale dei blocchi risulta indipendente dalla scala. In Figura 8 è riportata una rappresentazione grafica di questa caratteristica.

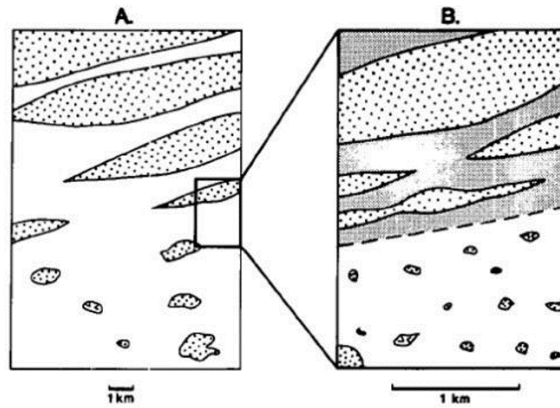


Figura 8 – Indipendenza di scala (Cowan, 1985).

Un sistema può essere considerato autosimile se la dimensione frattale D è misurabile (Mandelbrot, 1983).

La dimensione frattale viene indicata nell'equazione (2):

$$D = \frac{\log(N(r))}{\log(r)} \quad (2)$$

In cui si ha:

- r , intervallo della classe di frequenza;
- $N(r)$, la frequenza numerica della variabile r .

I dati vengono riportati in un piano bi-logaritmico in cui la D corrisponde all'esponente della legge di potenza, ovvero alla pendenza della retta interpolante. La legge di potenza con esponente negativo risulta essere (equazione(3)):

$$N = r^{-D} \quad (3)$$

In cui si ha:

- N , frequenza relativa degli elementi con dimensione lineare maggiore di r ;
- D , dimensione frattale.

Medley verifica le proprietà di autosomiglianza analizzando circa 1900 aree di indagine del Franciscan mélange californiano, misurandone la dimensione massima osservata d_{mod} . Dai grafici in Figura 9, entrambe le distribuzioni seguono un andamento pressoché uguale indipendentemente dalla scala di indagine e confermano la tesi sull'autosomiglianza (Medley, 1994).

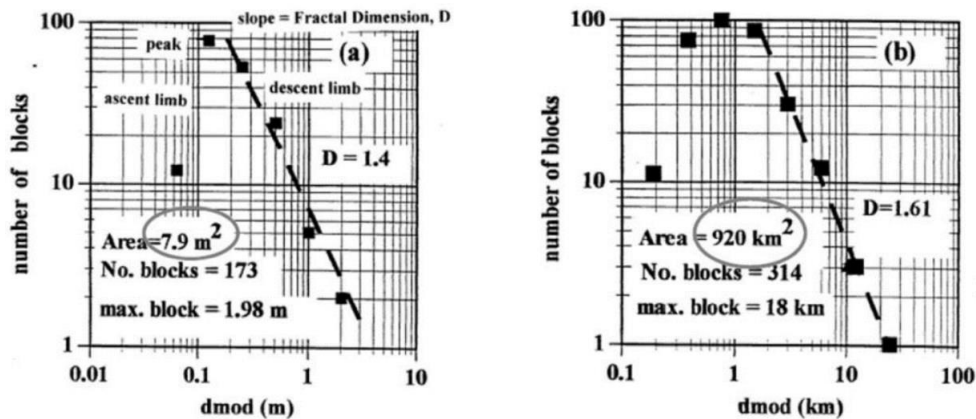


Figura 9 – Istogrammi bi-logaritmici della distribuzione dimensionale dei blocchi del Franciscan mélange californiano a due diverse scale di analisi (m^2 e km^2). (Medley, 1994)

Questo risultato è molto interessante ai fini ingegneristici, poiché favorisce l'impiego di campioni di materiale di piccole dimensioni, come quelli usati per le analisi di laboratorio. Le caratteristiche del campione poi possono essere ricondotte all'intero complesso.

Per verificare l'indipendenza di scala bisogna normalizzare gli istogrammi. Considerando un grafico bi-logaritmico, si ha:

- in ordinata, la frequenza relativa $N(d_{mod})$ ovvero il rapporto tra il numero di blocchi di ciascuna classe e il numero totale dei blocchi relativi all'intera area considerata;
- in ascissa, la dimensione massima osservata d_{mod} normalizzata rispetto alla \sqrt{A} , in cui A rappresenta l'area indagata.

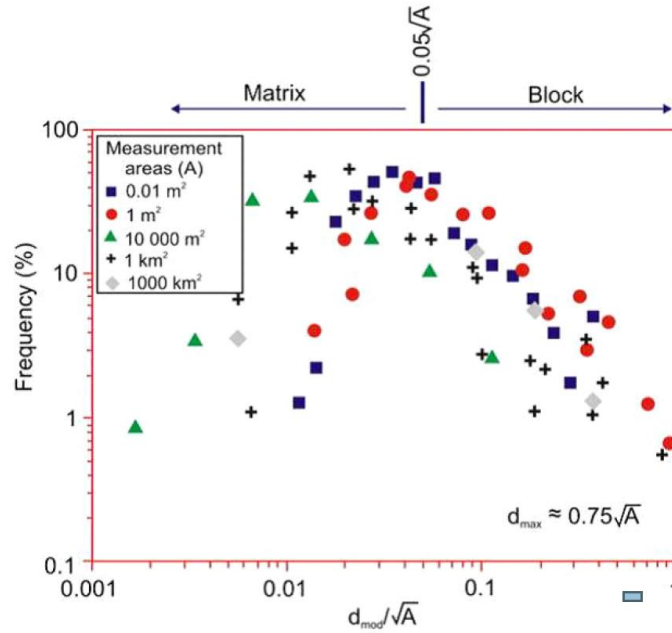


Figura 10 - Distribuzione dimensionale dei blocchi normalizzata rispetto a \sqrt{A} del Franciscan mélange per identificare l'indipendenza di scala al variare dell'area indagata (Kalender et al., 2014, Medley, 1994).

Le distribuzioni al variare dell'area analizzata presentano un andamento simile. Il valore massimo si ha per $d_{mod} = 0.05\sqrt{A}$, esso viene definito come soglia blocco/matrice di ciascuna scala. Per valori inferiori del punto massimo, l'andamento risulta crescente poiché si ha una sottostima della frequenza dovuta alla difficoltà di misurazione dei blocchi più piccoli di $0.05d_{mod}/\sqrt{A}$.

Pertanto, i blocchi che presentano una dimensione inferiore al valore di soglia sono classificati come matrice. Il limite superiore è $d_{mod}/\sqrt{A} = 1$ ma il 99% risulta inferiore a $d_{mod} \approx 0.075\sqrt{A}$, che viene definito d_{max} , ovvero il massimo valore della dimensione del blocco alla scala indagata.

1.1.3. Dimensione caratteristica

La dimensione caratteristica del problema, indicata con L_c , descrive la lunghezza di un elemento del modello ingegneristico che risulta rappresentativa del problema in esame (Medley, 1994). La lunghezza caratteristica del problema ingegneristico dipende dalla scala di interesse e dalla dimensione dell'opera ingegneristica. Può essere definita in base al tipo di problema che si vuole considerare, per esempio, può essere assunta pari alla profondità

media sulla lunghezza di un pendio (Medley & San, 2004), al diametro della galleria (Button et al., 2003), alla larghezza della fondazione di una diga (Goodman & Alghren, 2000) o anche all'altezza del campione di terreno sottoposto a prove meccaniche in situ (Xu et al., 2007). Per quanto riguarda le prove in laboratorio, L_c è pari ad una dimensione del provino, solitamente si considera il diametro.

La determinazione della lunghezza caratteristica risulta fondamentale per la valutazione del valore di soglia. Alcuni studi condotti da Medley e Lindquist, definiscono che i blocchi di dimensione superiore al 5% di L_c si possono ritenere significativi per nell'ambito geotecnico, mentre per quei blocchi la cui dimensione è superiore al 75% di L_c , la formazione viene considerata un ammasso roccioso e non un mélange (Medley, 1994; Lindquist, 1995).

1.1.4. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi

La percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) è un parametro fondamentale nello studio delle formazioni complesse, poiché influenza il comportamento meccanico, ad esempio la resistenza meccanica. La VBP viene espressa come il rapporto tra il volume dei blocchi ed il volume della massa totale.

Uno dei metodi più corretti per determinare la VBP è la vagliatura del materiale, operazione possibile solo alla scala del laboratorio. Per scale più grandi rispetto a quella del laboratorio, invece, si usa fare una stima indiretta, per mezzo di:

- metodo monodimensionale, ossia interpretazione dei sondaggi geognostici lineari tramite misura delle corde dei blocchi inglobati nelle carote estratte;
- metodo bidimensionale, interpretazione della di sondaggi areali tramite analisi digitale di riprese fotografiche.

1.1.5. Resistenza meccanica

Le caratteristiche meccaniche dei bimrock sono molto condizionate dalla loro struttura e composizione. L'inclusione di blocchi lapidei all'interno della matrice non comporta necessariamente una notevole variazione delle proprietà meccaniche dell'intera formazione complessa rispetto a quelle della sola matrice.

Una tesi comune a molti autori è quella per cui, affinché i blocchi influenzino il comportamento dell'intera formazione, la VBP deve risultare compresa tra il 20% ed il 75% (Lindquist, 1994; Lindquist & Goodman, 1994; Kim et al., 2004; Sonmez et al., 2004; Pan et al., 2008).

Per valori di VBP inferiori al 20%, la matrice domina il comportamento meccanico del materiale mentre, per valori di VBP superiori al 75%, la formazione si configura come un ammasso roccioso molto fratturato.

In generale, la resistenza meccanica globale di un bimrock dipende fortemente dalla VBP per un valore compreso tra il 25% ed il 70% mentre, per percentuali inferiori al 25%, la resistenza dell'ammasso è identificabile con quella della matrice (Barbero et al., 2006).

Una formazione complessa come il bimrock è caratterizzata da una significativa differenza tra la resistenza e la deformabilità dei materiali che la compongono. Questa condizione è stata oggetto di studi di molti autori, i quali hanno definito dei valori di soglia da soddisfare affinché lo sviluppo di superfici di rottura all'interno della matrice risultino più tortuose, in maniera tale da aumentare passivamente la resistenza a rottura (Lindquist, 1994; Medley, 2004).

Medley usa il criterio per cui il valore di soglia è il risultato del rapporto tra gli angoli di resistenza al taglio (Medley, 1994), come mostrato nell'equazione (4). Lo studio è basato sul lavoro di Lindquist (1994), Lindquist & Goodman (1994) e Volpe et al. (1991).

$$\frac{\tan\phi_{\text{blocchi}}}{\tan\phi_{\text{matrice}}} \geq 2 \quad (4)$$

Lindquist definisce un criterio per la valutazione del valore di soglia basato sul rapporto tra la rigidezza del blocco e quella della matrice (Lindquist, 1994), (equazione (5):

$$\frac{E_{blocchi}}{E_{matrice}} \cong 2 \quad (5)$$

Sonmez sfrutta la resistenza a compressione monoassiale dei blocchi e della matrice per valutare il valore di soglia (Sonmez, 2009), (equazione (6):

$$\frac{UCS_{blocchi}}{UCS_{matrice}} \geq 1.5 \quad (6)$$

1.2.Mélange dell'Oltrepò Pavese

I campioni di materiale analizzati in questo elaborato provengono dalla zona dell'Oltrepò Pavese, situata in provincia di Pavia e in pieno Appennino Settentrionale. La formazione complessa è costituita da una matrice argillosa-limosa molto compatta che ingloba al suo interno le inclusioni di roccia. La campagna di prelievo dei campioni è stata seguita dal professore geologo Andrea Festa del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, svolgendosi in periodi diversi (ottobre 2017 e aprile 2018), tra i vari campioni prelevati in questo capitolo ne verranno descritti quattro.

1.2.1. Geologia del sito

La zona di interesse si trova presso il comune di Borgoratto Mormorolo, nell'area dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino, alle pendici del Monte Fratello. Sono stati scelti due affioramenti superficiali vicini tra loro ma con la presenza di due diverse tipologie di mélangé (Figura 11; Figura 12).



Figura 11- Affioramenti di prelievo presso il comune di Borgoratto Mormorolo (PV). (Immagine reperita tramite Google Earth)



a)



b)

Figura 12 – a) Affioramento 1; b) Affioramento 2. (Immagini reperite tramite Google Earth)

La zona è costituita prevalentemente da un *mélange* argilloso della Val Tiepido-Canossa, composto da una matrice argillitica grigia o rossastra, al cui interno sono inglobati clasti riconducibili ad argille di vari colori, calcilutiti silicee grigie, areniti di vario tipo e innumerevoli altri tipi litologici (Panini et al., 2002; Festa et al., 2015).

Come indicato precedentemente, i due affioramenti sono vicini ma hanno caratteristiche diverse. Il primo è costituito da un materiale prevalentemente omogeneo, di tipo argilloso. I campioni prelevati in questa zona sono analizzati per identificare le caratteristiche meccaniche della sola matrice. (Figura 13)



*Figura 13 – Affioramento 1: *mélange* sedimentario caratterizzato principalmente da matrice argillosa (Cerise, 2019).*

A differenza del primo affioramento, il secondo mostra una cospicua presenza di clasti; i campioni prelevati saranno caratterizzati da eterogeneità dovuta alla presenza della matrice e dei blocchi (Figura 14).



Figura 14 – Affioramento 2: *mélange* sedimentario con evidenti clasti in superficie (Cerise, 2019).

1.2.2. Prelievo dei campioni

Molti sono stati i motivi per cui il prelievo dei campioni è risultato estremamente difficoltoso, alcuni dei quali sono stati:

- non è stato possibile sfruttare l'aiuto di un escavatore perché infattibile raggiungere la zona di interesse con un macchinario del genere;
- la matrice argillosa non ha consentito l'estrazione del campione con le classiche tecniche di carotaggio, perché la presenza dell'acqua avrebbe indotto il danneggiamento del tessuto matriciale;
- impiegando perforazioni a secco, la difficoltà si è presentata durante le estrazioni del materiale dalla fustella, in cui è rimasto incastrato. Per estrapolare il materiale con il contributo di un martello, il campione ne è uscito completamente distrutto.

Per queste ragioni l'unico modo possibile è stato quello del prelievo manuale con l'ausilio di scalpello e martello (Figura 15). Nella prima fase è stato rimosso un piccolo strato

superficiale deteriorato dagli agenti atmosferici. Nella seconda fase, la più tortuosa, sono stati estratti degli spezzoni con gli unici attrezzi disponibili. La resistenza del materiale alla sollecitazione impressa dagli attrezzi ha complicato severamente la procedura di esecuzione, poiché per sollecitazioni elevate i campioni si rompevano in frammenti. I campioni di *mélange*, risultati idonei per le analisi da eseguire in laboratorio, sono stati accuratamente avvolti in carta di giornale e sigillati per rendere migliore la conservazione del materiale.



*Figura 15 – Campione di *mélange* in fase di estrazione. Il campionamento viene eseguito incuneando lo scalpello nel materiale e facendo leva con il martello. Zona del prelievo: affioramento 1 (Cerise, 2019).*

1.2.3. Tipologie di campioni

Tra i vari campioni ottenuti nella campagna di prelievo svolta nell'Oltrepò Pavese, in questo capitolo ne verranno descritti quattro. Due dei quali, sono prevalentemente costituiti da matrice mentre gli altri due sono eterogenei e includono un certo numero di clasti ben visibili.

CAMPIONE 1


| | |
|----------------------|--|
| Foto |  |
| Campagna di prelievo | Ottobre 2017 |
| Tipologia | Matrice e blocchi (campione eterogeneo) |
| Peso | 3915.1 [g] |
| Origine | Sedimentaria |
| Presenza blocchi | Si |
| Descrizione blocchi | Clasti di forma subangolare, superficie rugosa e di colore grigio e bianco. Presenza di alcuni grani di forma subarrotondata, di colore marrone. La disposizione delle inclusioni risulta altamente caotica all'interno del tessuto matriciale |
| Descrizione matrice | Colore grigio non stratificato |
| Presentazione | Molto fratturato e visibilmente alterato, non è possibile determinare una stratificazione |

Tabella 1 – Scheda tecnica del Campione 1

CAMPIONE 2


| | |
|----------------------|--|
| Foto |  |
| Campagna di prelievo | Ottobre 2017 |
| Tipologia | Matrice |
| Peso | 4722.4 [g] |
| Origine | Tettonica |
| Presenza blocchi | Pochi |
| Descrizione blocchi | I grani visibili a occhio nudo sono relativamente pochi, caratterizzati da un colore grigio scuro e bianco con sfumature di rosso, la forma è lamellare subangolare e la superficie rugosa |
| Descrizione matrice | Colore grigio/rossastro e definisce un evidente stratigrafia |
| Presentazione | Il susseguirsi di fenomeni di subduzione ha comportato forti pressioni fino a deformare e ordinare i pochi clasti lungo superfici di taglio, così da creare dei piani di foliazione |

Tabella 2 - Scheda tecnica del Campione 2

CAMPIONE 3

| | |
|----------------------|--|
| Foto |  |
| Campagna di prelievo | di Aprile 2018 |
| Tipologia | Matrice e blocchi (campione eterogeneo) |
| Peso | 4470.5 [g] |
| Origine | Sedimentaria |
| Presenza blocchi | Si |
| Descrizione blocchi | Clasti di forma subangolare, superficie rugosa e di colore grigio e bianco. Presenza di alcuni grani di forma subarrotondata, di colore marrone. La disposizione delle inclusioni risulta altamente caotica all'interno del tessuto matriciale |
| Descrizione matrice | Colore grigio non stratificato |
| Presentazione | Presenza di qualche fessura e visibilmente alterato, non è possibile determinare una stratificazione |

Tabella 3 - Scheda tecnica del Campione 3

CAMPIONE 4


| | |
|----------------------|--|
| Foto |  |
| Campagna di prelievo | di Aprile 2018 |
| Tipologia | Matrice |
| Peso | 4166.2 [g] |
| Origine | Sedimentaria |
| Presenza blocchi | Pochi |
| Descrizione blocchi | Clasti di forma subangolare, superficie rugosa e di colore rosa e bianco con sfumatura di grigio |
| Descrizione matrice | Colore grigio/rossastra con stratificazione netta ondulata |
| Presentazione | Molto fratturato e visibilmente alterato. A causa di fenomeni franosi avvenuti in passato in ambiente sottomarino si sono creati dei piani di foliazione |

Tabella 4 - Scheda tecnica del Campione 4

1.2.4. Caratterizzazione dei campioni

I Campioni descritti sono stati analizzati in lavori di tesi condotti precedentemente. Si riportano i risultati ottenuti riguardo:

- contenuto d'acqua;
- limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica.

CONTENUTO D'ACQUA

Il contenuto d'acqua rappresenta la quantità d'acqua all'interno dei vuoti rispetto alla quantità di materia solida. Tramite l'equazione (7) è possibile ricavare il valore in percentuale del contenuto d'acqua.

$$w = \frac{M_i - M_f}{M_s} \quad (7)$$

In cui si ha:

- M_i , massa iniziale nel suo stato naturale;
- M_f , massa essiccata in forno alla temperatura di 105° per 24 ore;
- M_s , massa della sola frazione fine decurtata della massa dei clasti che risultano impermeabili all'acqua.

| | Campione 1 | Campione 2 | Campione 3 | Campione 4 |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| w | 5.30 | 4.26 | 4.41 | 6.33 |
| [%] | | | | |

Tabella 5 -Valori del contenuto d'acqua dei campioni analizzati

LIMITI DI ATTERBERG

I limiti di Atterberg sono dei parametri ottenuti attraverso procedure standard di laboratorio e servono a quantificare il grado di interazione solido-acqua. In funzione della consistenza del materiale si distinguono quattro stati fisici: stato liquido, stato plastico, stato semisolido e stato solido. Il passaggio da uno stato di consistenza all'altro dipende dal comportamento del materiale al variare del contenuto d'acqua.

La determinazione dei limiti è stata eseguita sulla matrice dei campioni analizzati, in cui la parte fine del materiale è stata sciolta in acqua distillata e poi vagliata al setaccio ASTM 40 di apertura 425 μm . Successivamente, il passante è stato mescolato con aggiunta di acqua distillata fino a raggiungere la consistenza di un composto omogeneo.

Sia la prova con il Cucchiaino di Casagrande per determinare l'indice liquido sia quella per determinare l'indice plastico, sono state effettuate su quattro miscele corrispondenti a ciascun campione e, infine, mediate così da poter ottenere un risultato più affidabile a causa dell'ampia variabilità della prova.

In Tabella 6, oltre al limite liquido e al limite plastico calcolati nelle due prove, si riportano anche i valori dell'indice plastico e dell'indice di consistenza che dipendono dai valori dei limiti calcolati, valutati attraverso le equazioni (8) e (9).

$$PI = w_L - w_P \quad (8)$$

$$IC = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad (9)$$

| | 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 | 23.39 | 30.66 |
| Indice plastico PI [%] | 37.13 | 52.91 | 43.59 | 59.69 |
| Indice di consistenza IC [%] | 1.52 | 1.32 | 1.45 | 1.41 |

Tabella 6 – Valore medio dei limiti di Atterberg ottenuto da prove sui quattro campioni presi in esame.

ANALISI GRANULOMETRICA

L'analisi granulometrica permette di classificare un terreno mediante il raggruppamento delle varie dimensioni delle particelle in classi di grandezza e, successivamente, rapportando il peso percentuale di ciascuna classe rispetto al peso secco del campione iniziale.

In riferimento ai quattro campioni esaminati, l'analisi granulometrica è stata condotta con entrambi i metodi ovvero, inizialmente, per separare il materiale grossolano è stata utilizzata la vagliatura meccanica e, successivamente, tramite sedimentazione è stata analizzata la parte fine.

Come è possibile notare dalla Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19, il risultato ottenuto dall'analisi granulometrica è dato da quattro curve granulometriche rappresentative dei campioni con rispettiva nomenclatura suggerita dall' A.G.I.

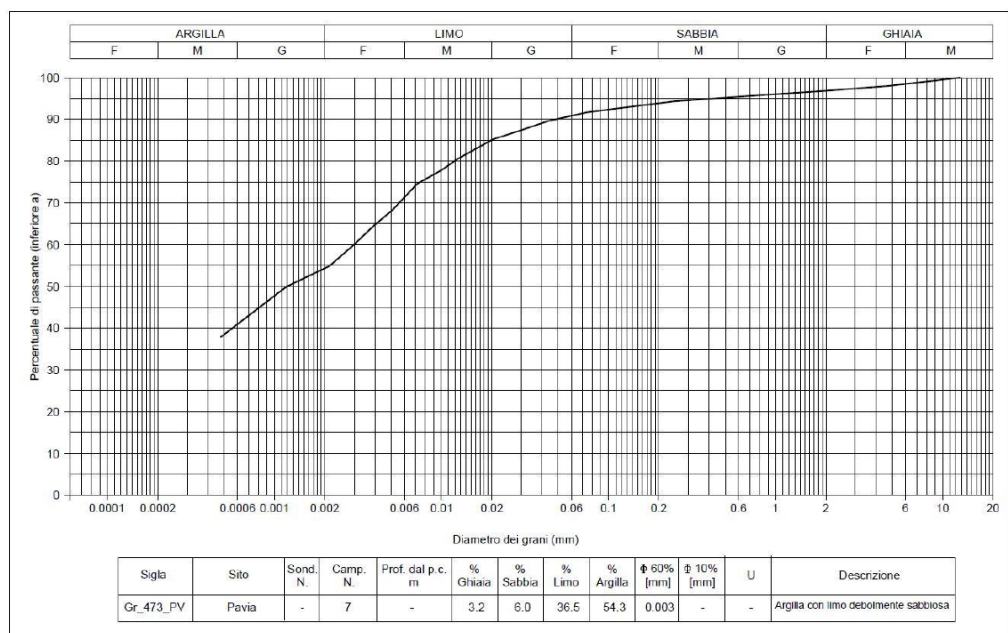


Figura 16 – Curva granulometrica Campione 1 “Argilla con limo debolmente sabbiosa”. (Cerise, 2019)

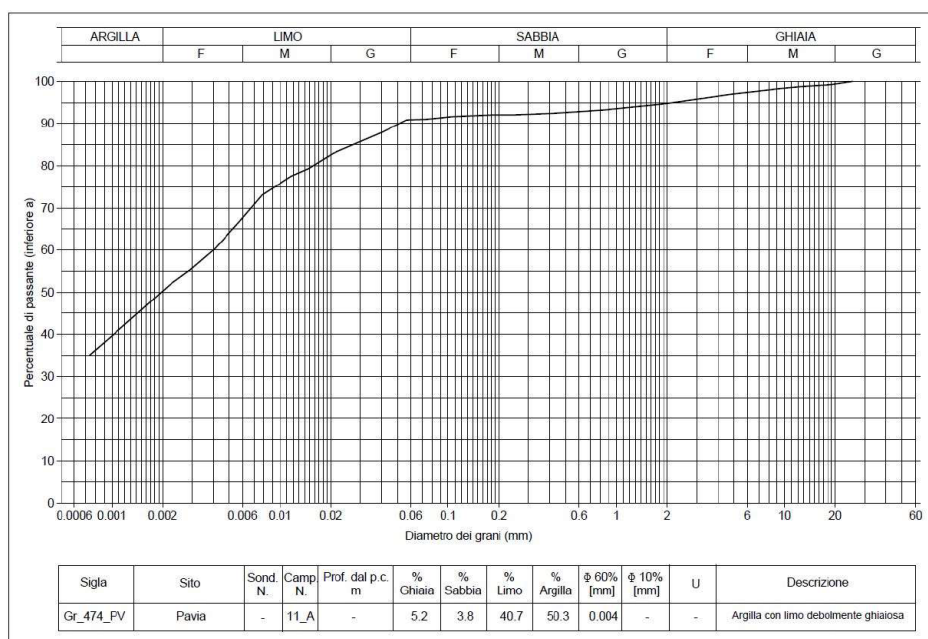


Figura 17 - Curva granulometrica Campione 2 “Argilla con limo debolmente ghiaiosa”. (Cerise, 2019)

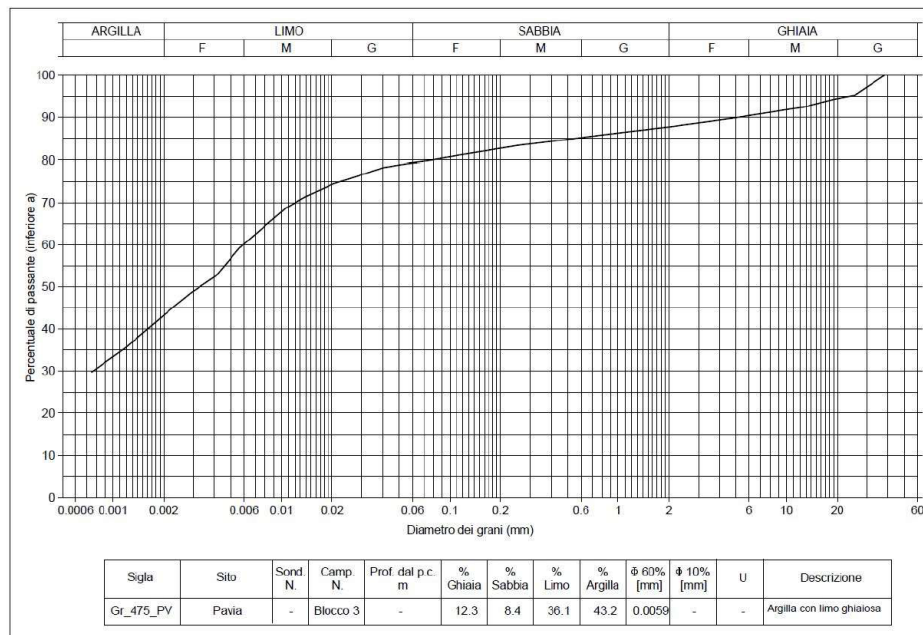


Figura 18 - Curva granulometrica Campione 3 "Argilla con limo ghiaiosa". (Cerise, 2019)

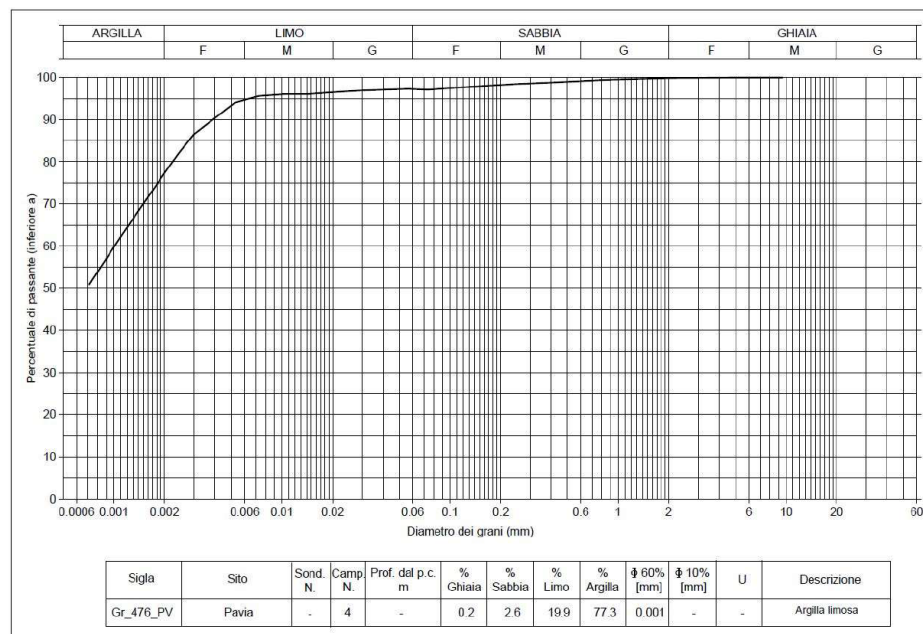


Figura 19 - Curva granulometrica Campione 4 "Argilla limosa". (Cerise, 2019)

Come è possibile osservare in Figura 20, la componente costante per tutti i campioni è quella argillosa che comprende un buon 50% del materiale che costituisce gli stessi. Il limo è presente con una percentuale ridotta, circa il 30% ed infine piccole percentuali di materiale grossolano.

Dalla descrizione fatta precedentemente sui singoli campioni e dalla vagliatura meccanica si nota una certa somiglianza tra il campione 1 ed il campione 3, i blocchi presentano una forma subarrotondata e un colore grigio/bianco. Mentre il campione 2 ed il campione 4 sono rappresentati entrambi da pochi blocchi di forma lamellare.

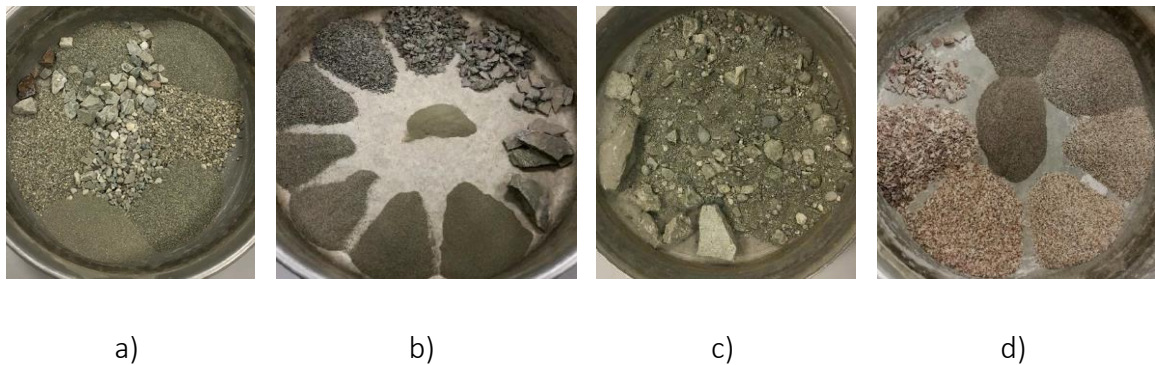


Figura 20 – Vagliatura meccanica dei quattro campioni analizzati a) Campione 1; b) Campione 2; c) Campione 3 e d) Campione 4. (Cerise, 2019)

2. Modellazione numerica tridimensionale

L'analisi numerica delle prove di compressione monoassiale è stata condotta mediante il software FLAC3D 6.0 (ITASCA). I dati acquisiti per lo svolgimento delle analisi tridimensionali sono stati forniti da tesisti che, precedentemente, hanno condotto delle analisi sperimentali presso il Laboratorio Geotecnico del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino.

In questo capitolo verranno descritti i provini esaminati per lo svolgimento del presente lavoro di tesi, in termini di composizione, geometria e modellazione CAD. Successivamente, verrà spiegato il processo e l'esecuzione della prova di compressione monoassiale dal punto di vista sperimentale ed il metodo adottato per la realizzazione del modello numerico.

2.1. Descrizione dei provini esaminati

Nell'ambito della ricerca sviluppata per esaminare il comportamento a compressione del mélange prelevato nella zona dell'Oltrepò Pavese, è stato possibile ricavare, tramite l'utilizzo di una sega a nastro diamantata, una serie di provini da impiegare per test di laboratorio.

Nel presente elaborato sono stati analizzati tre provini, due dei quali caratterizzati da sola matrice ed un terzo che presenta dei blocchi immersi nella matrice. I provini sono caratterizzati da un'elevata irregolarità geometrica a causa della difficoltà di campionamento.

2.1.1. Composizione dei provini

PROVINO 9

Provino ricavato a partire dal campione 2, prelevato nell'ottobre 2017, è composto in prevalenza da una matrice argillosa di mélange di origine tettonica. Presenta un colore grigio/rossastro con delle evidenti striature lungo la direzione di compressione. È possibile notare le caratteristiche appena descritte in Figura 21:

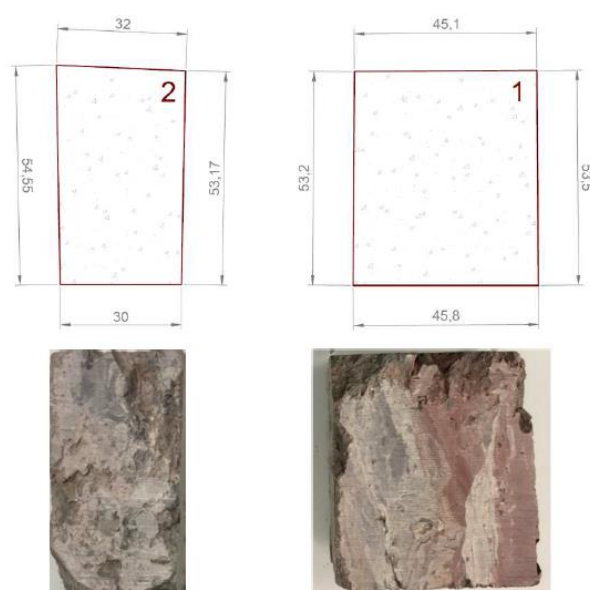


Figura 21 – Dimensioni in mm e fotografie di due facce del provino 9 di sola matrice. (Cerise, 2019)

PROVINO 4G

Provino ricavato a partire dal campione 4, prelevato nell'aprile 2018, è composto in prevalenza da una matrice argillosa di mélange di origine sedimentaria. Presenta un colore grigio/rossastro con delle evidenti striature lungo la direzione di compressione. È possibile notare le caratteristiche appena descritte in Figura 22:

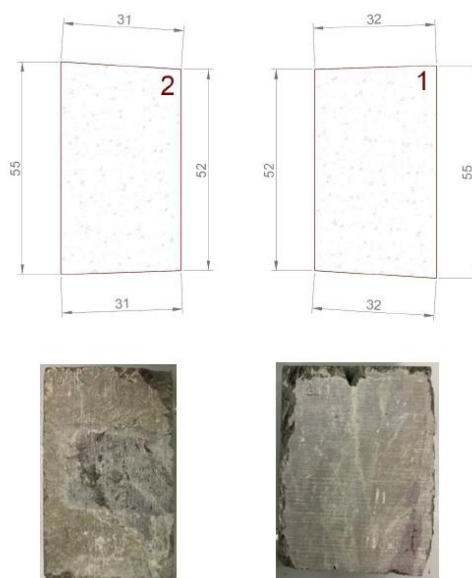


Figura 22 – Dimensioni in mm e fotografie di due facce del provino 4G di sola matrice. (Cerise, 2019)

PROVINO 7

Provino ricavato a partire dal campione 3, prelevato nell'aprile 2018, è composto in prevalenza da una matrice argillosa di mélange di origine sedimentaria e da una piccola percentuale di clasti di forma subangolare e alcune inclusioni di argilla sovraconsolidata di forma subarrotondata. È possibile notare le caratteristiche appena descritte in Figura 23:



Figura 23 – Faccia del provino 7 eterogeneo. (Milan, 2020).

2.1.2. Geometria dei provini

Le caratteristiche geometriche dei provini ricavati dai campioni riconducibili alla campagna di prelievo svolta nella zona dell'Oltrepò Pavese, sono riportate nella tabella Tabella 7.

| | Provino 9 | Provino 4G | Provino 7 |
|--|-----------|------------|------------|
| Tipologia | MATRICE | MATRICE | ETEROGENEO |
| Superficie media di compressione [mm ²] | 1385.75 | 1175.71 | 1039.26 |
| Altezza media [mm] | 53.6 | 53.9 | 68.9 |
| Lato [mm] | 37 | 34 | 32.2 |
| Percentuale volumetrica dei blocchi - VBP [%] | 0.17 | 0.08 | 4.9 |
| Anno prelievo | 2017 | 2018 | 2018 |
| Campione | 2 | 4 | 3 |

Tabella 7 - Caratteristiche geometriche e provenienza dei provini scelti per la modellazione tridimensionale.

Come è possibile notare in Tabella 7, i provini di sola matrice presentano una geometria piuttosto simile. Anche se prelevati in due periodi diversi, entrambi fanno riferimento all'affioramento 1, rappresentativo della sola matrice (come descritto del capitolo precedente).

Non è stato possibile ricavare dei provini di dimensioni identiche poiché le difficoltà di campionamento del materiale analizzato non hanno permesso la realizzazione di parallelepipedi perfetti. I campioni, infatti, presentano varie imperfezioni come le facce non perfettamente allineate, dimensioni differenti e poco regolari. (Figura 21, Figura 22)

Nella modellazione tridimensionale, nonostante le suddette irregolarità, sono stati adottati dei parallelepipedi regolari. Il lato è stato ricavato tramite la radice quadrata della superficie media di compressione, mentre l'altezza è stata approssimata per eccesso ad un valore pari a 54 mm per il provino 9 ed il 4G.

2.1.3. Modellazione dei provini

RHINOCEROS

Il primo passo per analizzare il comportamento a compressione del materiale in esame è stato quello della modellazione tridimensionale, partendo dalla rappresentazione grafica dei provini condotta tramite il software di modellazione CAD3D Rhinoceros (vers. 6). Il programma, conosciuto anche come Rhino, lavora creando oggetti 3D tramite superfici rettangolari che vengono unite tra loro per formare degli oggetti solidi. Questo software è in grado di creare, modificare, analizzare, documentare e ancora renderizzare, animare e tradurre curve, superfici, solidi, nuvole di punti e mesh poligonali nurbs.

PROVINO 9

La Figura 24 illustra il modello tridimensionale del provino 9 ottenuto su Rhino, con vista prospettica wireframe in cui vengono evidenziate le relative dimensioni in mm.

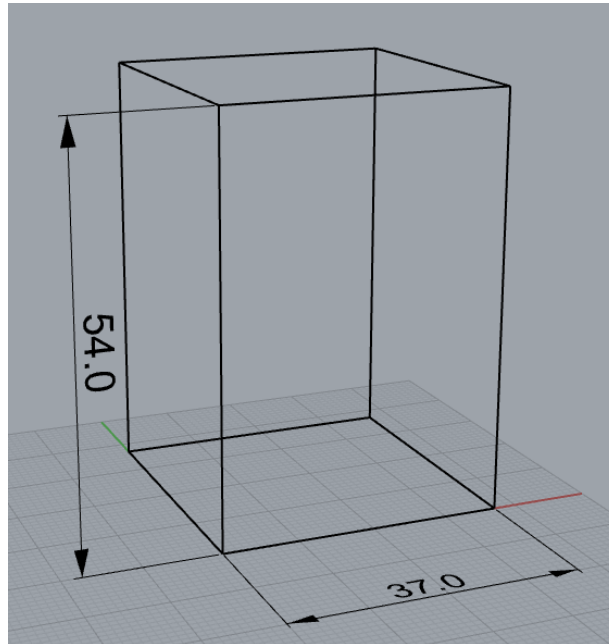


Figura 24 – Modello del provino 9 con dimensioni in mm, vista prospettica.

La Figura 25 mostra la finestra di lavoro di Rhino suddivisa in base alle quattro viste predefinite: prospettica, superiore, frontale e destra.

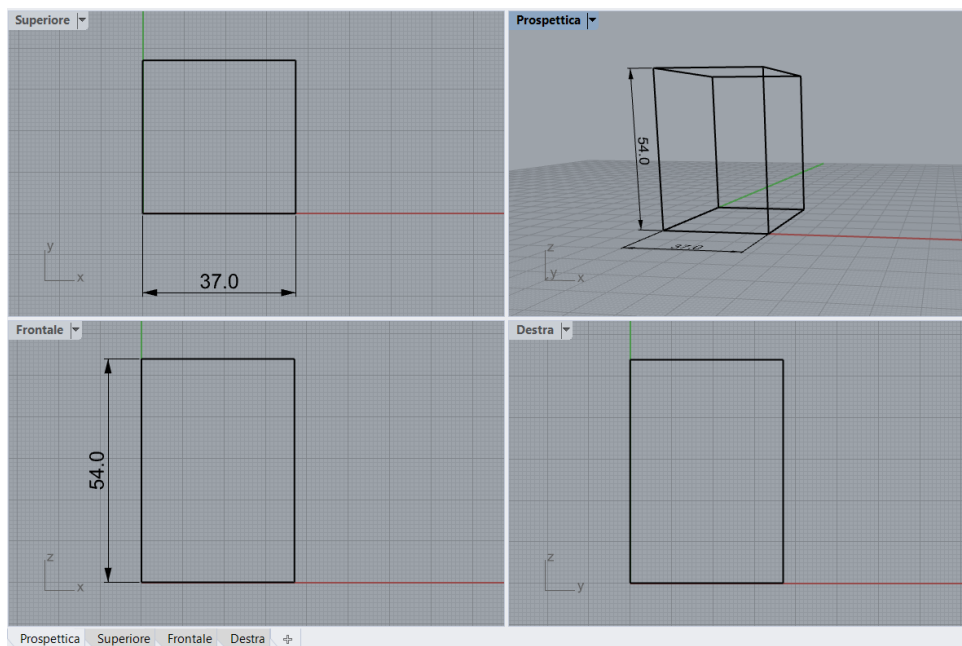


Figura 25 – Modello del provino 9 raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

PROVINO 4G

La Figura 26 illustra il modello tridimensionale del provino 4G ottenuto su Rhino, con vista prospettica wireframe in cui vengono evidenziate le relative dimensioni in mm.

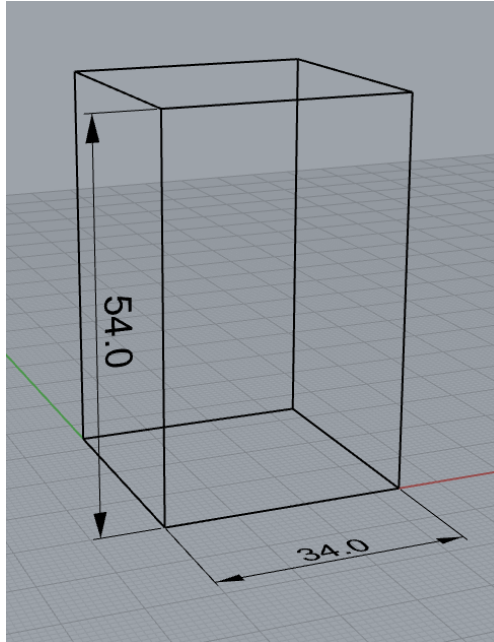


Figura 26 - Modello del provino 4G con dimensioni in mm, vista prospettica.

Nella Figura 27 sono rappresentate le quattro viste predefinite del programma.

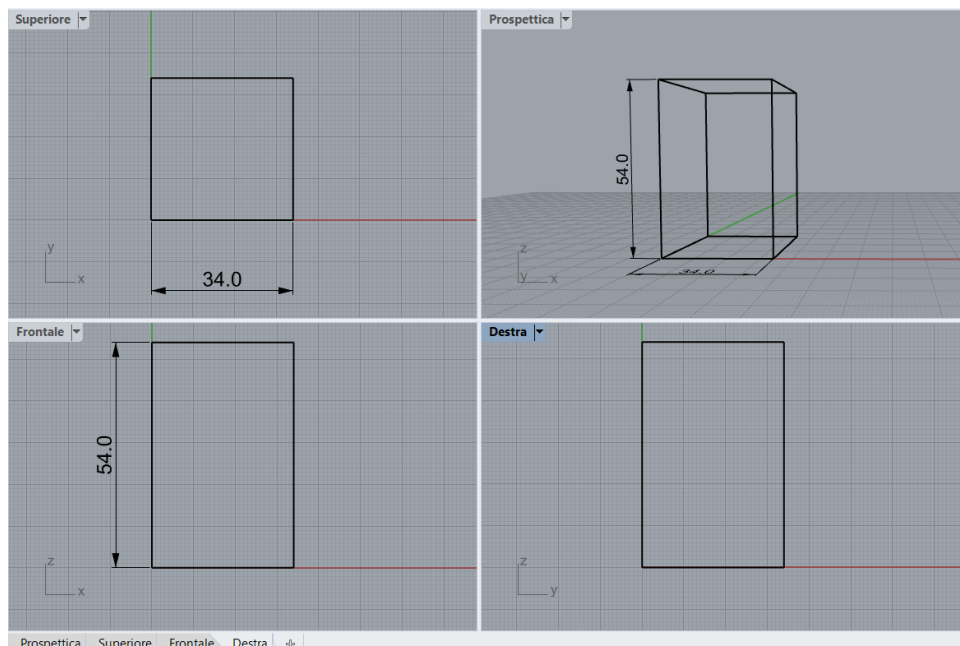


Figura 27 – Modello del provino 4G raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

PROVINO 7

In Figura 28 è rappresentato il provino 7 con le relative dimensioni in mm e vista prospettica.

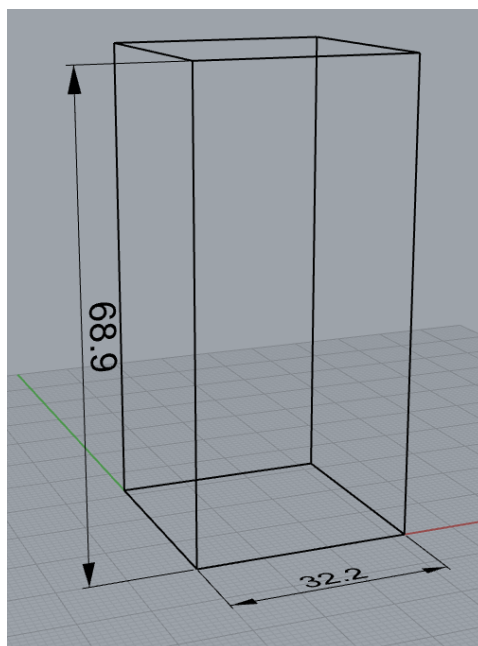


Figura 28 - Modello del provino 7 con dimensioni in mm, vista prospettica.

Questo provino è caratterizzato dall'inclusione di clasti calcarei con una percentuale pari al 4.9%. Mediante le analisi del materiale eseguite in laboratorio è stato possibile constatare che i blocchi presentano forma irregolare che viene approssimata tramite ellissoidi. Il numero dei blocchi è circa 40 con dimensione massima variabile in un intervallo che va da 1.5 mm a 4.5 mm.

A causa della mancanza di una tomografia che potesse individuare la posizione di ogni singolo blocco, data la bassa percentuale volumetrica, i parametri della distribuzione dimensionale sono stati inseriti manualmente ed in modo casuale all'interno del modello. Sulla base delle ispezioni effettuate sui blocchi, si è scelto di usare una forma ellissoidica con eccentricità pari a 0.45.

Per evitare la compenetrazione dei clasti, è stato creato un semplice codice di calcolo su MATLAB, considerando delle sfere con il diametro pari alla dimensione massima dei blocchi ellissoidici, al fine di ricavare le coordinate dei centri delle sfere nelle tre dimensioni.

Fissato il valore dell'eccentricità e quello del semiasse maggiore sono state ricavate le dimensioni dei semiasse nelle altre direzioni ed il volume (equazioni (10), (11), (12), e (13)).

I risultati dedotti per la classificazione geometrica dei 40 blocchi sono illustrati in Allegato 1.

$$a > b \quad e = \frac{c}{a} \quad (10)$$

$$c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (11)$$

$$b = \sqrt{a^2 - a^2 \cdot e^2} \quad (12)$$

$$V = \frac{4}{3}\pi abd \quad (13)$$

In cui:

- a, semiasse maggiore;
- b, semiasse minore;
- c, semidistanza focale;
- d, semiasse minore (3 dimensione);
- e, eccentricità pari a 0.45;
- V, volume dell'ellissoide.

Considerando la geometria del provino 7, il volume dei blocchi risulta essere pari a 3508.65 mm^3 . Il volume ottenuto dall'inserimento dei 40 ellissoidi risulta prossimo al volume reale (3509 mm^3).

Inoltre, l'orientazione dei blocchi all'interno del provino è stata determinata considerando degli angoli di rollio (oscillazione intorno all'asse longitudinale) e beccheggio (oscillazione intorno all'asse trasversale) estratti in maniera casuale tramite il comando Excel CASUALE

TRA, utilizzando dei valori compresi tra 0° e 90° . Gli angoli ricavati sono riportati in Allegato 1.

Di seguito sono mostrate le immagini relative all'inserimento dei blocchi ellissoidici all'interno del parallelepipedo creato per modellare il campione 7.

In Figura 29 sono mostrati gli ellissoidi in vista prospettica, in modalità semitrasparente e wireframe.

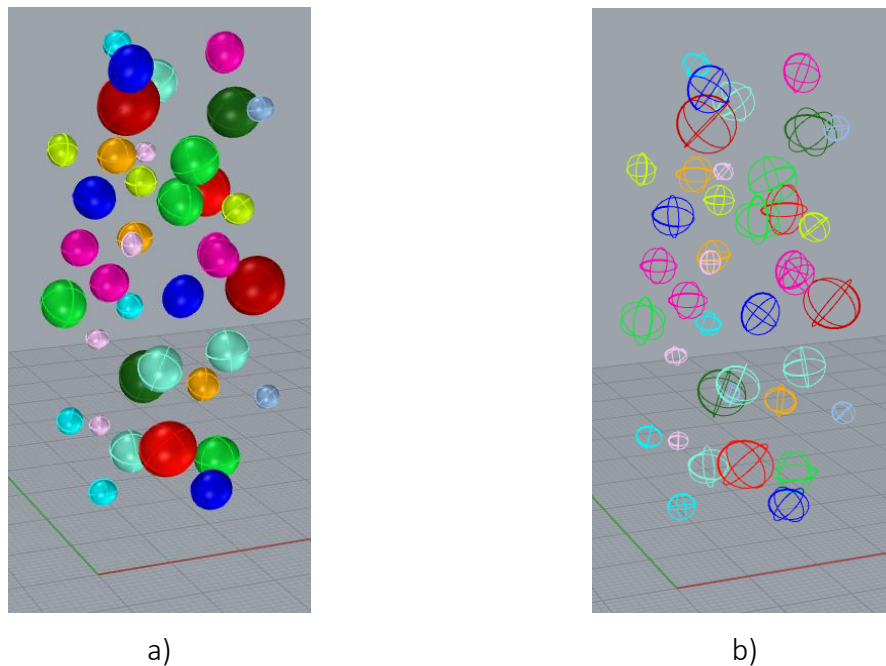


Figura 29 – Modello dei blocchi con dimensioni in mm^3 , vista prospettica. a) modalità semitrasparente, b) modalità wireframe.

Dalla Figura 30 è possibile notare che non avviene compenetrazione tra i blocchi, le immagini ritraggono varie altezze e angolazioni di visualizzazione.

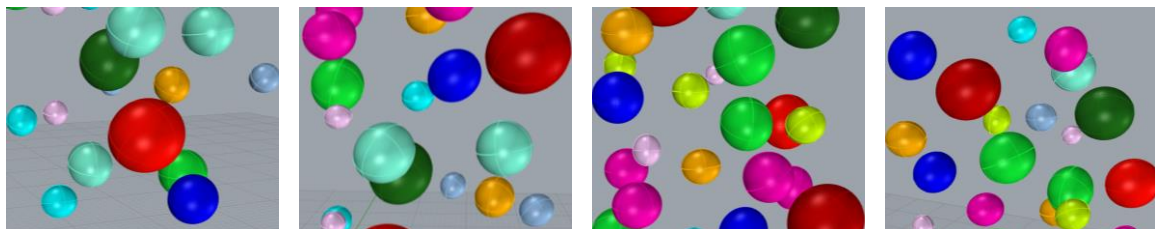
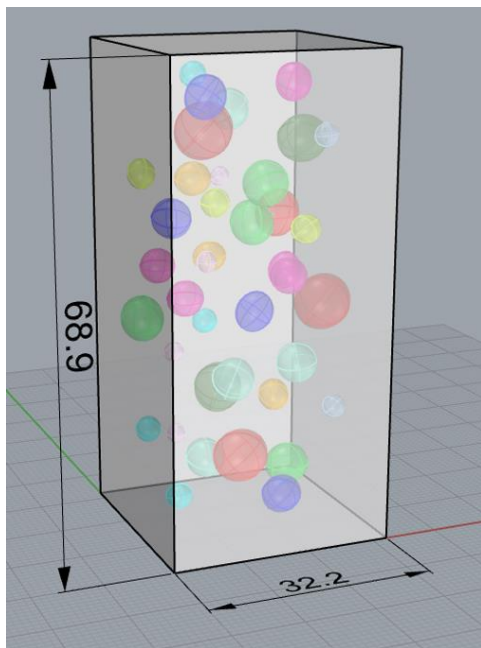
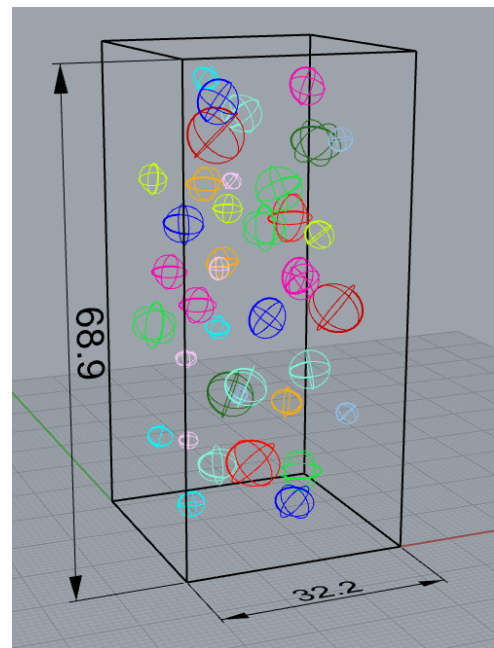


Figura 30 – Blocchi vista prospettica con modalità semitrasparente, visualizzazione da varie altezze e angolazioni.

Si riporta in Figura 31 e Figura 32 il risultato finale della modellazione.



a)



b)

Figura 31 - Modello del provino 7 con dimensioni in mm e inserimento dei blocchi ellissoidici, vista prospettica. a) modalità semitrasparente, b) modalità wireframe.

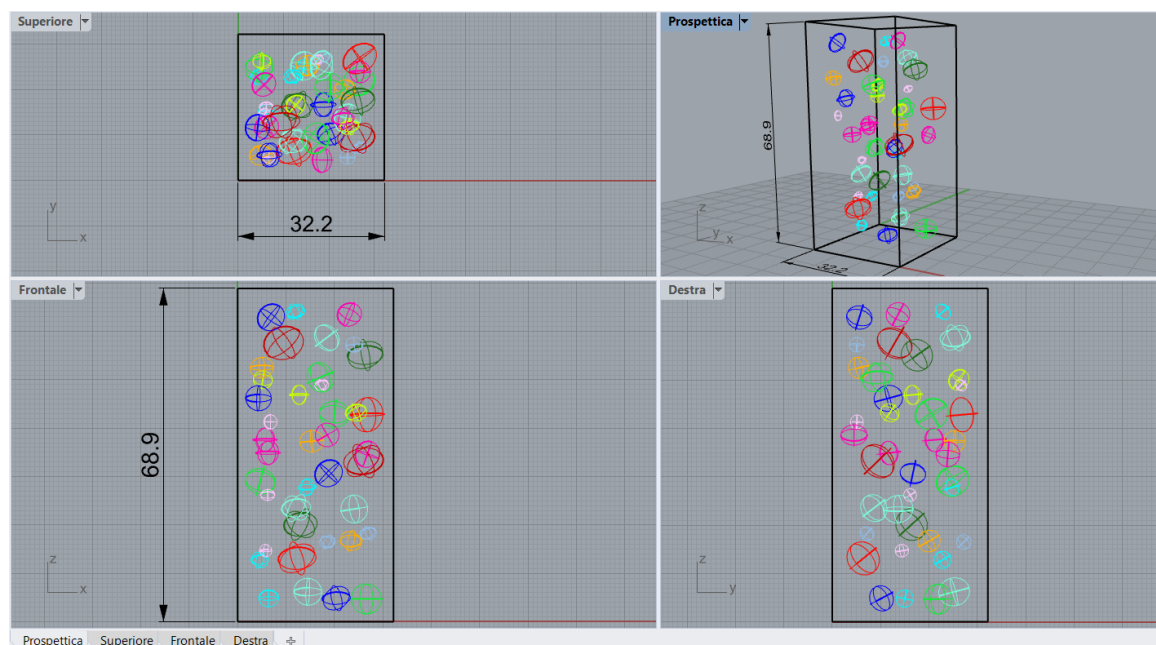


Figura 32 - Modello del provino 7 raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

GRIDDLE

Rhinoceros offre una vasta quantità di plug-in che permettono al software di essere una delle piattaforme più libere e aperte alla sperimentazione nel mondo dei programmi CAD.

Per la generazione delle mesh è stato usato il plug-in Griddle, per software CAD3D Rhinoceros 6. Tramite questo programma è possibile ridisegnare le mesh di superficie di Rhino in conformità alle specifiche dimensioni e al tipo di forma (triangolo, quad – dom e all-quad). Le mesh di superficie possono essere utilizzate come limiti per il mesher di volume di Griddle. Le mesh volumetriche del modello, generate tramite Griddle in formato .f3grid, possono essere importate all'interno del progetto in FLAC3D.

Al fine di stabilire la dimensione ottimale della maglia della mesh, sono state effettuate delle analisi preliminari partendo da modelli dotati di una mesh più grossolana con dimensione della maglia pari a 2.5 mm. Successivamente, la mesh è stata infittita fino ad un valore di dimensione della maglia di 0.75 mm. Questa procedura è stata effettuata allo scopo di trovare un compromesso tra il breve tempo di computazione relativo ai modelli con mesh più grossolana e la maggiore precisione dei risultati ottenibili con mesh più fitte. Inoltre, come spiegato più approfonditamente nel capitolo 3, l'analisi di modelli con differenti mesh hanno evidenziato in maniera marcata il fenomeno della "mesh dependency". La dimensione della maglia della mesh adottata per i modelli definitivi è pari ad 1 mm.

A titolo di esempio, in Figura 33 è illustrato il provino 4G con mesh a 2.5 mm, mentre, in Figura 34, lo stesso viene mostrato nella finestra delle viste predefinite di Rhino.

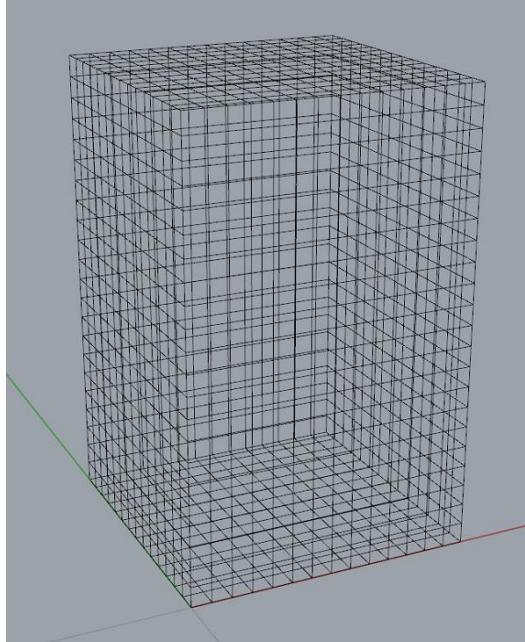


Figura 33 - Modello del provino 4G con mesh 2.5 mm, vista prospettica.

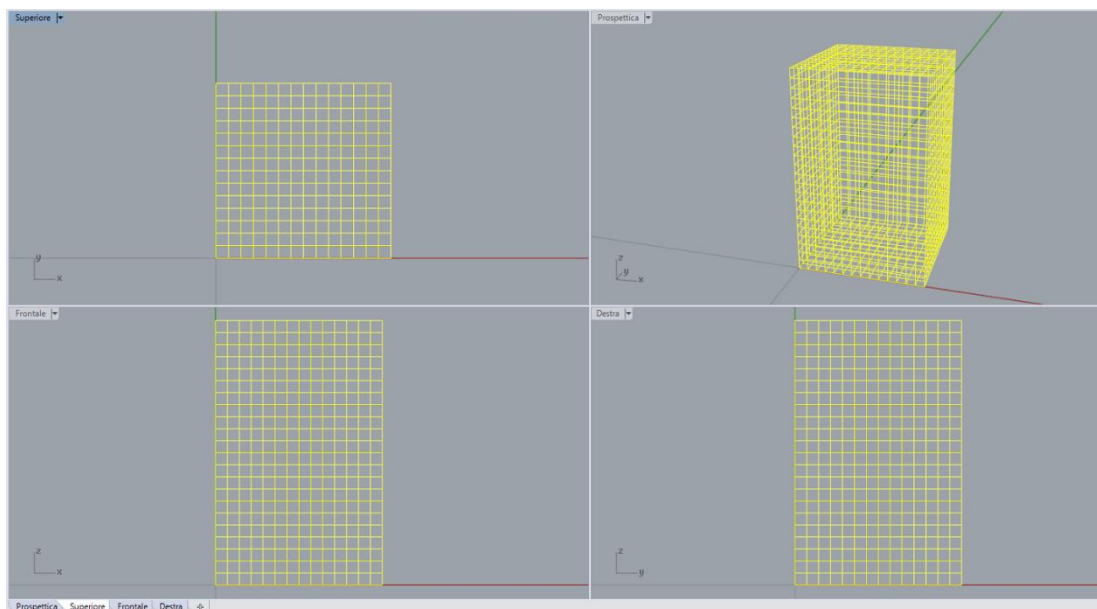


Figura 34 - Modello del provino 4G con mesh 2.5 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

In Figura 35 e in Figura 36 è illustrato il provino 9 con mesh a 1 mm, rispettivamente, tramite la visualizzazione prospettica e nella finestra delle viste predefinite di Rhino.

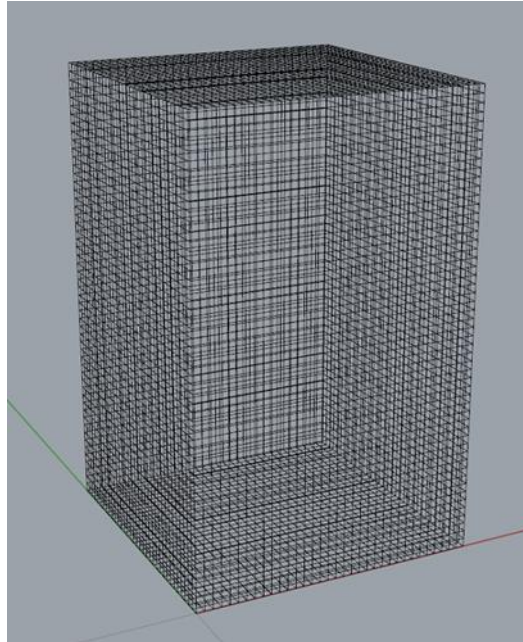


Figura 35 - Modello del provino 9 con mesh 1 mm, vista prospettica.

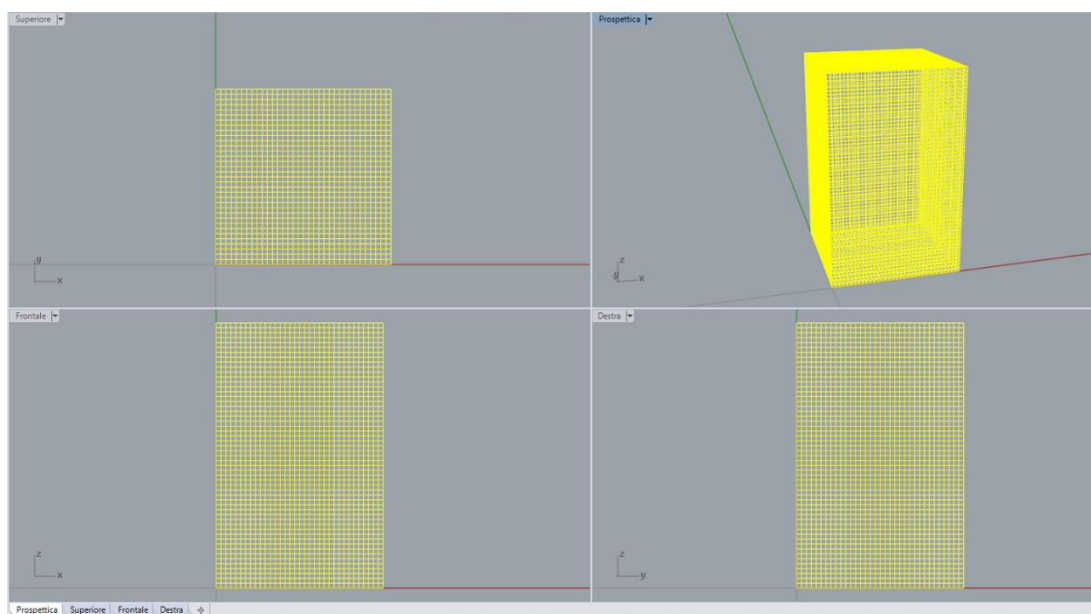


Figura 36 - Modello del provino 9 con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

In Figura 37 e in Figura 38 è illustrato il provino 4G con mesh a 1 mm, rispettivamente, tramite la visualizzazione prospettica e nella finestra delle viste predefinite di Rhino.

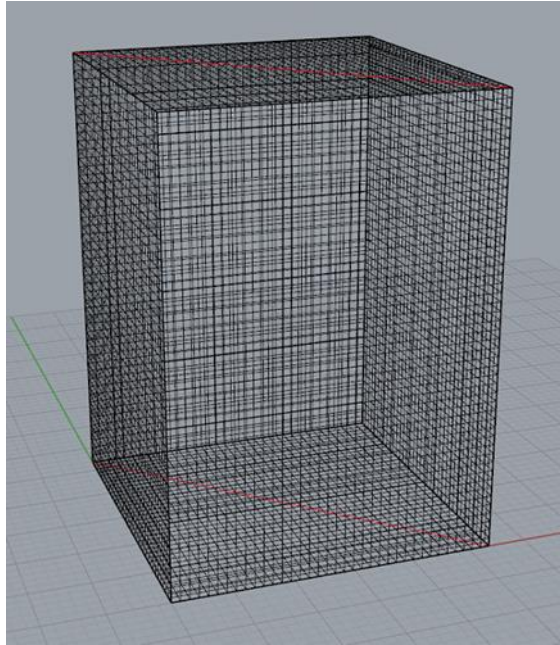


Figura 37 - Modello del provino 4G con mesh 1 mm, vista prospettica

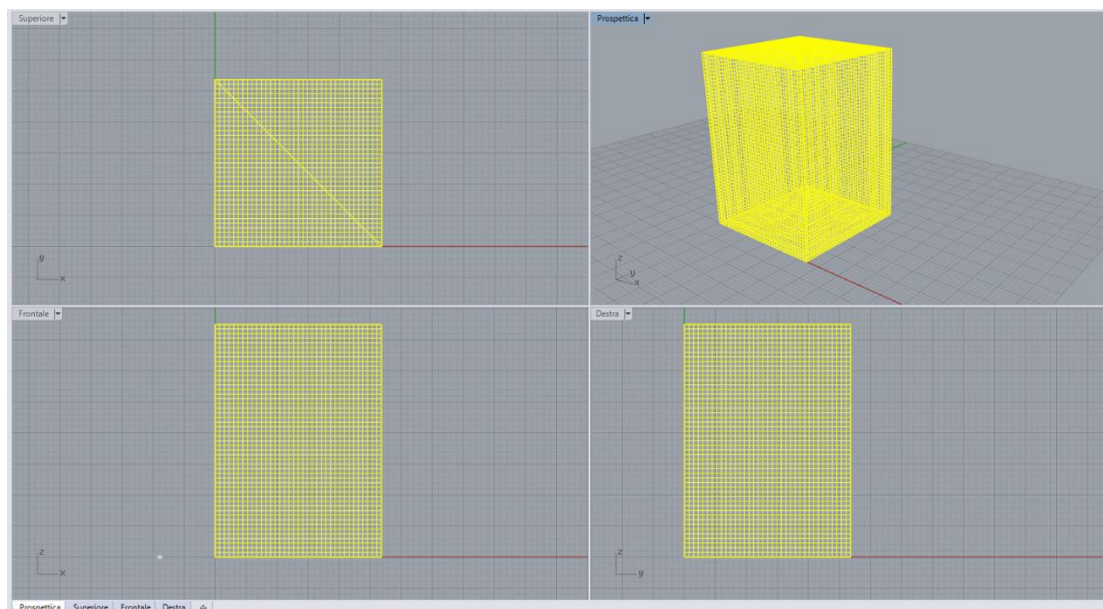


Figura 38 - Modello del provino 4G con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

In Figura 39 e in Figura 40 è illustrato il provino 7 con mesh a 1 mm sia per il parallelepipedo che per i blocchi al suo interno, rispettivamente, tramite la visualizzazione prospettica e nella finestra delle viste predefinite di Rhino.

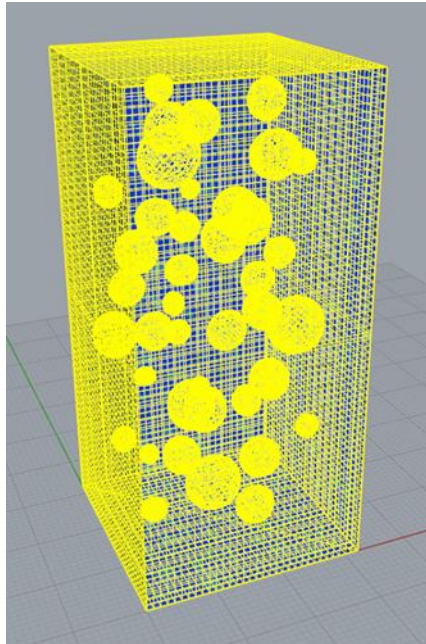


Figura 39 - Modello del provino 7 con mesh 1 mm, vista prospettica.

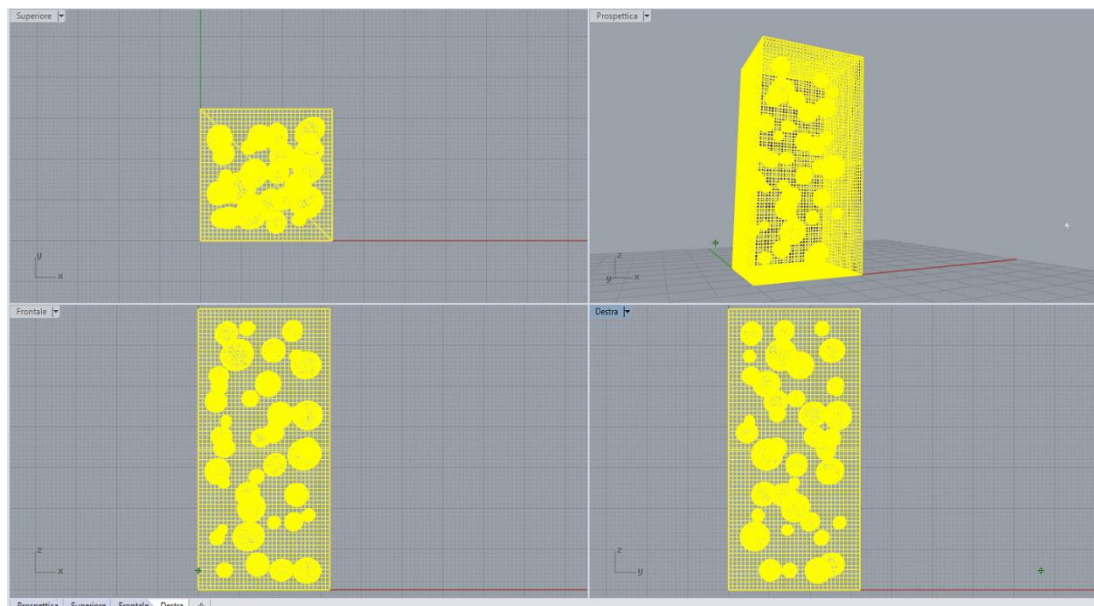


Figura 40 - Modello del provino 7 con mesh 1 mm raffigurato nelle quattro viste predefinite di Rhino.

2.2.Prova di compressione monoassiale

La prova di compressione monoassiale consente una misura diretta della resistenza a compressione della roccia. La prova viene eseguita su provini cilindrici con un rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 3, con un diametro superiore a 5 cm e almeno 20 volte maggiore rispetto la dimensione massima del grano. Il provino deve presentare le facce perfettamente piane e la superficie laterale deve essere lisciata e regolare. Lungo l'asse e la circonferenza del provino vengono generalmente applicati degli estensimetri elettrici (strain gauge) per la misura delle deformazioni assiali e laterali. La strumentazione utilizzata è una pressa idraulica dotata di piastre in acciaio piane e parallele, all'interno della quale viene posizionato il provino. In genere, la prova viene condotta a velocità costante, esercitando una forza perpendicolare alle facce del provino, comprimendolo fino alla rottura. Oltre alla resistenza a compressione, grazie alla presenza degli estensimetri elettrici, la prova permette di calcolare i parametri di deformabilità del materiale, in particolare, il modulo di Young e il coefficiente di Poisson.

2.2.1. Prova svolta in laboratorio

Per la determinazione dei parametri meccanici dei campioni di *mélange d'Oltrepò Pavese* è stato studiato il comportamento a compressione del materiale.

Lo scopo è quello di caratterizzare il materiale eterogeneo nelle sue due componenti, matrice e blocchi. La modellazione delle formazioni complesse si basa su un approccio del continuo eterogeneo, in cui, alla matrice e ai blocchi, discretizzati separatamente, vengono assegnate le rispettive proprietà meccaniche.

In riferimento ai blocchi, una volta identificato il litotipo, è possibile assegnare i parametri di resistenza sulla base dei suggerimenti disponibili in letteratura. In merito alla caratterizzazione meccanica della matrice, questa risulta più difficoltosa in quanto il comportamento meccanico è legato alla variabilità del materiale.

Per studiare il comportamento a compressione del materiale sarebbe opportuno eseguire una prova di compressione triassiale, in cui, un provino cilindrico di dimensioni standard,

viene sottoposto ad un confinamento laterale costante, mentre, lungo la direzione assiale, viene applicato uno sforzo crescente fino a portare il provino a rottura.

Nel *mélange* in esame, non è possibile eseguire una prova di compressione triassiale perché il materiale, non essendo campionabile, non consente la realizzazione di provini cilindrici indisturbati con dimensioni prestabilite per eseguire la prova. Questa tipologia di *mélange*, come descritto precedentemente, è un materiale roccioso con matrice argillosa/limosa e anche se caratterizzato da una certa resistenza, sotto sforzo risulta facilmente sgretolabile e si scioglie in acqua.

Di conseguenza, in base alle limitazioni legate alla geometria del materiale e alla sua composizione, si è preferito eseguire una prova di compressione monoassiale, che risulta meno restrittiva dal punto di vista geometrico. La realizzazione dei provini è stata eseguita a partire dai campioni prelevati manualmente in situ e mediante l'utilizzo di una sega a nastro con lama diamantata, nonostante le numerose difficoltà incontrate durante l'operazione di segagione, sono stati ottenuti dei parallelepipedi con dimensioni differenti e non perfettamente regolari.



*Figura 41 – Sega a nastro con lama diamantata usata per la realizzazione dei provini di *mélange* (Cerise, 2019)*

Data l'irregolarità dei provini, i risultati della prova di compressione monoassiale non corrispondono al vero comportamento a compressione del materiale, ma lo approssimano in maniera esaustiva.

Il calcolo delle deformazioni locali non è avvenuto mediante l'utilizzo di estensimetri elettrici per due motivi:

- l'applicazione degli estensimetri adesivi non è stata consentita poiché la superficie del provino risulta polverosa;
- l'utilizzo di estensimetri ad infissione avrebbe potuto causare l'innesco di cricche all'interno del provino e dunque la rottura ancor prima dello svolgimento della prova.

Per porre rimedio a questo inconveniente è stato utilizzato un trasduttore esterno (*Linear Variable Differential Transformer* o *LVD*T), tramite il quale è stato possibile ricavare la deformazione assiale globale nel tempo, considerando lo spostamento della piastra di applicazione del carico in associazione al valore della forza assiale fornito dalla cella di carico con una frequenza pari a 100 Hz. Il risultato ottenuto non è esaustivo poiché include, oltre la distorsione assiale del provino anche le deformazioni della piastra, per questo motivo non fornisce un valore attendibile del modulo di deformabilità del materiale indagato. La differenza di deformabilità tra la piastra ed il provino genera la formazione di tensioni tangenziali che producono uno sforzo triassiale.

Al fine di valutare le deformazioni locali, così da determinare un valore attendibile del modulo di deformabilità del materiale, è stato aggiunto un ulteriore sistema di monitoraggio, la correlazione digitale di immagini (*Digital Image Correlation* o *DIC*), che offre l'opportunità di identificare in maniera visiva le deformazioni superficiali. Quest'ultima è una tecnica ottica di monitoraggio non distruttiva, basata sul confronto di immagini digitali, dalle quali è possibile ricavare gli spostamenti e le deformazioni dell'elemento inquadrato. (Gabielli & Colla, 2013).

2.2.2. Risultati della prova di laboratorio

Dalla prova di compressione monoassiale in definitiva, è stata determinata la resistenza a compressione (*Unconfined Compressive Strength* o *UCS*), calcolata mediante il rapporto tra il carico a rottura del provino e l'area della sezione trasversale, come mostrato nell'equazione (14) e la deformazione assiale corrispondente:

$$UCS = \frac{F}{A} \quad (14)$$

In Figura 42 è possibile osservare l'andamento del diagramma tensione – deformazione relativo alla prova di compressione monoassiale eseguita sui tre provini in esame, mentre in Tabella 8, sono elencati i risultati finali.

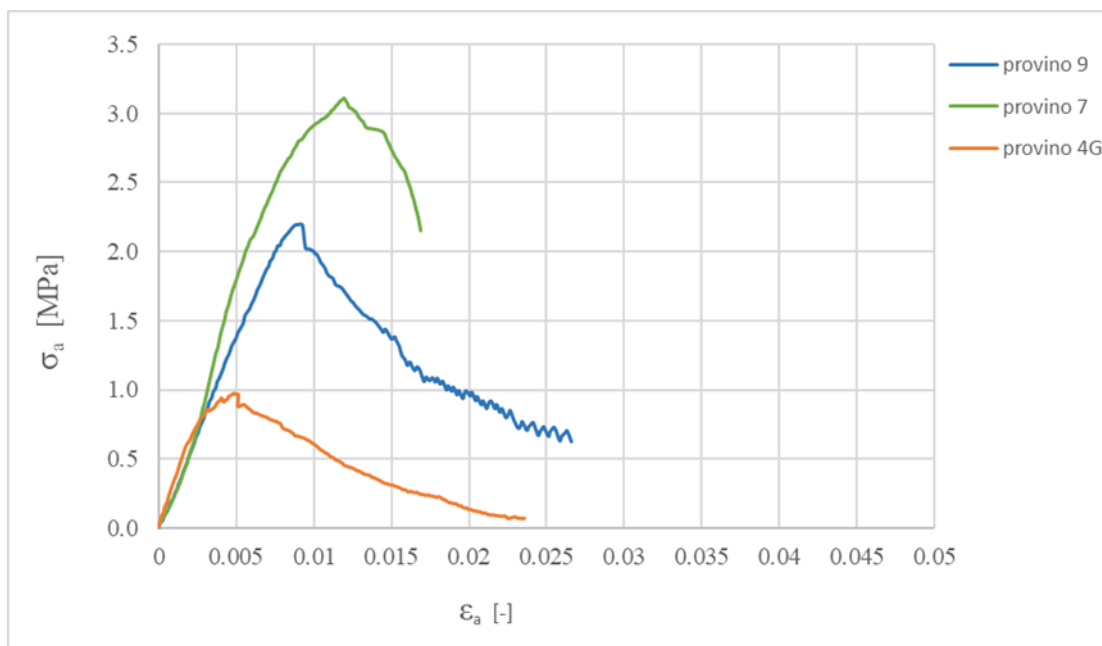


Figura 42 – Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7.

| | UCS [MPa] | ε_a [%] |
|------------|-----------|---------------------|
| Provino 9 | 2.20 | 0.9 |
| Provino 4G | 0.98 | 0.48 |
| Provino 7 | 3.12 | 1.2 |

Tabella 8 – Risultati resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali.

Il modulo di deformabilità ed il coefficiente di Poisson forniti dalle prove sperimentali sono riportati nell'equazione (15) e (16).

$$0.20 \leq E \leq 0.34 \quad [GPa] \quad (15)$$

$$\nu = 0.3 \quad (16)$$

Per completare la valutazione dei parametri di resistenza del mélange d'Oltrepò Pavese, è stato esaminato il comportamento a taglio del materiale oggetto di studio. Mediante un'attività sperimentale si è determinato il criterio di rottura ed i parametri di resistenza della matrice. Il criterio di rottura scelto è quello di Mohr-Coulomb e i parametri di resistenza, in particolare la coesione e l'angolo di resistenza al taglio, sono stati ricavati tramite una serie di prove di taglio diretto svolte in modo non convenzionale a causa delle varie problematiche precedentemente descritte dei provini esaminati. I risultati forniti dalle prove evidenziano un campo di variabilità dei parametri (equazioni (17) e (18)), causato dalla difficoltosa caratterizzazione di questo materiale, il cui comportamento meccanico è legato alle complessità intrinseca dello stesso.

$$25^\circ \leq \varphi \leq 36^\circ \quad (17)$$

$$210 \leq c \leq 428 \text{ [kPa]} \quad (18)$$

2.3.FLAC3D

La modellazione tridimensionale è stata eseguita mediante FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions - ITASCA), software di modellazione numerica che estende la capacità delle analisi di FLAC in tre dimensioni, simulando il comportamento di strutture tridimensionali quali: scavi geotecnici (tunnel, pendii), costruzioni (dighe, fondazioni, muri) o, come nel caso in esame, prove di laboratorio.

FLAC3D è un programma basato sul metodo delle differenze finite esplicito (FDM), che permette di studiare, in maniera numerica, il comportamento meccanico di un materiale tridimensionale al raggiungimento dell'equilibrio o di un flusso plastico costante.

2.3.1. Descrizione del modello matematico

I meccanismi su cui si basa il modello matematico derivano da principi generali (definizione delle deformazioni, leggi del moto) e dall'uso di equazioni costitutive che definiscono il materiale modellato. Le espressioni matematiche risultanti sono un set di equazioni differenziali alle derivate parziali, che mettono in relazione variabili meccaniche (tensioni) e cinematiche (rapporto di deformazione, velocità), le quali verranno risolte per geometrie e proprietà particolari dopo aver specificato le condizioni al contorno e le condizioni iniziali.

Un aspetto importante del modello è l'inclusione delle equazioni del moto, sebbene FLAC3D è principalmente interessato allo stato di tensione e deformazione del mezzo vicino allo stato di equilibrio. La sezione di implementazione numerica mostra l'utilizzo di termini inerziali come mezzi tramite i quali raggiungere lo stato di equilibrio in un modo numericamente stabile.

2.3.2. Convenzioni

Nella formulazione lagrangiana adottata in FLAC3D, un punto è caratterizzato dalle componenti vettoriali x_i , u_i e dv_i/dt , $i = 1,2,3$ di, rispettivamente, posizione, spostamento, velocità e accelerazione.

La convenzione adottata per la notazione prevede che una lettera in grassetto descriva un vettore o un tensore, in base al contesto. Il simbolo a_i denota la componente i del vettore $[a]$ in un sistema di riferimento cartesiano; A_{ij} è la componente (i,j) del tensore $[A]$. Inoltre, α_i è la derivata parziale di α rispetto ad x_i (α può essere una variabile scalare, un vettore o una componente di un tensore). Per definizione, trazione e allungamento sono positive.

2.3.3. Stato tensionale, deformativo ed equazioni del moto

Lo stato tensionale in un dato punto del mezzo è caratterizzato dal tensore simmetrico delle tensioni σ_{ij} . Il vettore di trazione $[t]$ su una faccia di versore $[n]$ è data dalla formulazione di Cauchy (equazione (19)):

$$t_i = \sigma_{ij}n_j \quad (19)$$

Supponiamo che le particelle del mezzo si muovano con velocità $[v]$. In un tempo infinitesimo $[dt]$, il mezzo subisce una deformazione infinitesima data dalle traslazioni $v_i dt$ e le componenti corrispondenti del tensore di deformazione possono essere scritte come nell'equazione (20):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (20)$$

In cui le derivate parziali sono prese rispetto alle componenti del vettore posizione corrente $[x]$.

Le equazioni del moto sono definite dalla formulazione di Cauchy (equazione (21)).

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (21)$$

In cui ρ è il peso per unità di volume del mezzo, $[b]$ è la forza peso per unità di massa, $d[v]/dt$ è la derivata della velocità. Queste leggi governano, nel modello matematico, il moto di un volume elementare attraverso le forze applicate al mezzo. Nel caso di equilibrio statico, l'equazione della dinamica si riduce alla seguente equazione (22):

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (22)$$

2.3.4. Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Le condizioni al contorno si basano sull'imposizione di trazioni ai bordi del modello e/o velocità (per indurre spostamenti imposti). Inoltre, possono essere presenti delle forze di volume. Lo stato tensionale iniziale del corpo deve essere specificato.

2.3.5. Equazioni costitutive

Le equazioni del moto (equazione (21)), insieme alle equazioni che definiscono lo stato deformativo (equazione (20)), costituiscono nove equazioni in quindici incognite (le sei componenti del tensore degli sforzi, le sei componenti del tensore delle deformazioni e le tre componenti del vettore velocità). Le equazioni costitutive forniscono sei relazioni aggiuntive che definiscono la natura del materiale considerato. Solitamente vengono scritte nella forma (equazione (23)).

$$[\dot{\sigma}] = H_{ij}(\sigma_{ij}, \xi_{ij}, \kappa) \quad (23)$$

In cui:

- $[\dot{\sigma}]$, tensore corotazionale "stress-rate";
- $[H]$, funzione data;
- κ , parametro che tiene conto della storia di carico.

2.3.6. Formulazione numerica

Il metodo di soluzione di FLAC3D è caratterizzato dai seguenti tre approcci:

1. approccio alle differenze finite (derivate spaziali e temporali del primo ordine vengono approssimate per differenze finite, assumendo che la variabile abbia variazioni lineari in intervalli finiti di spazio e tempo);
2. approccio di modellazione discreto (un mezzo continuo è sostituito da un mezzo discreto equivalente in cui tutte le forze coinvolte sono concentrate nei nodi di una mesh tridimensionale usata per rappresentare il mezzo);
3. approccio di soluzione dinamica (i termini inerziali nell'equazione del moto vengono utilizzati come mezzi numerici per raggiungere lo stato di equilibrio del sistema considerato).

Le leggi del moto per il continuo, mediante questi approcci, vengono trasformate in forma discreta come leggi di Newton ai nodi. Il sistema risultante di equazioni differenziali ordinarie viene risolto numericamente usando un approccio esplicito alle differenze finite, per cui FLAC3D utilizza un metodo di risoluzione basato sul *timestep* per risolvere le equazioni discretizzate. Nel software, il numero di passaggi computazionali, detti anche cicli,

necessari per raggiungere una soluzione, può essere controllato automaticamente dal codice o manualmente dall'utente.

Al fine di definire le variazioni di velocità ed i corrispondenti intervalli spaziali, il mezzo viene discretizzato in elementi di forma tetraedrica all'interno dei quali la deformazione è costante. I vertici di questi elementi sono i nodi della mesh.

2.3.7. Criterio di Mohr Coulomb

Il criterio di Mohr-Coulomb in FLAC3D è descritto in termini di tensioni principali, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, le tre componenti del vettore delle tensioni generalizzato per questo modello ($n = 3$). Le componenti del vettore generalizzato delle deformazioni corrispondenti sono le deformazioni principali $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

Le espressioni incrementali della legge di Hooke in termini di tensioni generalizzate e di incrementi di tensione sono espresse nell'equazione (24):

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_1 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_2 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_3 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_2^e)\end{aligned}\tag{24}$$

In cui α_1 e α_2 sono costanti del materiale definite in termini di modulo di taglio, G , e modulo di comprimibilità, K , come espresso nelle equazioni (25) e (26):

$$\alpha_1 = K + \frac{4}{3}G\tag{25}$$

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G\tag{26}$$

Il criterio di rottura usato nel FLAC3D è un criterio di Mohr-Coulomb composito con limitazione di tensione. Per essere rappresentato nel piano (σ_1, σ_3) come mostrato in Figura 43, le tensioni principali devono rispettare la seguente condizione, $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$.

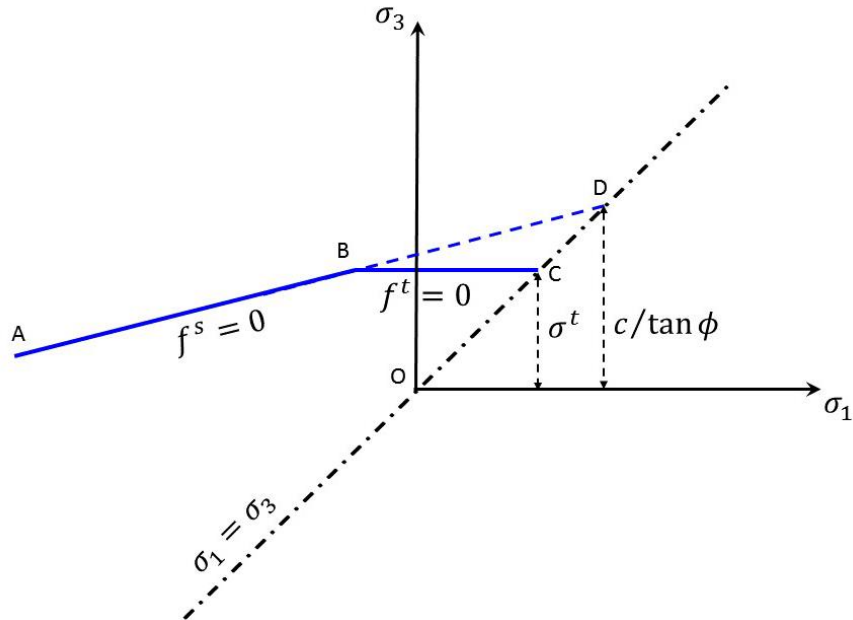


Figura 43 – Criterio di rottura di Mohr-Coulomb (FLAC3D)

L'involuppo di rottura $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$, è definito dal punto A al punto B dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb $f^s = 0$ in cui:

$$f^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\phi - 2c \sqrt{N_\phi} \quad (27)$$

Mentre dal punto B al punto C dal criterio di rottura a trazione $f^t = 0$ in cui:

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (28)$$

dove ϕ è l'angolo di attrito, c è la coesione, σ^t è la resistenza a trazione ed N_ϕ è descritto dall'equazione (29):

$$N_\phi = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad (29)$$

Si noti che il valore della resistenza a trazione del materiale non può superare il valore di σ_3 corrispondente al punto di intersezione della retta $f^s = 0$ e $\sigma_1 = \sigma_3$ nel piano $f(\sigma_1, \sigma_3)$. Questo valore massimo è dato dall'equazione (30):

$$\sigma_{max}^t = \frac{c}{\tan\phi} \quad (30)$$

La funzione potenziale è descritta per mezzo di due funzioni, g^s e g^t , usate per definire, rispettivamente, il flusso plastico a taglio ed il flusso plastico a trazione. La g^s è definita nell'equazione (31):

$$g^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\psi \quad (31)$$

In cui ψ è l'angolo di dilatanza ed N_ψ è descritto dall'equazione (32):

$$N_\psi = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)} \quad (32)$$

La funzione g^t è descritta dall'equazione (33):

$$g^t = f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (33)$$

La retta descritta dalla diagonale tra le rappresentazioni $f^s = 0$ e $f^t = 0$ nel piano (σ_1, σ_3) divide il dominio in due, come è possibile notare in Figura 44.

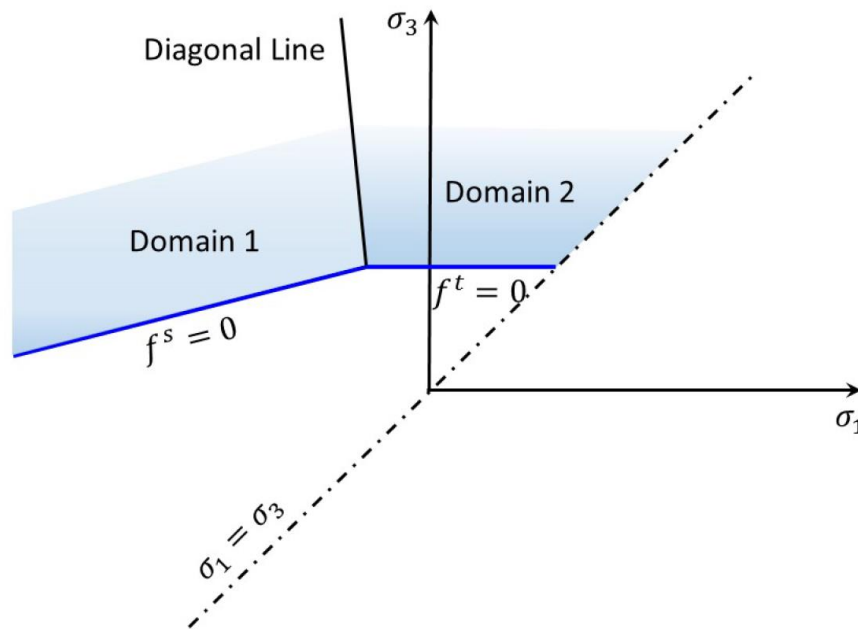


Figura 44 – Domini utilizzati per la definizione delle leggi di flusso per il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (FLAC3D)

Se un punto si trova all'interno del dominio 1 si ha la rottura per taglio e lo stato tensionale associato è posizionato sulla curva $f^s = 0$. Mentre, se il punto giace all'interno del dominio 2 si ha la rottura a trazione e lo stato tensionale associato è posizionato sulla curva $f^t = 0$.

2.3.8. Modello Strain-Softening per il criterio di Mohr Coulomb

Questo modello permette il decadimento dei parametri di coesione, attrito, dilatanza e resistenza a trazione una volta raggiunto lo snervamento.

L'utente può definire delle funzioni di decadimento lineari a tratti ed il codice misura le deformazioni plastiche a taglio e a trazione incrementando i parametri di resistenza ad ogni timestep, costringendo le proprietà del modello ad adattarsi alle funzioni definite dall'utente.

Le funzioni di decadimento per i parametri di resistenza possono essere determinate mediante una back-analysis del comportamento del materiale successivo allo snervamento.

Considerando la curva tensioni-deformazioni (σ, ε), mostrata in Figura 45, il decadimento avviene dopo un primo tratto lineare, raggiunto lo snervamento.

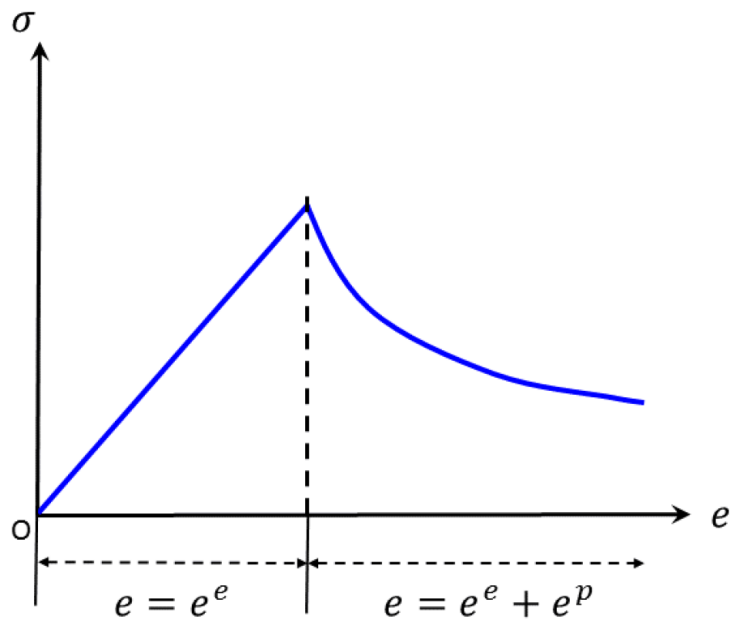


Figura 45 – Esempio curva tensioni – deformazioni (FLAC3D).

La curva presenta un primo tratto lineare in cui la deformazione è soltanto elastica $\varepsilon = \varepsilon^e$.

Dopo il punto di snervamento, la deformazione totale è composta da un'aliquota elastica ed una plastica $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$. Le funzioni di decadimento di coesione, angolo di attrito, dilatanza e resistenza a trazione variano in funzione dell'aliquota della deformazione plastica ε^p della deformazione totale.

Queste funzioni, illustrate in Figura 46, sono approssimate dal FLAC3D mediante funzioni lineari a tratti come mostrato in Figura 47.

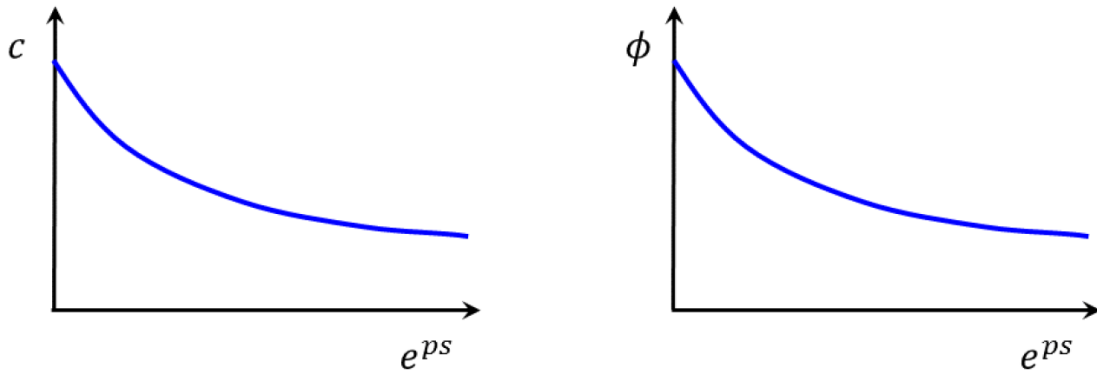


Figura 46 – Leggi di variazione di coesione e angolo di attrito (FLAC3D).

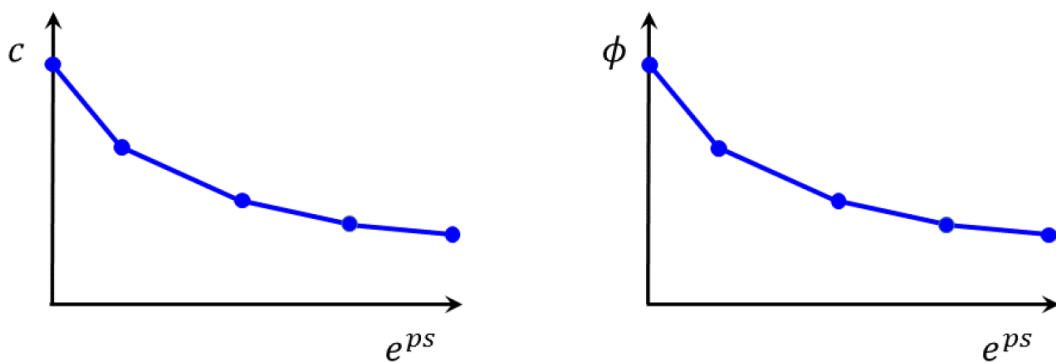


Figura 47 – Approssimazioni mediante funzioni lineari a tratti (FLAC3D).

Il comportamento di softening viene definito attraverso l'inserimento di tabelle che contengono coppie di valori, costituite dagli incrementi di deformazione e dai corrispondenti valori del parametro considerato. Si assume che le proprietà varino linearmente tra due coppie consecutive di valori.

2.3.9. Interfacce

Il software permette di modellare delle interfacce caratterizzate da leggi di attrito e/o legami a trazione e taglio. Le interfacce sono definite tramite parametri di attrito, coesione, dilatanza, rigidzze normali e di taglio e resistenza dei legami a trazione e taglio. Anche se non ci sono restrizioni riguardo il numero di interfacce o la complessità delle loro intersezioni, è generalmente consigliato modellare non più di alcune semplici interfacce in FLAC3D, poiché risulta complicato definire la loro geometria.

Per problemi di modellazione di molti corpi tridimensionali che interagiscono tra loro, è consigliabile utilizzare il programma 3DEC (ITASCA 2007), progettato specificatamente per problemi di interfacce più complessi.

Le interfacce possono anche essere usate per collegate regioni caratterizzate da differenti dimensioni. In generale, per unire insieme più griglie dovrebbe essere utilizzato il comando "zone attach". Tuttavia, in alcune circostanze, potrebbe essere più adatto utilizzare un'interfaccia che non subisca scivolamento o distacco, poiché non corrisponde a nessuna entità fisica.

Le interfacce in FLAC3D sono rappresentate tramite degli elementi triangolari ciascuno dei quali è definito da tre nodi. Gli elementi di interfaccia possono essere creati in qualunque zona del modello. Generalmente, gli elementi di interfaccia sono collegati ad una superficie di una zona e per ogni zona quadrilatera sono definiti due elementi di interfaccia triangolare. In seguito, vengono creati automaticamente i nodi di interfaccia in ogni vertice. Quando un'altra griglia viene in contatto con un elemento di interfaccia, il contatto viene rilevato al nodo dell'interfaccia, il quale è caratterizzato da rigidzza normale e a taglio e dai parametri di attrito.

La Figura 48 illustra la relazione tra gli elementi e i nodi di interfaccia mettendo in evidenza l'area rappresentativa associata ad un determinato nodo.

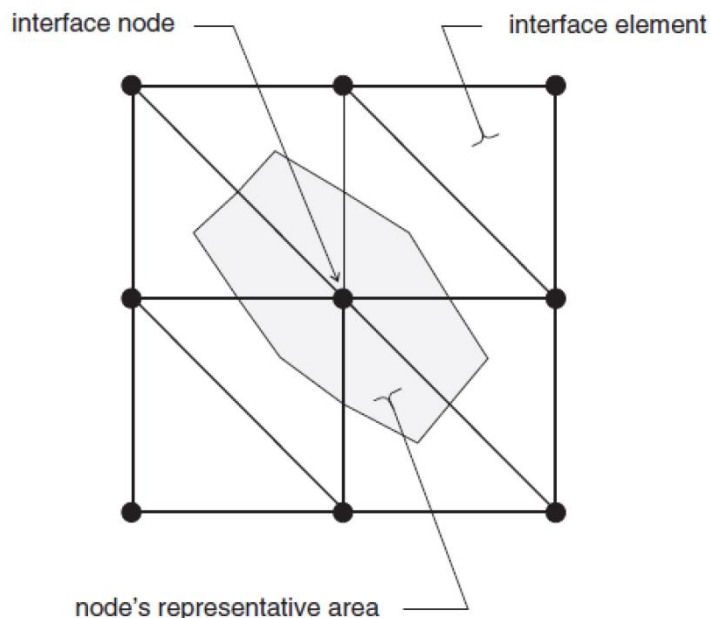


Figura 48 – Rappresentazione dell'area corrispondente ad un singolo nodo di interfaccia. (FLAC3D)

È importante notare che le interfacce in FLAC3D sono unilaterali a differenza della formulazione di interfacce bilaterali presente in FLAC bidimensionale (ITASCA 2011).

Potrebbe essere utile pensare alle interfacce come un involucro retraibile che si estende sulla superficie desiderata, rendendo la superficie sensibile alla compenetrazione con qualsiasi altra superficie con cui può venire in contatto.

Tra il nodo di interfaccia e la superficie con cui esso viene in contatto, nota anche come faccia "target", viene definita una relazione di contatto fondamentale. La direzione della forza che si sviluppa all'interfaccia è determinata dall'orientamento della faccia target.

In ogni timestep, vengono calcolate, per ogni nodo di interfaccia, la penetrazione normale assoluta e la velocità di taglio relativa associate alla faccia target con cui entra in contatto. Entrambi questi valori vengono utilizzati dal modello costitutivo dell'interfaccia per calcolare una forza normale ed un vettore di forza di taglio.

Il modello costitutivo è definito da un criterio lineare di resistenza a taglio (Coulomb) che limita la forza di taglio agente su un nodo di interfaccia, le rigidezze normali e di taglio, le resistenze a taglio e a trazione del legame e l'angolo di dilatanza, provocando un aumento della forza normale effettiva sulla faccia target al raggiungimento del limite di resistenza a taglio.

In Figura 49 sono illustrate le componenti del modello costitutivo agente al nodo di interfaccia (P).

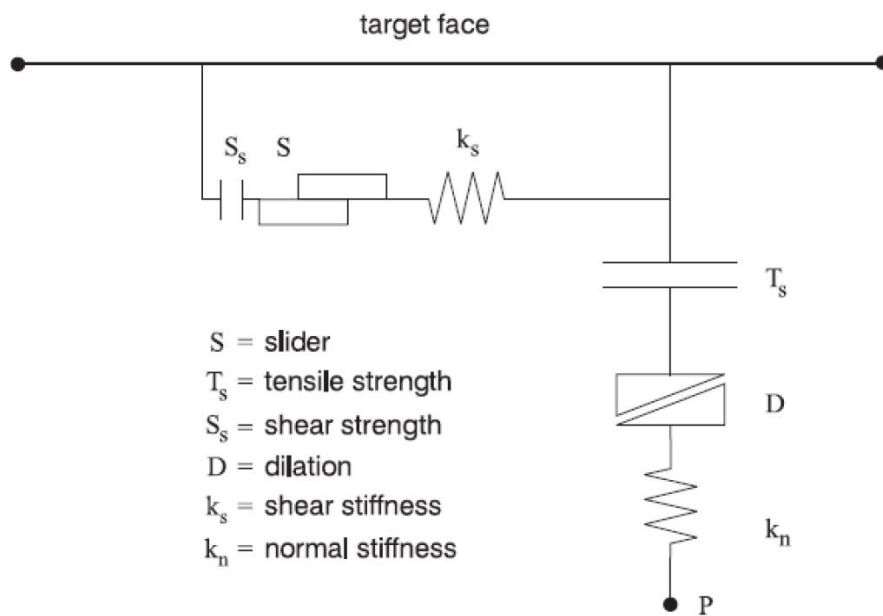


Figura 49 – Schema illustrativo delle componenti che caratterizzano il modello costitutivo delle interfacce. (FLAC3D)

Le forze normali e di taglio che descrivono la risposta elastica dell'interfaccia al tempo $(t + \Delta t)$ sono determinate attraverso le equazioni (34) e (35).

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (34)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} A + \sigma_{si} A \quad (35)$$

I parametri che compongono le equazioni (34) e (35) sono descritti in Tabella 9:

| | |
|-------------------------|--|
| $F_n^{(t+\Delta t)}$ | forza normale al tempo $(t + \Delta t)$ [forza] |
| $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ | vettore forza di taglio al tempo $(t + \Delta t)$ [forza] |
| u_n | penetrazione normale assoluta del nodo di interfaccia nella faccia target [spostamento] |
| Δu_{si} | spostamento incrementale relativo di taglio [spostamento] |
| σ_n | tensione normale addizionale aggiunta a causa della tensione di inizializzazione dell'interfaccia [forza/spostamento] |
| k_n | rigidezza normale [tensione/spostamento] |
| k_s | rigidezza a taglio [tensione/spostamento] |
| σ_{si} | vettore delle tensioni di taglio addizionale dovuto alla tensione di inizializzazione dell'interfaccia [forza/spostamento] |
| A | area rappresentativa associata al nodo di interfaccia [lunghezza ²] |

Tabella 9 – Parametri che descrivono la risposta elastica dell'interfaccia (FLAC3D).

La logica di interfaccia anelastica lavora nella seguente maniera:

1. "bonded interface" – l'interfaccia rimane elastica se le tensioni rimangono al di sotto della resistenza del legame. Quest'ultimo presenta sia una resistenza a taglio che una a trazione. La resistenza normale del legame è impostata tramite la parola chiave "tension". Il comando "zone interface node property shear-bond-ratio=sbr" imposta la resistenza a taglio del legame ad un valore pari a "sbr" volte la resistenza normale del legame. Il valore di default del "property shear-bond-ratio" viene impostato a 100. Il

legame si rompe se la tensione a taglio supera la resistenza a taglio oppure se lo sforzo normale a trazione supera la resistenza normale. Impostando soltanto il comando "property shear-bond-ratio" il legame non viene creato, ma bisogna impostare anche la resistenza a trazione del legame;

2. "slip while bonded" – un legame, per default, impedisce tutti i comportamenti di snervamento (scivolamento e separazione). È possibile attivare una proprietà opzionale "bonded-slip" che impedisce la separazione solo se il legame è intatto (ma consente lo snervamento a taglio controllato dai parametri di attrito e coesione usando (F_n) come forza normale). Il comando "zone interface node" permette di abilitare o disabilitare lo scivolamento per un segmento di "bonded interface". Impostando il comando "bonded-slip on" o "bonded-slip off";
3. "Coulomb sliding" – il legame può essere intatto o rotto. Nel caso in cui il legame sia rotto, il comportamento del segmento di interfaccia è determinato dall'attrito e dalla coesione (e ovviamente dalle rigidzze). Se le resistenze del legame non sono impostate, questo risulta il comportamento predefinito.

Con il comando "zone interface node list" è possibile ottenere una lista dei valori delle tensioni per ogni nodo di interfaccia che denota se il legame è intatto (diverso da zero) o rotto (zero).

Le forze normali e di taglio calcolate ai nodi di interfaccia vengono distribuite in direzioni uguali e opposte sia alla faccia target che alla faccia a cui è collegato il nodo di interfaccia (faccia "host").

I contatti vengono rilevati solo nei nodi di interfaccia, ai quali vengono trasferite le forze di contatto. Si assume che lo stato tensionale associato ad un nodo sia distribuito uniformemente sull'intera area rappresentativa del nodo.

Le interfacce vengono create tramite il comando "zone interface create". Per i casi in cui è richiesta un'interfaccia tra due griglie separate del modello, è consigliabile utilizzare il comando "zone interface create by-face" per collegare un'interfaccia ad una delle superfici della griglia.

Questo comando genera elementi di interfaccia lungo tutte le facce della superficie con un punto centrale che ricade all'interno di un range specifico.

Ogni superficie su cui si vuole creare un'interfaccia deve essere generata all'inizio della modellazione, inoltre, deve essere possibile specificare una superficie esistente per creare gli elementi di interfaccia. Tra due superfici adiacenti deve essere specificato un distacco, a meno che non sia impostata la parola chiave "separate" nel comando "zone interface create by-face". In questo caso, le due subgriglie separate potrebbero avere dei gridpoints di superficie nella stessa posizione nello spazio. Per impostazione predefinita, vengono creati due elementi di interfaccia per ciascuna faccia.

Le seguenti regole devono essere rispettate quando si usano gli elementi interfaccia in FLAC3D:

1. se un'area piccola entra in contatto con un'area più grande l'interfaccia dovrebbe essere collegata alla regione più piccola;
2. se è presente una differenza di densità tra due griglie adiacenti, l'interfaccia dovrebbe essere collegata alla griglia con densità più elevata;
3. le dimensioni degli elementi di interfaccia dovrebbero essere sempre uguali o inferiori rispetto alle facce target con cui essi entreranno in contatto. Se ciò non avviene, gli elementi interfaccia dovrebbero essere suddivisi in elementi più piccoli;
4. gli elementi di interfaccia dovrebbero essere limitati alle griglie delle superfici che entreranno effettivamente in contatto con altre griglie.

L'assegnazione delle proprietà del materiale (in particolare le rigidità) ad un'interfaccia dipende dal modo in cui essa è usata. L'interfaccia può essere:

1. un dispositivo artificiale che collega due sub-griglie insieme. Se possibile, le sub-griglie dovrebbero essere collegate con il comando "attach". Usare il comando "attach" piuttosto che il comando "interface" per collegare le sub-griglie è più efficiente dal punto di vista computazionale. In determinate circostanze può essere necessario usare un'interfaccia per collegare due sub-griglie. Questo tipo di interfaccia è denominata "glued" all'interno del comando "interface" impendendo

scivolamento e separazione. Non è necessario definire i valori di angolo di attrito, coesione e resistenza a trazione, se vengono impostati verranno ignorati. Tuttavia, devono essere fornite le rigidezze normale e a taglio;

2. un'interfaccia reale che è rigida rispetto al materiale circostante e che può scivolare e separarsi in risposta ai carichi (questo caso comprende la situazione in cui le rigidezze sono sconosciute o non importanti ma dove scivolamento e/o separazione potrebbero verificarsi). L'angolo di attrito, la coesione, la dilatanza e la resistenza a trazione sono importanti, mentre la rigidezza elastica non lo è. Le rigidezze dell'interfaccia vengono impostate approssimativamente ad un valore dieci volte maggiore rispetto alla rigidezza associata ai materiali adiacenti;
3. un'interfaccia reale che è abbastanza tenue da influenzare il comportamento del sistema (ad esempio una discontinuità riempita con argilla).

2.3.10.Codice di calcolo FLAC3D analisi a compressione monoassiale

In questo paragrafo viene spiegato il codice di calcolo utilizzato per la modellazione tridimensionale della prova di compressione monoassiale. Il codice è riportato per intero in Allegato 2, per ognuno dei modelli analizzati.

Le prime analisi sono state eseguite sui modelli di sola matrice (provino 9 e provino 4G) assegnando un comportamento del materiale elastico perfettamente plastico.

Dopo aver importato il file in formato .f3grid generato dal plug-in Griddle, è stato assegnato il gruppo "matrice" al modello e la denominazione delle varie facce ("North", "South", "West" e "East").

In Figura 50 sono mostrate le righe di codice utilizzate per conferire le proprietà meccaniche della matrice.

```
;Constitutive Model and Properties
zone cmodel assign mohr-coulomb
zone property young 0.25e6 poisson 0.3 friction 36 dilation 0 cohesion 560 density 2.1e6 range group 'matrice'
```

Figura 50 – Comandi utilizzati per l'assegnazione delle proprietà meccaniche del materiale (provino 9).

Come è possibile notare, il modello costitutivo scelto è stato quello di Mohr – Coulomb caratterizzato da una legge elastica perfettamente plastica. I parametri assegnati sono il risultato di una back-analysis effettuata sul provino 9 che verrà approfondita nel capitolo successivo.

In Figura 51, vengono illustrate le condizioni al contorno attribuite in termini di velocità applicate alle facce del modello. Come è possibile notare, alla faccia superiore ("Top") è stata fissata una velocità negativa rispetto al sistema di riferimento, in maniera tale da simulare il carico applicato. Alla faccia inferiore ("Bottom"), sono state assegnate velocità nulle lungo gli assi denominati x, y e lungo l'asse perpendicolare alla faccia, in maniera tale da simulare delle cerniere, bloccando la faccia inferiore. Questa condizione prevede la perfetta aderenza tra provino e piastra inferiore. Trattandosi di una prova di compressione monoassiale, che non prevede confinamento, alle facce laterali denominate "North", "South", "West" e "East" non sono state assegnate condizioni al contorno.

```
; Boundary Conditions
zone face apply velocity-normal -1e-8 range group "Top"
zone face apply velocity-normal 0 range group "Bottom"
zone face apply velocity-x      0 range group 'Bottom'
zone face apply velocity-y      0 range group 'Bottom'
```

Figura 51 – Comandi utilizzati per assegnare le condizioni al contorno (provino 9).

Successivamente, sono state definiti i due punti "zpnt1" e "zpnt2" in corrispondenza del centro, rispettivamente della faccia inferiore e superiore del modello, come mostrato Figura 52. Inoltre, sono state definite le variabili extra, denominate "1" e "2", allo scopo di verificare la corretta orientazione del sistema di riferimento.

```
[global zpnt1 = gp.near(0.0185,0.0185,0)]
[global zpnt2 = gp.near(0.0185,0.0185,0.054)]
zone gridpoint initialize extra 1 0
zone gridpoint initialize extra 2 0
```

Figura 52 – Comandi utilizzati per definire i punti nei quali verranno calcolate le tensioni e le deformazioni (provino 9).

Per la definizione delle tensioni e delle deformazioni è stato utilizzato il "Fish", un linguaggio di programmazione implementato all'interno del FLAC3D. Come è possibile notare in Figura

53, le tensioni sono state definite mediante un ciclo "loop" ed un ciclo "if". Il primo passo è stato quello di definire la funzione "f_accum" nel sistema di riferimento locale che parte da un valore nullo che viene incrementato con il contributo delle forze non bilanciate lungo l'asse z appartenenti a ciascun gridpoint. Il ciclo loop viene arrestato a convergenza. La tensione è definita mediante la variabile "stress" calcolata mediante il rapporto tra la forza accumulata e la superficie media di compressione.

```
fish define stress
  local f_accum = 0.0
  loop foreach local gp gp.list
    if gp.pos.z(gp) > 0.0 then
      gp.extra(gp,1) = gp.pos.x(gp)
      gp.extra(gp,2) = gp.pos.z(gp)
      f_accum = f_accum + gp.force.unbal.z(gp)
    end_if
  end_loop
  stress = f_accum / 0.001369
end
```

Figura 53 – Comandi utilizzati per la definizione delle tensioni (provino 9).

Le deformazioni sono state definite attraverso la variabile "strain" data dal rapporto tra la differenza delle componenti del vettore spostamento lungo l'asse z dei punti "zpnt1" e "zpnt2" e la lunghezza iniziale del provino (Figura 54).

```
fish define strain
  strain = (gp.disp.z(zpnt1) - gp.disp.z(zpnt2)) / 0.054
end
```

Figura 54 – Comandi utilizzati per la definizione delle deformazioni (provino 9).

Al fine di plottare il diagramma tensioni – deformazioni è stato utilizzato il codice in Figura 55. Come è possibile notare, il numero di cicli assegnato per raggiungere l'equilibrio all'interno del modello e, quindi, la soluzione del problema, è pari a 60000.

```

model history mechanical unbalanced-maximum
fish history @stress
fish history @strain;

model cycle 60000
model save 'C9H_C2,55_E4,1'

```

Figura 55 – Comandi utilizzati per plottare la storia di tensioni e deformazioni e salvare l'analisi (provino 9).

Per approssimare al meglio l'andamento della curva tensioni – deformazioni ottenuta sperimentalmente per il provino 9, è stata condotta una back-analysis assegnando al modello una legge costitutiva elasto-plastica rammollente, come è possibile vedere dalla Figura 56. Nel codice si riportano le coppie di valori ricavate dalle leggi di decadimento dei parametri di coesione e attrito, all'interno di tabelle (descritte nel paragrafo 2.3.8). Le leggi di decadimento scelte sono di tipo esponenziale e verranno approfondite nel prossimo capitolo.

```

;Constitutive Model and Properties
zone cmodel assign strain-softening
zone property young 0.25e6 poisson 0.3 friction 36 dilation 0 cohesion 560 density 2.1e6 range group 'matrice'
zone property table-friction 'fri' table-cohesion 'coh'
table 'fri' add (0, 36) (.05, 35) (.1, 35) (.3, 30) (.6, 24)(1, 16)
table 'coh' add (0, 560) (.05, 348) (.1, 252) (.3, 90) (.6, 26)(1, 6)

```

Figura 56 – Comandi utilizzati per l'assegnazione del modello costitutivo di tipo "strain – softening" (provino 9).

Al fine di individuare le zone plastiche che si sviluppano all'interno del modello, è stato utilizzato il codice mostrato in Figura 57, in cui si stabilisce una soglia di deformazione plastica a taglio arbitraria.

```

fish define TagPlasticZones
loop foreach local zp zone.list
if zone.prop(zp, 'strain-shear-plastic') > 2e-1
zone.group(zp) = 'Yield'
else
zone.group(zp) = 'Other'
endif
endloop
end
@TagPlasticZones

```

Figura 57 – Comandi utilizzati per individuare le zone plastiche presenti nel modello (provino9).

Poiché il provino 7 è caratterizzato dalla presenza delle inclusioni, il codice di calcolo presenta delle differenze. Dopo aver importato il file in formato .f3grid generato dal plugin Griddle, oltre ad aver assegnato il gruppo “matrice” al modello, è stato necessario definire anche il gruppo “blocchi”.

Le proprietà meccaniche dei blocchi sono state assegnate sulla base dei valori suggeriti da Goodman (1980) per il materiale limestone (Help FLAC3D). Data la notevole differenza in termini di resistenza rispetto alla matrice, è stata scelta, per i blocchi, una legge costitutiva di tipo elastico lineare (Figura 58).

```
zone cmodel assign elastic          range group 'blocchi'  
zone property young 28.5e6 poisson 0.29 range group 'blocchi'
```

Figura 58 – Comandi utilizzati per l’assegnazione delle proprietà meccaniche dei blocchi (provino 7).

Inoltre, per completare l’analisi del modello eterogeneo, è stata implementata tra i blocchi e la matrice un’interfaccia di tipo reale, rigida rispetto al materiale circostante e che può scivolare e separarsi in risposta ai carichi, come descritto nel paragrafo 2.3.9.

In Figura 59 è illustrato il codice per la creazione delle interfacce insieme alle proprietà scelte. Le rigidzze, normale e di taglio, sono state impostate pari a 10 volte il valore della rigidzza del materiale più resistente, mentre la coesione è stata impostata pari a quella della matrice e l’angolo di attrito a un valore intermedio tra l’angolo di attrito della matrice e quello dei blocchi.

```
; Separate zones, and create two interfaces  
zone separate by-face new-side group 'Interface' range group 'matrice' group 'blocchi'  
zone interface 1 create by-face range group 'Interface' group 'blocchi'  
  
zone interface 1 node property stiffness-normal 285e6 stiffness-shear 285e6 cohesion 560 friction 50
```

Figura 59 – Comandi utilizzati per creare le interfacce e l’assegnazione delle relative proprietà (provino 7).

3. Valutazione delle caratteristiche meccaniche della matrice

Lo studio in oggetto ha come scopo la rappresentazione del materiale eterogeneo nelle sue due componenti, matrice e blocchi, e successivamente la valutazione del comportamento del provino sottoposto a prova di compressione monoassiale mediante modellazione numerica tridimensionale.

La modellazione delle formazioni complesse si basa su un approccio del continuo eterogeneo, in cui, alla matrice e ai blocchi, discretizzati separatamente, vengono assegnate le rispettive proprietà meccaniche.

In riferimento alla determinazione dei parametri meccanici della matrice, è stata condotta, inizialmente, una back analysis sui provini 9 e 4G, in modo da trovare il set di valori che meglio approssimasse la configurazione del diagramma sperimentale tensione – deformazione.

Questa operazione, in un primo momento, è stata effettuata assegnando al materiale un comportamento di tipo elastico perfettamente plastico, al fine di individuare la resistenza a compressione monoassiale e la corrispondente deformazione assiale sperimentale, variando i parametri di angolo di resistenza al taglio, coesione e modulo di deformabilità.

Successivamente, è stata svolta una seconda back analysis solo sul provino 9 (caratterizzato da una resistenza elevata quindi vicina a quella del provino 7), al fine di ricreare il comportamento post - rottura (rammollente), riscontrato nella prova di laboratorio.

3.1. Modelli con comportamento elastico perfettamente plastico

3.1.1. Provino 4G

L'obiettivo della back analysis svolta nel seguente elaborato è quello di ricavare i parametri meccanici del provino, affinché il risultato della modellazione rispecchi i valori di picco forniti dai test effettuati in laboratorio, che per il provino 4G sono mostrati in Tabella 10.

| | UCS | ε_a |
|------------|-------|-----------------|
| | [MPa] | [%] |
| Provino 4G | 0.98 | 0.48 |

Tabella 10 – Risultati di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali (provino 4G).

Partendo dall'intervallo di valori fornito dalle prove sperimentali, come descritto nel paragrafo 2.2.2, una prima valutazione è stata condotta:

- fissando la mesh ad 1 mm;
- considerando i valori minimi e massimi della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio;
- ponendo il modulo di deformabilità costante, pari al massimo valore del range fornito.

| File | Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|---------|------|-------|-----------|-------|---------|-----------------|
| | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| C4G_MIN | 1 | 0.34 | 25 | 210 | 659.80 | 0.216% |
| C4G_MAX | 1 | 0.34 | 36 | 428 | 1681.13 | 0.603% |

Tabella 11 – Risultati della prima analisi con valori massimi e minimi di coesione e angolo di attrito (provino 4G).

Come è possibile notare dalla Tabella 11, il valore sperimentale della resistenza a compressione e della deformazione assiale è compreso tra i risultati delle analisi numeriche. Per ricercare il set di parametri che meglio approssima i risultati sperimentali, è stata effettuata un'interpolazione lineare dei valori della coesione e dell'angolo di attrito (Figura 60).

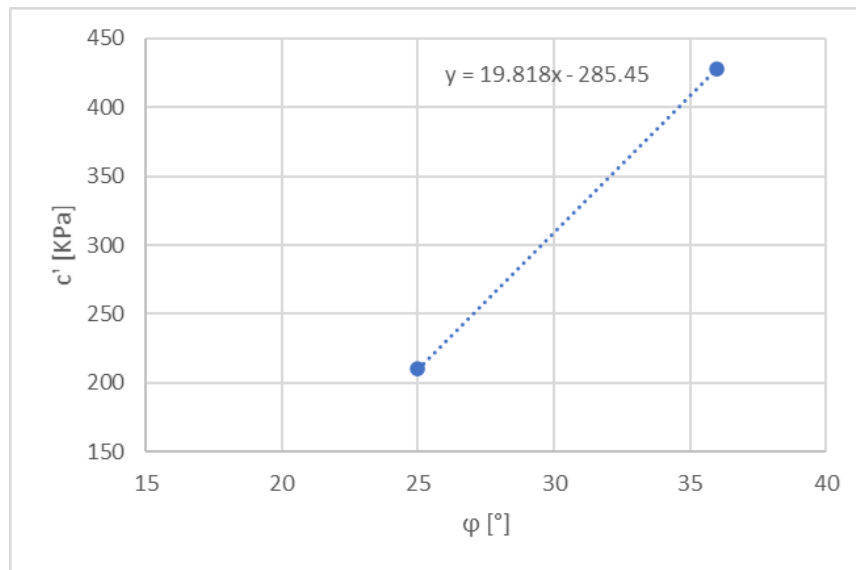


Figura 60 – Retta interpolante i valori di coesione e di angolo di attrito.

Mediante l'equazione della retta interpolante, è stata eseguita una taratura all'interno del campo di variabilità della coesione e dell'angolo di attrito, creando 12 classi, in cui, per una prima valutazione, il modulo di deformabilità è stato mantenuto costante ad un valore pari al massimo del range fornito, come è possibile notare in Tabella 12. In questa fase le analisi sono state condotte utilizzando la mesh grossolana a 2.5 mm sia per abbreviare i tempi computazionali che per avere un risultato immediato.

| Classe | E | c' | φ |
|--------|-------|-------|-----------|
| | [GPa] | [kPa] | [°] |
| 1 | 0.34 | 210 | 25 |
| 2 | 0.34 | 230 | 26 |
| 3 | 0.34 | 250 | 27 |
| 4 | 0.34 | 269 | 28 |
| 5 | 0.34 | 289 | 29 |
| 6 | 0.34 | 309 | 30 |
| 7 | 0.34 | 329 | 31 |
| 8 | 0.34 | 349 | 32 |
| 9 | 0.34 | 369 | 33 |
| 10 | 0.34 | 388 | 34 |
| 11 | 0.34 | 408 | 35 |
| 12 | 0.34 | 428 | 36 |

Tabella 12 –Classi per l'analisi iniziale del provino 4G

Le analisi sono state interrotte alla sesta classe poiché, come è possibile osservare dai risultati mostrati in Tabella 13, la resistenza a compressione monoassiale è stata raggiunta con i parametri utilizzati nella quinta classe.

| Classe | File | Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|--------|-----------|------|-------|-----------|-------|--------|-----------------|
| | | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| 1 | C4G_C1_F1 | 2.5 | 0.34 | 25 | 210 | 656.53 | 0.190% |
| 2 | C4G_C2_F2 | 2.5 | 0.34 | 26 | 230 | 732.50 | 0.212% |
| 3 | C4G_C3_F3 | 2.5 | 0.34 | 27 | 250 | 811.6 | 0.235% |

| | | | | | | | |
|---|-----------|-----|------|----|-----|---------|--------|
| 4 | C4G_C4_F4 | 2.5 | 0.34 | 28 | 269 | 891.49 | 0.259% |
| 5 | C4G_C5_F5 | 2.5 | 0.34 | 29 | 289 | 974.63 | 0.283% |
| 6 | C4G_C6_F6 | 2.5 | 0.34 | 30 | 309 | 1065.60 | 0.310% |

Tabella 13 – Risultati back analysis provino 4G (2.5 mm) per le prime sei classi.

È evidente dai risultati ottenuti che la resistenza a compressione ha un valore prossimo a quello sperimentale, mentre la deformazione a rottura è ancora distante dalla percentuale attesa. Per questo motivo, per le successive analisi, sono stati mantenuti costanti i valori di angolo di resistenza al taglio e coesione e sono state create cinque sottocategorie in cui il modulo di deformabilità è decrescente. Quest'ultimo varia in un intervallo compreso tra 0.20 GPa e 0.34 GPa, tramite decrementi del 10% del suo valore massimo (Tabella 14).

| Categorie | File | Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|-----------|--------------|------|-------|-----------|-------|--------|-----------------|
| | | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| 1 | C4G_C5_F5_E1 | 2.5 | 0.34 | 29 | 289 | 974.63 | 0.283% |
| 2 | C4G_C5_F5_2 | 2.5 | 0.31 | 29 | 289 | 975.23 | 0.311% |
| 3 | C4G_C5_F5_3 | 2.5 | 0.27 | 29 | 289 | 976.46 | 0.357% |
| 4 | C4G_C5_F5_E4 | 2.5 | 0.24 | 29 | 289 | 976.55 | 0.402% |
| 5 | C4G_C5_F5_E5 | 2.5 | 0.20 | 29 | 289 | 977.39 | 0.483% |

Tabella 14 – Risultati della back analysis sul provino 4G con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie della quinta classe.

Infine, sulla base dei risultati ottenuti, sono state eseguite due analisi con mesh più fitta (1 mm), fissando i valori del modulo di deformabilità pari, rispettivamente, ai valori corrispondenti alla quarta e quinta sottocategoria, come illustrato in Tabella 15.

| Categorie | File | Mesh [mm] | E [GPa] | φ [°] | c' [kPa] | UCS [kPa] | ε_a [%] |
|-----------|--------------|--------------|------------|------------------|-------------|--------------|------------------------|
| 4 | C4G_C5_F5_E4 | 1 | 0.24 | 29 | 289 | 975.22 | 0.404% |
| 5 | C4G_C5_F5_5 | 1 | 0.20 | 29 | 289 | 976.00 | 0.483% |

Tabella 15 – Risultati della back analysis sul provino 4G con mesh 1 mm (categorie quattro e cinque).

In Tabella 16 vengono mostrati i valori della resistenza a compressione e della deformazione assiale, i quali vengono diagrammati in Figura 61. A titolo di esempio, in Allegato 3 si riportano il diagramma tensione – deformazione (C4G_C5_F5_E4), risultato dell'analisi condotta tramite FLAC3D ed il modello del provino 4G (mesh 1 mm).

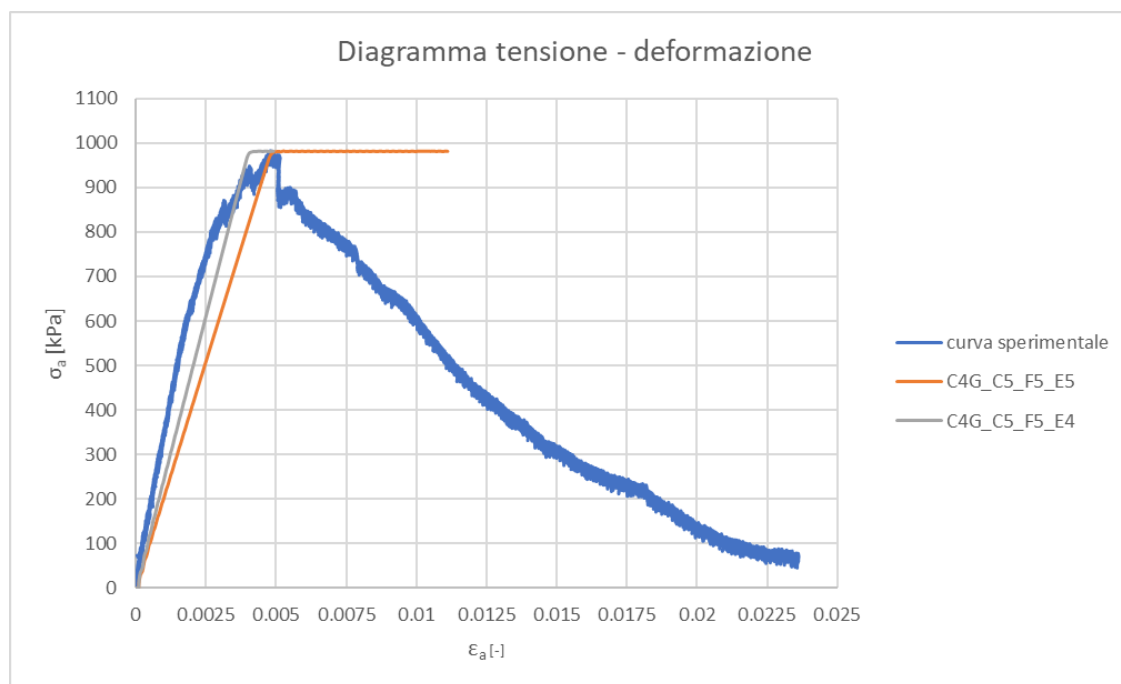


Figura 61 – Confronto tra la curva sperimentale e gli andamenti ricavati dalla back analysis eseguita ad 1 mm (provino 4G).

| | UCS | ε_a |
|--------------------|-------|-----------------|
| | [MPa] | [%] |
| Curva sperimentale | 0.98 | 0.48 |
| C4G_C5_F5_E4 | 0.97 | 0.40 |
| C4G_C5_F5_E5 | 0.98 | 0.48 |

Tabella 16 – Riepilogo risultati provino 4G

Come è possibile notare in Figura 61, l'andamento che meglio approssima la curva sperimentale risulta essere quello relativo alla categoria 4 (C4G_C5_F5_E4) con mesh ad 1 mm, curva in grigio.

3.1.2. Provino 9

I valori di picco forniti dalle prove effettuate in laboratorio per il provino 9 sono mostrati in Tabella 17.

| | UCS | ε_a |
|-----------|-------|-----------------|
| | [MPa] | [%] |
| Provino 9 | 0.98 | 0.48 |

Tabella 17 – Risultati di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale ottenuti mediante prove sperimentali (provino 9).

Partendo dall'intervallo di valori fornito dalle prove sperimentali, come descritto nel paragrafo 2.2.2, una prima valutazione è stata condotta:

- fissando la mesh ad 1 mm;
- considerando i valori minimi e massimi della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio;
- ponendo il modulo di deformabilità costante, pari al massimo valore del range fornito.

| File | Mesh | E | φ | c' | Stress | ε_a |
|--------|------|-------|-----------|-------|---------|-----------------|
| | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| C9_MIN | 1 | 0.34 | 25 | 210 | 659.94 | 0.221% |
| C9_MAX | 1 | 0.34 | 36 | 428 | 1682.42 | 0.526% |

Tabella 18 – Risultati della prima analisi con valori massimi e minimi di coesione e angolo di attrito (provino 9).

Come è possibile notare dalla Tabella 18, il valore sperimentale della resistenza a compressione e della deformazione assiale non risulta compreso tra i risultati delle analisi numeriche.

Per ricercare il set di parametri che meglio approssima i risultati sperimentali, sono state create cinque categorie in cui il modulo di deformabilità è decrescente e varia in un intervallo compreso tra 0.20 GPa e 0.34 GPa, tramite decrementi del 10% del suo valore massimo.

L'angolo di attrito viene mantenuto costante, pari a 36° ed infine il valore di coesione viene aumentato progressivamente del 20% rispetto al valore massimo fornito dalle prove di laboratorio.

L'aumento di coesione è giustificato dal fatto che dalle prove di laboratorio, per il provino 9 è stata ottenuta una resistenza a compressione monoassiale più elevata rispetto agli altri provini e quindi risulta plausibile che il valore di coesione sia maggiore rispetto all'intervallo fornito inizialmente.

In Tabella 19 sono illustrati i valori della prima analisi eseguita considerando un aumento della coesione del 20%, ottenendo così un valore pari a 514 kPa.

La mesh utilizzata è di 2.5 mm per ridurre in questa fase iniziale, i tempi computazionali.

| Categorie | File | Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|-----------|----------|------|-------|-----------|-------|---------|-----------------|
| | | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| 1 | C9_C2_E1 | 2.5 | 0.34 | 36 | 514 | 2021.47 | 0.594% |
| 2 | C9_C2_E2 | 2.5 | 0.31 | 36 | 514 | 2015.81 | 0.640% |
| 3 | C9_C2_E3 | 2.5 | 0.27 | 36 | 514 | 2015.81 | 0.737% |
| 4 | C9_C2_E4 | 2.5 | 0.24 | 36 | 514 | 2015.81 | 0.828% |
| 5 | C9_C2_E5 | 2.5 | 0.20 | 36 | 514 | 2015.81 | 0.995% |

Tabella 19 – Risultati della back analysis sul provino 9 con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie del modulo di deformabilità con coesione pari a 514 kPa..

Osservando i risultati mostrati in Tabella 19, appare necessario svolgere un'ulteriore analisi per ottenere dei valori prossimi a quelli sperimentali, in questo caso la coesione assume il valore di 599 kPa, considerando sempre un aumento progressivo del 20%.

| Categorie | File | Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|-----------|----------|------|-------|-----------|-------|---------|-----------------|
| | | [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| 1 | C9_C3_E1 | 2.5 | 0.34 | 36 | 599 | 2349.63 | 0.687% |
| 2 | C9_C3_E2 | 2.5 | 0.31 | 36 | 599 | 2349.63 | 0.752% |
| 3 | C9_C3_E3 | 2.5 | 0.27 | 36 | 599 | 2349.63 | 0.681% |
| 4 | C9_C3_E4 | 2.5 | 0.24 | 36 | 599 | 2349.63 | 0.966% |
| 5 | C9_C3_E5 | 2.5 | 0.20 | 36 | 599 | 2349.63 | 1.161% |

Tabella 20 – Risultati della back analysis sul provino 9 con mesh 2.5 mm per le cinque sottocategorie del modulo di deformabilità con coesione pari a 599 kPa..

Attraverso i risultati ottenuti dalle ultime analisi è stato possibile infittire il range di valori sia in termini di modulo di deformabilità che di coesione. Sono state svolte numerose analisi numeriche fino ad ottenere il set di parametri, mostrati in Tabella 21, che approssima al meglio i valori target.

| Mesh | E | φ | c' | UCS | ε_a |
|------|-------|-----------|-------|---------|-----------------|
| [mm] | [GPa] | [°] | [kPa] | [kPa] | [%] |
| 1 | 0.25 | 36 | 560 | 2177.88 | 0.858% |

Tabella 21 – Set di parametri meccanici ricavati per il provino 9 e risultati in termini di resistenza a compressione monoassiale e deformazione assiale in corrispondenza del picco.

In Figura 62 è illustrato il confronto tra la curva sperimentale e quella ottenuta dal modello con comportamento elasto – plastico perfetto. Come è possibile notare dal grafico in Figura 62, la curva arancione segue in maniera soddisfacente il tratto lineare della curva sperimentale.

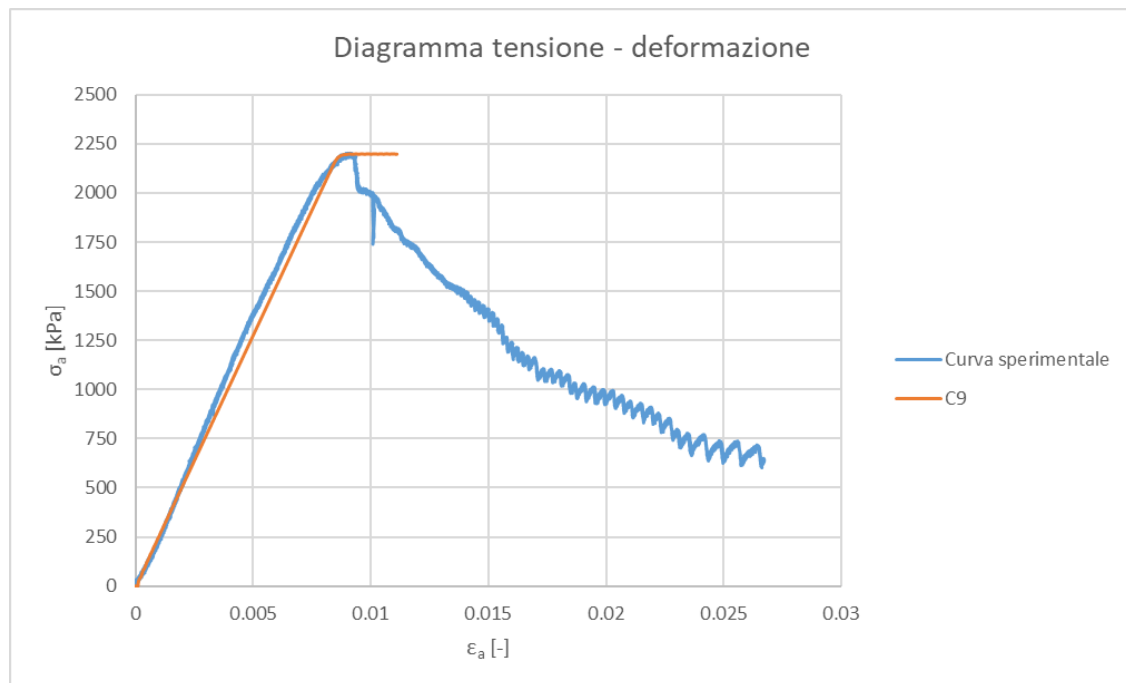


Figura 62 - Confronto tra la curva sperimentale e l'andamento ricavato dalla back analysis eseguita ad 1 mm (provino 9).

A titolo di esempio, in Allegato 3 si riportano il diagramma tensione – deformazione, risultato dell'analisi condotta tramite FLAC3D ed il modello del provino 9 (mesh 1 mm).

| | UCS | ϵ_a |
|--------------------|-------|--------------|
| | [MPa] | [%] |
| Curva sperimentale | 2.2 | 0.9 |
| C9 | 2.2 | 0.9 |

Tabella 22 – Riepilogo risultati provino 9

3.2. Modello con comportamento elasto – plastico rammollente

3.2.1. Provino 9

Alla luce dei risultati ricavati nel paragrafo precedente (3.1) sui provini di sola matrice e ai valori di resistenza raggiunti, si è ritenuto opportuno svolgere una back analysis sul ramo di softening, al fine di avere una caratterizzazione completa della matrice da assegnare, successivamente, al provino 7.

Come è possibile notare dalla Figura 63, il provino 9 è caratterizzato da una resistenza più elevata rispetto al provino 4G, e quindi, più vicino al comportamento del provino 7. Per questo motivo il provino 9 è stato scelto per rappresentare la matrice del provino eterogeneo.

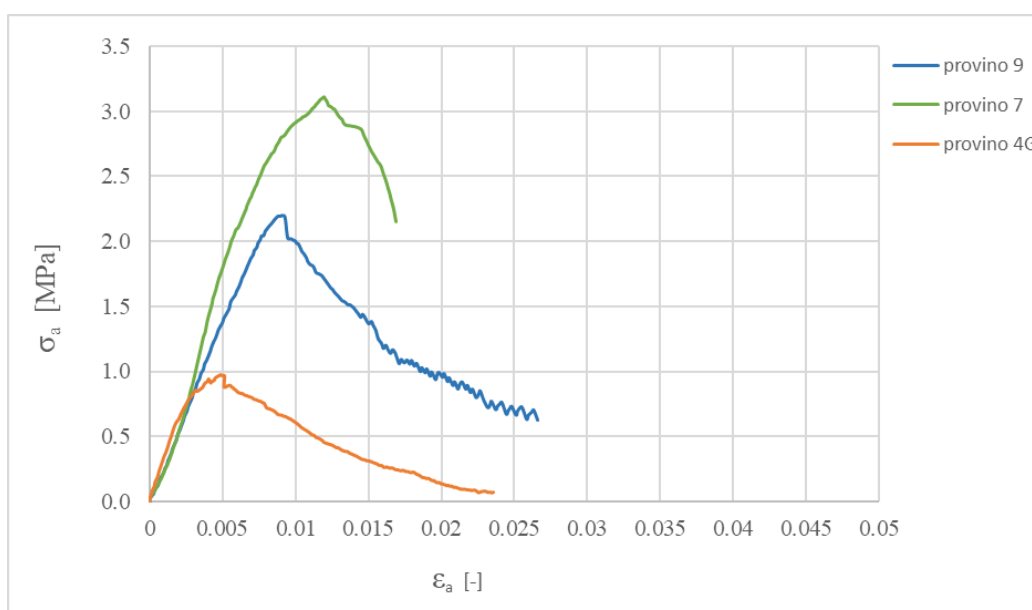


Figura 63 – Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7.

Per approssimare al meglio l'andamento della curva tensione – deformazione ottenuta sperimentalmente per il provino 9 (curva blu in Figura 63), è stata condotta una back-analysis assegnando al modello una legge costitutiva elasto-plastica rammollente.

Nel codice di calcolo di FLAC3D si riportano le coppie di valori ricavate dalle leggi di decadimento dei parametri di coesione e attrito, all'interno di tabelle (descritte nel paragrafo 2.3.8).

Sono state scelte delle leggi di decadimento di tipo esponenziale, rappresentate dalle equazioni (36) e (37).

$$y = c_{max}e^{-ax^d} \quad (36)$$

$$y = \varphi_{max}e^{-bx^f} \quad (37)$$

In cui:

- a e d , sono dei coefficienti che influenzano la forma della curva di decadimento della coesione;
- c_{max} , rappresenta la coesione massima della matrice, pari a 560 kPa;
- b e f , sono dei coefficienti che influenzano la forma della curva di decadimento dell'angolo di attrito;
- φ_{max} , rappresenta l'angolo di attrito massimo della matrice, pari a 36°.

Date le numerose analisi svolte per ricavare il ramo di softening, inizialmente, al fine di ridurre i tempi computazionali, è stata utilizzata la mesh a 2.5 mm.

Una volta stabiliti i coefficienti per la definizione delle leggi di decadimento, da cui deriva la nomenclatura assegnata (Tabella 23), sono state ricavate le tabelle con le coppie di valori di coesione e angolo di attrito, in funzione dell'incremento di deformazione plastica ($\Delta\varepsilon_{ps}$), definite nelle equazioni (38) e (39).

| 4.5_0.75_0.8_1.3 | |
|------------------|------|
| a | 4.5 |
| d | 0.75 |
| b | 0.8 |
| f | 1.3 |

Tabella 23 – Coefficienti definiti per la back analysis del provino 9 con mesh a 2.5 mm

$$\text{table 'coh' add (0,560), (0.05,348), (0.1,252), (0.3,90), (0.6,26), (1,6)} \quad (38)$$

$$\text{table 'fri' add (0,36), (0.05,35), (0.1,35), (0.3,30), (0.6,24), (1,16)} \quad (39)$$

In Figura 64 e Figura 65, sono illustrate le leggi di decadimento della coesione e dell'angolo di attrito utilizzate.

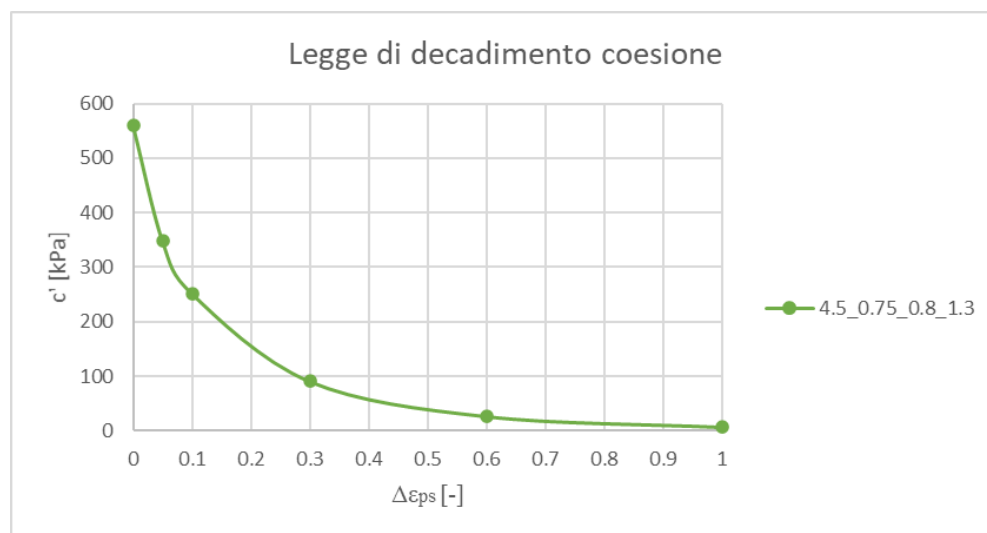


Figura 64 – Legge di decadimento della coesione in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 23.

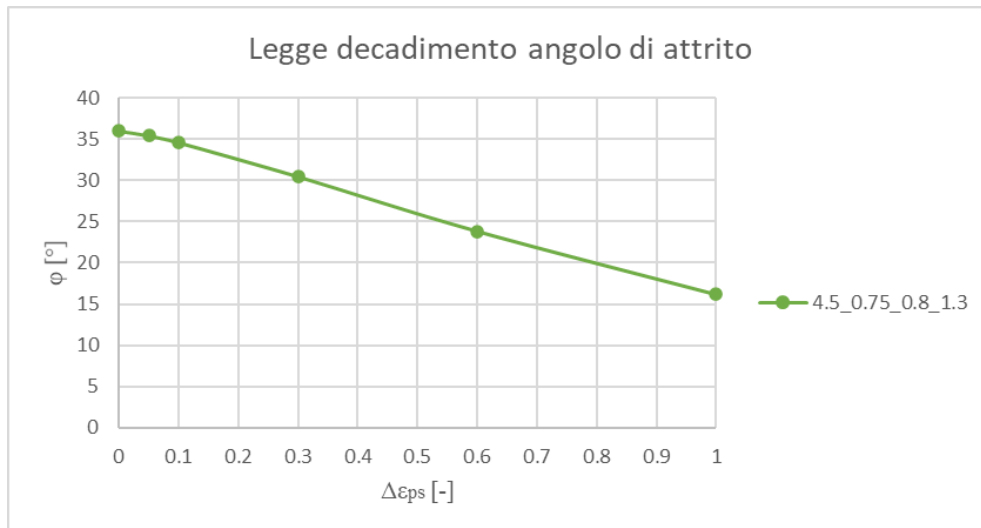


Figura 65 - – Legge di decadimento dell'angolo di attrito in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 23.

Come è possibile osservare in Figura 66, la curva in rosso, risultato della back analysis effettuata sul modello con mesh a 2.5 mm, approssima in maniera soddisfacente la curva sperimentale.

Sulla base di questo risultato, i coefficienti delle curve di decadimento sono stati utilizzati per eseguire un'ulteriore analisi su un modello con mesh ad 1 mm. L'andamento tensione - deformazione ottenuto da quest'ultima operazione è rappresentato dalla curva in giallo, che denota l'evidente effetto della mesh dependency. Appare, quindi, necessario modificare i coefficienti delle curve di decadimento in maniera tale da approssimare meglio la curva sperimentale con il modello con mesh a 1 mm.

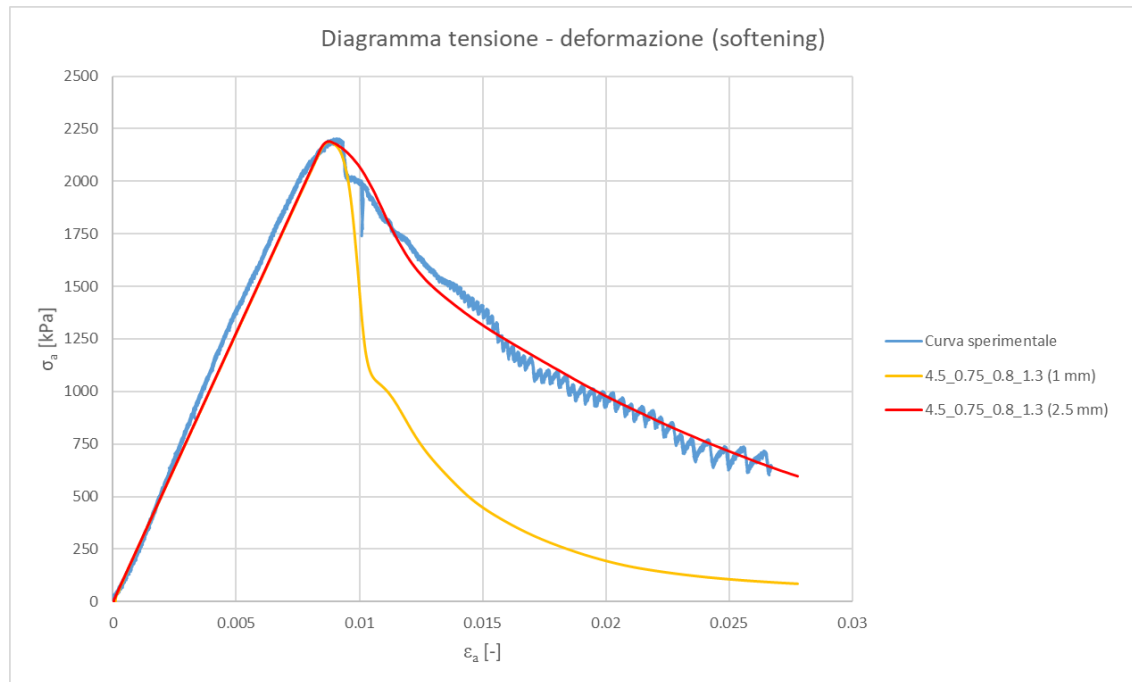


Figura 66 – Confronto tra la curva sperimentale e gli andamenti ricavati da analisi effettuate con gli stessi coefficienti ma diverse mesh, rispettivamente, 2.5 mm (curva rossa) e 1 mm (curva gialla).

In Tabella 24 sono illustrati i coefficienti finali ricavati dopo una serie di analisi sul modello con mesh ad 1 mm.

| 2.5_0.75_36 | |
|-------------|------|
| a | 2.5 |
| d | 0.75 |
| b | 0 |
| f | 36 |

Tabella 24 – Coefficienti definiti dopo la back analysis sul provino 9 con mesh a 1 mm

$$table 'coh' add (0, 560), (0.05, 430), (0.1, 359), (0.3, 203), (0.6, 102), (1, 46) \quad (40)$$

$$table 'fri' add (0, 36), (0.05, 36), (0.1, 36), (0.3, 36), (0.6, 36), (1, 36) \quad (41)$$

In Figura 67 e Figura 68, sono mostrate le leggi di decadimento della coesione e dell'angolo di attrito utilizzate per il modello con mesh ad 1 mm.

In questo caso, all'angolo di attrito è stata assegnata una legge costante pari al valore massimo della matrice (Figura 68), invece per la coesione, una legge esponenziale decrescente (Figura 67).

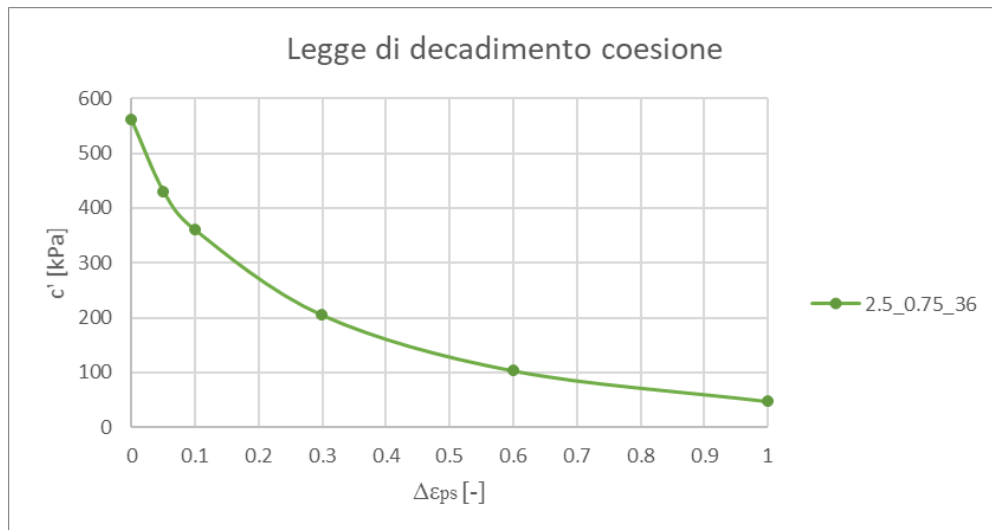


Figura 67 – Legge di decadimento della coesione in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 24.

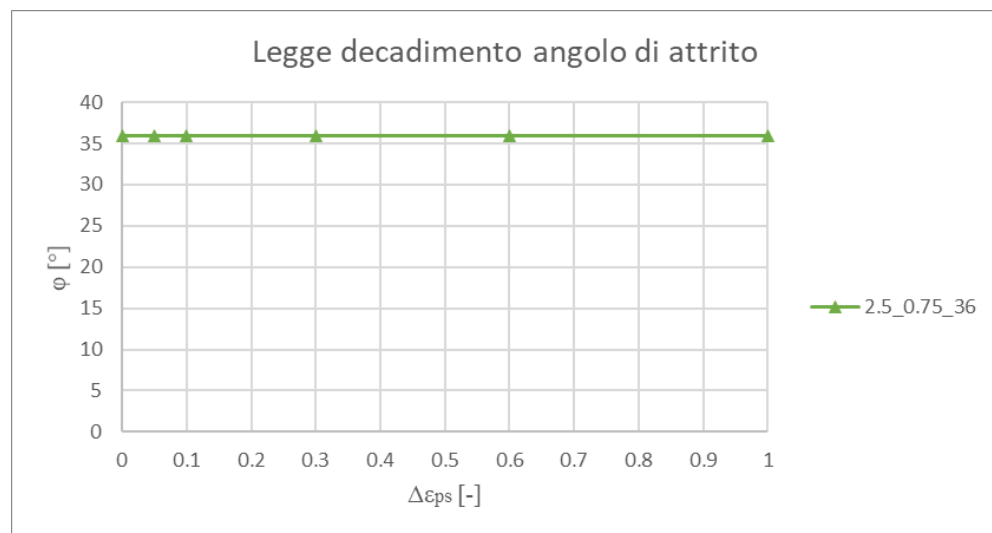


Figura 68 - - Legge di decadimento dell'angolo di attrito in riferimento ai coefficienti indicati in Tabella 24.

In Figura 69 è mostrato l'andamento del diagramma tensione- deformazione ricavato dalla back analysis eseguita sul provino 9 con mesh ad 1 mm. La curva relativa all'analisi numerica approssima in maniera soddisfacente la curva sperimentale.

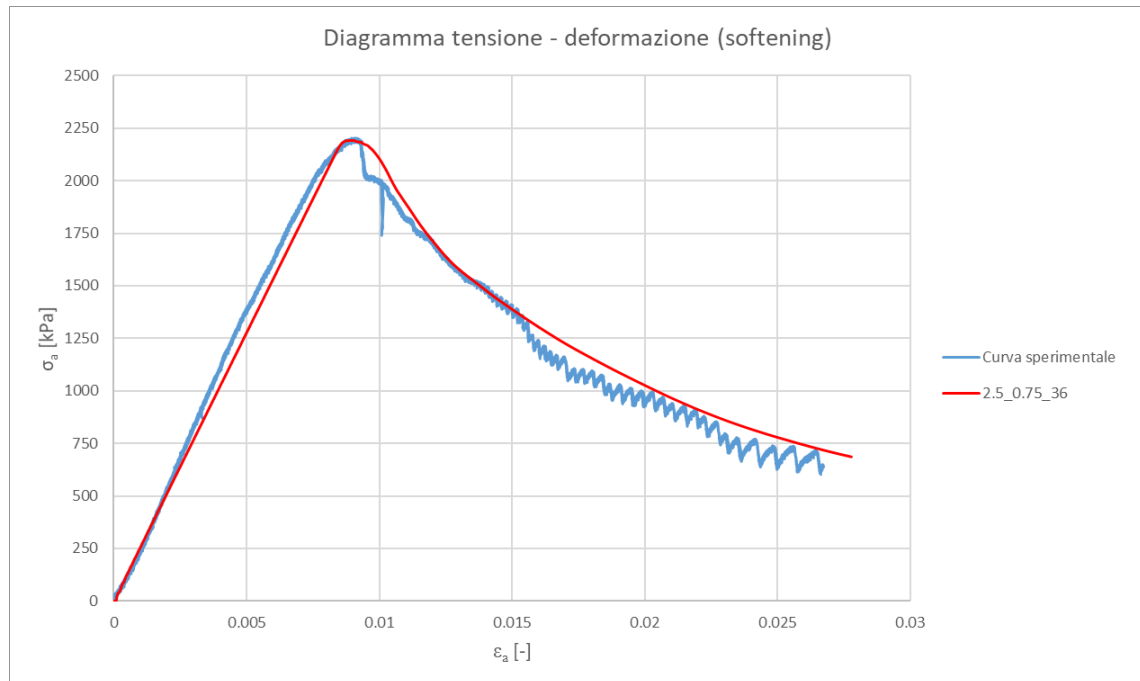


Figura 69 – Confronto tra la curva sperimentale e l'andamento ricavato dalla back analysis sul provino 9 con mesh a 1 mm.

3.3.Superficie di plasticizzazione

3.3.1. Provino 9

Insieme alla back analysis per modellare il ramo di softening relativo al provino 9, sono state anche individuate le zone plastiche che si sviluppano all'interno del modello, come descritto nel paragrafo 2.3.10. In Figura 70 e Figura 71, sono mostrate, rispettivamente, le deformazioni massime a taglio (impostando un fattore di deformazione pari a 1.5) e la superficie interna di plasticizzazione, nel modello con mesh pari a 2.5 mm.

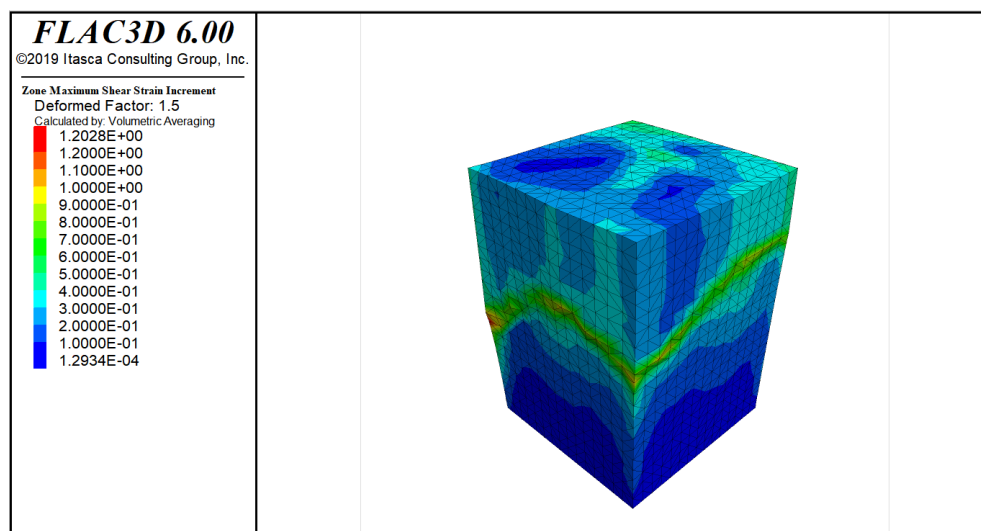


Figura 70 – Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 2.5 mm (DF:1.5)

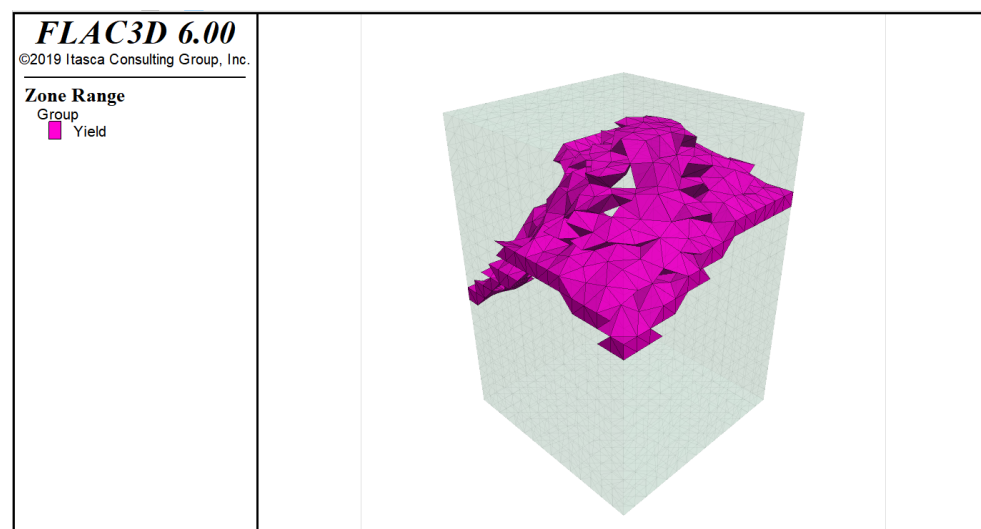


Figura 71 – Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 2.5 mm.

Utilizzando una mesh più fitta pari ad 1 mm, è possibile notare dalla Figura 72 e Figura 73, che le deformazioni non sono uniformemente distribuite ma risultano concentrate solo in determinati piani in corrispondenza dei quali si forma la superficie di plasticizzazione, come è possibile osservare in Figura 74 e Figura 75. La superficie di plasticizzazione per il modello con mesh ad 1 mm assume una forma diversa rispetto a quella con mesh 2.5 mm, disponendosi per strati. Anche in questo caso, appare evidente come la mesh dependency crea una variabilità nel risultato, che si ritiene più attendibile nel caso di mesh più fitta.

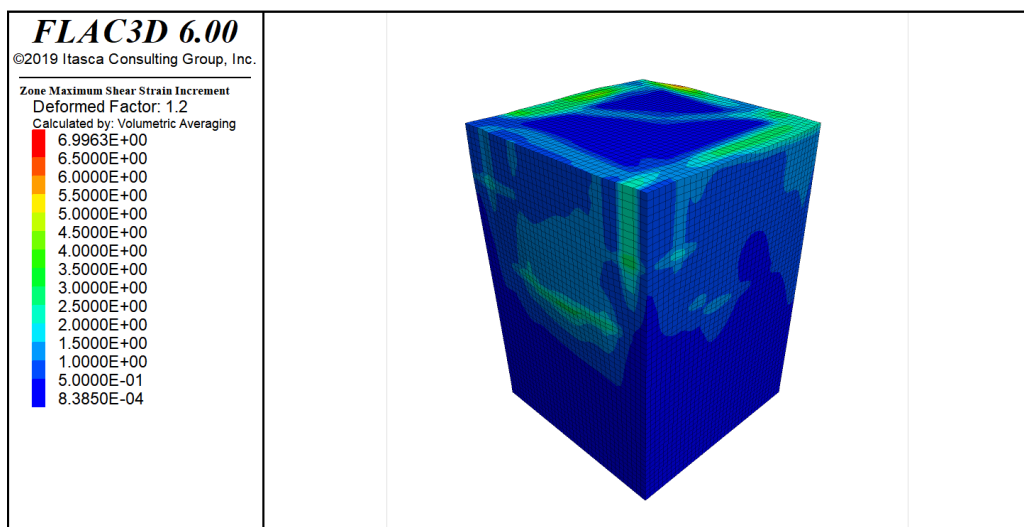


Figura 72 - Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 1 mm, fattore di deformazione pari a 1.2 (facce "south" e "east").

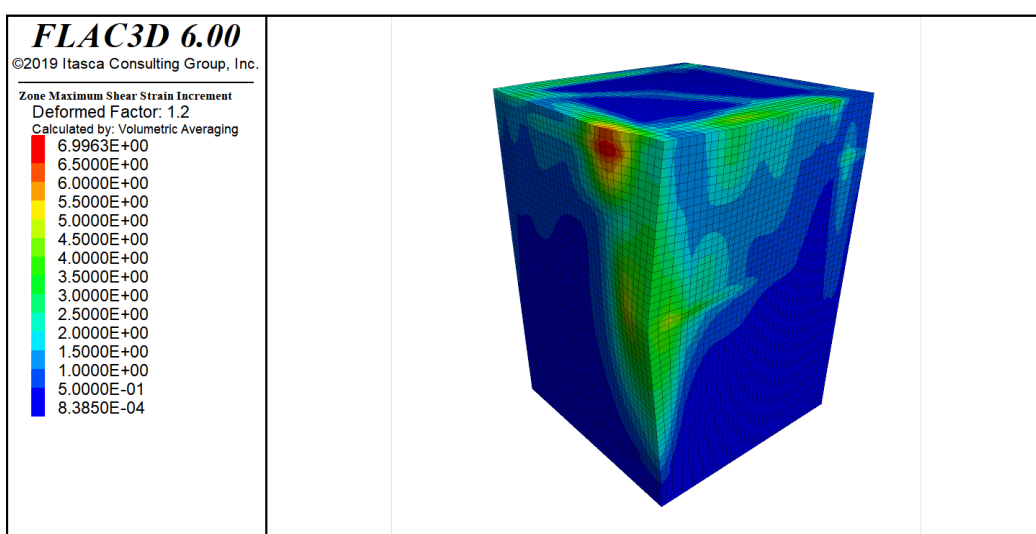


Figura 73 - Deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 1 mm, fattore di deformazione pari a 1.2 (facce "north" e "west").

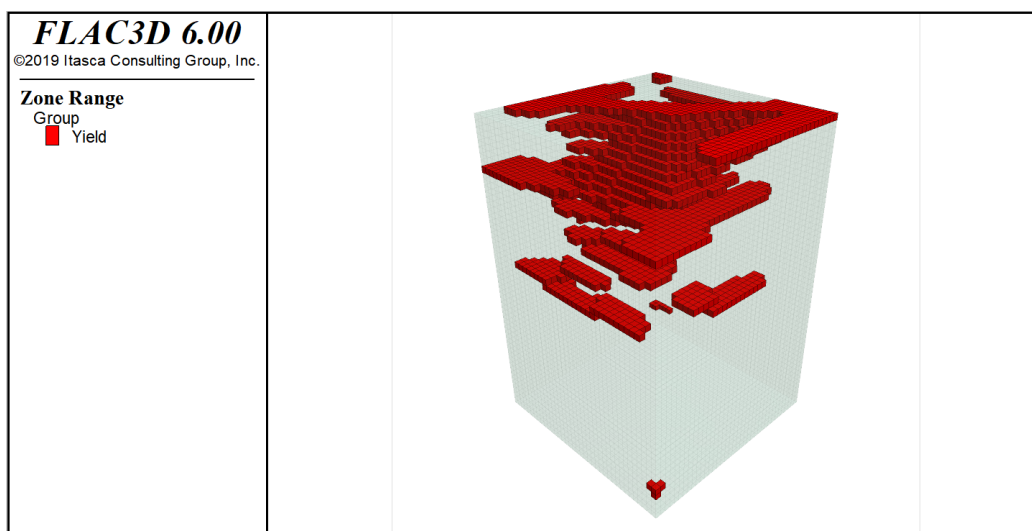


Figura 74 - Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 1 mm (facce "south" e "east").

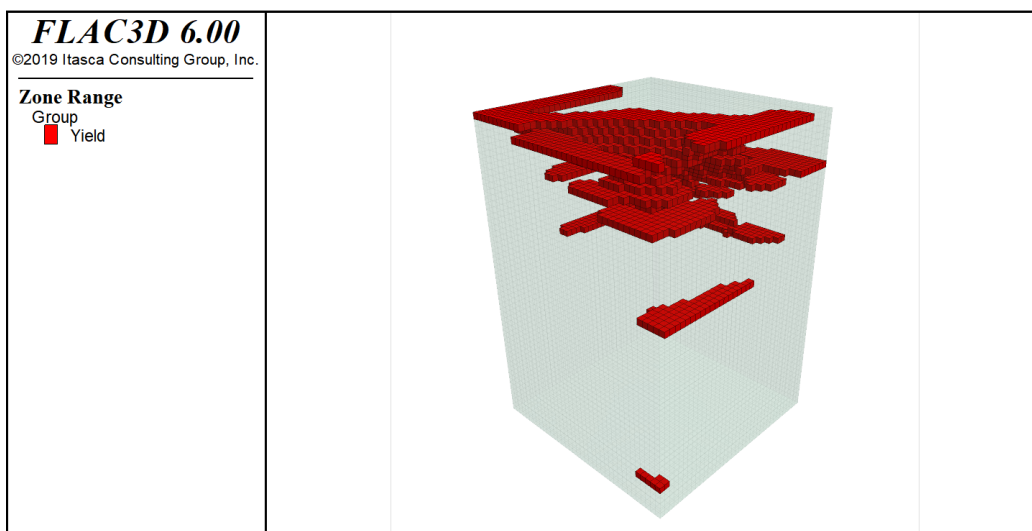


Figura 75 - Superficie di plasticizzazione per il provino 9 con mesh 1 mm (facce "north" e "west").

Per poter osservare i risultati della modellazione del provino 9 con mesh ad 1 mm, in Allegato 3 sono riportate:

- la deformazione massima a taglio per il provino 9 con mesh 1 mm, senza fattore di deformazione (visualizzazione: frontale e retro);
- l'individuazione complessiva delle zone plastiche "Yield" e di quelle "Other" per il provino 9 con mesh 1 mm (visualizzazione: frontale e retro).

Nelle foto illustrate in Figura 76, si può osservare come sia avvenuta la rottura del provino 9 mediante prova di compressione monoassiale, eseguita in laboratorio da tesisti che, precedentemente, hanno condotto delle analisi sperimentali.

La rottura si sviluppa tramite delle superfici subverticali che seguono le evidenti striature già presenti nel provino lungo la direzione di compressione prima che fosse sottoposto alla prova (riquadro in alto a destra di ciascuna foto), come descritto nel paragrafo 2.1.1. Nella foto di sinistra si può notare che la superficie di rottura si estende maggiormente nella parte superiore del provino, come avviene nel modello numerico

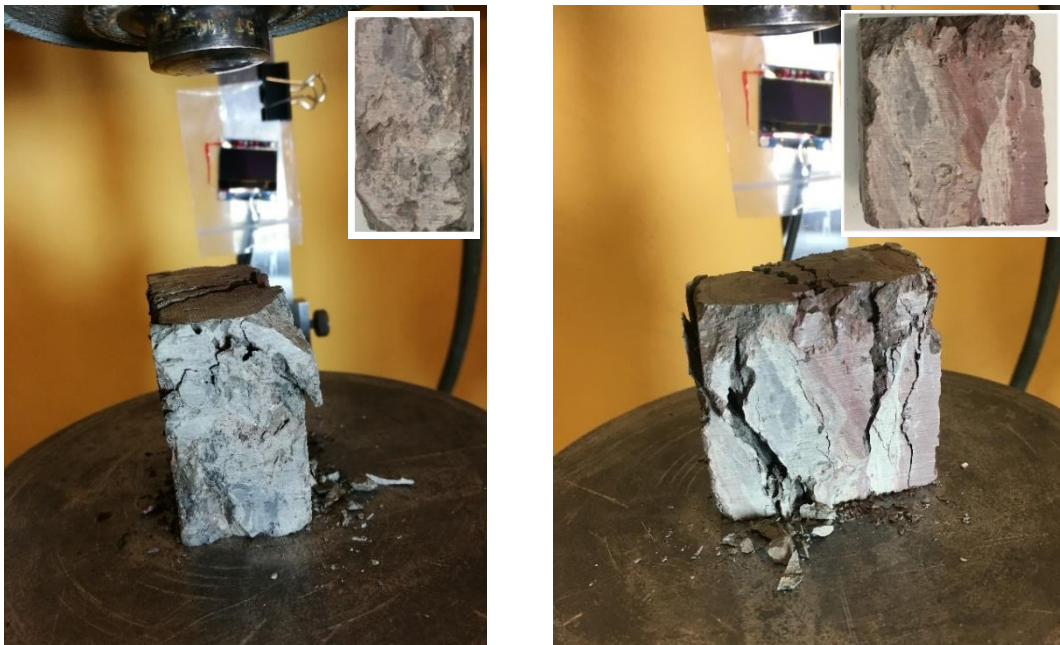


Figura 76 – Foto della superficie di rottura lungo le due facce del provino 9, fornita da tesisti che, precedentemente a questo lavoro di tesi, hanno condotto delle analisi sperimentali.

4. Risultati della prova di compressione monoassiale sul provino 7

La caratterizzazione e la valutazione del comportamento delle formazioni complesse si è articolata in tre diversi livelli di analisi:

- ricerca delle caratteristiche meccaniche della matrice attraverso l'analisi di due provini caratterizzati dall'assenza di blocchi (capitolo 3);
- analisi del provino eterogeneo a cui sono state assegnate le caratteristiche della matrice analizzata precedentemente con inserimento dei blocchi calcarei (paragrafo 4.1);
- analisi del provino eterogeneo con inserimento delle interfacce tra blocchi e matrice (paragrafo 4.2).

Alla matrice del modello eterogeneo sono state assegnate le proprietà risultanti dalla back analysis effettuata sul provino 9, caratterizzato da un comportamento di tipo strain-softening, mentre per i blocchi, una volta identificato il litotipo (calcere), si è fatto riferimento a quanto suggerito nel manuale di FLAC3D. In particolare sono stati assegnati ai blocchi, i valori delle proprietà meccaniche suggeriti da Goodman (1980) per il materiale limestone (Tabella 25).

| Table 1: Selected Elastic Constants (laboratory-scale) for Rocks (adapted from Goodman 1980) | | | | | |
|--|----------------------------------|----------------|----------|----------------|----------------|
| | Dry Density (kg/m ³) | <i>E</i> (GPa) | <i>ν</i> | <i>K</i> (GPa) | <i>G</i> (GPa) |
| sandstone | | 19.3 | 0.38 | 26.8 | 7.0 |
| siltstone | | 26.3 | 0.22 | 15.6 | 10.8 |
| limestone | 2090 | 28.5 | 0.29 | 22.6 | 11.1 |
| shale | 2210 – 2570 | 11.1 | 0.29 | 8.8 | 4.3 |
| marble | 2700 | 55.8 | 0.25 | 37.2 | 22.3 |
| granite | | 73.8 | 0.22 | 43.9 | 30.2 |

Tabella 25 - Valori delle proprietà meccaniche assegnate ai blocchi. (Goodman 1980)

Il valore dell'angolo di resistenza al taglio è stato dedotto utilizzando il criterio proposto da Medley (1994), in cui viene definito il valore di soglia come il risultato del rapporto tra gli

angoli di resistenza al taglio di blocchi e matrice. Partendo dalla conoscenza dell'angolo di resistenza al taglio della matrice è stato ricavato a ritroso il valore da attribuire ai blocchi (equazione (42)).

$$\frac{\tan \varphi_{\text{blocchi}}}{\tan \varphi_{\text{matrice}}} \geq 2$$

$$\tan \varphi_{\text{blocchi}} \geq 2 \cdot \tan 36^\circ \quad \tan \varphi_{\text{blocchi}} \geq 1.45$$

(42)

$$\varphi_{\text{blocchi}} \geq 55^\circ$$

Il provino 7 è composto in prevalenza da una matrice argillosa di mélange di origine sedimentaria e da una piccola percentuale di clasti di forma subangolare e alcune inclusioni di argilla sovraconsolidata di forma subarrotondata. Il modello tridimensionale utilizzato per l'analisi numerica, è il risultato dell'unione dei valori ottenuti dalla back analysis condotta sul provino 9 e dei parametri assegnati ai blocchi calcarei.

4.1. Modellazione tridimensionale senza interfacce

In una prima fase l'analisi è stata eseguita senza la modellazione delle interfacce. In Figura 77 è mostrato il grafico tensione – deformazione che viene fornito in output da FLAC3D per il provino 7, in cui appare evidente che la resistenza ottenuta risulta significativamente differente da quella ricavata dalla prova sperimentale, pari a 3.12 MPa. La resistenza a compressione raggiunta dal modello si attesta su 2.2 MPa in corrispondenza di una deformazione assiale pari a 0.9 %. Questo risultato dimostra che, nonostante il provino sia eterogeneo, la percentuale dei blocchi presenti all'interno del provino non influenza minimamente la resistenza. È possibile avanzare l'ipotesi per cui l'incremento di resistenza sperimentale sia legato alla presenza delle inclusioni di argilla sovraconsolidata, per le quali non è stato possibile effettuare la modellazione perché poiché risultano non quantificabili.

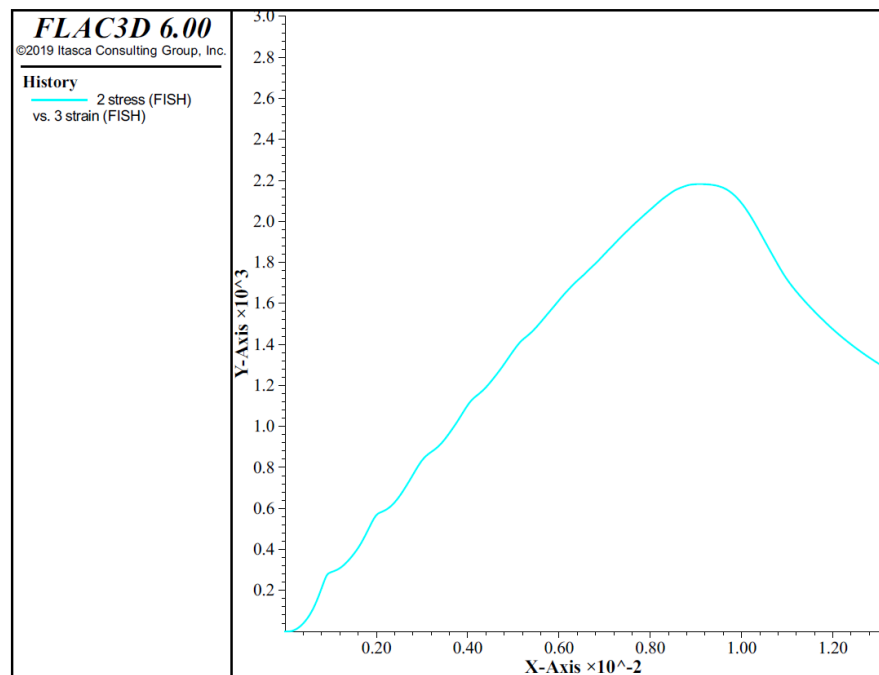


Figura 77 – Diagramma tensione – deformazione del provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (Output estratto dal FLAC3D)

La Figura 78 e la Figura 79 descrivono la variazione delle massime deformazioni a taglio del provino 7 senza interfacce. Per poter apprezzare la modalità di rottura è stato utilizzato un fattore di deformazione, scelto arbitrariamente, pari a 2.

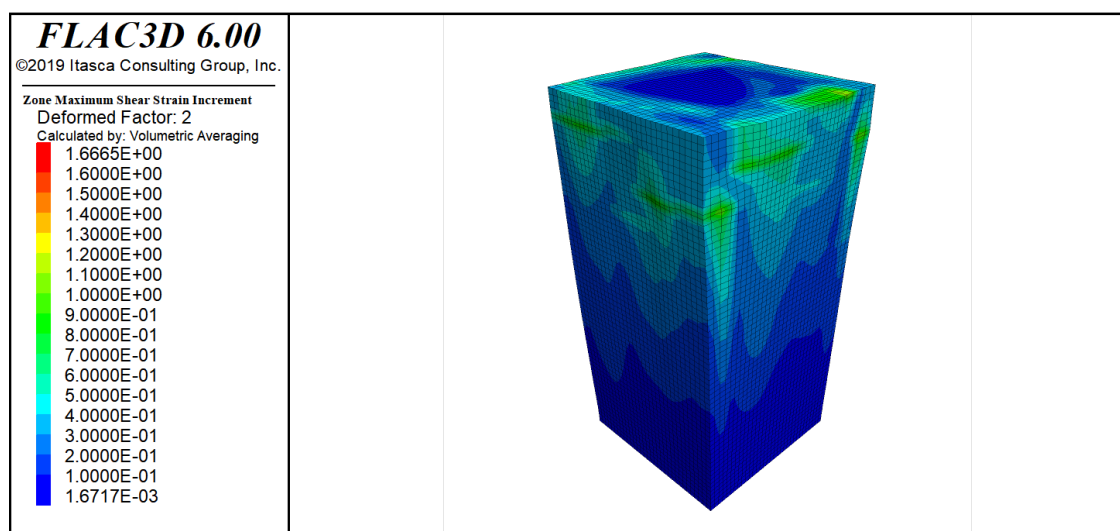


Figura 78 – Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce "south" e "east").

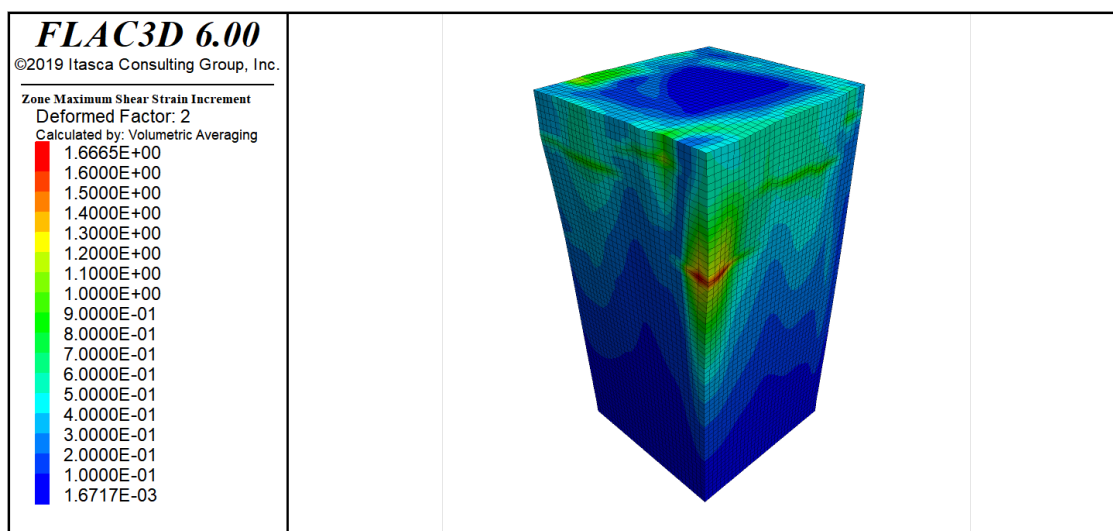


Figura 79 - Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce "north" e "west").

In Figura 80 e Figura 81, le zone plastiche sono visibili anche all'esterno, configurandosi solo nella parte superiore del modello.

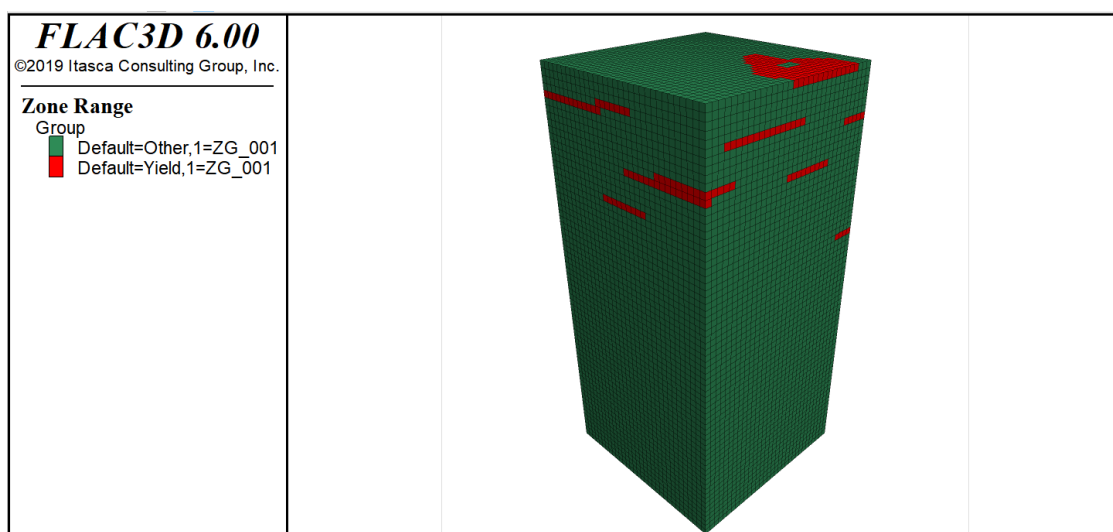


Figura 80 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (facce "south" e "east").

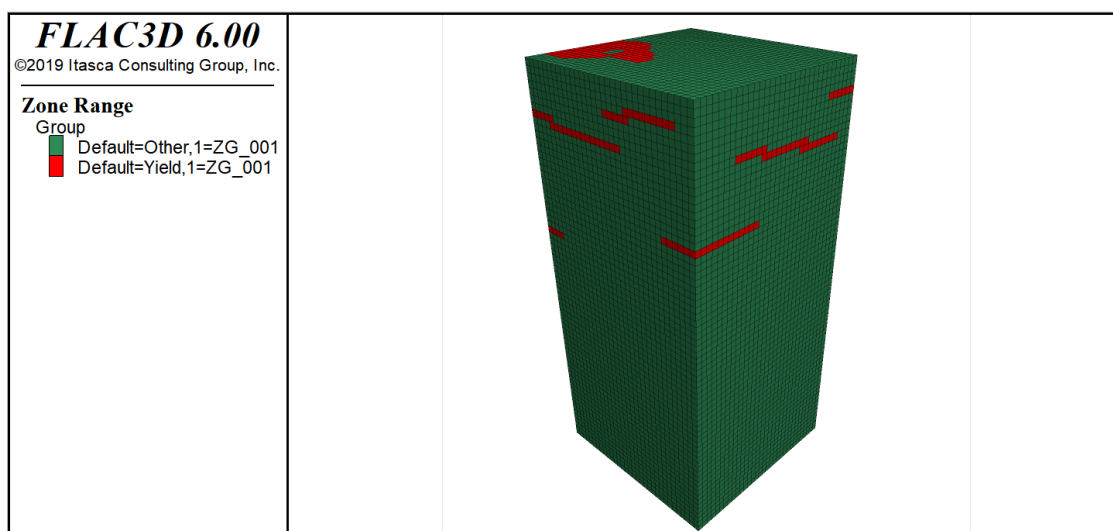


Figura 81 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm, senza interfacce (facce “north” e “west”).

Come è possibile notare dalla Figura 82 e Figura 83 la superficie di plasticizzazione interna si sviluppa maggiormente nella zona superiore del provino.

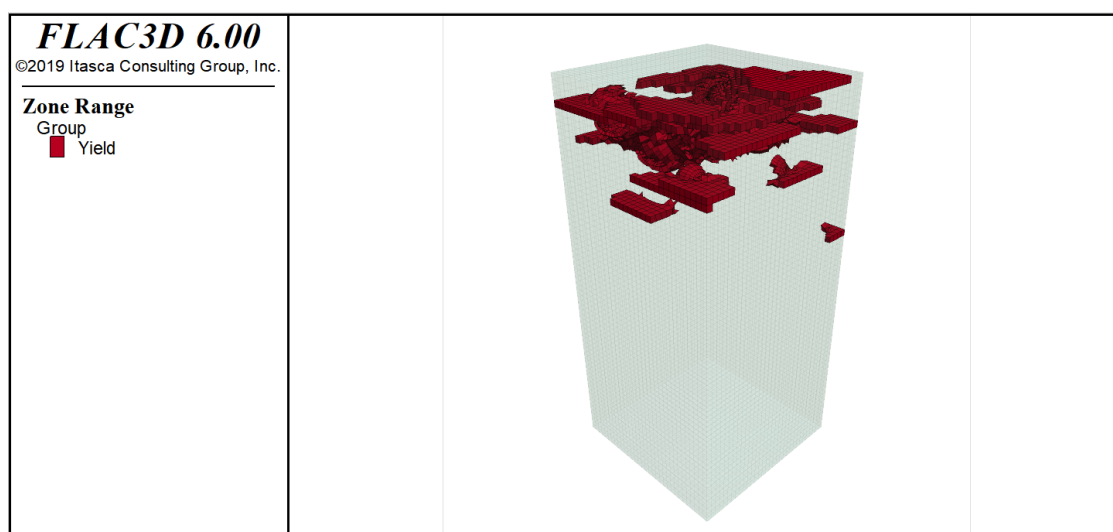


Figura 82 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (facce “south” e “east”).

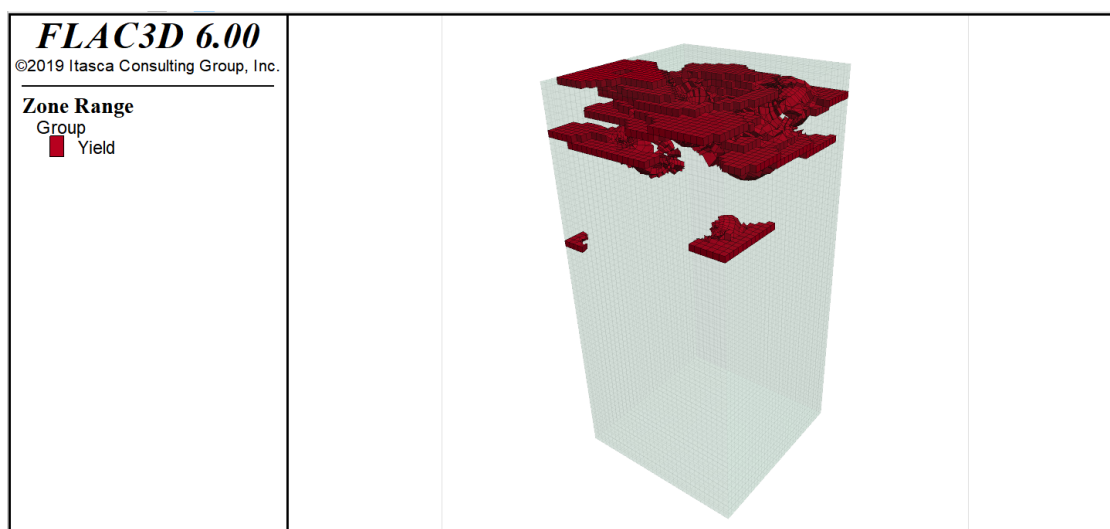


Figura 83 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (facce “north” e “west”).

Come è possibile notare dalla Figura 84, la superficie di plasticizzazione si sviluppa esclusivamente nella matrice, passando intorno ai blocchi senza attraversarli, risultando tortuosa.

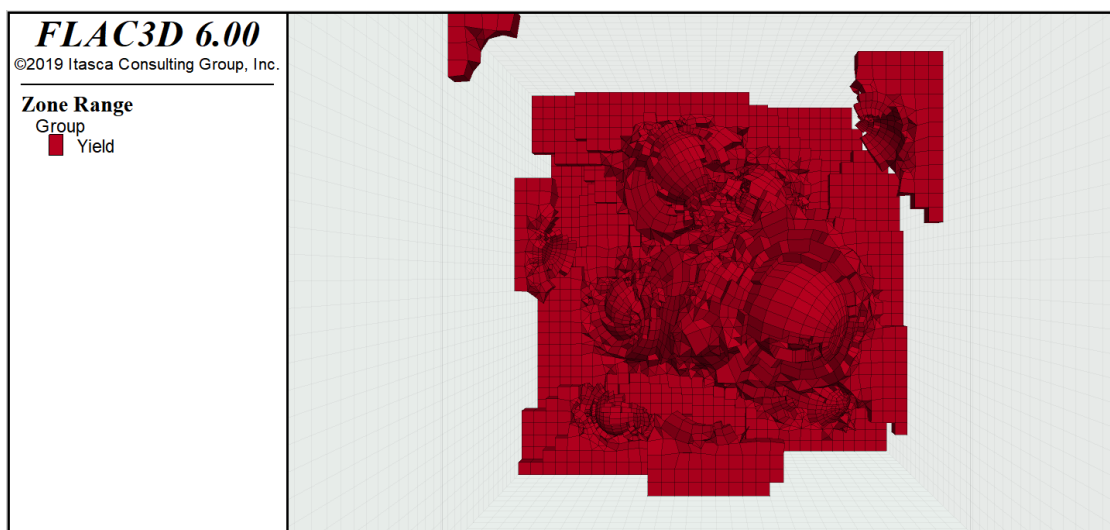


Figura 84 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm, senza interfacce (visualizzazione interna dal basso verso l’alto).

4.2. Modellazione tridimensionale con interfacce

Per completare l'analisi del modello eterogeneo, è stata implementata tra i blocchi e la matrice un'interfaccia di tipo reale, rigida rispetto al materiale circostante e che può scivolare e separarsi in risposta ai carichi, come descritto nel paragrafo 2.3.9. In Figura 85 è possibile osservare il diagramma tensione – deformazione fornito in output da FLAC3D. La resistenza sperimentale del provino, pari a 3.12 MPa, anche in questo caso non viene raggiunta. Il valore della resistenza a compressione e della deformazione assiale corrispondente è pari a quello descritto precedentemente nel paragrafo 4.1, per il modello senza interfacce. È possibile constatare che in entrambi i casi, la percentuale volumetrica dei blocchi non influenza l'incremento di resistenza, infatti, la resistenza ottenuta è identica a quella del provino di sola matrice. Come ipotizzato precedentemente, il motivo per cui la resistenza risulta maggiore, con ogni probabilità, è dovuto alla presenza di inclusioni di argilla sovraconsolidata. Inoltre, la presenza delle interfacce non ha alcun effetto sulla variazione della resistenza.

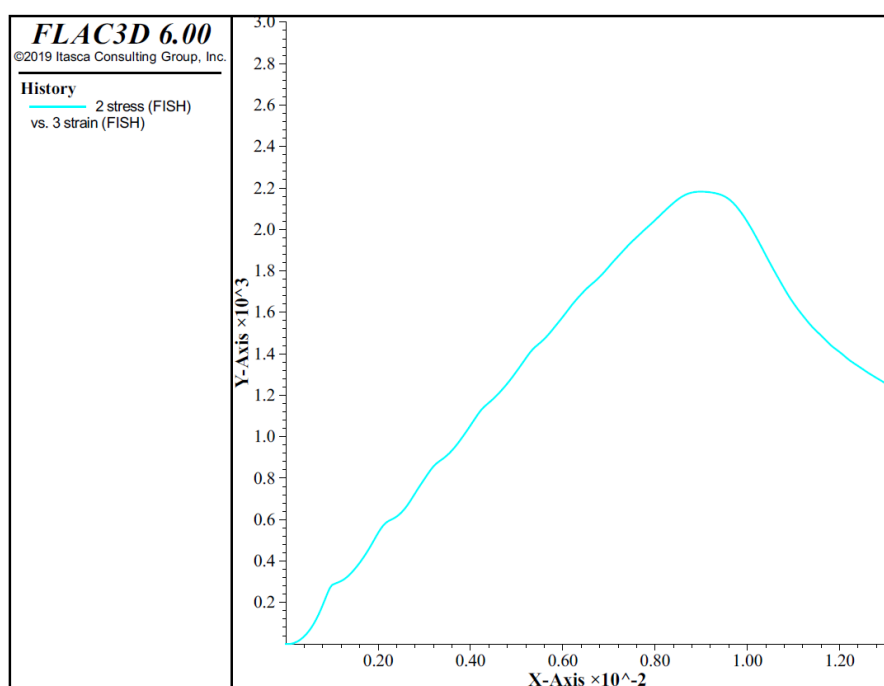


Figura 85 - Diagramma tensione – deformazione del provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (Output estratto dal FLAC3D)

In Figura 86 si può notare come vengono visualizzate le interfacce tra blocchi e matrice nel software di calcolo.

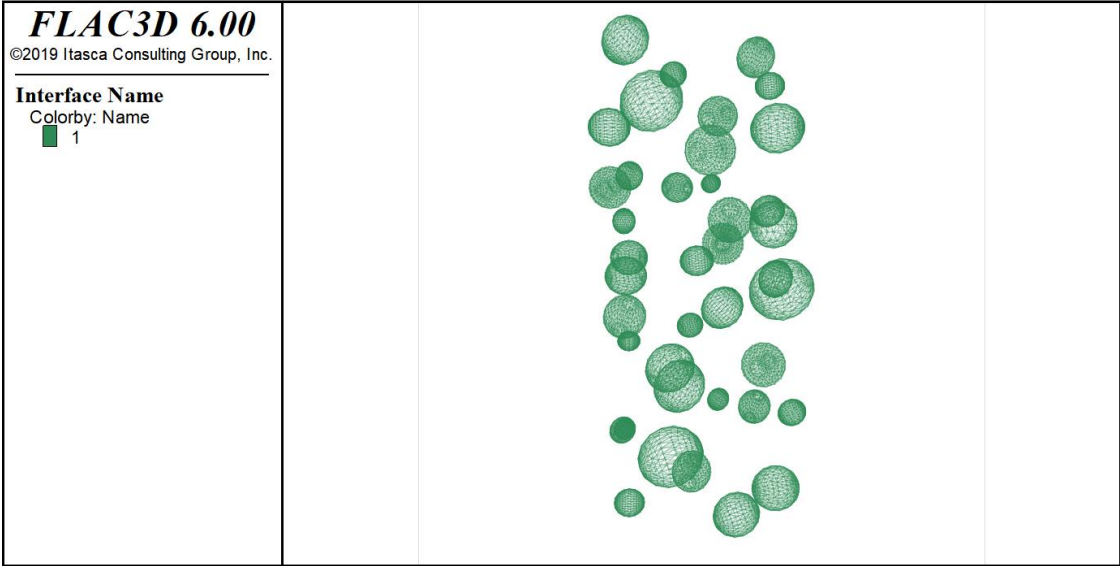


Figura 86 – Interfacce create tra i blocchi e la matrice (Interface 1).

In Figura 87, viene mostrato lo stato di scivolamento normale avvenuto tra le interfacce ed i blocchi. Si può ipotizzare uno scollamento per trazione del materiale in risposta ai carichi.

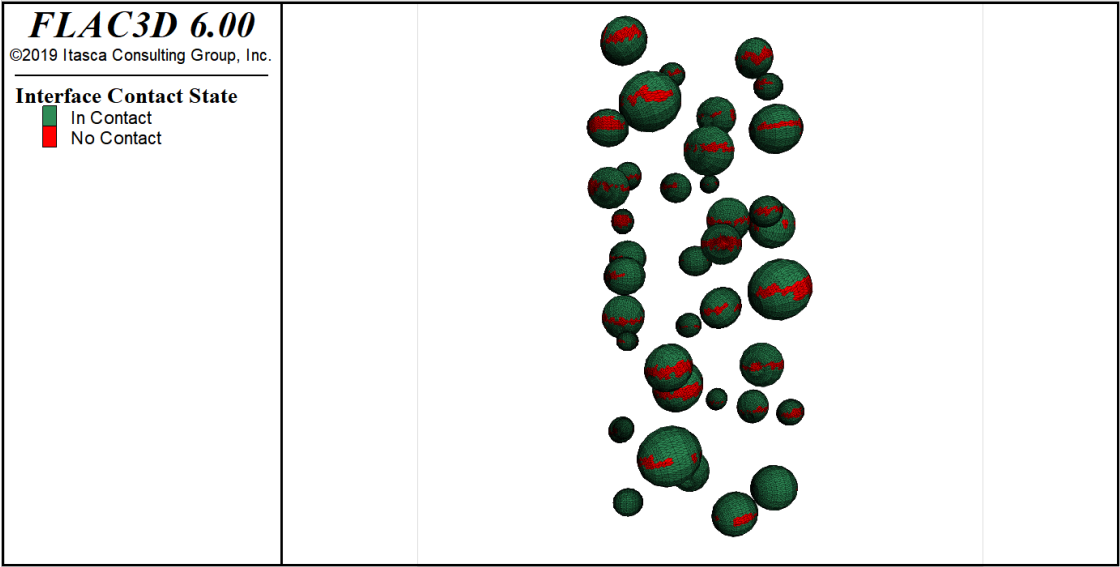


Figura 87 – Interfacce, scivolamento normale.

Per quanto riguarda lo stato di scivolamento per taglio, dalla Figura 88, si nota che per la maggior parte delle interfacce non avviene scivolamento, e solo per una piccola aliquota di queste, risulta avvenuto.

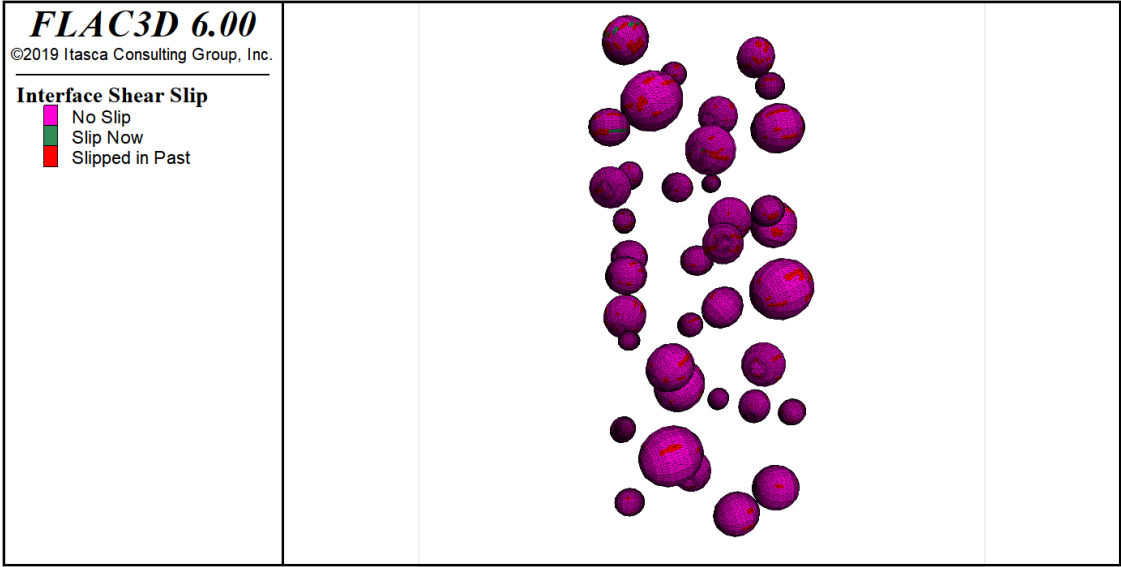


Figura 88 – Interfacce, scivolamento a taglio.

La Figura 89 e la Figura 90 descrivono la variazione delle massime deformazioni a taglio del provino 7 e, mediante il fattore di deformazione, scelto arbitrariamente pari a 2, la configurazione deformata del provino.

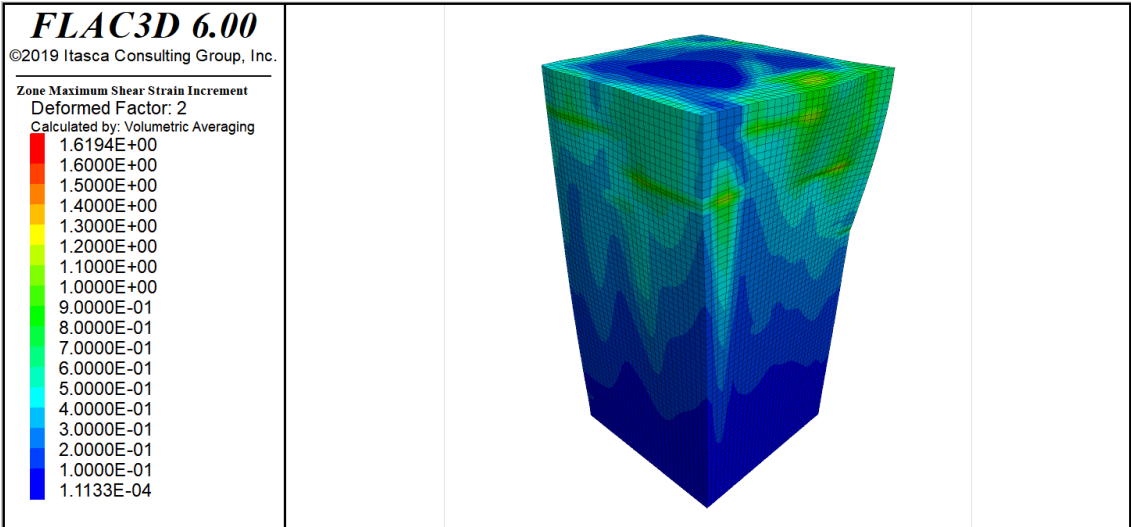


Figura 89 – Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce “south” e “east”).

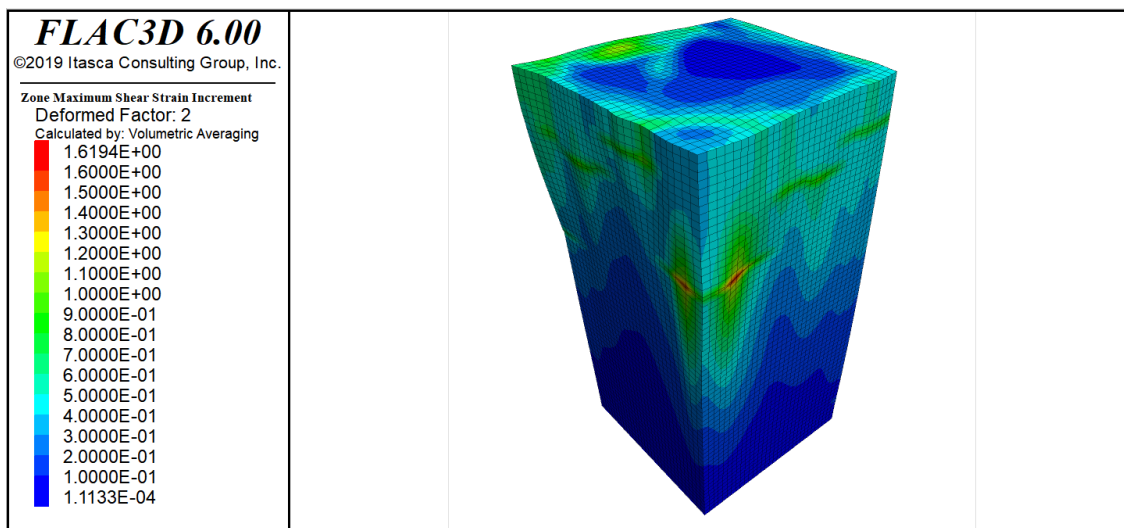


Figura 90 – Deformazione massima a taglio per il provino 7 con mesh ad 1 mm, interfacce e fattore di deformazione pari a 2 (facce “north” e “west”).

Le zone plastiche sono visibili anche dall’esterno del provino, come è possibile notare dalla Figura 91 e Figura 92, e si configurano maggiormente nella parte superiore.

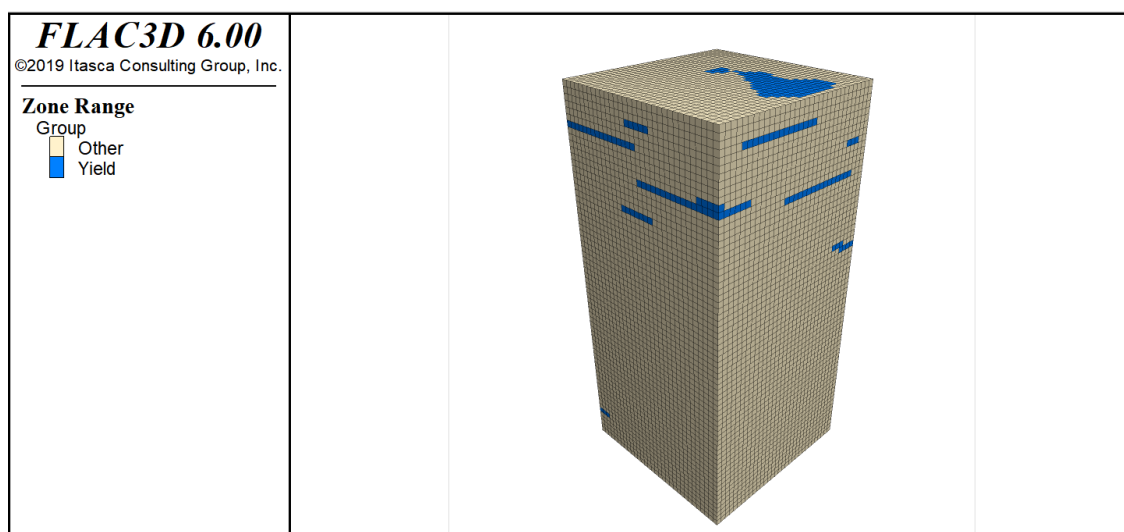


Figura 91 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (facce “south” e “east”).

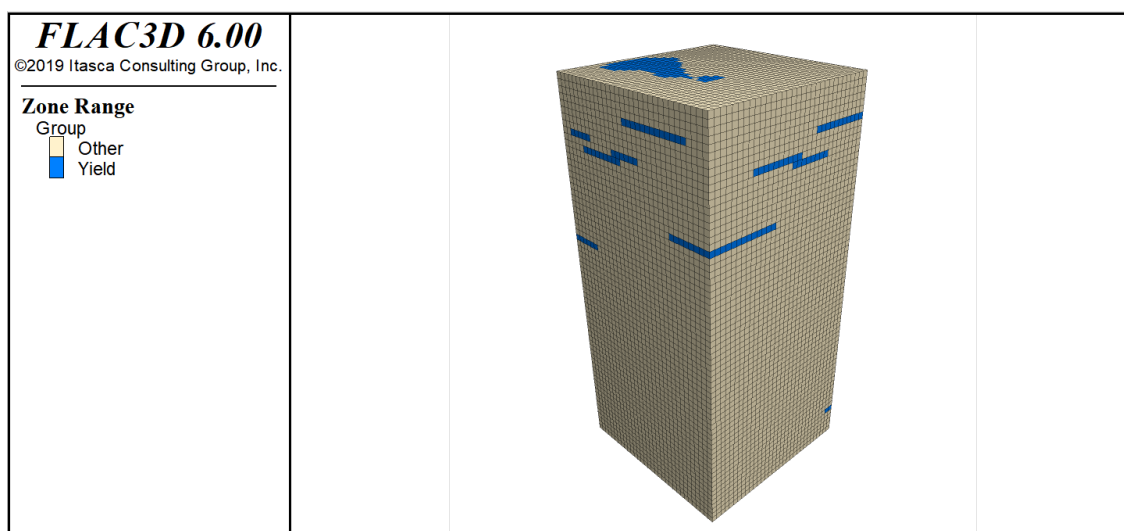


Figura 92 – Zone plastiche nel provino 7 con mesh ad 1 mm e interfacce (facce “north” e “west”).

La superficie di plasticizzazione interna si sviluppa maggiormente nella zona superiore del provino, come illustrato in Figura 93 e Figura 94.

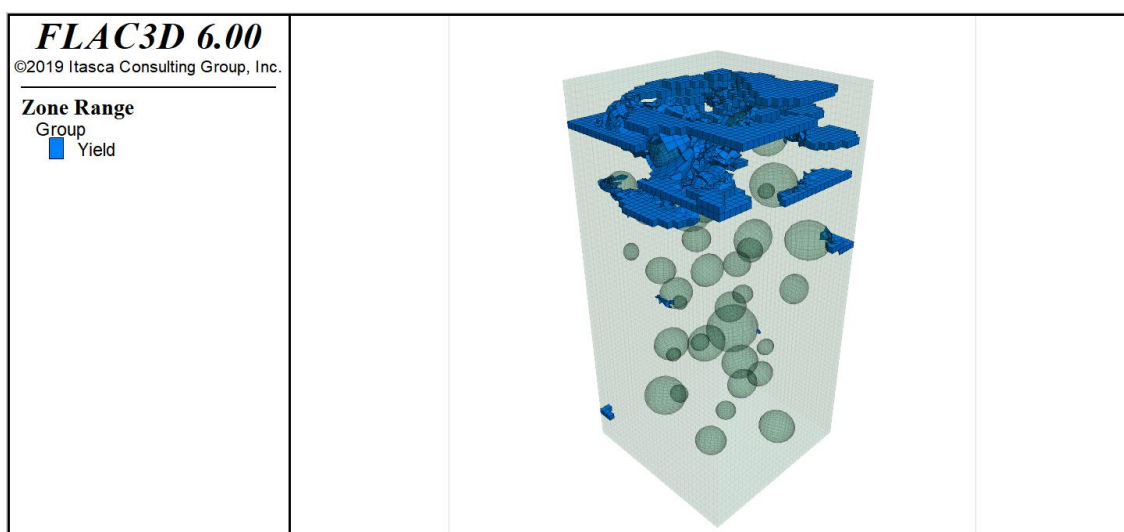


Figura 93 - Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (facce “south” e “east”).

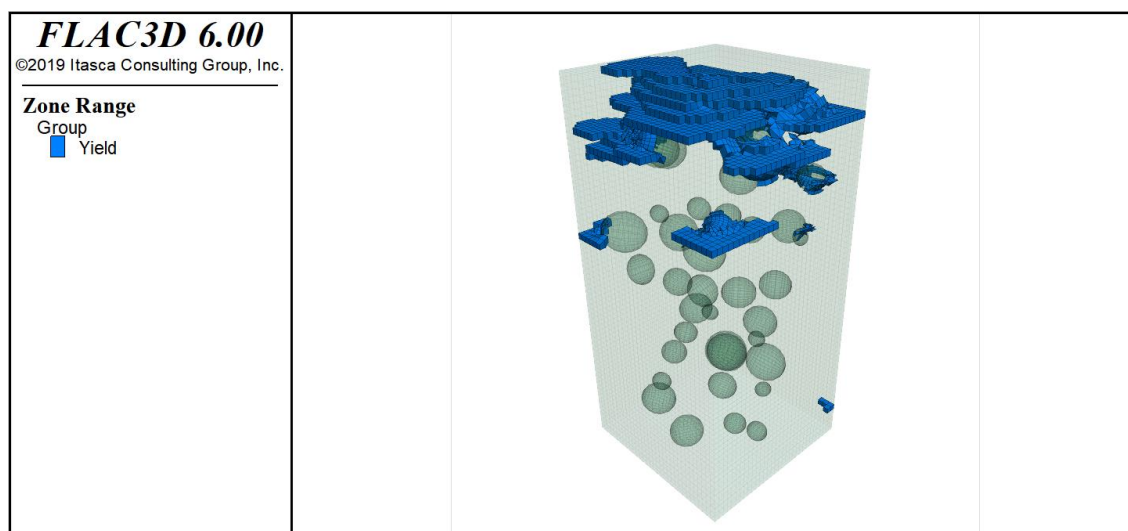


Figura 94 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (facce “north” e “west”).

Osservando le due figure precedenti (Figura 93 e Figura 94) insieme alla Figura 95, appare chiaro come la superficie di plasticizzazione segua la tortuosità dei blocchi, sviluppandosi intorno ad essi senza attraversarli.

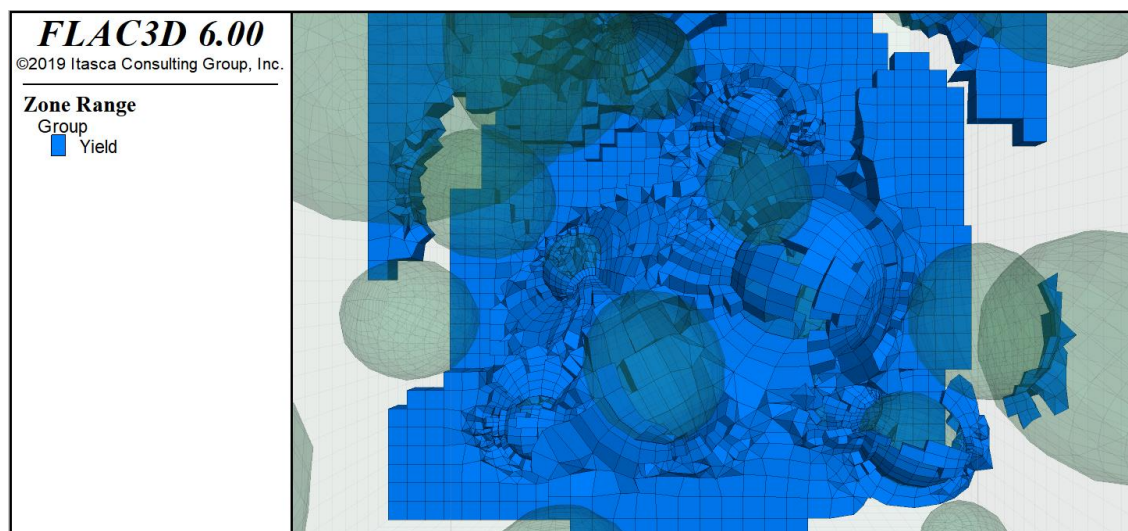


Figura 95 – Superficie di plasticizzazione per il provino 7 con mesh 1 mm e interfacce (visualizzazione interna dal basso verso l’alto).

In Figura 96 è riportata la foto del provino 7 in fase di rottura, a sinistra la foto originale, mentre a destra, sono state evidenziate in rosso le superfici di rottura ed in giallo i blocchi vicini alla superficie di rottura. Come è possibile notare, la superficie di rottura tende ad aggirare i blocchi (evidenziati in giallo) assumendo un andamento tortuoso.

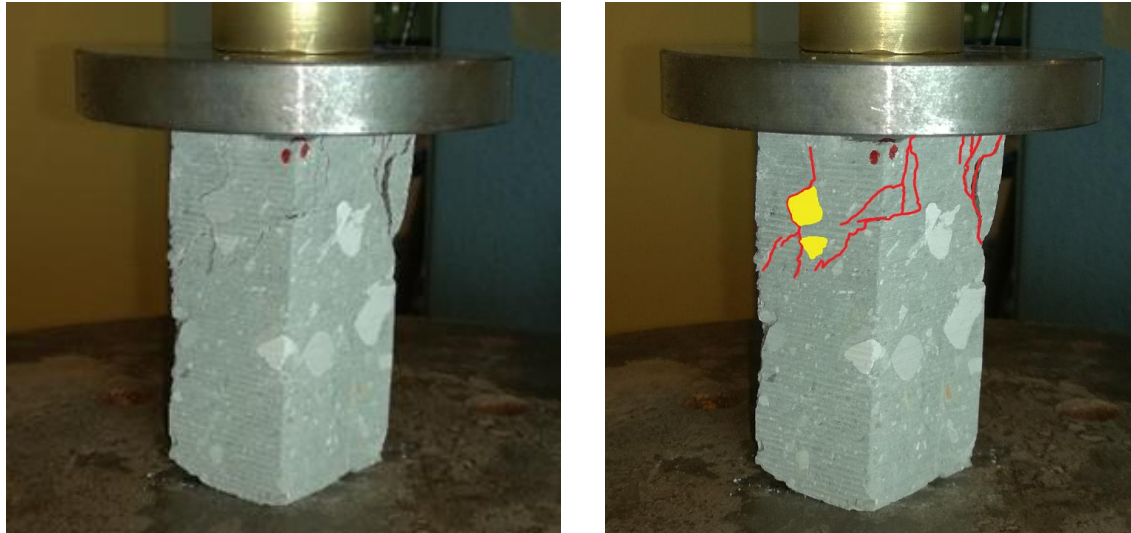


Figura 96 – Provino 7 sottoposto a prova di compressione monoassiale in laboratorio. A destra foto originale e a sinistra foto ritoccata, delineando le superfici di rottura e i due blocchi circoscritti.

In Figura 97 sono riportate le configurazioni deformate (fattore di deformazione pari a 2) della massima deformazione di taglio del provino 7, rispettivamente, a sinistra senza interfacce e a destra con la modellazione delle interfacce. La zona in cui si ha la massima concentrazione di deformazione a taglio è legata molto probabilmente alla presenza di un blocco all'interno in prossimità della superficie.

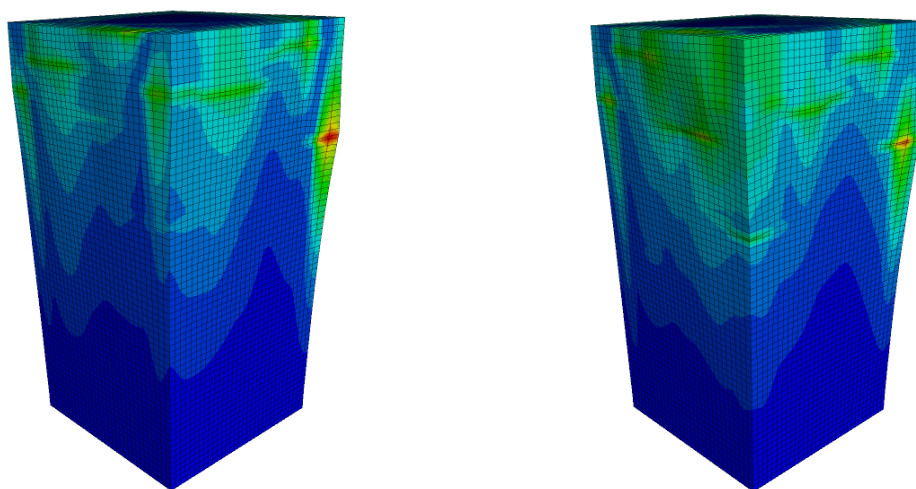


Figura 97 – Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2, del provino 7. A sinistra modellazione senza interfacce e a destra modellazione con interfacce.

In entrambe le immagini riportate in Figura 97 la zona inferiore del provino non subisce alcuna deformazione, poiché, come osservato precedentemente, la superficie di rottura si sviluppa maggiormente nella zona superiore. Questo aspetto è evidenziato anche nelle foto reali del provino (Figura 96), in cui la zona inferiore rimane integra.

4.3.Confronto tra provino 9 e provino 7

In base al risultato dell'analisi numerica condotta sul provino 7, si è potuto riscontrare che i valori di resistenza a compressione e della deformazione assiale corrispondente, sono identici a quelli dedotti sperimentalmente nel provino 9.

Come è possibile notare dal grafico presente in Figura 98, l'andamento del provino 7 presenta una pendenza maggiore rispetto a quello del provino 9, probabilmente questa differenza è dovuta al fatto che la presenza delle inclusioni di argilla sovraconsolidata provoca un leggero aumento della rigidezza.

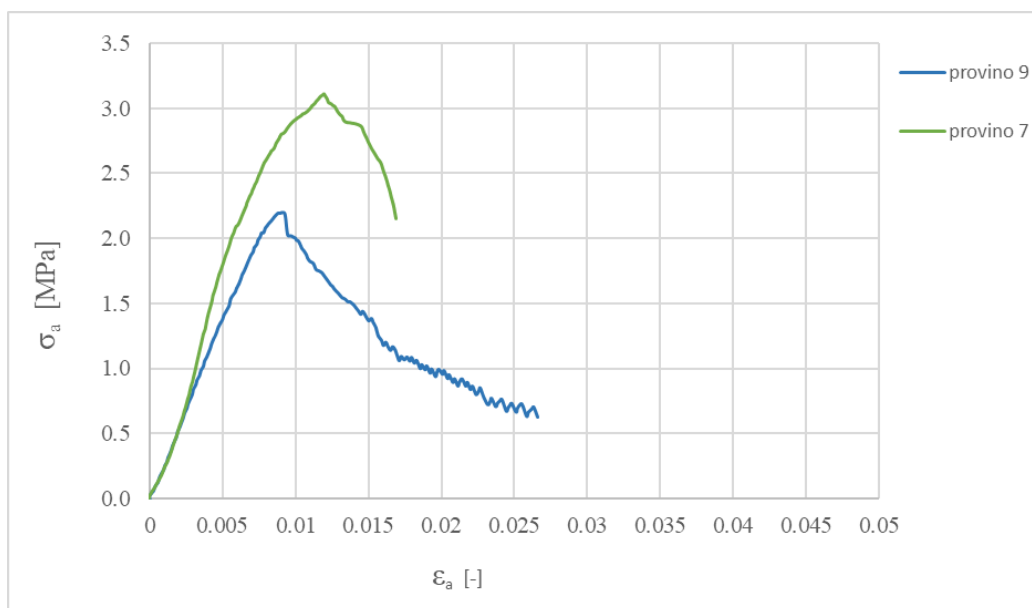


Figura 98 - Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 9 e 7.

In termini di massime deformazioni a taglio, è possibile osservare dalla Figura 99 e Figura 100, che la concentrazione delle deformazioni di taglio è necessariamente differente e rispecchia quello che è il risultato di plasticizzazione (Figura 101).

Infine, dalle foto dei provini reali, scattate dopo l'esecuzione della prova di compressione monoassiale in laboratorio (Figura 102), è possibile notare che entrambi i provini presentano la rottura superiormente.

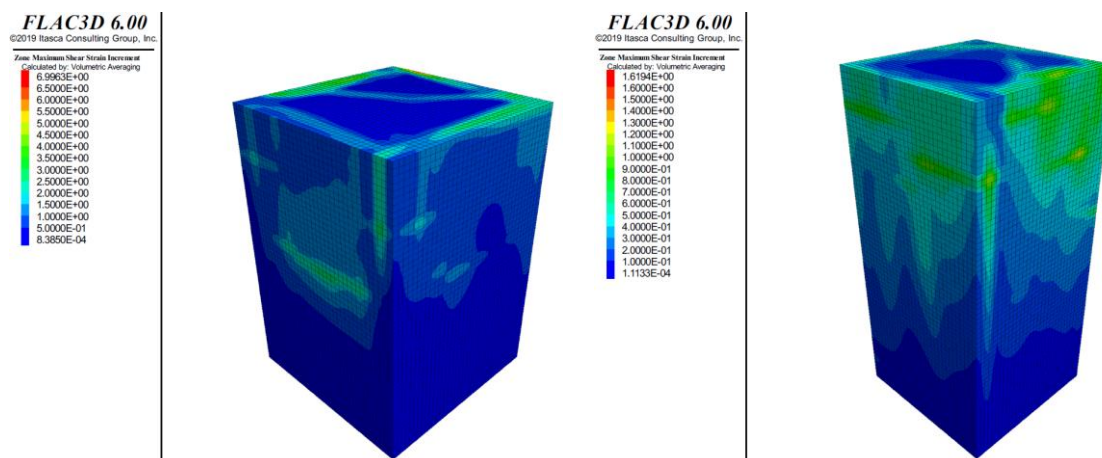


Figura 99 - Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce "south" e "east").

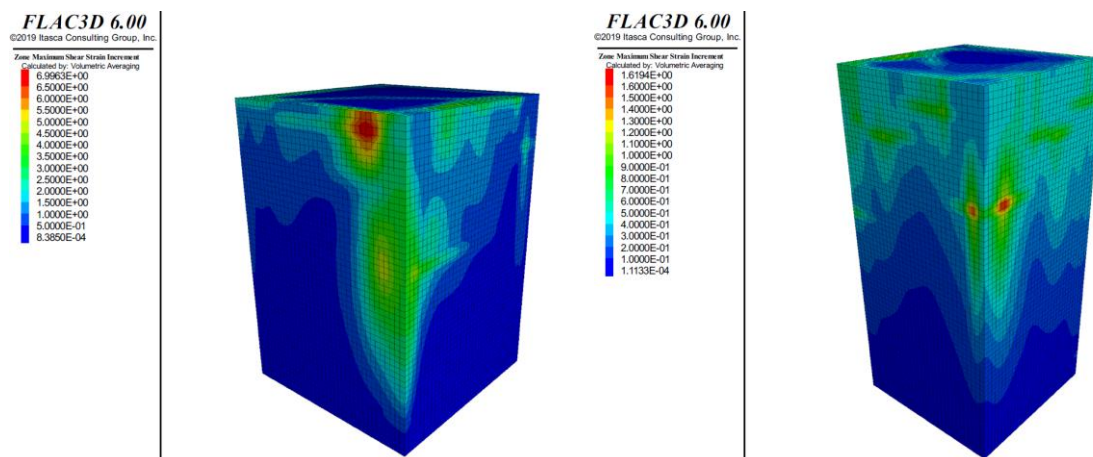


Figura 100 – Configurazioni della massima deformazione a taglio impostando il fattore di deformazione pari a 2. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce “north” e “west”).

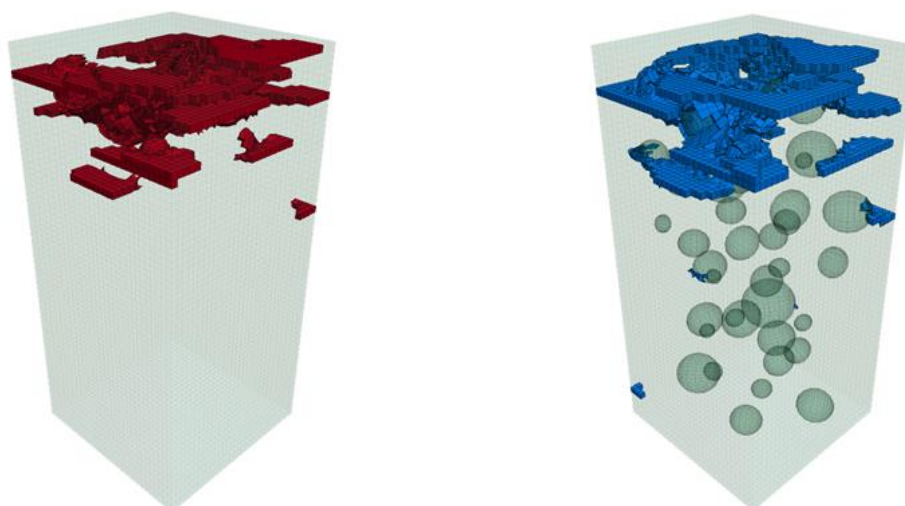


Figura 101 – Superficie di plasticizzazione. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7 (facce “south” e “east”).



Figura 102 – Risultato della prova di compressione monoassiale eseguita in laboratorio. A sinistra il provino 9 e a destra il provino 7.

5. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha riguardato la simulazione del comportamento di un bimrock, attraverso la modellazione tridimensionale di un provino eterogeneo ricavato da un campione di mélange prelevato in Italia, sottoposto ad una prova di compressione monoassiale. La modellazione delle formazioni complesse si basa su un approccio del continuo eterogeneo, in cui, alla matrice e ai blocchi, discretizzati separatamente, vengono assegnate le rispettive proprietà meccaniche.

Il primo step di analisi è stato quello della caratterizzazione della matrice, effettuata mediante una taratura basata sui risultati di prove sperimentali eseguite su due provini composti prevalentemente da matrice (provini 9 e 4G). I risultati forniti dalle prove evidenziano un campo di variabilità dei parametri, causato dalla difficoltosa caratterizzazione di questo materiale, il cui comportamento meccanico è legato alla complessità intrinseca dello stesso. Per questo motivo, considerando questa variabilità, è stata condotta una back analysis in riferimento alla resistenza a compressione e alla deformazione assiale corrispondente, al fine di avere una caratterizzazione completa della matrice, componente da assegnare successivamente, al provino 7. A dimostrazione della variabilità del materiale, i provini 9 e 4G, caratterizzati dalla sola matrice e da una geometria molto simile, hanno presentato risultati completamente diversi, come è possibile notare nel grafico in Figura 103 - Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7. I parametri meccanici della componente matrice da assegnare al provino eterogeneo sono quelli relativi al provino 9, che presenta una resistenza a compressione elevata (quindi più vicina a quella del provino 7) e una rigidezza leggermente minore, probabilmente a causa dell'assenza di blocchi e delle inclusioni di argilla sovraconsolidata.

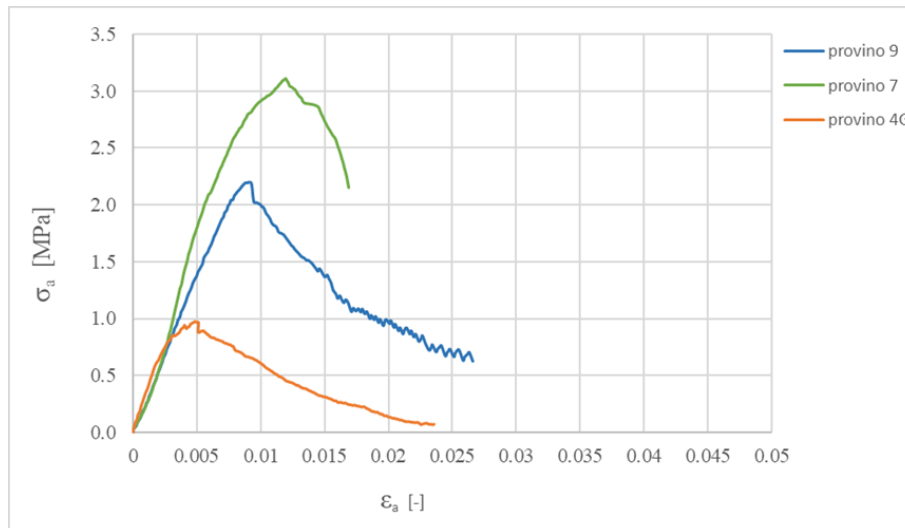


Figura 103 - Andamento del diagramma tensione – deformazione ricavato da prove sperimentali per i provini 4G, 9 e 7.

Infine, è stata modellata una prova di compressione monoassiale sul provino 7 (eterogeneo). Le proprietà meccaniche assegnate alla matrice sono il risultato della back analysis effettuata sul provino 9 mentre quelle assegnate ai blocchi calcarei, sono state dedotte tramite i suggerimenti del manuale di FLAC3D (Goodman, 1980).

La valutazione del comportamento del provino 7, sottoposto ad una prova di compressione monoassiale, si è articolata in due diversi livelli di analisi. In una prima fase, l'analisi tridimensionale è stata svolta assegnando le proprietà alla matrice e ai blocchi senza modellare le interfacce. Successivamente, sono state inserite delle interfacce tra i blocchi e la matrice. Al termine dell'analisi numerica, svolta con e senza la modellazione delle interfacce, il grafico tensione – deformazione fornito in output da FLAC3D, mostra che, il valore della resistenza a compressione e della deformazione assiale corrispondono, coincidono con quello ricavato sperimentalmente e analiticamente per la componente della matrice che è stata assegnata al provino 7.

Il risultato ottenuto rispecchia quanto presente in letteratura, per cui una percentuale volumetrica di blocchi così bassa ($VBP = 4.9\%$), inferiore al limite minimo suggerito pari al $20 - 25\%$, non determina un incremento di resistenza a compressione del materiale. Sulla base dell'interpretazione sperimentale del provino 7, in cui era stata evidenziata la presenza di inclusioni di argilla sovraconsolidata, che nel modello non sono state inserite poiché non sono quantificabili, è possibile attribuire l'aumento di resistenza a queste inclusioni. La

presenza di queste, infatti, non è assolutamente irrilevante, anzi, influenza complessivamente il risultato finale.

Nel risultato complessivo, l'inserimento delle interfacce tra i blocchi e la matrice, sembra non influenzare la resistenza finale del provino. Analizzando nel dettaglio le interfacce, si sono riscontrate delle aree in cui si nota un distaccamento del materiale, probabilmente sollecitato a trazione durante l'esecuzione della prova. Mentre, in termini di scivolamento a taglio si nota che per la maggior parte delle interfacce non avviene alcuno svincolo e solo per una piccola aliquota di queste, risulta avvenuto. Le interfacce sono quelle zone in cui dovrebbe avvenire proprio il fenomeno di propagazione dell'instabilità dovuta alla frattura, queste si possono interpretare come delle superfici che avvolgono, nel caso in esame, i blocchi calcarei. Tra questi contatti è possibile che avvenga qualche reazione chimica che tende ad aumentare la solidarietà tra i blocchi e la matrice, definendo un comportamento diverso, per esempio di tipo fragile.

Mettendo a confronto sia il provino analizzato mediante il FLAC3D che quello analizzato sperimentalmente, si nota che in entrambi i casi la superficie di plasticizzazione si sviluppa nella parte superiore del provino, in cui sono presenti le massime deformazioni a taglio. La superficie di rottura visibile nel provino reale presenta delle fratture che seguono la tortuosità dei blocchi propagandosi attorno ad essi. Questo aspetto viene evidenziato anche dal modello numerico, in cui le superfici di plasticizzazione che si creano all'interno del provino, tendono a svilupparsi tra i blocchi, senza mai attraversarli. Questo fenomeno conferma i dati trovati in letteratura, per cui la superficie che collega i blocchi con la matrice argillosa è un piano di debolezza e influisce sulle proprietà meccaniche del materiale.

Bibliografia

Afifipour, M., Moarefvand, P., 2014 Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*

Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., 2006 *Analisi numeriche della stabilità di un versante in bimrock*. Proceedings of Incontro annuale dei ricercatori di Geotecnica. IARG 2006, Pisa, 2006.

Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., 2008 *Three-Dimensional Finite Element Simulations of Compression Tests on Bimrock*. In: Proceedings of the 12th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.

Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., 2012 *Numerical simulations of Compressive Tests on Bimrock*. *EJGE*, vol. 15, 3397- 3399.

Burghignoli, A., 1985. *Lezioni di meccanica delle terre*, Roma, Edizioni Scientifiche Associate.

Button, E., Riedmueller, G., Schubert, W., Medley, E., 2003. *Tunneling in tectonic Mèlanges: Accomodating the Impacts of Geomechanical Complexities and Anisotropic Rock Mass Fabrics*, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, March 2003.

Cerise, M., 2019. *Caratterizzazione meccanica di una formazione Complessa*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2019.

Cowan, D., 1985 Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the Wester Cordillera of North Americq. *Geological Society of America Bullettin*, January 1985.

Festa, A., Pini, G.A., Dilek, Y., Codegone, G., 2010 *Mélanges and mélange-forming processes: a historical overview and new concepts*. *International Geology Review*. Vol. 52, Nos. 10–12, October–December 2010, 1040–1105.

Festa, A., Pini, G.A., Ortaga, K., Dilek, Y., Codegone, G., 2015 Late Oligocene-early Miocene olistostromes (sedimentary mélanges) as tecno-stratigraphic constraints to the geodynamic evolution of the exhumed Ligurian accretionary complex (Northern Apennines, NW Italy). *International Geology Review*, 57, 540-562.

Gabrielli, E., Colla, C., 2013 La tecnica della correlazione digitale di immagini per il monitoraggio di provini di muratura sottoposti a prove meccaniche. DISTART Department; University of Bologna, Bologna, Italy.

Goodman, R.E., Ahlgren, C.S., 2000 *Evaluating the safety of a concrete gravity dam on weak rock-Scott Dam*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Itasca Consulting Group, 2017 Advanced Grid Generation for Engineers and Scientists Griddle and BlockRanger User's Guide.

Itasca Consulting Group, 2017 FLAC3D 6.0 Theory and background.

Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., 2014 *An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils*. Engineering geology A. 2014, vol. 183.

Lancellotta R., 2012 *Geotecnica*, quarta edizione, Bologna, Zanichelli.

Lindquist, E., 1994 *The Strength and Deformation Properties of Melange*. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

Lindquist, E. S., Goodman, R. E., 1994 *Strength and deformation properties of a physical model mélanges*. 1st North American Rock Mechanics Symposium, 1-3 June, Austin, Texas.

Mandelbrot, B.B., 1983 *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman and Co, New York, 468.

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.

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.

Medley, E., 1999 Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. Felsbau, 17, 152-162.

Medley, E., 2001 *Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges*. Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 19.

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.

Medley, E., Sanz Rehermann, P.F. 2004 *Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixtures) with Application to Slope Stability Problems*. Proceedings Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium Salzburg, Austria October 2004.

Medley, E., 2007a *Bimrocks Article-Part 1: Introduction*. Newsletter of HSSMGE, No. 7, February 2007.

Medley, E., 2007b *Bimrocks Article-Part 2: Case Histories and Practical Guidelines*. Newsletter of HSSMGE, No. 8, April 2007.

Napoli, M.L., Barbero, M., Ravera, E., Scavia, C., 2018 *A stochastic approach to slope stability analysis in bimrock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.

Pan, Y.W., M.H. Hsieh, M.H., Liao, J.J., 2008 *Mechanical Properties of virtual block-in-matrix colluvium*. In: Proceedings of ARMA 2008, American Rock Mechanics Association, 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Francisco, USA, ARMA08-51.

Panini, F., Fiorini, C., Fregni, P., Bonacci, M., 2002. Le rocce caotiche dell'Oltrepò Pavese: Note illustrative della Carta Geologica dell'Appennino vogherese tra Borgo Priolo e Ruino. In: Atti Ticinensi Di Scienza Della Terra, v. 43, 83-109.

Picarelli, L., 1986 Caratterizzazione geotecnica dei terreni strutturalmente complessi nei problemi di stabilità dei pendii. Atti XVI Convegno Nazionale Geotecnica, Napoli.

Raymond, L.A., 1984 *Classification of melanges*. In Raymond L.A., Melanges: Their nature, origin and significance. Geological Society of America Special Paper, 198, 7-20.

Sonmez, H., Geokceoglu, C., Tuncay, E., Medley, E., 2004. Relationships Between Volumetric Block Proportions and Overall UCS of a Volcanic Bimrock, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5.

Sonmez, H., Kasapoglu, K.E., Coskun, A., Tunusluglu, C., Medley, E.W., Zimmerman, R.W., 2009 *A conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks*. In ISRM Regional Symposium, Rock Engineering in Difficult Ground Condition, Soft Rock and Karst, Dubrovnik, Croatia.

Tsiambaos, G., 2010 *Engineering Geological Behaviour of heterogeneous and chaotic rock masses*. Bulletin of the Geological Society of Greece, XLIII, 183 – 195. 10.12681/bgsg.11173.

Volpe, R.L., Ahlgren, C.S., Goodman, R.E., 1991 *Selection of engineering properties for geologically variable foundations*. In: Proceedings of the 17th International Congress on Large Dams, Paris, 1991.

Allegato 1

Coordinate nelle tre dimensioni (x, y, z), risultato del codice di calcolo MATLAB su sfere di diametro pari alla massima dimensione degli ellissoidi.

| Numero blocchi | x | y | z | Numero Blocchi | x | y | z |
|-------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|
| 1 | 26.0 | 9.4 | 33.2 | 21 | 23.1 | 13.6 | 63.5 |
| 2 | 9.5 | 12.9 | 57.6 | 22 | 6.3 | 11.7 | 34.9 |
| 3 | 12.3 | 6.4 | 13.1 | 23 | 5.7 | 21.1 | 37.6 |
| 4 | 26.8 | 26.8 | 42.8 | 24 | 23.4 | 20.0 | 16.7 |
| 5 | 13.0 | 16.4 | 20.1 | 25 | 15.3 | 25.3 | 37.3 |
| 6 | 26.4 | 17.5 | 55.1 | 26 | 5.0 | 5.5 | 52.5 |
| 7 | 4.9 | 26.4 | 30.0 | 27 | 12.7 | 16.6 | 46.9 |
| 8 | 26.6 | 21.9 | 4.7 | 28 | 24.5 | 11.9 | 43.2 |
| 9 | 20.0 | 20.6 | 42.9 | 29 | 5.2 | 26.2 | 50.0 |
| 10 | 17.1 | 9.3 | 50.5 | 30 | 4.6 | 22.8 | 12.8 |
| 11 | 24.1 | 13.6 | 23.3 | 31 | 6.4 | 15.0 | 4.8 |
| 12 | 18.4 | 25.4 | 58.7 | 32 | 14.3 | 24.8 | 27.8 |
| 13 | 14.5 | 25.2 | 6.2 | 33 | 11.9 | 22.9 | 64.1 |
| 14 | 12.1 | 8.6 | 23.5 | 34 | 27.0 | 7.2 | 18.2 |
| 15 | 4.3 | 11.6 | 46.2 | 35 | 24.1 | 5.1 | 57.3 |
| 16 | 18.8 | 16.8 | 30.5 | 36 | 18.5 | 27.2 | 16.5 |
| 17 | 20.4 | 10.2 | 4.8 | 37 | 5.8 | 14.4 | 14.7 |
| 18 | 6.9 | 5.6 | 62.9 | 38 | 6.8 | 5.1 | 41.3 |
| 19 | 18.5 | 4.5 | 38.6 | 39 | 17.4 | 26.6 | 48.9 |
| 20 | 26.8 | 23.9 | 34.6 | 40 | 6.2 | 16.1 | 26.2 |

Tabella con i valori in mm corrispondenti al semiasse maggiore (a), semiasse minore (b) e al semiasse minore (d) lungo la terza dimensione.

| Numero | a | b | d | Numero | a | b | d |
|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| blocchi | [mm] | [mm] | [mm] | blocchi | [mm] | [mm] | [mm] |
| 1 | 4.25 | 3.80 | 3.80 | 21 | 2.75 | 2.46 | 2.46 |
| 2 | 4.25 | 3.80 | 3.80 | 22 | 2.75 | 2.46 | 2.46 |
| 3 | 4 | 3.57 | 3.57 | 23 | 2.75 | 2.46 | 2.46 |
| 4 | 4 | 3.57 | 3.57 | 24 | 2.5 | 2.23 | 2.23 |
| 5 | 3.75 | 3.35 | 3.35 | 25 | 2.5 | 2.23 | 2.23 |
| 6 | 3.75 | 3.35 | 3.35 | 26 | 2.5 | 2.23 | 2.23 |
| 7 | 3.5 | 3.13 | 3.13 | 27 | 2.25 | 2.01 | 2.01 |
| 8 | 3.5 | 3.13 | 3.13 | 28 | 2.25 | 2.01 | 2.01 |
| 9 | 3.5 | 3.13 | 3.13 | 29 | 2.25 | 2.01 | 2.01 |
| 10 | 3.5 | 3.13 | 3.13 | 30 | 2 | 1.79 | 1.79 |
| 11 | 3.25 | 2.90 | 2.90 | 31 | 2 | 1.79 | 1.79 |
| 12 | 3.25 | 2.90 | 2.90 | 32 | 2 | 1.79 | 1.79 |
| 13 | 3.25 | 2.90 | 2.90 | 33 | 2 | 1.79 | 1.79 |
| 14 | 3.25 | 2.90 | 2.90 | 34 | 1.75 | 1.56 | 1.56 |
| 15 | 3 | 2.68 | 2.68 | 35 | 1.75 | 1.56 | 1.56 |
| 16 | 3 | 2.68 | 2.68 | 36 | 1.75 | 1.56 | 1.56 |
| 17 | 3 | 2.68 | 2.68 | 37 | 1.5 | 1.34 | 1.34 |
| 18 | 3 | 2.68 | 2.68 | 38 | 1.5 | 1.34 | 1.34 |
| 19 | 2.75 | 2.46 | 2.46 | 39 | 1.5 | 1.34 | 1.34 |
| 20 | 2.75 | 2.46 | 2.46 | 40 | 1.5 | 1.34 | 1.34 |

Valori degli angoli di rollio e beccheggio estratti in maniera casuale.

| Numero | α | β | Numero | α | β |
|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| blocchi | [°] | [°] | blocchi | [°] | [°] |
| 1 | 36 | 44 | 21 | 66 | 62 |
| 2 | 26 | 0 | 22 | 38 | 7 |
| 3 | 49 | 54 | 23 | 45 | 5 |
| 4 | 85 | 89 | 24 | 71 | 30 |
| 5 | 38 | 60 | 25 | 6 | 5 |
| 6 | 70 | 9 | 26 | 17 | 13 |
| 7 | 36 | 5 | 27 | 50 | 5 |
| 8 | 59 | 42 | 28 | 28 | 56 |
| 9 | 18 | 35 | 29 | 35 | 80 |
| 10 | 56 | 75 | 30 | 62 | 30 |
| 11 | 59 | 84 | 31 | 1 | 77 |
| 12 | 59 | 24 | 32 | 41 | 17 |
| 13 | 72 | 9 | 33 | 38 | 41 |
| 14 | 54 | 37 | 34 | 31 | 48 |
| 15 | 83 | 15 | 35 | 6 | 88 |
| 16 | 45 | 78 | 36 | 59 | 45 |
| 17 | 26 | 28 | 37 | 26 | 39 |
| 18 | 53 | 73 | 38 | 88 | 88 |
| 19 | 89 | 30 | 39 | 37 | 45 |
| 20 | 70 | 85 | 40 | 3 | 31 |

Allegato 2

File .dat FLAC3D riferito al provino 9 con legge elastica perfettamente plastica.

```
model new
```

```
zone import "GVol_1mm.f3grid" use-given-ids
```

```
zone select true group "1=ZG_001" only by zone
```

```
zone group "matrice" slot "Default" range selected
```

```
zone face skin
```

```
;Constitutive Model and Properties
```

```
zone cmodel assign mohr-coulomb
```

```
zone property young 0.25e6 poisson 0.3 friction 36 dilation 0 cohesion 560 density  
2.1e6 range group 'matrice'
```

```
; Boundary Conditions
```

```
zone face apply velocity-normal -1e-8 range group "Top"
```

```
zone face apply velocity-normal 0 range group "Bottom"
```

```
zone face apply velocity-x 0 range group 'Bottom'
```

```
zone face apply velocity-y 0 range group 'Bottom'
```

```
[global zpnt1 = gp.near(0.0185,0.0185,0)]
```

```
[global zpnt2 = gp.near(0.0185,0.0185,0.054)]
```

```
zone gridpoint initialize extra 1 0
```

```
zone gridpoint initialize extra 2 0
```

```
fish define stress
```

```
    local f_accum = 0.0
```

```
    loop foreach local gp gp.list
```

```
        if gp.pos.z(gp) > 0.0 then
```

```

        gp.extra(gp,1) = gp.pos.x(gp)

        gp.extra(gp,2) = gp.pos.z(gp)

        f_accum = f_accum + gp.force.unbal.z(gp)

    end_if

end_loop

stress = f_accum / 0.001369

end

fish define strain

    strain = (gp.disp.z(zpnt1) - gp.disp.z(zpnt2)) / 0.054

end

model history mechanical unbalanced-maximum

fish history @stress

fish history @strain;

model cycle 60000

model save 'C9H_C2,55_E4,1'

return

```

File .dat FLAC3D riferito al provino 4G con legge elastica perfettamente plastica.

```
model new
```

```
zone import "GVol_4G_1mm.f3grid" use-given-ids
```

```
zone select true group "1=ZG_001" only by zone
```

```
zone group "matrice" slot "Default" range selected
```

```
zone face skin
```

```
;Constitutive Model and Properties
```

```
zone cmodel assign mohr-coulomb
```

```
zone property young 0.24e6 poisson 0.3 friction 29 dilation 0 cohesion 289 density  
2.1e6 range group 'matrice'
```

```
; Boundary Conditions
```

```
zone face apply velocity-normal -1e-8 range group "Top"
```

```
zone face apply velocity-normal 0 range group "Bottom"
```

```
zone face apply velocity-x 0 range group 'Bottom'
```

```
zone face apply velocity-y 0 range group 'Bottom'
```

```
[global zpnt1 = gp.near(0.017,0.017,0)]
```

```
[global zpnt2 = gp.near(0.017,0.017,0.054)]
```

```
zone gridpoint initialize extra 1 0
```

```
zone gridpoint initialize extra 2 0
```

```
fish define stress
```

```
    local f_accum = 0.0
```

```
    loop foreach local gp gp.list
```

```
        if gp.pos.z(gp) > 0.0 then
```

```
            gp.extra(gp,1) = gp.pos.x(gp)
```

```

        gp.extra(gp,2) = gp.pos.z(gp)

        f_accum = f_accum + gp.force.unbal.z(gp)

    end_if

end_loop

stress = f_accum / 0.001156

end

fish define strain

    strain = (gp.disp.z(zpnt1) - gp.disp.z(zpnt2)) / 0.054

end

model history mechanical unbalanced-maximum

fish history @stress

fish history @strain;

model cycle 25000

model save 'C4G_C5_F5_E4'

return

```

File .dat FLAC3D riferito al provino 9 con legge elasto – plastica rammollente.

model new

zone import "GVol_1mm.f3grid" use-given-ids

zone select true group "1=ZG_001" only by zone

zone group "matrice" slot "Default" range selected

zone face skin

;Constitutive Model and Properties

zone cmodel assign strain-softening

zone property young 0.25e6 poisson 0.3 friction 36 dilation 0 cohesion 560 density
2.1e6 range group 'matrice'

zone property table-friction 'fri' table-cohesion 'coh'

table 'fri' add (0, 36) (.05, 35) (.1, 35) (.3, 30)(.6, 24)(1, 16)

table 'coh' add (0, 560) (.05, 348) (.1, 252) (.3, 90)(.6, 26)(1, 6)

; Boundary Conditions

zone face apply velocity-normal -1e-8 range group "Top"

zone face apply velocity-normal 0 range group "Bottom"

zone face apply velocity-x 0 range group 'Bottom'

zone face apply velocity-y 0 range group 'Bottom'

[global zpnt1 = gp.near(0.0185,0.0185,0)]

[global zpnt2 = gp.near(0.0185,0.0185,0.054)]

zone gridpoint initialize extra 1 0

zone gridpoint initialize extra 2 0

fish define stress

```

local f_accum = 0.0

loop foreach local gp gp.list

    if gp.pos.z(gp) > 0.0 then

        gp.extra(gp,1) = gp.pos.x(gp)

        gp.extra(gp,2) = gp.pos.z(gp)

        f_accum = f_accum + gp.force.unbal.z(gp)

    end_if

end_loop

stress = f_accum / 0.001369

end

fish define strain

    strain = (gp.disp.z(zpnt1) - gp.disp.z(zpnt2)) / 0.054

end

model history mechanical unbalanced-maximum

fish history @stress

fish history @strain;

model cycle 150000

fish define TagPlasticZones

    loop foreach local zp zone.list

        if zone.prop(zp,'strain-shear-plastic') > 2e-1

            zone.group(zp) = 'Yield'

        end_if

    end_loop

end_fish

```

```

        else

            zone.group(zp) = 'Other'

        endif

    endloop

end

```

```
@TagPlasticZones
```

```
model save 'Yield'
```

```
return
```

File .dat FLAC3D riferito al provino 7 con legge elasto – plastica rammollente per la matrice (provino 9)

```
model new
```

```
zone import "GVolCampione7.f3grid" use-given-ids
```

```
zone select true group "1=ZG_001" only by zone
```

```
zone group "matrice" slot "Default" range selected
```

```
zone hide range selected
```

```
zone select off
```

```
zone select
```

```
zone group "blocchi" slot "Default" range selected
```

```
zone hide off range use-hidden
```

```
zone select off range use-hidden
```

```
zone select true group "Default=matrice" and "1=ZG_001" only by zone
```

```
zone face skin
```

```
; Separate zones, and create two interfaces
```

```
zone separate by-face new-side group 'Interface' range group 'matrice' group 'blocchi'
```


zone interface 1 create by-face range group 'Interface' group 'blocchi'

;Constitutive Model and Properties

zone cmodel assign strain-softening

zone property young 0.25e6 poisson 0.3 friction 36 dilation 0 cohesion 560 density
2.1e6 range group 'matrice'

zone property table-friction 'fri' table-cohesion 'coh'

table 'fri' add (0, 36) (.05, 36) (.1, 36) (.3, 36) (.6, 36) (1, 36)

table 'coh' add (0, 560) (.05, 430) (.1, 359) (.3, 203) (.6, 102) (1, 46)

zone cmodel assign strain-softening range group 'blocchi'

zone property young 28.5e6 poisson 0.29 friction 55 cohesion 6720 range group
'blocchi'

zone property table-friction 'fri' table-cohesion 'coh'

table 'fri' add (0, 55) (.05, 55) (.1, 55) (.3, 55) (.6, 55) (1, 55)

table 'coh' add (0, 6720) (.05, 6720) (.1, 6720) (.3, 6720) (.6, 6720) (1, 6720)

zone interface 1 node property stiffness-normal 285e6 stiffness-shear 285e6 cohesion 560
friction 50

; Boundary Conditions

zone face apply velocity-normal -1e-8 range group "Top"

zone face apply velocity-normal 0 range group "Bottom"

zone face apply velocity-x 0 range group 'Bottom'

zone face apply velocity-y 0 range group 'Bottom'

[global zpnt1 = gp.near(0.0161,0.0161,0)]

[global zpnt2 = gp.near(0.0161,0.0161,0.0689)]

zone gridpoint initialize extra 1 0

zone gridpoint initialize extra 2 0

fish define stress

local f_accum = 0.0

loop foreach local gp gp.list

if gp.pos.z(gp) > 0.0 then

gp.extra(gp,1) = gp.pos.x(gp)

gp.extra(gp,2) = gp.pos.z(gp)

f_accum = f_accum + gp.force.unbal.z(gp)

end_if

end_loop

stress = f_accum / 0.00103684

end

fish define strain

strain = (gp.disp.z(zpnt1) - gp.disp.z(zpnt2)) / 0.0689

end

model history mechanical unbalanced-maximum

fish history @stress

fish history @strain;

model cycle 90000

fish define TagPlasticZones

```
loop foreach local zp zone.list

  if zone.prop(zp,'strain-shear-plastic') > 5e-2

    zone.group(zp) = 'Yield'

  else

    zone.group(zp) = 'Other'

  endif

endloop

end

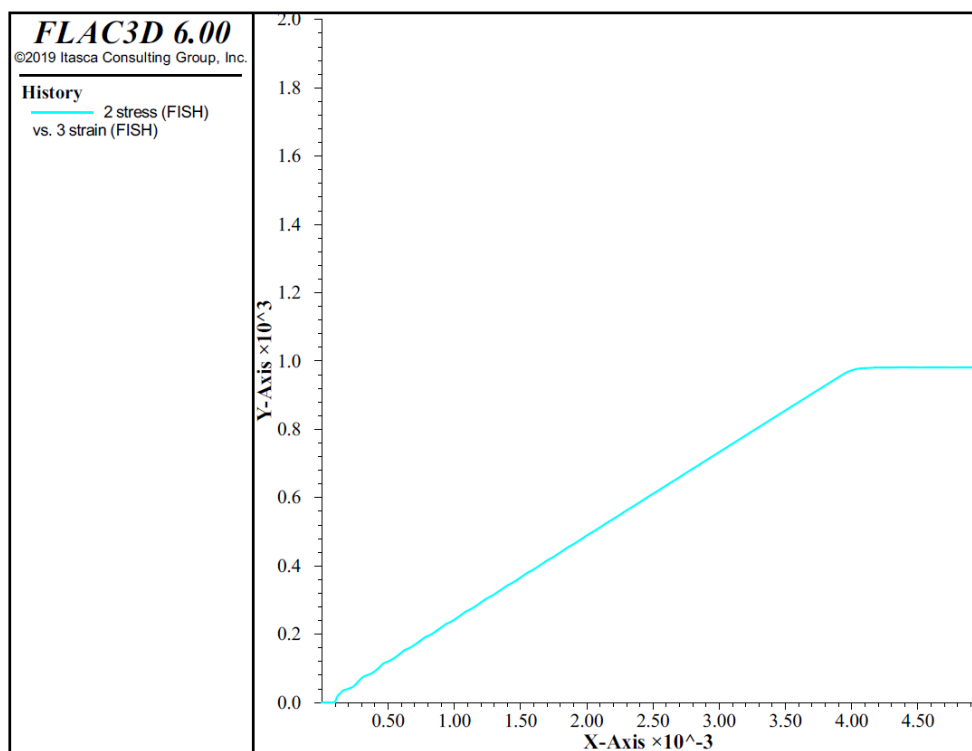
@TagPlasticZones

model save 'C7_soft_intll_50'

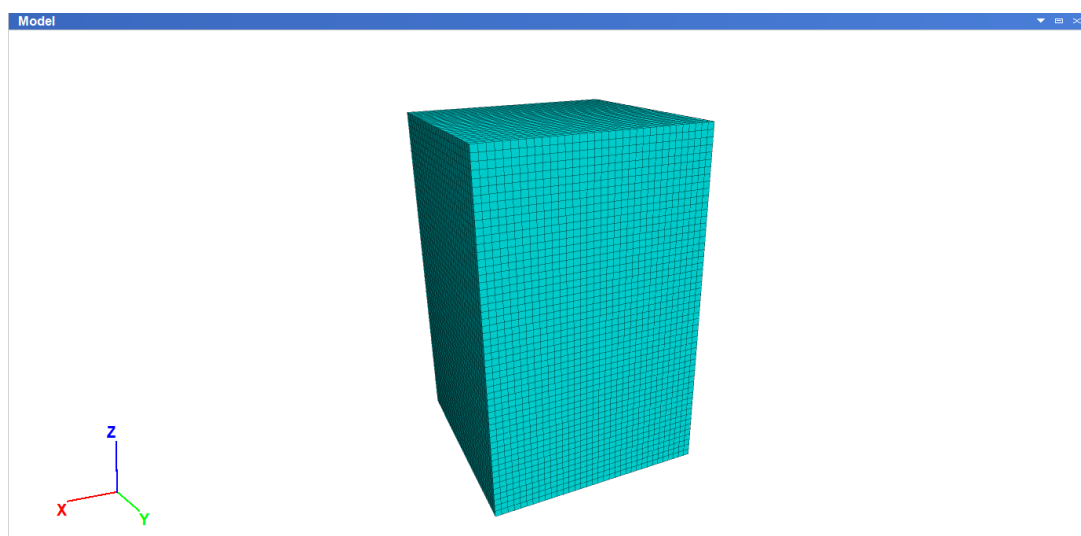
return.
```

Allegato 3

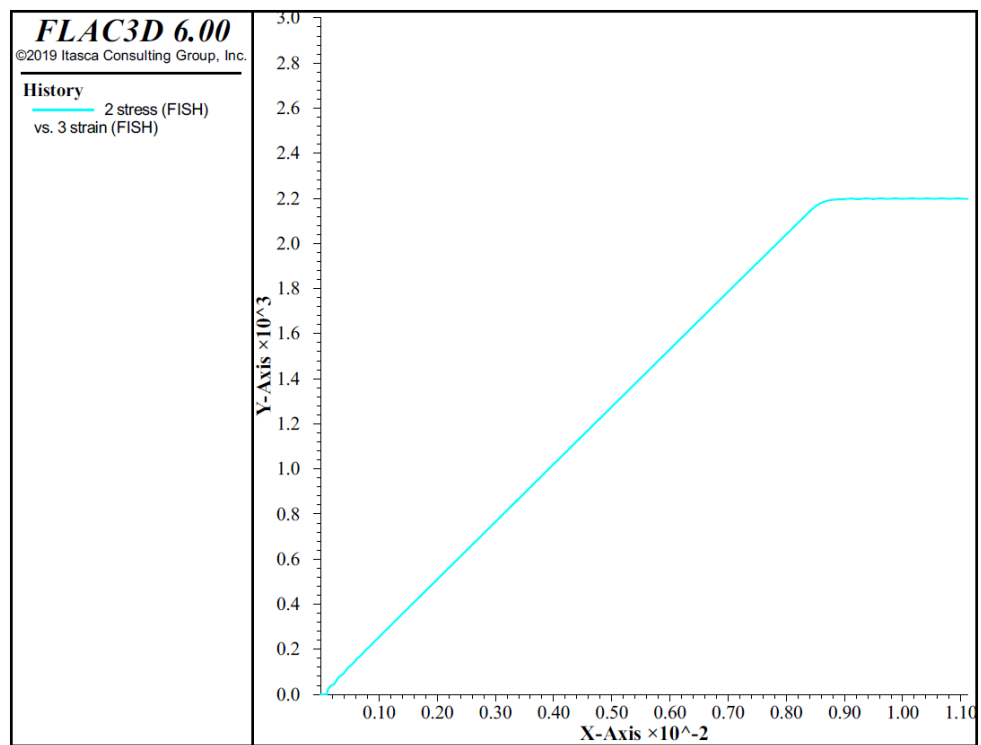
Output in termini di diagramma tensioni – deformazioni per il provino 4G (FLAC3D)



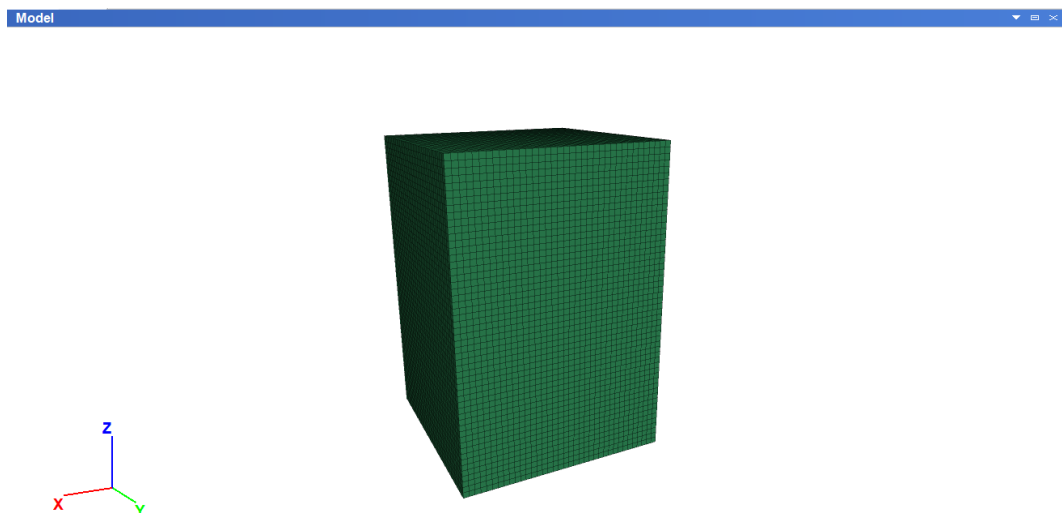
Visualizzazione provino 4G (FLAC3D)



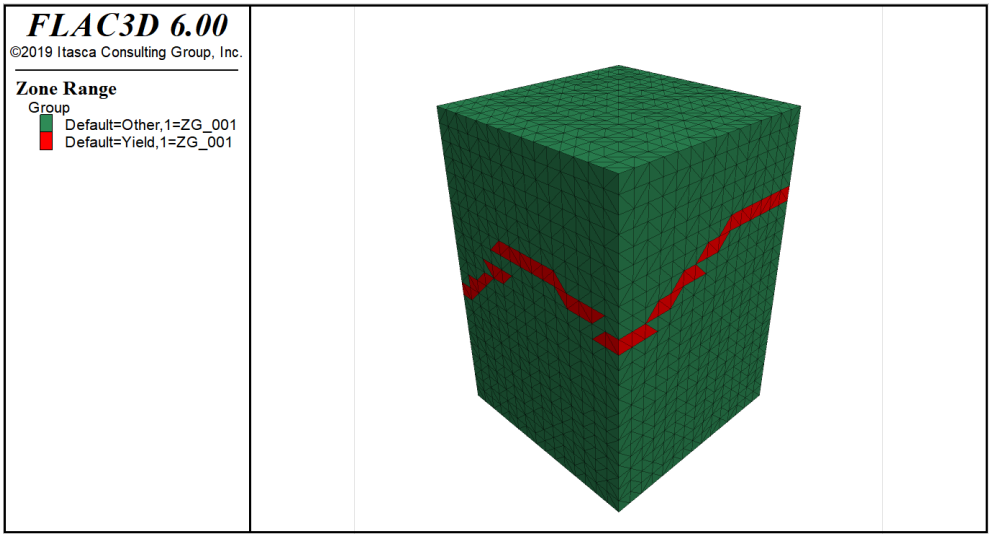
Output in termini di diagramma tensioni – deformazioni per il provino 9 (FLAC3D)



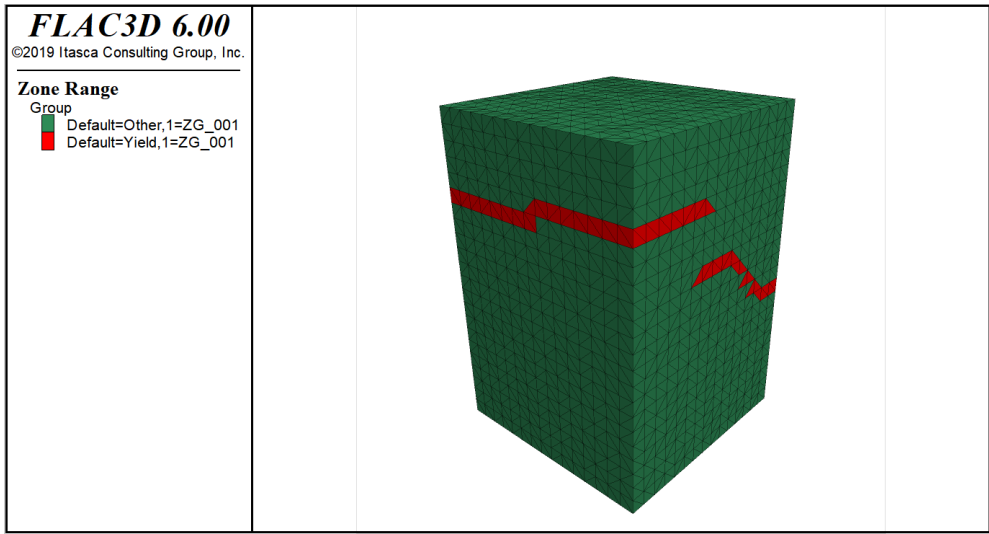
Visualizzazione provino 9 (FLAC3D)



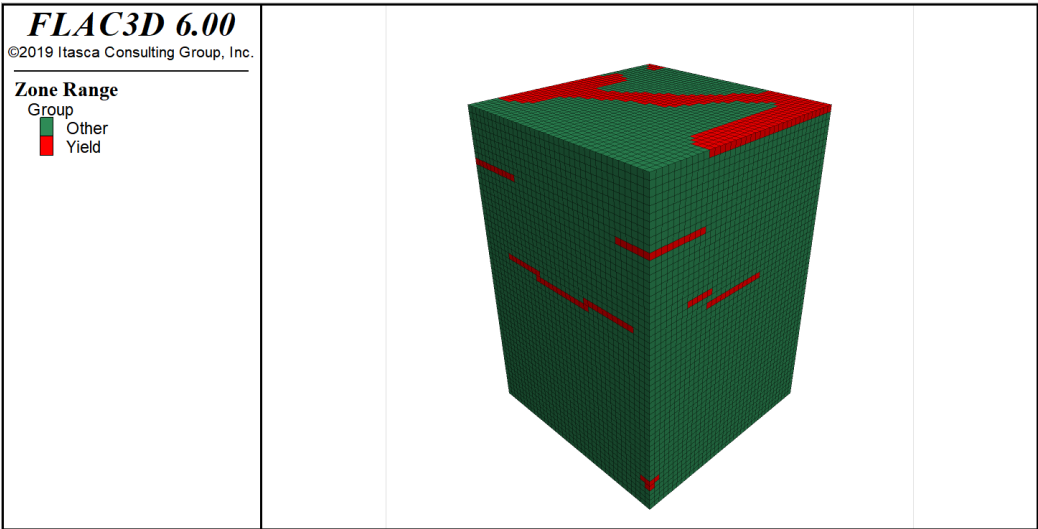
Provino 9 con mesh a 2.5 mm, zone plastiche "Yield" (facce "south" e "east")



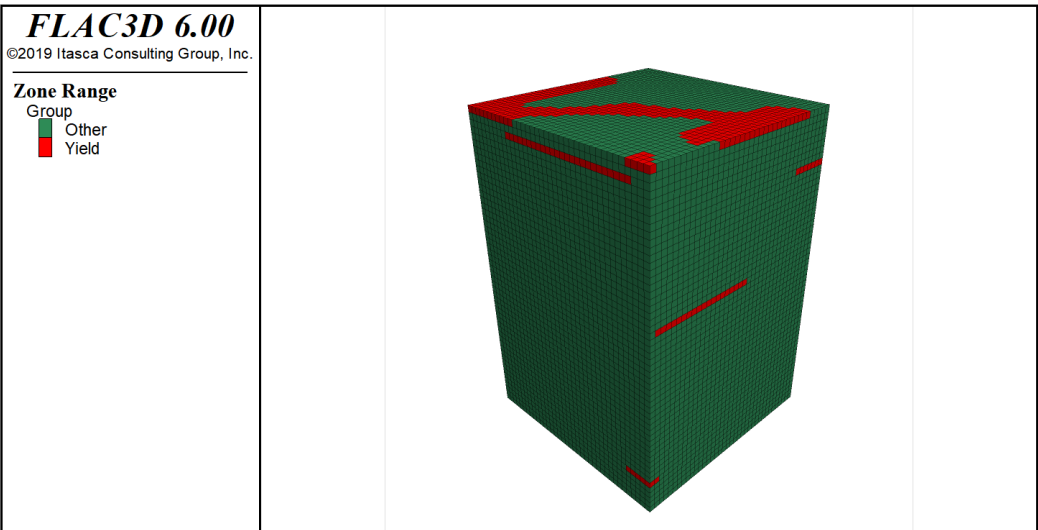
Provino 9 con mesh ad 2.5 mm, zone plastiche "Yield" (facce "north" e "west")



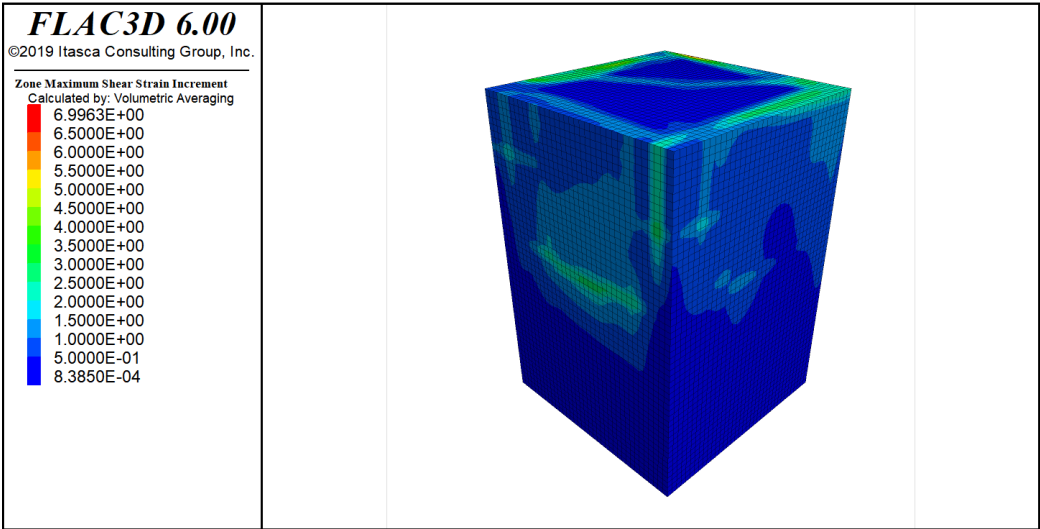
Provino 9 con mesh ad 1 mm, zone plastiche "Yield" (facce "south" e "east")



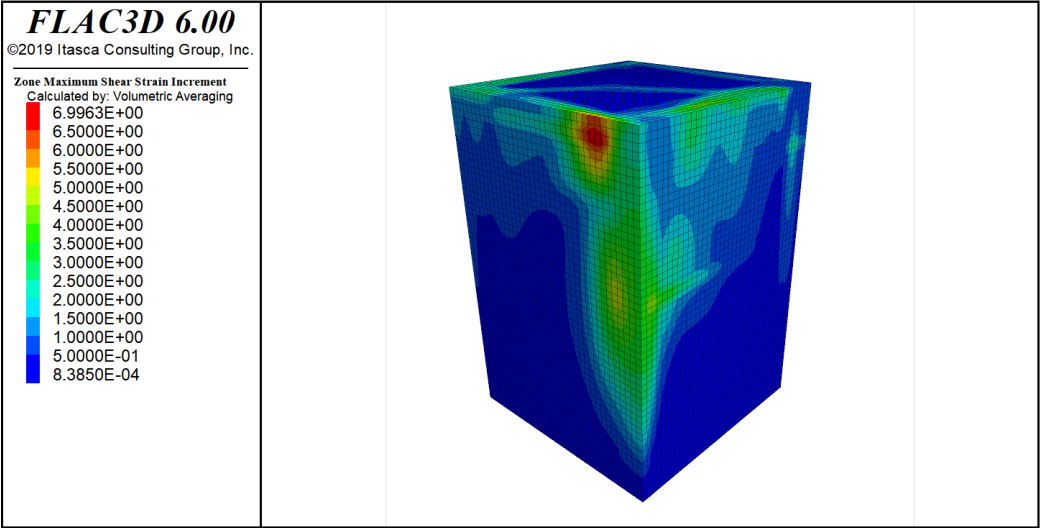
Provino 9 con mesh ad 1 mm, zone plastiche "Yield" (facce "north" e "west")



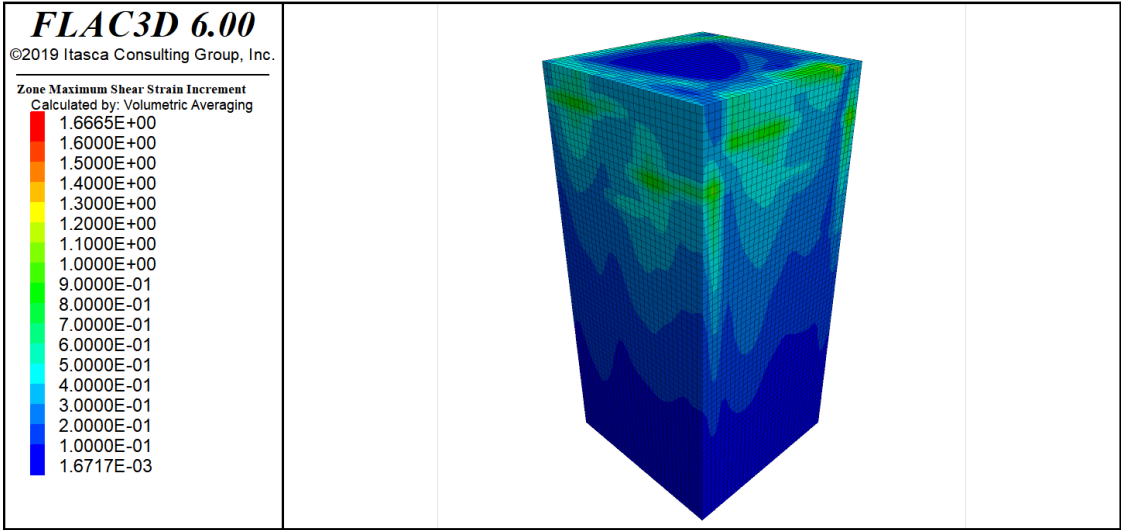
Provino 9 con mesh ad 1 mm, massime deformazioni a taglio (facce "south" e "east")



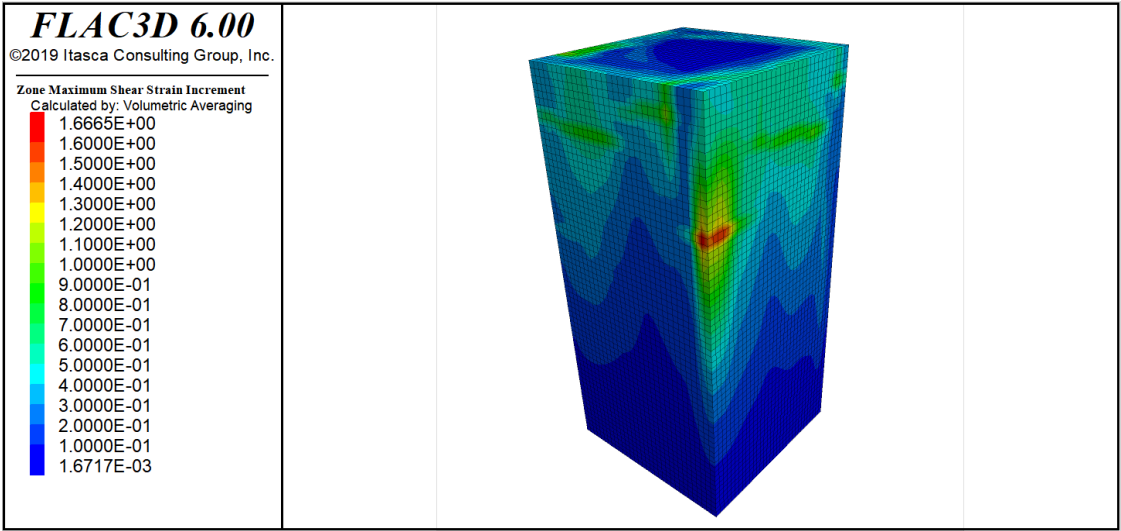
Provino 9 con mesh ad 1 mm, massime deformazioni a taglio (facce "north" e "west")



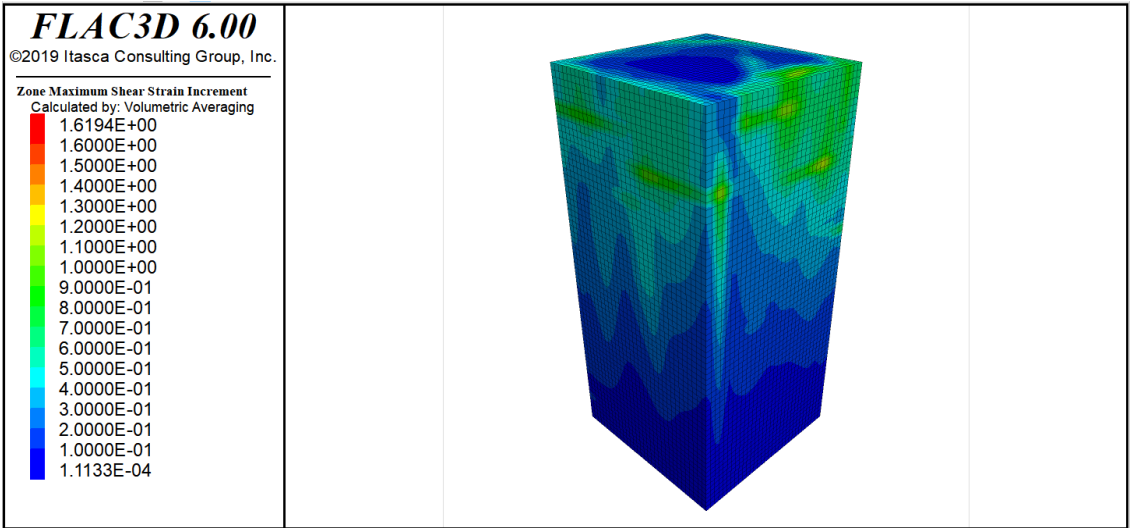
Provino 7 con mesh ad 1 mm senza interfacce, massime deformazioni a taglio (facce "south" e "east")



Provino 7 con mesh ad 1 mm senza interfacce, massime deformazioni a taglio (facce "north" e "west")



Provino 7 con mesh ad 1 mm con interfacce, massime deformazioni a taglio (facce "south" e "east")



Provino 7 con mesh ad 1 mm con interfacce, massime deformazioni a taglio (facce "north" e "west")

