Politecnico di Torino

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

## Analisi di scavi in sotterraneo in formazioni complesse



**Relatori:** 

Prof.ssa Monica Barbero

Ing. Maria Lia Napoli

**Candidato:** 

Paolo Dadone

Dicembre 2018

## Ringraziamenti

Giunto alla conclusione di questo percorso, porgo i miei più sentiti ringraziamenti all'istituzione Politecnico di Torino ed ai docenti che mi hanno accompagnato durante il corso di studi, contribuendo alla mia crescita personale ed alle mie conoscenze.

Un particolare ringraziamento va alla Prof.ssa Monica Barbero e all'Ing. Maria Lia Napoli, che mi hanno permesso di realizzare questo lavoro di tesi, con preziosi aiuti e grande disponibilità, facendo crescere in me la curiosità riguardo specifiche criticità dell'Ingegneria Geotecnica, come quelle riguardanti i materiali geologicamente complessi.

Gran parte del merito per il raggiungimento di questo importante traguardo va ai miei genitori, che con i loro sacrifici mi hanno sostenuto durante tutto il mio cammino.

A Gabriella, per aver condiviso con me l'ansia per ciascun esame che un percorso di laurea impegnativo come questo presenta, e per avermi insegnato che nella vita posso raggiungere qualsiasi meta con impegno, Fede e Fiducia: la mia tesi la dedico a lei.

Alla mia caparbietà, tenacia e buona volontà.

## Indice

| RING | RAZIAMENTI  | I            |
|------|---|--------------|
| INTR | DDUZIONE  | V            |
| 1. G | ENERALITÀ SULLE FORMAZIONI COMPLESSE  | 1            |
| 1.1  | Mèlange del Franciscan Complex  | 6            |
| 1.   | 1.1 Aspetti conoscitivi di un mèlange   | 9            |
| 1.   | 1.2 Possibile genesi di un mèlange  | 10           |
| 2 C. | ARATTERISTICHE DEI BIMROCKS   | 12           |
| 2.1  | ASPETTI DI IDENTIFICAZIONE  | 14           |
| 2.   | 1.1 Riconoscimento di un bimrock  | 14           |
| 2.   | 1.2 Posizione di un bimrock nel dominio di riferimento                          | 17           |
| 2.   | 1.3 Metodi di estrazione del materiale in sito: sondaggio geognostico           | 19           |
| 2.2  | DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA   | 20           |
| 2    | 2.1 Indipendenza dalla scala di osservazione e proprietà della distribuzi<br>24 | one frattale |
| 2    | 2.2 Dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico                 | 29           |
| 2    | 2.3 Distribuzione e stima della percentuale volumetrica (VBP)                   |              |
| 2    | 2.4 Modelli di Lindquist e Medley   |              |
|      | 2.2.4.1 Esame del modello fisico di Medley                                      | 37           |
|      | 2.2.4.2 Esame del modello fisico di Lindquist                                   | 41           |
| 3 Pl | ROPRIETÀ MECCANICHE E STATO DELL'ARTE   | 46           |
| 3.1  | ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI ROTTURA   | 48           |
| 3.2  | CARATTERIZZAZIONE MECCANICA: ANALISI DI LABORATORIO, METODI N                   | UMERICI E    |
| PROV | /E IN SITU  | 54           |

| 3.3 METODI EMPIRICI EQUIVALENTI PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA  |                          |
|--|--------------------------|
| MECCANICA  | 64                       |
| 3.3.1 Criterio di resistenza empirico di Lindquist (1994)  | 65                       |
| 3.3.2 Criterio di resistenza empirico di Sonmez et al. (2006)  | 67                       |
| 3.3.3 Criterio di resistenza empirico di Kalender et al. (2014)  | 70                       |
| 3.4 LINEE GUIDA E CASI STUDIO  | 75                       |
| 3.4.1 Analisi delle caratteristiche di un pendio   | 75                       |
| 3.4.2 Analisi all'equilibrio limite  | 76                       |
| 3.4.2.1 Analisi mediante metodi numerici   | 80                       |
| 3.4.3 Parametri di resistenza del Franciscan Mèlange alla base della fondazion   | ne                       |
| della diga Scott   | 85                       |
| 3.4.4 Stima della VBP durante uno scavo  | 87                       |
| 4 ANALISI DI UNO SCAVO IN UN AMMASSO COMPLESSO BIMROCK   | •                        |
| STRUTTURAZIONE DEL MODELLO   | 89                       |
|  |                          |
| 4.1 METODI NUMERICI PER LA VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA DI UN AMMASSO  | 01                       |
|  | 91                       |
| 4.2 IMPLEMETANZIONE DELL'APPROCCIO STOCASTICO CON IL CODICE MATLAB<br>4.2 MODELL AZIONE DUDI EDICA DI DOCCOUDICE $\mathbf{PS}^2$ | 93                       |
| 4.5 MODELLAZIONE NUMERICA IN ROCSCIENCE RS <sup>-</sup>  | 98                       |
| 4.5.1 Impostazioni iniziari suita modellazione   | 90                       |
| 4.3.1.1 Geometria di analisi   | 99                       |
| 4.3.1.2 Numero di stages, discretizzazione e creazione della Mesn  | 99                       |
| 4313 Boundary Condition  | 100                      |
| 4.2.1.4 Demonstri reconnection and distanti di comica  | 102                      |
| 4.3.1.4 Parametri meccanici e condizioni di carico   | 102                      |
| 4.3.1.4       Parametri meccanici e condizioni di carico         4.3.2       Metodo delle curve caratteristiche                  | 102<br>105               |
| <ul> <li>4.3.1.4 Parametri meccanici e condizioni di carico</li></ul>  | 102<br><i>105</i>        |
| <ul> <li>4.3.1.4 Parametri meccanici e condizioni di carico</li></ul>  | 102<br>105               |
| <ul> <li>4.3.1.9 Doundary Condition</li> <li>4.3.1.4 Parametri meccanici e condizioni di carico</li></ul>                        | 102<br>105<br>108<br>110 |

| Spost  | tamenti registrati  |     |
|--------|---|-----|
| 5.3    | ANALISI CON VBP = $40\%$  | 121 |
| Spost  | tamenti registrati  |     |
| 5.4    | ANALISI CON VBP = 55%   |     |
| Spost  | tamenti registrati  |     |
| 5.5    | ANALISI CON VBP = $70\%$  |     |
| Spost  | tamenti registrati  |     |
| 5.6    | INFLUENZA DELLA $\operatorname{VBP}$ SULLA CONVERGENZA DEL TUNNEL | 145 |
| Pie    | dritto destro   | 146 |
| Pie    | edritto sinistro  | 147 |
| Ca     | lotta   |     |
| 5.7    | ANALISI MEDIANTE APPROCCI OMOGENEI EQUIVALENTI                    |     |
| 5.7.1  | Approccio di Lindquist (1994)                                     |     |
| 5.7.2  | Approccio di Sonmez et al. (2006)                                 |     |
| 5.7.3  | Approccio di Kaleder et al. (2014)                                |     |
| 5.7.4  | Confronti con le analisi stocastiche                              |     |
| CONCLU | USIONI  |     |
| INDICE | DELLE FIGURE  |     |
| INDICE | DELLE TABELLE   |     |
| BIBLIO | GRAFIA  | 191 |
| ALLEGA | АТО А   |     |
| ALLEGA | АТО В   |     |
| ALLEGA | <b>ATO</b> C  | 227 |

## Introduzione

Con la definizione di "formazioni complesse" si definiscono quelle unità geologiche caratterizzate da una natura eterogenea e caotica. Una particolare tipologia di queste formazioni sono i "bimrock", costituiti da clasti rocciosi competenti immersi all'interno di una matrice di tessitura fine, avente resistenza meccanica scadente, secondo la definizione dettata da Medley (1994). I bimrock manifestano la propria presenza a scala globale, generando problematiche legate alla loro definizione durante le fasi progettuali e realizzative di opere ingegneristiche, rendendo pertanto necessaria un'adeguata e specifica caratterizzazione geometrica e meccanica di questi materiali, in modo da poter ridurre le problematiche tecniche ed economiche che le legano ai consolidati metodi di scavo di opere in sotterraneo.

Nella presente trattazione si approfondisce lo studio riguardante la risposta geomeccanica di un bimrock, facendo riferimento alla realizzazione di una galleria circolare del diametro di 10 metri. Basandosi su di un approccio di analisi di tipo statistico secondo il Metodo di Monte Carlo, si valuta l'influenza della distribuzione dimensionale, basata su di un 'estrazione casuale legata alla distribuzione che caratterizza il *Franciscan Mèlange*, e di un posizionamento delle inclusioni rocciose competenti, sempre casuale, sui fenomeni di convergenza durante la realizzazione dello scavo. Le analisi numeriche vengono svolte avvalendosi del programma di calcolo agli elementi finiti Phase<sup>2</sup> (Rocscience Inc.). Per ogni percentuale volumetrica dei blocchi tenuta in considerazione (25%, 40%, 55%, 70%) si definiscono 10 differenti simulazioni delle condizioni teoriche in situ, basate su forme ellittiche delle inclusioni con un valore di eccentricità e = 0.5. Tutti i risultati ottenuti dalle analisi numeriche vengono confrontati con la soluzione riguardante la sola presenza della matrice, in quanto nell'Ingegneria Geotecnica spesso si assume che il comportamento globale del materiale sia solamente dipendente dalla stessa, trascurando le inclusioni rocciose competenti presenti e, di conseguenza, la natura eterogenea del complesso.

Le analisi numeriche effettuate sui differenti domini di scavo delineano un decremento dei valori di convergenza del tunnel realizzato per i modelli che presentano le inclusioni disposte secondo il procedimento statistico, e per elevate percentuali volumetriche delle stesse (VBP), mentre per bassi valori di VBP il contributo di resistenza che il materiale è in grado di offrire risulta ridotto ed estremamente variabile. La rottura all'interno del mezzo avviene attraverso un riscontrabile andamento tortuoso a livello della matrice, mentre le inclusioni non sono interessate dal raggiungimento delle loro condizioni meccaniche ultime. Generalmente, all'aumentare della VBP si riduce il grado di convergenza associato al detensionamento a causa dello scavo, poiché il maggior numero di inclusioni ostacola la redistribuzione dello stato di sollecitazione indotto e la plasticizzazione del materiale.

Gli approcci omogenei equivalenti nel caso della realizzazione della galleria oggetto di studio non risultano sufficientemente consoni alla previsione dell'andamento delle convergenze all'aumentare della VBP, a differenza del comportamento osservato per i modelli eterogenei realizzati secondo estrazioni statistiche.

### 1. Generalità sulle formazioni complesse

Mediante la terminologia "Ammassi Rocciosi Strutturalmente Complessi" vengono definiti, secondo una classificazione geotecnica e meccanica, tutte le formazioni geologici che risultano essere complicate dal punto di vista della caratterizzazione e definizione dei loro parametri di resistenza, con notevoli problematiche legate alla creazione di un modello meccanico ben definito (A.G.I, 1979; Meherhof, 1982; Houska, 1982; Picarelli, 1986). Tali formazioni complesse non possono essere dunque descritte secondo le usuali tecniche utilizzate dalla Meccanica delle Rocce e dei Terreni, creando problemi di analisi durante la fase di investigazione geotecnica. Il modello meccanico e, di conseguenza, lo studio di una determinata formazione complessa, è strettamente connesso ad una corretta ed esaustiva valutazione delle proprietà dei litotipi principali riscontrati durante la fase di analisi, con opportuna rappresentazione dei parametri dell'intero ammasso (Coli et al, 2010). La scelta del corretto modello geotecnico da utilizzare per le analisi, inoltre, risulta essere fortemente influenzata dalla possibile variazione degli stessi parametri meccanici individuati all'interno dell'ammasso, poiché essi sono strettamente collegati alla singola componente geologica ed alla loro disposizione nel dominio considerato. L'Associazione Geotecnica Italiana, nel 1979, ha cercato di definire in maniera esaustiva una classificazione da utilizzare durante l'analisi preliminare delle formazioni complesse, con particolare attenzione a quelle caratterizzate da litologie di arenarie-peliti o calcare-peliti, basandosi in prima battuta sul rapporto arenaria-calcare/pelite e sulla complessità della struttura, dovuta sostanzialmente alla diagenesi, deformazioni di tipo tettonico e differente competenza tra le tre differenti litologie.

In *Figura 1-1* vengono riportate le prescrizioni connesse alle identificazioni di una formazione complessa, facendo riferimento a quanto espresso dall'A.G.I:

- scisti stratificati con e senza piani di taglio (*A*);
- rocce deboli e dure internamente stratificate, con strutture geometricamente caotiche o con lieve disarrangiamento dei clasti (*B*);
- misti caotici di blocchi esposti in matrice argillosa (C) (Manfredini et al., 1985; D'Elia et al., 1986).



Figura 1-1 Classificazione delle Formazioni Complesse secondo A.G.I [A.G.I 1979].

Generalmente, in Italia, ammassi di struttura complessa sono le formazioni torbiditiche (*Figura 1-2*), che risultano essere molto diffuse nell'Appennino Settentrionale.



Figura 1-2 Successione torbiditica strutturalmente Complessa, definibile B1 secondo la classificazione A.G.I [1979].

Le deformazioni tettoniche possono dare origine a delle porzioni di ammasso strutturalmente complesso: le elevate deformazioni di taglio a cui sono soggette queste zone portano ad una netta modifica dell'ammasso stesso, con conseguente struttura caotica coesistente con gli elementi sedimentari preesistenti. Riferendosi a quanto appena enunciato, una struttura complessa di questo tipo si riscontra quando si ha una forte presenza di componente pelitica all'interno di un flyschoide: in questa situazione, la pelite è costituita da argillite o argilla, in grado di potersi presentare attraverso una particolare struttura a scaglie, che in termini geologici viene definita foliazione (Morgesten & Eigenbrod, 1974).

Si capisce come una semplice classificazione di tipo geologico non sia completamente esaustiva per poter effettuare dunque un'adeguata indagine preliminare sul comportamento che può essere riscontrato durante la realizzazione di un'opera ingegneristica. Infatti, per poter identificare la risposta geotecnica di una formazione complessa di tipo flyschoide, si è delineata una classificazione tipica della Meccanica delle Rocce, che fa riferimento all'indice *GSI* (Marinos & Hoek, 2001 e Hoek et al., 2005), riportata in *Figura 1-3*: tuttavia è necessario

esprimere come il sistema di classificazione, basato su questo indice, non risulti essere esauriente per poter classificare ed identificare in maniera univoca i parametri meccanici e geotecnici di una formazione di questo tipo, poiché la forte dipendenza spaziale del problema porta ad un'ampia possibile variazione dei parametri di resistenza. Tale metodologia può essere pertanto utilizzata durante un'analisi preliminare, nella quale si cerca di comprendere in maniera globale il possibile comportamento di un ammasso sottoposto ad un certo stato di sollecitazione.



Figura 1-3 Classificazione mediante indice GSI per ammassi rocciosi complessi [Hoek et al., 2005]: GC-3 matrice dominante, GC-1 blocchi persistenti.

In natura esistono molteplici tipologie di formazioni complesse, tra di esse una notevole rilevanza è assunta dai bimrock. Questo termine è stato introdotto ed utilizzato per la prima volta da Medley nel 1994 (Medley, 1994), che cercò di identificare dal punto di vista ingegneristico e geomeccanico queste formazioni, definendole "<u>a mixture of rocks,</u> <u>composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture</u>": la definizione indica infatti la presenza di blocchi di materiale roccioso competente, circondati

da una matrice di tessitura fine, che presenta delle proprietà meccaniche di gran lunga inferiori rispetto a quelle connesse ai blocchi. La loro grande diffusione implica infatti un notevole studio nei confronti dei problemi di ingegneria civile che interessano il territorio e la sua difesa: entrano in gioco dei parametri fondamentali come la distribuzione dimensionale dei blocchi, la loro orientazione e percentuale volumetrica all'interno della regione considerata, la struttura blocco matrice, la resistenza della loro zona di contatto e la resistenza della matrice stessa (Medley, 1994).



Figura 1-4 Franciscan Complex mèlange San Bruno Mt., South San Francisco [Medley, 1989].

I principali studiosi delle formazioni complesse sono stati E. Medley ed E. S. Lindquist, esponenti dell'Università di Berkeley, in California, i quali hanno concentrato le loro ricerche sulla determinazione e valutazione del comportamento geotecnico di ammassi rocciosi complessi, identificati secondo la terminologia *Mèlanges* and *Similar block-in-matrix rocks* (*Bimrocks*).

### 1.1 Mèlange del Franciscan Complex

E.Medley, ricercatore presso l'Università di Berkley, ha effettuato una mappatura su scala globale delle formazioni complesse blocco-in-matrice, concentrando la propria attenzione sui mèlanges e sugli ofioliti della California. Facendo riferimento alla *Figura 1-5*, è possibile riscontrare che le formazioni esaminate risultino appartenere a delle zone di contatto tra differenti placche tettoniche.



Figura 1-5 Geolocalizzazione su scala globale dei Mèlange e degli Ofioliti [Medley, 1994].

Una dimostrazione di ciò è il *Franciscan Complex*: esso si colloca nel territorio californiano per più di un terzo di esso. La sua morfologia permette di inquadrare questo complesso secondo tre differenti fasce: *Coastal Belt, Central (Mèlange) Belt* e *l'Eastern (Metamorphic or Yolla Bolly) Belt*. Le tre fasce sono riconoscibili attraverso la litologia ed i fenomeni di metamorfismo presenti, dovuti ad una divisione di tipo tettonico. La presenza di una zona di subduzione porta ad un incremento graduale del grado di metamorfismo associato all'ammasso, da Ovest verso Est:



Figura 1-6 Deposito di mèlanges in Sierra Nevada [Medley, 2007].

1. <u>Coastal Belt</u>: composta principalmente da arenaria e scisti di origine sedimentaria e blocchi sotto forma di strati in tufo, che vengono definiti dall'autore come "broken formation";

2. <u>Central Belt</u>: composta da rocce metamorfiche, che risultano provenire da una zona di subduzione situata a 10 km di profondità, che sono riconducibili a selce, serpentinite, calcare, bluscisti, amfibolite ed eclogite, combinate con blocchi di tufo, grovacca e metagrovacca;

3. <u>*Eastern Belt*</u>: composta sostanzialmente da arenaria dura, lawsonite con micascisti, glaucophane con rocce vulcaniche.

Medley (2001) ha confermato che la litologia dei materiali coinvolti è pertanto estremamente variabile, con una percentuale di materiale grovacca compresa tra il 60% ed il 70%, materiale vulcanico tra il 15% ed il 20%, serpentinite tra il 15% ed il 20%, selce tra il 5% ed il 10%.



Figura 1-7 Distribuzione geografica del Franciscan Mèlange, nell'area di San Francisco Bay [Medley, 1994].

Alcuni geologi sostenevano che l'origine del Franciscan Complex fosse legata alla convergenza delle placche tettoniche, cercando di descrivere in questo modo la presenza di una zona di subduzione tra la placca oceanica e quella continentale collegata al Nord America. Altri studiosi, invece, identificavano questo materiale come non strettamente legato a dei fenomeni di subduzione. Quest'ultimi, ipotizzavano la presenza nella litologia della zona di masse con pezzatura discontinua (*terranes*), appartenenti a frammenti della crosta oceanica trasportati dal movimento della placca oceanica-pacifica. Concordando con questa definizione, alcuni geologi interpretano la presenza di tali blocchi nella *Central Belt* e nella *Eastern Belt* come "*sub-terranes*", che presentano un ulteriore grado di frammentazione ed un'intercalazione all'interno di una matrice fine (*Figura 1-7*). Tale definizione risulta essere congruente con quanto espresso dallo studio effettuato da Medley su questa particolare tipologia di formazione complessa.

#### 1.1.1 Aspetti conoscitivi di un mèlange

Il termine Mèlange fu utilizzato per la prima volta da Greenly (1919), basandosi sull'osservazione, analisi, mappatura geologica di rocce presenti in Galles, incluse in una matrice scistosa. Greenly sosteneva che la matrice risultasse essere il prodotto di particolari meccanismi di taglio all'interno dell'ammasso, dovuti a movimenti tipici di una zona tettonica. Basandosi sulla raccolta dei dati effettuata da Greenly, Shackleton (1954, 1969), Wood (1974) e Wood e Schiuster (1974), hanno ipotizzato l'origine di tipo sedimentaria del mèlange del Galles, contrastando dunque la tesi sull'origine di tipo tettonico. Questa definizione risultava essere però solamente adeguata nell'andare a descrivere il comportamento del mèlange su scala locale, essendo quindi non adatto per una definizione su scala globale. Successivamente, le caratteristiche di queste formazioni furono identificate da Bayley e McCallien (1950, 1953, 1961, 1963), Gansser (1955) e Hsu (1966, 1968, 1969), i quali sostennero che esse fossero appartenenti ad un congruo meccanismo di deposizione, di natura di tipo frammentario e di mancanza di continuità reciproca, specialmente basandosi sui dati raccolti da specifici fori di sondaggio, che andavano ad evidenziare una mancanza di contatto primario, spiegando in tal modo la presenza di blocchi di caratteristiche meccaniche consistenti immersi all'interno di una matrice debole dal punto di vista geotecnico. Altre teorie sono state identificate come rappresentative per la descrizione di un mèlange: Raymond (1975) definisce questa formazione come mappabile secondo una particolare scala, precisamente 1:24.000 od inferiore, dove attraverso un metodo di tipo osservazionale è possibile definire le proprietà di questa litologia, che ha dei ben precisi paletti fondamentali che ne delineano il possibile comportamento: mancanza di un grado di continuità interna nella porzione di ammasso considerato; inclusione di blocchi di differenti dimensioni, che a piccola scala possono essere ricondotti a frammenti; inclusione degli stessi blocchi all'interno di una matrice caratterizzata da un netto grado di alterazione, frammentazione, definibile pertanto come materiale fine del complesso sotto esame.

#### 1.1.2 Possibile genesi di un mèlange

Riferendosi a quanto già enunciato in precedenza, la natura fortemente caotica di questi materiali è principalmente collegata ai fenomeni di convergenza delle placche tettoniche. Greenly (1919), primo studioso a dare il nome mèlanges a queste particolari formazioni, sosteneva che questi derivassero da particolari meccanismi di taglio, dovuti a processi geologici di natura tettonica. Basandosi sullo studio dei dati raccolti sul mèlange del Galles, Shackleton (1954, 1969), Wood (1974) e Wood e Schiuter (1974) hanno supposto che l'origine dei mèlanges fosse legata a feonomeni di sedimentazione dei materiali provenienti dalla crosta oceanica, identificati con il nome di olistotromi: questi però, a differenza dei mèlanges tettonici, non presentavano nella globalità della loro formazione dei blocchi di diversa natura, aventi la proprietà di essere ad elevato grado metamorfico, secondo la definizione dettata da Hsu (1974). Secondo Bosworth (1989), il mèlange poteva essere definito sulla base della sua tessitura interna, mentre Cowan (1985) aveva proposto un criterio per la classificazione, sostenendo che la maggior parte dei mèlanges si erano formati dalla combinazione di processi olistostromici, tettonici o diapirici, entrambi processi genetici di difficile riconoscimento.



Figura 1-8 Meccanismo di convergenza tettonica atto alla formazione del Franciscan Mèlange [Chinese Science Bulletin, 2013].

Come evidenziato in Figura 1-8, a causa delle zone di subduzione della placca oceanica rispetto a quella continentale, le superfici di sedimentazione potevano essere inglobate in una zona di "accrescimento", formatasi insieme ai sedimenti sottoposti ad uno stato di ulteriore sollecitazione dovuto alle spinte di compressione e faglie estensionali secondarie. La compressione aveva provocato l'insorgere di alte pressioni nel cuneo considerato, costituito da sedimenti che si mobilitavano verso la superficie, attraverso processi diapirici, ascendenti medianti canali di flusso (Cloos, 1994; Orange et al., 1993; Brown and Orange, 1993). Cloos (1984) sosteneva che la formazione della sedimentazione fluida aveva causato il distacco di xenoliti dai depositi superficiali e dalle rocce metamorfiche in profondità, come i bluscisti. Quest'ultimi erano stati successivamente inglobati dal flusso sovrastante, ad una profondità indicativa di circa 10-35 km. I blocchi così soggetti a questa azione di metamorfismo, erano così incorporati in diapiri di serpentinite e rocce vulcaniche (Fryer, 1992; Moor and others, 1992). Mediante tali ipotesi, si stimava che circa il 25% dei blocchi di Franciscan Mèlange provenisse da montagne sottomarine, con il 20% dell'ophiolite del Nord America Generata da montagne sottomarine ed altopiani. Cloos (1990) ipotizzava che le cime delle montagne sottomarine, aventi altezza superiore al km, si fossero staccate mentre la loro parte inferiore, a causa dei movimenti di subduzione, avesse subito un processo di deformazione in grado di renderle fortemente frammentate, in grado di accrescere il prima di accrescimento mostrato nella sottostante Figura 1-9.



Figura 1-9 Accrescimento del cuneo attivo (accrezione del prisma); [Elder & Gordon, 2001].

## 2 Caratteristiche dei Bimrocks

La prima terminologia utilizzata per descrivere il materiale sotto esame risulta essere quella di Raymond nel 1984, il quale adottò l'espressione "formazioni rocciose complesse a blocchi in matrice" per denotare la presenza di Mèlanges e Olistrostromi all'interno di un ammasso; successivamente Medley (1994) ha introdotto la definizione di "bimrock" per tali materiali.

I bimrocks (block-in-matrix) sono definiti come una "miscela" di rocce composta da blocchi con significative caratteristiche geotecniche, "annegati" all'interno di una matrice di tessitura fine che può essere ricondotta alla presenza di zone di faglia, ai mèlanges ed altri insiemi geologici di formazione complessa (Medley 1994). Non tenendo in considerazione il processo geologico di formazione, i bimrocks comuni sono caratterizzati in generale dalla presenza di un mix di blocchi di roccia circondati da una matrice di caratteristiche meccaniche inferiori. I blocchi sono definiti "significativi" dal punto di vista geotecnico, e questo sta dunque ad indicare il contrasto dal punto di vista meccanico rispetto alla matrice, identificabile mediante un valore di soglia del rapporto dei moduli di Young e del rapporto delle tangenti dell'angolo di attrito di base (*Capitolo 3*).

Allo stesso modo, per poter dichiarare veritiera la significatività di questi blocchi, risulta necessario definire un valore dimensionale di soglia che permette di decretare l'influenza che gli stessi hanno nella caratterizzazione meccanica dell'insieme considerato: tale soglia è definibile andando a considerare la dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico  $(L_c)$  (*Paragrafo 2.2.2*), definibile come la dimensione del problema ingegneristico che risulta essere rappresentativa del problema in esame (per esempio il diametro di una galleria durante il suo scavo, l'altezza di un pendio durante lo studio di stabilità di versante), che può variare da decine a centinaia di metri. In particolare Medley (1994), consiglia di considerare un intervallo di variazione dimensionale dei blocchi che va dal 25% al 75% della dimensione caratteristica-ingegneristica: per questo motivo, blocchi aventi una dimensione inferiore a

 $0.05 L_c$  vengono considerati come parte integrante della matrice, assumendo dunque differenti caratteristiche meccaniche; risulta intuitivo comprendere come la variabilità dimensionale dei clasti all'interno dell'ammasso considerato influisca notevolmente sulle caratteristiche di resistenza dell'intero materiale.

Necessario è quindi poter andare a delineare una soglia dimensionale di riferimento, o meglio definita soglia blocchi-matrice, al di sotto della quale i blocchi non influenzano il comportamento globale del materiale e sono per questo considerati appartenenti alla matrice stessa (Medley, 1994, 2001). In definitiva, i blocchi sono clasti rocciosi con dimensioni superiori rispetto alla soglia dimensionale blocchi-matrice.

Un altro parametro geometrico che interviene all'interno della classificazione risulta essere la dimensione massima osservabile del blocco, definita in letteratura come  $d_{mod}$ : in due o tre dimensioni essa è indicata come la distanza tra i due punti più lontani del perimetro esposto del blocco, non identificando dunque necessariamente l'asse maggiore dello stesso o la sua dimensione massima (*Paragrafo 2.2*).

Si capisce dunque come i caratteri dimensionali del materiale sotto esame vadano ad influenzare le caratteristiche di resistenza del volume di ammasso considerato; per tal motivo, in via progettuale risulta necessario conoscere in maniera il più dettagliata possibile queste dimensioni caratteristiche, per poter andare a costruire un modello geomeccanico che tenga in considerazione la complessità del problema. In passato, molti progettisti erano soliti trascurare il contributo positivo alla resistenza che i blocchi di caratteristiche meccaniche migliori erano in grado di offrire, modellando dunque il materiale come un continuo equivalente costituito solamente dalla presenza della matrice "debole"; tale metodologia di analisi e sviluppo di lavoro risulta spesso troppo conservativa e non sempre adeguata, specialmente per ammassi che presentano una dimensione dei blocchi maggiori: aumentando la dimensione caratteristica dei blocchi, aumenta la rigidezza e diminuisce la deformazione di un sistema blocchi-in-matrice (Lindquist, 1994; Lindquist & Goodman, 1994). La distribuzione dello stato tensionale all'interno dei bimrocks dipende inoltre dalla litologia, distribuzione dimensionale, orientamento e forma dei blocchi (Medley, Sanz, 2004).

#### 2.1 Aspetti di identificazione

Come precedentemente affermato, ignorare completamente la presenza di un bimrock all'interno di un ammasso è l'errore più comune commesso durante la fase progettuale. Considerando il fatto che queste formazioni eterogenee sono state riscontrate in più di 60 paesi a livello globale, si necessita di poter avere un'adeguata classificazione durante l'analisi preliminare, specialmente con la comprensione ottimale delle caratteristiche dell'ammasso roccioso durante la fase esplorativa e conoscitiva dello stesso. L'errata identificazione dei materiali che costituiscono l'ammasso non solo porta ad errate valutazioni del comportamento globale durante la progettazione, ma bensì in corso d'opera possono presentarsi problemi legati alle tecniche di realizzazione previste in fase progettuale, con conseguente aumento del costo di realizzazione.

Risulta pertanto utile basare la classificazione del materiale su metodologie di osservazione descritte dai principali artefici dello studio di tali unità geotecniche complesse, facendo riferimento a degli indicatori di origine geomorfologica-osservazionale del sito interessato da una futura opera ingegneristica.

#### 2.1.1 Riconoscimento di un bimrock

Il passo fondamentale per poter identificare in maniera corretta la presenza dei bimrocks all'interno di un ammasso è quello di richiedere la perizia di un geologo, in grado di redigere ed analizzare la carta geologica. Tipicamente, dall'analisi dei siti costituiti da mèlange, emerge la presenza di un andamento topografico che si potrebbe definire ondulato, il quale delinea degli affioramenti di blocchi in roccia che possono avere un differente grado di diffusione superficiale, legato prevalentemente alle caratteristiche intrinseche del deposito stesso. La definizione di andamento ondulato-irregolare della superficie topografica può non identificare in maniera univoca la presenza di una formazione complessa, in quanto questa potrebbe indicare la presenza di uno strato di argille coerenti o di unità di basalto. La matrice, nella maggior parte dei casi a litologia argillosa, è caratterizzata da una struttura a scaglie a causa della presenza di piani di foliazione o clivaggio che possono assumere, in alcuni casi, un'orientazione preferenziale nell'ammasso, determinando un ruolo fondamentale nel comportamento meccanico (Medley & Rehermann, 2004). Inoltre, essa risulta facilmente erodibile ed asportabile e, su pendii contraddistinti da marcata acclività, soggetta a movimenti franosi superficiali.



Figura 2-1 Caratteristiche di identificazione dei materiali strutturalmente complessi [Medley & Wakabayashi, 2004].

La geologia del sito in esame è in grado di evidenziare la presenza di litotipi di differente natura: in alcuni aree la presenza del bimrock può delineare la presenza di basalti e calcari in forma di deposito con affioramenti di arenaria e scisti, oppure la presenza di unità strutturali di arenaria, scisti o basalti contenuti all'interno di un deposito di serpentinite (Medley, Wakabayashi, 2004). La serpentinite, presa singolarmente, non è necessariamente un indicatore efficace e totale della presenza di una formazione complessa bimrock, ma allo stesso tempo risulta essere un monito dal punto di vista geologico riguardante la possibilità di trovare un ammasso caratterizzato dalla presenza di una formazione di questo tipo. A volte la presenza di un bimrock può essere descritta da una matrice di serpentinite dotata di caratteristiche meccaniche scadenti, disgregata, al cui interno sono contenuti blocchi di serpentinite massiva, ovviamente contraddistinti da migliori proprietà meccaniche. Particolare importanza assume la distinzione tra un bimrock ed un materiale colluviale: gli agenti atmosferici possono effettuare un'azione erosiva nei confronti del materiale complesso considerato, rendendolo del tutto simile ad un colluvio, specialmente se quest'ultimo si è formato da materiali che risultano avere delle caratteristiche non omogenee. Questa identificazione errata porta di conseguenza anche ad una non ideale individuazione delle caratteristiche meccaniche che entrano in gioco nella caratterizzazione dei parametri di resistenza del deposito: infatti il colluvio, per definizione, risulta essere individuato dalla presenza di uno strato più consistente che lo va a delimitare inferiormente, mentre allo stesso tempo la presenza di un bimrock non risulta essere confinata, poichè la caratteristica appena elencata andrebbe contro la definizione di bimrock stesso. Un bimrock che risulta essere definito a partire dalla presenza di una materiale colluviale, è caratterizzato da una foliazione che non presenta con continuità la stessa inclinazione, mentre la foliazione di un materiale blocco-in-matrice tende ad assumere indicativamente una direzione continua all'interno dell'intero deposito (Medley, Wakabayashi, 2004)

Tali indicazioni evidenziano come il comportamento di un ammasso sia fortemente influenzato dalla tipologia di operazione conoscitiva effettuata, in quanto le caratteristiche esaminate non potrebbero essere verificate in maniera adeguata se fossero solamente possibili estrazioni di campioni in fori: sarebbe infatti necessario, in via preliminare, sempre eseguire un'attività di osservazione e rilievo degli affioramenti del materiale, per poter giungere ad una buona classificazione e distinzione del bimrock da altri litotipi, valutando pertanto una corretta e possibile interazione tra il materiale e un'opera ingegneristica.

#### 2.1.2 Posizione di un bimrock nel dominio di riferimento

La morfologia del sito in esame è di estrema importanza per poter effettuare un'analisi preliminare delle caratteristiche del materiale: possiamo infatti contraddistinguere zone segnate da una bassa presenza di affioramenti di blocchi (come nel caso di versanti soggetti a fenomeni gravitativi), rispetto a zone con un maggior affioramento di blocchi, come gli argini fluviali, aspetto dovuto alla maggior resistenza all'erosione di questi elementi rispetto alla matrice. La vegetazione può anche incidere sull'identificazione, in quanto i blocchi di maggiori dimensioni possono essere sormontati dalla presenza di alberi, mentre la matrice è coperta da un semplice manto erboso.



Figura 2-2 Rilievo geologico in situ di una formazione bimrock [Medley, 2004].

Una volta identificati blocchi e matrice nel dominio di riferimento, il primo passo è quello di poter andare a valutare in via preliminare le caratteristiche intrinseche dell'affioramento, mediante alcune analisi direttamente in sito: con un semplice martello da geologo (*Figura 2-2*) è possibile verificare la differenza di caratteristiche meccaniche tra i blocchi e la stessa matrice, la tessitura di quest'ultima, la disposizione litologica dei blocchi e se essi siano o meno caratterizzati da un certo grado di discontinuità; quest'ultima caratteristica risulta essere fondamentale, in quanto se un blocco è costituito da un elevato numero di fratture, queste sicuramente incideranno negativamente sulle sue proprietà di resistenza meccanica per

fronteggiare le sollecitazioni esterne e, per questo motivo, le fratture stesse possono essere parti preferenziali di input nei confronti di movimenti futuri (considerando ad esempio il problema della stabilità di un pendio); inoltre, se la fratturazione del blocco è estremamente elevata, questo può essere "degradato" per ricoprire il ruolo di semplice matrice, assumendone le caratteristiche meccaniche.

Per lo studio di un deposito a blocchi-in-matrice si ha la necessità di effettuare un'adeguata mappatura, sia interna che esterna. Mediante la mappatura esterna, direttamente in sito è opportuno poter decretare la presenza di eventuali movimenti di fagliazione, le superfici di contatto tra differenti deposizioni geologiche; la superficie di contatto è definita in maniera approssimata considerando l'interpolazione di alcuni punti appartenenti alla zona stessa che delimitano il bimrock, individuati durante le operazioni di rilievo geologico. La mappatura eseguita può essere adeguata quando è in grado di definire con sufficiente precisione i contatti esterni del mèlange: con questa operazione si deve cercare di delimitare il contorno dei blocchi più grandi e fornire indicazioni sulla loro litologia e dimensione (Medley, Wakabayashi, 2004).

La mappatura deve anche essere eseguita sulla foliazione: questa risulta non essere differente rispetto ad una mappatura che avviene in unità di roccia metamorfica. Si necessita di questa operazione per poter mappare le differenti foliazioni in maniera adeguata, descrivendo la loro potenzialità nell' influire sull'anisotropia del deposito considerato. La mappatura sopra indicata risente anche di un certo effetto scala: considerando la dimensione di un singolo blocco, la foliazione può assumere un andamento che tende a circondare il blocco considerato, presentando dunque una forma non regolare; d'altro canto, facendo riferimento ad una scala più grande, si può notare come la foliazione dell'ammasso complesso tenda verso un andamento abbastanza uniforme, lungo una stessa direzione (Medley, Wakabayashi, 2004). Si capisce dunque come la scala di osservazione del problema risulti essere fondamentale per poter comprendere se il comportamento d'insieme del materiale possa essere considerato anisotropo o meno.

# 2.1.3 Metodi di estrazione del materiale in sito: sondaggio geognostico



Figura 2-3 Prodotto della perforazione di un foro di sondaggio in bimrock [Adam et al., 2012].

La tecnologia odiernamente più utilizzata per comprendere al meglio la composizione geomeccanica non visibile di un ammasso è quella del sondaggio geognostico, rilievo geologico eseguito dalla superficie. Attraverso questo sondaggio si possono ottenere delle informazioni riguardanti le proprietà fisiche, litologia, mineralogia, idrologia e caratteristiche strutturali dell'ammasso in relazione alla profondità di campionamento.

Nelle indagini in situ si cerca di ottenere e di determinare il posizionamento delle inclusioni rocciose nella formazione di interesse.

L'esecuzione dei fori di sondaggio permette di arrivare a definire l'eventuale presenza di contatto tra il materiale sotto investigazione e un bedrock roccioso, cercando di definire il grado di interazione tra le due differenti litologie. Ovviamente, l'esecuzione del foro di sondaggio deve penetrare per almeno 2 metri all'interno del bedrock, così da poter essere adeguatamente rappresentativo di uno strato di materiale dotato di caratteristiche meccaniche maggiori, evitando di confonderlo con un blocco di materiale sufficientemente rigido. Con l'utilizzo delle nuove tecnologie, è possibile andare ad eseguire delle perforazioni direzionate, che permettono di evidenziare la direzione delle foliazioni e dei blocchi immersi all'interno della matrice.

Se dal punto di vista della meccanica dei terreni l'estrazione di un materiale sabbiososciolto è difficoltoso, poiché si perdono le proprietà geotecniche dello stesso, in modo analogo, nel caso di un sondaggio all'interno di un materiale bimrock, i campioni non rimangono indisturbati: questo comportamento è dovuto al grado di alterazione indotto dal carotiere nella zona di contatto tra blocchi e matrice, in quanto la differente resistenza in termini meccanici dei due materiali rende più difficoltose le fasi di taglio. Per questo motivo, se si necessitano dei provini per eventuali indagini di laboratorio, è opportuno andare ad utilizzare dei carotieri doppi o tripli, tenendo in considerazione che una buona riuscita di un campionamento risulta essere anche strettamente collegata alla capacità di lavoro delle imprese ed, allo stesso tempo, alla visione di un geologo esperto: l'errata interpretazione dei campionamenti effettuati può portare a conclusioni errate, che metteranno pertanto in evidenza un design di progetto non adeguato e già di per sé complicato, trattandosi dell'esame di formazioni complesse.

#### 2.2 Definizione della geometria

Per poter studiare il comportamento di un ammasso complesso come quello dei blocchiin-matrice, la priorità sta nell'indagare nella maniera il più dettagliata possibile il materiale considerato, in particolar modo le dimensioni, la disposizione e la percentuale volumetrica dei blocchi all'interno della matrice: la loro presenza infatti è indice di una deviazione della fase continua della matrice, con conseguente redistribuzione dello stato di sforzo dovuto alle sollecitazioni esterne; quest'ultima affermazione, di conseguenza, indica necessariamente un andamento di un'ipotetica superficie di rottura che si sviluppa in maniera non regolare, influenzata dalla differente disposizione dei blocchi nel dominio di interesse (Irfan, Tang, 1993; Lindquist, 1994; Lindquist, Goodman, 1994; Medley, 1994; Medley, Rehermann, 2004; Goodman, Ahlgren, 2000; Sonmez et al., 2009; Medley, 2007a,b).

Come è facile intuire, per poter effettuare qualsiasi analisi preliminare in fase progettuale sulle resistenze che il materiale è in grado di offrire, occorre eseguire un'adeguata classificazione delle dimensioni e posizioni dei blocchi dell'ammasso, considerando alcuni aspetti fondamentali: la percentuale volumetrica deve essere definita in un dominio 3D, basandosi sulla mappatura bidimensionale 2D e sulle misure monodimensionali 1D dei *"chords"* o corde, ovvero le lunghezze di intersezione tra le inclusioni incontrate ed il nucleo di perforazione, eseguito con i sondaggi geognostici. I sondaggi di perforazione mettono in

risalto nei provini la presenza di parte di matrice e di blocchi, per questo motivo non è rappresentativo dal punto di vista dimensionale poter basare la stima della grandezza massima dei blocchi  $(d_{mod})$  e la loro percentuale di presenza volumetrica (VBP) sulla base dei provini ottenuti. Facendo riferimento solamente al materiale estratto dai fori di sondaggio, si possono andare ad analizzare delle dimensioni caratteristiche che non indicano in maniera opportuna l'effettivo andamento del diametro di un masso: la pratica dimostra che mentre in un'analisi 2D e 3D la dimensione massima  $d_{mod}$  è pari alla distanza relativa tra i due punti misurabili di un affioramento, il valore dimensionale di una corda, nella maggior parte dei casi, non sta ad indicare la massima lunghezza che realmente si potrebbe riscontrare durante la realizzazione di un'ipotetica opera in sotterraneo.



Figura 2-4 Confronto tra analisi bidimensionale e monodimensionale; il blocco ha dimensione massima osservata rispettivamente pari a dmod e dimensione indicata in figura con "chord", pari alla lunghezza di intersezione tra foro e blocco stesso [Medley, 2001].

In Figura 2-4 si nota come, osservando un affioramento di questo materiale, è possibile denotare una dimensione  $d_{mod}$  definibile apparente, mentre l'utilizzo del prodotto di sondaggio definisce una lunghezza caratteristica pari alla corda: entrambe le misure non risultano rappresentative della geometria del problema sotto esame e della percentuale volumetrica dei blocchi. In alcuni casi la lunghezza della corda potrebbe rappresentare in maniera fedele la reale dimensione massima di un blocco: questa situazione si riscontra

quando si ha un'adeguata lunghezza di perforazione, accompagnata da un altrettanto adeguata orientazione reciproca tra il blocco e la direzione del foro di sondaggio. Ulteriore problematica è legata alla posizione in cui si effettua una perforazione in quanto, se ci si posiziona sulla parte centrale o di bordo di un'inclusione, varia completamente la stima della lunghezza associata alla presenza di un blocco. Per questi motivi, con le analisi monodimensionali 1D mediante fori di sondaggio si tende a sottostimare la dimensione delle inclusioni geometricamente più grandi e ad effettuare una sovrastima della geometria di quelle più piccole, a causa di una non corretta interpretazione proveniente dei campioni estratti, come mostrato in *Figura 2-5*, dove i risultati deducibili dalle indagini sulle carote prelevate potrebbero essere molto lontane dalle reali dimensioni dei blocchi all'interno dell'ammasso esaminato.



Figura 2-5 Confronto tra distribuzione dimensionale dei blocchi 1D (verde), a confronto con la distribuzione reale 3D (blu) di un deposito [Medley, 2001].

Una corretta valutazione della possibile distribuzione dimensionale delle inclusioni in un sistema blocchi-in-matrice è dunque un aspetto fondamentale: trascurando completamente o parzialmente in fase progettuale la presenza di tali inclusioni, si potrebbe manifestare durante la realizzazione di un'opera ingegneristica la presenza di blocchi imprevisti, anche di notevoli

dimensioni, con conseguenti rallentamenti dei lavori di costruzione (gallerie, dighe, etc.) ed incremento dei costi connessi, a causa di un comportamento globale del materiale totalmente differente rispetto a quello previsto. Allo stesso modo, un'errata interpretazione dei risultati ottenuti mediante sondaggi, può modificare in maniera marcata l'andamento di una ipotetica superficie di rottura all'interno di un pendio, alterando di conseguenza il valore del fattore di sicurezza e le spese ingegneristiche per garantirne la stabilità.

La stereologia può essere un valido metodo di investigazione della distribuzione dimensionale delle inclusioni immerse all'interno della matrice: essa, partendo da una distribuzione in un dominio uni e bidimensionale, permette la ricostruzione della geometria caratteristica in un dominio tridimensionale.



Figura 2-6 Differente orientazione e percentuale volumetrica in provini di mèlange artificiali [Medley, 2001].

Riferendosi a *Figura 2-6*, osservando l'immagine di destra costituita da una percentuale volumetrica di blocchi pari al 74%, è intuibile come un deposito di questo tipo soggetto ad indagini monodimensionali attraverso fori di sondaggio, sia costituito da inclusioni facilmente intercettabili ma, allo stesso tempo, la lunghezza della corda rilevata non coincide con la dimensione massima del blocco, dato che questi presentano un andamento approssimabile a quello orizzontale. D'altro canto, nell'immagine di sinistra, considerando una bassa percentuale in volume dei blocchi nel dominio di interesse pari al 34%, se si utilizzano delle linee di prelevamento del materiale parallele rispetto all'orientazione dei

blocchi, è più probabile individuare la massima dimensione geometrica degli stessi, ma, allo stesso tempo, la possibilità di intercettare solamente del materiale che viene definito come matrice dal punto di vista geomeccanico aumenta. Pertanto è difficile giungere ad una valutazione dell'ipotetico andamento tridimensionale della disposizione e dimensione dei blocchi, tanto è vero che una eventuale sottostima di questi due parametri fondamentali si manifesta sempre quando si è in fase di realizzazione dell'opera, specialmente per quanto riguarda il tunnelling (Medley, 2001).

## 2.2.1 Indipendenza dalla scala di osservazione e proprietà della distribuzione frattale

In un bimrock, è possibile osservare che durante qualsiasi analisi ed a qualsiasi scala, è riscontrabile la presenza di numerosi blocchi più grandi, accompagnati da un numero elevato di blocchi con dimensioni molto piccole, poiché il range di variazione geometrica delle inclusioni considerate varia da millimetri a decine di chilometri (Medley & Lindquist, 1995). L'analisi di questo sistema fisico fa riferimento ad un andamento di tipo frattale: con questa trattazione è possibile esprimere l'invarianza del problema rispetto alla scala di osservazione; l'istogramma di frequenza degli elementi considerati in un volume di riferimento non varia andando a variare la scala di osservazione, caratterizzando lo stesso volume con un incremento del numero di elementi con dimensioni più piccole. Se si va a variare la scala di riferimento, è possibile affermare che esiste una variazione in termini di dimensione assoluta degli elementi considerati, ma allo stesso tempo gli istogrammi relativi alla frequenza della stessa distribuzione dimensionale rimangono invariati. La soluzione di questa argomentazione può essere indicata mediante il parametro D, il quale indica la dimensione frattale del problema, che rimane dunque invariata:

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

dove r è il numero di intervalli delle classi di frequenza ed N, funzione della variabile r, è la frequenza della variabile r.

Lindquist (1991), analizzando le unità dimensionali dei blocchi appartenenti agli affioramenti del *Franciscan Mèlange* (Mendoncino, California, in Coastal Belt Franciscan), determinò che la loro dimensione era frattale, cercando una metodologia per riprodurre la fisicità del problema. Medley (1994), analizzando i risultati del lavoro svolto da Lindquist sui campioni di laboratorio, provò a studiarne la distribuzione dimensionale. Facendo riferimento a più di 1900 blocchi, misurati sugli affioramenti del *Franciscan Melange*, egli per ognuno ne registrò la massima dimensione osservata  $d_{mod}$ , partendo pertanto da un'analisi bidimensionale, anche se questa non risultava essere rappresentativa del vero andamento tridimensionale della distribuzione. Lo studio effettuato da Medley e Lindquist (1995) definiva la distribuzione frattale del mèlange e la costruzione di un istogramma di frequenza. La frequenza relativa associata ad ogni singola classe sta ad indicare il rapporto tra il numero di blocchi appartenenti alla medesima, in termini di  $d_{mod}$ , ed il numero totale di blocchi su cui era stata fatta una misura.

L'istogramma di frequenza relativa in *Figura 2-7* può essere rappresentato sotto forma di diagramma bilogaritmico: l'asse delle ascisse è associato al valore del  $d_{mod}$ , che segue uno sviluppo legato ad una progressione geometrica del tipo  $x_n = 2x_{n-1}$  (0,5 cm, 1 cm, 2 cm, 4 cm, 8 cm, ..., 32 cm) secondo il quale il limite superiore coincide con il valore di  $x_n$ , valore con cui termina la classe dello stesso intervallo ed, allo stesso tempo, dimensione massima della classe considerata. Siccome ogni classe rispecchia un possibile range di valori che la costituiscono, bisogna stabilire quale sia il valore rappresentativo di ognuna di esse, nello studio definibile con il termine di nodo, mediante una particolare procedura: si sottrae al valore dell'area totale in esame il valore dell'area che rispecchia la situazione della sola presenza dei blocchi; il valore ottenuto, denominabile in via generale A, è necessario per definire la dimensione caratteristica di ogni singolo intervallo di appartenenza: infatti il nodo viene descritto come  $0,04 \sqrt{A}$ , e basandosi su di esso si è in grado di definire il dominio di ogni classe, con il valore superiore coincidente con il doppio del nodo e quello inferiore

coincidente con il dimezzamento del nodo. Definite pertanto le classi, è possibile inserire all'interno di ciascuna il corrispondente numero di campioni misurati che sono dotati di dimensioni appartenenti al range di variazione considerato. Il diagramma bilogaritmico ottenibile presenta in ordinata l'andamento delle frequenze, che può essere di conseguenza agevolmente trasformata in una frequenza relativa, si veda *Figura 2-7*: essa fa riferimento ad un andamento dimensione-frequenza di una unità geologica di tipo mèlange appartenente alla zona di Caspar Beach, sulle aree di 7,9  $m^2$  e 900  $km^2$ .



Figura 2-7 Istogramma logaritmico del Franciscan Mèlange [Medley and Lindquist, 1995].

Siccome ci si basa su una tipologia di analisi che al proprio interno contiene delle incertezze legate principalmente alle modalità con cui si procede nelle misure, effettuate con l'aiuto di metodi fotogrammetrici, in grado di ottenere in maniera automatica il  $d_{mod}$  di ogni affioramento considerato, per poter eseguire in maniera idonea l'analisi senza la valutazione di un possibile errore sistematico nella misura fotografica, si trascuravano i valori dimensionali inferiori a 0,05  $\sqrt{A}$ . Riferendosi al grafico di forma parabolica, il primo tratto ascendente rispecchia questa assunzione, ossia il trascurare la presenza di blocchi aventi una dimensione più piccola rispetto al valore di soglia sopra definito; il tratto discendente indica invece una distribuzione dimensionale che rispecchia un andamento frattale-dimensionale espresso come *D*, il quale deriva da una potenza negativa con valore compreso tra 1,1 e 1,7. Il punto di picco indica invece il limite della classe dimensionale del blocco. Collegandosi a quanto precedentemente esposto nell'elaborato, il numero di blocchi che possono essere misurati all'interno di un ammasso è strettamente connesso alla loro percentuale di presenza volumetrica. Sulla base dell'area considerata, si espresse la frequenza relativa in cui la dimensione delle inclusioni, corrispondente all'ultimo valore della classe, è normalizzata dividendo per  $\sqrt{A}$ . Dall'analisi finale emergeva come gli istogrammi, con un valore di  $d_{mod}$ variabile più di 7 ordini di grandezza, si distribuivano in maniera simile: un ordine apparente era stato riscontrato, non giustificando dunque le semplificazioni geotecniche eseguite per la sua caratterizzazione (*Figura 2-8*), constatando che il Franciscan Mèlange era indipendente dalla scala per oltre 7 ordini di grandezza.



Figura 2-8 Normalizzazione dell'istogramma logaritmico ottenuti dall'analisi del Franciscan Mèlange [Medley and Lindquist, 1995].

Facendo riferimento ad un diagramma su scala logaritmica e ad una distribuzione frattale delle dimensioni, è necessario andare a definire due limiti frattali, uno superiore e l'altro inferiore, che garantiscono entro il loro intervallo il criterio di autosomiglianza. Il principio di indipendenza della scala comporta infatti che per materiali bimrocks sotto forma di provini di laboratorio o materiale in sito, sia sempre possibile riscontrare la presenza di unità blocco, con una percentuale in volume in grado di modificare le caratteristiche di risposta meccanica.

Il grafico osservabile in *Figura 2-8* dimostra che l'andamento delle distribuzioni facenti riferimento a differenti aree di misura siano simili. In particolar modo, essi assumono un valore massimo in corrispondenza delle frequenze relative aventi valore compreso tra il 30% ed il 50%, a cui corrisponde in ascissa un valore di  $\frac{d_{mod}}{\sqrt{A}} = 0,04$ , rappresentabile con la nomenclatura  $d_{peak}$ . Quindi, per ogni differente scala di osservazione, è possibile andare a fissare la soglia dimensionale blocco matrice pari a  $d_{peak} = 0,05 d_{max} = 0,05 \sqrt{A}$ .

Medley (1994) delineò le principali caratteristiche di un bimrock in funzione della dimensione dei blocchi: i sistemi a blocchi-in-matrice sono caratterizzati da un'indipendenza della scala di rappresentazione, definendo dunque che la distribuzione dimensionale delle inclusioni viene mantenuta costante per ogni scala di osservazione; la dimensione massima di un blocco, ad ogni scala di osservazione, equivale approssimativamente a  $\sqrt{A}$ ; Si identifica



Figura 2-9 Distribuzione dimensionale dei blocchi in un Franciscan Mèlange, riferendosi a differenti scale di osservazione: frequenza relativa in funzione della massima dimensione osservabile d<sub>mod</sub> [Medley, 2002].

però come dimensione massima di un blocco il valore  $d_{max} =$  $0,75\sqrt{A}$ , dato che il 99% dei blocchi ha una dimensione inferiore rispetto a quella appena descritta; la distribuzione dimensionale dei blocchi segue una legge di potenza negativa, con un valore di dimensione frattale pari a 2,3: per n blocchi in una determinata classe, ci sono  $n^{2,3}$ blocchi appartenenti alla classe precedente; in via conservativa, si assume la dimensione più piccola

del blocco significativo dal punto di vista geometrico pari al 5% di  $d_{max}$ , ovvero il 5% della dimensione del blocco più grande che risulta riscontrabile alla scala di interesse ingegneristico, cioè  $\sqrt{A}$ . (Medley, 1994; *Figura 2-9*).

E' necessario pertanto sottolineare nuovamente come tutti i blocchi al di sotto del valore di soglia che definisce il limite dimensionale blocco-matrice, siano di irrilevante interesse dal punto di vista ingegneristico, poiché considerati come materiale dotato di scarse caratteristiche meccaniche. Inoltre, per potersi basare su un valore di soglia che possa essere facilmente individuata durante un qualsiasi tipo di intervento, la si pone a  $0,05 L_c$ , con  $L_c$ grandezza caratteristica dal punto di vista ingegneristico.

## 2.2.2 Dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico

La lunghezza che descrive la geometria del problema considerato è la dimensione caratteristica ingegneristica (Medley, 1994). Con la definizione di questo parametro dimensionale, si è in grado di delineare opportunamente la grandezza dei blocchi che è ritenuta significativa, in grado di separarli da una dimensione più piccola, che non sarebbe in grado di poterli definire tali. La scelta di  $L_c$ , secondo determinate considerazioni empiriche, viene stabilita facendo opportunamente riferimento alla dimensione dell'opera e dall'interazione che questa è in grado di esplicitare nei confronti del terreno circostante, prevista durante la fase di progettazione. Ovviamente, bisogna essere a conoscenza della tipologia di opera in esame, valutando la parte dell'opera che interagisce con l'ammasso roccioso: infatti L<sub>c</sub> può risultar essere il diametro di una galleria (Button et al., 2001), la larghezza della fondazione di una diga (Goodman & Alghren, 2000), la profondità media sulla lunghezza di un pendio della superficie di scivolamento (Medley & Sanz, 2004), l'altezza del campione di terreno sottoposto a prove meccaniche in sito (Xu et al., 2007). Più precisamente, se si fa riferimento ad una prova eseguita a livello di laboratorio,  $L_c$  viene identificato sulla base delle dimensioni del provino utilizzato per la prova stessa, mentre facendo riferimento alla reale scala del sito di realizzazione dell'opera, essa deve essere posta pari a  $\sqrt{A}$ , superficie globalmente coperta da riprese forografiche o carte geologicotematiche utilizzate durante la fase di investigazione preliminare.
Mediante quanto appena descritto, è intuibile come  $L_c$  dipenda strettamente dalla scala di interesse e dalle dimensioni di una qualsiasi opera ingegneristica da analizzare:

- spessore o profondità che caratterizzano un fenomeno gravitativo di versante;
- altezza di escavazione per una trincea;
- area di una generica porzione di terreno da esaminare, con  $L_c = \sqrt{A}$ ;
- larghezza di una fondazione, nel caso di opere superficiali;
- diametro di un palo di fondazione, nel caso di fondazioni profonde;
- per gallerie alla scala del fronte di scavo, il diametro della galleria;
- per gallerie con scala relativa alla lunghezza dello scavo, si misura l'area interessata dallo stesso e si pone L<sub>c</sub> = √A;
- per opere massicce come l'analisi del piano di fondazione di una diga, si deve far riferimento a  $L_c = \sqrt{A}$ , con A pari all'area della zona di fondazione.

Si denota dunque come il grado di interazione tra l'opera considerata ed il bimrock da esaminare sia strettamente collegato all'estensione della futura opera da realizzare.

Si esamini quanto espresso da Medley (2001), considerata un'area relativa ad un eventuale progetto di 100 m x 100 m, definita dal punto di vista geologico da un *Mèlange* del *Franciscan Complex*. La dimensione ingegneristica di riferimento  $L_c$  è posta pari a  $\sqrt{A}$ , dunque pari a 100 m in questo caso. Considerando la scala di interesse, è possibile definire un valore dimensionale di soglia blocco-matrice pari a  $0,05\sqrt{A}$ , ovvero 5 m, con il blocco dimensionalmente più grande pari a  $0,75 \sqrt{A}$ , ovvero 75 m. Definiti i parametri dimensionali caratteristici del problema, è necessario evidenziare come, facendo riferimento alla scala del sito, qualsiasi blocco che presenti una grandezza inferiore ai 5 metri viene di conseguenza identificato come matrice, mentre tutti i blocchi con grandezza superiore sono identificati come blocchi di roccia.



Figura 2-10 Influenza dell'intervento considerato sulla scala dimensionale di interesse [Medley, 2001].

In Figura 2-10, tutti i blocchi sono definiti tali, eccetto quello avente un diametro caratteristico pari ad 1 m. Ovviamente, variando la tipologia di opera, e dunque la sua dimensione e la  $L_c$ , è possibile che questo blocco con dimensione pari ad 1 m possa identificato essere con un comportamento pari ad un blocco in roccia: ad esempio questo potrebbe essere il caso in cui si debba realizzare uno associato scavo all'installazione nel terreno di tubazioni di piccolo diametro.

Se si fa riferimento al *Franciscan Mèlange*, questo sistema è composto da un molto maggior numero di blocchi di piccole dimensioni rispetto a inclusioni rocciose di grandi dimensioni. Riferendosi alla *Figura 2-11*, riguardante una popolazione di blocchi a forma ellissoidale con asse maggiore pari al doppio di quello minore, si giustifica la scelta di un valore di soglia pari al 5%: anche se il ramo sinistro, che si riferisce a degli istogrammi di distribuzione dei blocchi (*Figura 2-7*), identifica che vi è un piccolo numero di blocchi con dimensione inferiore rispetto a 0,05  $L_c$ , nella realtà ve ne sono molti altri aventi dimensione ancora più piccola del valore di soglia appena definito, ma che risultano essere non identificabili mediante un possibile rilievo. Questa esclusione viene definita con il termine di "censura". Il grafico si riferisce ad una distribuzione ellittica dei blocchi, con un rapporto tra gli assi pari a 0,5; inoltre, esso delinea il fatto che il 98% dei blocchi ha una dimensione inferiore rispetto a quella che definisce la differenziazione blocco-matrice, pari a 0,05  $d_{max}$ , ma allo stesso tempo il loro volume rappresenta meno dell'1% di quello globale, esponendo



chiaramente che questi blocchi non tendono ad influenzare il comportamento globale della porzione di ammasso considerato durante la realizzazione di un'opera ingegneristica.

Figura 2-11 Andamento della distribuzione dei blocchi nel Franciscan Mèlanges; i diametri hanno un andamento compreso tra 0,3 m e 56 m. I blocchi più piccoli di 0,05  $d_{mod}$  rappresentano il 95% del numero totale, ma meno dell'1% del volume di riferimento [Medley, 1994].

## 2.2.3 Distribuzione e stima della percentuale volumetrica (VBP)

La stima delle proporzioni volumetriche dei blocchi nell'ammasso considerato è una proprietà che si sviluppa in un dominio tri-dimensionale, ma che allo stesso tempo è strettamente dipendente dal rilievo geologico effettuato in due-dimensioni e dai fori di esplorazione, mediante le tecniche di prelievo descritte precedentemente. La percentuale VBP, che esprime il rapporto tra il volume dei blocchi ed il volume totale della massa eterogenea, può essere collegata alla percentuale di presenza lineare dei blocchi riscontrata durante le perforazioni (rapporto tra la lunghezza di materiale riconducibile alla presenza di un blocco e la lunghezza totale del foro considerato), dove si fa riferimento pertanto alle lunghezze di intersezione blocco-nucleo (corde). I metodi monodimensionali fanno l'assunzione che la percentuale volumetrica sia stereologicamente equivalente alla percentuale cumulata della litologia misurata nella stratigrafia, ma tale ipotesi risulta essere conforme per poter studiare il fenomeno solamente quando si ha elevata densità di campionamento. I blocchi, poiché non risultano essere caratterizzati da una forma perfettamente sferica e sono distribuiti in modo generalmente caotico, influenzano notevolmente un corretto valore della VBP, a partire da dati che sono ottenuti con un numero limitato di campionamenti.



Figura 2-12 Metodo di analisi monodimensionale dalla superficie [Medley, 2001].

La stima della VBP condotta mediante metodo monodimensionale risulta estremamente complessa, poiché con una qualsiasi perforazione non si ha la certezza assoluta di poter andare ad intersecare la massima dimensione di un blocco all'interno del complesso bimrock sotto esame: generalmente la lunghezza massima monodimensionale del materiale proveniente dalla perforazione risulta essere inferiore rispetto alla dimensione massima del blocco, con un livello di sottostima che si aggira tra il 33% ed il 55% (Lindquist & Goodman, 1994; Medley, 1997, 2001, 2002) e per tale ragione, considerare questa dimensione come quella massima caratteristica del problema, porta ad una notevole sottostima dei reali volumi di materiale con caratteristiche geomeccaniche migliori. Recenti studi, come quello affrontato da Haneberg (2004), hanno evidenziato che semplici sondaggi di perforazione, portano ad una sottovalutazione significativa, intorno al 50% per le medie ed il 90% per il VBP. In maniera intuitiva è possibile affermare che tanto più estesa risulti essere l'analisi monodimensionale, tanto più i risultati possono essere adeguati alla rappresentazione del materiale costituente il sito in esame. Occorre indicare inoltre una profondità rappresentativa di sondaggio, che può essere imposta pari a 10 volte la dimensione massima dei blocchi in sito  $(d_{mod})$ , in maniera tale da incrementare la probabilità di "intercettare" le inclusioni di materiale rappresentative del problema (Medley 2007).

Un'altra metodologia di indagine risulta quella osservazionale, mediante rilievo in sito della superficie: si cerca infatti di determinare attraverso disegni e fotografie l'area esposta, la percentuale volumetrica, l'orientamento, la distribuzione spaziale e la dimensione rappresentativa  $d_{mod}$  di ciascun blocco; quest'ultima, rappresenta la massima dimensione rilevabile del blocco che affiora dalla superficie topografica. Le immagini rilevate possono essere successivamente scansionate e convertite in una sequenza di pixel, ciascun con un valore compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco), in grado dunque di ricoprire tutto il materiale. Con l'utilizzo della teoria della restituzione foto-digitale, si è in grado di misurare le porzioni di area, perimetro e dimensione assiale dei blocchi che vengono riscontrati nelle rispettive immagini. Affidandosi ad un rilievo di tipo fotografico, si evidenzia il fatto che esso sia strettamente collegato ad una buona rappresentazione cromatica, che viene meno quando il contrasto di colore tra i blocchi da esaminare e la matrice non è ben delineato. Inoltre, una

non disponibile e sufficiente area di indagine, costituita da un congruo numero di affioramenti, non permette di poter esaminare l'ammasso nella sua complessità. Questo tipo di procedura analitica è stata riconosciuta e validata dopo il suo utilizzo sui modelli fisici per descrivere il comportamento di un bimrock, eseguiti ed interpretati da Medley e Lindquist. Tuttavia, l'errore che caratterizza questa trattazione può essere pari al 35% per la dimensione media dei blocchi ed al 44% per il VBP (Haneberg, 2004).

Cercando una valida alternativa alle due metodologie precedentemente descritte, Medley (2001) ha cercato di stabilire un approccio sperimentale per poter effettuare una descrizione della stima della percentuale di volume dei blocchi nel dominio considerato. Necessariamente, bisogna in primo luogo definire la dimensione rilevante dal punto di vista ingegneristico,  $L_c$ , per poter fissare dunque un valore di soglia pari a  $0,05L_c$ , distinguendo i blocchi così piccoli da poter essere considerati parti integranti della matrice. Il criterio di valutazione, riportato in *Figura 2-13*, utilizza uno schema di procedura fondamentale così descrivibile:

- 1. è necessario effettuare una stima della dimensione massima del blocco  $(d_{max})$ , utilizzando tutti i dati provenienti dai fori di sondaggio designati;
- 2. si utilizza un fattore di moltiplicazione N: esso risulta essere il rapporto tra la lunghezza del foro eseguita ed il valore precedentemente ricavato  $d_{max}$ ;
- la percentuale lineare dei blocchi sotto esame viene esplicitata mediante un'interpolazione dei valori suggeriti, costituita da una probabilità di riscontro volumetrico che varia tra il 13% ed il 55%, rappresentate con opportune linee oblique nel grafico di riferimento;
- 4. il corrispondente fattore di incertezza della misura effettuata è ottenuto sull'asse delle ordinate.



Figura 2-13 Incertezza legata alla stima della frazione volumetrica dei blocchi, funzione della lunghezza della misura lineare espressa come multiplo di (N), della dimensione caratteristica del blocco più grande (d<sub>max</sub>) e della frazuione del blocco lineare misurata (variante tra il 13% ed il 55%) [Medley, 2001].

Dato che i valori di resistenza dell'ammasso sono fortemente influenzati dalla percentuale volumetrica dei blocchi, è intuibile come la metodologia di indagine appena descritta debba fare riferimento ad un limite inferiore della soluzione, procedendo pertanto in via cautelativa nella determinazione del fattore di presenza volumetrica di blocchi all'interno della matrice: Medley sostenne che la reale percentuale volumetrica era all'incirca pari a quella riscontrabile linearmente mediante fori di sondaggio, moltiplicando quest'ultima per il valore del coefficiente correttivo ottenuto per via grafica. Per i problemi legati invece allo scavo, si deve far riferimento ad una sovrastima del valore di VBP.

### 2.2.4 Modelli di Lindquist e Medley

Medley e Lindquist (Medley, 1994; Lindquist, 1994) si sono resi artefici della definizione di una particolare procedura in grado di andare a definire la percentuale volumetrica in funzione di un fattore correttivo: utilizzando i dati ottenuti dalla creazione di provini artificiali di bimrock, che al proprio interno contengono una VBP di materiale "duro" ottenibile dalla proporzione lineare, si sono descritti i parametri di resistenza, riferibili in questo caso all'intero ammasso. Il fattore di sicurezza-correttivo utilizzato dipende dalla lunghezza dei provini e dalla loro proporzione lineare. Dato che, come enunciato in precedenza, la quantità di blocchi all'interno di uno specifico volume tende a modificare le proprietà meccaniche del materiale "composito" considerato, è necessario andare ad utilizzare un fattore correttivo conservativo.

I primi modelli fisici oggetto di studio furono i campioni di materiale bimrock di forma cilindrica, sottoposti ad uno stato di sollecitazione esterna proveniente da prove con celle di carico triassiali. Mediante queste prove, si cercò di ottenere una stima dei parametri meccanici, collegandoli con l'andamento e posizione caratteristica della superficie di rottura. L'approfondimento dei risultati ottenuti da queste prove svolte in laboratorio fu esaminato minuziosamente da Lindquist (1994) e Medley (1994).

#### 2.2.4.1 Esame del modello fisico di Medley

Riferendosi a dei campioni ottenuti con fori di sondaggio in sito, Medley ha cercato di collegare il grado di incertezza inerente alla valutazione della percentuale volumetrica (VBP) dagli stessi, con la reale distribuzione volumetrica nel dominio di riferimento. Più precisamente, lo scopo era quello di andare a collegare la relazione che intercorre tra la distribuzione dimensionale dei blocchi e quella che risulta ottenibile secondo lo studio della lunghezza della corda, riscontrabile durante una classica operazione di sondaggio geognostico. Egli infatti basò il proprio studio su dei provini creati in maniera artificiale, la cui matrice era composta da gesso, mentre i blocchi da riso nero, plastilina ed argilla (Medley

2002). Le dimensioni dei provini erano state assunte rispettivamente pari a 170 mm per la larghezza, un'altezza variabile tra i 110 ed i 150 mm, una profondità di 110 mm, per una superficie complessiva di campione pari a 1700 mm<sup>2</sup>. Si scelsero quattro differenti VBP (13%, 32%, 42%, 55%), caratterizzati da inserimenti di materiale di forma tipicamente ellissoidale, con un valore dell'angolo di inclinazione compreso tra 0° e 90° rispetto all'asse maggiore del provino considerato. Riferendosi alla descrizione dimensionale contenuta nel *Paragrafo 2.2.1*, i blocchi dovevano avere una dimensione massima che risultasse inferiore ad un limite imposto pari a  $0.75 \sqrt{A}$ , con A pari alla superficie complessiva del campione: per questo motivo, le inclusioni dovevano rispettare un intervallo dimensionale compreso tra i 3,5 mm e 95 mm. Gli stessi blocchi, furono divisi in un totale di 5 classi dimensionali, con variazione compresa tra  $0.05 \sqrt{A}$  (3 mm – 6 mm) e  $0.8 \sqrt{A}$  (48 mm – 96 mm). Riferendosi invece alla frequenza relativa dei blocchi, per ogni modello fu possibile decretare:

- 79,9 % per 0,05  $\sqrt{A}$
- 16,2 % per 0,1  $\sqrt{A}$
- 3,3 % per 0,2  $\sqrt{A}$
- 0,7 % per 0,4  $\sqrt{A}$
- 0,1 % per 0,7  $\sqrt{A}$

Il numero totale di blocchi, per ogni singolo modello, varia da 2200 per il campione con una VPB pari al 13%, fino a 7350 per il campione con una VPB pari al 55%.



Figura 2-14 Determinazione delle proporzioni del blocco da immagini su campioni triassiali con linee di scansione [Medley, 2002].

Una volta opportunamente creati i campioni secondo tutti gli aspetti sopra riportati, ogni modello fu tagliato in 10 differenti porzioni e sottoposto ad un'analisi fotografica di rilievo (*Figura 2-14*): la linea di colore giallo e quelle di colore verde indicavano, rispettivamente, l'asse del campione in esame e le linee di campionamento (*scanlines*), identificabili in sito con un consueto foro di sondaggio.

Su ogni porzione precedentemente vennero disegnate tagliata, 10 linee, cercando pertanto di ottenere una percentuale volumetrica per un'ognuna di esse; considerando un totale di 10 fette di materiale, si aveva pertanto un valore complessivo 100 differenti di corde

caratteristiche, alla scala del campione considerato. In questo modo, Medley fu in grado di andare ad effettuare un'analisi statistica dei dati raccolti, che si basavano su 238 dati per VBP pari al 13%, 622 dati per VBP pari al 32%, 806 dati per VBP pari al 42%, 723 dati per VBP pari al 55%.

A questo punto fu possibile effettuare un confronto tra la distribuzione dimensionale dei blocchi in un dominio 3D (noto a priori) e la lunghezza delle corde ottenute mediante scanlines (stima della percentuale lineare dei blocchi, LBP). La rappresentazione dell'istogramma in *Figura 2-15* mostra l'andamento della frequenza relativa dei blocchi, opportunamente correlata con la classe dimensionale.



Figura 2-15 Istogramma riguardante la distribuzione tridimensionale dei blocchi (segmenti di colore nero) per i 4 modelli di differente VBP considerati e lunghezze della corda mediante scanlines [Medley, 2002].



Figura 2-16 Distribuzioni dimensionali assimilabili a curve granulometriche della lunghezza della corda 1D e distribuzione geometrica delle inclusioni 3D per i 4 modelli di differente VBP realizzati [Medley, 2002].

Da Figura 2-15 e Figura 2-16 è possibile riscontrare come le misure effettuate mediante le corde, ottenute da linee di scansione, equivalenti a fori di sondaggio monodimensionali, non siano adeguatamente rappresentative di una reale distribuzione 3D di un bimrock: è possibile notare che, nonostante il numero maggiore dei blocchi corrisponda alla classe dimensionale compresa tra 3 mm e 6 mm, con un valore di frequenza relativa pari a circa 80%, la lunghezza delle corde intercettate è di gran lunga inferiore rispetto alla dimensione massima riscontrabile mediante un'analisi 3D. Per quanto riguarda invece i blocchi più grandi, essi venivano intercettati con maggiore probabilità a causa della loro maggiore estensione, con un necessario avvicinamento tra la curva 1D e quella 3D, anche se la reale dimensione massima riscontrabile non coincide in maniera esatta ed univoca con quella misurata. In Figura 2-16 si esprime con il termine CLDs la distribuzione della lunghezza della corda, con BSD la reale distribuzione dei blocchi: è possibile notare la differenza che intercorre tra le due distribuzioni, anche se il numero di dati ottenuti dallo studio è elevato. Importante è esprimere che all'incirca il 60% delle inclusioni rappresentati dalla curva CLDs risultavano avere una dimensione inferiore a  $0.05\sqrt{A}$ , valore di soglia per il passaggio da blocchi a matrice: le curve ottenute mediante semplice utilizzo della valutazione della lunghezza delle corde sono, per questo motivo, non coincidenti con la dimensione massima effettiva riscontrabile in un dominio  $3D(d_{mod})$ .

#### 2.2.4.2 Esame del modello fisico di Lindquist

Lindquist (1994), ha basato il proprio studio su più di 100 campioni di mèlange costituiti artificialmente in laboratorio, sottoponendoli a delle prove di carico mediante celle triassiali, descrivendone il comportamento meccanico. I provini avevano una dimensione di 150 mm per il diametro e 300 mm per l'altezza. La percentuale volumetrica dei blocchi fu selezionata pari al 30%, 50%, 70%, con un angolo di inclinazione delle inclusioni interne pari 0°, 30°, 60°, 90°.



Figura 2-17 Schematizzazione delle differenti tipologie di provini realizzati [Lindquist, 1994].

La forma delle inclusioni, invece, faceva riferimento ad un elevato numero di fotografie riscontrate durante le attività di rilevamento dei bimrock, localizzate in tutte le aree del globo. Lindquist attribuì ai blocchi una forma che variava da quella circolare fino a quella ellissoidica, lenticolare, cercando dunque di riprodurre nel miglior modo possibile il reale andamento di forma dei possibili blocchi in ammasso. Per questo motivo, il rapporto tra l'asse maggiore e l'asse minore di ogni blocco varia tra due e tre, con una distribuzione dimensionale che è espressa mediante una legge frattale, con dimensione frattale pari a 2,0 (Lindquist, 1994). La dimensione massima dei blocchi introdotti, considerando dei provini cilindrici, varia da un massimo di 165 mm ad un minimo di 12 mm, quest'ultimo valore considerato pertanto valore dimensionale di soglia blocco-matrice.

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

Tabella 2-1 Distribuzione dimensionale dei blocchi utilizzati per la sperimentazione [Lindquist, 1994].

La realizzazione artificiale dei provini di mèlange, era legata alla presenza di inclusioni di calcestruzzo ad elevata resistenza, sostanzialmente miscele di cemento Portland e sabbia, immerse all'interno di matrice debole, miscela di cemento Portland ed argilla. Le deformazioni che portano in crisi il materiale sono quelle di taglio, per questo motivo si cercò di andare a simulare tale comportamento inserendo sottili strati di cera, opportunamente ricoperti di talco.

| Materiale per matrice | Parti per peso |  |  |
|-----------------------|----------------|--|--|
| Bentonite             | 20             |  |  |
| Acqua                 | 17             |  |  |
| Cemento               | 20             |  |  |

| Materiale per blocchi | Perti per peso |  |
|-----------------------|----------------|--|
| Sabbia                | 70             |  |
| Ceneri volanti        | 35             |  |
| Acqua                 | 15             |  |
| Cemento               | 7              |  |

Tabella 2-2 Proporzione in peso dei materiali utilizzati per la realizzazione dei modelli [Lindquist, 1994]

Il numero totale di campioni realizzati fu pari a 67 per un diametro di 200 mm, e 10 per un diametro di 70 mm:

- 5 campioni per ogni tipologia mostrata in Figura 2-17;
- 7 campioni creati con materiale appartenente alla sola matrice, con un diametro di 200 mm circa;
- 10 campioni con materiale dei blocchi, con un diametro di circa 70 mm.

Durante l'esecuzione delle prove di carico con cella triassiale, utilizzando un'apposita pellicola fotografica, la superficie laterale del campione veniva "registrata" attraverso la presenza di 10 *scanlines*, per poter ottenere:

• andamento degli spostamenti e visualizzazione delle deformazioni dovute alla rottura della porzione di materiale di contatto tra blocchi e matrice;

• differenza in termini di parametri geometrici, riguardanti la distribuzione dimensionale e, di conseguenza, percentuale volumetrica, confrontando opportunamente i valori fotografici registrati con quelli ottenuti nel caso di un'analisi unidimensionale.

La proporzione volumetrica è stata valutata in fase preliminare durante l'assemblaggio del campione, conoscendo il peso dei blocchi inseriti. Sulla base di questo valore e sfruttando opportunamente i risultati ottenuti dalle scansioni fotografiche mediante scanlines, si notò che la stima della VPB del campione, utilizzando un metodo di analisi monodimensionale sulla superficie laterale, risultava essere circa del 30% inferiore rispetto alla reale VBP ottenuta dalla conoscenza del peso in volume delle inclusioni.



Figura 2-18 Istogramma delle frequenze relative delle distribuzioni di lunghezza della corda 1D e della dimensione reale dei blocchi 3D [Medley, 2002].

In *Figura 2-18* si dimostra che le frequenze relative delle lunghezze ottenibili mediante analisi monodimensionale della lunghezza delle corde, presentano una discrepanza rispetto ad i valori di una reale distribuzione 3D delle inclusioni. Le curve associate ad una distribuzione monodimensionale sono legate ad un'analisi limitata di campioni, all'interno dei quali l'intercettazione di un'inclusione dipende strettamente dall'inclinazione con cui esse sono inserite nei campioni stessi: con un'orientazione blocco-linea di scansione a 0°, non si rappresentava in maniera adeguata la distribuzione principale. Tuttavia, un'orientazione blocco-linea di scansione a 90°, con una lunghezza di corda maggiore rispetto alla soglia dimensionale blocco-matrice, si ottenne una miglior rappresentazione del fenomeno, a causa della maggior intercettazione dei blocchi più grandi da parte della linea di scansione.

I picchi della distribuzione monodimensionale possono essere rappresentativi della soglia blocco-matrice, poiché i picchi della distribuzione 1D possono essere adeguati alla rappresentazione della più alta frequenza relativa della dimensione dei blocchi, aventi dimensione più piccole nella distribuzione 3D.

## 3 Proprietà meccaniche e stato dell'arte

Riportando la definizione di Medley (1994), le formazioni complesse caratterizzate dalla presenza di blocchi e matrice, strutturalmente e meccanicamente, devono rispecchiare alcune proprietà fondamentali per poter essere definite come bimrock, più precisamente:

- basandosi sulla percentuale in volume definita dai blocchi, essa deve essere compresa tra il 20-25% ed il 75%, secondo la definizione riportata in letteratura da Lindquist (1994) e Lindquist & Goodman (1994). Al di sotto di una percentuale in volume assumibile pari al 20%, le caratteristiche geomeccaniche del materiale risultano essere strettamente connesse a quella della matrice, mentre viceversa quando essa risulta essere al di sopra del 75%, il comportamento è confondibile con quello di una massa di materiale roccioso fortemente fratturato;
- la caratterizzazione prevede che vi sia una marcata differenziazione tra i valori di resistenza dei blocchi e quelli della matrice; il rapporto di resistenza viene espresso con le relazioni sottostanti:

$$\frac{\tan\varphi_{blocchi}}{\tan\varphi_{matrice}} \ge 2 \tag{3.1}$$

$$\frac{E_{blocchi}}{E_{matrice}} \ge 2 \tag{3.2}$$

dove  $\varphi$  risulta essere la definizione dell'angolo di attrito, mentre E sta ad indicare il modulo di Young del materiale (Volpe et al., 1991; Lindquist, 1994; Lindquist & Goodman, 1994).



In questo modo si assume che la rottura all'interno del materiale considerato avvenga per taglio, con un grado di deformazione che si concentra all'interno della matrice. Se le disequazioni precedentemente elencate fossero non verificate, si descriverebbe un materiale minor con differenza meccanica tra

Figura 3-1 Resistenza di un bimrock con il variare della VBP: confronto tra i dati di Lindquist (modelli fisici di mèlange), Irfan e Tang per il colluvium di Hong Kong.

matrice e blocchi, che con un grado di disturbo esterno potrebbe sviluppare una ipotetica superficie di rottura anche all'interno delle inclusioni, rendendo per questo motivo la trattazione di un problema ingegneristico assimilabile a quella di un mezzo omogeneo, un continuo equivalente.

Meccanicamente parlando, la presenza dei blocchi all'interno dell'ammasso può influenzare notevolmente o risulta essere irrilevante per la resistenza meccanica del deposito, a seconda della loro percentuale volumetrica. Questa differenziazione di comportamento risulta essere di difficile interpretazione, poiché è complicato conoscere in maniera adeguata le differenti dimensioni dei blocchi che costituiscono il deposito stesso. Per questo motivo è importante, ai fini di un'analisi ingegneristica, poter determinare una soglia dimensionale rappresentativa dei blocchi che sia in grado di descrivere il più coerentemente possibile le reali condizioni meccaniche del materiale, al di sotto della quale la presenza dei blocchi risulta non essere incidente sulle caratteristiche geotecniche del deposito. Una prima trattazione di questo genere fu affrontata da Medley e Lindquist (1995), che svilupparono un criterio empirico basato sugli studi di un *Franciscan Mèlange*, definendo il valore di soglia prima descritto.

Altri autori, come Volpe et al. (1991), evidenziano che il comportamento di un bimrock potrebbe essere espresso come una media ponderata delle proprietà meccaniche dei blocchi e della matrice, sempre opportunamente considerando una precisa percentuale volumetrica delle inclusioni.

## 3.1 Andamento della superficie di rottura

Nel rispetto di quanto descritto in precedenza, l'andamento dell'ipotetica superficie di rottura risulta essere influenzata dalla porzione di materiale che definisce il contatto tra differenti blocchi e la matrice: questa è necessariamente la zona più debole dal punto di vista meccanico, dove tendono a concentrarsi le maggiori deformazioni di taglio; tale meccanismo può essere paragonato al crearsi di una banda di taglio in un problema di stabilità di un pendio, con il generarsi di una possibile superficie di scivolamento.



Figura 3-2 Sezionamento del campione portato a rottura da Lindquist [1994].

L'andamento della zona di rottura sotto uno stato di sollecitazione esterna fu studiata da Lindquist (1994) che, mediante campioni opportunamente costituiti in laboratorio, monitorò l'andamento delle porzioni di materiale interessate da rottura: egli affermò che il superamento della condizione stabile e, di conseguenza, il crearsi di una zona di scorrimento sotto carico impresso è strettamente collegata alla percentuale volumetrica dei blocchi contenuti all'interno dei campioni considerati; in particolare, essi furono opportunamente creati con una ben precisa distribuzione dimensionale, percentuale volumetrica e differente orientazione delle inclusioni. Data la forte aleatorietà che caratterizza le possibili orientazioni dei

blocchi, le superfici di rottura variano in funzione della differente posizione reciproca delle inclusioni all'interno del provino: esse si sviluppano attorno ai blocchi, dunque nella zona di

contatto blocco matrice, e tanto più una superficie di rottura tende ad avere un andamento tortuoso, tanto più si ha un incremento dell'angolo di attrito che il provino, nella sua globalità, è in grado di andare ad offrire rispetto alla sollecitazione esterna. Con l'aumentare della VBP si ha un incremento, pertanto, del numero di contatti tra inclusione e matrice, che corrisponde ad un numero maggiore di potenziali superfici deboli che portano ad una diminuzione della coesione globale, mentre il numero totale dei piani di taglio identificati come "wax layer", allineati secondo la dimensione del blocco più grande, diminuisce. In maniera simultanea, si ha un innalzamento del valore di angolo di attrito globale. Tale relazione, in grado di esprimere l'andamento delle caratteristiche di resistenza di un bimrock, è indipendente dalle caratteristiche meccaniche associate ai soli blocchi. Riferendosi alla Figura 3-3, Lindquist (1994) osservò come la posizione e la VBP dei blocchi influenzasse il percorso della linea di rottura, raramente in grado di attraversare le stesse inclusioni. La tortuosità dell'andamento della rottura cresceva con l'incremento della VBP, con conseguente innalzamento del valore dell'angolo di attrito globale del materiale, che in alcuni casi poteva assumere un valore maggiore rispetto all'angolo di resistenza delle stesse inclusioni. Basandosi sul fatto che la linea media di rottura non aveva la capacità di attraversare le inclusioni, poteva sembrare che la resistenza associata alle stesse non influenzasse il comportamento globale del materiale.



Figura 3-3 Andamento della linea di rottura riscontrata durante le sperimentazioni di Lindquist e Goodman[1994], in funzione di una distribuzione uniforme (destra) ed una distribuzione graduata (sinistra).

Per questo motivo la distribuzione dimensionale dei blocchi nel dominio considerato assume un aspetto molto rilevante all'interno della procedura di analisi di un'opera geotecnica: in base a quanto enunciato nel *Paragrafo 2.2.2*, l'andamento della superficie di rottura risulta essere fortemente influenzata dalla dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico  $L_c$ , dalla quale è possibile ricavare il range di variazione dimensionale dei blocchi che sono interessati dallo sviluppo di una possibile opera in sotterraneo, come lo scavo di una galleria. E' infatti importante delineare il comportamento di rottura, secondo il quale blocchi aventi un andamento dimensionale simile portano ad un andamento della banda di rottura con un basso grado di tortuosità, mentre quando il volume considerato presenta blocchi di dimensioni differenti, questa risulta avere un elevato grado di tortuosità, come riportato in *Figura 3-3* (Lindquist & Goodman; 1994): essa mostra come per due configurazioni, aventi all'incirca la stessa distribuzione volumetrica ma differente geometria dei blocchi, la dimensione delle inclusioni influenza notevolmente l'andamento della superficie di rottura, nonostante i blocchi siano caratterizzati da una forma circolare, non facilmente riscontrabile durante l'analisi di un problema reale.

Si capisce dunque come il comportamento globale del materiale "composito" sotto esame risulti strettamente dipendente non solo dalla percentuale volumetrica dei blocchi, ma anche e soprattutto dal loro orientamento, forma e dimensione. Tale principio rende pertanto difficile il design preliminare dal punto di vista ingegneristico, durante il quale è necessario far riferimento ad un materiale che deve essere trattato in maniera differente rispetto ad uno omogeneo: una forzata semplificazione porta pertanto a grossi errori di valutazione nella risposta di un deposito, con conseguente aumento dei tempi e costi di realizzazione.

Medley (2004) mediante ulteriori analisi dimostrò che la forma geometrica dei blocchi, unita alla loro distribuzione ed orientazione, influenzavano l'andamento della superficie di rottura: in particolare, le inclusioni di forma ellittica con asse maggiore isorientato con l'inclinazione della direzione del pendio, tendevano a ridurre la stabilità globale. Quanto precedentemente descritto è stato opportunamente studiato attraverso prove di laboratorio (Lindquist, 1994, Lindquist & Goodman, 1994) e simulazioni numeriche (Li et al., 2004, Barbero et al., 2006, 2007, 2008), con le quali si dimostrò che un incremento di tortuosità della superficie di rottura era strettamente legato ad un andamento crescente dell'angolo di attrito e del modulo di elasticità del materiale, con conseguente diminuzione delle proprietà coesive del mezzo, confrontando i risultati ottenuti rispetto ai parametri di geotecnica resistenza esprimibili dalla sola presenza di matrice.



Figura 3-5 Superfici di rottura dall'andamento tortuoso riscontrate durante le sperimentazioni di Medley [2002].



Figura 3-4 Superfici di rottura confrontate con profili di rugosità [Medley, 2004].

Sulla base delle sperimentazioni svolte da Lindquist, Medley (2004) la resistenza osservò come meccanica del bimrock esaminato influenzata dall'andamento fosse della tortuosità della superficie di rottura. Analizzando i risultati degli andamenti di circa 60 superfici di rottura, egli decretò che quest' ultime presentavano un andamento tortuoso attorno alla superficie geometrica delle inclusioni, secondo

l'andamento della linea gialla riportata in *Figura 3-5*, mentre la linea viola regolare indicava l'andamento stimabile assunto dalla superficie di rottura in caso di presenza di sola matrice. Medley ha così definito due differenti parametri: L', che rappresenta la lunghezza tortuosa della linea di rottura misurabile manualmente (colore giallo) ed  $L_0$ , che rappresenta la lunghezza misurata digitalmente sui provini costituiti da sola matrice (colore viola). Riferendosi a quanto precedentemente esposto, egli confrontò il parametro di tortuosità L' per differenti percentuali volumetriche ed orientazione dei blocchi, ottenendo quanto riportato nella seguente *Figura 3-6*. Da essa è riscontrabile che, per ogni differente percentuale volumetrica delle inclusioni e loro disposizione, si ottiene un andamento della superficie di rottura caratterizzata da un livello di tortuosità differente, esprimibile mediante un ipotetico coefficiente *JRC* (Barton e Choubey, 1977), che ne identifica la rugosità (Lindquist, 1994).

Basandosi sui parametri descrittivi, venne eseguito un confronto tra la lunghezza della superficie tortuosa con le proporzioni volumetriche e le orientazioni dei blocchi: risultò una bassa correlazione per elevate percentuali volumetriche, mentre per basse VBP le variazioni erano elevate.



Figura 3-6 Misura e calcolo delle linee di rottura tortuose [Medley, 2004].

Dal rapporto  $\frac{L'}{L_0}$  (*Indice di lunghezza tortuosa*), cioè rapporto tra la lunghezza della linea tortuosa che collegava due punti e la lunghezza della retta tracciata tra gli stessi due punti, si evince come tale indice sia strettamente collegato alla proporzione volumetrica ed orientazione dei blocchi: per una VBP pari al 30% circa, si poteva identificare una maggiore

variabilità dell'indice di lunghezza tortuosa, mettendo in risalto una variazione sistematica tra la geometria degli andamenti delle superfici di rottura, le orientazioni dei blocchi e le frazioni volumetriche. Mediante le analisi dei risultati riguardanti i rapporti di contatto tra le superfici del blocco e quella di rottura (t/L'), si notava una dipendenza lineare tra le superfici di rottura tangenti ai blocchi e le frazioni volumetriche, con una linearità progressivamente decrescente oltre una percentuale volumetrica del 55%. Per questo motivo, basandosi sulla valutazione di tale indice, è possibile esprimere come a priori, durante la fase progettuale, non sia possibile decretare in maniera corretta l'andamento della superficie di rottura all'interno del materiale, data la casualità del problema da studiare (Lindquist, 1994). Lo studio delineava inoltre la probabile "fascia di insuccesso", che definiva le possibili superfici di rottura tortuose, esprimendo una larghezza media utilizzata come tolleranza per l'individuazione delle superfici. La scabrezza era definita dalla variazione media della superficie di rottura al di sopra di una linea media (Dipartimento di Ingegneria e Tecnologia, 2004). La scabrezza della superficie, la "larghezza tortuosa media" nello studio, fu calcolata dividendo il totale delle aree comprese tra le superficie irregolare e la linea media (A), per la lunghezza della linea media  $L_0$ , come mostrato in Figura 3-6 (Medley, 2004). Per applicare i risultati ottenuti alla scala di interesse ingegneristico, dipendentemente dal problema in esame, una volta selezionata la dimensione caratteristica si stimò lo spessore della potenziale zona di rottura tra il 5% e il 15% della larghezza tortuosa (Medley, 2004). Per la forte variabilità insita nel problema, non era necessario definire univocamente le potenziali superfici di rottura per un bimrock, ma identificare zone di rottura in termini di spessore, relazionandolo alla dimensione ingegneristica caratteristica. Una conferma di questa teoria è stata fornita dal caso studio inerente alla selezione della zona di rottura potenziale di 3 m sotto Scott Dam, California (*Paragrafo 3.4.3*). Per la diga, di circa 40 m di altezza e 45 m di larghezza, di cui è stata necessaria la valutazione dell'entità delle sollecitazioni di taglio alla base, attraverso la roccia di fondazione, dove è stata selezionata la larghezza come lunghezza ingegneristica caratteristica. La teoria esposta da Medley è risultata congruente con gli studi effettuati sul caso in esame, poiché una potenziale zona di rottura sarebbe stata compresa tra 2,3 m e 6,8 m di spessore, e la zona a rottura stimata è stata valutata pari a 3 m.

## 3.2 Caratterizzazione meccanica: analisi di laboratorio, metodi numerici e prove in situ

La resistenza di un bimrock è fortemente correlata ai parametri di resistenza della matrice ed alla frazione volumetrica dei blocchi. Se la VBP risulta essere compresa tra il 25% ed il 75%, si riscontra un aumento graduale dell'angolo di attrito, collegato con un aumento della tortuosità della superficie di rottura, mentre la coesione diminuisce a causa della debolezza dell'interfaccia tra i blocchi e la matrice. Lindquist & Goodman (1994), attraverso test di compressione triassiale su campioni generati artificialmente, con inclusioni di forma ellittica, conseguentemente all'aumento della percentuale volumetrica, riscontrarono un aumento intorno ai 15°-20° dell'angolo di attrito del materiale rispetto a quello della matrice. Allo stesso tempo, la coesione tendeva a diminuire con l'aumento della VBP. Ciò che fu da considerare era la disposizione dei blocchi nel dominio di riferimento e la loro influenza mediante dimensione e forma. In particolare, per la coesione, i valori più bassi furono riscontrati per una configurazione dei blocchi presentanti l'asse maggiore con una inclinazione pari a 30° rispetto alla direzione di applicazione del carico assiale.



Figura 3-7 Espressione della variazione dell'angolo di attrito (sinistra) e della coesione (destra) in funzione di differenti VBP [Lindquist & Goodman, 1994].

Successivamente sono stati condotti diversi studi sui bimrock provenienti dall'*Agglomerato di Ankara* (Gokceoglu, 2002; Gokceoglu e Zorlu, 2004; Sonmez et al., 2004a, b, 2006a, b), che hanno permesso di mettere in evidenza la possibilità di esprimere una relazione tra la resistenza a compressione monoassiale (*UCS*) e la percentuale volumetrica equivalente *EBP* (frazione volumetrica ponderata dei blocchi). Il materiale considerato, composto da blocchi di andesite di colore nero tenaci e blocchi di andesite rosa meno resistenti, era influenzato dalla presenza in percentuale volumetrica delle due inclusioni: i valori di *UCS* globali, infatti, dipendevano dalla presenza dell'andesite nera. Basandosi su tale proprietà, si è deciso di esprimere una proporzione di blocco equivalente (*EBP*), nel caso in cui ci si trovi davanti a depositi composti da due o più tipologie di blocchi:

$$EBP = \sum_{i}^{n} VP_{i} \frac{UCS_{i}}{UCS_{maxblock}}$$

dove *VP* indica la frazione volumetrica del blocco, *UCS* è la resistenza a compressione monoassiale, *n* è il numero delle diverse tipologie di blocchi e  $UCS_{max_{block}}$  è la resistenza a compressione monoassiale riguardante il blocco più resistente.

La distribuzione dei dati ottenibili da queste prove di compressione (*Figura 3-8*) mostra una relazione tra i valori EBP precedentemente calcolati con la resistenza a compressione monoassiale, normalizzata rispetto a quella della sola matrice ( $UCS_n$ ), quest'ultima esprimibile secondo una legge esponenziale basata sulla regressione dei dati:

$$UCS_n = 1.3361 * \exp(1.2 * EBP)$$
  
 $UCS_n = \exp(1.6874 * EBP)$ 



Figura 3-8 Dispersione delle prove eseguite sull'Agglomerato di Ankara, relazionando EBP ed UCS [Sonmez et al., 2004].

La regressione non lineare assume una rappresentazione dei dati migliore per livelli di *EBP* al di sopra del 70%, dove la resistenza complessiva del bimrock risulta essere superiore, con una minor dispersione dei valori registrati ed una possibile identificazione del materiale come massa rocciosa fortemente fratturata, trattabile secondo le classiche metodologie di Meccanica delle Rocce. La porzione di materiale contrassegnata da rottura risulta essere appartenente alla matrice, con la superficie di rottura influenzata dalla posizione e dimensione dei blocchi, dove quest'ultimi non incidono sulle proprietà globali di resistenza del bimrock, qualora vi sia una netta distinzione tra le proprietà meccaniche degli stessi e quelle della matrice (Medley, 1994; Lindquist & Goodman, 1994). Questo studio sull'*Agglomerato di Ankara* dimostra come il grado di interazione tra blocchi appartenenti a litotipi e resistenze differenti, possano influenzare il comportamento di risposta globale di un ammasso bimrock (Sonmez et al., 2004).

Li et al. (2004) sono gli artefici di analisi condotte sul comportamento meccanico di un litotipo situato in Cina, nell'area delle Tre Gole, del periodo quaternario, originato da eventi gravitativi di versante, fenomeni atmosferici e depositi di origine alluvionale, sotto forma di una miscela di terreno e roccia (RSA), comprendente per la maggior parte blocchi in roccia, argilla ed argilla sabbiosa. La principale trattazione di questo studio è stata quella di effettuare un confronto tra le simulazioni numeriche, tenendo in considerazione lo studio sulla caratterizzazione geometrica delle particelle all'interno del materiale eterogeneo, ed i risultai di testi effettuati in situ. Sulla base delle indagini in campo e dei test in situ, è stato possibile creare un modello stocastico in grado di riprodurre in maniera casuale la posizione delle inclusioni all'interno dell'area di riferimento. Per ridurre l'effetto dimensionale dei campioni, essi sono stati scelti con una dimensione minima cinque volte superiore alla dimensione massima del blocco all'interno dell'RSA (90 cm x 60 cm x 30cm). Attraverso i test sui 3 campioni, T1, T2 e T3, rispettivamente con una VBP pari al 54%, 42,1% e 38,3% si sono graficizzate le curve riguardanti le prove di resistenza al taglio eseguite, registrando per ognuna il valore di spostamento orizzontale, la pressione longitudinale impartita mediante il martinetto idraulico e la forza di resistenza a taglio del mezzo.



Figura 3-9 Sforzo di taglio dei tre campioni esaminati di RSA [Li et al., 2004].

Come riscontrabile in Figura 3-9, la percentuale volumetrica delle inclusioni ha un forte effetto sui risultati delle prove eseguite: per le prove T2 e T3, caratterizzate da una bassa percentuale volumetrica, si identificano il tratto di snervamento per taglio e di scorrimento legati ad una diminuzione della resistenza residua del materiale, a differenza della prova T1, con 2 differenti punti di snervamento associati ad un incremento della frazione volumetrica VBP. Si evince inoltre un incremento delle caratteristiche meccaniche in termini di modulo di Young, con un leggero incremento passando da T3 a T2, ed una crescita marcata passando da T2 a T1. Per questo motivo, è possibile definire un valore di soglia ipotetico in termini di VBP, al di sopra del quale si ha un incremento della risposta meccanica del materiale RSA. Riferendosi alla prova T1, è possibile spiegarne il comportamento meccanico: nella prima fase, cioè al raggiungimento del primo picco nella prova di taglio, si ha un'espansione della superficie di rottura nella matrice che circonda e cementa i blocchi, mentre la fase di hardening è dovuta allo sfalsamento ed arrangiamento dei blocchi, rispetto alla loro posizione iniziale imperturbata. L'ultima fase del diagramma indica, invece, il collasso "strutturale" del volume considerato, decretando un eccessivo grado di deformazione non assorbito dal bimrock. Osservando il profilo di questi elementi di volume noto, è possibile esprimere che la superficie di rottura si espande solamente all'interno della matrice in cui sono immersi i blocchi, illustrando come gli stessi non siano una zona preferenziale di ampliamento della rottura del materiale nel suo complesso.



Figura 3-10 Modello numerico stocastico del campione T1 di RSA [Li et al., 2004].

Cercando di descrivere in maniera esauriente il comportamento del materiale RSA, causa del limitato numero di prove realizzabili in situ, una volta ottenuti i parametri di resistenza meccanica associati alla matrice ed alle inclusioni, si cercò di studiarne il comportamento globale attraverso l'utilizzo di metodi numerici, che facevano riferimento ad una estrazione casuale della posizione dei blocchi attraverso il metodo di Monte Carlo: si

generarono infatti delle aree di studio in cui la disposizione spaziale, dimensione, forma ed azimut dei blocchi vennero opportunamente create seguendo le prescrizioni imposte dal metodo statistico.

Il posizionamento spaziale dei blocchi nel campione T1 assumeva un andamento uniforme, con dimensione ottenuta da una distribuzione normale logaritimica. La forma dei blocchi, nei tre campioni, fu definita basandosi su di una variabile casuale *n*, secondo la quale essi potevano assumere una forma a pentagono, esagono, ettagono ed ottagono, mentre l'angolo di inclinazione del lato di ogni poligono generato poteva variare casualmente tra 0° e  $360^{\circ}$ .

Secondo le precedenti prescrizioni, fu costruito un modello numerico bidimensionale studiando la risposta con l'ausilio del codice di calcolo alle differenze finite *FLAC3D* (Itasca): esso presentava una larghezza di 240 cm, un'altezza di 110 cm, una velocità orizzontale applicata per step di carico  $(1 * e^{-5})$  per simulare la pressione applicata dal martinetto, una legge costitutiva elasto-plastica ed un criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

|                  |                        | MATRICE | BLOCCHI |
|------------------|------------------------|---------|---------|
| Density          | ρ / kg m <sup>-3</sup> | 2200    | 2700    |
| Volume modules   | K / MPa                | 25      | 3000    |
| Shear modules    | G / MPa                | 15      | 2100    |
| Cohesion         | C / MPa                | 0,03    | 0,6     |
| Friction angle   | φ/°                    | 24      | 40      |
| Tensile strenght | σt / MPa               | 0,02    | 0,5     |

Tabella 3-1 Parametri meccanici utilizzati durante la modellazione numerica [Li et al., 2004].

Simulando per via numerica la prova realizzata in situ, è stato possibile ricostruire la curva relativa alla prova di taglio attesa del campione T1, opportunamente confrontata con i valori della prova ottenuti in situ. Si è potuto dimostrare che i valori di deformazione a taglio ottenuti dal metodo stocastico con *FLAC3D* erano adeguatamente rappresentativi dei valori ottenuti attraverso la vera sperimentazione, come è possibile osservare in *Figura 3-11*.



Figura 3-11 Curve sforzo di taglio/spostamento associato ottenute dalla sperimentazione in situ e dal modello numerico [Li et al., 2004].

Il modulo di Young e la resistenza a taglio delle due prove sono simili, con l'evidenza di una piccola differenziazione del punto di incrudimento ed andamento del ramo di hardening quasi coincidente: la rappresentazione infatti indica che, una volta avvenuta la plasticizzazione del materiale a livello della matrice, identificata dal ramo di incrudimento, si sviluppano delle zone di rottura a trazione con l'incremento dello spostamento indotto dal martinetto. La plasticizzazione e conseguente rottura si sviluppa nell'intorno delle inclusioni senza attraversale nella maggior parte dei casi, ma i blocchi possono essere anche essere soggetti a rottura quando la loro dimensione è irrilevante dal punto di vista ingegneristico. Tale comportamento identifica un'irregolarità che porta ad un incremento dell'angolo di attrito interno.

Barbero et al. (2006, 2007, 2008) hanno realizzato delle simulazioni numeriche in due e tre dimensioni di prove di carico monoassiali e triassiali, con diversi livelli di confinamento laterale, su diversi provini di bimrock alla scala di laboratorio. Ogni campione testato è stato realizzato inserendo all'interno della matrice delle inclusioni in maniera stocastica, con lunghezza caratteristica del campione,  $L_c$ , pari a 15 cm. Il rapporto tra gli assi delle inclusioni era pari a 2, con orizzontamento del loro asse maggiore rispetto alla direzione di applicazione del carico verticale ed una dimensione di tutti i blocchi medesima, in grado di rappresentare una distribuzione dimensionale con esponente negativo. Per ogni singola estrazione casuale, si sono esaminate le risposte dei campioni per 5 differenti percentuali volumetriche delle inclusioni, cercando di delineare la risposta meccanica in termini di resistenza a compressione e modulo di deformazione. La presenza di sola matrice e soli blocchi erano indicativi rispettivamente di un limite inferiore e superiore della resistenza, la quale cresceva con l'aumentare della VBP, secondo la definizione del criterio di Hoek & Brown (1997), accompagnata da un aumento del modulo di deformazione. Si è definito un valore di soglia percentuale volumetrica, al di sotto della quale la presenza delle inclusioni tendeva a non influenzare, in termini migliorativi, la risposta meccanica globale del campione, con risultati in accordo con quanto descritto in letteratura: esisteva una soglia di VBP al di sotto della quale il bimrock può essere esaminato con la presenza di sola matrice (*Figura 3-12*).



Figura 3-12 Inviluppo di resistenza di Hoek & Brown (sinistra) e modulo di deformazione (destra) al variare della VBP [Barbero et al., 2006].

Ulteriori analisi bidimensionali sono state sviluppate con i software di calcolo *FLAC* ed *ADINA 3D*, in tal caso utilizzando dei campioni di bimrock con inclusioni di forma circolareellittica e loro posizionamento casuale, secondo l'utilizzo di un metodo stocastico.

Riferendosi ad un criterio di rottura elastico perfettamente plastico di Mohr-Coulomb (Lindquist & Goodman, 1994), con un rapporto tra gli assi delle inclusioni pari a 2, mediante

il codice *FLAC* si è riprodotto la risposta meccanica di prove di compressione monoassiale, in condizione di deformazione piana con discretizzazione costituita da celle quadrilaterali, per 4 differenti VBP. Le analisi con il software *ADINA* sono state eseguite su campioni costituiti da inclusioni con sola forma circolare, sempre in condizioni di deformazione piana e discretizzazione legata ad elementi triangolari a 3 nodi, in questo caso per 7 differenti VBP.



Figura 3-13 Definizione del criterio di rottura di Hoek & Brown per diverse percentuali volumetriche [Barbero et al., 2007].

Attraverso la regressione di tutti i dati rilevati, è stato possibile ricavare i parametri di  $m \ e \ \sigma_{ci}$ , ricostruendo l'andamento del criterio di rottura di Hoek & Brown (1997) per bimrock di forma ellittica e circolare, dimostrando come un incremento della percentuale delle inclusioni influenzi in maniera positiva la risposta meccanica globale del materiale composito.



Per quanto riguarda la modellazione numerica tridimensionale (Figura 3-14), utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti ADINA (ADINA R & D, Inc.), si è proceduto alla realizzazione di 3 campioni con blocchi sferici estratti casualmente, secondo una distribuzione governata da una legge di negativa. La potenza

Figura 3-14 Sequenza di generazione del provino [Barbero et al., 2008].

discretizzazione è avvenuta utilizzando elementi tetraedrici a 4 nodi, testando così la risposta meccanica per differenti VBP mediante un modello elastico perfettamente plastico Drucker-

Prager; dai risultati ottenuti, si può evincere quanto segue:

- la zona di rottura si concentra nelle zone di matrice più sottili, delineate dai blocchi che risiedono vicino alle zone di bordo;
- i blocchi più grandi evidenziano un'alterazione dello stato di sforzo all'interno dei provini;
- per medesime VBP, una disposizione uniforme dei blocchi indica una maggiore resistenza;
- con l'aumento della VBP, la resistenza a compressione monoassiale  $\sigma_c$  aumenta in modo lineare fino al massimo valore di VBP così come il modulo di deformazione, valutato in maniera tangente al 50% della resistenza a compressione del campione.



Figura 3-15 Propagazione della plasticizzazione del materiale all'interno del modello (sinistra) e sulla superficie laterale (destra), VBP pari al 40% [Barbero et al., 2008].

L'interpretazione dei risultati (*Figura 3-16*) ottenuti è stata eseguita utilizzando, anche in questo caso, il criterio di resistenza di Hoek & Brown (1997), calcolando i parametri identificativi  $m \ e \ \sigma_{ci}$  attraverso regressione statistica, per differenti VBP.



Figura 3-16 Influenza della VBP sulla resistenza del materiale, secondo inviluppo di rottura di Hoek & Brown (a) e Mohr-Coulomb (b) [Barbero et al., 2008].

Sono stati rappresentati gli inviluppi di resistenza per la matrice e blocco, messi a confronto con le curve limite per le differenti VBP ottenute con le simulazioni numeriche: in particolare, i campioni con una percentuale delle inclusioni pari al 10%, presentano un andamento sostanzialmente coincidente con quello della sola matrice.

# 3.3 Metodi empirici equivalenti per la valutazione della resistenza meccanica

La valutazione della resistenza di un bimrock può essere eseguita attraverso provini prodotti artificialmente in laboratorio o campioni estratti mediante perforazione in situ. La prima tipologia è di facile analisi per la struttura integra, ma allo stesso tempo richiede una dettagliata cura nella preparazione, mentre l'estrazione dei campioni ottenuti da carotaggi risulta essere una metodologia complicata, in quanto l'operazione di prelevamento applica un grado di disturbo non indifferente sui campioni. Negli studi presenti in letteratura che descrivono, secondo metodi empirici, le caratteristiche meccaniche di resistenza che questi materiali eterogenei sono in grado di fornire, spiccano quelli condotti da Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), esposti di seguito.

### 3.3.1 Criterio di resistenza empirico di Lindquist (1994)

Lindquist (1994), a seguito delle sue analisi (*Paragrafo 2.2.4.2*), affermò che anche il modulo di resistenza di Young del materiale cresceva con l'aumentare della VBP, assumendo un valore massimo per campioni avente direzione delle inclusioni parallela rispetto a quella di applicazione del carico massimo.

Le assunzioni da egli fatte riguardavano la valutazione del modulo di deformazione del materiale, della coesione e dell'angolo di attrito interno, opportunamente rapportati alla percentuale volumetrica VBP dei blocchi.



Figura 3-17 Intervallo di variazione dei moduli di deformazione secondo differenti VBP [Lindquist, 1994].

Il parametro di rigidezza del mèlange aumentava con la percentuale volumetrica delle inclusioni, con un incremento presentante un andamento marcato meno nella direzione perpendicolare all'orientazione dei blocchi, indicante il fatto che, molto probabilmente, la porzione di matrice nell'intorno degli stessi risultava essere più deformabile, anche a causa della loro orientazione. Riferendosi alla

*Figura 3-17*, è possibile riscontrare come i moduli di deformazione dei campioni esaminati appartenessero all'intervallo di variazione compreso tra il valore medio del modulo di deformazione elastico appartenente alla matrice (limite inferiore), e la media ponderata tra i moduli di deformazione di blocco e matrice, basati sulla percentuale volumetrica delle inclusioni (limite superiore).

Per quanto riguarda la coesione, essa diminuiva con l'aumentare della VBP, rispecchiando il comportamento di debolezza della zona di contatto blocco-matrice.


Figura 3-18 Coesione ed incremento del valore dell'angolo di attrito in funzione di differenti VBP [Lindquist, 1994].

Nell'immagine a sinistra di *Figura 3-18*, il valore della coesione per una percentuale volumetrica pari al 100% era all'incirca pari a 120 psi, trovandosi compreso tra il valore relativo ai punti di contatto blocco-matrice e quello relativo alla formazione delle zone di rottura per taglio, *le "wax shear"*. Quest'ultimi, presentando una coesione più bassa, indicavano un decremento globale del valore di coesione associata al provino con un incremento della VBP. Per questo motivo, data la complessità del problema, Lindquist scelse di rappresentare la variazione di coesione del materiale secondo una legge linearmente decrescente con l'aumentare della VBP. Per quanto riguarda l'angolo di attrito interno, nell'immagine destra di *Figura 3-18*, si osserva che esso tende ad aumentare con l'incremento della VBP, comportamento sostanzialmente dovuto ad una maggiore tortuosità della superficie di rottura. La stessa immagine indica la variazione dell'angolo di attrito del *Franciscan Mèlange* della diga di Scott esaminato da Lindquist (con angolo di attrito effettivo assunto pari a 28°) ed il *Colluvium di Hong Kong*, definito da Irfan e Tang (1993). Questi ultimi hanno evidenziato un incremento dell'angolo di attrito poco conservativo, pari ad un incremento di 4° per ogni incremento dell VBP.

Sulla base di questi test attraverso prove con cella di carico triassiale, Lindquist espresse una legge per riprodurre il valore di resistenza al taglio presentabile dal mèlange, basandosi sul criterio di rottura di Mohr-Coulomb;

$$\tau_p = c_{matrix}(1 - VBP) + \sigma \tan(\varphi_{matrix} + \Delta \varphi_{matrix}(VBP))$$
(3.3)

- $\tau_p$  rappresenta la resistenza a taglio equivalente del bimrock;
- *c<sub>matrix</sub>* rappresenta la coesione della matrice, che assume un andamento linearmente decrescente con l'incremento della VBP;
- $\varphi_{matrix}$  rappresenta l'angolo di attrito della matrice;
- Δφ<sub>matrix</sub>(VBP) rappresenta l'incremento di angolo di attrito che, per valori di VBP maggiori del 25%, subisce un incremento pari a 3° per ogni incremento della VBP del 10%.

#### 3.3.2 Criterio di resistenza empirico di Sonmez et al. (2006)



Figura 3-19 Fasi di preparazione dei campioni artificiali di bimrock [Sonmez et al., 2006].

Sonmez et al. (2006), hanno proposto un ulteriore metodo di classificazione dei bimrocks, basandosi sui dati ottenuti dallo studio di prove di compressione monoassiale di campioni prodotti artificialmente in laboratorio, i quali presentavano blocchi di tufo ed andesite opportunamente frammentati, atti a imitare la presenza di inclusioni nel materiale. Si è formulata una relazione che intercorre tra i parametri di resistenza dei blocchi inseriti nei campioni ed il valore di resistenza a compressione monoassiale (UCS) globale, secondo differenti VBP. In questo modo, è stato possibile definire i parametri di resistenza nei termini di Mohr-Coulomb (c e

 $\varphi$ ) e di Hoek & Brown ( $m_i$ ), formulando le seguenti equazioni, normalizzate rispetto ai

parametri della matrice:

#### Mohr-Coulomb:

$$c_n = 1.25 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{75}\right) \qquad c_{bimrock} = c_n * c_{matrix}$$
(3.4)

$$\varphi_n = \exp\left(\frac{8*VBP}{1000}\right) \qquad \varphi_{bimrock} = \varphi_n * \varphi_{matrix}$$
(3.5)

$$UCS_n = 1 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{75}\right) \qquad UCS_{bimrock} = UCS_n * UCS_{matrix}$$
(3.6)

#### Hoek & Brown:

$$UCS_{bimrock} = \frac{2 * c * \cos(\varphi_{bimrock})}{1 - sen\varphi_{bimrock}} \qquad \sigma_1 = UCS_{bimrock} * \left(\frac{1 + sen\varphi}{1 - sen\varphi}\right) *_{\sigma_3}$$
(3.7)

$$m_{i-N} = \exp(0.015 * VBP) \qquad m_{i-bimrock} = m_{i-N} * m_{i-matrix}$$
(3.8)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS_{bimrock} * \sqrt{m_{bimrock*} \frac{\sigma_3}{UCS_{bimrock}} + 1}$$
(3.9)

dove c e  $\varphi$  rappresentano rispettivamente coesione ed angolo di attrito interno globale, UCS la resistenza a compressione monoassiale,  $m_i$  il parametro m del campione intatto,  $\sigma_1 e \sigma_3$ le tensioni principali maggiore e minore. Gli autori, inoltre, hanno cercato di identificare un resoconto sull'affidabilità delle equazioni proposte, ricalcolando il valore della tensione verticale principale  $\sigma_1$  e confrontandolo con quello ottenuto durante la misura dei test eseguiti, esprimendo la loro differenziazione attraverso un errore percentuale; per il criterio di rottura di Mohr-Coulomb e Hoek & Brown, rispettivamente, circa il 65% ed il 73% dei dati risulta avere un errore relativo percentuale inferiore al 3% (*Figura 3-20*).



Figura 3-20 Frequenza cumulato dell'errore relativo, ottenuta usando i valori di  $\sigma_1$  valutati con le soluzioni empiriche delle equazioni di Mohr-Coulomb e Hoek & Brown [Sonmez et al., 2006].

#### 3.3.3 Criterio di resistenza empirico di Kalender et al. (2014)

Kalender, mediante i suoi studi, ha cercato di descrivere il comportamento meccanico dei bimrocks avvalendosi dei principi fondamentali della meccanica delle rocce e dei terreni. Sulla base dei risultati di un congruo numero di prove riportate in letteratura, si è cercato di costruire un grado di prevedibilità dei risultati empirici rispetto a quelli teorici, secondo i quali il comportamento meccanico di un bimrock è funzione della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP). Il principale livello di attenzione è stato posto nella valutazione dei parametri meccanici, considerando il comportamento meccanico delle zone di contatto blocco matrice.

I dati sono il raggruppamento delle sperimentazioni condotte da Lindquist (1994) ed Altinsoy (2006), su campioni artificiali di bimrock; da test sul *Franciscan Mèlang*e al di sotto della fondazione della diga di Scott, in California, eseguiti da Goodman e Ahlgren (2000); da bimtest eseguiti da Coli et al. (2011); da test triassiali di *Franciscan Mèlange* del piano di fondazione della diga Calaveras, in California, eseguiti da Roadifer and Forrest (2012).

Le formule empiriche, in grado di esprimere i parametri di resistenza del bimrock, basandosi su quelli della matrice e dei blocchi, è stata studiata da Kalender et al. attenendosi agli studi di Sonmez et al. (2009) e Coskun (2010), i quali hanno definito una relazione che tiene in considerazione il grado di influenza che il contatto blocco-blocco e blocco-matrice hanno sulla resistenza di insieme di un bimrock. Si sono pertanto espresse le seguenti relazioni, che si basano sulla capacità di resistenza attritiva del materiale e sulla percentuale volumetrica dei blocchi (VBP):

- nell'intervallo compreso tra VBP = 0% e circa VBP = 10% non esiste un incremento della resistenza attritiva del bimrock (φ<sub>bimrock</sub>); tuttavia, questo incremento è marcato tra VBP = 10% e VBP = 75%; l'aumento della resistenza oltre VBP > 75% risulta essere ininfluente;
- l'angolo di attrito complessivo del materiale  $\varphi_{bimrock}$  può essere posto pari ad  $\alpha$  (angolo a riposo dei blocchi), con un valore di VBP maggiore del 75%;

- quando la VBP aumenta, aumenta di conseguenza φ<sub>bimrock</sub> ed α risulta maggiore di φ<sub>matrix</sub>;
- per valori di VBP maggiori del 60% si assume che i contatti tra i blocchi siano molto bassi o quasi nulli, assumendo un valore di UCS<sub>bimrock</sub> che tende a discostarsi dal valore di UCS<sub>matrix</sub>, diminuendo fino a zero per valori di VBP compresi tra lo 0% ed il 100%.

Facendo riferimento a quanto appena descritto, Kalender et al. (2014) hanno definito una relazione che intercorre tra  $\varphi_{bimrock}$  e VBP, generando in maniera analoga la relazione che intercorre tra  $UCS_{bimrock}$  e VBP, mostrate rispettivamente in *Figura 3-21* e *Figura 3-22*. Gli autori hanno inoltre assunto le formazioni bimrock come deposizioni geologiche a comportamento omogeneo ed isotropo, ottenendo le seguenti equazioni:

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matrix} * \left[ 1 + \frac{1000 * \left[ \left( \frac{\alpha}{\varphi_{matrix}} \right) - 1 \right]}{1000 + 5^{\left[ \frac{100 - VBP}{15} \right]}} * \frac{VBP}{VBP + 1} \right]$$
(3.10)

$$c_{bimrock} = \frac{UCS_{bimrock} * (1 - sin\varphi_{bimrock})}{2 * \cos(\varphi_{bimrock})}$$
(3.11)

$$UCS_{bimrock} = \frac{\left(A - A^{\left(\frac{VBP}{100}\right)}\right)}{\left(A - 1\right)} * UCS_{matrix}$$
(3.12)

dove  $\varphi_{bimrock}$  e  $\varphi_{matrix}$  sono rispettivamente l'angolo di attrito interno del bimrock e della matrice;  $\alpha$  rappresenta l'angolo a riposo dei blocchi;  $UCS_{bimrock}$  ed  $UCS_{matrix}$  rappresentano rispettivamente la resistenza a compressione monoassiale del bimrock e della

matrice;  $c_{bimrock}$  coesione del bimrock; VBP percentuale volumetrica dei blocchi; A parametro che è definibile a partire dal valore di  $UCS_{matrix}$  e di " $\alpha$ ".



Figura 3-21 Valutazione grafica dell'espressione empirica per la stima di  $\varphi_{bimrock}$  [Kalender et al., 2014].

In *Figura 3-21* è possibile notare come, per VBP elevati, il valore dell'angolo di attrito interno del bimrock normalizzato rispetto a quello della sola matrice è delimitato da precisi valori del rapporto tra  $\alpha \in \varphi_{matrix}$ . Allo stesso modo, in *Figura 3-22*, sono rappresentati i valori del rapporto tra  $UCS_{bimrock}$  ed  $UCS_{matrix}$  in funzione del parametro "*A*", che ne delinea un andamento non lineare. Valori maggiori del parametro "*A*" identificano la forza di contatto tra blocchi e matrice, in base all'angolarità ed alla rugosità dei blocchi, dal tipo di matrice e genesi del bimrock (*Figura 3-23*), con la soluzione più cautelativa esprimibile con "*A*" = 0,1. La resistenza a compressione monoassiale della matrice è assimilabile ad un parametro di scala per ricavare la resistenza a compressione monoassiale riferita al comportamento globale. Quando vi è un incremento della VBP,  $UCS_{bimrock}$  diminuisce secondo un andamento più o meno marcato, governato dal parametro "A".



Figura 3-22 Valutazione grafica dell'espressione empirica per la stima di UCS<sub>bimrock</sub> [Kalender et al., 2014].



Figura 3-23 Grafico per la selezione del parametro "A", secondo le proprietà del contatto blocco-matrice [Kalender et al., 2014].

Mediante i risultati ottenibili con l'utilizzo delle *Equazioni 3.10-3.11-3.12*, è stato effettuato un confronto tra l'approccio empirico ed i valori misurati presenti nel database delle prove realizzate, su cui lo stesso studio si basa.



Figura 3-24 Previsione del comportamento di resistenza di un bimrock [Kalender et al., 2014].

Tra i valori di angolo di attrito globali stimati e quelli misurati, il valore di quelli stimati, nella maggior parte dei casi, risultava essere inferiore di circa 4° rispetto a quelli effettivamente misurati secondo i precedenti studi eseguiti sul materiale. La correlazione che intercorre tra le due differenti tipologie di dati è stata espressa con y = 0.9 \* x, con un coefficiente di correlazione pari a 0.76. Analogamente, per quanto riguarda il valore di coesione stimato, esso risulta essere correlato a quelli misurati secondo un'espressione del tipo y = 1.025 \* x, con un coefficiente di correlazione pari a 0.94. Secondo dunque quanto espresso in *Figura 3-24*, il criterio di Kalender et al. (2014) tende a sottostimare leggermente i valori di resistenza associati al materiale composito, che possono essere assunti come limite inferiore di un eventuale processo di previsione applicabile ad un bimsoil in termini di resistenza.

#### 3.4 Linee guida e casi studio

Una corretta definizione e classificazione di un bimrock è di notevole rilevanza in un problema geotecnico, in quanto ad un'idonea caratterizzazione geometrica e meccanica si affianca la valutazione della percentuale volumetrica, della distribuzione dimensionale, dell'orientazione e della forma dei blocchi rocciosi. Molto spesso, in presenza di una formazione complessa bimrock, si preferisce trascurare la presenza delle inclusioni e attribuire all'intera formazione le proprietà meccaniche di resistenza scadenti della matrice, allontanandosi di molto dalla reale fisicità del problema in esame. A tal scopo, Medley (2007) si rese artefice dell'illustrazione di alcune problematiche progettuali riguardanti la non corretta identificazione di un bimrock in problemi ingegneristici legati alla stabilità di un pendio, opportunamente integrate successivamente da analisi all'equilibrio limite (Medley & Sanz, 2004) e metodi numerici (Barbero et al., 2006; Napoli et al., 2018).

#### 3.4.1 Analisi delle caratteristiche di un pendio



Figura 3-25 Errata identificazione della litologia attraverso fori di sondaggio [Medley, 2007].

L'oggetto dello studio riguarda la stabilizzazione e la mitigazione degli effetti indotti da una frana presso Coleman Beach, in California. Durante l'investigazione geotecnica preliminare, si eseguirono dei fori di sondaggio, aventi una profondità di circa 2 metri, che terminavano all'interno di un litotipo definito come bedrock in

arenaria. Si concluse così che il movimento franoso era superficiale, composto da argilla e colluvium che scivolavano sul bedrock di arenaria, prevedendo pertanto un intervento di riprofilatura del versante, rimuovendo la parte meccanicamente scadente di argilla. In realtà, la frana era molto più profonda di quanto previsto infatti, durante la realizzazione degli scavi progettuali, venne riscontrata la presenza di blocchi di grosse dimensioni all'interno di formazioni scistose, delineando un'inopportuna identificazione delle inclusioni erroneamente associate al bedrock roccioso. Tale situazione indicava come una non adeguata classificazione del terreno, desumibile da pochi fori di sondaggio, potesse essere deleteria per un'analisi progettuale, in quanto spesso si identifica lo strato rigido ad una profondità corrispondente alla zona di contatto tra terreno-blocco.

#### 3.4.2 Analisi all'equilibrio limite

Per un problema legato alla stabilità di un pendio, è necessario considerare altri fattori, come il numero di possibili blocchi ed il loro grado di orientazione: essi infatti tendono ad influenzare l'andamento della superficie di rottura (*Paragrafo 3.1*), variando di conseguenza il valore del fattore di sicurezza associato. Più in dettaglio, in *Figura 3-26* sono riassunte le possibili configurazioni di instabilità di versante bimrock soggetto a fenomeni franosi (Medley & Sanz, 2004):

<u>A.</u> con bassa VBP la superficie di scivolamento non è influenzata dalla presenza delle inclusioni;

<u>*B.*</u> inclusioni rocciose orientate parallelamente rispetto all'inclinazione del pendio incidono sullo sviluppo della superficie di scivolamento;

<u>C.</u> blocchi orientati verticalmente provocano un maggior andamento tortuoso della superficie di scivolamento, con conseguente incremento del grado di stabilità del versante;

<u>D.</u> il passaggio da zone ricche a zone povere di blocchi porta alla generazione di una superficie di scivolamento tra zone con differente VBP, con conseguente aumento della possibilità di frana dovuta al peso delle zone ricche di inclusioni.



Figura 3-26 Influenza della posizione ed orientazione dei blocchi sull'andamento della superficie di rottura [Medley & Sanz, 2004].

Medley & Sanz (2004) hanno sviluppato la trattazione di un semplice modello per poter evidenziare l'influenza della VBP sulla stabilità globale di un versante. Il pendio riprodotto ha un'inclinazione di 35° rispetto all'orizzontale ed un'altezza di 10 metri. La dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico  $L_c$  è pari a 10 metri, cioè altezza del pendio; la modellazione delle inclusioni del *Franciscan Mèlange* è effettuata considerando una forma ellissoidica degli stessi, inseriti all'interno del versante mediante rettangoli orizzontali, in cui l'asse maggiore orizzontale è doppio rispetto a quello verticale. Si realizzano differenti modelli (*Figura 3-26*) di calcolo, con VBP pari al 50%, 25% e 13%. I parametri di resistenza sono 10 KPa e 25°, rispettivamente per coesione ed angolo di attrito, trascurando la resistenza che si instaura al contatto blocco-matrice e possibile presenza di un livello di falda.



Figura 3-27 Modello del pendio con VBP 50%, con blocchi distribuiti in maniera casuale [Medley e Sanz, 2004].

Attraverso il metodo dell'equilibrio limite, si è in primo luogo evidenziato l'andamento della superficie di rottura per la sola matrice, espressa dal tratteggio, la quale fornisce un fattore di sicurezza FS = 1.26. Il risultato è assunto come input per poter effettuare un paragone con i restanti modelli considerati costituiti da blocchi, i cui fattori di sicurezza ottenuti sono successivamente normalizzati rispetto a tal valore. Le analisi riscontrano un incremento del fattore di sicurezza normalizzato rispetto a quello della sola presenza di matrice, che rispecchia un miglioramento delle caratteristiche meccaniche di insieme del deposito con l'incremento della percentuale areale delle inclusioni.



Figura 3-28 Confronto tra i risultati riscontrati sul Franciscan Mèlange (Medley e Sanz, 2003) e quelli relativi al Colluvium (Irfan e Tang, 1993), [Medley e Rehermann, 2004].

I risultati ottenuti da Medley e Sanz (2004) sono stati confrontati con quelli ottenuti da Irfan & Tang (1993), i quali hanno eseguito analisi di stabilità su pendii teorici riguardanti le operazioni di rilievo sulla determinazione in situ della resistenza al taglio del terreno alluvionale di Hong Kong, ricco di inclusioni.



I pendii modellati (*Figura 3-29*) hanno un'altezza di circa 10 metri ed una pendenza media di 60° rispetto all'asse orizzontale. I blocchi all'interno della matrice di tessitura fine hanno tutti la medesima inclinazione, dove le percentuali volumetriche hanno un range di variazione compreso tra il 10% ed il 55%, disponendosi in maniera stratificata.

Figura 3-29 Esempio di versante del deposito alluvionale di Hong Kong, VBP 20%. La linea arancione evidenzia un ipotetico andamento della superficie di scivolmanto, mentre la linea tratteggiata costituisce il profilo di rottura nel caso di sola matrice [Irfan e Tana, 1993].

Per le caratteristiche meccaniche, si sono imposti coesione ed angolo di attrito interno con un valore di 5 KPa e 35° rispettivamente. Gli autori affermarono che il grado di sedimentazione e la struttura stratificata dei modelli di pendio creati, inducono un comportamento di risposta del deposito non trascurabile, sempre considerando una ben precisa VBP. Tanto più i blocchi sono orientati nella direzione dell'inclinazione media del pendio, tanto più le verifiche di stabilità assumono un valore del fattore di sicurezza che si riduce progressivamente mentre, nel caso in cui le inclusioni siano orientate in maniera differente, si ha un incremento della stabilità con annesso andamento tortuoso della superficie di rottura.

In conclusione, con riferimento alla *Figura 3-28*, si osserva pertanto un netto incremento del fattore di sicurezza dei modelli di pendio (per entrambi i metodi di analisi eseguiti) legato

ad una maggiore percentuale volumetrica delle inclusioni (VBP), evidenziando quanto espresso da Lindquist (1994) attraverso la sue prove di carico con cella triassiale sui campioni di laboratorio, dove per livelli di VBP ridotti (nell'intervallo del 25%-30%) i blocchi offrono un vantaggio ridotto sulla variazione delle caratteristiche meccaniche dei depositi.

#### 3.4.2.1 Analisi mediante metodi numerici

Basandosi sui risultati riportati in letteratura, Barbero et al. (2006) hanno effettuato un'analisi di stabilità al continuo di un versante in bimrock, per poter indagare l'influenza che i parametri fondamentali (VBP, orientazione e forma delle inclusioni annegate nella matrice) hanno sul fattore di sicurezza, utilizzando un approccio stocastico. Le analisi sono ricondotte ad una geometria semplice, eseguite numericamente attraverso il codice di calcolo alle differenze finite *FLAC* (Itasca, 2000), modellando il mezzo come un continuo. I blocchi vengono inseriti nella matrice attraverso un metodo di estrazione statistico, che conferisce loro una disposizione ed una orientazione casuale. I blocchi sono regioni di forma ellittica, dotati di caratteristiche di resistenza meccaniche relativamente maggiori rispetto a quelle della singola matrice.



Figura 3-30 a) Modello numerico per differenti VBP; b) Forma delle inclusioni con differenti eccentricità ed orientazioni; c) variazione del Fattore di Sicurezza del versante al variare VBP, per differenti valori di eccentricità [Barbero et al., 2006].

|                   | Matrice               | Blocchi               |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Legge costitutiva | Elastoplastica ideale | Elastoplastica ideale |
| E [MPa]           | 200                   | 600                   |
| ν                 | 0.33                  | 0.3                   |
| c [MPa]           | 0.01                  | 0.1                   |
| φ [°]             | 35                    | 50                    |

Figura 3-31 Parametri meccanici dei materiali costituenti il modello numerico [Barbero et al., 2006].

Per poter avviare il metodo di disposizione statistica, sono necessari alcuni parametri chiave, come la percentuale volumetrica delle inclusioni, l'esponente della distribuzione di frequenza dei blocchi, la massima e minima dimensione degli stessi, il rapporto tra il loro asse maggiore e minore (definito come e), la direzione media e lo scarto del diametro massimo.

Analizzando i modelli generati, con una VBP del 20%, 35% e 50%, rapporto *e* corrispondente a 0.25, 0.5 ed 1.0, orientazione dei blocchi di 0°, 45°, 90° e 135° rispetto all'orizzontale, si ottiene il valore del fattore di sicurezza del versante, valutato con la formulazione *SRF* (*Strength Reduction Factor*). Le analisi prevedono una condizione gravitativa di versante, dove il pendio, costituito da sola matrice, si trova in condizioni di equilibrio limite. In base a quanto ottenuto, si considerano le seguenti affermazioni:

- il fattore di sicurezza del deposito aumenta con un incremento della VBP, con una ben delineata variazione in termini di stabilità per valori della VBP superiori al 20%, quest'ultima identificabile come valore di soglia al di sotto della quale il pendio si comporta come se fosse composto da sola matrice debole;
- il fattore di sicurezza è soggetto ad un aumento significativo quando le forme ellittiche delle inclusioni sono molto schiacciate (e = 0.25); quando i blocchi sono circolari (e = 1.0), FS assume valore minimo, indicando il fatto che la forma ellittica dei blocchi possa ostacolare il propagarsi della superficie di rottura all'interno del materiale, caratterizzata da un maggior livello di tortuosità;

- generalmente, per percentuali volumetriche intorno al 20%, non si hanno sostanziali miglioramenti della condizione di stabilità del versante rispetto al caso in cui le inclusioni siano assenti ed il dominio costituito da sola matrice; per percentuali del 50%, vi è un netto miglioramento della stabilità, identificata da un andamento molto ridotto della zona di rottura nella matrice e vicino alla superficie;
- il grado di orientazione dei blocchi non sembra influenzare in modo evidente il fattore di sicurezza, per tutte le VBP ed *e*. Tale influenza è in ogni modo complessa e richiede necessariamente analisi ulteriori (Barbero et al., 2006).

Sulla base dell'approccio stocastico introdotto da Barbero et al. (2006), il gruppo di ricerca di Napoli et al. (2018) approfondisce ulteriormente il problema della stabilità di versante attraverso circa 90 simulazioni numeriche di stabilità di versante in 2D, utilizzando i metodi agli elementi finiti (*FEM*) e quelli dell'equilibrio limite (*LEM*).



Figura 3-32 Modello numerico agli elementi finito realizzato in Phase2 [Napoli et al., 2018].

Lo scopo del lavoro è stato quelli di analizzare gli effetti della VBP sulla stabilità di un versante bimrock; il modello ricostruito è semplice, e prevede un fronte di altezza pari a 50 metri (identificabile con  $L_c$ ) ed inclinazione di 30°. I valori della VBP sono stati assunti pari a 25%, 40%, 55%, 70%. La generazione delle inclusioni rocciose in ciascun versante considerato è stata effettuata utilizzando un approccio stocastico.

|           | Matrice | Blocchi |
|-----------|---------|---------|
| E [GPa]   | 2,5     | 7,2     |
| v [-]     | 0,3     | 0,3     |
| γ [kN/m³] | 23      | 23      |
| c [kPa]   | 10      | 1000    |
| φ [°]     | 28      | 50      |

Tabella 3-2 Caratteristiche meccaniche delle inclusioni e della matrice [Napoli et al., 2018].

Per ciascuna VBP, sono state effettuate dieci estrazioni, mediante il metodo Monte Carlo, del diametro e della posizione dei blocchi, analizzando anche il caso di versante costituito da sola matrice. Per le inclusioni e la matrice è stato assunto un comportamento elasticoperfettamente plastico, applicando sia il criterio di rottura di Mohr Coulomb sia quello empirico di Lindquist (1994). I risultati sono stati confrontati in termini di fattori di sicurezza globali: la ricerca conferma che per VBP = 25% si registra un incremento del fattore di sicurezza legato al possibile fenomeno gravitativo poco significativo, mentre per alte percentuali volumetriche (VBP = 55% e VBP = 70%) la stabilità risulta nettamente migliorata, in accordo con quanto affermato da Medley e Sanz (2004) e da Barbero et al. (2006). Per ogni classe di VBP, si osserva una importante variabilità assunta dal valore del fattore di sicurezza, dovuto alla presenza di blocchi che influenzano l'andamento delle zone dove si ha la massima concentrazione degli sforzi di taglio. Le analisi LEM non sono in grado di fornire tali informazioni, in quanto essi fanno sostanzialmente riferimento a superfici di scivolamento circolari.



Figura 3-33 Fattore di sicurezza FS del versante esaminato in funzione delle differenti VBP [Napoli et al., 2018].

Gli approcci stocastici vengono confrontati con quelli ottenuti dai modelli omogenei equivalenti di Lindquist (1994) e Kalender et al. (2014) (*Paragrafo 3.3*). I valori del fattore di sicurezza ottenuti mediante il metodo di Kalender et al. risultano essere molto prossimi alla media dei valori di FS ottenuti nei modelli FEM per ciascuna VBP (*Figura 3-33*), delineando il fatto che il metodo possa essere utilizzato nella fase preliminare della progettazione, non fornendo però alcun riscontro sull'andamento dell'ipotetica superficie di rottura.

Infine, si evince come i metodi LEM non siano in grado di descrivere in maniera adeguata il fenomeno, in quanto la superficie di rottura circolare è fortemente influenzata dalla presenza delle inclusioni rocciose, dotate di una maggiore rigidezza: viene individuata una superficie di rottura circolare, poco profonda, con una forte sovrastima del valore del fattore di sicurezza, specialmente per elevati livelli di VBP (70%).

### 3.4.3 Parametri di resistenza del Franciscan Mèlange alla base della fondazione della diga Scott

Il caso studio sottolinea le metodologie utilizzate per la caratterizzazione del bedrock sottostante la diga di Scott (*Figura 3-34*), a 160 km a nord di San Francisco. La diga, costruita nel 1920, è una struttura in muratura a gravità dell'altezza di circa 40 metri, con una fondazione poggiante sul complesso caotico del *Franciscan Complex Mèlange*.



Figura 3-34 Sezione trasversale della diga Scott, California. In blu si evidenzia la possibile zona di scorrimento per taglio, mentre in rosso si delinea la profondità del foro di sondaggio di esplorazione [Medley, 2007].

1970 Nel studi geotecnici evidenziarono la possibilità di scorrimento della base di fondazione dell'opera, se la resistenza meccanica del mèlange avesse raggiunto parametri di resistenza simili a quelli della matrice scistosa. Tuttavia, per roccia in l'integrità dell'opera, il mèlange al di sotto dell'opera era dotato di caratteristiche meccaniche maggiori rispetto a quelle della sola matrice,

dovuta alla possibile presenza di inclusioni di tipo blocco all'interno della matrice in roccia scistosa (Volpe et al., 1991; Goodman and Ahlgren, 2000).

Il complesso del *Franciscan Mèlange*, così come molte altre tipologie di bimrock, presenta un'indipendenza dalla scala per la distribuzione dei blocchi (*Paragrafo 2.2.1*). Conseguentemente, la dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico (*Paragrafo 2.2.1*). Conseguentemente, la dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico (*Paragrafo 2.2.2*)  $L_c$  deve essere espressa sulla base della larghezza della fondazione (Medley, 1994). Per tal ragione, si assunse una superficie di scivolamento per taglio della diga Scott posizionata ad una potenziale profondità di 3 metri. Fu selezionata una soglia dimensionale blocco-matrice pari a 0.15 metri (5% di 3 metri), utilizzando questo criterio per effettuare l'analisi sulla percentuale volumetrica sui provini estratti mediante i fori sondaggi. La lunghezza totale minima di perforazione fu imposta pari a 10 volte il valore di  $d_{mod}$ , massima dimensione del blocco riscontrata, in questo caso stimato in un range compreso tra 30 e 40 metri, identificando pertanto una profondità di perforazione eseguita tra i 300 ed i 430 metri di profondità.

Riferendosi alla procedura descritta da Medley (1994), fu stimata una VBP del 40%, con un'incertezza associata pari a 0,2, ottenendo una stima del 40%  $\pm$  0,2 \* 40%: la VBP variava da un valore massimo del 48% ad un valore minimo del 32%, assunto poi successivamente cautelativamente al 31% basandosi su ulteriori indagini di perforazione (Goodman e Ahlgren, 2000).

Sulla base delle perforazioni vennero eseguite prove di laboratorio per la determinazione del valore dell'angolo di attrito del deposito, stimando un valore cautelativo pari a 39°, come riportato in *Figura 3-35*: si delineò dunque un valore di resistenza al taglio della formazione superiore a quello della sola matrice in roccia scistosa, con conseguente decisione di non effettuare alcun intervento di rinforzo riguardante lo scorrimento alla base dell'opera.



Figura 3-35 Plottaggio dell'effettivo angolo di attrito in funzione della percentuale volumetrica delle inclusioni, mediante prove di laboratorio sul Franciscan Mèlange ottenute dai sondaggi di perforazione al di sotto della diga di Scott, California [Goodman and Ahlgren, 2000].

#### 3.4.4 Stima della VBP durante uno scavo

La trattazione dello studio è basata sulla realizzazione della galleria Richmond Transport, fognatura sotterranea di calcestruzzo di 4,3 metri di diametro, nella Sea Cliff e Legion of Honor area di San Francisco, tra il 1994 ed il 1996. L'installazione della fognatura risiede all'interno di una galleria di 6 metri di diametro, con una lunghezza di circa 3 km, scavata con una TBM nel complesso del *Franciscan Mèlange*. Lungo l'allineamento del tunnel, furono estratti circa 740 metri di materiale attraverso fori di sondaggio, evidenziando una zona in cui il deposito era ricco di blocchi, ed una zona caratterizzata dalla presenza



Figura 3-36 Prodotto della perforazione esplorativa del Richmond Transport Tunnel, foro di sondaggio B103 [Medley, 1995].

blocchi non influenzino la meccanica globale di un bimrock, la litologia, discontinuità, numero e distribuzione dei blocchi interessano lo scavo di una galleria ed il suo progetto. Dal momento che il metodo principale, per ottenere materiale in sito, è il sondaggio di perforazione, è logico attendersi una stima della distribuzione dimensionale dei blocchi dalle lunghezze delle corde (*chord*) interessate dalla perforazione. Tale stima dovrebbe essere considerata con opportuna cautelatività, dato che la lunghezza delle corde sovrastima in maniera severa la reale distribuzione in un dominio 3D, come espresso nel *Paragrafo 2.2.4* (Medley, 1994a;

predominante della matrice di natura scistosa.

Sebbene i parametri di resistenza dei singoli

1995, 2002).

Il diametro di 6 metri del tunnel fu selezionato come valore della dimensione ingegneristica caratteristica  $L_c$ ; la percentuale di distribuzione lineare dei blocchi da fori di sondaggio fu posta pari a 38% circa; la soglia dimensionale blocco matrice fu espressa con

il valore di 0,3 metri (0,05  $L_c$ ): blocchi con dimensione inferiore rispetto a quella appena descritta furono assegnati alla matrice scistosa. Durante la realizzazione, i progettisti incontrarono rilevanti problematiche di scavo connesse alle condizioni di mixed-face, con un gran numero di piccoli blocchi intatti, riscontrando la validità delle affermazioni di Medley (1994a) e Medley e Lindquist (1995), secondo i quali con il diminuire delle dimensioni dei blocchi aumenta di conseguenza il loro numero complessivo. Sulla base della mappa geologica, Medley (1994a) stimò la massima possibile dimensione del blocco, basandosi su un'area di riferimento imposta (A), tra la progressiva del tunnel e la linea della costa: la massima forma geometrica riscontrabile per un blocco fu posta pari a 600 metri, equivalente al valore  $\sqrt{A}$ . Quanto precedentemente affermato fu verificato in quanto, durante l'avanzamento del cavo, si scavò in maniera imprevista all'interno di una rilevante inclusione, estesa circa 200 metri, non rilevata con le prove di sondaggio in foro.

Basandosi sui "case history" esposti e sulle prove di modellazione numerica effettuate, è necessario che i progettisti tengano in considerazione la presenza di forme geologiche complesse come i bimrock, cercando di definirli meccanicamente in maniera il più dettagliata possibile ai fini della realizzazione di modelli preliminari di analisi. I passi di una buona caratterizzazione del materiale su scala globale, elencati da Medley, devono essere: la definizione della dimensione caratteristica dal punto di vista ingegneristico, le perforazioni di sondaggio atte alla visione preliminare di un'ipotetica percentuale volumetrica delle inclusioni e la stima della massima dimensione geometrica, test di laboratorio per la valutazione dei parametri di resistenza, valutazione della distribuzione dimensionale ed orientazione dei blocchi.

# 4 Analisi di uno scavo in un ammasso complesso bimrock: strutturazione del modello

Nel presente *Capitolo* verrà descritto il procedimento di lavoro utilizzato per effettuare le analisi di convergenza dello scavo di una galleria in un ammasso caotico bimrock, eseguite mediante l'utilizzo del software agli elementi finiti  $RS^2$  (Rocscience Phase<sup>2</sup> 9.0). Nel *Capitolo 1* sono state riportate le problematiche connesse alle formazioni geotecniche complesse, per poter delineare una corretta stima ed interpretazione di tali litologie eterogenee dal punto di vista meccanico.

I parametri di resistenza meccanica complessivi risultano fortemente influenzati dall'orientazione, forma, percentuale volumetrica e dimensioni delle inclusioni rocciose; in particolare, la VBP determina una variazione della risposta meccanica del deposito, con conseguente variazione degli spostamenti di convergenza associati ad uno scavo. Durante la realizzazione di un'opera in sotterraneo le inclusioni possono essere caratterizzate da un incremento dello stato di sollecitazione, e per questo motivo soggette a rotture fragili, mentre la matrice subisce un'elevata deformazione; blocchi all'interno del perimetro di scavo contribuiscono alla maggior stabilità del cavo, ma solo in maniera temporanea alla stabilità globale dell'opera. Il tunnelling in un bimrock richiede continui modelli sulla distribuzione spaziale delle inclusioni e della matrice nella porzione retrostante il fronte di scavo ed il contorno del cavo, integrando le attività di monitoraggio a breve termine con un'adeguata mappatura geologica (Schubert and Budil 1995; Vavrovsky and Shubert 1995; Steindofer 1997; Grossauer 2001; Shubert et al. 2002). I supporti da inserire devono considerare la forte variazione spaziale degli spostamenti dovuti alle deformazioni indotte dalla realizzazione, indicando pertanto l'utilizzo di sistemi di sostegno di tipo duttile (*Lining Stress Controllers*),

con una redistribuzione dello stato di sollecitazione indotto. A causa della forte eterogeneità del sistema, gli schemi di classificazione come gli indici *Q* e *RMR* (Barton et al. 1974; Barton 1998; Bieniawsky 1989) non sono in grado di garantire un'adeguata valutazione del supporto e modalità di avanzamento richieste, con lo scavo che solitamente viene eseguito basandosi sul metodo *NATM* (*New Austrian Tunnel Method*), mediante la suddivisione del fronte in *top*, *bench* ed *arco rovescio* con un rivestimento preliminare costituito da centine, chiodi cementati, calcestruzzo proiettato con reti elettrosaldate annegate. A causa del possibile comportamento espansivo della matrice con un contenuto di minerali rigonfianti (*swelling*), l'arco rovescio deve essere sufficientemente rigido per contrastare questo fenomeno (Button et al., 2001).



Figura 4-1 Metodo di scavo NATM [Zhang, Zhuang and Lackner; 2018]

Nel seguito si illustrano le tipologie di metodi numerici utilizzati per l'analisi delle opere in sotterraneo in formazioni complesse, precedenti la descrizione dei metodi sviluppati per la descrizione della simulazione dello scavo di una galleria circolare di 10 metri di diametro all'interno di un ammasso bimrock, con l'utilizzo di un approccio stocastico: si considera la presenza delle inclusioni rocciose all'interno della matrice, definendo la loro forma, orientazione, dimensione frattale e percentuale volumetrica, in accordo con le principali modalità di analisi dettate da Medley (1994) sul *Franciscan Mèlange*. La distribuzione e la posizione dei blocchi nel dominio di riferimento sono state ottenute con un'estrazione casuale seguendo le prescrizioni del Metodo Monte Carlo implementato in Matlab, con l'intenzione di creare delle configurazioni random per ciascuna percentuale volumetrica considerata; ognuno di essi, presi singolarmente, non ha significato fisico, mentre se accumunati nell'insieme possono restituire un risultato più coerente con le reali condizioni di disturbo che si andrebbero a creare in sito.

## 4.1 Metodi numerici per la valutazione della risposta di un ammasso complesso

Ai fini di poter studiare il comportamento di opere geotecniche in formazioni complesse, occorre individuare quali caratteristiche di queste ultime sia necessario riprodurre nel modello numerico ed in qual modo. Il primo aspetto è quello di comprendere in che misura possa essere riprodotta l'eterogeneità del modello, caratteristica tipica delle formazioni complesse, richiamando per questo la necessità di far riferimento a delle forme di rappresentazione tridimensionale o meno. L'approccio più semplice può essere quello di non includere le eterogeneità nel modello numerico in modo esplicito, avvalendosi di una modellazione al continuo equivalente, caratterizzata da una legge costitutiva di tipo elastoplastico, in cui i parametri di resistenza dell'ammasso possono essere dedotti da prove di laboratorio, analisi di monitoraggio o mediante indici di classificazione noti (Marinos & Hoek, 2001; Barla et al., 2014). Nell'ultima modalità elencata, ci si riferisce alla valutazione dell'indice GSI della formazione, dal quale si ricavano i parametri deformativi e di resistenza. L'indice GSI tiene conto della diversificazione della matrice e del grado di alterazione delle discontinuità propria delle formazioni complesse: in questo modo, la modellazione numerica viene condotta facendo riferimento a metodi al continuo (FEM, FDM), anche se nella pratica progettuale questo approccio presenta dei limiti, in quanto l'assunzione di mezzo omogeneo equivalente non consente di includere la distribuzione spaziale ed il grado di inclusione delle complessità, che necessita un maggior grado di approfondimento.

Un esempio di questo approccio è quello relativo alla realizzazione della galleria ferroviaria Raticosa, della linea alta velocità di Bologna Firenze: essa è stata scavata, per più

della metà della sua lunghezza, all'interno del complesso caotico delle argille scagliose; in questa formazione, costituita principalmente da argille e marne, si possono individuare due diversi livelli di complessità: il primo a scala decimetrica, con un fitto reticolo di fratturazione, individuabile mediante una litologia a piccole scaglie iso-orientate formate da limo ed argilla legati per diagenesi; il secondo, a scala metrica, con una struttura caotica con la presenza di inclusioni lapidee anche importanti. La realizzazione della galleria è stata eseguita con il metodo di scavo *ADECO-RS* (Lunardi, 2002; *Figura 4-2*), sottolineando l'importanza della stabilità del fronte nella realizzazione dell'opera, accompagnato da un'intensa attività di monitoraggio durante le fasi realizzative. La modellazione numerica è stata eseguita con il software di calcolo *FLAC3D* (Itasca, 2006). Il comportamento strutturale delle argille scagliose è stato modellato mediante una legge di plasticizzazione ideale di Mohr-Coulomb, con comportamento isostropo, trascurando la componente rigonfiante del materiale. I parametri meccanici imposti sono stato assegnati basandosi sullo studio dei risultati delle prove alla scala di laboratorio, opportunamente scalate sulla base delle prescrizioni del *GSI*.



Figura 4-2 Metodo di avanzamento ADECO-RS (Lunardi, 2002) della Galleria Raticosa nel Complesso Caotico delle argille scagliose [Lunardi, Cassani e Tanzini; 2009].

L'utilizzo del metodo numerico ha evidenziato come il comportamento globale dello scavo sia riproducibile in maniera sufficientemente precisa nella condizione a breve termine, mentre ha mostrato i suoi limiti nel comportamento a medio e lungo termine: questa situazione è dovuta al fatto che si è trascurata la componente di deformazione legata al tempo, utilizzando un modello costitutivo del terreno elastico-plastico in via semplificata.

Un differente approccio di analisi è quello descritto da Barbero et al. (2012) e Napoli et al. (2018) (*Pragrafo 3.4.2.1*), utilizzato per la simulazione del comportamento di un bimrock; facendo riferimento a dei metodi *FDM* e *FEM*, Barbero et al. (2012) e Napoli et al. (2018) hanno dimostrato la possibilità di includere nella modellazione numerica al continuo le inclusioni del materiale.

Per riprodurre le complessità presenti all'interno dell'ammasso, Barla & Barla (2012) hanno effettuato un'analisi al discontinuo mediante il Metodo agli Elementi Distinti, riproducendo in maniera particellare il sottosuolo della città di Torino, per esaminare la realizzazione del Passante Ferroviario della Metropolitana (Barla & Vai, 1999; Geodata, 2000; Barla & Barla, 2012), costituito da depositi sabbiosi e ghiaiosi di origine alluvionale, dotati di cementazione diffusa negli strati profondi. Per introdurre la variabilità spaziale del deposito, si è suddiviso l'area di interesse in rettangoli (altezza variabile da 0.1 a 1 m, larghezza variabile da 0.2 a 2 m), considerando alcune aree cementate ed altre sciolte, associando ad ognuna di esse i rispettivi parametri di resistenza meccanica.



Figura 4-3 Modelli corrispondenti a due differenti gradi di cementazione: 25% (a), 75% (b); le aree non cementate sono rappresentate in arancione, mentre le aree cementate in blu [Barla & Vai, 1999; Geodata, 2000; Barla & Barla, 2012].

Altro aspetto da considerare in uno studio per la realizzazione di un modello meccanico di una formazione complessa è l'eterogeneità spaziale al di fuori del piano. Per simulare completamente il problema, pertanto, è necessario ricorrere ad una modellazione tridimensionale, quando le ipotesi di deformazione piana non possono essere ritenute valide. Un modello di deformazione piana 2D è accettabile quanto si necessita dell'analisi di un'opera avente uno sviluppo prevalente lungo una direzione, come lo scavo di una galleria lontana dal fronte di scavo o un'opera di sostegno.

In conclusione nella pratica professionale, per cogliere gli aspetti principali dello scavo in una formazione complessa, come l'eterogeneità in un dominio bidimensionale ed al di fuori del piano, la differente variabilità spaziale dei parametri ed il comportamento costitutivo non lineare, si fa ricorso a modellazioni numeriche all'omogeneo equivalente, che in futuro saranno sempre più integrate da metodi di calcolo legati alla tridimensionalità del problema, soprattutto per eseguire studi riguardanti il grado di interazione che le complessità geotecniche hanno nei confronti delle opere di sostegno realizzate.

# 4.2 Implemetanzione dell'approccio stocastico con il codice Matlab

Si utilizza il codice Matlab, riportato in ALLEGATO A, per la generazione delle inclusioni rocciose inserite all'interno del dominio nell'intorno del cavo circolare di 10 metri di diametro: considerando quattro differenti percentuali volumetriche pari al 25%, 40%, 55% e 70%, per ciascuna sono state generate 10 differenti configurazioni dei blocchi considerando un loro posizionamento ed orientazione in maniera random, la cui dimensione è basata sulla distribuzione frattale del Franciscan Mèlange. Il codice ha come input la geometria caratterizzante il modello: si tratta di un dominio quadrato di 50 metri di lato, delimitato secondo le principali regole consone ad un'indagine di tipo geotecnica. I blocchi vengono modellati con una forma ellittica, caratterizzata da un valore di eccentricità pari a 0.5 ed orientazione casuale. La loro dimensione è strettamente dipendente dalla dimensione ingegneristica caratteristica del problema  $L_c$ , quest'ultima assunta pari a 10 metri, corrispondente al diametro della galleria (Medley, 2004); essi variano da un valore minimo (a) ad un valore massimo (b) pari, rispettivamente, al 5% ed al 75% della dimensione caratteristica  $L_c$  imposta. Il codice, fissata la percentuale volumetrica VBP ed una tolleranza di modello, pari a 1/40 VBP, genera una matrice contenente gli assi maggiori e minori di ogni singola ellisse (d), estratti da una popolazione che si distribuisce secondo la seguente funzione cumulata, analoga a quella utilizzata da Barbero et al. (2006) e Napoli et al. (2018):

$$F(d) = -\frac{(a^{1+q} - d^{1+q})}{a^{1+q} - b^{1+q}}$$
(4.1)

dove

il termine q indica la dimensione frattale dei blocchi; in letteratura questo parametro assume un valore compreso tra 1 e 2 per modellazioni bidimensionali del *Franciscan Mèlange*; nel caso in esame si assume un valore di q = 1.3;

- $a = 0.05 L_c$ , minimo valore dell'asse dei blocchi ellittici;
- $b = 0.75 L_c$ , massima dimensione accettabile delle inclusioni ellittiche;
- d è la dimensione dell'asse delle inclusioni della popolazione, limitata tra a e b.

Il ciclo di estrazione termina una volta che la somma delle aree di ogni singola inclusione, rispetto alla geometria del dominio considerato, corrisponde alla VBP inserita come dato di input.

I campioni estratti fanno riferimento ad una densità di probabilità esprimibile in forma percentuale, secondo la seguente legge di potenza negativa:

$$f(d) = -\frac{1+q}{a^{1+q} - b^{1+q} * d^q}$$
(4.2)



Figura 4-4 Rappresentazione della distribuzione dimensionale delle inclusioni generate (modello della seconda estrazione, VBP 25%).

Nel modello viene fissata una tolleranza di posizione reciproca trai i blocchi pari a 5 cm, in grado di evitare la possibile compenetrazione mutua tra le inclusioni e delle stesse rispetto al dominio posto come riferimento. Una volta generata la configurazione geometrica ottenuta in maniera random, deve essere verificata la dimensione frattale D della distribuzione. Per tale verifica, si fa riferimento a quanto espresso da Medley (1994): il test sulla dimensione frattale viene effettuato mediante la divisione in classi, ciascuna delle quali è caratterizzata da un valore centrale pari a 0,04  $\sqrt{A}$ , da cui vengono definiti i limiti delle stesse: si dimezza per ottenere quello della classe precedente e si raddoppia per ottenete quello relativo alla classe successiva, definendo l'istogramma delle frequenze in scala bi-logaritmica. Il codice di calcolo fornisce come output un file di testo in formato .txt, che identifica per ogni singola inclusione ellittica generata le coordinate del centro, del vertice del semiasse maggiore e la lunghezza del semiasse minore. In tal modo, convertendo il formato del file nell'estensione .scr, si è in grado di esportare queste coordinate e rappresentarle direttamente nel software di disegno Autocad, dove i blocchi ellittici vengono delimitati da polilinee 3D. Successivamente, occorre salvare il file Autocad contenente il modello nel formato DXF R12/LT2 e chiuderlo. Riaprendo il file, è possibile esplodere tutte le polilinee 3D che definiscono ogni singola inclusione e successivamente con il comando "EDITPL" convertire ogni singolo elemento in cui è stata esplosa la polilinea 3D in polilinee 2D, che a loro volta vengono unite in un'unica polilinea in grado di delimitare ogni singola inclusione considerata. Questi passaggi rendono possibile l'importazione della geometria di ogni singola estrazione all'interno dell'ambiente di lavoro di RS<sup>2</sup>, in quanto l'analisi FEM è applicabile a geometrie che vengono univocamente identificate come polilinee.



Figura 4-5 Modello geometrico in Autocad riguardante la 10° estrazione casuale delle inclusioni per una VBP = 70%; in rosso si evidenzia il contorno dello scavo.

#### 4.3 Modellazione numerica in Rocscience RS<sup>2</sup>

 $RS^2$  è un software agli elementi finiti bidimensionale, appartenente ai prodotti del pacchetto Rocscience, utilizzato in ambito geotecnico per le problematiche della Meccanica delle Rocce e delle Terre come scavi di opere in sotterraneo, scavi superficiali, fondazioni, analisi di versanti instabili ed analisi dinamiche dei terreni. Nella versione 9.0,  $RS^2$  segue le seguenti fasi per la creazione di ogni singolo modello: impostazioni iniziali sulla modellazione; importazione della geometria del dominio di riferimento; definizione del numero di stages, discretizzazione e creazione della mesh; imposizione delle condizioni al contorno; definizione dello stato di tensione iniziale agente in situ; attribuzione delle proprietà meccaniche ai materiali; riproduzione dell'avanzamento tridimensionale del cavo; avvio dell'analisi; interpretazione dei risultati.

#### 4.3.1 Impostazioni iniziali sulla modellazione

Per ogni modello, è necessario definire le seguenti impostazioni iniziali (Project Settings):

- 1. Deformazione piana di analisi: il materiale ospitante lo scavo viene assunto infinitamente esteso nella direzione perpendicolare al piano di osservazione, imponendo pertanto deformazioni e spostamenti nulli al di fuori dello stesso;  $RS^2$ considera principali le tensioni  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , massima e minima sollecitazione nel piano di riferimento, ed è in grado di fornire le sollecitazioni  $\sigma_z$  al di fuori del piano.
- 2. unità di misura della simulazione numerica: metri per le lunghezze, MPa per gli stati tensionali;
- 3. scelta del risolutore: in questo modo il programma permette la risoluzione della matrice che rappresenta il sistema di equazioni del modello. La scelta ricade su tre modalità: metodo del gradiente coniugato, metodo del gradiente precondizionato ed eliminazione gaussiana. Per la risoluzione del problema legato alle differenti fasi di scavo si sceglie l'eliminazione gaussiana di default, che trasforma la matrice del

sistema in una matrice triangolare superiore per risolvere il sistema di equazioni fondamentali;

4. condizioni del livello di falda e relative condizioni di permeabilità dei materiali.

#### 4.3.1.1 Geometria di analisi

Considerando un quadrilatero di 50 metri di lato, se ne sono fissati i limiti mediante il comando *Material Boundaries*; sempre agendo tramite quest'ultimo, vengono definite le inclusioni interne al modello, basate sulla posizione ed orientazione random ottenute tramite il codice Matlab.

Per ogni modello generato, si procede con l'importazione del file .*dxf* di *Autocad* (contenente le polilinee associate ad ogni singola inclusione), selezionando l'opzione *Geometry Cleanup*, la quale consente di applicare una riduzione del numero di punti associati ad ogni polilinea di ogni singola inclusione, unendo tra loro i vertici appartenenti ad ogni blocco che risultano troppo vicini, provocando pertanto difficoltà nella successiva discretizzazione del modello in esame. Il dominio esterno del modello viene realizzato inserendo per via grafico-manuale un *layer* di 150 metri di lato, con una profondità di 50 metri, per non influenzare i risultati delle analisi. A questo *layer*, è stato attribuito un comportamento elastico-omogeneo, avente le stesse proprietà meccaniche della matrice costituente la porzione di materiale compreso tra le inclusioni nella zona di scavo.

#### 4.3.1.2 Numero di stages, discretizzazione e creazione della Mesh

Mediante il comando *Project Settings* è stato necessario specificare il numero di stages per ogni singola ananlisi. Complessivamente sono stati considerati 12 stages: il primo stage considera l'assenza dello scavo, mentre i successivi 11 sono utilizzati per la simulazione della risposta del deposito indotta dall'avanzamento tridimensionale del cavo. In un problema agli elementi finiti, la definizione della *mesh* assume particolare rilevanza in quanto capace di influenzare i risultati ottenuti e la convergenza del problema. Basandosi sulla geometria del contorno, definita come *Boundaries*, il programma genera una discretizzazione in segmenti, a partire dai quali avviene la realizzazione degli elementi finiti. Per la risoluzione del sistema, si è scelta una *mesh* costituita da elementi triangolari a sei nodi, una delle opzioni di default presenti nel software  $RS^2$ ; dato il forte grado di complessità della geometria in esame, attraverso il comando *Advanced Mesh Regions*, si è scelto di adottare un *gradation factor* in combinazione con il numero di nodi appartenenti alle *External Boundaries* definite, incrementando il numero di punti della *mesh* del dominio bimrock. In questo modo, è stato possibile infittire la *mesh* generata in modo automatico in prossimità dell'area quadrata di riferimento, nell'intorno dello scavo (*Figura 4-6*). Per la creazione dei modelli omogenei equivalenti in assenza di inclusioni, che fanno riferimento alla sola matrice (VBP = 0%) el agli approcci empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), la discretizzazione avviene sempre mediante una *mesh* triangolare a sei nodi, per garantire sempre il più elevato grado di dettaglio della soluzione (*Figura 4-8*).

#### 4.3.1.3 Boundary Condition

Le condizioni al contorno che definiscono il problema sono fissate in termini di spostamenti. I bordi esterni verticali del modello hanno la possibilità di spostamento nella direzione verticale y, mentre gli spostamenti orizzontali lungo x sono posti pari a zero. I bordi esterni lungo l'orizzontale sono invece dotati di una possibilità di traslazione lungo la direzione x, ma nulla nella direzione verticale y. Inoltre, i quattro vertici della geometria in esame hanno spostamento pari a zero, ottenuto mediante l'imposizione di elementi cerniera (*Figura 4-6*).



Figura 4-6 Modello 0.70\_10 (decima estrazione con VBP = 70%, orientazione dei blocchi random). Definizione della mesh e posizionamento vicnoli.



Figura 4-7 Dettaglio della geometria delle inclusioni all'interno del dominio di riferimento (sinistra); zona di scavo e mesh triangolare a sei nodi (destra), decima estrazione con VBP = 70%.


Figura 4-8 Definizione della mesh triangolare a sei nodi e posizionamento dei vincoli nel modello con VBP = 0%, presenza della sola matrice.

#### 4.3.1.4 Parametri meccanici e condizioni di carico

La risposta meccanica del modello viene definita assegnando i parametri di resistenza meccanica e le leggi costitutive ad ogni singolo elemento. I valori di densità della matrice e dei blocchi vengono assunti pari a quelli ottenuti dagli studi di Li et al. (2004), basati sull'esecuzione di prove di taglio in sito con martinetti idraulici su materiale bimrock, posizionato nella zona della *Diga delle Tre Gole* in *Cina*. Gli stessi autori, procedendo ad una modellazione numerica attraverso un procedimento stocastico di analisi dei campioni delle prove, hanno evidenziato dei risultati molto conformi alla realtà sperimentale, sia per quanto riguarda le possibili superfici di scivolamento-rottura sia per l'andamento delle curve sforzo-deformazione (*Paragrafo 3.2*). I restanti valori di resistenza sono stati assunti in merito alla caratterizzazione delle prove di laboratorio effettuate da Adam et al. (2012), riguardanti il complesso bimrock incontrato durante la costruzione del tunnel di bypass di

|   | Matrice | Blocchi |
|---|---------|---------|
| Densità p[kg/m³]  | 2200    | 2700    |
| Modulo di Young E [MPa]                                   | 40      | 40700   |
| Coesione C [MPa]  | 0,065   | 11      |
| Angolo di attrito φ [°]                                   | 28      | 50      |
| Resistenza a trazione $\sigma_t$ [MPa]                    | 0,02    | 6       |
| Coefficiente di Poisson v [-]                             | 0,3     | 0,3     |
| Resistenza a compressione monoassiale $\sigma_{ci}$ [MPa] | 0,22    | 60      |

Waidhofen an der Ybbs (Austria). In tabella si forniscono i valori di input per l'analisi numerica.

Tabella 4-1 Proprietà meccaniche dei materiali [Li et al., 2004; Adam et al., 2012].

L'area esterna racchiusa tra il contorno del dominio bimrock ed il confine ultimo del modello è assunta a comportamento elastico, avente medesimi parametri di resistenza della matrice, con lo scopo di evitare che i risultati della modellazione numerica siano influenzati dalle *Boundaries Conditions* imposte, mentre le inclusioni rocciose e la matrice sono modellate con una legge costitutiva elastica perfettamente plastica (*ELPLA*). In un materiale *ELPLA* ideale, quando si verifica un livello di tensione inferiore rispetto a quello di snervamento, il comportamento è elastico lineare: in questo tratto la deformazione  $\varepsilon$  varia linearmene con l'incremento della tensione efficace  $\sigma$ ; con questa legge si descrive, senza la conoscenza di parametri aggiuntivi, la capacità del materiale di deformarsi plasticamente a tensione costante in maniera indefinita oltre il punto di snervamento. Mediante questo modello di comportamento meccanico, i valori di coesione e di angolo di attrito di ogni elemento del modello di calcolo (*Tabella 4-1*) rappresentano sia i valori di picco che quelli residui, considerando nullo l'angolo di dilatazione.

Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb è così espresso:

$$\tau = c' + \sigma' * tan\varphi' \tag{4.3}$$

dove  $\tau$  indica la resistenza al taglio disponibile,  $\sigma'$  il livello tensionale agente, c' la coesione e  $\varphi'$  l'angolo di resistenza al taglio.

Ai differenti modelli è stato attribuito uno stato tensionale isostropo, identificato da un rapporto tra la tensione verticale efficace e quella orizzontale efficace unitario, mediante il comando *Loading -> Field Stress -> Constant*. In questa fase, è necessario immettere manualmente il valore della tensione verticale ed orizzontale  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , in quanto non è possibile attribuire una procedura di calcolo automatica dello stato tensionale in sito, a causa delle limitazioni imposte al modello con i comandi *Boundaries conditions*. Il valore della tensione agente fa riferimento al peso dell'unità di volume dei materiali considerati, moltiplicati per la loro profondità, quest'ultima basata sulla lunghezza verticale tra la zona sommitale del modello ed il centro dello scavo circolare. In particolare, per le differenti VBP considerate, si ottiene un valore di stato tensionale direttamente proporzionale alla percentuale areale delle inclusioni contenute all'interno del dominio bimrock analizzato, decretando pertanto un incremento dello stato di sollecitazione con l'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi. Per la valutazione dello stato tensionale al di fuori del piano  $\sigma_z$ , si fa ricorso alla seguente formulazione:

$$\sigma_z = v * (\sigma_1 + \sigma_3) \tag{4.4}$$

In *Tabella 4-2* vengono riportati i valori della tensione in sito imposta, per ogni modello appartenente ad una differente VBP delle inclusioni.

|         | $k_0$ | $\sigma_x$ [MPa] | $\sigma_y$ [MPa] | $\sigma_z$ [MPa] |
|---------|-------|------------------|------------------|------------------|
| VBP 0%  | 1     | 1,65             | 1,65             | 0,99             |
| VBP 25% | 1     | 1,68             | 1,68             | 1,008            |
| VBP 40% | 1     | 1,70             | 1,70             | 1,02             |
| VBP 55% | 1     | 1,72             | 1,72             | 1,032            |
| VBP 70% | 1     | 1,74             | 1,74             | 1,044            |

Tabella 4-2 Stato tensionale in situ isotropo, in funzione della VBP.

Prima di lanciare le analisi, è necessario simulare la progressione tridimensionale del tunnel, imponendo una pressione di confinamento interna decrescente per steps, ottenendo così la metodologia di analisi descritta dal criterio di convergenza confinamento (*Paragrafo 4.3.2*). Utilizzando il comando *Loading -> Add uniform load -> Field Stress Vector* si impone, per ognuno degli 11 stages di modellazione plastica, una diminuzione della

pressione di confinamento interna pari al 10% dello stato di tensione iniziale, essendo così in grado di avere una buona discretizzazione delle curve caratteristiche da rappresentare.



Figura 4-9 Rappresentazione della pressione interna con il comando Field Stress Vector per la simulazione dell'andamento tridimensionale del cavo (10° estrazione con VBP al 70%, rilassamento del materiale al 50%).

#### 4.3.2 Metodo delle curve caratteristiche

Negli anni settanta il Dott. Lombardi per primo ha evidenziato l'influenza del nucleo di avanzamento e della sua resistenza, mediante il "Metodo delle Linee Caratteristiche". Per la prima volta, il problema legato all'avanzamento dello scavo veniva espresso in termini pseudo-tridimensionali, imprimendo una svolta nello studio degli scavi in sotterraneo. La valutazione della deformabilità della porzione di ammasso in esame dipende ovviamente: dalle caratteristiche intrinseche dell'ammasso, dallo stato di coazione originario cui è sottoposto, dalle modalità di avanzamento con cui verrà prodotto un annullamento della tensione principale  $\sigma_3$  all'avvicinarsi del fronte di scavo. Può essere allora considerata la vera causa del processo tenso-deformativo che si sviluppa a monte dello scavo, che evolve poi di conseguenza in corrispondenza delle pareti della cavità. La risposta deformativa che ne deriva si configura dunque come effetto e si articola secondo tre fenomeni in senso geometrico e cronologico: estrusione del nucleo in corrispondenza della superficie delimitata dal fronte di scavo, preconvergenza del profilo teorico di scavo a monte del fronte medesimo, convergenza del profilo teorico di scavo a valle di quest'ultimo.

Nello sviluppo dei metodi di analisi un posto rilevante deve essere riservato al metodo di convergenza-confinamento o delle curve caratteristiche (Panet, 1995), il cui primo uso risale all'impiego della modalità di scavo del Nuovo Metodo Austriaco, *NATM* (Golser, 1995). Le basi del metodo fanno riferimento alle soluzioni per il calcolo dello stato tensionale e deformativo e del progressivo incremento della zona di plasticizzazione attorno a una galleria circolare scavata in un mezzo ELPLA ideale, sottoposto ad uno stato di tensione in situ  $p_0$  di tipo isostropo. E'possibile pertanto determinare lo stato tensionale e deformativo nell'ammasso a seguito dello scavo, schematizzandolo con una progressiva diminuzione della tensione radiale  $\sigma_r$  sul contorno del cavo.



Figura 4-10 Metodo di convergenza confinamento; vengono illustrate la curva caratteristica della galleria (LC) e la curva di reazione del sostegno (LS); in particolare, con LS1 si identifica un sostegno rigido-elastico, mentre con LS2 un sostegno cedevole; viene anche illustrata la curva di spostamento in funzione del tempo che distingue il comportamento di una galleria stabile o instabile, meccanicamente parlando [G. Barla, 2005].

Come illustrato in Figura 4-10, la curva che definisce lo spostamento radiale  $u_r$  in funzione della tensione radiale  $\sigma_r$ , è detta convergenza confinamento della galleria in esame. Viene definita anche l'estensione della fascia plastica, identificata dal valore del raggio plastico  $R_{pl}$ . Per una tensione radiale pari a  $p_0$ , non si ha alcuna variazione dello stato tensionale e deformativo inziale al contorno, e lo spostamento radiale è nullo. Al diminuire della pressione radiale  $\sigma_r$ , inizia a manifestarsi lo spostamento radiale  $u_r$  sul contorno del cavo, che inizialmente tende a crescere linearmente sino ad un certo valore della tensione radiale  $\sigma_{r,cr}$ , detta tensione radiale critica, unicamente funzione dei parametri di picco dell'ammasso roccioso. Al di sotto di questo valore, nell'intorno del cavo si sviluppa la fascia plastica, la cui estensione viene delimitata dal valore del raggio plastico  $R_{pl}$ : per distanze superiori, l'ammasso roccioso continua a rimanere in condizioni elastiche. La curva caratteristica non tiene in considerazione le strutture di sostegno, ma descrive unicamente il comportamento della risposta del cavo in termini di convergenza ed estensione della fascia plastica: per tenere in considerazione il grado di interazione tra la galleria ed il rivestimento è necessario considerare quest'ultimo secondo una propria curva, definita curva caratteristica del sostegno, introducendo il concetto della tensione radiale fittizia (Panet & Guenot, 1982), che affronta il problema tridimensionale del fronte di scavo secondo uno schema bidimensionale semplificato. La curva caratteristica risulta pertanto interpretabile come un grafico rappresentativo di una situazione deformativa lungo l'asse della galleria: ogni suo punto permette di determinare il valore dello spostamento radiale in una particolare sezione dello scavo ad una certa distanza dal fronte di scavo. La curva di convergenza del rivestimento definisce dunque il valore dello spostamento radiale che la struttura di sostegno deve essere in grado contrastare: essa è descritta da una legge lineare il cui coefficiente angolare rappresenta la rigidezza del rivestimento  $k_s$  e dal valore limite  $\sigma_{r,max}$  che la struttura stessa è in grado di sopportare, ad esempio considerando dei rivestimenti tradizionali come le centine metalliche, il calcestruzzo proiettato ed i bulloni di ancoraggio (Hoek & Brown, 1980). Il metodo offre dunque un certo grado di versatilità, in particolare riferendosi ad una fase progettuale di scavo.

# 5 Analisi di uno scavo in ammasso complesso bimrock: risultati ottenuti

L'analisi progettuale di uno scavo in un ammasso bimrock risulta complicata per la difficile definizione della geometria e determinazione dei parametri di resistenza del materiale, a cui si aggiunge un'elevata variabilità nella formazione di un'ipotetica superficie di rottura lungo le zone di debolezza.

Vengono di seguito riportati ed esaminati i risultati delle simulazioni numeriche svolte con Rocscience  $RS^2$  (Phase<sup>2</sup> 9.0) relative ad i modelli generati, basati su una posizione ed orientazione casuale delle inclusioni all'interno della matrice, e di modelli definiti omogenei equivalenti, attraverso una stima delle proprietà meccaniche dell'ammasso basate sugli studi effettuati da Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014).

Nello studio si definisce un modello teorico di ammasso, costituito da un quadrato di 50 metri di lato, con una forma ellittica delle inclusioni aventi eccentricità e = 0.5. Il posizionamento dei blocchi all'interno della matrice avviene in maniera stocastica, come anche la loro orientazione, appositamente implementando un codice Matlab che permette di effettuare un'estrazione casuale da una popolazione con distribuzione dimensionale delle inclusioni connessa al *Franciscan Complex Mèlange*. I pesi specifici dei materiali sono legati alle prove sperimentali di Li et al. (2004) basate sulle prove di taglio in sito su una formazione complessa che si localizza presso la *Diga delle Tre Gole* in Cina, mentre gli altri parametri di resistenza fanno riferimento ad un bimrock incontrato durante la costruzione del tunnel di bypass di *Waidhofen an der Ybbs (Austria*), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite da Adam et al. (2012) (*Paragrafo 4.3.1.4*).

L'implementazione del codice Matlab permette di 10 differenti configurazioni dei blocchi aventi posizione ed orientazione random, per ciascuna VBP (25%, 40%, 55% e 70%) in quanto, secondo quanto affermato in letteratura, la presenza dei blocchi viene considerata rilevante per percentuali comprese tra il 25% e il 75% (Lindquist, 1994; Lindquist & Goodman, 1994). I risultati ottenuti vengono interpretati secondo la definizione delle curve caratteristiche (convergenza-confinamento) per ogni singolo modello associato ad un valore noto di VBP, facendo riferimento a tre punti identificati dai piedritti e dalla calotta dello scavo in quanto, a causa della forte dipendenza spaziale dello spostamento di un punto per la disposizione casuale delle inclusioni, risulta proibitivo avere un'adeguata stima delle coordinate del punto con maggior convergenza. Si valuta inoltre l'incidenza delle differenti VBP esaminate sui valori di convergenza e sul massimo spostamento registrato a detensionamento totale dei punti considerati.

La parte finale del capitolo mostra gli andamenti del criterio di convergenza-confinamento per i criteri omogenei equivalenti di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), fornendo una stima approssimata delle proprietà meccaniche del deposito blocco-inmatrice in esame. I valori stimati di coesione e di angolo di attrito del materiale bimrock al variare della percentuale volumetrica dei blocchi vengono inserite nel modello di ammasso omogeneo considerato.

## 5.1 Analisi in assenza di inclusioni: VBP = 0%

Il primo modello considerato fa riferimento all'assenza di inclusioni, ed è costituito esclusivamente dalla matrice. Esso viene definito come modalità di confronto per tutte le successive analisi effettuate, in quanto nella progettazione geotecnica questo scenario viene assunto come modello base per la soluzione di problemi di questo tipo, trascurando la presenza delle inclusioni. Si esprimono i seguenti risultati che identificano la curva di convergenza-confinamento della matrice, appositamente evidenziando la diminuzione della pressione interna allo scavo imposta dal software  $RS^2$ . Trattando un mezzo isotropo, omogeneo ed equivalente, gli spostamenti nell'intorno del cavo risultano essere concentrici ed uniformemente distribuiti, così come la definizione della fascia plastica (*Figura 5-2*): per questo motivo, è possibile identificare un'unica rappresentazione grafica del criterio di convergenza, comparata nei paragrafi successivi con i valori di convergenza dei piedritti destro, sinistro e del punto di calotta dello scavo esaminato.

| Pressione interna [MPa] | Spostamento radiale [m] |
|-------------------------|-------------------------|
| 0                       | 1,58                    |
| 0,16                    | 0,59                    |
| 0,33                    | 0,34                    |
| 0,49                    | 0,22                    |
| 0,66                    | 0,17                    |
| 0,82                    | 0,13                    |
| 0,99                    | 0,11                    |
| 1,15                    | 0,08                    |
| 1,32                    | 0,05                    |
| 1,48                    | 0,03                    |
| 1,65                    | 0,00                    |

Tabella 5-1 Curva caratteristica del cavo al variare della pressione di confinamento imposta, VBP = 0%.

Il massimo spostamento a convergenza del tunnel, a rilassamento totale ed in assenza di rivestimento, è pari ad 1.58 metri, con un marcato incremento dello spostamento radiale nell'ultimo step di rilassamento del materiale.

Riferendosi a quanto sopra descritto, è possibile calcolare una pressione interna che è in grado di generare la prima plasticizzazione della matrice, secondo le espressioni seguenti:

$$p_{i,cr} = \frac{2 * (p_0 - c_p \sqrt{N_p})}{1 + N_p}$$
5.1

$$N_p = \frac{1 + sen\varphi}{1 - sen\varphi}$$
 5.2

dove  $\varphi$  rappresenta l'angolo di attrito del materiale e  $c_p$  il valore della coesione. Per la matrice, si determina un valore della pressione interna critica pari a 0.82 MPa, identificata in *Figura 5-1* come inizio del tratto non lineare del criterio di convergenza.



Figura 5-1 Criterio di confinamento- convergenza, VBP 0% (assenza di inclusioni).

Le rotture nel materiale avvengono per taglio, con un'estensione della fascia plastica intorno ai 18 metri, misurata a partire dal centro del cavo: con quest'osservazione si è in grado di confermare che la grandezza del dominio quadrato di 50 metri di lato scelto per lo studio in esame è adeguato, in quanto non vi sono effetti di bordo che rendono ogni singolo punto del deposito bimrock plastico, facendo riferimento all'ipotesi più cautelativa dell'assenza di inclusioni.



Figura 5-2 Andamento concentrico degli spostamenti (sinistra) e della zona plasticizzata (destra) in assenza di inclusioni (VBP = 0%).

#### 5.2 Analisi con VBP = 25%

Le estrazioni eseguite con il codice Matlab hanno permesso di analizzare 10 differenti modelli con una VBP = 25% (valore minimo fissato per le analisi), dove la distribuzione dimensionale dei blocchi ed il loro posizionamento avvengono in maniera casuale. In *Figura 5-3* viene riportato a titolo di esempio l'andamento degli spostamenti sul contorno del cavo a detensionamento totale ed in assenza di un eventuale rivestimento, il cui percorso viene linearizzato per facilitarne la comprensione, delineando l'impossibilità della corretta identificazione del punto di massima convergenza. Il punto di inizio della linearizzazione è posizionato in corrispondenza della zona del piedritto destro: vengono pertanto distinti quattro quadranti, ottenuti dalla suddivisione della circonferenza del cavo in quattro uguali



sotto- lunghezze, il cui sviluppo lineare segue un verso di rotazione anti orario rispetto al contorno considerato.

Figura 5-3 Rappresentazione dell'andamento degli spostamenti di convergenza sul contorno del cavo linearizzato, secondo ogni estrazione stocastica associata a VBP = 25%.

|                                 | I quadrante | II quadrante | III quadrante | IV quadrante |
|---------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Massimo spostamento radiale [m] | 1,68        | 1,44         | 1,47          | 1,69         |
| Minimo spostamento radiale [m]  | 0,53        | 0,32         | 0,54          | 0,52         |

Tabella 5-2 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le 10 estrazioni con VBP = 25%.

Come si evince da *Figura 5-3* e *Tabella 5-2*, i massimi valori di spostamento sono riscontrabili nel I e nel IV quadrante, rispettivamente confinanti con la zona di calotta e del piedritto destro del tunnel. Questi risultano essere superiori rispetto al caso considerato di assenza di inclusioni (VBP = 0%, presenza di sola matrice), con quest'ultimo scenario rappresentato da un valore di spostamento radiale uniformemente distribuito pari a 1.58 m (*Tabella 5-1*). Anche se quanto appena espresso risulta decretare un maggior spostamento

rispetto al caso della sola presenza della matrice, bisogna evidenziare come esso si concentri in zone limitate, estensionalmente parlando, in cui il valore massimo è immediatamente delimitato da un decremento del valore di spostamento radiale. Per questo motivo, il progressivo rilassamento dovuto allo scavo è strettamente connesso al raggiungimento della condizione ultima di resistenza al taglio della matrice, meccanicamente più debole delle inclusioni. In merito a quanto appena descritto, ai fini della rappresentazione del problema, il criterio di convergenza-confinamento è esprimibile mediante i risultati ottenuti considerando tre punti caratteristici, i due piedritti e la calotta, associati ad ognuno dei 10 modelli generati. A titolo di esempio si riporta in *Figura 5-4* la plasticizzazione di un modello appartenente a questo gruppo, i restanti risultati sono contenuti in *Allegato B*.



Figura 5-4 Rappresentazione dell'andamento della plasticizzazione nell'intorno del cavo; le inclusioni caratterizzano un andamento tortuoso della rottura per taglio della matrice (7° estrazione, VBP = 25%).

#### Spostamenti registrati

Di seguito vengono riportati i risultati, in termini di spostamenti radiali, del piedritto destro (*Tabella 5-3*), del piedritto sinistro (*Tabella 5-4*) e della calotta (*Tabella 5-5*) in funzione delle 10 estrazioni casuali effettuate e legati al differente valore di pressione interna,  $P_i$ , di confinamento, per simulare l'andamento tridimensionale dello scavo. In ciascuna tabella, sono stati evidenziati il valore massimo e minimo di spostamento riscontrati, attraverso i quali si delinea un forte incremento di deformazione nel passaggio dal penultimo all'ultimo step di rilassamento, dovuto ad una redistribuzione dello stato di sollecitazione e bassa percentuale di presenza in volume delle inclusioni. Le rappresentazioni grafiche dei valori di spostamenti radiali ottenuti per ogni singola estrazione effettuata sono contenute nelle *Figure 5-5, 5-6, 5-7*, e confrontate con il caso della matrice.

|                       |        |        |        | Pie    | dritto de | stro VBP | 25%    |        |        |         |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|----------|--------|--------|--------|---------|
| <b>P</b> <sub>i</sub> | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5    | Case 6   | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |
| [MPa]                 | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]       | [m]      | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |
| 0                     | 1,18   | 1,53   | 0,73   | 1,08   | 1,25      | 1,15     | 1,09   | 1,22   | 1,30   | 0,63    |
| 0,17                  | 0,36   | 0,47   | 0,23   | 0,35   | 0,39      | 0,40     | 0,36   | 0,44   | 0,44   | 0,30    |
| 0,34                  | 0,20   | 0,26   | 0,13   | 0,18   | 0,22      | 0,23     | 0,21   | 0,26   | 0,26   | 0,19    |
| 0,5                   | 0,13   | 0,18   | 0,09   | 0,13   | 0,15      | 0,16     | 0,14   | 0,18   | 0,17   | 0,14    |
| 0,67                  | 0,11   | 0,12   | 0,07   | 0,10   | 0,11      | 0,12     | 0,11   | 0,13   | 0,13   | 0,11    |
| 0,84                  | 0,08   | 0,10   | 0,05   | 0,08   | 0,09      | 0,10     | 0,09   | 0,10   | 0,10   | 0,09    |
| 1,01                  | 0,07   | 0,08   | 0,04   | 0,06   | 0,07      | 0,08     | 0,07   | 0,08   | 0,08   | 0,07    |
| 1,18                  | 0,05   | 0,06   | 0,03   | 0,05   | 0,05      | 0,06     | 0,05   | 0,06   | 0,06   | 0,05    |
| 1,34                  | 0,03   | 0,04   | 0,02   | 0,03   | 0,03      | 0,04     | 0,03   | 0,04   | 0,04   | 0,03    |
| 1,51                  | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02      | 0,02     | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02    |
| 1,68                  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00      | 0,00     | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00    |

Tabella 5-3 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto destro, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Piedritto sinistro VBP 25% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |
|----------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1                     | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |  |  |
|                |                            |        |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |
| [MPa]          | [m]                        | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |  |  |
| 0              | 0,81                       | 1,30   | 0,86   | 1,13   | 0,61   | 0,84   | 0,82   | 1,00   | 1,44   | 0,62    |  |  |
| 0,17           | 0,26                       | 0,45   | 0,28   | 0,44   | 0,20   | 0,30   | 0,29   | 0,32   | 0,49   | 0,30    |  |  |
| 0,34           | 0,15                       | 0,26   | 0,14   | 0,23   | 0,13   | 0,17   | 0,18   | 0,18   | 0,25   | 0,18    |  |  |
| 0,5            | 0,11                       | 0,18   | 0,10   | 0,15   | 0,09   | 0,12   | 0,13   | 0,12   | 0,16   | 0,12    |  |  |
| 0,67           | 0,08                       | 0,14   | 0,08   | 0,10   | 0,07   | 0,08   | 0,10   | 0,10   | 0,12   | 0,09    |  |  |
| 0,84           | 0,07                       | 0,11   | 0,06   | 0,08   | 0,05   | 0,07   | 0,08   | 0,08   | 0,09   | 0,07    |  |  |
| 1,01           | 0,05                       | 0,09   | 0,05   | 0,06   | 0,04   | 0,05   | 0,06   | 0,06   | 0,08   | 0,06    |  |  |
| 1,18           | 0,04                       | 0,07   | 0,04   | 0,05   | 0,03   | 0,04   | 0,05   | 0,05   | 0,06   | 0,04    |  |  |
| 1,34           | 0,03                       | 0,04   | 0,02   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,03    |  |  |
| 1,51           | 0,01                       | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01    |  |  |
| 1,68           | 0,00                       | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00    |  |  |

Tabella 5-4 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto sinistro, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Calotta VBP 25% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |
|----------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1          | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |  |  |
| [MPa]          | [m]             | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |  |  |
| 0              | 0,53            | 1,32   | 1,08   | 1,25   | 1,21   | 1,29   | 1,13   | 1,24   | 1,32   | 0,79    |  |  |
| 0,17           | 0,17            | 0,47   | 0,36   | 0,45   | 0,38   | 0,40   | 0,41   | 0,45   | 0,44   | 0,35    |  |  |
| 0,34           | 0,11            | 0,27   | 0,20   | 0,27   | 0,22   | 0,23   | 0,24   | 0,26   | 0,24   | 0,21    |  |  |
| 0,5            | 0,07            | 0,18   | 0,13   | 0,17   | 0,14   | 0,16   | 0,16   | 0,18   | 0,16   | 0,14    |  |  |
| 0,67           | 0,05            | 0,13   | 0,09   | 0,12   | 0,10   | 0,13   | 0,11   | 0,13   | 0,12   | 0,11    |  |  |
| 0,84           | 0,04            | 0,11   | 0,07   | 0,10   | 0,07   | 0,10   | 0,08   | 0,10   | 0,10   | 0,08    |  |  |
| 1,01           | 0,04            | 0,08   | 0,06   | 0,08   | 0,05   | 0,08   | 0,07   | 0,08   | 0,08   | 0,07    |  |  |
| 1,18           | 0,03            | 0,06   | 0,04   | 0,06   | 0,04   | 0,06   | 0,05   | 0,06   | 0,06   | 0,05    |  |  |
| 1,34           | 0,02            | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,04   | 0,03    |  |  |
| 1,51           | 0,01            | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02    |  |  |
| 1,68           | 0               | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |  |  |

Tabella 5-5 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna della calotta, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.



Figura 5-5 Criterio di convergenza- confinamento piedritto destro, VBP 25%.



Figura 5-6 Criterio di convergenza- confinamento piedritto sinistro, VBP 25%.



Figura 5-7 Criterio di convergenza- confinamento calotta, VBP 25%.

Effettuando un confronto con la curva caratteristica del modello omogeneo equivalente associato alla matrice, è possibile osservare la validazione dell'ipotesi secondo cui, in generale, si assiste ad un incremento della resistenza del deposito con la presa in considerazione delle inclusioni, ma l'aumento appare poco marcato per un valore della VBP definito da un range di variazione tra il 20% ed il 30%. Gli andamenti degli spostamenti radiali di ogni singola estrazione esaminata ed i loro valori massimi a rilassamento totale, mettono in evidenza come la procedura random di generazione delle inclusioni nel dominio di riferimento, inserita nell'analisi proprio per simulare l'incertezza di modellazione di uno scavo in bimrock, possa produrre dei modelli favorevoli e per questo decrementare il valore di convergenza associato o viceversa più modelli con posizionamento dei blocchi sfavorevoli, che portano ad un aumento dello spostamento radiale.

Gli spostamenti ottenuti dal modello, sempre a rilassamento totale ed in assenza di rivestimento, sono stati analizzati considerando lo "stendimento" di una linea retta che parte da ciascuno dei tre punti caratteristici esaminati e termina in corrispondenza del bordo esterno

del modello, attraversando tutto il materiale eterogeneo oggetto di studio ed il *layer* esterno, avente le stesse proprietà meccaniche della matrice e imposto a comportamento elastico. L'andamento degli spostamenti è strettamente collegato alle configurazioni generate, con zone piatte indicanti la presenza delle inclusioni: la loro limitata percentuale volumetrica si ripercuote sul comportamento globale dell'ammasso, con andamento degli spostamenti globali di ciascuna estrazione prossimi a quelli della matrice nella zona di passaggio dal materiale plastico a quello elastico di contorno (*Figure 5-8, 5-9, 5-10*). La plasticizzazione della matrice tra le inclusioni influenza la risposta deformativa nell'intorno dello scavo, con un comportamento che tende verso quello relativo all'assenza di inclusioni. L'effetto dello scavo viene parzialmente risentito nella zona elastica.



Figura 5-8 Andamento degli spostamenti ottenuti da RS<sup>2</sup> dal punto di piedritto destro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo viene risentito nella zona elastica (VBP 25%).



Figura 5-9 Andamento degli spostamenti ottenuti da RS<sup>2</sup> dal punto di piedritto sinistro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: anche se non plasticizzato, l'effetto dello scavo viene risentito nella zona elastica (VBP 25%).



Figura 5-10 Andamento degli spostamenti ottenuti da RS<sup>2</sup> dal punto di calotta alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: anche se non plasticizzato, l'effetto dello scavo viene risentito nella zona elastica (VBP 25%).

### 5.3 Analisi con VBP = 40%

Riferendosi alle considerazioni svolte nel *Paragrafo 5.2*, i modelli con VBP = 40% non mostrano un netto miglioramento delle caratteristiche di stabilità del cavo rispetto al caso della presenza di inclusioni con VBP=25%. La percentuale areale delle inclusioni e la loro orientazione casuale non riescono ad essere totalmente efficaci in prossimità della zona di scavo.



Figura 5-11 Rappresentazione dell'andamento degli spostamenti di convergenza del contorno del cavo linearizzato, secondo ogni estrazione stocastica associata a VBP = 40%.

|                                 | I quadrante | II quadrante | III quadrante | IV quadrante |
|---------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Massimo spostamento radiale [m] | 1,30        | 1,25         | 1,25          | 1,34         |
| Minimo spostamento radiale [m]  | 0,39        | 0,40         | 0,34          | 0,35         |

Tabella 5-6 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le 10 estrazioni con VBP = 40%.

Anche in questo caso, gli spostamenti massimi avvengono in corrispondenza del primo e del quarto quadrante, con un valore inferiore rispetto a quello uniformemente distribuito associato alla matrice. Gli spostamenti minimi, invece, risultano essere inferiori rispetto al caso con VBP del 25%, indicando dunque un parziale effetto migliorativo delle condizioni in sito dovuto ad un incremento del numero di inclusioni, le quali, grazie alla loro orientazione casuale, influenzano lo sviluppo dell'andamento della rottura all'interno della matrice. Come nel caso di una VBP del 25%, la condizione ultima di resistenza viene raggiunta per taglio all'interno della matrice, con andamento tortuoso della rottura che segue la presenza delle inclusioni. A titolo di esempio si riporta in *Figura 5-12* la plasticizzazione di un modello appartenente a questo gruppo, i restanti risultati sono contenuti in *Allegato B*.



Figura 5-12 Rappresentazione dell'andamento della plasticizzazione nell'intorno del cavo; le inclusioni caratterizzano l'andamento tortuoso della rottura nella matrice (5° estrazione, VBP = 40%).

#### Spostamenti registrati

Di seguito vengono riportati i risultati, in termini di spostamenti radiali, del piedritto destro (*Tabella 5-7*), del piedritto sinistro (*Tabella 5-8*) e della calotta (*Tabella 5-9*) in funzione delle 10 estrazioni casuali effettuate, legati al differente valore di pressione interna di confinamento ( $P_i$ ) per simulare l'andamento tridimensionale dello scavo. Per ciascun caso, sono stati evidenziati il valore massimo e minimo di spostamento radiale riscontrati: anche in questo caso un forte incremento di deformazione nel passaggio dal penultimo all'ultimo step di rilassamento, dovuto principalmente ad una redistribuzione delle sollecitazioni intorno alle inclusioni rocciose nelle zone limitrofe ai tre punti considerati. Gli spostamenti radiali massimi sono inferiori rispetto al caso con VBP = 25%: tale aspetto è legato ad un parziale miglioramento delle caratteristiche meccaniche globali dell'ammasso.

|                | Piedritto destro VBP 40% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |
|----------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|
|                | Case 1                   | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |  |  |
| P <sub>i</sub> | [m]                      | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |  |  |
| 0              | 0,87                     | 0,81   | 0,87   | 0,76   | 0,97   | 0,72   | 0,81   | 0,53   | 0,92   | 0,68    |  |  |
| 0,17           | 0,33                     | 0,30   | 0,31   | 0,29   | 0,30   | 0,25   | 0,30   | 0,17   | 0,34   | 0,23    |  |  |
| 0,34           | 0,19                     | 0,17   | 0,16   | 0,17   | 0,17   | 0,14   | 0,17   | 0,10   | 0,18   | 0,13    |  |  |
| 0,51           | 0,13                     | 0,12   | 0,11   | 0,12   | 0,11   | 0,09   | 0,12   | 0,07   | 0,12   | 0,09    |  |  |
| 0,68           | 0,10                     | 0,09   | 0,08   | 0,09   | 0,08   | 0,06   | 0,09   | 0,06   | 0,09   | 0,07    |  |  |
| 0,85           | 0,08                     | 0,08   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,05   | 0,08   | 0,05   | 0,07   | 0,05    |  |  |
| 1,02           | 0,06                     | 0,06   | 0,05   | 0,06   | 0,05   | 0,04   | 0,06   | 0,04   | 0,06   | 0,04    |  |  |
| 1,19           | 0,05                     | 0,05   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,03    |  |  |
| 1,36           | 0,03                     | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,02    |  |  |
| 1,53           | 0,02                     | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |  |  |
| 1,7            | 0                        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |  |  |

Tabella 5-7 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto destro, VBP=40%. In

verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Piedritto sinistro VBP 40% |        |        |        |        |        |        |        |               |         |  |  |
|----------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------|--|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1                     | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9        | Case 10 |  |  |
| [MPa]          | [m]                        | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]           | [m]     |  |  |
| 0              | 1,00                       | 0,84   | 1,00   | 0,87   | 0,98   | 0,74   | 1,00   | 0,89   | 0,97          | 0,72    |  |  |
| 0,17           | 0,38                       | 0,33   | 0,30   | 0,32   | 0,30   | 0,26   | 0,33   | 0,33   | 0,33          | 0,22    |  |  |
| 0,34           | 0,22                       | 0,18   | 0,17   | 0,19   | 0,17   | 0,15   | 0,17   | 0,17   | 0,19          | 0,13    |  |  |
| 0,51           | 0,14                       | 0,12   | 0,12   | 0,12   | 0,11   | 0,11   | 0,11   | 0,12   | 0,13          | 0,09    |  |  |
| 0,68           | 0,10                       | 0,10   | 0,10   | 0,10   | 0,09   | 0,09   | 0,08   | 0,09   | 0,09          | 0,07    |  |  |
| 0,85           | 0,08                       | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0 <i>,</i> 08 | 0,06    |  |  |
| 1,02           | 0,06                       | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,05   | 0,06   | 0,06          | 0,04    |  |  |
| 1,19           | 0,05                       | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,05          | 0,03    |  |  |
| 1,36           | 0,03                       | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03          | 0,02    |  |  |
| 1,53           | 0,02                       | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02          | 0,01    |  |  |
| 1,7            | 0                          | 0      | 0,00   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0             | 0       |  |  |

Tabella 5-8 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto sinistro, VBP=40%. In

| verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente |
|---|
|---|

|                | Calotta VBP 40% |               |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |
|----------------|-----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1          | Case 2        | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |  |  |
| [MPa]          | [m]             | [m]           | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |  |  |
| 0              | 0,92            | 0,79          | 0,73   | 0,80   | 1,17   | 1,03   | 0,80   | 0,67   | 0,78   | 0,68    |  |  |
| 0,17           | 0,32            | 0,28          | 0,26   | 0,32   | 0,39   | 0,35   | 0,25   | 0,21   | 0,30   | 0,28    |  |  |
| 0,34           | 0,18            | 0,17          | 0,16   | 0,18   | 0,21   | 0,20   | 0,14   | 0,13   | 0,17   | 0,17    |  |  |
| 0,51           | 0,12            | 0,12          | 0,10   | 0,12   | 0,14   | 0,13   | 0,10   | 0,10   | 0,12   | 0,12    |  |  |
| 0,68           | 0,10            | 0,09          | 0,08   | 0,10   | 0,11   | 0,10   | 0,08   | 0,08   | 0,09   | 0,09    |  |  |
| 0,85           | 0,07            | 0 <i>,</i> 08 | 0,06   | 0,08   | 0,09   | 0,08   | 0,07   | 0,06   | 0,07   | 0,07    |  |  |
| 1,02           | 0,06            | 0,06          | 0,05   | 0,06   | 0,07   | 0,07   | 0,05   | 0,05   | 0,06   | 0,06    |  |  |
| 1,19           | 0,04            | 0,05          | 0,04   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04    |  |  |
| 1,36           | 0,03            | 0,03          | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,03    |  |  |
| 1,53           | 0,01            | 0,02          | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |  |  |
| 1,7            | 0               | 0             | 0,00   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |  |  |

Tabella 5-9 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna della calotta, VBP=40%. In verde ed in

arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.



Tabella 5-10 Criterio di convergenza- confinamento piedritto destro, VBP 40%.



Figura 5-13 Criterio di convergenza- confinamento piedritto sinistro, VBP 40%.



Figura 5-14 Criterio di convergenza- confinamento calotta, VBP 40%.

Effettuando un confronto con la curva caratteristica del modello omogeneo equivalente associato alla matrice, è possibile osservare la validazione dell'ipotesi secondo cui, in generale, si assiste ad un incremento della resistenza del deposito con la presa in considerazione delle inclusioni, in questo caso più marcato per un valore della VBP maggiore del range di variazione tra il 20% ed il 30%, che definisce la soglia limite per differenziarne il comportamento della sola matrice. Sussiste tuttavia ancora una forte variabilità nei risultati ottenuti, specialmente nella fase di rilassamento totale, dove la redistribuzione dello stato di sollecitazione indotto dallo scavo si ripercuote sulla rottura a taglio della matrice tra le inclusioni, con un incremento delle tortuosità associate alla propagazione della zona plastica tra i blocchi inseriti: questi ultimi generano un andamento degli spostamenti totali che si riducono e si differenziano in maniera netta dalla sola matrice nel passaggio dalla zona a comportamento plastico al dominio esterno definito meccanicamente elastico, come riscontrabile nelle *Figure (5-15, 5-16, 5-17)*.

Analizzando gli "stendimenti" rettilinei che partono da ciascuno dei tre punti caratteristici esaminati e terminano in corrispondenza del bordo esterno del modello, attraversando tutto il materiale eterogeneo oggetto di studio ed il *layer* esterno, l'andamento degli spostamenti è strettamente collegato alle configurazioni generate, con zone piatte indicanti la presenza delle inclusioni: un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del deposito, legate ad un incremento della percentuale volumetrica VBP, sono riscontrabili nella zona di transizione tra materiale plastico ed elastico, in quanto è possibile osservare una distinzione tra gli spostamenti globali delle estrazioni rispetto al caso di sola matrice matrice, con un effetto dello scavo che viene parzialmente risentito nella zona di transizione.



Figura 5-15 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di piedritto destro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce la sua influenza sulla zona elastica (VBP 40%).



Figura 5-16 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di piedritto sinistro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce la sua influenza sulla zona elastica



Figura 5-17 Andamento degli spostamenti ottenuti da RS<sup>2</sup> dal punto di calotta alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce la sua influenza sulla zona elastica (VBP 40%).

# 5.4 Analisi con VBP = 55%

Riferendosi alle considerazioni svolte nel *Paragrafo 5.2*, i modelli con VBP = 50% mostrano un miglioramento delle caratteristiche di stabilità del cavo rispetto al caso della presenza di inclusioni con VBP pari al 25% e 40%; la loro percentuale volumetrica ed orientazione casuale riesce ad essere parzialmente efficace in prossimità della zona di scavo.

|                         | I quadrante | II quadrante | III quadrante | IV quadrante |
|-------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Massima convergenza [m] | 0,90        | 0,79         | 0,72          | 0,83         |
| Minima convergenza [m]  | 0,16        | 0,09         | 0,10          | 0,14         |



Tabella 5-11 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le 10 estrazioni con VBP = 55%.

Figura 5-18 Rappresentazione dell'andamento degli spostamenti di convergenza del contorno del cavo linearizzato, secondo ogni estrazione stocastica associata a VBP = 55%.

Anche in questo caso, gli spostamenti massimi avvengono in corrispondenza del primo e del quarto quadrante, con un valore inferiore rispetto a quello uniformemente distribuito associato alla matrice ed ai due casi precedenti (VBP del 25% e 40%). Gli spostamenti minimi, invece, risultano essere inferiori rispetto ai casi con una VBP del 25% e del 40%, indicando dunque un buon effetto migliorativo delle condizioni in sito dovuto ad un incremento del numero delle inclusioni, le quali influenzano lo sviluppo dell'andamento della superficie di rottura all'interno della matrice, grazie alla loro orientazione casuale. Come nel caso di una VBP del 25%, la condizione ultima di resistenza viene raggiunta per taglio all'interno della matrice, con andamento della rottura di tipo tortuoso che segue la presenza delle inclusioni. A titolo di esempio si riporta in *Figura 5-19* la plasticizzazione di un modello appartenente a questo gruppo, i restanti risultati sono contenuti in *Allegato B*.



Figura 5-19 Rappresentazione dell'andamento della plasticizzazione nell'intorno del cavo; le inclusioni caratterizzano l'andamento tortuoso della rottura nella matrice (4° estrazione, VBP = 55%).

#### Spostamenti registrati

Di seguito vengono riportati i risultati, in termini di spostamenti radiali, del piedritto destro (*Tabella 5-12*), del piedritto sinistro (*Tabella 5-13*) e della calotta (*Tabella 5-14*) in funzione delle 10 estrazioni casuali effettuate, legati al differente valore di pressione interna di confinamento per simulare l'andamento tridimensionale dello scavo. Per ciascun caso, sono stati evidenziati il valore massimo e minimo di spostamento radiale riscontrati, dove anche in questo una maggiore variazione di deformazione si riscontra nel passaggio dal penultimo all'ultimo step di rilassamento, anche se con un valore meno marcato rispetto alle VBP del 25% e 40%: è evidente il cambiamento del comportamento meccanico del bimrock.

|                | Piedritto destro VBP 55% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|----------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P <sub>i</sub> | Case 1                   | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |
| [MPa]          | [m]                      | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |
| 0              | 0,29                     | 0,51   | 0,51   | 0,55   | 0,49   | 0,40   | 0,38   | 0,47   | 0,19   | 0,42    |
| 0,17           | 0,10                     | 0,20   | 0,20   | 0,21   | 0,18   | 0,17   | 0,15   | 0,18   | 0,10   | 0,16    |
| 0,34           | 0,06                     | 0,12   | 0,11   | 0,12   | 0,10   | 0,10   | 0,09   | 0,11   | 0,07   | 0,09    |
| 0,52           | 0,05                     | 0,08   | 0,09   | 0,09   | 0,07   | 0,08   | 0,07   | 0,07   | 0,05   | 0,06    |
| 0,69           | 0,04                     | 0,06   | 0,07   | 0,07   | 0,06   | 0,06   | 0,05   | 0,05   | 0,04   | 0,05    |
| 0,86           | 0,03                     | 0,05   | 0,06   | 0,06   | 0,05   | 0,05   | 0,04   | 0,04   | 0,03   | 0,04    |
| 1,03           | 0,02                     | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03    |
| 1,2            | 0,02                     | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,02   | 0,02    |
| 1,38           | 0,01                     | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,01    |
| 1,55           | 0,01                     | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |
| 1,72           | 0                        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |

Tabella 5-12 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto destro, VBP=55%. In

verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Piedritto sinistro VBP 55% |        |        |        |        |        |        |               |        |         |
|----------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|---------|
| P <sub>i</sub> | Case 1                     | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8        | Case 9 | Case 10 |
| [MPa]          | [m]                        | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]           | [m]    | [m]     |
| 0              | 0,51                       | 0,45   | 0,61   | 0,47   | 0,67   | 0,10   | 0,44   | 0,33          | 0,25   | 0,59    |
| 0,17           | 0,19                       | 0,15   | 0,21   | 0,17   | 0,25   | 0,07   | 0,19   | 0,12          | 0,10   | 0,21    |
| 0,34           | 0,12                       | 0,09   | 0,11   | 0,10   | 0,14   | 0,05   | 0,12   | 0 <i>,</i> 08 | 0,06   | 0,11    |
| 0,52           | 0,09                       | 0,06   | 0,08   | 0,07   | 0,10   | 0,04   | 0,09   | 0,06          | 0,05   | 0,08    |
| 0,69           | 0,07                       | 0,04   | 0,06   | 0,06   | 0,07   | 0,03   | 0,07   | 0,05          | 0,04   | 0,06    |
| 0,86           | 0,06                       | 0,03   | 0,05   | 0,05   | 0,06   | 0,03   | 0,06   | 0,04          | 0,03   | 0,05    |
| 1,03           | 0,05                       | 0,02   | 0,04   | 0,04   | 0,05   | 0,02   | 0,04   | 0,03          | 0,02   | 0,04    |
| 1,2            | 0,04                       | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,02   | 0,03   | 0,02          | 0,02   | 0,03    |
| 1,38           | 0,02                       | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02          | 0,01   | 0,02    |
| 1,55           | 0,01                       | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01          | 0,01   | 0,01    |
| 1,72           | 0                          | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0             | 0      | 0       |

Tabella 5-13 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto sinistro, VBP=55%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Calotta VBP 55% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|----------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P <sub>i</sub> | Case 1          | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |
| [MPa]          | [m]             | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |
| 0              | 0,56            | 0,56   | 0,53   | 0,57   | 0,43   | 0,17   | 0,28   | 0,53   | 0,38   | 0,44    |
| 0,17           | 0,23            | 0,24   | 0,20   | 0,22   | 0,18   | 0,09   | 0,13   | 0,21   | 0,15   | 0,16    |
| 0,34           | 0,13            | 0,13   | 0,11   | 0,13   | 0,11   | 0,06   | 0,08   | 0,12   | 0,09   | 0,09    |
| 0,52           | 0,09            | 0,08   | 0,07   | 0,07   | 0,08   | 0,05   | 0,06   | 0,08   | 0,06   | 0,07    |
| 0,69           | 0,07            | 0,06   | 0,06   | 0,05   | 0,06   | 0,04   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05    |
| 0,86           | 0,06            | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,05   | 0,03   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04    |
| 1,03           | 0,05            | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03    |
| 1,2            | 0,03            | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02    |
| 1,38           | 0,02            | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02    |
| 1,55           | 0,01            | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |
| 1,72           | 0               | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |

Tabella 5-14 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto sinistro, VBP=55%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.



Figura 5-20 Criterio di convergenza- confinamento piedritto destro, VBP 55%.



Figura 5-21 Criterio di convergenza- confinamento piedritto destro, VBP 55%.



Figura 5-22 Criterio di convergenza- confinamento calotta, VBP 55%.

Effettuando un confronto con la curva caratteristica del modello omogeneo equivalente associato alla matrice, è possibile osservare un incremento della resistenza del deposito con la presa in considerazione delle inclusioni, in questo caso con un marcato miglioramento per un valore di VBP del 55%. I blocchi rocciosi annegati nella matrice delineano una buona risposta del materiale per livelli di rilassamento abbastanza elevati. Rimane però una forte variabilità della soluzione per la situazione ultima di scavo, cioè in assenza di pressione interna: le inclusioni, avvicinandosi al cavo, redistribuiscono lo stato di sollecitazione indotto, causando un incremento della deformazione a taglio nelle zone di contatto blocco matrice, con conseguente plasticizzazione caratterizzata da un andamento tortuoso strettamente connesso alla posizione ed orientazione dei blocchi. Quanto appena descritto trova riscontro nelle *Figure* seguenti (*5-23, 5-24, 5-25*): analizzando gli "stendimenti" rettilinei che partono da ciascuno dei tre punti caratteristici considerati e terminano in corrispondenza del bordo esterno del modello, attraversando tutto il materiale oggetto di studio ed il *layer* esterno, l'andamento degli spostamenti è strettamente collegato alle

configurazioni generate, con zone piatte indicanti la presenza delle inclusioni: la VBP delle inclusioni riduce in maniera marcata il valore dello spostamento totale nel passaggio dalla zona plastica al layer elastico esterno del modello.



Figura 5-23 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di piedritto destro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce notevolmente la sua influenza sulla zona elastica (VBP 55%).



Figura 5-24 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase2 dal punto di piedritto sinistro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce notevolmente la sua influenza sulla zona elastica (VBP 55%).



Figura 5-25 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase2 dal punto di calotta alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo riduce notevolmente la sua influenza sulla zona elastica (VBP 55%).

### 5.5 Analisi con VBP = 70%

Riferendosi alle considerazioni svolte nel *Paragrafo 5.2*, i modelli con VBP = 70% mostrano un netto miglioramento delle caratteristiche di stabilità del cavo rispetto al caso della presenza di inclusioni con VBP = 25%. Il grado di presenza areale delle inclusioni e la loro orientazione casuale riesce ad essere efficace in prossimità della zona di scavo.



Figura 5-26 Rappresentazione dell'andamento degli spostamenti di convergenza del contorno del cavo linearizzato, secondo ogni estrazione stocastica associata a VBP = 70%.

Gli spostamenti massimi avvengono in corrispondenza del secondo e terzo quadrante, con un valore nettamente inferiore rispetto a quello uniformemente distribuito associato alla sola presenza della matrice, nonché ai casi precedentemente analizzati. Gli spostamenti minimi
rispecchiano un buon miglioramento delle caratteristiche meccaniche del deposito, in quanto le inclusioni rappresentano un forte punto di appiattimento del grado di convergenza associato allo scavo.

|                         | l quadrante | II quadrante | III quadrante | IV quadrante |
|-------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Massima convergenza [m] | 0,35        | 0,46         | 0,36          | 0,33         |
| Minima convergenza [m]  | 0,07        | 0,08         | 0,07          | 0,06         |

Tabella 5-15 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le 10 estrazioni con VBP = 70%.

Come tutte le altre configurazioni di VBP analizzate, la condizione ultima di resistenza viene raggiunta a taglio all'interno della matrice, con andamento tortuoso che segue la presenza delle inclusioni. A titolo di esempio si riporta in *Figura 5-19* la plasticizzazione di un modello appartenente a questo gruppo, i restanti risultati sono contenuti in *Allegato B*.



Figura 5-27 Rappresentazione dell'andamento della plasticizzazione nell'intorno del cavo; le inclusioni caratterizzano la rottura tortuosa del materiale matrice (10° estrazione, VBP = 70%).

## Spostamenti registrati

Di seguito vengono riportati i risultati, in termini di spostamenti radiali, del piedritto destro (*Tabella 5-16*), del piedritto sinistro (*Tabella 5-17*) e della calotta (*Tabella 5-18*) in funzione delle 10 estrazioni casuali effettuate, legati al differente valore di pressione interna di confinamento per simulare l'andamento tridimensionale dello scavo. Per ciascun caso, sono stati evidenziati il valore massimo e minimo di convergenza riscontrati. Anche in questo caso la variazione più significativa di deformazione avviene nel passaggio dal penultimo all'ultimo step di rilassamento, dovuto principalmente ad una redistribuzione delle sollecitazioni intorno alle inclusioni rocciose, nelle zone limitrofe ai tre punti considerati. I valori di spostamento radiale mostrano un buon miglioramento delle caratteristiche globali dell'ammasso facendo riferimento al confronto con la curva di convergenza associata al modello omogeneo della matrice, come osservabile in *Figure 5-28, 5-29, 5-30*.

|                |        | Piedritto destro VBP 70% |        |        |        |        |        |        |        |         |  |
|----------------|--------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1 | Case 2                   | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |  |
| [MPa]          | [m]    | [m]                      | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |  |
| 0              | 0,26   | 0,19                     | 0,13   | 0,10   | 0,29   | 0,25   | 0,31   | 0,22   | 0,14   | 0,19    |  |
| 0,17           | 0,11   | 0,09                     | 0,08   | 0,05   | 0,14   | 0,11   | 0,14   | 0,11   | 0,07   | 0,11    |  |
| 0,35           | 0,07   | 0,06                     | 0,06   | 0,04   | 0,08   | 0,07   | 0,09   | 0,07   | 0,04   | 0,07    |  |
| 0,52           | 0,05   | 0,04                     | 0,04   | 0,03   | 0,05   | 0,04   | 0,06   | 0,05   | 0,03   | 0,05    |  |
| 0,7            | 0,04   | 0,03                     | 0,04   | 0,02   | 0,04   | 0,03   | 0,05   | 0,04   | 0,02   | 0,04    |  |
| 0,87           | 0,03   | 0,02                     | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,02   | 0,03    |  |
| 1,04           | 0,03   | 0,02                     | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,02    |  |
| 1,22           | 0,02   | 0,01                     | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,02    |  |
| 1,39           | 0,01   | 0,01                     | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |  |
| 1,57           | 0,01   | 0,00                     | 0,01   | 0,00   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,00   | 0,01    |  |
| 1,74           | 0,00   | 0,00                     | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00    |  |

Tabella 5-16 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto destro, VBP=70%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Piedritto sinistro VBP 70% |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|----------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P <sub>i</sub> | Case 1                     | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 6 | Case 7 | Case 8 | Case 9 | Case 10 |
| [MPa]          | [m]                        | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]    | [m]     |
| 0              | 0,22                       | 0,09   | 0,18   | 0,11   | 0,08   | 0,10   | 0,14   | 0,13   | 0,22   | 0,13    |
| 0,17           | 0,11                       | 0,05   | 0,09   | 0,05   | 0,04   | 0,05   | 0,06   | 0,07   | 0,12   | 0,07    |
| 0,35           | 0,07                       | 0,03   | 0,06   | 0,04   | 0,03   | 0,04   | 0,05   | 0,04   | 0,07   | 0,05    |
| 0,52           | 0,05                       | 0,02   | 0,04   | 0,03   | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,04   | 0,05   | 0,04    |
| 0,7            | 0,04                       | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,03    |
| 0,87           | 0,03                       | 0,02   | 0,03   | 0,02   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,02    |
| 1,04           | 0,03                       | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,02    |
| 1,22           | 0,02                       | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,01    |
| 1,39           | 0,01                       | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    |
| 1,57           | 0,01                       | 0,00   | 0,01   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,01   | 0,00    |
| 1,74           | 0                          | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |

Tabella 5-17 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna del piedritto sinistro, VBP=70%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.

|                | Calotta VBP 70% |  |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|----------------|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| P <sub>i</sub> | Case 1          | Case 1 Case 2 Case 3 Case 4 Case 5 Case 6 Case 7 Case 8 Case 9 Case 10 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| [MPa]          | [m]             | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  |  |
| 0              | 0,12            | 0,20   | 0,08 | 0,19 | 0,16 | 0,10 | 0,26 | 0,14 | 0,18 | 0,21 |  |
| 0,17           | 0,06            | 0,10   | 0,05 | 0,11 | 0,07 | 0,05 | 0,10 | 0,08 | 0,08 | 0,11 |  |
| 0,35           | 0,05            | 0,06   | 0,03 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,07 |  |
| 0,52           | 0,04            | 0,05   | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |  |
| 0,7            | 0,03            | 0,04   | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,04 |  |
| 0,87           | 0,02            | 0,03   | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |  |
| 1,04           | 0,02            | 0,02   | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |  |
| 1,22           | 0,01            | 0,02   | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |  |
| 1,39           | 0,01            | 0,01   | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |  |
| 1,57           | 0,00            | 0,01   | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |  |
| 1,74           | 0               | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |  |

 1,74
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0

 Tabella 5-18 Convergenza di ogni estrazione in funzione della pressione di confinamento interna della calotta, VBP=70%. In verde ed

in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo spostamento a convergenza rispettivamente.



Figura 5-28 Criterio di convergenza- confinamento piedritto destro, VBP 70%.



Figura 5-29 Criterio di convergenza- confinamento piedritto sinistro, VBP 70%.



Figura 5-30 Criterio di convergenza- confinamento calotta, VBP 70%.

Effettuando un confronto con la curva caratteristica del modello omogeneo equivalente associato alla matrice, è possibile osservare un incremento della resistenza del deposito con la presa in considerazione delle inclusioni, in questo caso con un ottimo miglioramento per un valore di VBP del 70%. I livelli di rilassamento del materiale sono fortemente influenzati dalla disposizione ed orientazione delle inclusioni rocciose all'interno della matrice, con la variabilità delle convergenze a detensionamento totale diminuita. A causa della realizzazione dello scavo, avviene una modifica della posizione reciproca delle inclusioni, che generano una rottura a taglio nella matrice, che raggiunge un'estensione limitata dal contorno della galleria. Quanto appena descritto trova riscontro nelle *Figure* seguenti (*5-31, 5-32, 5-33*): analizzando gli "stendimenti" rettilinei che partono da ciascuno dei tre punti caratteristici considerati e terminano in corrispondenza del bordo esterno del modello, l'andamento degli spostamenti è strettamente collegato alle configurazioni generate, con zone piatte indicanti

la presenza delle inclusioni; la VBP conduce ad un valore di spostamento quasi nullo nel passaggio dalla zona plastica al layer elastico esterno del modello.



Figura 5-31 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di piedritto destro alla fine del modello; la linea verticaledelimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo non influenza la zona elastica (VBP 70%).



Figura 5-32 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di piedritto sinistro alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo non influenza la zona elastica (VBP 70%).



Figura 5-33 Andamento degli spostamenti ottenuti da Phase<sup>2</sup> dal punto di calotta alla fine del modello; la linea verticale delimita il passaggio dalla zona in cui si ha la presenza di materiale plastico a quella in cui il materiale di contorno è elastico: l'effetto dello scavo non influenza la zona elastica (VBP 70%).

# 5.6 Influenza della VBP sulla convergenza del tunnel

Per la valutazione dell'influenza che la percentuale volumetrica delle inclusioni VBP ha nei confronti della stabilità del cavo in termini di convergenza, i dati ottenuti dal modello omogeneo della matrice e dei tre punti caratteristici esaminati sono stati riassunti in *Tabella 5-19, 5-20, 5-21, 5-22*, esprimendo i parametri statistici in termini di media, mediana e deviazione standard calcolati per il piedritto destro, sinistro e calotta relativi alle 10 estrazioni effettuate per ciascuna VBP. L'analisi statistica in termini di media, mediana e deviazione standard per ogni percentuale volumetrica con orientazione e disposizione casuale delle inclusioni, permette di trarre alcune considerazioni significative: con l'incremento della percentuale volumetrica del deposito, per i tre punti caratteristici si ha una diminuzione dello spostamento radiale in funzione del rilassamento; le medie e mediane manifestano un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del deposito, con un valore della deviazione standard decrescente con l'incremento della VBP, indicante dunque una minor dispersione dei risultati ottenuti in termini di spostamento associato.

| VBP 0% (Matrice)        |                         |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Spostamento radiale [m] |  |  |  |  |  |  |  |
| 0                       | 1,58                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,16                    | 0,59                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,33                    | 0,34                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,49                    | 0,22                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,66                    | 0,17                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,82                    | 0,13                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,99                    | 0,11                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,15                    | 0,08                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,32                    | 0,05                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,48                    | 0,03                    |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,65                    | 0,00                    |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 5-19 Curva caratteristica del cavo al variare della pressione di confinamento imposta, VBP = 0%.

|                | <u>۱</u> | /BP 25% |         |                | VBP 40% |       |         |
|----------------|----------|---------|---------|----------------|---------|-------|---------|
| P <sub>i</sub> | Mediana  | Media   | Dev.Std | P <sub>i</sub> | Mediana | Media | Dev.Std |
| [MPa]          | [m]      | [m]     | [-]     | [MPa]          | [m]     | [m]   | [-]     |
| 0              | 0,85     | 0,94    | 0,27    | 0              | 0,93    | 0,90  | 0,11    |
| 0,17           | 0,30     | 0,33    | 0,09    | 0,17           | 0,33    | 0,31  | 0,04    |
| 0,34           | 0,18     | 0,19    | 0,05    | 0,34           | 0,17    | 0,18  | 0,02    |
| 0,5            | 0,12     | 0,13    | 0,03    | 0,51           | 0,12    | 0,12  | 0,01    |
| 0,67           | 0,09     | 0,10    | 0,02    | 0,68           | 0,09    | 0,09  | 0,01    |
| 0,84           | 0,07     | 0,08    | 0,02    | 0,85           | 0,07    | 0,07  | 0,01    |
| 1,01           | 0,06     | 0,06    | 0,01    | 1,02           | 0,06    | 0,06  | 0,01    |
| 1,18           | 0,04     | 0,05    | 0,01    | 1,19           | 0,04    | 0,04  | 0,00    |
| 1,34           | 0,03     | 0,03    | 0,01    | 1,36           | 0,03    | 0,03  | 0,00    |
| 1,51           | 0,01     | 0,02    | 0,00    | 1,53           | 0,01    | 0,01  | 0,00    |
| 1,68           | 0        | 0       | 0       | 1,7            | 0       | 0     | 0       |

## Piedritto destro

|                | ١       | /BP 55% |         |                | \       | /BP 70% |         |
|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
| P <sub>i</sub> | Mediana | Media   | Dev.Std | P <sub>i</sub> | Mediana | Media   | Dev.Std |
| [MPa]          | [m]     | [m]     | [-]     | [MPa]          | [m]     | [m]     | [-]     |
| 0              | 0,47    | 0,44    | 0,17    | 0              | 0,13    | 0,14    | 0,05    |
| 0,17           | 0,19    | 0,16    | 0,06    | 0,17           | 0,07    | 0,07    | 0,03    |
| 0,34           | 0,11    | 0,10    | 0,03    | 0,35           | 0,05    | 0,05    | 0,01    |
| 0,52           | 0,08    | 0,07    | 0,02    | 0,52           | 0,04    | 0,04    | 0,01    |
| 0,69           | 0,06    | 0,06    | 0,02    | 0,7            | 0,03    | 0,03    | 0,01    |
| 0,86           | 0,05    | 0,04    | 0,01    | 0,87           | 0,02    | 0,02    | 0,01    |
| 1,03           | 0,04    | 0,04    | 0,01    | 1,04           | 0,02    | 0,02    | 0,01    |
| 1,2            | 0,03    | 0,03    | 0,01    | 1,22           | 0,01    | 0,01    | 0,00    |
| 1,38           | 0,02    | 0,02    | 0,01    | 1,39           | 0,01    | 0,01    | 0,00    |
| 1,55           | 0,01    | 0,01    | 0,00    | 1,57           | 0,00    | 0,00    | 0,00    |
| 1,72           | 0       | 0       | 0       | 1,74           | 0       | 0       | 0       |

Tabella 5-20 Parametri statistici per la convergenza del piedritto destro, valutati per ciascuna VBP e per un rilassamento del

materiale crescente.

|                       | V       | /BP 25% |         |                | VBP 40% |       |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|----------------|---------|-------|---------|
| <b>P</b> <sub>i</sub> | Mediana | Media   | Dev.Std | P <sub>i</sub> | Mediana | Media | Dev.Std |
| [MPa]                 | [m]     | [m]     | [-]     | [MPa]          | [m]     | [m]   | [-]     |
| 0                     | 1,17    | 1,12    | 0,26    | 0              | 0,81    | 0,79  | 0,13    |
| 0,17                  | 0,38    | 0,37    | 0,07    | 0,17           | 0,3     | 0,28  | 0,05    |
| 0,34                  | 0,21    | 0,21    | 0,04    | 0,34           | 0,17    | 0,16  | 0,03    |
| 0,5                   | 0,15    | 0,15    | 0,03    | 0,51           | 0,11    | 0,11  | 0,02    |
| 0,67                  | 0,11    | 0,11    | 0,02    | 0,68           | 0,09    | 0,08  | 0,01    |
| 0,84                  | 0,09    | 0,09    | 0,01    | 0,85           | 0,07    | 0,07  | 0,01    |
| 1,01                  | 0,07    | 0,07    | 0,01    | 1,02           | 0,05    | 0,05  | 0,01    |
| 1,18                  | 0,05    | 0,05    | 0,01    | 1,19           | 0,04    | 0,04  | 0,01    |
| 1,34                  | 0,03    | 0,04    | 0,01    | 1,36           | 0,03    | 0,03  | 0       |
| 1,51                  | 0,02    | 0,02    | 0       | 1,53           | 0,01    | 0,01  | 0       |
| 1,68                  | 0       | 0       | 0       | 1,7            | 0       | 0     | 0       |

## Piedritto sinistro

|                | ۱.<br>N | /BP 55% |         |                | ١       | /BP 70% |         |
|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
| P <sub>i</sub> | Mediana | Media   | Dev.Std | P <sub>i</sub> | Mediana | Media   | Dev.Std |
| [MPa]          | [m]     | [m]     | [-]     | [MPa]          | [m]     | [m]     | [-]     |
| 0              | 0,45    | 0,42    | 0,11    | 0              | 0,2     | 0,21    | 0,07    |
| 0,17           | 0,18    | 0,17    | 0,04    | 0,17           | 0,11    | 0,1     | 0,03    |
| 0,34           | 0,1     | 0,1     | 0,02    | 0,35           | 0,07    | 0,06    | 0,01    |
| 0,52           | 0,07    | 0,07    | 0,01    | 0,52           | 0,05    | 0,04    | 0,01    |
| 0,69           | 0,05    | 0,05    | 0,01    | 0,7            | 0,04    | 0,03    | 0,01    |
| 0,86           | 0,04    | 0,04    | 0,01    | 0,87           | 0,03    | 0,03    | 0,01    |
| 1,03           | 0,03    | 0,03    | 0,01    | 1,04           | 0,02    | 0,02    | 0,01    |
| 1,2            | 0,03    | 0,03    | 0,01    | 1,22           | 0,02    | 0,02    | 0       |
| 1,38           | 0,02    | 0,02    | 0       | 1,39           | 0,01    | 0,01    | 0       |
| 1,55           | 0,01    | 0,01    | 0       | 1,57           | 0,01    | 0,01    | 0       |
| 1,72           | 0       | 0       | 0       | 1,74           | 0       | 0       | 0       |

Tabella 5-21 Parametri statistici per la convergenza del piedritto sinistro, valutati per ciascuna VBP e per un rilassamento del

materiale crescente.

|       | <u>۱</u> | /BP 25% |         |       | VBP 40% |       |         |  |
|-------|----------|---------|---------|-------|---------|-------|---------|--|
|       | Mediana  | Media   | Dev.Std |       | Mediana | Media | Dev.Std |  |
| [MPa] | [m]      | [m]     | [-]     | [MPa] | [m]     | [m]   | [-]     |  |
| 0     | 1,23     | 1,12    | 0,26    | 0     | 0,79    | 0,84  | 0,16    |  |
| 0,17  | 0,40     | 0,39    | 0,09    | 0,17  | 0,29    | 0,30  | 0,05    |  |
| 0,34  | 0,23     | 0,22    | 0,05    | 0,34  | 0,17    | 0,17  | 0,02    |  |
| 0,5   | 0,16     | 0,15    | 0,03    | 0,51  | 0,12    | 0,12  | 0,01    |  |
| 0,67  | 0,12     | 0,11    | 0,02    | 0,68  | 0,09    | 0,09  | 0,01    |  |
| 0,84  | 0,09     | 0,09    | 0,02    | 0,85  | 0,07    | 0,07  | 0,01    |  |
| 1,01  | 0,07     | 0,07    | 0,02    | 1,02  | 0,06    | 0,06  | 0,01    |  |
| 1,18  | 0,05     | 0,05    | 0,01    | 1,19  | 0,04    | 0,04  | 0,00    |  |
| 1,34  | 0,03     | 0,03    | 0,01    | 1,36  | 0,03    | 0,03  | 0,00    |  |
| 1,51  | 0,02     | 0,02    | 0,00    | 1,53  | 0,01    | 0,01  | 0,00    |  |
| 1,68  | 0        | 0       | 0       | 1,7   | 0       | 0     | 0       |  |

## Calotta

| _     | \<br>\  | /BP 55% |         |       | \       | /BP 70% |         |
|-------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|
|       | Mediana | Media   | Dev.Std |       | Mediana | Media   | Dev.Std |
| [MPa] | [m]     | [m]     | [-]     | [MPa] | [m]     | [m]     | [-]     |
| 0     | 0,48    | 0,45    | 0,13    | 0     | 0,17    | 0,16    | 0,06    |
| 0,17  | 0,19    | 0,18    | 0,05    | 0,17  | 0,08    | 0,08    | 0,02    |
| 0,34  | 0,11    | 0,11    | 0,02    | 0,35  | 0,06    | 0,05    | 0,01    |
| 0,52  | 0,07    | 0,07    | 0,01    | 0,52  | 0,04    | 0,04    | 0,01    |
| 0,69  | 0,05    | 0,05    | 0,01    | 0,7   | 0,03    | 0,03    | 0,01    |
| 0,86  | 0,04    | 0,04    | 0,01    | 0,87  | 0,03    | 0,03    | 0,01    |
| 1,03  | 0,03    | 0,03    | 0,01    | 1,04  | 0,02    | 0,02    | 0,00    |
| 1,2   | 0,02    | 0,02    | 0,00    | 1,22  | 0,02    | 0,02    | 0,00    |
| 1,38  | 0,02    | 0,02    | 0,00    | 1,39  | 0,01    | 0,01    | 0,00    |
| 1,55  | 0,01    | 0,01    | 0,00    | 1,57  | 0,01    | 0,01    | 0,00    |
| 1,72  | 0       | 0       | 0       | 1,74  | 0       | 0       | 0       |

Tabella 5-22 Parametri statistici per la convergenza della calotta, valutati per ciascuna VBP e per un rilassamento del materiale

crescente.

Al fine di valutare il grado di convergenza del cavo in funzione delle differenti VBP associate ad un preciso decremento percentuale della tensione agente in situ, si può far riferimento ad un indice assoluto della variabilità di una successione di dati, il campo di variazione, il quale rappresenta la differenza tra il valore massimo ed il valore minimo dei dati registrati, costituendo così l'ampiezza dell'intervallo degli stessi. Basandosi su tale informazione, si riportano i valori di spostamento radiale associati ai 3 punti caratteristici esaminati a rilassamento totale, in funzione della VBP, dove è possibile notare la variabilità dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche (*Figure 5-34, 5-35, 5-36*): è riscontrabile come una VBP del 25% sia estremamente influenzata dal posizionamento spaziale delle inclusioni, con valori minimi che si sovrappongono alle soluzioni ottenute con una percentuale volumetrica del 40% e del 55%, come nel caso del piedritto sinistro e della calotta.



Figura 5-34 Range di variazione dello spostamento radiale del piedritto destro a rilassamento finale del piedritto destro, in funzione della VBP.



Figura 5-35 Range di variazione dello spostamento radiale del piedritto sinistro a rilassamento finale, in funzione della VBP.



Figura 5-36 Range di variazione dello spostamento radiale della calotta a rilassamento finale, in funzione della VBP.

Per una migliore rappresentazione dei risultati, funzione della diminuzione della pressione interna di confinamento e della VBP, si fa ricorso allo scarto quadratico medio, definito come indice di variabilità assoluta di una distribuzione casuale. In particolare, considerando i valori medi associati ai 10 modelli di convergenza-confinamento per ciascuna VBP e per ognuno dei tre punti caratteristici, basati su differenti steps di diminuzione di pressione interna, si esprime una fascia di variazione dello spostamento radiale, ottenuta aggiungendo e sottraendo alla media delle 10 estrazioni il valore della deviazione standard associata (*Figura 5-37, 5-38, 5-39*) : per una maggior comprensione della rappresentazione, le fasce verdi e magenta indicano rispettivamente le fasce di variazione associate alla VBP del 70% e del 55%, mentre le zone con un riempimento tratteggiato in marrone e azzurrino identificano le VBP del 40% e del 25%

Si evince come la percentuale volumetrica del 25% sia estremamente influenzata dal posizionamento ed orientazione delle inclusioni nel dominio di riferimento, con valori di convergenza che risultano essere sempre inferiori rispetto al caso dell'assenza delle inclusioni, ma ampiezza della fascia maggiore. La soluzione con una VBP pari al 40% esprime un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del deposito, ma ancora non sufficiente ad incrementare in modo adeguato le sue proprietà geotecniche, poiché la fascia di spostamento radiale ottenuta tende a sovrapporsi parzialmente o totalmente, come nel caso del piedritto sinistro, alla fascia di competenza della VBP del 25%. Il miglioramento meccanico del deposito, associato ad un'inferiore convergenza del cavo, è apprezzabile per le VBP del 55% e del 70%, dove l'andamento del criterio di convergenza-confinamento assume uno sviluppo quasi lineare, che viene mantenuto tale fino ad un valore del rilassamento del materiale compreso tra il 60% ed il 70%; basandosi su questa analisi, le inclusioni e la loro VBP influenzano l'andamento della plasticizzazione del materiale debole (matrice): un incremento della percentuale volumetrica dei clasti competenti porta ad un decremento dello spostamento radiale. Dalle rappresentazioni è evidente come, incrementando il valore della VBP del deposito oltre il valore di soglia di analisi imposto pari al 70%, l'ammasso bimrock esaminato tenderebbe a comportarsi come una formazione

rocciosa fortemente fratturata, generando pertanto meno problematiche in condizioni progettuali, con uno studio di stabilità del cavo trattabile secondo metodi più semplificati.



Figura 5-37 Confronto tra le fasce di variazione associate alle 10 estrazioni effettuate per ciascuna VBP con la convergenza della sola matrice, piedritto destro.



Analisi di scavi in sotterraneo in formazioni complesse

#### Figura 5-38 Confronto tra le fasce di variazione associate alle 10 estrazioni effettuate per ciascuna VBP con la convergenza della sola matrice, piedritto sinistro.



Figura 5-39 Confronto tra le fasce di variazione associate alle 10 estrazioni effettuate per ciascuna VBP con la convergenza della sola matrice, calotta.

In via cautelativa, per ottenere la percentuale di differenziazione della convergenza esaminata per via statistica rispetto a quella ottenuta con una VBP pari allo 0%, si fa riferimento alla distanza tra il limite superiore di ogni singola fascia individuata (media più deviazione standard), associata ad una singola VBP e ad una diminuzione per step della pressione di confinamento interna, con la curva di convergenza-confinamento della matrice.

|                  |         | Variazione pied | lritto destro [%] |         |
|------------------|---------|-----------------|-------------------|---------|
| Rilassamento [%] | VBP 25% | VBP 40%         | VBP 55%           | VBP 70% |
| 100              | 12,32   | 41,45           | 66,01             | 82,32   |
| 90               | 24,85   | 43,84           | 65,61             | 78,26   |
| 80               | 24,02   | 44,64           | 64,85             | 77,08   |
| 70               | 23,47   | 43,86           | 63,15             | 75,69   |
| 60               | 22,68   | 42,31           | 61,07             | 74,43   |
| 50               | 22,50   | 41,48           | 60,77             | 73,92   |
| 40               | 22,76   | 41,81           | 61,19             | 74,14   |
| 30               | 22,63   | 41,86           | 61,38             | 74,20   |
| 20               | 22,24   | 41,84           | 61,46             | 74,24   |
| 10               | 20,78   | 41,73           | 61,55             | 74,30   |
| 0                | 0       | 0               | 0                 | 0       |

Tabella 5-23 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.

|                  | Variazione piedritto sinistro [%] |         |         |         |
|------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| Rilassamento [%] | VBP 25%                           | VBP 40% | VBP 55% | VBP 70% |
| 100              | 12,44                             | 36,22   | 60,78   | 87,87   |
| 90               | 28,09                             | 40,50   | 62,70   | 83,80   |
| 80               | 30,52                             | 40,65   | 61,92   | 81,49   |
| 70               | 30,27                             | 41,14   | 59,28   | 79,38   |
| 60               | 29,93                             | 40,74   | 57,35   | 77,63   |
| 50               | 29,28                             | 39,81   | 56,59   | 77,18   |
| 40               | 29,56                             | 39,86   | 56,80   | 77,37   |
| 30               | 29,71                             | 39,85   | 56,76   | 77,41   |
| 20               | 29,99                             | 39,79   | 56,65   | 77,42   |
| 10               | 30,74                             | 39,58   | 56,20   | 77,47   |
| 0                | 0                                 | 0       | 0       | 0       |

Tabella 5-24 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.

|                  | Variazione calotta [%] |         |         |         |
|------------------|------------------------|---------|---------|---------|
| Rilassamento [%] | VBP 25%                | VBP 40% | VBP 55% | VBP 70% |
| 100              | 22,84                  | 36,56   | 63,06   | 85,86   |
| 90               | 28,09                  | 41,68   | 61,23   | 82,55   |
| 80               | 30,52                  | 42,78   | 61,61   | 80,39   |
| 70               | 30,27                  | 42,26   | 63,18   | 78,14   |
| 60               | 29,93                  | 39,28   | 62,99   | 76,98   |
| 50               | 29,28                  | 38,50   | 62,62   | 76,53   |
| 40               | 29,56                  | 38,97   | 62,93   | 76,60   |
| 30               | 29,71                  | 39,03   | 63,11   | 76,60   |
| 20               | 29,99                  | 39,05   | 63,32   | 76,59   |
| 10               | 30,74                  | 39,09   | 63,75   | 76,60   |
| 0                | 0                      | 0       | 0       | 0       |

Tabella 5-25 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.



Figura 5-40 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.



Figura 5-41 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.



Figura 5-42 Variazione percentuale del limite superiore rispetto al caso di sola matrice in funzione della VBP del deposito.

Per tutte le curve definite in base alla VBP delle inclusioni, si nota una variazione percentuale rispetto alla sola matrice che si incrementa notevolmente con il maggior grado

di presenza areale dei blocchi. In particolare, per le VBP del 55% e del 70%, la soluzione si discosta notevolmente da quella matriciale, con valori compresi tra 60% e circa il 90%, indicando pertanto come un incremento della VBP porti ad un netto miglioramento della risposta meccanica globale dell'ammasso bimrock in esame sottoposto ad un decremento di tensione dovuto allo scavo.

# 5.7 Analisi mediante approcci omogenei equivalenti

Gli approcci empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014) (*Paragrafi 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3*) basano la loro definizione delle proprietà meccaniche di un bimrock sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb, attraverso la seguente espressione di materiale equivalente:

$$\tau_{bimrock} = c'_{bimrock} + \sigma'_{bimrock} * tan\varphi'_{bimrock}$$
(5.3)

dove la resistenza al taglio  $\tau_{bimrock}$  viene espressa in funzione dello stato tensionale agente normalmente  $\sigma'_{bimrock}$  e dei parametri  $c'_{bimrock}$  e  $\varphi'_{bimrock}$ , rispettivamente coesione ed angolo di attrito, che vengono ottenuti mediante opportune formulazioni, basate sulla percentuale volumetrica delle inclusioni nella matrice debole, meccanicamente parlando. I parametri sopra definiti vengono inseriti in  $RS^2$  considerando il modello omogeneo (VBP = 0%), dove si mantengono invariate le caratteristiche della matrice in termini di peso specifico, modulo di elasticità di Young e coefficiente di Poisson, attribuendo successivamente uno stato di tensione iniziale coincidente con quello imposto ai modelli eterogenei esaminati, che tiene conto della percentuale di presenza areale delle inclusioni. I risultati vengono sempre analizzati in termini di curve di convergenza-confinamento, per valori noti di VBP pari a 25%, 40%, 55% e 70%, confrontandoli successivamente con quelli ottenuti seguendo l'approccio stocastico delle 10 estrazioni al variare della percentuale volumetrica.

## 5.7.1 Approccio di Lindquist (1994)

Conoscendo le proprietà meccaniche associate alla matrice e la percentuale volumetrica delle inclusioni VBP, è possibile esprimere il criterio di rottura di Mohr-Coulomb generalizzato, definito da Lindquist (1994) sulla base delle sue sperimentazioni mediante prove di compressione triassiale eseguite su provini artificiali di bimrock (*Paragrafo 3.3.1*).

$$\tau_p = c_{matrix}(1 - VBP) + \sigma \tan(\varphi_{matrix} + \Delta \varphi_{matrix}(VBP))$$
(5.4)

- $\tau_p$  rappresenta la resistenza a taglio equivalente del bimrock;
- *c<sub>matrix</sub>* rappresenta la coesione della matrice, che assume un andamento linearmente decrescente con l'incremento della VBP;
- $\varphi_{matrix}$  rappresenta l'angolo di attrito della matrice;
- Δφ<sub>matrix</sub>(VBP) rappresenta l'incremento di angolo di attrito che, per valori di VBP maggiori del 25%, subisce un incremento pari a 3° per ogni incremento della VBP del 10%.

| Matrice |              |         |     |                  |                  |                  |
|---------|--------------|---------|-----|------------------|------------------|------------------|
| c [MPa] | <i>φ</i> [°] | E [MPa] | ν   | $\sigma$ t [MPa] | $\sigma$ c [MPa] | $\gamma$ [kg/m³] |
| 0,065   | 28           | 40      | 0,3 | 0,02             | 0,2              | 2200             |

Tabella 5-26 Resistenze meccaniche della matrice.

L'angolo di attrito del deposito e la riduzione della coesione presentano un andamento lineare con l'aumento della VBP, seguendo la rappresentazione di Lindquist (1994) di *Figura 3-17*.

| Lindquist (1994) |                      |        |      |  |  |
|------------------|----------------------|--------|------|--|--|
| VBP              | C <sub>bimrock</sub> | Δφ [°] | Φ[°] |  |  |
| 25%              | 0,05                 | 0      | 28   |  |  |
| 40%              | 0,04                 | 4,5    | 32,5 |  |  |
| 55%              | 0,03                 | 9      | 37   |  |  |
| 70%              | 0,02                 | 14,5   | 42,5 |  |  |

Tabella 5-27 Parametri meccanici di resistenza equivalente secondo modello empirico di Lindquist (1994).

In *RS*<sup>2</sup> si realizza un modello omogeneo equivalente per riprodurre le condizioni di scavo per ciascuna VBP, con una mesh e condizioni di vincoli mostrati in *Figura 4-8*. Con l'utilizzo di una legge elastica-perfettamente plastica, basata sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb, ai differenti stages di natura plastica vengono assegnati angolo di attrito e coesione calcolati per riprodurre gli effetti del detensionamento dovuto al cavo, mentre il primo stage precedente la realizzazione del tunnel è caratterizzato dalla presenza di matrice a comportamento elastico. Il materiale che circonda il dominio bimrock viene mantenuto elastico per tutta l'analisi, con gli stessi parametri meccanici della matrice, per evitare che la realizzazione del tunnel sia influenzata dalla presenza dei vincoli esterni imposti. I risultati delle computazioni vengono riportati nella seguente tabella.

| VBP 25%                 |                 |  |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |  |
| 0                       | 2,09            |  |  |  |  |
| 0,17                    | 0,67            |  |  |  |  |
| 0,34                    | 0,36            |  |  |  |  |
| 0,5                     | 0,23            |  |  |  |  |
| 0,67                    | 0,17            |  |  |  |  |
| 0,84                    | 0,13            |  |  |  |  |
| 1,01                    | 0,11            |  |  |  |  |
| 1,18                    | 0,08            |  |  |  |  |
| 1,34                    | 0,05            |  |  |  |  |
| 1,51                    | 0,03            |  |  |  |  |
| 1,68                    | 0               |  |  |  |  |

| VBP 40%                 |                 |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |
| 0                       | 1,64            |  |  |  |
| 0,17                    | 0,52            |  |  |  |
| 0,34                    | 0,30            |  |  |  |
| 0,51                    | 0,21            |  |  |  |
| 0,68                    | 0,16            |  |  |  |
| 0,85                    | 0,14            |  |  |  |
| 1,02                    | 0,11            |  |  |  |
| 1,19                    | 0,08            |  |  |  |
| 1,36                    | 0,05            |  |  |  |
| 1,53                    | 0,03            |  |  |  |
| 1,7                     | 0               |  |  |  |

| VBP 55%                 |                 |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |
| 0                       | 1,37            |  |  |  |
| 0,17                    | 0,42            |  |  |  |
| 0,34                    | 0,26            |  |  |  |
| 0,52                    | 0,20            |  |  |  |
| 0,69                    | 0,17            |  |  |  |
| 0,86                    | 0,14            |  |  |  |
| 1,03                    | 0,11            |  |  |  |
| 1,2                     | 0,08            |  |  |  |
| 1,38                    | 0,06            |  |  |  |
| 1,55                    | 0,03            |  |  |  |
| 1,72                    | 0               |  |  |  |

| VBP 70%                 |                 |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |
| 0                       | 1,25            |  |  |  |
| 0,17                    | 0,36            |  |  |  |
| 0,35                    | 0,24            |  |  |  |
| 0,52                    | 0,20            |  |  |  |
| 0,7                     | 0,17            |  |  |  |
| 0,87                    | 0,14            |  |  |  |
| 1,04                    | 0,11            |  |  |  |
| 1,22                    | 0,08            |  |  |  |
| 1,39                    | 0,06            |  |  |  |
| 1,57                    | 0,03            |  |  |  |
| 1,74                    | 0               |  |  |  |

Tabella 5-28 Criterio di convergenza-confinamento del modello empirico di Lindquist (1994).



Figura 5-43 Criterio di convergenza-confinamento di Lindquist (1994) in funzione della VBP, confrontato gli spostamenti associati alla sola presenza della matrice.

Come si evince da Figura 5-43, i parametri meccanici imposti, che seguono una variazione lineare con l'incremento della VBP secondo l'approccio empirico di Lindquist (1994), influenzano notevolmente la risposta globale dell'ammasso. In particolare, fino ad un valore di rilassamento del materiale intorno al 60%, le soluzioni riscontrate per differenti VBP assumono un andamento che è confondibile con quello della sola presenza della matrice, con un successivo discostamento da essa in termini peggiorativi per percentuali volumetriche delle inclusioni del 25% e 40%. Per le VBP del 55% e del 70%, il discostamento dalla soluzione con sola matrice è apprezzabile a convergenza totale, con un valore inferiore di spostamento rispettivamente di 1.37 e 1.25 metri, rispetto a 1.58 metri riscontrabili in assenza di inclusioni. Il comportamento delineato è strettamente legato alle differenti pressioni interne di plasticizzazione dell'intorno del cavo (Tabella 5-29): aumentando la VBP, diminuisce il grado di confinamento radiale da imporre al materiale per mantenere lineare l'andamento della curva caratteristica, secondo le Equazioni 5.1 e 5.2. Tale aspetto evidenzia pertanto come la VBP si ripercuota sul differente grado di convergenza ed estensione della plasticizzazione (Allegato C), a detensionamento totale, nei confronti della matrice, quest'ultima avente raggio plastico di circa 18 metri.

| VBP | Pressione plasticizzazione | Raggio plastico |
|-----|----------------------------|-----------------|
| 25% | 0,85 [MPa]                 | 18,5 [m]        |
| 40% | 0,75 [MPa]                 | 16,5 [m]        |
| 55% | 0,66 [MPa]                 | 14,5 [m]        |
| 70% | 0,55 [MPa]                 | 13,5 [m]        |

Tabella 5-29 Pressione interna di confinamento che porta all'inizio della plasticizzazione nell'intorno del cavo ed estensione del raggio plastico, secondo il metodo empirico di Lindquist (1994), funzione della VBP.

#### 5.7.2 Approccio di Sonmez et al. (2006)

Basandosi sull'approccio empirico di Sonmez et al. (2006) ottenuto da prove di carico monoassiale su provini di bimrock costituiti in laboratorio (*Paragrafo 3.3.2*), si fa riferimento ad un modello di Mohr-Coulomb di legge elastica-perfettamente plastica, i cui parametri meccanici derivano dalle seguenti relazioni:

$$c_n = 1.25 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{75}\right) \qquad c_{bimrock} = c_n * c_{matrix}$$
(5.5)

$$\varphi_n = \exp\left(\frac{8*VBP}{1000}\right) \qquad \varphi_{bimrock} = \varphi_n * \varphi_{matrix}$$
(5.6)

$$UCS_n = 1 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{75}\right) \qquad UCS_{bimrock} = UCS_n * UCS_{matrix}$$
(5.7)

In input il metodo richiede la percentuale volumetrica delle inclusioni e i valori di resistenza meccanica della matrice in termini di coesione, angolo di attrito e resistenza a compressione monoassiale. I risultati ottenuti sono di seguito riportati, dove è possibile riscontrare un incremento dell'angolo di attrito accompagnato da una diminuzione della coesione, muovendosi verso VBP maggiori.

| Sonmez et al. (2006) |                         |                       |                           |                               |                                   |                              |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| VBP                  | с <sub>п</sub><br>[МРа] | φ <sub>n</sub><br>[°] | UCS <sub>n</sub><br>[MPa] | c <sub>bimrock</sub><br>[MPa] | <i>Φ<sub>bimrock</sub></i><br>[°] | UCS <sub>bimrock</sub> [MPa] |
| 25%                  | 0,88                    | 1,22                  | 0,63                      | 0,06                          | 34,20                             | 0,14                         |
| 40%                  | 0,80                    | 1,38                  | 0,55                      | 0,05                          | 38,56                             | 0,12                         |
| 55%                  | 0,70                    | 1,55                  | 0,45                      | 0,05                          | 43,48                             | 0,10                         |
| 70%                  | 0,58                    | 1,75                  | 0,33                      | 0,04                          | 49,02                             | 0,07                         |

Tabella 5-30 Parametri meccanici di resistenza equivalente secondo il modello empirico di Sonmez et al (2006).

In *RS*<sup>2</sup> si realizza un modello omogeneo equivalente per riprodurre le condizioni di scavo per ciascuna VBP, con una mesh e vincoli imposti mostrati in *Figura 4-8*. Con l'utilizzo di

una legge elastica-perfettamente plastica, basata sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb, ai differenti stages di natura plastica vengono assegnati angolo di attrito e coesione calcolati per riprodurre gli effetti del detensionamento dovuto al cavo, mentre il primo stage precedente la realizzazione del tunnel è caratterizzato dalla presenza di matrice a comportamento elastico. La matrice che circonda il dominio bimrock viene mantenuta elastica per tutta l'analisi, per evitare che la realizzazione del tunnel sia influenzata dalla presenza dei vincoli imposti. I risultati delle analisi vengono riportati nella seguente tabella.

| VBP 25%                 |                 |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |
| 0                       | 1,03            |  |  |  |
| 0,17                    | 0,42            |  |  |  |
| 0,34                    | 0,27            |  |  |  |
| 0,5                     | 0,2             |  |  |  |
| 0,67                    | 0,16            |  |  |  |
| 0,84                    | 0,13            |  |  |  |
| 1,01                    | 0,11            |  |  |  |
| 1,18                    | 0,08            |  |  |  |
| 1,34                    | 0,05            |  |  |  |
| 1,51                    | 0,03            |  |  |  |
| 1,68                    | 0               |  |  |  |

| VBP 40%                 |                 |  |  |  |
|-------------------------|-----------------|--|--|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |  |  |
| 0                       | 0,88            |  |  |  |
| 0,17                    | 0,36            |  |  |  |
| 0,34                    | 0,25            |  |  |  |
| 0,51                    | 0,19            |  |  |  |
| 0,68                    | 0,16            |  |  |  |
| 0,85                    | 0,14            |  |  |  |
| 1,02                    | 0,11            |  |  |  |
| 1,19                    | 0,08            |  |  |  |
| 1,36                    | 0,05            |  |  |  |
| 1,53                    | 0,03            |  |  |  |
| 1,7                     | 0               |  |  |  |

| VBP 55%                 |                 |  |
|-------------------------|-----------------|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |
| 0                       | 0,69            |  |
| 0,17                    | 0,31            |  |
| 0,34                    | 0,23            |  |
| 0,52                    | 0,19            |  |
| 0,69                    | 0,17            |  |
| 0,86                    | 0,14            |  |
| 1,03                    | 0,11            |  |
| 1,2                     | 0,08            |  |
| 1,38                    | 0,06            |  |
| 1,55                    | 0,03            |  |
| 1,72                    | 0               |  |

| VBP 70%                 |                 |  |
|-------------------------|-----------------|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |
| 0                       | 0,61            |  |
| 0,17                    | 0,28            |  |
| 0,35                    | 0,22            |  |
| 0,52                    | 0,2             |  |
| 0,7                     | 0,17            |  |
| 0,87                    | 0,14            |  |
| 1,04                    | 0,11            |  |
| 1,22                    | 0,08            |  |
| 1,39                    | 0,06            |  |
| 1,57                    | 0,03            |  |
| 1,74                    | 0               |  |

Tabella 5-31 Criterio di convergenza-confinamento del modello empirico di Sonmez et al (2006).



Figura 5-44 Criterio di convergenza-confinamento di Sonmez et al. (2006) in funzione della VBP, confrontato con gli spostamenti associati alla sola presenza della matrice.

Come si evince da *Figura 5-44*, fino ad un valore di rilassamento del materiale intorno al 60%, le soluzioni riscontrate per differenti VBP assumono un andamento che è confrontabile con quello della sola presenza della matrice, con un successivo discostamento da essa in termini migliorativi per tutte le quattro VBP considerate. Per le VBP del 55% e del 70%, il discostamento dalla soluzione della sola matrice è apprezzabile a convergenza totale, con un valore di spostamento rispettivamente di 0.69 e 0.61 metri, rispetto a 1.58 metri riscontrabili in assenza di inclusioni. Il comportamento delineato è strettamente legato alle differenti pressioni interne di plasticizzazione dell'intorno del cavo (*Tabella 5-32*): aumentando la VBP, diminuisce il grado di confinamento radiale da imporre al materiale per mantenere lineare l'andamento della curva caratteristica, secondo le *Equazioni 5.1 e 5.2*. Tale aspetto evidenzia pertanto come la VBP si ripercuota sul differente grado di convergenza ed

| VBP | Pressione plasticizzazione | Raggio plastico |
|-----|----------------------------|-----------------|
| 25% | 0,69 [MPa]                 | 13,5 [m]        |
| 40% | 0,70 [MPa]                 | 12,5 [m]        |
| 55% | 0,50 [MPa]                 | 9,5 [m]         |
| 70% | 0,40 [MPa]                 | 9,5 [m]         |

estensione della plasticizzazione (*Allegato C*), a detensionamento totale, nei confronti della matrice, quest'ultima avente raggio plastico di circa 18 metri.

Tabella 5-32 Pressione interna di confinamento che porta all'inizio della plasticizzazione nell'intorno del cavo secondo il metodo empirico di Sonmez et al. (2006), funzione della VBP.

## 5.7.3 Approccio di Kaleder et al. (2014)

Il metodo di Kalender et al. (2014) (*Paragrafo 3.3.3*) richiede anch'esso come parametri di input la percentuale volumetrica dei blocchi VBP, i parametri di resistenza della matrice (*Tabella 5-26*) e l'angolo di riposo delle inclusioni rocciose. Al fine di effettuare le analisi con questa metodologia di calcolo, si è supposto un angolo di riposo delle inclusioni pari ad  $\alpha = 40^{\circ}$ . Risulta inoltre necessario valutare il parametro A, che esprime la forza dei contatti presenti tra i blocchi e la matrice: riferendosi al grafico riportato in *Figura 3-23*, con la conoscenza dell'angolo a riposo delle inclusioni  $\alpha$  e della resistenza a compressione monoassiale UCS della matrice pari a 0.2 MPa, si stima un valore di A pari a 4. I parametri ottenuti, integrati con le caratteristiche meccaniche della matrice, sono inseriti all'interno delle equazioni empiriche di Kalender et al. (2014):

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matrix} * \left[ 1 + \frac{1000 * \left[ \left( \frac{\alpha}{\varphi_{matrix}} \right) - 1 \right]}{1000 + 5 \left[ \frac{100 - VBP}{15} \right]} * \frac{VBP}{VBP + 1} \right]$$
(5.8)

$$c_{bimrock} = \frac{UCS_{bimrock} * (1 - sin\varphi_{bimrock})}{2 * \cos(\varphi_{bimrock})}$$
(5.9)

$$UCS_{bimrock} = \frac{(A - A^{\left(\frac{VBP}{100}\right)})}{(A - 1)} * UCS_{matrix}$$
(5.10)

Di seguito vengono riportati i parametri di resistenza attribuiti all'ammasso bimrock considerato, in funzione dei parametri di input sopra esposti.

| Kalender et al. (2014) |                                      |                              |                            |                  |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------|
| VBP                    | $\boldsymbol{\varphi}_{bimrock}$ [°] | UCS <sub>bimrock</sub> [MPa] | c <sub>bimrock</sub> [MPa] | $\sigma_t [MPa]$ |
| 25%                    | 31,77                                | 0,19                         | 0,05                       | 0,02             |
| 40%                    | 37,72                                | 0,16                         | 0,04                       | 0,02             |
| 55%                    | 42,13                                | 0,13                         | 0,03                       | 0,01             |
| 70%                    | 43,57                                | 0,10                         | 0,02                       | 0,01             |

Tabella 5-33 Parametri meccanici di resistenza equivalente secondo il modello empirico di Kalender et al (2006).

In *RS*<sup>2</sup> si realizza un modello omogeneo equivalente per riprodurre le condizioni di scavo per ciascuna VBP, con una mesh e vincoli imposti mostrati in *Figura 4-6*. Con l'utilizzo di una legge elastica-perfettamente plastica, basata sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb, ai differenti stages di natura plastica vengono assegnati angolo di attrito e coesione calcolati per riprodurre gli effetti del detensionamento dovuto al cavo, mentre il primo stage precedente la realizzazione del tunnel è caratterizzato dalla presenza di matrice a comportamento elastico. La matrice che circonada il dominio bimrock viene mantenuta elastica per tutta l'analisi, per evitare che la realizzazione del tunnel sia influenzata dalla presenza dei vincoli imposti.

| VBP 25%                 |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |
| 0                       | 1,39            |
| 0,17                    | 0,51            |
| 0,34                    | 0,30            |
| 0,5                     | 0,21            |
| 0,67                    | 0,16            |
| 0,84                    | 0,13            |
| 1,01                    | 0,11            |
| 1,18                    | 0,08            |
| 1,34                    | 0,05            |
| 1,51                    | 0,03            |
| 1,68                    | 0               |

I risultati delle analisi vengono riportati nella seguente tabella.

| VBP 40%                 |                 |  |
|-------------------------|-----------------|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |
| 0                       | 1,06            |  |
| 0,17                    | 0,39            |  |
| 0,34                    | 0,25            |  |
| 0,51                    | 0,19            |  |
| 0,68                    | 0,16            |  |
| 0,85                    | 0,14            |  |
| 1,02                    | 0,11            |  |
| 1,19                    | 0,08            |  |
| 1,36                    | 0,05            |  |
| 1,53                    | 0,03            |  |
| 1,7                     | 0               |  |

| VBP 55%                 |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |
| 0                       | 0,94            |
| 0,17                    | 0,33            |
| 0,34                    | 0,24            |
| 0,52                    | 0,19            |
| 0,69                    | 0,17            |
| 0,86                    | 0,14            |
| 1,03                    | 0,11            |
| 1,2                     | 0,08            |
| 1,38                    | 0,06            |
| 1,55                    | 0,03            |
| 1,72                    | 0               |

| VBP 70%                 |                 |  |
|-------------------------|-----------------|--|
| Pressione interna [MPa] | Convergenza [m] |  |
| 0                       | 1,03            |  |
| 0,17                    | 0,33            |  |
| 0,35                    | 0,24            |  |
| 0,52                    | 0,20            |  |
| 0,7                     | 0,17            |  |
| 0,87                    | 0,14            |  |
| 1,04                    | 0,11            |  |
| 1,22                    | 0,08            |  |
| 1,39                    | 0,06            |  |
| 1,57                    | 0,03            |  |
| 1,74                    | 0               |  |

Tabella 5-34 Criterio di convergenza-confinamento del modello empirico di Kalender et al. (2014).



Figura 5-45 Criterio di convergenza-confinamento di Kalender et al. (2014) in funzione della VBP, confrontato gli spostamenti associati alla sola presenza della matrice.

Come si evince da *Figura 5-45*, fino ad un valore di rilassamento del materiale intorno al 60%, le soluzioni riscontrate per differenti VBP assumono un andamento che è confrontabile con quello della sola matrice, sempre un po' maggiore, con un successivo discostamento da essa in termini migliorativi per tutte le quattro VBP considerate. Per le VBP del 55% e del 70%, il discostamento dalla soluzione con sola matrice è apprezzabile a convergenza totale, con un valore di spostamento rispettivamente di 0.94 e 1.03 metri, rispetto a 1.58 metri riscontrabili in assenza di inclusioni: a differenza dei due metodi empirici descritti in precedenza, il valore di convergenza massimo registrato per una VBP del 70% risulta in questo caso superiore rispetto alla VBP del 55%.

Il comportamento delineato è strettamente legato alle differenti pressioni interne di plasticizzazione dell'intorno del cavo (*Tabella 5-32*): aumentando la VBP, diminuisce il grado di confinamento radiale da imporre al materiale per mantenere lineare l'andamento

della curva caratteristica, secondo le *Equazioni 5.1 e 5.2*, basandosi sui concetti fondamentali espressi nel *Paragrafo 4.3.1*. Tale aspetto evidenzia pertanto come la VBP si ripercuota sul differente grado di convergenza ed estensione della plasticizzazione (*Allegato C*), a detensionamento totale, nei confronti della matrice, quest'ultima avente raggio plastico di circa 18 metri.

| VBP | Pressione plasticizzazione | Raggio plastico |
|-----|----------------------------|-----------------|
| 25% | 0,75 [MPa]                 | 17 [m]          |
| 40% | 0,63 [MPa]                 | 14,7 [m]        |
| 55% | 0,54 [MPa]                 | 14 [m]          |
| 70% | 0,53 [MPa]                 | 14,5 [m]        |

Tabella 5-35 Pressione interna di confinamento che porta all'inizio della plasticizzazione nell'intorno del cavo secondo il metodo empirico di Kalender et al. (2014), funzione della VBP.

#### 5.7.4 Confronti con le analisi stocastiche

La progettazione con gli approcci omogenei equivalenti indica una stima a favore di sicurezza per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica di un bimrock. I risultati ottenuti dai tre metodi empirici equivalenti possono essere direttamente confrontati tra di loro e con le soluzioni di convergenza ottenute da un'analisi stocastica del posizionamento ed orientazione delle inclusioni all'interno dell'ammasso, poiché la geometria e la discretizzazione delle simulazioni è la medesima.

Sulla base dei risultati ottenuti per via statistica, dove viene opportunamente considerata l'eterogeneità del sistema in esame, secondo differenti VBP e livelli di rilassamento del materiale crescenti, è possibile raffrontare le fasce di variazione delle curve di convergenzaconfinamento associate ai due piedritti ed alla calotta con gli spostamenti ottenuti secondo gli approcci di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006), Kalender et al. (2014). Per ognuna delle tre relazioni empiriche, è possibile riscontrare un decremento degli spostamenti associati ai punti considerati con un incremento della VBP: in particolare la soluzione di Sonmez et al. (2006) è quella che fa registrare una minor convergenza a detensionamento totale, seguita dalla soluzione di Kalender et al. (2014) e Lindquist (1994), con quest'ultima troppo cautelativa per VBP comprese tra il 25% ed il 40%, in quanto presenta degli spostamenti a rilassamento totale superiori rispetto alla matrice. In particolare, per una VBP del 25% e del 40%, la soluzione di Sonmez et al. (2006), nell'ultimo step di rilassamento del materiale, presenta un valore di convergenza che ricade all'interno dell'intervallo di variazione definito per via statistica: questo aspetto è riscontrato per ognuno dei tre punti geometrici del tunnel esaminati. E' osservabile come angolo di attrito e coesione ottenibili mediante gli approcci empirici equivalenti siano il prodotto di relazioni empiriche che basano la loro validità sulle prove di laboratorio per la caratterizzazione meccanica di un bimrock, ottenute per estrazione di materiale in sito o produzione artificiale. Le tre relazioni forniscono da un certo lato una buona stima dei parametri di resistenza meccanica globale di un deposito blocco-in-matrice, ma non possono predire in maniera adeguata la risposta del cavo e del suo intorno in termini di spostamenti, poiché la rottura plastica della matrice e l'andamento delle tensioni ultime indotte da taglio causano una diversa mobilitazione dei valori di resistenza imposti.

Concludendo, nello scavo nel dominio di riferimento esaminato, i metodi empirici non risultano adeguatamente capaci di fornire una previsione sulla convergenza e, di conseguenza, sulla stabilità del tunnel circolare trattato. Si esprime pertanto la necessità di poter effettuare una migliore caratterizzazione del materiale basata sull'incremento dell'angolo di attrito e sulla riduzione della coesione nei modelli omogenei.

Nelle seguenti rappresentazioni, è possibile osservare quanto appena descritto per i tre punti geometrici esaminati (piedritto destro, sinistro e calotta).

171



Piedritto sinistro

Figura 5-46 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 25%.



Figura 5-47 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 40%.



Figura 5-48 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 55%.



Figura 5-49 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 70%.


Piedritto destro

Figura 5-50 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 25%.



Figura 5-51 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 40%.



Figura 5-52 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 55%.



Figura 5-53 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 70%.



Figura 5-54 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 25%.



Figura 5-55 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 40%.



Figura 5-56 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. 2014), VBP 55%.



Figura 5-57 Confronto della fascia di variazione ottenuta per via statistica con i metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), VBP 55%.

#### Conclusioni

L'obbiettivo della presenta tesi è stato lo studio della risposta meccanica e deformativa di una galleria circolare in un ammasso complesso a blocchi in matrice. In particolare, si è indagata la risposta del deposito facendo riferimento a differenti percentuali volumetriche (VBP), con disposizione ed orientazione casuale delle inclusioni annegate nella matrice, valutando il contrasto tra le caratteristiche di resistenza in condizioni isotrope. I 40 modelli stocastici sono stati analizzati e confrontati con il caso semplificato, spesso utilizzato per la definizione e trattazione del problema geotecnico riguardante queste particolari formazioni complesse, che prevede la sola presenza della matrice. Attraverso analisi FEM bidimensionali, per ciascuna delle VBP considerate sono state generate 10 differenti configurazioni di un ipotetico dominio di scavo bimrock, basato sulle considerazioni di variabilità spaziale e dimensionale delle inclusioni considerate. In particolare, i modelli sono stati creati utilizzando un apposito script Matlab che ha consentito una disposizione (posizione e orientazione) casuale delle inclusioni rocciose. Tale operazione è stata effettuata ricorrendo ad un'estrazione random con riferimento al Metodo di Monte Carlo, per ciascuna delle VBP imposte sono state generate 10 differenti configurazioni di un ipotetico dominio di scavo bimrock, basato sulle considerazioni di variabilità spaziale e dimensionale delle inclusioni considerate. I risultati ottenuti dalle simulazioni di calcolo numerico sono stati successivamente raffrontati con le soluzioni ottenute dai metodi empirici di Lindquist (1994), Sonmez et al. (2006) e Kalender et al. (2014), i quali basano la loro trattazione sull'analisi di un bimrock come un materiale omogeneo ed equivalente, valutando pertanto delle caratteristiche meccaniche equivalenti del complesso.

Tutti i risultati ottenuti sono stati espressi attraverso il criterio di convergenzaconfinamento, dimostrando che per VBP elevate si ha un miglioramento della risposta strutturale del deposito interessato dallo scavo. Secondo quanto riportato in letteratura (Lindquist & Goodman, 1994), si è potuto riscontrare come per percentuali volumetriche al di sotto di un valore minimo di soglia di circa il 25%, la presenza delle inclusioni non è significativa dal punto di vista ingegneristico, in quanto esse non sono in grado di aumentare la proprietà di resistenza del deposito. La plasticizzazione, nelle porzioni di materiale limitrofe al cavo è interessata da una rottura a taglio della matrice, con uno sviluppo ed andamento che non interessa le inclusioni, avente un percorso caratterizzato da un certo grado di tortuosità, dove quest'ultima risente della distribuzione ed orientazione dei differenti blocchi.

L'analisi semplificata, che considera il dominio di scavo costituito dalla sola presenza di matrice, trascurando dunque la resistenza associata alle inclusioni, costituisce una soluzione troppo cautelativa per un'analisi progettuale, che diventa più significativa per valori elevati della percentuale volumetrica. Tuttavia, per valori di VBP al di sotto del 25%, le inclusioni hanno poca influenza sulla risposta meccanica del deposito, con conseguente assunzione della sola presenza di matrice accettabile.

Con l'ausilio di analisi statistiche, si sono definite per ogni VBP le differenti fasce di variazione del criterio di convergenza-confinamento con le quali, specialmente per basse percentuali volumetriche, è stata riscontrata una notevole variabilità delle soluzioni ottenute. Per ogni dominio di variazione, si è considerato il limite superiore della soluzione e lo si è confrontato con la convergenza associata alla sola presenza della matrice, evidenziando dunque la percentuale di errore che si commette in fase progettuale se i blocchi competenti non vengono considerati all'interno dell'ammasso. In generale, le analisi deterministiche di uno scavo all'interno di un ammasso complesso a blocchi in matrice non possono dunque essere utilizzate per la trattazione ingegneristica di un problema di questo tipo.

Le soluzioni associate all'utilizzo dei metodi empirici equivalenti sono state confrontate con quelle provenienti dall'analisi *FEM* dei modelli eterogenei, osservando una parziale corrispondenza della soluzione di Sonmez et al. (2014) per bassi valori di percentuale volumetrica delle inclusioni. Per elevate VBP si delinea una soluzione troppo cautelativa di questi metodi, che non sono in grado di analizzare in maniera adeguata il comportamento legato alla realizzazione di un'opera in sotterraneo in formazioni complesse.

# Indice delle figure

| FIGURA 1-1 CLASSIFICAZIONE DELLE FORMAZIONI COMPLESSE SECONDO A.G.I [A.G.I 1979]2  |
|--|
| FIGURA 1-2 SUCCESSIONE TORBIDITICA STRUTTURALMENTE COMPLESSA, DEFINIBILE B1 SECONDO LA   |
| CLASSIFICAZIONE A.G.I [1979]3  |
| FIGURA 1-3 CLASSIFICAZIONE MEDIANTE INDICE GSI PER AMMASSI ROCCIOSI COMPLESSI [HOEK ET AL.,  |
| 2005]: GC-3 MATRICE DOMINANTE, GC-1 BLOCCHI PERSISTENTI.   |
| FIGURA 1-4 FRANCISCAN COMPLEX MÈLANGE SAN BRUNO MT., SOUTH SAN FRANCISCO [MEDLEY, 1989]. 5   |
| FIGURA 1-5 GEOLOCALIZZAZIONE SU SCALA GLOBALE DEI MÈLANGE E DEGLI OFIOLITI [MEDLEY, 1994]6   |
| FIGURA 1-6 DEPOSITO DI MÈLANGES IN SIERRA NEVADA [MEDLEY, 2007]7   |
| Figura 1-7 Distribuzione geografica del Franciscan Mèlange, nell'area di San Francisco Bay   |
| [MEDLEY, 1994]8  |
| FIGURA 1-8 MECCANISMO DI CONVERGENZA TETTONICA ATTO ALLA FORMAZIONE DEL FRANCISCAN MÈLANGE   |
| [Chinese Science Bulletin, 2013]10   |
| FIGURA 1-9 ACCRESCIMENTO DEL CUNEO ATTIVO (ACCREZIONE DEL PRISMA); [ELDER & GORDON, 2001]11  |
| FIGURA 2-1 CARATTERISTICHE DI IDENTIFICAZIONE DEI MATERIALI STRUTTURALMENTE COMPLESSI [MEDLEY &  |
|  |
| Wakabayashi, 2004]15   |
| Wakabayashi, 2004]15<br>Figura 2-2 Rilievo geologico in situ di una formazione bimrock [Medley, 2004]17  |
| Wakabayashi, 2004]   |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>15</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004].</li> <li>17</li> <li>FIGURA 2-3 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE DI UN FORO DI SONDAGGIO IN BIMROCK [ADAM ET AL., 2012].</li> <li>19</li> <li>FIGURA 2-4 CONFRONTO TRA ANALISI BIDIMENSIONALE E MONODIMENSIONALE; IL BLOCCO HA DIMENSIONE<br/>MASSIMA OSSERVATA RISPETTIVAMENTE PARI A DMOD E DIMENSIONE INDICATA IN FIGURA CON<br/>"CHORD", PARI ALLA LUNGHEZZA DI INTERSEZIONE TRA FORO E BLOCCO STESSO [MEDLEY, 2001].</li> <li>FIGURA 2-5 CONFRONTO TRA DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DEI BLOCCHI 1D (VERDE), A CONFRONTO CON LA</li> </ul>   |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004]17</li> <li>FIGURA 2-3 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE DI UN FORO DI SONDAGGIO IN BIMROCK [ADAM ET AL., 2012].</li> <li></li></ul>  |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004]</li></ul>  |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>15</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004].</li> <li>17</li> <li>FIGURA 2-3 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE DI UN FORO DI SONDAGGIO IN BIMROCK [ADAM ET AL., 2012].</li> <li>19</li> <li>FIGURA 2-4 CONFRONTO TRA ANALISI BIDIMENSIONALE E MONODIMENSIONALE; IL BLOCCO HA DIMENSIONE<br/>MASSIMA OSSERVATA RISPETTIVAMENTE PARI A DMOD E DIMENSIONE INDICATA IN FIGURA CON</li> <li>"CHORD", PARI ALLA LUNGHEZZA DI INTERSEZIONE TRA FORO E BLOCCO STESSO [MEDLEY, 2001].</li> <li>FIGURA 2-5 CONFRONTO TRA DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DEI BLOCCHI 1D (VERDE), A CONFRONTO CON LA<br/>DISTRIBUZIONE REALE 3D (BLU) DI UN DEPOSITO [MEDLEY, 2001].</li> <li>FIGURA 2-6 DIFFERENTE ORIENTAZIONE E PERCENTUALE VOLUMETRICA IN PROVINI DI MÈLANGE ARTIFICIALI<br/>[MEDLEY, 2001].</li> <li>23</li> </ul>  |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>15</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004].</li> <li>17</li> <li>FIGURA 2-3 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE DI UN FORO DI SONDAGGIO IN BIMROCK [ADAM ET AL., 2012].</li> <li>19</li> <li>FIGURA 2-4 CONFRONTO TRA ANALISI BIDIMENSIONALE E MONODIMENSIONALE; IL BLOCCO HA DIMENSIONE<br/>MASSIMA OSSERVATA RISPETTIVAMENTE PARI A DMOD E DIMENSIONE INDICATA IN FIGURA CON<br/>"CHORD", PARI ALLA LUNGHEZZA DI INTERSEZIONE TRA FORO E BLOCCO STESSO [MEDLEY, 2001].</li> <li>121</li> <li>FIGURA 2-5 CONFRONTO TRA DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DEI BLOCCHI 1D (VERDE), A CONFRONTO CON LA<br/>DISTRIBUZIONE REALE 3D (BLU) DI UN DEPOSITO [MEDLEY, 2001].</li> <li>22</li> <li>FIGURA 2-6 DIFFERENTE ORIENTAZIONE E PERCENTUALE VOLUMETRICA IN PROVINI DI MÈLANGE ARTIFICIALI<br/>[MEDLEY, 2001].</li> <li>23</li> <li>FIGURA 2-7 ISTOGRAMMA LOGARITMICO DEL FRANCISCAN MÈLANGE [MEDLEY AND LINDQUIST, 1995]26</li> </ul> |
| <ul> <li>WAKABAYASHI, 2004].</li> <li>FIGURA 2-2 RILIEVO GEOLOGICO IN SITU DI UNA FORMAZIONE BIMROCK [MEDLEY, 2004].</li> <li>FIGURA 2-3 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE DI UN FORO DI SONDAGGIO IN BIMROCK [ADAM ET AL., 2012].</li> <li></li></ul>   |

| Figura 2-9 Distribuzione dimensionale dei blocchi in un Franciscan Mèlange, riferendosi a          |
|--|
| DIFFERENTI SCALE DI OSSERVAZIONE: FREQUENZA RELATIVA IN FUNZIONE DELLA MASSIMA DIMENSIONE          |
| OSSERVABILE <i>dmod</i> [Medley, 2002]28   |
| FIGURA 2-10 INFLUENZA DELL'INTERVENTO CONSIDERATO SULLA SCALA DIMENSIONALE DI INTERESSE            |
| [MEDLEY, 2001]   |
| Figura 2-11 Andamento della distribuzione dei blocchi nel Franciscan Mèlanges; i diametri          |
| hanno un andamento compreso tra 0,3 m e 56 m. I blocchi più piccoli di 0,05 $ dmod$                |
| RAPPRESENTANO IL 95% DEL NUMERO TOTALE, MA MENO DELL'1% DEL VOLUME DI RIFERIMENTO                  |
| [MEDLEY, 1994]   |
| FIGURA 2-12 METODO DI ANALISI MONODIMENSIONALE DALLA SUPERFICIE [MEDLEY, 2001]33                   |
| FIGURA 2-13 INCERTEZZA LEGATA ALLA STIMA DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI, FUNZIONE DELLA    |
| LUNGHEZZA DELLA MISURA LINEARE ESPRESSA COME MULTIPLO DI $(N)$ , DELLA DIMENSIONE                  |
| CARATTERISTICA DEL BLOCCO PIÙ GRANDE $(oldsymbol{dmax})$ e della frazuione del blocco lineare      |
| MISURATA (VARIANTE TRA IL 13% ED IL 55%) [MEDLEY, 2001]  |
| FIGURA 2-14 DETERMINAZIONE DELLE PROPORZIONI DEL BLOCCO DA IMMAGINI SU CAMPIONI TRIASSIALI CON     |
| LINEE DI SCANSIONE [MEDLEY, 2002]  |
| Figura 2-15 Istogramma riguardante la distribuzione tridimensionale dei blocchi (segmenti di       |
| colore nero) per i $4$ modelli di differente VBP considerati e lunghezze della corda mediante      |
| SCANLINES [MEDLEY, 2002]40   |
| Figura 2-16 Distribuzioni dimensionali assimilabili a curve granulometriche della lunghezza        |
| della corda $1D$ e distribuzione geometrica delle inclusioni $3D$ per i $4$ modelli di differente  |
| VBP REALIZZATI [MEDLEY, 2002]  |
| FIGURA 2-17 SCHEMATIZZAZIONE DELLE DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PROVINI REALIZZATI [LINDQUIST, 1994].42 |
| FIGURA 2-18 ISTOGRAMMA DELLE FREQUENZE RELATIVE DELLE DISTRIBUZIONI DI LUNGHEZZA DELLA CORDA       |
| 1D E DELLA DIMENSIONE REALE DEI BLOCCHI 3D [MEDLEY, 2002]44  |
| Figura 3-1 Resistenza di un bimrock con il variare della VBP: confronto tra i dati di Lindquist    |
| (modelli fisici di mèlange), Irfan e Tang per il colluvium di Hong Kong47                          |
| FIGURA 3-2 SEZIONAMENTO DEL CAMPIONE PORTATO A ROTTURA DA LINDQUIST [1994]48                       |
| Figura 3-3 Andamento della linea di rottura riscontrata durante le sperimentazioni di              |
| Lindquist e Goodman[1994], in funzione di una distribuzione uniforme (destra) ed una               |
| DISTRIBUZIONE GRADUATA (SINISTRA)  |
| FIGURA 3-4 SUPERFICI DI ROTTURA CONFRONTATE CON PROFILI DI RUGOSITÀ [MEDLEY, 2004]51               |
| Figura 3-5 Superfici di rottura dall'andamento tortuoso riscontrate durante le                     |
| SPERIMENTAZIONI DI MEDLEY [2002]   |
| FIGURA 3-6 MISURA E CALCOLO DELLE LINEE DI ROTTURA TORTUOSE [MEDLEY, 2004]52                       |

| Figura 3-7 Espressione della variazione dell'angolo di attrito (sinistra) e della coesione           |
|--|
| (destra) in funzione di differenti VBP [Lindquist & Goodman, 1994]54                                 |
| Figura <b>3-8</b> Dispersione delle prove eseguite sull'Agglomerato di Ankara, relazionando EBP ed   |
| UCS [Sonmez et al., 2004]  |
| FIGURA 3-9 SFORZO DI TAGLIO DEI TRE CAMPIONI ESAMINATI DI RSA [LI ET AL., 2004]                      |
| FIGURA 3-10 MODELLO NUMERICO STOCASTICO DEL CAMPIONE T1 DI RSA [LI ET AL., 2004]58                   |
| FIGURA 3-11 CURVE SFORZO DI TAGLIO/SPOSTAMENTO ASSOCIATO OTTENUTE DALLA SPERIMENTAZIONE IN           |
| situ e dal modello numerico [Li et al., 2004]60  |
| Figura 3-12 Inviluppo di resistenza di Hoek & Brown (sinistra) e modulo di deformazione              |
| (DESTRA) AL VARIARE DELLA VBP [BARBERO ET AL., 2006]61   |
| FIGURA 3-13 DEFINIZIONE DEL CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN PER DIVERSE PERCENTUALI              |
| VOLUMETRICHE [BARBERO ET AL., 2007]62  |
| FIGURA 3-14 SEQUENZA DI GENERAZIONE DEL PROVINO [BARBERO ET AL., 2008]62                             |
| FIGURA 3-15 PROPAGAZIONE DELLA PLASTICIZZAZIONE DEL MATERIALE ALL'INTERNO DEL MODELLO (SINISTRA)     |
| E SULLA SUPERFICIE LATERALE (DESTRA), VBP PARI AL 40% [BARBERO ET AL., 2008]63                       |
| FIGURA 3-16 INFLUENZA DELLA VBP SULLA RESISTENZA DEL MATERIALE, SECONDO INVILUPPO DI ROTTURA DI      |
| Ноек & Brown (а) е Монг-Coulomb (в) [Barbero et al., 2008]64   |
| FIGURA 3-17 INTERVALLO DI VARIAZIONE DEI MODULI DI DEFORMAZIONE SECONDO DIFFERENTI VBP               |
| [LINDQUIST, 1994]65  |
| FIGURA 3-18 COESIONE ED INCREMENTO DEL VALORE DELL'ANGOLO DI ATTRITO IN FUNZIONE DI DIFFERENTI       |
| VBP [LINDQUIST, 1994]  |
| FIGURA 3-19 FASI DI PREPARAZIONE DEI CAMPIONI ARTIFICIALI DI BIMROCK [SONMEZ ET AL., 2006]67         |
| Figura 3-20 Frequenza cumulato dell'errore relativo, ottenuta usando i valori di $\sigma 1$ valutati |
| con le soluzioni empiriche delle equazioni di Mohr-Coulomb e Hoek & Brown [Sonmez et                 |
| AL., 2006]   |
| Figura 3-21 Valutazione grafica dell'espressione empirica per la stima di $ arphi bimrock$           |
| [KALENDER ET AL., 2014]72  |
| FIGURA 3-22 VALUTAZIONE GRAFICA DELL'ESPRESSIONE EMPIRICA PER LA STIMA DI UCSbimrock                 |
| [KALENDER ET AL., 2014]73  |
| FIGURA 3-23 GRAFICO PER LA SELEZIONE DEL PARAMETRO "A", SECONDO LE PROPRIETÀ DEL CONTATTO            |
| BLOCCO-MATRICE [KALENDER ET AL., 2014]73   |
| FIGURA 3-24 PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO DI RESISTENZA DI UN BIMROCK [KALENDER ET AL., 2014].        |
|  |
| FIGURA 3-25 ERRATA IDENTIFICAZIONE DELLA LITOLOGIA ATTRAVERSO FORI DI SONDAGGIO [MEDLEY, 2007].      |
| 75   |

| FIGURA 3-26 INFLUENZA DELLA POSIZIONE ED ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI SULL'ANDAMENTO DELLA              |
|---|
| SUPERFICIE DI ROTTURA [MEDLEY & SANZ, 2004]77   |
| Figura 3-27 Modello del pendio con VBP 50%, con blocchi distribuiti in maniera casuale              |
| [Medley e Sanz, 2004]   |
| Figura 3-28 Confronto tra i risultati riscontrati sul Franciscan Mèlange (Medley e Sanz,            |
| 2003) E QUELLI RELATIVI AL COLLUVIUM (IRFAN E TANG, 1993), [MEDLEY E REHERMANN, 2004]78             |
| Figura 3-29 Esempio di versante del deposito alluvionale di Hong Kong, VBP 20%. La linea            |
| ARANCIONE EVIDENZIA UN IPOTETICO ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLMANTO, MENTRE LA               |
| LINEA TRATTEGGIATA COSTITUISCE IL PROFILO DI ROTTURA NEL CASO DI SOLA MATRICE [IRFAN E TANG,        |
| 1993]   |
| Figura 3-30 a) Modello numerico per differenti VBP; b) Forma delle inclusioni con differenti        |
| eccentricità ed orientazioni; c) variazione del Fattore di Sicurezza del versante al variare        |
| VBP, per differenti valori di eccentricità [Barbero et al., 2006]80                                 |
| FIGURA 3-31 PARAMETRI MECCANICI DEI MATERIALI COSTITUENTI IL MODELLO NUMERICO [BARBERO ET AL.,      |
| 2006]   |
| FIGURA 3-32 MODELLO NUMERICO AGLI ELEMENTI FINITO REALIZZATO IN PHASE2 [NAPOLI ET AL., 2018].82     |
| Figura 3-33 Fattore di sicurezza FS del versante esaminato in funzione delle differenti VBP $$      |
| [NAPOLI ET AL., 2018]84   |
| FIGURA 3-34 SEZIONE TRASVERSALE DELLA DIGA SCOTT, CALIFORNIA. IN BLU SI EVIDENZIA LA POSSIBILE ZONA |
| DI SCORRIMENTO PER TAGLIO, MENTRE IN ROSSO SI DELINEA LA PROFONDITÀ DEL FORO DI SONDAGGIO DI        |
| ESPLORAZIONE [MEDLEY, 2007]85   |
| FIGURA 3-35 PLOTTAGGIO DELL'EFFETTIVO ANGOLO DI ATTRITO IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE               |
| VOLUMETRICA DELLE INCLUSIONI, MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO SUL FRANCISCAN MÈLANGE                  |
| OTTENUTE DAI SONDAGGI DI PERFORAZIONE AL DI SOTTO DELLA DIGA DI SCOTT, CALIFORNIA [GOODMAN          |
| and Ahlgren, 2000]86  |
| FIGURA 3-36 PRODOTTO DELLA PERFORAZIONE ESPLORATIVA DEL RICHMOND TRANSPORT TUNNEL, FORO DI          |
| SONDAGGIO B103 [MEDLEY, 1995]87   |
| FIGURA 4-1 METODO DI SCAVO NATM [ZHANG, ZHUANG AND LACKNER; 2018]90                                 |
| Figura 4-2 Metodo di avanzamento ADECO-RS (Lunardi, 2002) della Galleria Raticosa nel               |
| COMPLESSO CAOTICO DELLE ARGILLE SCAGLIOSE [LUNARDI, CASSANI E TANZINI; 2009]92                      |
| Figura 4-3 Modelli corrispondenti a due differenti gradi di cementazione: 25% (a), 75% (b); le      |
| AREE NON CEMENTATE SONO RAPPRESENTATE IN ARANCIONE, MENTRE LE AREE CEMENTATE IN BLU                 |
| [Barla & Vai, 1999; Geodata, 2000; Barla & Barla, 2012]   |
| FIGURA 4-4 RAPPRESENTAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DELLE INCLUSIONI GENERATE              |
| (MODELLO DELLA SECONDA ESTRAZIONE, VBP 25%)   |

| Figura 4-5 Modello geometrico in Autocad riguardante la $10^\circ$ estrazione casuale delle  |
|--|
| INCLUSIONI PER UNA VBP = 70%; IN ROSSO SI EVIDENZIA IL CONTORNO DELLO SCAVO  |
| FIGURA 4-6 MODELLO 0.70_10 (DECIMA ESTRAZIONE CON VBP = 70%, ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI  |
| RANDOM). DEFINIZIONE DELLA MESH E POSIZIONAMENTO VICNOLI   |
| Figura 4-7 Dettaglio della geometria delle inclusioni all'interno del dominio di riferimento   |
| (sinistra); zona di scavo e mesh triangolare a sei nodi (destra), decima estrazione con VBP =  |
| 70%101   |
| Figura 4-8 Definizione della mesh triangolare a sei nodi e posizionamento dei vincoli nel  |
| MODELLO CON VBP = 0%, PRESENZA DELLA SOLA MATRICE  |
| FIGURA 4-9 RAPPRESENTAZIONE DELLA PRESSIONE INTERNA CON IL COMANDO FIELD STRESS VECTOR PER LA  |
| SIMULAZIONE DELL'ANDAMENTO TRIDIMENSIONALE DEL CAVO ( $10^\circ$ estrazione con VBP al 70%,  |
| RILASSAMENTO DEL MATERIALE AL 50%)   |
| Figura 4-10 Metodo di convergenza confinamento; vengono illustrate la curva caratteristica   |
| della galleria (LC) e la curva di reazione del sostegno (LS); in particolare, con LS1 si   |
| IDENTIFICA UN SOSTEGNO RIGIDO-ELASTICO, MENTRE CON LS2 UN SOSTEGNO CEDEVOLE; VIENE ANCHE   |
| ILLUSTRATA LA CURVA DI SPOSTAMENTO IN FUNZIONE DEL TEMPO CHE DISTINGUE IL COMPORTAMENTO DI   |
| UNA GALLERIA STABILE O INSTABILE, MECCANICAMENTE PARLANDO [G. BARLA, 2005]106  |
| FIGURA 5-1 CRITERIO DI CONFINAMENTO- CONVERGENZA, VBP 0% (ASSENZA DI INCLUSIONI)111  |
| Figura 5-2 Andamento concentrico degli spostamenti (sinistra) e della zona plasticizzata   |
| (DESTRA) IN ASSENZA DI INCLUSIONI (VBP = 0%)112  |
| Figura 5-3 Rappresentazione dell'andamento degli spostamenti di convergenza sul contorno   |
| DEL CAVO LINEARIZZATO, SECONDO OGNI ESTRAZIONE STOCASTICA ASSOCIATA A VBP = $25\%$ 113   |
| FIGURA 5-4 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA PLASTICIZZAZIONE NELL'INTORNO DEL CAVO; LE  |
| INCLUSIONI CARATTERIZZANO UN ANDAMENTO TORTUOSO DELLA ROTTURA PER TAGLIO DELLA MATRICE   |
| (7° ESTRAZIONE, VBP = 25%)114  |
|  |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%117<br>FIGURA 5-6 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO SINISTRO, VBP 25%117 |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%   |
| <ul> <li>FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%</li></ul>  |
| <ul> <li>FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%</li></ul>  |
| <ul> <li>FIGURA 5-5 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 25%</li></ul>  |

FIGURA 5-10 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA RS<sup>2</sup> DAL PUNTO DI CALOTTA ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: ANCHE SE NON PLASTICIZZATO, L'EFFETTO DELLO SCAVO VIENE RISENTITO NELLA ZONA ELASTICA (VBP 25%). ..........120 FIGURA 5-11 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI DI CONVERGENZA DEL CONTORNO DEL CAVO LINEARIZZATO, SECONDO OGNI ESTRAZIONE STOCASTICA ASSOCIATA A VBP = 40%......121 FIGURA 5-12 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA PLASTICIZZAZIONE NELL'INTORNO DEL CAVO; LE INCLUSIONI CARATTERIZZANO L'ANDAMENTO TORTUOSO DELLA ROTTURA NELLA MATRICE (5° FIGURA 5-13 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO SINISTRO, VBP 40%. .....125 FIGURA 5-14 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO CALOTTA, VBP 40%......126 FIGURA 5-15 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI PIEDRITTO DESTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO FIGURA 5-16 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI PIEDRITTO SINISTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO FIGURA 5-17 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA RS<sup>2</sup> dal punto di calotta alla fine del MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO FIGURA 5-18 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI DI CONVERGENZA DEL CONTORNO DEL CAVO LINEARIZZATO, SECONDO OGNI ESTRAZIONE STOCASTICA ASSOCIATA A VBP = 55%........129 FIGURA 5-19 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA PLASTICIZZAZIONE NELL'INTORNO DEL CAVO; LE INCLUSIONI CARATTERIZZANO L'ANDAMENTO TORTUOSO DELLA ROTTURA NELLA MATRICE (4° FIGURA 5-23 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI PIEDRITTO DESTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO 

FIGURA 5-24 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE2 DAL PUNTO DI PIEDRITTO SINISTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO FIGURA 5-25 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE2 DAL PUNTO DI CALOTTA ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO RIDUCE NOTEVOLMENTE LA SUA INFLUENZA SULLA ZONA ELASTICA (VBP 55%)......136 FIGURA 5-26 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI DI CONVERGENZA DEL CONTORNO DEL CAVO LINEARIZZATO, SECONDO OGNI ESTRAZIONE STOCASTICA ASSOCIATA A VBP = 70%.......137 FIGURA 5-27 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA PLASTICIZZAZIONE NELL'INTORNO DEL CAVO; LE INCLUSIONI CARATTERIZZANO LA ROTTURA TORTUOSA DEL MATERIALE MATRICE (10° ESTRAZIONE, VBP = FIGURA 5-29 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO SINISTRO, VBP 70%. .....141 FIGURA 5-30 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO CALOTTA, VBP 70%......142 FIGURA 5-31 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI PIEDRITTO DESTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALEDELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO FIGURA 5-32 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI PIEDRITTO SINISTRO ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO FIGURA 5-33 ANDAMENTO DEGLI SPOSTAMENTI OTTENUTI DA PHASE<sup>2</sup> DAL PUNTO DI CALOTTA ALLA FINE DEL MODELLO; LA LINEA VERTICALE DELIMITA IL PASSAGGIO DALLA ZONA IN CUI SI HA LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO A QUELLA IN CUI IL MATERIALE DI CONTORNO È ELASTICO: L'EFFETTO DELLO SCAVO NON INFLUENZA LA ZONA ELASTICA (VBP 70%).....144 FIGURA 5-34 RANGE DI VARIAZIONE DELLO SPOSTAMENTO RADIALE DEL PIEDRITTO DESTRO A RILASSAMENTO FINALE DEL PIEDRITTO DESTRO, IN FUNZIONE DELLA VBP. .....149 FIGURA 5-35 RANGE DI VARIAZIONE DELLO SPOSTAMENTO RADIALE DEL PIEDRITTO SINISTRO A RILASSAMENTO FIGURA 5-36 RANGE DI VARIAZIONE DELLO SPOSTAMENTO RADIALE DELLA CALOTTA A RILASSAMENTO FINALE, FIGURA 5-37 CONFRONTO TRA LE FASCE DI VARIAZIONE ASSOCIATE ALLE 10 ESTRAZIONI EFFETTUATE PER 

FIGURA 5-56 CONFRONTO DELLA FASCIA DI VARIAZIONE OTTENUTA PER VIA STATISTICA CON I METODI EMPIRICI DI LINDQUIST (1994), SONMEZ ET AL. (2006) E KALENDER ET AL. 2014), VBP 55%......177
FIGURA 5-57 CONFRONTO DELLA FASCIA DI VARIAZIONE OTTENUTA PER VIA STATISTICA CON I METODI EMPIRICI DI LINDQUIST (1994), SONMEZ ET AL. (2006) E KALENDER ET AL. (2014), VBP 55%. ....177

### Indice delle tabelle

| TABELLA 2-1 DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DEI BLOCCHI UTILIZZATI PER LA SPERIMENTAZIONE [LINDQUIST, |
|--|
| 1994]42  |
| TABELLA 2-2 PROPORZIONE IN PESO DEI MATERIALI UTILIZZATI PER LA REALIZZAZIONE DEI MODELLI        |
| [LINDQUIST, 1994]43  |
| TABELLA 3-1 PARAMETRI MECCANICI UTILIZZATI DURANTE LA MODELLAZIONE NUMERICA [LI ET AL., 2004].59 |
| TABELLA 3-2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE INCLUSIONI E DELLA MATRICE [NAPOLI ET AL., 2018]83  |
| TABELLA 4-1 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI [LI ET AL., 2004; ADAM ET AL., 2012]103           |
| TABELLA 4-2 STATO TENSIONALE IN SITU ISOTROPO, IN FUNZIONE DELLA VBP                             |
| TABELLA 5-1 CURVA CARATTERISTICA DEL CAVO AL VARIARE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO IMPOSTA,    |
| VBP = 0%   |
| Tabella 5-2 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le $10$            |
| ESTRAZIONI CON VBP = 25%113  |
| TABELLA 5-3 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA   |
| del piedritto destro, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il          |
| MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| TABELLA 5-4 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA   |
| del piedritto sinistro, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il        |
| MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE116   |
| TABELLA 5-5 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA   |
| della calotta, VBP=25%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo         |
| SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| Tabella 5-6 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le $10$            |
| ESTRAZIONI CON VBP = 40%   |
| TABELLA 5-7 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA   |
| del piedritto destro, VBP=40%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il          |
| MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |

| TABELLA 5-8 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA     |
|--|
| del piedritto sinistro, VBP=40%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il          |
| MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE124   |
| TABELLA 5-9 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO INTERNA     |
| della calotta, VBP=40%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il massimo           |
| SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| TABELLA 5-10 CRITERIO DI CONVERGENZA- CONFINAMENTO PIEDRITTO DESTRO, VBP 40%125                    |
| Tabella 5-11 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le $10$             |
| ESTRAZIONI CON VBP = 55%129  |
| TABELLA 5-12 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| INTERNA DEL PIEDRITTO DESTRO, VBP=55%. IN VERDE ED IN ARANCIO LE ESTRAZIONI CON IL MINIMO ED       |
| IL MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE   |
| TABELLA 5-13 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| INTERNA DEL PIEDRITTO SINISTRO, VBP=55%. IN VERDE ED IN ARANCIO LE ESTRAZIONI CON IL MINIMO        |
| ED IL MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| TABELLA 5-14 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| INTERNA DEL PIEDRITTO SINISTRO, VBP=55%. IN VERDE ED IN ARANCIO LE ESTRAZIONI CON IL MINIMO        |
| ED IL MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| Tabella 5-15 Valori di convergenza massimo e minimo per ogni quadrante secondo le $10$             |
| ESTRAZIONI CON VBP = 70%138  |
| TABELLA 5-16 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| INTERNA DEL PIEDRITTO DESTRO, VBP=70%. IN VERDE ED IN ARANCIO LE ESTRAZIONI CON IL MINIMO ED       |
| IL MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE   |
| TABELLA 5-17 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| INTERNA DEL PIEDRITTO SINISTRO, VBP=70%. IN VERDE ED IN ARANCIO LE ESTRAZIONI CON IL MINIMO        |
| ED IL MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| TABELLA 5-18 CONVERGENZA DI OGNI ESTRAZIONE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO            |
| interna della calotta, VBP=70%. In verde ed in arancio le estrazioni con il minimo ed il           |
| MASSIMO SPOSTAMENTO A CONVERGENZA RISPETTIVAMENTE  |
| TABELLA 5-19 CURVA CARATTERISTICA DEL CAVO AL VARIARE DELLA PRESSIONE DI CONFINAMENTO IMPOSTA,     |
| VBP = 0%   |
| TABELLA 5-20 PARAMETRI STATISTICI PER LA CONVERGENZA DEL PIEDRITTO DESTRO, VALUTATI PER CIASCUNA   |
| VBP E PER UN RILASSAMENTO DEL MATERIALE CRESCENTE  |
| TABELLA 5-21 PARAMETRI STATISTICI PER LA CONVERGENZA DEL PIEDRITTO SINISTRO, VALUTATI PER CIASCUNA |
| VBP E PER UN RILASSAMENTO DEL MATERIALE CRESCENTE  |

| TABELLA J-22 FARAMETRI STATISTICI PER LA CONVERGENZA DELLA CALOTTA, VALOTATI PER CIASCONA V DF E |
|--|
| PER UN RILASSAMENTO DEL MATERIALE CRESCENTE148   |
| TABELLA 5-23 VARIAZIONE PERCENTUALE DEL LIMITE SUPERIORE RISPETTO AL CASO DI SOLA MATRICE IN     |
| FUNZIONE DELLA VBP DEL DEPOSITO  |
| TABELLA 5-24 VARIAZIONE PERCENTUALE DEL LIMITE SUPERIORE RISPETTO AL CASO DI SOLA MATRICE IN     |
| FUNZIONE DELLA VBP DEL DEPOSITO  |
| TABELLA 5-25 VARIAZIONE PERCENTUALE DEL LIMITE SUPERIORE RISPETTO AL CASO DI SOLA MATRICE IN     |
| FUNZIONE DELLA VBP DEL DEPOSITO  |
| TABELLA 5-26 RESISTENZE MECCANICHE DELLA MATRICE.    159   |
| Tabella 5-27 Parametri meccanici di resistenza equivalente secondo modello empirico di           |
| Lindquist (1994)   |
| TABELLA 5-28 CRITERIO DI CONVERGENZA-CONFINAMENTO DEL MODELLO EMPIRICO DI LINDQUIST (1994).      |
|  |
| TABELLA 5-29 PRESSIONE INTERNA DI CONFINAMENTO CHE PORTA ALL'INIZIO DELLA PLASTICIZZAZIONE       |
| NELL'INTORNO DEL CAVO ED ESTENSIONE DEL RAGGIO PLASTICO, SECONDO IL METODO EMPIRICO DI           |
| LINDQUIST (1994), FUNZIONE DELLA VBP162  |
| TABELLA 5-30 PARAMETRI MECCANICI DI RESISTENZA EQUIVALENTE SECONDO IL MODELLO EMPIRICO DI        |
|  |
| SONMEZ ET AL (2006)  |

#### Bibliografia

**A.G.I., 1979**. Some Italian experiences on the mechanical characterization of structurally complex Formations. Proc. IV I.C.R.M., Montreaux, 1, 827-846.

Adam, D., Markiewicz, R., Brunner, M. Block-in-Matrix Structure and Creeping Slope: Tunneling in Hard Soil and/or Weak Rock, Geotechnical and Geological Engineering, December 2014, Volume 32, Issue 6, pp. 1467-1476.

Altinsoy, H., 2006. A Physical Based Model Investigation for Determination of Shear Strength of Block in Matrix Rocks. (MSc thesis) Hacettepe University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey (91pp).

**Bailey, E. B., and McCallien, W.J., 1950**. *The Ankara Melange and the Anatolian Thrust*; Nature, v. 166, p. 938-940.

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., 2007**. *Numerical modelling of the mechanical behaviour of bimrock*. Proceedings of the 11th ISRM Int. Congress. Taylor & Francis Ltd., 2007.

**Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., 2008**. Three-Dimensional Finite Element Simulations of Compression Tests on Bimrock. In: Proceedings of the 12th 160 Int. Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.

**Barla, G., 2005**. *Sviluppi nell'analisi progettuale delle opere in sotterraneo*. Rivista Italiana di Geotecnica n. 3/2005.

**Barla, M., Camusso M., 2013**. *A method to design microtunneling installations in randomly cemented Torino alluvial soil*, Tunneling and Underground Space Tecnology, No. 33, 73-81.

**Barla and Perello (2014)**. *XV ciclo di conferenze di Meccanica delle Rocce MIR 2014*, Torino 19-20 Novembre 2014.

**Barton N., Lien R. and Lunde J. (1974)**. Analysis of Rock Mass Qaulity and Support Practice in Tunneling, and a Guide for Estimating Support Requirements. NGI Internal Rept. No. 54206.

**Beniawski Z. T. (1973)**. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans, S. African Inst. Civil Engrs 15, 335-342.

**Beniawski Z. T. (1984).** Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, p. 272. Balkerna, Rotterdam.

**Bosworth, W., 1982**, *Evolution and structural significance of master shear zones within the parautochthonous flysh of eastern New York*; Vermont Geology, v.2, p. 6-13.

Button, E., G. Riedmueller, W. Schubert and E.Medley, 2004; *Tunneling in tectonic Mèlanges: Accomodating th Impacts of Geomechanical Complexities and Anisotropic Rock Mass Fabrics*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, March 2004.

**Chiarelli, M.**; *La Realizzazione di gallerie in formazioni geologicamente complesse*; Ingenio n°36 del 30 Settembre 2015, Imready Srl, RSM.

Coli, N., Berry, P., Boldini, D., Bruno, R., 2009. In situ large size non conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock in The Santa Barbara open pit mine (Italy). In: The 43rd US rock mechanics symposium and 4th US-Canada rock mechanics symposium, held in Asheville. Paper no. ARMA 09-184.

Coli, N., 2010. *Metodi avanzati di indagine di ammassi rocciosi a blocchi in matrice (bimrock)*. Università di Bologna, Italia, PhD diss. Ciclo XXII.

**Cowan, D., 1985**. *Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the western Cordillera of North America*. Geological Society of America Bulletin, v.96, April 1985.

D'Elia, B., Distefano, D., Esu, F., Federico, G., 1986. *Slope movements in structurally complex formations*. Proceedings of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formation, Beijing, China.

Gansser. A., 1955, *New aspects of the geology in central Iran*; Proceedings of the 4th World Petroleum Conference, Sec. I/A/5, p. 279-298.

**Golser D.I. (1995)** – *NATM, history, definition, principles*. University of Technology, Vienna, Summercourse July 2 - July 8.

Goodman, R.E., Ahlgren, C.S., 2000. Evaluating the safety of a concrete gravity dam on weak rock-Scott Dam. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126, 429-442.

Gokceoglu, C., 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara Agglomerates from their petrographic composition. Engineering Geology 66, 39-51.

Gokceoglu, C., Zorlu, K., 2004. A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock. Eng. Appl. of Artificial Intelligence. 17(1):61-72.

**Greenly, E., 1919**, *The geology of Anglesey*; Great Britain Geological Survey Memoir, v. 1, p. 980.

Haneberg, W. C., 2004; Simulation of 3D block populations to characterize outcrop sampling bias in bimrocks, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September 2004.

Hoek, E., Marinos, P., Marinos, V., 2005. *The geological strength index: applications and limitations*. Bull. Eng. Geol. Environ., 64, 55-56.

Hsu, K. J., 1966. Melange concept and its application to an interpretation of the California Coast Range geology; Geological society of America Abstracts for 1966, p.99-100.

Hsu, K. J., 1968. The principles of mélange and their bearing on the Franciscan *Knoxville paradox*; Geological society of America bulletin, v.79, p. 1063-1074.

Hsu, K. J., 1969. Preliminary report and geologic guide to Franciscan Mèlange of Morro Bay San Simeon area, California; California division of mine and geology special pubblication, 35, 46 p.

**Hsu, K.J., 1974.** Mèlanges and their distinction from olistrostromes; in Dott, R. H., Jr., and Shaver, R.H., eds, Modern and Ancient Geosynclinals Sedimentation; Society of economic paleontologists and Mineralogists special publication no. 19, p. 321-333.

Irfan, T.Y., Tang K.Y., 1993. Effect of the Coarse Fractions on the Shear Strength of Colluvium. GEO report No. 22-Hong Kong Geotechnical Engineering Office, Reprinted, 1995, 223.

Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., 2014. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks. Engineering Geology 183 65-79.

Li, X., Liao Q.L, He, J.M, 2004. In situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the three Gorges Reservoir area, China. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, No. 3, 702-707.

Lindquist, E., 1991. *Fractals-Fracture and Franciscan Mèlange*, Term Paper for CE 280, Rock Mechanics instructor: Prof. R.E. Goodman, Dept Civil Enginnering, University of California, Berkeley.

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

Lindquist, E.S, and R.E Goodman, 1994; Strenth and deformation properties of a physical model mèlange, Proceeding, 1st North American Rock Mechanics Symposium, Austin. TX, May 1994.

Lunardi, P. Design & construction tunnels – ADECO-RS approach. In: T&T International special supplement, May 2000.

Marinos, P.G., Hoek, E., 2000. *GSI: a geological friendly tool for rock mass strength estimation*. Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000), Technomic Publishing Co. Inc., 1422-1440, Melbourne, Australia.

Marinos, P.G., Hoek, E., 2001. *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bull. Engg. Geol. Env., 60, 85-92.

Medley, E.W. and Goodman, R.E, 1994; *Estimating the block volumetric proportions* of mèlanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks), Proceeding, 1st North American Rock Mechanics Symposium, Austin, TX, May 1994.

Medley, E., 1994; Using stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in mèlanges and similar block-in-matrix rock (bimrock), Proceeding, 7th Congressional International Association of Engineering Geologists, Lisbon, Portugal, September 1994.

Medley, E. and E.S Lindquist, 1995; *The engineering significance of the scaleindependence of some Franciscan mèlanges in California Usa*, Proceedings, 35th U.S. Rock Mechanics Conference, Lake Tahoe, California, June 1995. Medley, E., 1997; Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in mèlange bimrocks, Proceedings, International Association of Engineering Geologists, Athens, Greece, June 23-27, 1997.

Medley, E., 2001; Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges, Felsbau Rock and Soil Enginnering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, Vol. 19, No. 4, pp. 20-30, July 2001.

Medley, E., 2002; *Estimating block size distributions of mèlanges and similar block-inmatrix rocks (bimrocks)*, Proceedings, 5th North American Rock Mechanics Symposium, University of Toronto, Toronto, Canada, July 2002, pp. 599-606.

Medley, E., 2004; *Observations on Tortuous Failure Surfaces*, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Enginnering Geology; Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September 2004.

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

Medley, E., 2007a; *Bimrocks-Part 1: Introduction*, Newsletter of the Hellenic Society of Soil Mechanics and Geotechnical Enginnering, February 2007, No. 7, pp 17-21 with Errata.

Medley, E., 2007b; *Bimrocks-Part 2: Case Histories and Practical Guidelines,* Newsletter of the Hellenic Society of Soil Mechanics and Geotechnical Enginnering, April 2007, No. 8.

Medley, E., 2008; *Engineering the Geological Chaos of Franciscan and Other Bimrocks*, Proc. Session 12: Mèlanges, Mixed Materials and Chaotic Rocks, 42nd U.S Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco, July 2008 (Also: June 28 2008 *Field Trip Guide* for an informal tour of Franciscan complex mèlanges in the San Francisco Bay Area). Medley, E. and Zekkos, D. (2011): Geopractitioner Approaches to Working With Antisocial Mèlanges, in ed. Wakabayashi, J. and Y. Dilek, Special Publication 480-Mèlanges: Processes of Formation and Societal Significance, Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 263-279.

Meyerhof, G.G., 1982. *The geotechnics of structurally complex formations*. Eng. Geol., 19 (1), 63.

Moritz, B., K. Grossauer and W. Shubert, 2004; *Short term prediction of system behaviour of shallow tunnels in heterogeneous ground*, Felsbau Rock and Soil Enginnering-Journal for Enginnering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol. 22, No. 5, September, 2004.

Napoli, M.L., Barbero, M., Ravera, E., Scavia, C., 2017. *A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks*. Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering, Politecnico di Torino. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 101 (2018) 41-49.

**Panet, M., and Guenot, A. 1982**. *Analysis of convergence behind the face of a tunnel*. Proceedings of the International Conference of Tunnelling, 197-204. Brighton: The Institution of Mining and Metallurgy.

Panet, M., 1995. Le Calcul des Tunnels par la Mèthode Convergence-Confinement. Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (in French)

**Phase**<sup>2</sup>. "*Theory documentations provided by the developers of the software*. "<u>https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/tutorials/Phase2\_Tutorials.htm</u>."

**Picarelli, L., 1986**. *Caratterizzazione geotecnica dei terreni strutturalmente complessi nei problemi di stabilità dei pendii*. Atti XVI Convegno Nazionale Geotecnica, Napoli, 15-16 Maggio.

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

Roadifer, J., Forrest, MP., 2012. *Characterization and treatment of mélange and sandstone foundation at Calaveras Dam*. Proc. GeoCongress 2012 State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, California, pp. 3362-3371.

Slatalla, N., Alber, M., Kahraman S.; Analyses of acoustic emission response of a fault breccia in uniaxial deformation, Bulletin of Enginnering Geology and the Environment, August 2010.

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

Sonmez, H., H. Altinsoy, C. Geokceoglu and E. Medley, 2006; *Considerations in Developing an Empirical Strength Criterion for Bimrocks*, Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 2006), November 6-10, Singapore.

Sonmez, H., K. Kasapoglu, C. Coskun, C. Tunusluoglu, E. Medley and R. Zimmeraman, 2009; *A conceptual Empirical Approach for the Overall Strength of Unwelded Bimrocks*, in Proc. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions, Karst and Soft Rock, Int. Soc. Rock Mechanics Regional Symposium, Dubrovnik, Croatia, 29-31 October, 2009.

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

**Riedmueller G., F.J. Brosch, K. Klima, and E.Medley, 2001**; *Engineering Geological Characterization of Brittle Faults and Classification of Fault Rocks*, Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, Vol. 19, No. 4, pp. 13-18, July 2001.

Volpe, R.L., Ahlgren, C.S., Goodman, R.E., 1991. Selection of engineering properties for geologically variable foundations. In: Proceedings of the 17th International Congress on Large Dams, Paris, 1991. 1087-1101.

Von Stockhausen, S., Young, D., Slack, C., 2018: *Approach to Characterizing BIM Rocks for Tunnel Design Using As-Built Tunnel Data*, North American Tunnelling 2018, pp. 390-400.

Wakabayashi, J. and E. Medley, 2002; Mèlange and Fault Rocks Exposed In and Around an Abandoned Quarry at the Shmidt Lane Racycling Center, El Cerrito, California, (with Appendices), in Mathieson, E.L., Field Trip Guide for AEG-ASCE Short Course: *Tunneling in Fault Rocks and Tectonic Mèlanges*, a Short course for Engineering Geologists and Geotechnical Engineers, held in Oakland California, May 31-June 1, 2002.

Wakabayashi, J. and E. Medley, 2004; *Geological Characterization of Mèlanges for Practitioners*; Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling, vol.22, No.5, September 2004.

Wood, D.M., 2004. Geothecnical Modelling, CRC press.

Xu, W., Yueb, Z., Hu, R., 2008. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil–rock mixture using digital image processing based finite element method. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 45,749–62.

Zhang, Y., Zhuang, X., Lackner, R.: Stability analysis of shotcrete supported crown of NATM tunnels with Discontinuity Layout Optimization (DLO). Int. J. Numer Anal. Methods problems. Geomecch. (2017, under review).

**Zheng Y F, Zhao Z F, Chen Y X**. *Continental subduction channel processes: Plate interface interaction during continental collision*. Chinese Science Bulletin, 2013, 58.

### Allegato A

```
2
           GENERAZIONE CASUALE DI BLOCCHI ALL'INTERNO DEL DOMINIO
8
***
clear all;
close all;
clc;
8
tic;
8888888
             CARATTERISTICHE
2
8
응응응응응응응
% dimensioni del dominio, unità in m
B = 50; % base del dominio
H = 50; % altezza del dominio
d=10 ; %raggio galleria
A=B*H;
% percentuale volumetrica
PV = 0.40;
toll = 1/40 * PV;
%eccentricità ellisse
e=0.5;
% La dimensione dei blocchi, deve essere compresa tra il 5% e il 75%
% della dimensione caratteristica, in questo caso il diametro della
galleria
% (d)
   = 0.05*d;
а
   = 0.75*d;
b
F
   = 0:0.0001:1;
   = -1.3;
q
   = ((-F^{*}((a^{(1+q)}) - (b^{(1+q)}))) + (a^{(1+q)})) . (1/(1+q));
dp
%distanza minima tra 2 blocchi e tra blocchi e dominio
toll pos = 0.05;
F2 = F.*100;
```

```
figure(1)
plot(dp,F2)
 title('Distribuzione dei diametri dei blocchi in termini
probabilistici');
   xlabel('Diametro blocchi (m)');
   ylabel('Probabilità (%)');
****
                         Distribuzione dimensionale blocchi
8
8
응응응응응응응
d medio = zeros([],2); %vettore con asse maggiore e asse minore di ogni
ellisse
vv = 0;
i
    = 0;
   while vv<=(PV*A-toll*A)</pre>
     i = i+1;
     temp = round(rand(1)*length(F));
     if (temp==0), temp = 1; end
     d medio(i,1) = dp(temp); %asse maggiore dell'ellisse, pari al
diametro dei cerchi nella versione con blocchi circolari
     d medio(i,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore
dell'ellisse, pari all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
     vvi = pi*(d medio(i,1)/2)*(d medio(i,2)/2); %area dell'ellisse i-
esima = pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
     vv
          = vv+vvi;
   end
   vvb=vv-vvi;
   Nd = numel(d medio)/2; %numero di ellissi generate (diviso 2 perchè
numel=n. elem. matrice, 2=n. di colonne)
   while vv>=(PV*A+toll*A)
     temp = round(rand(1)*length(F));
     if (temp==0), temp = 1; end
     d medio(Nd,1) = dp(temp); %asse maggiore dell'ellisse, pari al
diametro dei cerchi nella versione con blocchi circolari
     d medio(Nd,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore
dell'ellisse, pari all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
     vvi = pi*(d medio(i,1)/2)*(d medio(i,2)/2); %area dell'ellisse i-
esima = pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
          = vvb+vvi;
     vv
       while vv<=(PV*A-toll*A)</pre>
           temp = round(rand(1)*length(F));
           if (temp==0), temp = 1; end
           d medio(Nd,1) = dp(temp); %asse maggiore dell'ellisse, pari
al diametro dei cerchi nella versione con blocchi circolari
           d medio(Nd,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore
dell'ellisse, pari all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
          vvi = pi*(d medio(i,1)/2)*(d medio(i,2)/2); %area
dell'ellisse i-esima = pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
          vv = vvb+vvi;
```

```
end
   end
  do = sort(d medio, 'descend');
   figure(2)
   plot(do, 'x');
   title('Distribuzione dimensionale blocchi');
   xlabel('Blocchi');
   ylabel('Diametro blocchi (m)');
8
                       Verifica della dimensione frattale
2
% generazione delle classi
node = 0.05*sqrt(A); % valore di riferimento per rappres. grafica-->
ATT. || valutare se inserire 0.05 al posto di 0.04
node classe 1= node/2;
node classe 2= node;
node classe 3= node*2;
node classe 4= node classe 3*2;
node classe 5= node classe 4*2;
%definizione delle frequenze per le classi --- considerando l'asse
maggiore
ii=0;
cont_1=0;
cont 2=0;
cont 3=0;
cont 4=0;
for i=1:Nd
  if (node classe 1<do(i,1)) && (node classe 2>do(i,1))
     classe_1= cont 1 + 1;
     cont 1 = classe 1;
  end
  if (node classe 2<do(i,1)) && (node classe 3>do(i,1))
     classe 2 = \text{cont } 2 + 1;
     cont 2 = classe 2;
  end
  if (node classe 3<do(i,1)) && (node classe 4>do(i,1))
     classe 3 = \text{cont } 3 + 1;
     cont 3 = classe 3;
  end
  if (node_classe_4<do(i,1)) && (node_classe_5>do(i,1))
     classe 4 = \text{cont } 4 + 1;
     cont 4 = classe 4;
  end
end
somma = cont 1 + cont 2 + cont 3 + cont 4;
```

```
verifica = somma/Nd;
 freq(1) = (cont_1/Nd) *100;
 freq(2) = (cont_2/Nd) * 100;
 freq(3) = (cont 3/Nd) * 100;
 freq(4) = (cont 4/Nd) * 100;
 med(1) = (node classe 1+node classe 2)/2;
 med(2) = (node classe 2+node classe 3)/2;
 med(3) = (node classe 3+node classe 4)/2;
 med(4) = (node classe 4+node classe 5)/2;
 figure(3)
 loglog(med, freq, '+')
toc
******
****
                        Posizionamento blocchi
8
2
응응응응응응응
% set number of ellipses to plot (= Nd), già definito
n = Nd;
radiix = (do(:,1)/2); %"do" è la matrice contenente, su ogni riga, l'asse
> e l'asse < di ogni ellisse, dalla più grande alla più piccola
radiiy = (do(:, 2)/2);
pos = zeros(n, 2); % coordinate dei centri delle ellissi
posF1 = zeros(n, 2);
posF2 = zeros(n, 2);
allColours = lines(n);
% main loop
er=0;
ta=-pi:pi/100:pi;
Pkxb=zeros(length(ta),Nd); %coordinate x dei punti sul contorno delle
ellissi considerando il centro a x=0
Pkx=zeros(length(ta),Nd); %coordinate x dei punti sul contorno delle
ellissi
Pkyb=zeros(length(ta),Nd); %coordinate y dei punti sul contorno delle
ellissi considerando il centro a y=0
Pky=zeros(length(ta),Nd); % coordinate y dei punti sul contorno delle
ellissi
ang=zeros(n,1);
for idx = 1:n
   is good = false;
```

```
ang(idx) = randi([-360,0],1);
R = rotx(ang(idx));
```

```
% generate random positions and radii until we have a hit
    while ~is good
    matrix=zeros(length(ta),n-1); %matrice per calcoli di verifica non
inters ellissi
        %%%% genero coordinate random del centro dell'ellisse idx
        pos(idx, 1) = rand(1) *B;
        %%%% genero le coordinate dei punti di contorno dell'ellisse idx
        %%%% rotata
        Pkxb(:,idx)=radiix(idx)*cos(ta);
        Pkyb(:,idx)=radiiy(idx)*sin(ta);
        for i = 1:size(Pkx,1)
        Dum = R*[0 Pkyb(i,idx) Pkxb(i,idx)]';
        Pkyb(i, idx) = Dum(2);
        Pkx(i, idx) = Dum(3) + pos(idx, 1);
        end
      if (min(Pkx(:,idx))>toll pos && max(Pkx(:,idx))<B-toll pos)</pre>
            if pos(idx,1)<=B</pre>
                 er=1;
                vetymax=zeros(size(Pkx,1),1);
 %creo un vettore contenente tutte le coordinate y massime associate alle
coordinate x dell'ellisse
                 for iii=1:size(Pkx,1)
                     if Pkx(iii,idx)<=B</pre>
                     vetymax(iii)=H;
                     else
                     vetymax(iii) = (H-Pkx(iii,idx));
                     end
                 end
                while er==1
                pos(idx, 2) = rand(1) *H;
                Pky(:,idx) = Pkyb(:,idx) + pos(idx,2);
                     if min(Pky(:,idx))>toll pos && min(vetymax-
Pky(:,idx))>=toll pos
                     er=0;
                     else
                     er=1;
                     end
                end
            end
            if pos(idx, 1) >= H
               er=1;
                vetymax=zeros(size(Pkx,1),1);
 %creo un vettore contenente tutte le coordinate y massime associate alle
coordinate x dell'ellisse
                 for iii=1:size(Pkx,1)
8
                     vetymax(iii)=H+(B-Pkx(iii,idx))*(H)/B;
                  end
8
                   end
               while er==1
               pos(idx, 2) = rand(1) * H;
```

```
Pky(:,idx) =Pkyb(:,idx)+pos(idx,2);
                     if min(Pky(:,idx))>toll pos && min(vetymax-
Pky(:,idx))>=toll pos
                     er=0;
                     else
                     er=1;
                     end
               end
            end
                vetymax=zeros(size(Pkx,1),1);
 toc
              posF1(idx,:)=[-e*radiix(idx),0]; %coordinate del fuoco F1
essendo e*raddix = e*a= c
              posF2(idx,:)=[e*radiix(idx),0]; %coordinate del fuoco F2
ruotate
              DumF1 = R*[0 posF1(idx,2) posF1(idx,1)]';
              DumF2 = R^*[0 \text{ pos}F2(idx, 2) \text{ pos}F2(idx, 1)]';
              posF1(idx,:)=[DumF1(3)+pos(idx,1),DumF1(2)+pos(idx,2),];
%coordinate del fuoco F1 ruotate
              posF2(idx,:) = [DumF2(3) + pos(idx, 1), DumF2(2) + pos(idx, 2),];
%coordinate del fuoco F2 ruotate
              VerPos=1;
                 if idx>1
                    for j=1:idx-1
                    matrix(:,j)=((Pkx(:,idx)-posF1(j,1)).^2+(Pky(:,idx)-
posF1(j,2)).^2).^0.5+((Pkx(:,idx)-posF2(j,1)).^2+(Pky(:,idx)-
posF2(j,2)).^2).^0.5-2*radiix(j)-3*toll pos;
                    end
                 end
                    VerPos = all(matrix(:) > -0.000001);
                 %%%end
                 %verifica che tutti i termini siano ">0" (-0.000001 è
usato perchè inizialmente la matrice è costituita da "0")
                         if VerPos == 1
                             is good = true;
                         end
      end
    end
end
toc
%% plot
figure(5);
clf;
```

```
hold on
set(gca, 'visible', 'off')
daspect([1, 1, 1])
for idx = 1:n
  hold on
  patch(Pkx(:,idx), Pky(:,idx), zeros(1,length(ta)))
end
coordx=[0 0 B B 0];
coordy=[0 H H 0 0 ];
figure(5)
plot(coordx, coordy)
%%%%%da sistemare
m=[Pkx(1,:)',Pky(1,:)',Pkx(101,:)',Pky(101,:)',radiiy];
୫୫୫୫୫୫୫୫
୫
                  Generazione file di coordinate
2
8
888888888
if exist('coordinate.txt', 'file'), delete('coordinate.txt'); end
fid = fopen('coordinate.txt', 'a');
fprintf(fid,'%3.3f,%3.3f %2.2f,%2.2f %2.2f \r\n',m.');
fclose(fid);
୫୫୫୫୫୫୫୫
୫
                 Controllo percentuale volumetrica
8
2
888888888
format long
ΡV
test=vv/A
```

## Allegato B



Allegato B - 1 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 1, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 2 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 2, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 3 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 3, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 4 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 4, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 5 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 5, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 6 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 6, VBP 25%, rilassamento totale.


Allegato B - 7 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 7, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 8 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 8, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 9 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 9, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 10 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 10, VBP 25%, rilassamento totale.



Allegato B - 11 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 1, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 12 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 2, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 13 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 3, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 14 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 4, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 15 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 5, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 16 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 6, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 17 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 7, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 18 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 8, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 19 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 9, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 20 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 10, VBP 40%, rilassamento totale.



Allegato B - 21 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 1, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 22 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 2, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 23 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 3, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 24 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 4, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 25 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 5, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 26 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 6, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 27 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 7, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 28 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 8, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 29 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 9, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 30 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 10, VBP 55%, rilassamento totale.



Allegato B - 31 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 1, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 32 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 2, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 33 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 3, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 34 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 4, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 35 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 5, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 36 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 6, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 37 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 7, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 38 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 8, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 39 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 9, VBP 70%, rilassamento totale.



Allegato B - 40 Fascia plastica nell'intorno del cavo associata all'estrazione 10, VBP 70%, rilassamento totale.

## Allegato C



Allegato C - 1 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Lindquist (1994), VBP 25%.



Allegato C - 2 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Lindquist (1994), VBP 40%.



Allegato C - 3 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Lindquist (1994), VBP 55%.



Allegato C - 4 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Lindquist (1994), VBP 70%.



Allegato C - 5 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Sonmez et al. (2006), VBP 25%.



Allegato C - 6 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Sonmez et al. (2006), VBP 40%.



Allegato C - 7 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Sonmez et al. (2006), VBP 55%.



Allegato C - 8 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Sonmez et al. (2006), VBP 70%



Allegato C - 9 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Kalender et al. (2014), VBP 25%



Allegato C - 10 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Kalender et al. (2014), VBP 40%



Allegato C - 11 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Kalender et al. (2014), VBP 55%



Allegato C - 12 Fascia plastica nell'intorno del cavo secondo il metodo Kalender et al. (2014), VBP 70%