POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di stabilità di un versante in bimrock

Relatori:

Prof.ssa Monica Barbero
Ing. Maria Lia Napoli

Candidato:

Federica Amadore

Luglio 2018

Indice

Indice III
Introduzione 7
Capitolo 1 Formazioni strutturalmente complesse 9
1.1 Studio delle formazioni strutturalmente complesse 9
1.2 Generalità sulle formazioni strutturalmente complesse 10
1.3 L'interesse per le formazioni rocciose strutturalmente complesse 11
1.4 Identificazione e caratterizzazione delle formazioni rocciose complesse 15
Capitolo 2 Caratteristiche dei Bimrocks 17
2.1 Caratteristiche geometriche e geomeccaniche 17
2.2 Lunghezza ingegneristica caratteristica 21
2.3 Invarianza dalla scala di indagine 22
2.3.1 Indipendenza della scala di indagine: approccio secondo Medley 23
2.4 Stima della percentuale volumetrica dei blocchi 26
2.5 Valutazione sperimentale della percentuale volumetrica dei blocchi 27
Capitolo 3 Studio della tortuosità delle superfici di scivolamento 29
3.1 Superfici di rottura nelle formazioni rocciose strutturalmente complesse 30
3.2 Utilizzo di modelli di analisi per la definizione della superficie di rottura 31
3.3 Effetti della proporzione volumetrica sulla stabilità di un versante in bimrock: metodo all'equilibrio limite 36
3.4 Effetti della proporzione volumetrica sulla stabilità di un versante in bimrock: approccio numerico 40
Capitolo 4 Interpretazione delle caratteristiche meccaniche dei bimrocks mediante modelli 43

4.1 Modello di Medley 45
4.2 Modello di Lindquist 50
4.2.1 Analisi dei risultati 53
4.2.2 Effetti sul modulo di deformazione 59
4.2.3 Conclusioni sul modello di Lindquist 63
4.3 Criterio di resistenza proposto da Kalender 64
4.3.1 Considerazioni sul metodo empirico proposto da Kalender 70
4.4 Studio del comportamento meccanico dei bimrocks 71
4.4.1 Studio del comportamento meccanico: Barbero et al. (2006) 71
4.4.2 Studio del comportamento meccanico: Li, Liao et al. (2004) 73
4.5 Stato dell'arte 76
Capitolo 5 Studio della stabilità di un versante in bimrock 79
5.1 Introduzione all'analisi di stabilità di versante 79
5.2 Creazione del codice in Matlab 81
5.2.1 Metodo Monte Carlo 81
5.2.2 Applicazione del Metodo e creazione del codice 82
5.3 Rappresentazione del modello geometrico mediante AutoCad 86
5.4 Analisi numeriche mediante Phase^2 86
5.4.1 Utilizzo del software per le analisi di stabilità del versante in bimrock 87
5.5 Analisi di stabilità 90
5.6 Analisi di stabilità con modello eterogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Li et al. (2004) 91
5.6.1 Analisi di stabilità del versante in bimrock: assenza dei blocchi (VBP=0%) 91
5.6.2 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=25% 93
5.6.3 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=40% 95
5.6.4 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=55% 97
5.6.5 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=70% 99
5.6.6 Analisi di stabilità del versante in bimrock: confronto dei risultati 101
5.7 Applicazione del modello di versante omogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Lindquist (1994) 105
5.7.1 Analisi dei risultati 106

5.8 Applicazione del modello omogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Kalender (2014) 107
5.8.1 Analisi dei risultati 107
Capitolo 6 Analisi statistica 111
6.1 Scopo delle analisi statistiche 111
6.2 Introduzione ai test statistici 115
6.3 Test di Shapiro-Wilk 117
6.4 Test del T-Student 123
6.5 Teorema del Limite Centrale 126
Conclusioni 131
Indice delle figure 135
Indice delle tabelle 141
Allegato I 143
Allegato II 150
Allegato III 167
Allegato IV 169
Allegato V 171
Riferimenti Bibliografici 177

Introduzione

Si definiscono "formazioni complesse" quei corpi geologici (ammassi rocciosi o terreni) in cui si riscontrano proprietà meccaniche estremamente variabili nello spazio e spesso caratterizzate da un'organizzazione caotica e disorganica (Barla e Perello 2014).

Nell'ambito di tali formazioni si collocano le cosiddette "formazioni rocciose strutturalmente complesse" le quali, a loro volta, comprendono quelle caratterizzate da una struttura detta a "blocco in matrice" di cui fanno parte i "bimrocks" e i "melanges".

Il termine bimrock (*block-in-matrix rock*) è stato introdotto da Medley (1994) per indicare materiali eterogenei, costituiti da blocchi di roccia presenti in un materiale meno resistente, più fine e cementato. Sebbene in letteratura (Lindquist 1994) siano utilizzati indistintamente termini come melange e bimrock, in realtà è stato lo stesso Medley a proporne una diversificazione. Questi, infatti, classifica i melanges come quel sottogruppo dei bimrocks che manifesta maggiori problematiche dal punto di vista ingegneristico, che è presente perlopiù in zone montuose e le cui origini risalgono a fenomeni tettonici di subduzione (Medley 2002).

Tuttavia, in questa trattazione, si adopereranno indistintamente termini come bimrock, melange, ammassi eterogenei e formazioni rocciose strutturalmente complesse.

Dal momento che in questi ammassi coesistono materiali aventi proprietà geomeccaniche fortemente differenti, l'eterogeneità rappresenta la caratteristica più evidente: sono infatti presenti dei blocchi più resistenti immersi in una matrice avente tessitura più fine e con caratteristiche di resistenza tendenzialmente peggiori.

La non omogeneità può determinare importanti problematiche nella fase di identificazione, caratterizzazione ed esecuzione dei lavori in presenza di ammassi strutturalmente complessi.

Sebbene in diversi lavori di progettazione di opere civili, realizzate in presenza di melange, siano stati attribuiti all'intero deposito le proprietà meccaniche della sola matrice, è apparso evidente nel tempo che tale scelta non risulta né la più realistica né tantomeno, nella maggior parte dei casi, la più cautelativa (Medley 2004).

Per tali ragioni, soprattutto negli ultimi anni, si è manifestato un maggiore interesse per lo studio di questi materiali. Difatti, è opportuno effettuare un'accurata analisi e un'adeguata caratterizzazione meccanica al fine di scongiurare imprevisti nella fase di esecuzione dei lavori e di evitare possibili inconvenienti di natura tecnica con conseguenti dispendi economici non preventivati.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di analizzare l'influenza della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) sulla stabilità di un versante in bimrock.

Le analisi di stabilità sono state effettuate attraverso un approccio agli elementi finiti (programma RS2 di Rocscience), su di una geometria semplice di versante ed effettuando, mediante il metodo probabilistico Monte Carlo, delle estrazioni casuali dei blocchi in termini dimensionali e di diposizione all'interno del versante. In particolare, al fine di ottenere una sufficiente validità statistica dei risultati, sono state eseguite 15 estrazioni per ogni VBP considerata (25%, 40%, 55% e 70%).

Inoltre, sono state condotte delle analisi di stabilità sugli stessi modelli, considerando il mezzo come omogeneo equivalente, secondo quanto suggerito in letteratura da alcuni autori (Lindquist 1994, Kalender et al. 2014).

Il Capitolo 1 descrive i caratteri generali delle formazioni complesse, partendo dalla loro definizione e classificazione fino alla trattazione delle principali problematiche connesse a tali tipologie di materiali.

Il Capitolo 2 riporta le principali proprietà dei bimrocks soprattutto in termini di:

- lunghezza caratteristica L_c;
- proprietà geometriche e meccaniche;
- invarianza di scala.

Il Capitolo 3 espone i fattori che influenzano la forma della superficie di scivolamento e come la dimensione e la percentuale volumetrica dei blocchi ne influenzino la tortuosità.

Nel Capitolo 4 sono descritti alcuni studi, presenti in letteratura, per la determinazione dei parametri di resistenza e per la valutazione del comportamento meccanico delle formazioni rocciose complesse (Medley 2002, Lindquist 1994, Kalender et al. 2014, Li et al. 2004, Barbero et al. 2006).

Nel Capitolo 5 è presentato lo studio di stabilità del versante in bimrock, condotto mediante analisi agli elementi finiti e metodo probabilistico Monte Carlo. Infine, sono mostrati i risultati ricavati in termini di Fattore di Sicurezza e di volumi mobilitati, al variare della percentuale volumetrica dei blocchi.

Nel Capitolo 6, l'obiettivo è quello di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche attraverso un approccio statistico; in particolare, si sono applicati i test di Shapiro-Wilk, T-Student e il Teorema del Limite Centrale.

Capitolo 1

Formazioni strutturalmente complesse

Con il termine "formazioni complesse" si indicano quei corpi geologici (ammassi rocciosi o terreni) in cui si riscontrano proprietà meccaniche estremamente variabili nello spazio e spesso caratterizzate da un'organizzazione caotica e disorganica (Barla and Perello 2014).

La complessità è dovuta all'estrema eterogeneità che le contraddistingue, la quale ha determinato nel corso degli anni questioni e dibattiti su come, e in che termini, fosse opportuno classificarle. Tali formazioni sono dette anche "strutturalmente complesse" e includono una grande famiglia di materiali legati a fenomeni di origine tettonica sedimentaria o a processi chimici e fisici.

1.1 Studio delle formazioni strutturalmente complesse

Lo studio delle formazioni strutturalmente complesse si presenta arduo e problematico soprattutto perché è evidente una considerevole confusione terminologica e concettuale alla base. Le maggiori divergenze sono riscontrabili in termini di:

- definizione geologica e geotecnica;
- identificazione di terreno o di roccia eterogenei;
- suddivisione degli ammassi rocciosi eterogenei a fronte di un differente processo di genesi.

La complessità geologia si lega alle classificazioni mineralogiche e petrologiche, quindi è connessa ad aspetti non prettamente ingegneristici.

La complessità geotecnica, al contrario, si focalizza sulla caratterizzazione geomeccanica dei materiali coinvolti. Per quanto concerne l'identificazione di un terreno o di una roccia eterogenei è possibile far riferimento agli studi condotti da Medley (2001) che considerano la formazione come appartenente alla categoria delle rocce non omogenee qualora la matrice sia cementata e presenti

minore resistenza rispetto a quella attribuibile ai blocchi; viceversa, se la matrice è formata da materiale sciolto si parla di terreno eterogeno.

1.2 Generalità sulle formazioni strutturalmente complesse

Già a partire dagli anni Sessanta, sono stati condotti numerosi studi per l'analisi dei depositi eterogenei con lo scopo di definire, in maniera univoca, metodi di identificazione e di caratterizzazione di tali materiali. Una delle prime classificazioni delle formazioni complesse è stata proposta da A.G.I. (1979), in cui si pone particolare attenzione soprattutto ai depositi caratterizzati da litologie arenaceo-pelitiche o calcareo-pelitiche (A/R) e alla complessità della struttura, dovuta sia alla giustapposizione delle due differenti litologie sia alle deformazioni tettoniche (Figura 1).

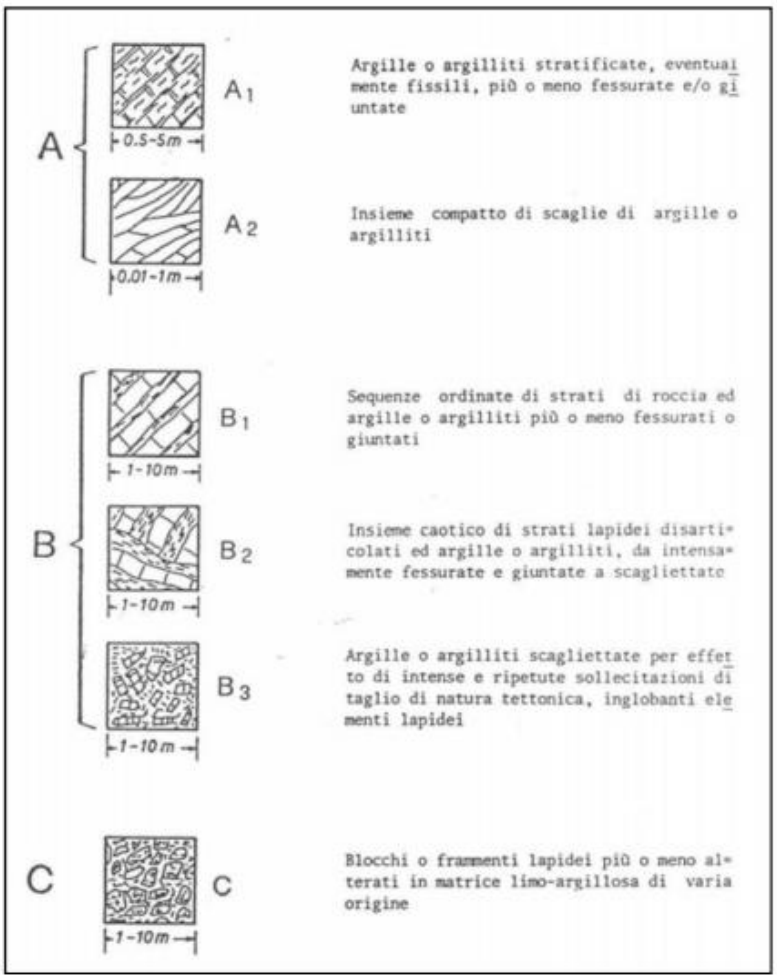


Figura 1 – Classificazione delle formazioni complesse secondo A.G.I. (A.G.I. 1979).

1.3 L'interesse per le formazioni rocciose strutturalmente complesse

Nell'ambito delle formazioni complesse si collocano le "formazioni rocciose strutturalmente complesse" le quali, a loro volta, comprendono anche quelle caratterizzate da una struttura detta a "blocco in matrice" di cui fanno parte i "bimrocks" e i "melanges".

Il termine bimrock (*block-in-matrix rock*) è stato introdotto da Medley (1994) per indicare materiali eterogenei, costituiti da blocchi di roccia presenti in un materiale meno resistente, più fine e cementato. Qualora la matrice si presenti non compatta e non cementata si parla, invece, di "bimsoil".

Questi depositi hanno, dunque, una componente rocciosa, solitamente calcarea o arenaria costituita da clasti di dimensioni molto variabili, immersi in una struttura a granulometria più fine, perlopiù argillosa o parzialmente argillitica.

Sebbene in letteratura (Lindquist 1994) si utilizzino indistintamente termini come melange e bimrock, in realtà, è stato lo stesso Medley a proporne una diversificazione. Questi, infatti, classifica i melanges come quel sottogruppo di bimrocks che manifesta maggiori problematiche dal punto di vista ingegneristico, che è presente perlopiù in zone montuose e le cui origini risalgono a fenomeni tettonici di subduzione (Medley 2002).

L'interesse per le formazioni rocciose strutturalmente complesse è nato con lo studio del *Fransiscan Complex*, situato nel nord della California, esso è costituito da una matrice argillosa – argillitica, caratterizzata da deformazioni di taglio, con immersi blocchi generalmente arenacei e tufacei e, in quantità minore, blocchi di selce, calcari, serpentiniti ed altri litotipi metamorfici.

Da un punto di vista tessiturale, il *Fransiscan Complex* è costituito dalla tipica conformazione strutturale dei melanges e cioè contenente blocchi eterometrici ed eterogenei disposti in modo del tutto caotico all'interno della matrice (Figura 2).

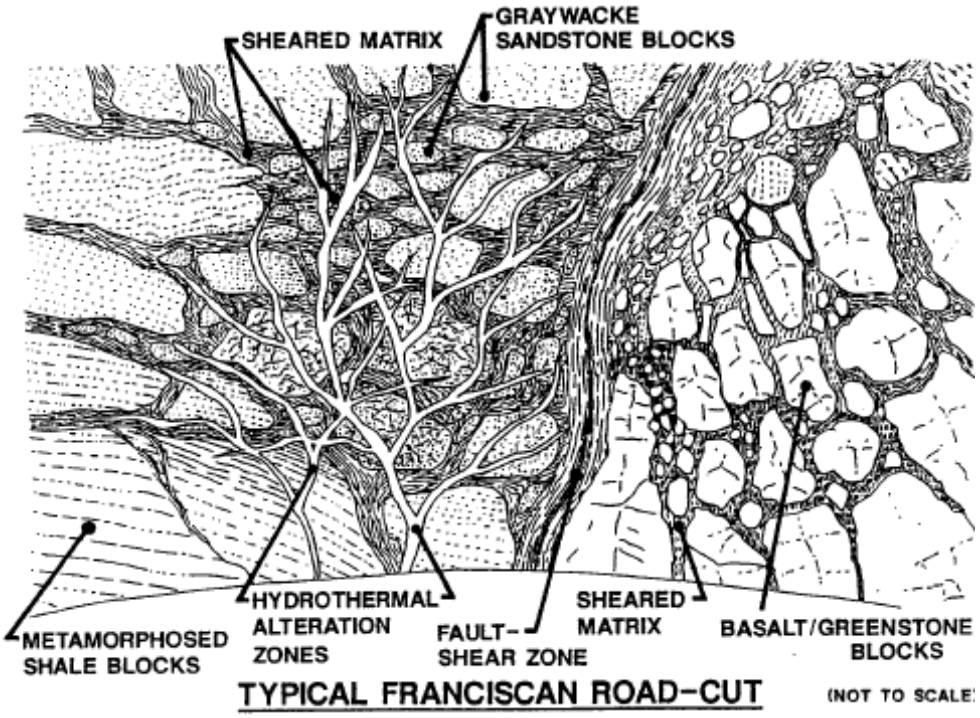


Figura 2 –Rappresentazione della configurazione caotica del Fransiscan Complex (Medley 1994).

All'interno del *Fransiscan Complex* la litologia dei materiali coinvolti è estremamente variabile e ciò è apparso evidente anche dagli studi condotti da Medley (2001), grazie ai quali, l'autore ne ha confermato la grande variabilità. In particolare, questi ha stimato che nel melange presente nella contea di Marin, in California (Figura 3), i blocchi appartengono a differenti tipologie e, nello specifico, sono di tipo:

- grovacca per il 60% e il 70%;
- vulcanico per il 15% e il 20%;
- serpentinitico per il 15% e il 20%;
- selce per il 5% e il 10%.

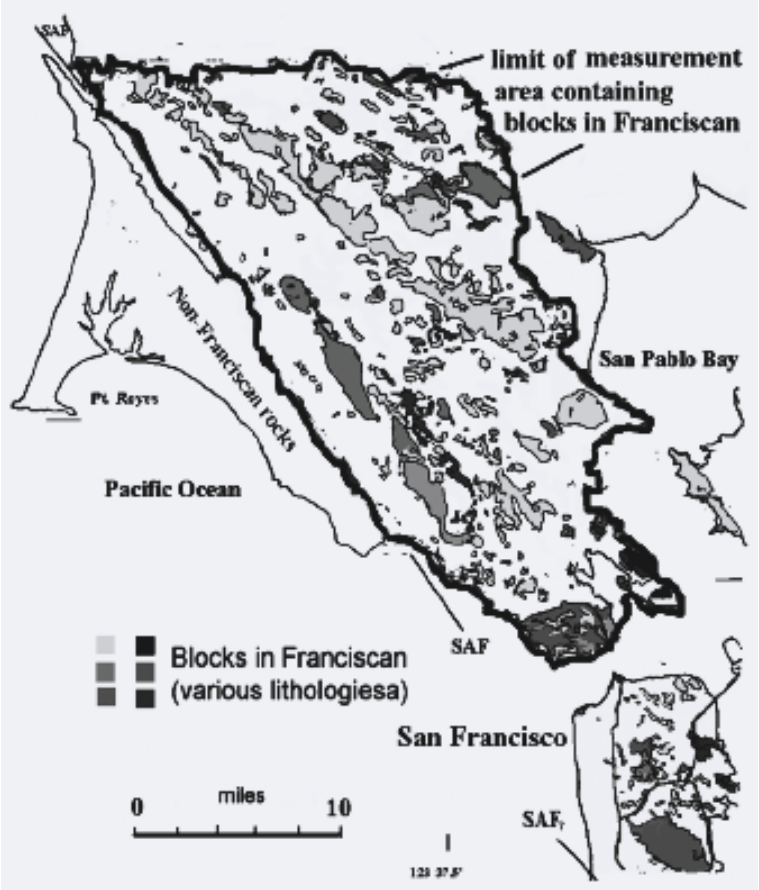


Figura 3 – Differenti formazioni di melange (Medley 2001).

A partire dallo studio di questa formazione rocciosa complessa, sono stati condotti, nel corso degli anni, ulteriori indagini e studi per quanto riguarda ammassi rocciosi eterogenei individuati anche in altre località (Figura 4).

In ambito italiano, ad esempio, l'attenzione si è concentra nell'analisi delle argille scagliose collocate nell'Appennino Tosco-Emiliano e in alcune zone del sud Italia (Medley 2004, Coli 2011).

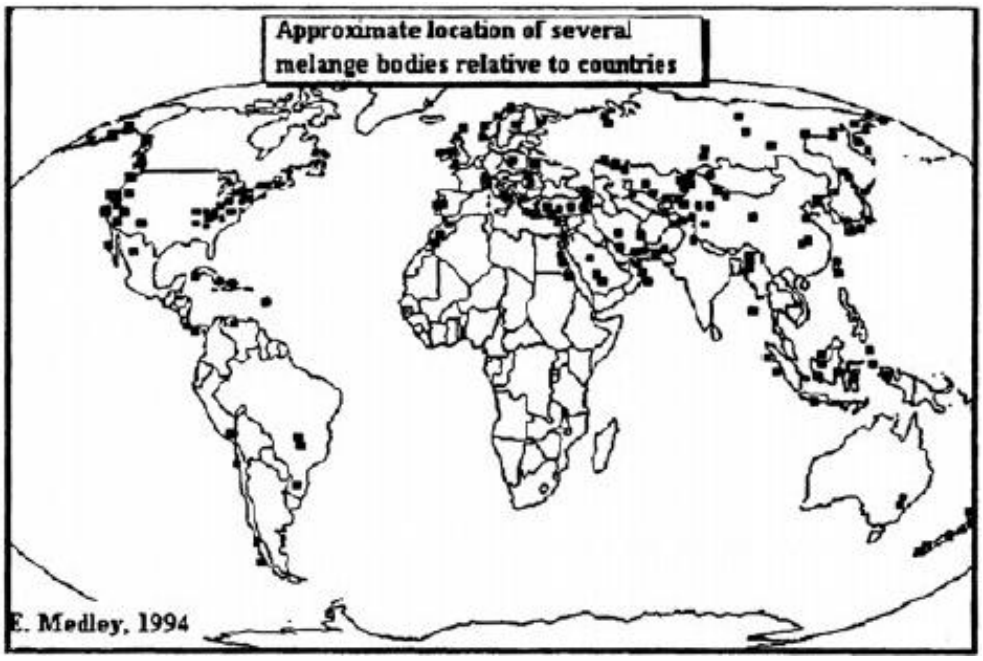


Figura 4 – Collocazione dei melanges nei vari Paesi del mondo (Medley 1994).

La presenza di blocchi all'interno delle formazioni rocciose complesse gioca un ruolo determinante nel comportamento dell'ammasso; tali inclusioni si presentano con dimensioni estremamente variabili, dai centimetri fino alle decine di metri.

Inoltre, è stato osservato (Medley 1994, Medley 2002) che tali formazioni eterogenee sono definibili come "*self similar system*" e presentano un'invarianza di scala, ciò significa che sono costituiti da elementi che sono repliche dell'intero (Medley 1994) per cui la presenza delle inclusioni rimane invariata, al variare della dimensione della scala di interesse.

Pertanto, per ogni scala di analisi è necessario inserire una soglia dimensionale di riferimento, che introduce un limite tra ciò che è matrice e ciò che, invece, è considerato blocco (Medley e Goodman 1994).

Per Medley il "blocco" è la parte del complesso eterogeneo che supera la dimensione di soglia, definita a partire dalla scala di investigazione. Questi saranno trattati dettagliatamente nei successivi Capitoli. I bimrocks sono dunque caratterizzati da una forte eterogeneità dovuta sostanzialmente alla presenza di clasti rocciosi immersi in una matrice con proprietà meccaniche differenti.

Sebbene in diversi lavori di progettazione di opere civili gli addetti ai lavori abbiano ritenuto opportuno attribuire all'intero ammasso le medesime caratteristiche meccaniche della sola matrice, è apparso evidente nel tempo che tale scelta non risulta né la più realistica né tantomeno la più cautelativa nella maggior parte dei casi (Medley 2004).

Per tali ragioni è importante individuare l'eventuale presenza di una formazione rocciosa complessa ed effettuare una idonea ed opportuna caratterizzazione meccanica dei materiali interessati.

Tuttavia è necessario sottolineare che il posizionamento e il numero dei fori di sondaggio da eseguire *in situ* non sono facilmente prevedibili o eseguibili sia per problemi di accessibilità all'area sia per le disponibilità economiche previste.

Oltre a tali problemi di carattere generale, per i bimrocks si aggiunge anche la difficoltà di individuare un'opportuna modalità di prelievo che consenta di ottenere campioni indisturbati.

Tutti questi aspetti suggeriscono una grande difficoltà nello studio dei melanges. Le principali problematiche riguardano soprattutto la fase di caratterizzazione meccanica della formazione rocciosa eterogenea, lo studio di stabilità di versante e l'individuazione della potenziale superficie di scivolamento che assume, in presenza di questi materiali, un andamento tortuoso e irregolare a causa della presenza dei blocchi. Questi aspetti verranno trattati a partire dal Capitolo 2.

1.4 Identificazione e caratterizzazione delle formazioni rocciose complesse

In presenza di formazioni rocciose complesse è opportuno effettuare una idonea campagna di identificazione ed una pianificazione mirata delle indagini da eseguire, al fine di ottenere una corretta caratterizzazione meccanica di tutti i materiali coinvolti.

In particolar modo, è possibile riassumere tali interventi nei seguenti punti:

- studio della storia geologica della zona esaminata;
- analisi dell'andamento geomorfologico del deposito;
- mappatura dell'ammasso e analisi di foto e immagini;
- programmazione della campagna di indagini.

Per la definizione della storia geologica e dell'andamento geomorfologico, si effettuano generalmente delle ricerche bibliografiche e si utilizzano foto e carte topografiche. Il fine è quello di raccogliere un numero significativo di informazioni e di definire i limiti geologici del sito oggetto di studio.

Inoltre, in presenza di ammassi eterogenei, l'andamento topografico assume frequentemente una conformazione ondulata. Per tali motivi, un'attenta osservazione dell'area permette di ottenere importanti informazioni.

Medley (2001) ha proposto dei metodi utili per il riconoscimento dei melanges (Figura 5, Figura 6). Questi suggerisce che è possibile identificare le aree caratterizzate da scarsità di blocchi negli avvallamenti e nelle zone sottoposte ad avvenimenti franosi; al contrario, la loro presenza è individuabile lungo gli argini fluviali e lungo le costiere marittime, zone ricche di affioramenti resistenti all'erosione e promontori rocciosi.

Usualmente, è possibile osservare la presenza di alberi sui blocchi mentre sulla matrice è generalmente riscontrabile una rada coltre vegetale. In primavera, poiché è presente una grande quantità di acqua nei terreni, i blocchi grandi e poco profondi si ricoprono di graminacee e di piccoli arbusti, mentre, la matrice è soggetta ad una esigua vegetazione.

Questi aspetti sono riconosciuti come campanelli di allarme per l'individuazione delle formazioni rocciose complesse. Tuttavia nella maggior parte dei casi, gli addetti ai lavori non riescono ad individuare immediatamente tali formazioni e dunque, sebbene siano operazioni indispensabili, l'identificazione e la mappatura dei bimrocks rappresentano attività piuttosto complesse. Generalmente un'adeguata compagna di indagini comprende:

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

Figura 5 – Deposito in Sierra Nevada (Medley 2007).

Figura 6 – Blocchi rocciosi all'interno di un melange sporgono dalla collina, Grecia (Medley 2007).

Capitolo 2

Caratteristiche dei Bimrocks

L'estrema variabilità litologica, spaziale e meccanica delle formazioni rocciose strutturalmente complesse determina una fase di caratterizzazione complicata ed articolata. L'aspetto predominante di questi ammassi è infatti l'alternanza caotica tra matrice e blocchi. Quest'ultimi possono mostrarsi nella parte più superficiale qualora siano stati sottoposti a fenomeni di erosione.

La forma, la distribuzione spaziale e la percentuale volumetrica dei blocchi sono aspetti strettamente correlati alle caratteristiche di tali formazioni e ne influenzano il comportamento meccanico.

2.1 Caratteristiche geometriche e geomeccaniche

La conoscenza delle proprietà dei blocchi presenti nei melanges permette di capire come, e in che misura, essi influenzano il comportamento meccanico dei bimrocks.

La presenza dei blocchi interrompe la continuità della matrice e provoca la formazione di una superficie di rottura tortuosa e non circolare come avviene, invece, in presenza di ammassi rocciosi omogenei (questo aspetto verrà ampiamente trattato al Capitolo 3). A fronte di ciò, è opportuno valutare le principali caratteristiche delle inclusioni in termini di:

- dimensioni;
- distribuzione spaziale;
- percentuale volumetrica.

L'esecuzione di fori di sondaggio presenta numerosi vantaggi come, ad esempio, la possibilità di identificare la litologia dei materiali, la posizione del bedrock e di effettuare una stima, seppur approssimata, della percentuale volumetrica dei blocchi.

E' frequente, in presenza di melange, una scorretta individuazione del bedrock. Difatti è possibile interpretare erroneamente come bedrock quello che in realtà è un blocco molto esteso, commettendo così un'errata interpretazione del deposito. Un errore legato all'individuazione del

bedrock può provocare significativi problemi dal momento che si potrebbe rischiare di non individuare correttamente la potenziale superficie di scivolamento, con conseguenti ripercussioni ad esempio sul progetto di stabilizzazione di un versante (Medley 2001).

Per quanto riguarda l'identificazione dimensionale dei blocchi presenti nei melanges, non è sufficiente procedere esclusivamente mediante fori di sondaggio.

Difatti, in presenza di melange, è molto probabile che il foro non intercetti l'intero blocco ma solamente una porzione di esso.

L'utilizzo dei carotaggi potrebbe determinare incertezze nell'interpretazione dell'effettiva dimensione dei blocchi presenti nell'ammasso eterogeneo: i risultati deducibili dall'indagine delle carote (1D) potrebbero essere molto lontani dalla reale dimensioni dei blocchi nell'ammasso (3D), (Figura 7).

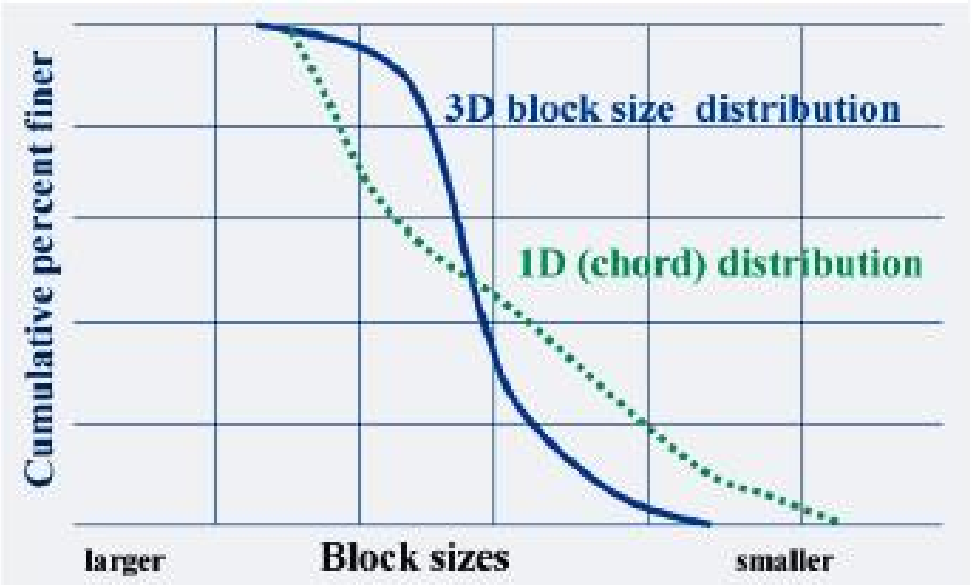


Figura 7 – Distribuzione dimensionale dei blocchi 1D stimata, in verde, a confronto con la distribuzione reale 3D, in blu (Medley 2001).

Frequentemente si tende a sottostimare la dimensione dei blocchi più grandi e a sovrastimare la dimensione di quelli più piccoli, a causa di una scorretta interpretazione dei dati ottenuti dai fori di sondaggio; pertanto, i risultati ricavati da indagini di perforazione *in situ* sono generalmente lontani dalla realtà a causa della struttura cotica ed eterogenea dei bimrocks.

Quindi l'identificazione stratigrafica, in presenza di melanges, è un'operazione non semplice e i risultati possono risultare poco rappresentativi a causa della presenza dei blocchi (Figura 9).

Sebbene si possa inizialmente pensare che un numero maggiore di fori permetta di ottenere un risultato più soddisfacente, in realtà bisogna tenere in considerazione anche le effettive possibilità economiche a disposizione e l'eventuale inaccessibilità del sito oggetto di studio.

Dunque nel caso di indagini monodimensionali non è possibile identificare con esattezza la dimensione massima dei blocchi poiché la carota estratta contiene sia matrice che blocchi ma la parte di blocco intercettata, come precedentemente accennato, è difficilmente coincidente con il diametro massimo del blocco stesso.

Indicando con d_{mod} la dimensione massima del blocco rilevata in campo, è molto frequente che la porzione di blocco intercettato dal foro di sondaggio non coincida con d_{mod} ma sarà invece un generica corda (Figura 8).

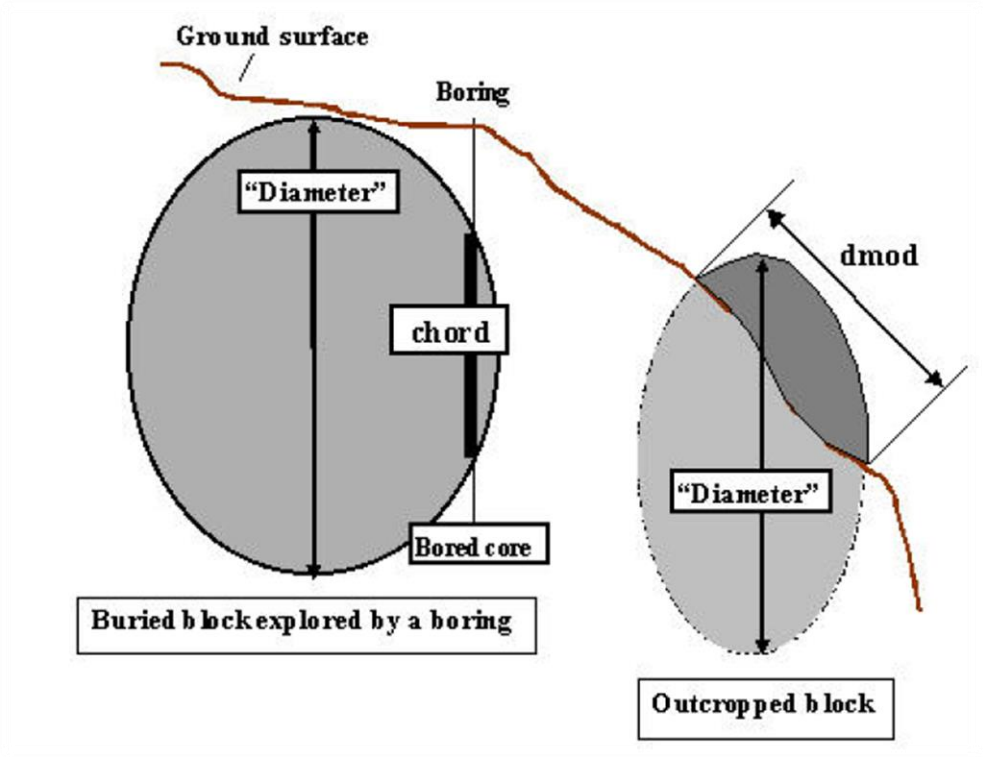


Figura 8 – Confronto tra la massima dimensione osservata d_{mod} e il diametro di un blocco (Medley 2001).

La possibilità che la corda intercettata durante la perforazione coincida con la massima dimensione dell'inclusione dipende chiaramente dall'orientazione relativa del blocco rispetto alla direzione del foro e dalla lunghezza totale di perforazione.

Le lunghezze delle porzioni di blocchi intercettate durante la prova e misurate sulle carote possono essere sommate, per tutti i fori che sono stati realizzati, e divise per la lunghezza totale dei carotaggi, in tal modo si ottiene la "proporzione cumulativa lineare dei blocchi".

Tale valore fornisce una valutazione preliminare della proporzione volumetrica e, nel caso in cui la lunghezza del foro non rispetti i limiti suggeriti, essa deve essere sottoposta a correzioni (Medley 2007). Medley (1994) suggerisce di considerare una profondità di indagine pari a $10 \cdot d_{max}$ dove dmax è la massima dimensione del blocco.

La valutazione della distribuzione dimensionale dei blocchi è dunque un aspetto fondamentale; se si trascurasse completamente o parzialmente la presenza di tali inclusioni, si potrebbero manifestare improvvisamente dei blocchi, anche di notevoli dimensioni, con rallentamenti durante i lavori di costruzione di opere civili (dighe, gallerie etc.) e un'inevitabile perdita di risorse economiche con costosi interventi per la rimozione di tali blocchi.

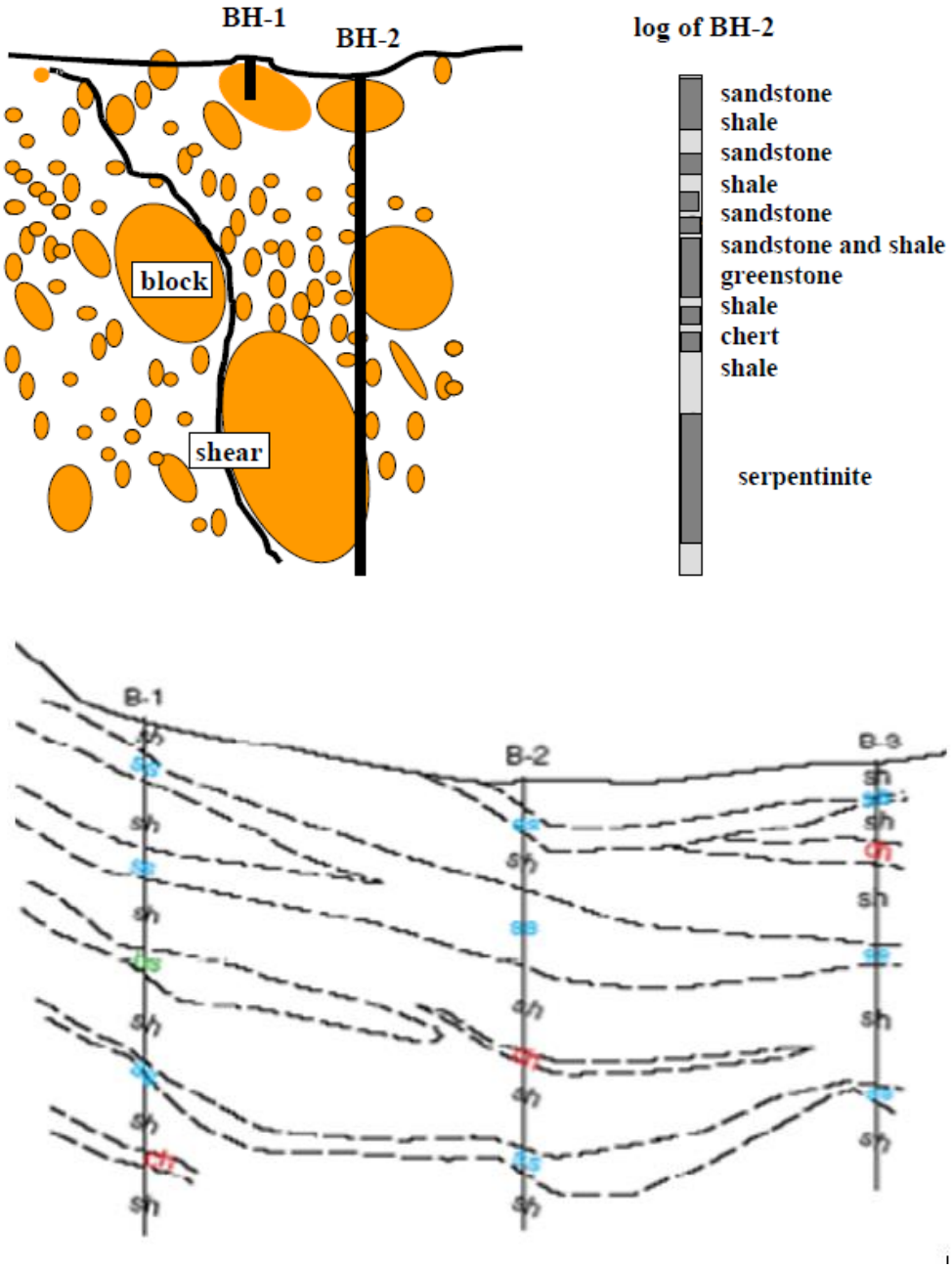


Figura 9 – Scorretta valutazione dell'ammasso a partire da fori di sondaggio, (Medley 2001).

La valutazione della proporzione volumetrica dei blocchi, basata sull'osservazione dei risultati ottenuti mediante fori di sondaggio, è soggetta ad un grado di incertezza che è stato valutato empiricamente. Medley e Lindquist (1995) hanno infatti introdotto un procedimento utilizzando modelli artificiali di bimrock, in cui la proporzione volumetrica è determinata a partire dalla proporzione lineare e corretta, successivamente, mediante un fattore dipendente dalla lunghezza totale dei provini e dalla proporzione lineare stessa. Tale fattore correttivo deve essere applicato affinché si possa ottenere un valore conservativo della percentuale volumetrica dei blocchi, in funzione del quale dipendono i parametri di resistenza.

2.2 Lunghezza ingegneristica caratteristica

Si definisce "*dimensione ingegneristica caratteristica*, L_c" la grandezza che risulta essere rappresentativa del problema progettuale in esame.

In particolare, essa rappresenta la soglia dimensionale che divide i blocchi dai frammenti di roccia che si ritiene facciano parte della matrice (Medley 2001).

L'uso della dimensione ingegneristica caratteristica è analogo all'utilizzo di un metro a nastro, o di una moneta, senza le quali l'osservatore non potrebbe apprezzare la scala di una immagine.

In funzione di tale lunghezza, quindi, è definibile un range dimensionale entro il quale la grandezza dei blocchi è ritenuta significativa. La scelta della dimensione ingegneristica viene effettuata, generalmente, con ampia flessibilità, tenendo sempre in considerazione il problema progettuale in esame.

In letteratura, sono presentati alcuni casi nei quali è stata suggerita la modalità di scelta di L_c, che può essere:

- la larghezza di una fondazione;
- lo spessore di una zona di instabilità;
- il diametro di una galleria;
- l'area A del sito in esame;
- il diametro di un campione destinato a prove di laboratorio.

Di seguito, è descritto un esempio proposto da Medley (2001), in cui è stata considerata un'area di studio interamente costituita da melange.

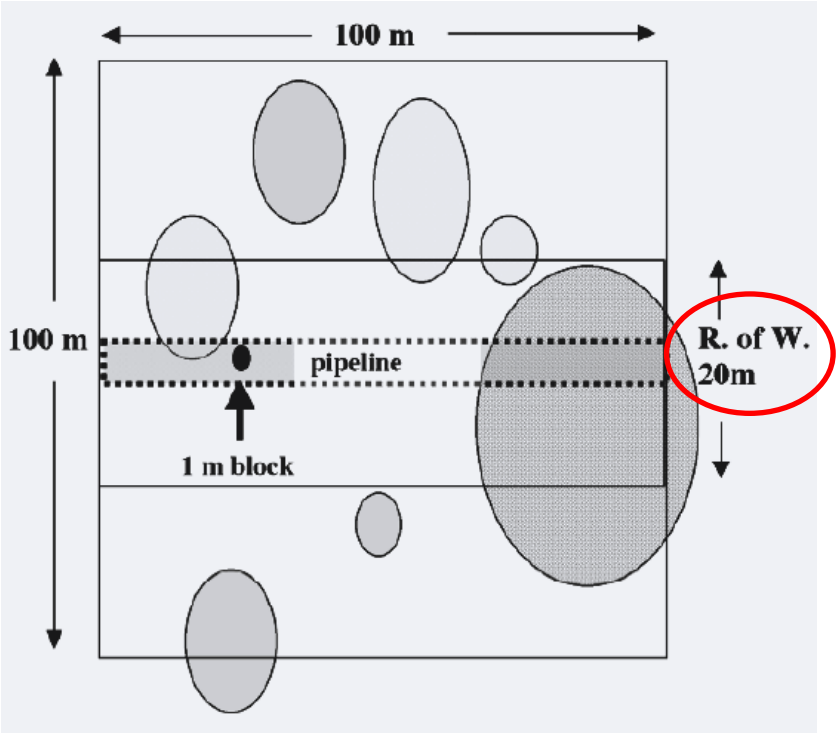


Figura 10 – Concetto di soglia tra blocco e matrice: scale di interesse (Medley 2001).

In Figura 10, è stata rappresentata l'area totale di studio (A), proponendo uno schema in cui si mostrano le varie scale relativamente ad una strada (cerchio rosso in Figura 10) e ad una trincea scavata per l'istallazione di una tubazione ("pipeline" in Figura 10).

La strada è larga 20 metri mentre la trincea è larga e profonda 2 metri. Alla luce di ciò, è possibile fare delle considerazioni a riguardo.

Considerando l'area interessata dalle opere, pari a 10000 m^2, la dimensione caratteristica L_c è uguale a $\sqrt{A}$, cioè pari a 100 metri.

Il limite tra blocchi e matrice è di 0,05· L_c pari dunque a 5 metri, mentre la dimensione massima di un blocco è pari a 0,75· L_c quindi pari a 75 metri.

È interessante osservare che il blocco collocato nella zona centrale, ombreggiato di nero con dimensione di 1 metro, in questo caso, fa parte della matrice.

Guardando alla scala della strada, la dimensione ingegneristica L_c è di 20 metri; la soglia tra blocchi e matrice, pari a 0,05· L_c, risulta adesso pari a 1 metro; la dimensione massima del blocco può essere considerata pari a 0,75· L_c quindi, pari a 15 metri.

Infine considerando la scala della trincea, si evince che la L_c corrisponde alla profondità dello scavo e cioè a 2 metri; allo stesso modo del caso precedente, si ricavano il limite tra blocchi e matrice e la dimensione del blocco più grande, pari rispettivamente a 0,1 e 1,5 metri.

Ciò significa che il blocco di 1 metro, presente nella parte centrale della Figura 10, viene considerato appartenente ai "blocchi" e non più alla matrice, sia in questo caso sia in quello precedente.

Alla luce di questo caso di studio, proposto da Medley (2001), si evince in maniera chiara ed efficace come e quanto sia importante la scala di riferimento del problema in esame e quanto sia fondamentale, seppur flessibile e relativamente arbitraria, la scelta della lunghezza ingegneristica caratteristica.

2.3 Invarianza dalla scala di indagine

Numerosi studi eseguiti sui melanges hanno messo in evidenza che la distribuzione della massima dimensione dei blocchi (d_{mod}) segue una legge di potenza con esponente negativo. Ciò equivale a dire che, per ogni scala di osservazione, è possibile individuare la presenza dei blocchi le cui dimensioni rispettano la suddetta distribuzione e che la soglia dimensionale blocco-matrice è variabile a seconda della lunghezza ingegneristica caratteristica L_c.

Facendo riferimento agli studi condotti sul *Franciscan Complex*, è stato osservato che la distribuzione della dimensione massima dei blocchi (d_{mod}) segue proprio tale legge (Medley 1994, Medley 2002). La legge esponenziale negativa è espressa dalla seguente relazione:

$$N = r^{-D} \tag{2.1}$$

Dove N rappresenta la frequenza relativa degli elementi con una dimensione lineare più grande rispetto a r; l'esponente negativo D è chiamato "dimensione frattale" (Turcotte 1997).

Come accennato precedentemente, esiste un vasto range di variabilità delle dimensioni dei blocchi nei bimrock. Tale variabilità è talmente ampia che è possibile riscontrare fino a sette ordini di grandezza, da millimetri a decine di chilometri.

Poiché la distribuzione dimensionale dei blocchi è di tipo frattale, allora, sussiste una indipendenza dalla scala di indagine: questa è di certo una delle più rilevanti caratteristiche attribuite ai melanges. Per tale ragione, sono stati condotti studi a riguardo, come quello proposto da Medley (2002).

2.3.1 Indipendenza della scala di indagine: approccio secondo Medley

Come discusso al Paragrafo 2.3, la distribuzione dimensionale dei blocchi, all'interno dell'ammasso in bimrock, segue una legge esponenziale negativa in cui l'esponente è detto "dimensione frattale" (Medley 2002).

A tal proposito, Medley ha condotto uno studio di misura della dimensione massima osservata (d_{mod}) di un gruppo di campioni costituito da circa 1900 blocchi, mediante l'utilizzo di mappe geologiche e dell'osservazione di affioramenti del *Franciscan Complex* (Medley 2002); le aree di indagine (A), contenenti i blocchi misurati, sono rappresentate in sette ordini di grandezza e le dimensioni dei massi oscillano tra i millimetri e le decine di chilometri (Figura 11).

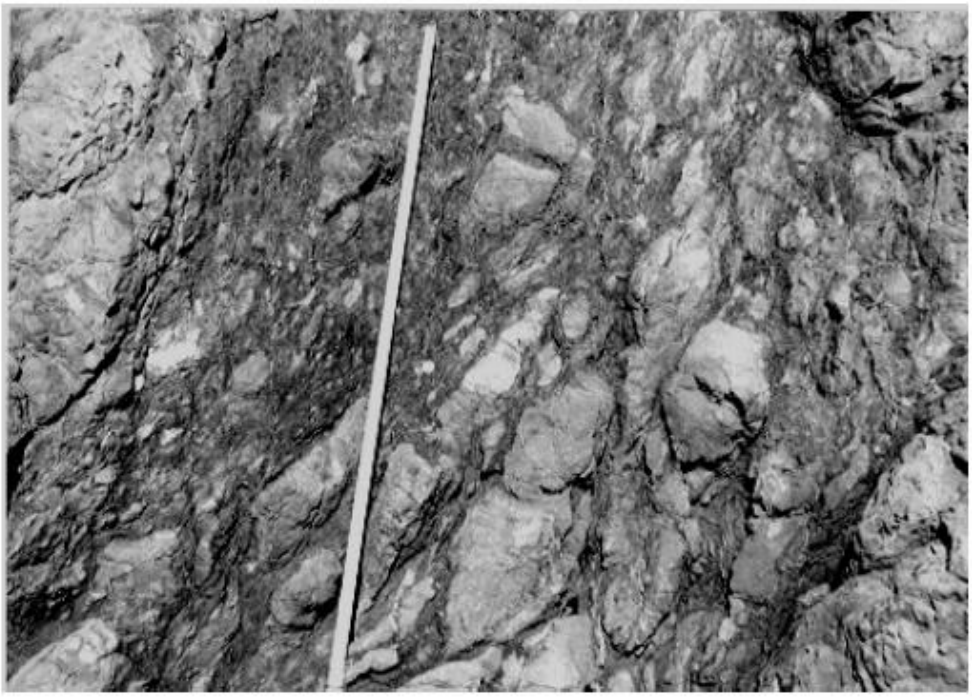


Figura 11 – Tipico Fransiscan melange, scala di riferimento 1,5 metri (Medley 2002).

Le dimensioni dei blocchi alle varie scale sono state adimensionalizzate, dividendole per la radice quadrata dell'area contenente gli stessi ($\sqrt{A} = L_c$).

Per ciascuna area, quindi, la frequenza numerica dei blocchi è stata convertita in frequenza relativa andando a dividere il numero dei blocchi, di ciascun ordine di grandezza, per il numero totale dei blocchi misurati in quell'area.

Immaginando di creare ogni categoria che contenga un intervallo di dimensioni doppie rispetto alla classe precedente, sono state create le classi dimensionali dei massi del tipo:

- 0,025 – 0,05;
- 0,05 – 0,1;
- 0,1 – 0,2;
- 0,2 – 0,4;
- 0,4 – 0,8.

In Figura 12, sono rappresentati i dati raccolti dall'autore; questi ha realizzato un istogramma in scala logaritmica contente in ascissa la massima dimensione osservata normalizzata rispetto alla $\sqrt{A}$ mentre, in asse delle ordinate, le frequenze relative.

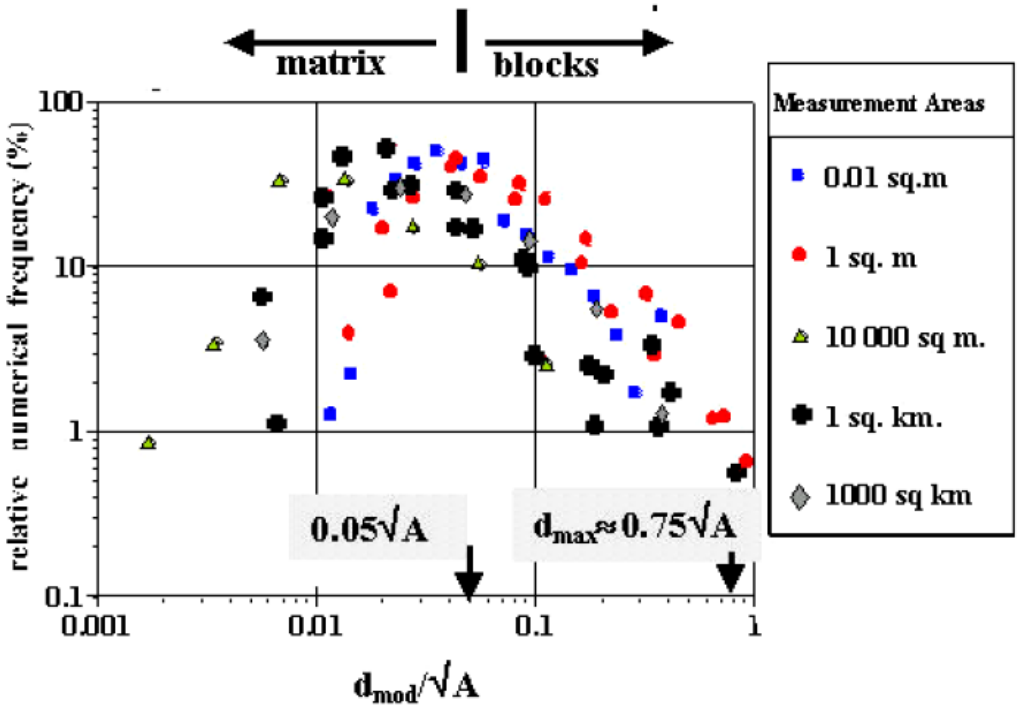


Figura 12 – Rappresentazione dei dati in termini di dimensione dei 1900 blocchi appartenenti al Fransiscan Complex (Medley 2002).

Sebbene i blocchi si distribuiscano con grande varietà dimensionale, la Figura 12 mostra che gli andamenti della distribuzione dei blocchi relativi alle diverse aree di misurazione sono simili.

In particolare, è possibile osservare che:

- gli andamenti hanno un valore massimo in corrispondenza di frequenze relative comprese tra il 30% e il 50%, corrispondente, in ascissa, ad un valore pari a $d_{mod}/\sqrt{A}$ uguale a 0,05;
- il blocco più grande, identificato in ogni scala di osservazione, ha la dimensione massima approssimativamente equivalente a $\sqrt{A}$. Tuttavia, poiché il 99% dei blocchi ha una dimensione minore di $0{,}75 \cdot \sqrt{A}$, si assume come valore di riferimento $d_{max} = 0{,}75 \cdot \sqrt{A}$;

- alla sinistra del picco ($0{,}05 \cdot \frac{d_{mod}}{\sqrt{A}}$) si nota un ramo discendente, dovuto alla difficoltà di campionare blocchi con dimensioni molto ridotte.

Alla luce di ciò appare chiaro dover definire un il limite di separazione tra ciò che è matrice e quelli che possono essere definiti blocchi. Medley ha proposto di adottare, convenzionalmente, un valore di separazione pari a $0{,}05 \cdot \sqrt{A}$; a sinistra di tale valore avremo dei massi più piccoli che forniscono un contributo limitato alla resistenza complessiva dell'intero ammasso e che vengono considerati facenti parte della matrice; viceversa, gli elementi che si collocano a destra di tale soglia rappresentano i blocchi.

Inoltre, dal momento che i bimrock presentano una invarianza di scala, la soglia blocco - matrice può essere correlata alla scala ingegneristica di interesse mediante la lunghezza caratteristica L_c. Pertanto, tenendo in considerazione la lunghezza ingegneristica caratteristica, il confine matrice - blocchi può essere assunto pari a $0{,}05 \cdot L_c$ e la massima dimensione dei blocchi sarà pari a $d_{max} = 0{,}75 \cdot L_c$.

Inoltre, i valori rappresentati in Figura 12 presentano una dimensione frattale che oscilla tra 1,1 e 1,7. Quindi, è stato assunto come valore di riferimento $D_{(2D)} = 1{,}3$.

Per passare dal caso bidimensionale a quello 3D è sufficiente sommare 1 al valore di rifermento precedentemente ottenuto; si ottiene dunque, come valore finale, $D_{(3D)} = 2{,}3$.

Questo comporta che, per ogni gruppo di n blocchi appartenenti ad una certa classe dimensionale, nella precedente classe sono presenti $2 \cdot n^{2,3}$ blocchi.

2.4 Stima della percentuale volumetrica dei blocchi

L'eterogeneità presente all'interno delle formazioni rocciose complesse influisce sul comportamento meccanico; in particolare, l'alternanza caotica tra matrice e blocchi condiziona la resistenza complessiva dell'ammasso.

Il comportamento globale dei bimrocks è influenzato sia dalle dimensioni ma anche dalla quantità dei blocchi presenti. L'individuazione del volume delle inclusioni nella matrice, rispetto al volume totale, rappresenta la percentuale volumetrica dei blocchi.

Si definisce "percentuale volumetrica dei blocchi" (VBP) il rapporto tra il volume dei blocchi inclusi nell'ammasso e il volume complessivo del deposito roccioso complesso.

La connessione tra il comportamento meccanico e la percentuale volumetrica è stata spiegata anche attraverso delle prove di laboratorio come quelle relative ai campioni estratti nella diga di Scott, nel nord della California (Medley 1994). In Figura 13 è rappresentata la relazione tra la percentuale volumetrica dei blocchi di tali campioni e il relativo angolo di attrito interno φ.

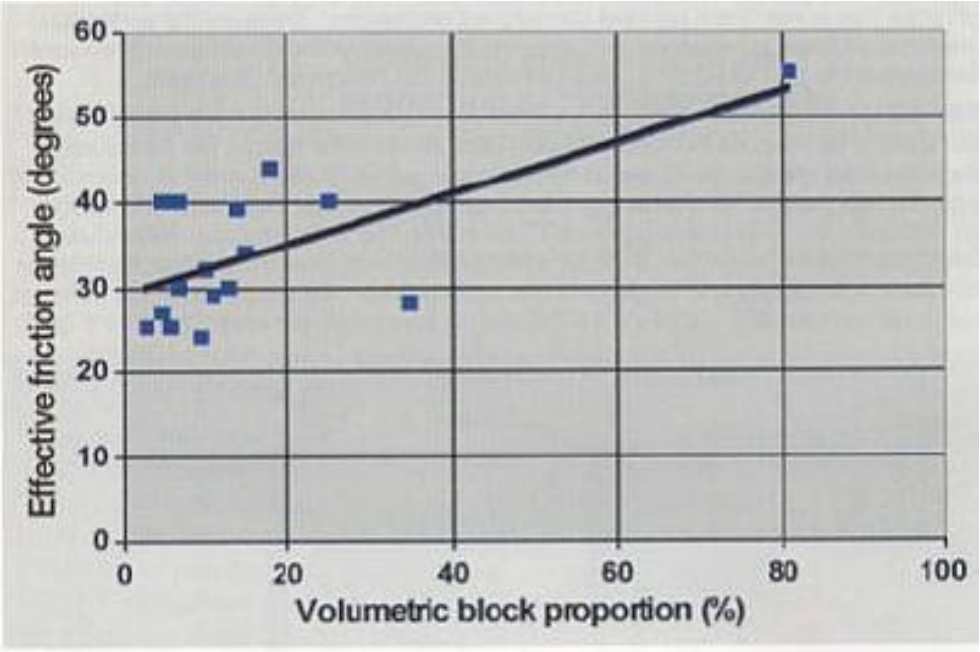


Figura 13 – Correlazione sperimentale tra proporzione volumetrica dei blocchi e angolo di attrito, (Medley 1994) .

Dalla Figura 13, si può notare che la linea di tendenza non approssima bene i dati: ciò è dovuto principalmente al fatto che i provini non sono indisturbati. Tuttavia, si osserva che il trend assume un andamento crescente all'aumentare della proporzione volumetrica dei blocchi.

Pertanto, dal momento che la VBP condiziona in maniera considerevole il comportamento meccanico di tali materiali, è necessaria un'adeguata e quanto più accurata valutazione.

I metodi generalmente adoperati per la stima della VBP sono i seguenti:

- Metodi monodirezionali (1D), derivanti da un'interpretazione stratigrafica e dai fori di sondaggio;
- Metodi bidirezionali (2D), basati sull'indagine digitale di immagini;
- Metodi tridimensionali (3D), che tengono conto della vagliatura del materiale.

Un'ulteriore strategia impiegata per la stima della percentuale volumetrica è quella di valutare la densità dei campioni (Lindquist 1994). Se è presente una marcata differenza di densità tra blocchi e matrice, allora la densità complessiva dei campioni analizzati varierà proporzionalmente con la VBP. Questa operazione, eseguita in concomitanza ad un processo di setacciatura, rappresenta il metodo più efficace per la stima della frazione volumetrica.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi, la separazione dei blocchi dalla matrice è un lavoro estremamente difficile ed eseguibile solo per indagini di laboratorio. Inoltre, la setacciatura permette la valutazione della distribuzione della dimensione dei blocchi solo in termini di percentuale cumulata in peso ma non consente di dedurre altre importanti proprietà come, ad esempio, la variabilità spaziale, la forma e l'orientazione dei blocchi. Per tali motivi è necessario effettuare anche fori di sondaggio. Tuttavia, come precedentemente discusso, sono numerose le difficoltà e le incertezze a causa della valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi dall'analisi delle carote .

Per quanto riguarda i metodi 2D, è frequente l'utilizzo di immagini riferite alla zona interessata dalla presenza di formazioni rocciose eterogenee.

Questo metodo di indagine, sebbene non molto accurato, è uno dei più utilizzati. Infatti, è comunque possibile reperire un gran numero di indicazioni geometriche dei blocchi come, ad esempio, informazioni sulla dimensione osservabile, sulle proporzioni e sull'orientamento dei blocchi ma è anche possibile valutare globalmente l'area interessata dall'ammasso eterogeneo.

2.5 Valutazione sperimentale della percentuale volumetrica dei blocchi

Come osservato nel Paragrafo precedente, risulta particolarmente difficile effettuare, in modo diretto ed immediato, una stima accurata della percentuale volumetrica dei blocchi; per tale motivo, Medley (2001) ha proposto a riguardo una valutazione di tipo sperimentale.

Il metodo prevede di considerare la dimensione caratteristica L_c e di fissare, al valore di $0{,}05 \cdot L_c$, il limite di separazione tra blocchi e matrice. L'autore (Medley 2001) propone un diagramma utile per la stima della percentuale volumetrica (Figura 14), in cui:

- N è il fattore di moltiplicazione che si ottiene dividendo la lunghezza del foro per il valore di d_{max};
- d_{max} è la massima dimensione del blocco stimata sulla base dei risultati dei carotaggi.

Si entra nel diagramma con la quantità ($N \cdot d_{max}$), si intercetta la retta che rappresenta il valore della proporzione lineare dei blocchi (ottenuta dalla stratigrafia e compresa tra il 13% e il 55%) e si ricava il fattore di correzione. Tale fattore permette di definire un range entro il quale si ha il valore della percentuale volumetrica dei blocchi.

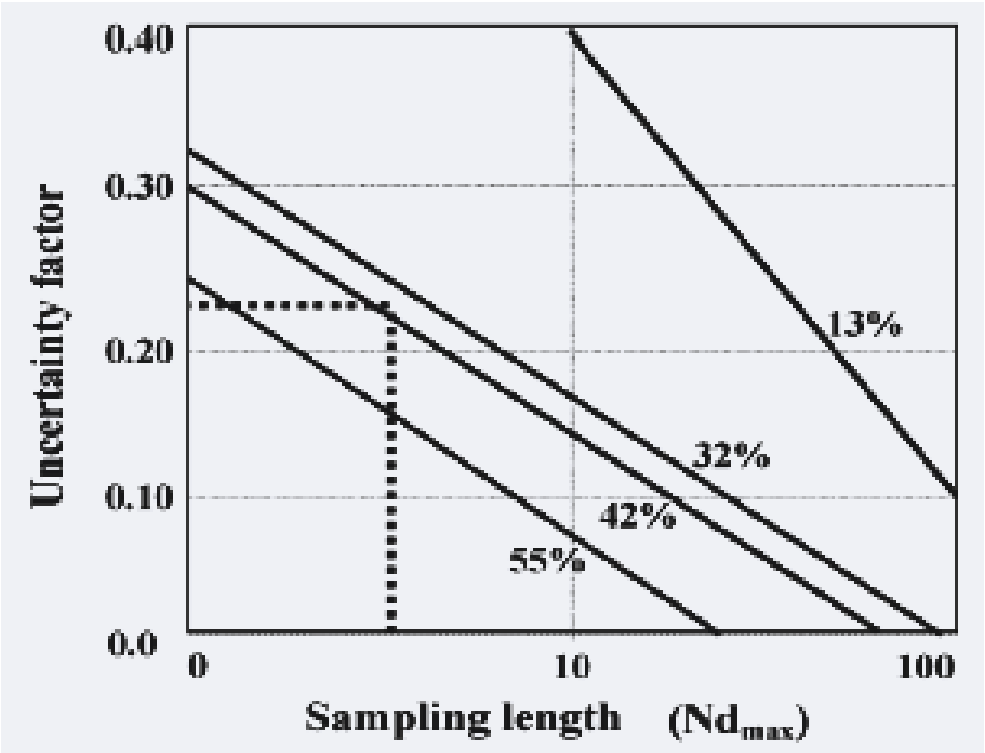


Figura 14 – Incertezza nella valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi, in funzione della lunghezza lineare di campionamento, espressa come un multiplo (N) della lunghezza massima dei blocchi (d_{max}),(Medley 2001).

Per la definizione della percentuale volumetrica dei blocchi, il metodo appena descritto deve essere utilizzato prestando particolare attenzione ai seguenti aspetti: per la valutazione della resistenza complessiva del bimrock è cautelativo adoperare il limite inferiore della VBP; nel caso in cui la valutazione della percentuale volumetrica è utilizzata per il progetto di uno scavo, è conveniente sovrastimare il valore e considerarne il limite superiore (Medley 2001).

Capitolo 3

Studio della tortuosità delle superfici di scivolamento

A causa della eterogeneità strutturale delle formazioni rocciose complesse la caratterizzazione meccanica dei bimrocks costituisce un problema di non semplice risoluzione e, per tale motivo, è necessario associare alle classiche metodologie di indagine *in situ* e in laboratorio, anche tecniche di analisi all'avanguardia.

All'interno di depositi in bimrock sono presenti dei blocchi che influenzano le caratteristiche meccaniche dell'intero ammasso; in realtà, un blocco può costituire un elemento importante ai fini della caratterizzazione del bimrock solo se esso è presente con dimensioni sufficientemente rilevanti.

Dal momento che i blocchi sono presenti con differenti ordini di misura, è opportuno capire quale sia l'ordine di grandezza da prendere come riferimento. Sostanzialmente, per certe scale di interesse, alcuni blocchi sono talmente piccoli che possono essere considerati appartenenti alla matrice e, dunque, non influenti in termini di resistenza dell'ammasso.

Di conseguenza, è evidente la necessità di trovare un valore soglia per distingue ciò che è considerabile blocco e tutto ciò che, invece, possedendo piccole dimensioni, si ritiene facente parte della matrice (Medley 2001). Ciò è stato trattato nel Capitolo 2.

A questo punto, il nocciolo della questione è capire come i blocchi, in termini di proporzione volumetriche e di orientazione, possano influenzare il comportamento meccanico dei bimrock e cosa ne scaturisce in termini di sviluppo, propagazione e forma della possibile superficie di rottura. Infatti, la presenza dei blocchi, interrompendo la continuità della matrice, causa un andamento tortuoso e non regolare della suddetta superficie di rottura.

3.1 Superfici di rottura nelle formazioni rocciose strutturalmente complesse

Facendo riferimento alla definizione di bimrock, introdotta al Capitolo 1, è possibile evidenziare la presenza di due o più materiali all'interno dello stesso deposito.

Tali materiali (matrice e blocchi rocciosi) possiedono caratteristiche meccaniche differenti e, in particolare, si osservano valori di resistenza più bassi per la matrice rispetto ai blocchi.

Considerando inoltre la scala di interesse, la dimensione dei blocchi sarà compresa tra il 5% e il 75% della dimensione caratteristica; i blocchi con dimensioni minori del 5% di L_c appartengono alla matrice; la restante parte, con dimensioni maggiori del 75% di L_c, sono individuabili come monoliti di roccia (Medley 2004).

In funzione di ciò, le superfici di scivolamento seguono la dislocazione e distribuzione di ciò che verrà definito "blocco", assumendo così un andamento tortuoso che si sviluppa lungo la matrice e che si genera attorno ai blocchi stessi (Medley 2004).

Pertanto, le caratteristiche meccaniche dei bimrock sono tendenzialmente influenzate dalle proprietà meccaniche della matrice, dalla forma e dalla proporzione volumetriche dei blocchi, nonché dalla loro orientazione.

Secondo gli studi condotti da Medley, un incremento della proporzione volumetrica determina un aumento dell'angolo di attrito (fino a 15°o 20° maggiore rispetto all'angolo di attrito della sola matrice) e, al contempo, provoca una diminuzione della coesione del bimrock (Medley 2004).

In Figura 15, è raffigurato un esempio di possibile superficie di scivolamento con andamento tortuoso.

Figura 15 – Superficie di possibile scivolamento con andamento tortuoso (Medley 2004).

Secondo Medley (2004), le zone di massima debolezza dell'intero complesso bimrock, sono le zone di contatto tra blocco e matrice: vi è una grande possibilità che si sviluppino nuove superfici di scivolamento proprio lungo tali punti.

Dunque, da un punto di vista geotecnico, vi è una grande attenzione per lo studio della formazione delle superfici di scivolamento al fine di condurre adeguatamente le analisi di stabilità dei versanti in presenza di materiali eterogenei e complessi come i bimrocks (Medley 2004).

3.2 Utilizzo di modelli di analisi per la definizione della superficie di rottura

Lindquist ha realizzato più di un centinaio di provini artificiali in bimrock che ha poi sottoposto a prove di compressione triassiale (pressione di confinamento tra 2,5 kPa e 12,5 kPa), costituiti da blocchi resistenti e matrice più deformabile (Lindquist 1994).

I provini sono stati realizzati con tre valori di proporzione volumetrica dei blocchi e con quattro orientazioni degli stessi rispetto alla verticale (vedi paragrafo 3.2).

Portando a rottura i provini, Lindquist ha evidenziato la formazione di superfici di scivolamento attorno ai blocchi così come illustrato in Figura 16.

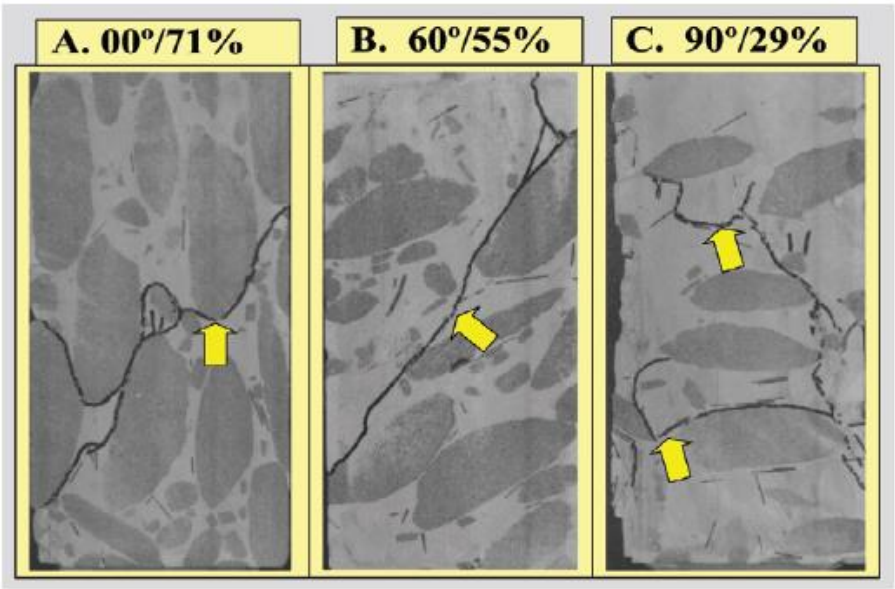


Figura 16 – Superfici di rottura su superficie laterale di tre provini sottoposti a prove triassiali (Medley 2004).

Dai provini, avvolti in carta trasparente, sono stati ottenuti gli andamenti delle superfici di rottura; quest'ultima appare evidentemente tortuosa, sviluppandosi in modo preferenziale attorno ai blocchi e attraverso la matrice.

Inoltre, per ogni campione, Medley ha definito il parametro *L'* che rappresenta la lunghezza della linea di rottura, misurata manualmente e riportata in giallo in Figura 17.

Sempre in Figura 17, si può individuare la linea rossa che è definita come L_0 e rappresenta la lunghezza misurata in maniera digitale sui provini costituiti da sola matrice.

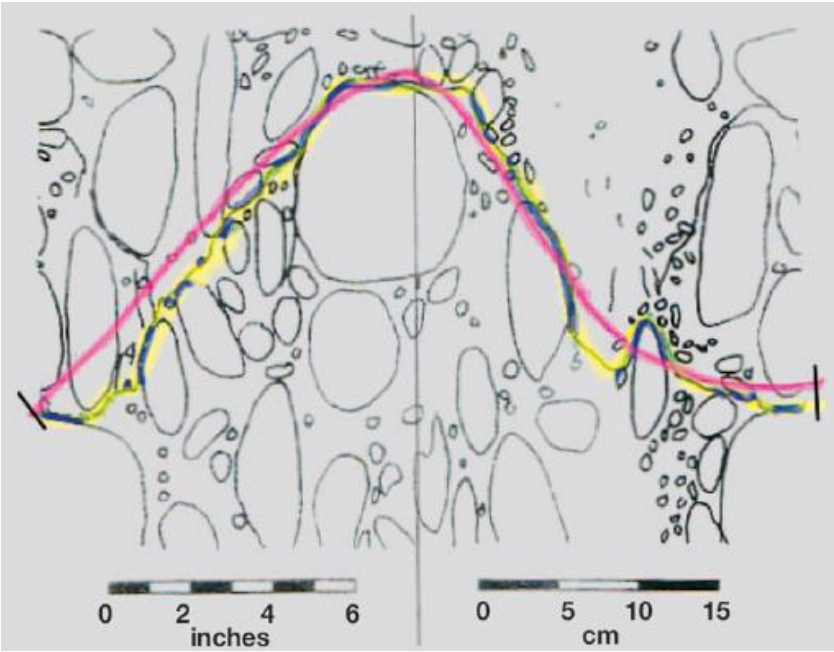


Figura 17 – Superfici di rottura con andamento tortuoso (Medley 2004).

Considerando successivamente diversi campioni, con differente proporzione volumetrica e orientazione dei blocchi, sono stati confrontati gli andamenti delle superfici di rottura, tracciati manualmente. Si è ottenuta così la Figura 18.

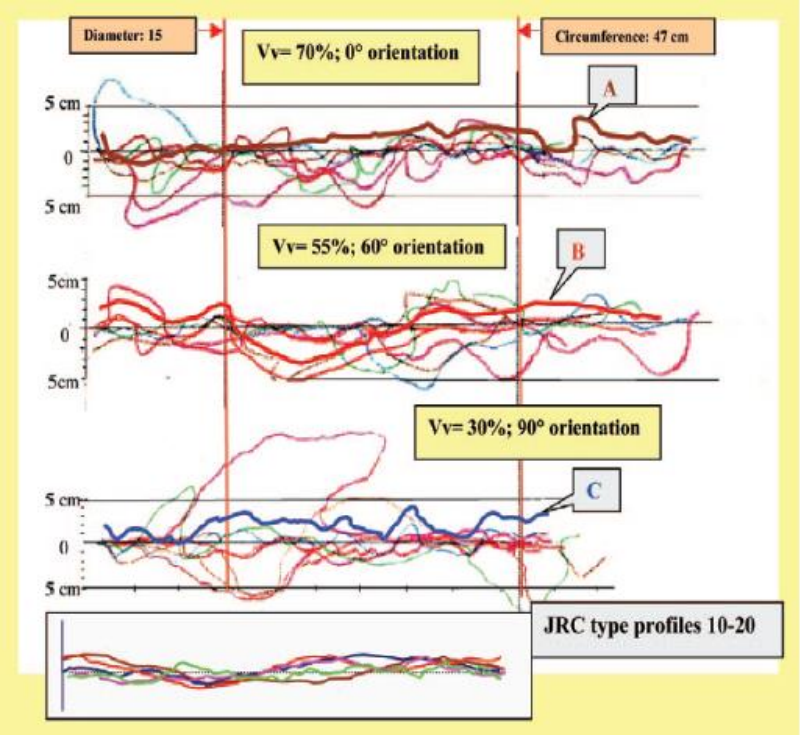


Figura 18 – Superfici di rottura confrontate con i profili di rugosità (Medley 2004).

Dalla Figura 18 si evince che, per ciascun provino, sono possibili diverse superfici di rottura che non hanno alcun elemento in comune tra loro e tale metodologia potrebbe risultare utile per definire il valore di JRC, cioè il coefficiente di rugosità del materiale (Lindquist 1994).

A questo punto, l'autore ha definito dei parametri (Figura 19) che potessero legare tra loro le caratteristiche di orientazione, di percentuale volumetrica dei blocchi e la possibile superficie di rottura.

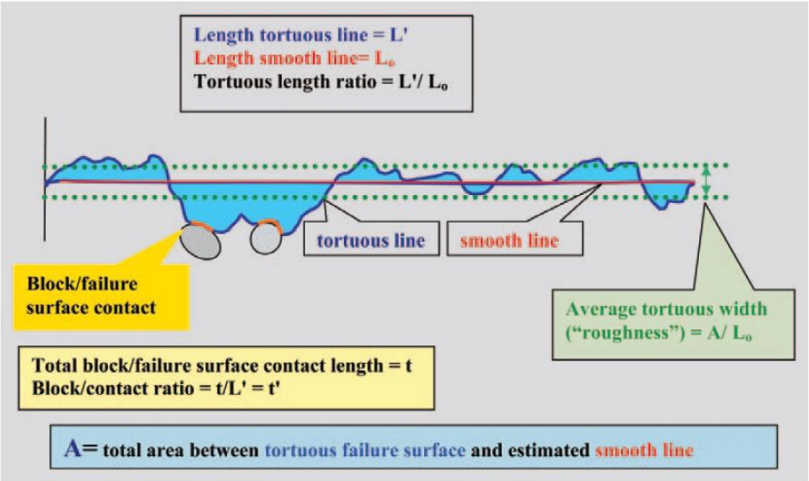


Figura 19 –Parametri misurati mediante linee di rottura tracciate da Lindquist (Medley 2004).

Uno dei parametri definiti da Medley, a valle di queste prove di laboratorio, è l'*Indice di lunghezza tortuosa* (L'/L_0), definito come il rapporto tra la lunghezza delle linea tortuosa congiungente due punti e la lunghezza della linea più corta tra i due punti stessi.

Tale parametro è stato ricavato considerando più provini con differenti proporzioni volumetriche e diverse orientazioni dei blocchi; in Figura 20 sono rappresentati i risultati.

Si evince che l'indice di lunghezza tortuosa, la proporzione volumetrica e l'orientazione dei blocchi non hanno una rilevante corrispondenza e affinità, tranne per il caso del 30% di percentuale volumetrica. Per quanto concerne il caso di percentuale volumetrica pari al 50%, la variabilità risulta pressoché nulla. A tali evidenze non è stata data spiegazione valida a riguardo.

Alla luce di ciò, è impossibile predire una probabile superficie di rottura in fase di progettazione, considerando, d'altro canto, la casualità della geometria della superficie stessa (Lindquist 1994).

Un'ulteriore considerazione potrebbe essere quella di valutare le zone di rottura attraverso l'identificazione di una profondità media globale per le superfici di rottura, ovvero considerare l'altezza media dell'ondulosità della superficie stessa, rispetto ad una superficie piana. Da questa considerazione, Medley definì un ulteriore parametro chiamato *Profondità media tortuosa* o *Rugosità*, ottenuto dividendo le aree totali individuate dalla superficie di rottura della linea media per la lunghezza della linea media L_0 (Figura 19).

Valutando tale indice per le differenti proporzioni volumetriche e orientazioni è stato definito il diagramma presente in Figura 20. Anche in questo caso si nota che, esclusivamente per piccoli valori di proporzioni volumetriche, si ha una maggiore correlazione tra i tre parametri, mentre, negli altri casi non sembra esserci dipendenza tra di essi.

Sempre in Figura 20, è possibile osservare l'andamento dell'*Indice di contatto tra i blocchi* (t/L'), ricavato mediante considerazioni presenti in Figura 19 e indicando con t la lunghezza totale dei contatti tra i blocchi. Per quanto riguarda questo parametro, si nota una lineare dipendenza iniziale tra le superfici di rottura e la proporzione volumetrica dei blocchi. Tuttavia, tale dipendenza diventa minore in corrispondenza del 50% di VBP (Lindquist 1994).

Per tale motivo, la dipendenza lineare tra le superfici di rottura che sono tangenti ai blocchi e la proporzione volumetrica assumerà andamento lineare solo fino a questa percentuale di soglia (si noti in Figura 20, l'andamento della linea rossa e della curva in giallo).

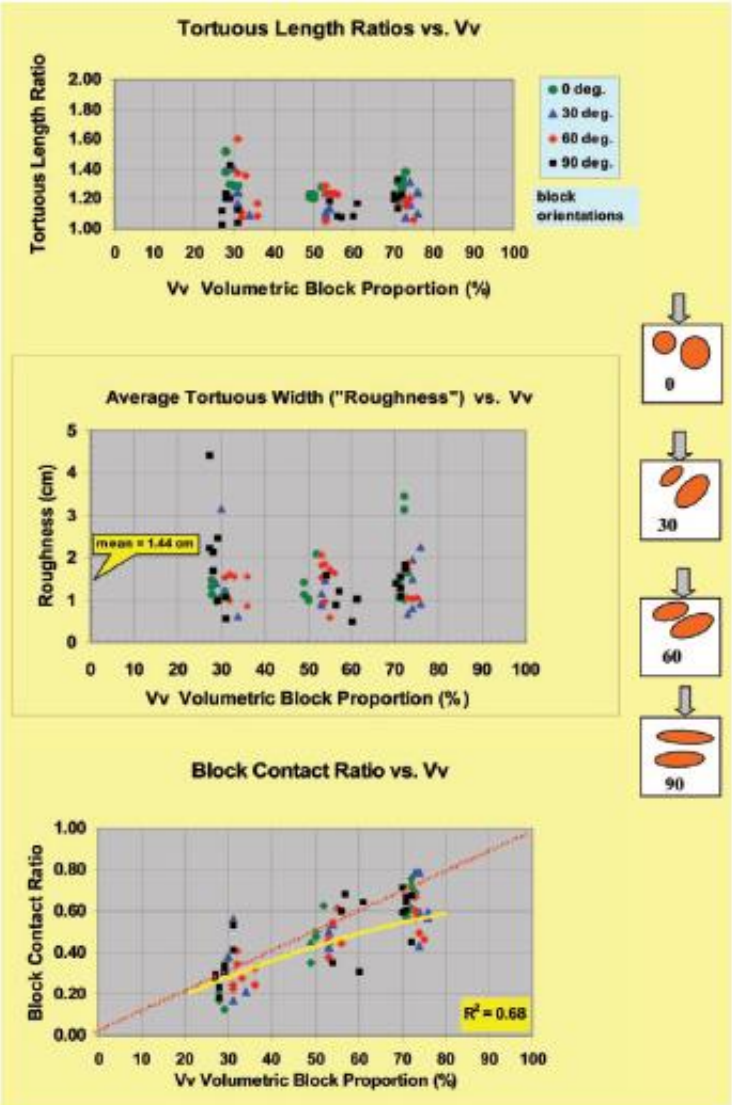


Figura 20 –Parametri misurati da Lindquist: indice di lunghezza tortuosa, profondità media tortuosa e indice di contatto dei blocchi (Medley 2004).

I risultati ottenuti da Lindquist, relativamente alle 73 superfici di scivolamento misurate, sono riportate in Tabella 3.1.

Parametro	**Media**	**Dev.st.**	**Min.**	**Max.**
L_0 [cm] (misura manuale)	52,2	10,4	31,6	77,8
L' [cm]	70,9	13,7	38,9	110,2
Rapporto estensione tortuosità	1,22	0,046	1,03	1,6
Lung. totale contatti tra blocchi t	32,9	12,5	9,7	66,8
Rapporto tra contatti tra i blocchi	0,46	0,18	0,12	0,79
Area di tortuosità [cm^2]	84,2	37,7	24,9	225,4
L_0 [cm] (misura digitale)	59,4	9,5	41,7	81
Larghezza tortuosità [cm]	1,44	0,86	0,5	4,45

Tabella 3.1– Risultati ottenuti da Lindquist, (Medley 2004).

Dai risultati ottenuti si evince che il valore di profondità media tortuosa è di 1,44 cm, con deviazione standard di 0,68 cm. Per i provini, sottoposti ad analisi, il diametro medio è di 15 cm. Pertanto, la profondità media tortuosa rappresenta circa il 10% del diametro con una deviazione standard del 5%.

Il risultato ha grande rilevanza se, soprattutto, si pensa all'indipendenza dalla scala per i bimrock, per cui è possibile estrapolare i dati ottenuti in laboratorio e riportarli su grande scala.

La validazione del metodo, proposto da Lindquist, è stata eseguita mediante studio della diga di Scott, situata in California, di altezza pari a 40 metri e profondità alla base di 45 metri.

Effettivamente, mediante il metodo adoperato per i campioni, è stata stimata la potenziale superficie di rottura avente spessore di 3 metri, collocata al di sotto della diga.

3.3 Effetti della proporzione volumetrica sulla stabilità di un versante in bimrock: metodo all'equilibrio limite

Medley e Sanz (2004) hanno studiato l'influenza dei blocchi sulla stabilità di un versante in bimrock. L'analisi è stata condotta con il metodo all'equilibrio limite per un pendio dalla geometria molto semplice, rappresentato in Figura 21.

Le caratteristiche del modello sono le seguenti:

- inclinazione del fronte pari a 35°;
- altezza del pendio pari a 10 metri;
- L_c pari a 10 metri (ovvero corrispondente all'altezza del versante);
- blocchi rettangolari posizionati orizzontalmente con proporzioni 2:1 e distribuzione tipica del *Franciscan Complex*.

I blocchi sono disposti all'interno della matrice in maniera casuale e le percentuali volumetriche considerate sono le seguenti:

- 50%;
- 25%;
- 13%.

Sulla base degli studi condotti da Medley sul *Franciscan Complex*, i parametri meccanici adoperati sono i seguenti:

- coesione c=10 kPa;
- angolo di attrito φ=25°.

Il livello della falda è stato considerato al di sotto dell'area interessata dalla studio e i contatti tra matrice e blocchi sono stati trascurati.

Mediante il codice SlopeW™ è stata ricavata la superficie critica di scivolamento per il caso di sola matrice ed è stato ricavato un valore del Fattore di Sicurezza pari a 1,26.

In Figura 21 è rappresentata la superficie critica (linea rossa tratteggiata).

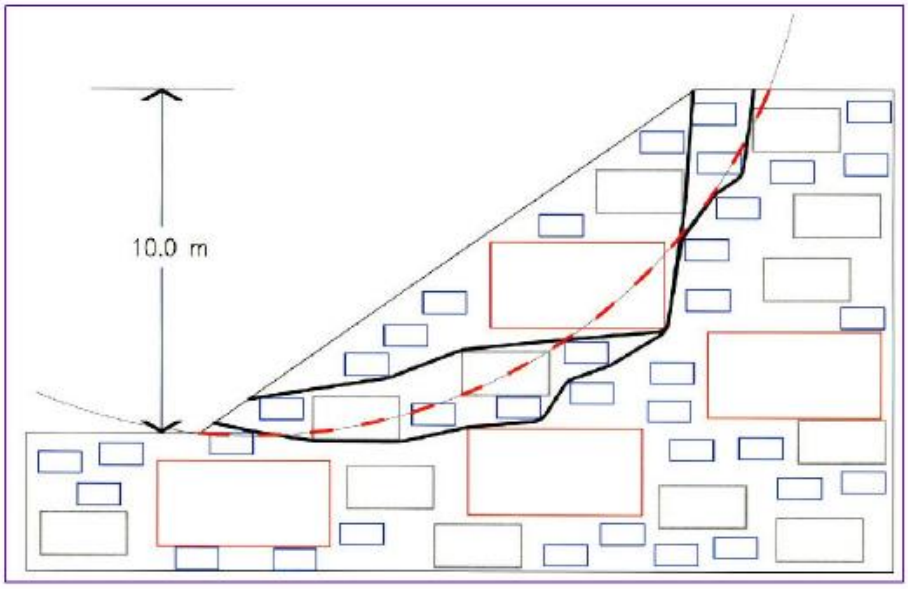


Figura 21 – Modello di versante in bimrock con distribuzione casuale dei blocchi e percentuale volumetrica pari al 50%; la curva tratteggiata (in rosso) raffigura la superficie di rottura nel caso di versante costituito dalla sola matrice; le altre curve (in nero) rappresentano le possibili superfici di rottura del bimrock (Medley e Sanz 2004).

Il programma adoperato per le simulazioni ha permesso di ottenere le probabili superfici di rottura per i diversi modelli considerati.

I Fattori di Sicurezza ricavati dalle analisi sono stati divisi per il valore ottenuto nel caso di sola matrice (F_s=1,26). I valori normalizzati sono riportati in Figura 22.

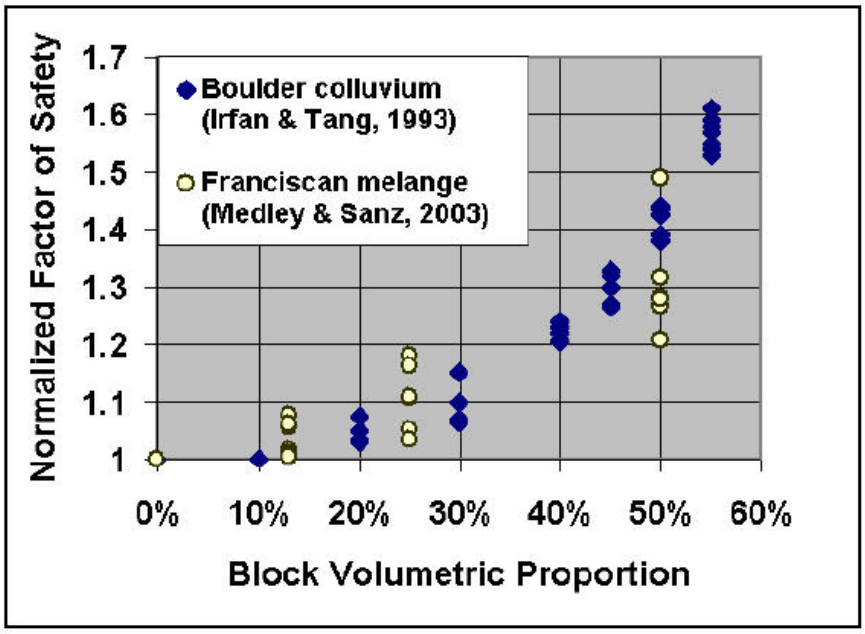


Figura 22 – Confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi del colluvio di Hong Kong (Iran e Tang 1993) e quelli relativi allo studio del Franciscan melange (Medley e Sanz 2004).

Dalla Figura 22 si evince che il Fattore di Sicurezza è influenzato dalla tortuosità della superficie di scivolamento. In particolare, si nota un incremento dei valori di F_s al crescere della percentuale volumetrica dei blocchi presenti all'interno della matrice.

A valle di una serie di ricerche effettuate sul colluvio di Hong Kong, Iran e Tang (1993) hanno condotto delle analisi di stabilità su pendii costituiti da terreno e blocchi.

I modelli di versante presentano le seguenti caratteristiche:

- altezza del pendio pari a 10 metri;
- inclinazione del versante pari a circa 60°.

I blocchi sono stati disposti in maniera equidistante e le percentuali volumetriche considerate sono state fatte variare tra un minimo pari al 10% fino ad un valore massimo corrispondente al 55%. I parametri meccanici adoperati sono i seguenti:

- coesione c=5 kPa;
- angolo di attrito φ=35°.

Le analisi di stabilità sono state condotte con il metodo di Morgenstern e Price (1965) considerando superfici di scivolamento tracciate seguendo il contorno di blocchi adiacenti e unendone gli angoli.

Il risultato di tale rappresentazione definisce superfici di scivolamento con andamento a zigzag e con ampiezze regolari (Figura 23).

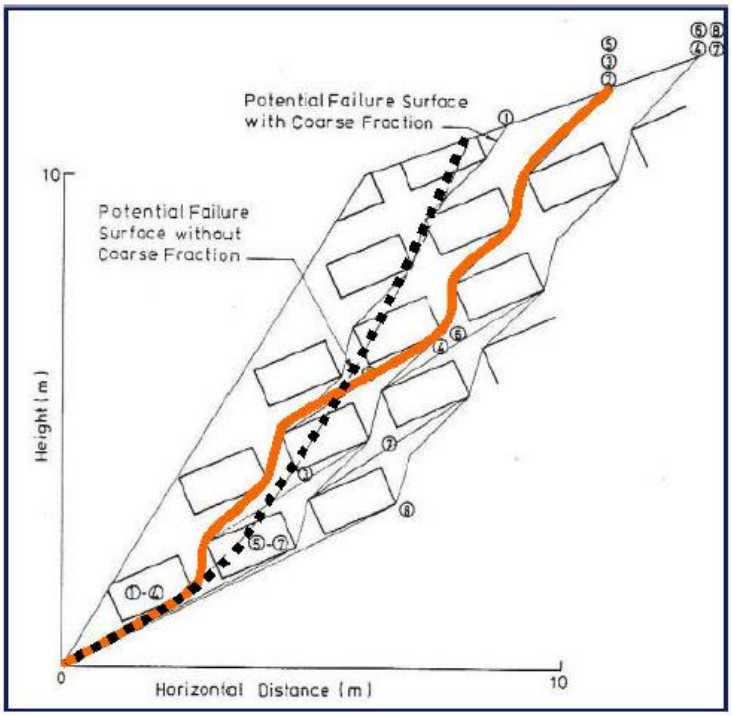


Figura 23 – Modello del colluvio roccioso avente VBP pari al 20%; la curva tratteggiata (in nero) rappresenta la superficie di scivolamento per la sola matrice; la curva in arancione rappresenta una probabile superficie di rottura con andamento tortuoso (Iran e Tang 1993).

Nonostante le differenze dimensionali, di orientazione dei blocchi e di metodologia di analisi, i modelli proposti da Medley e Sanz (2004) e da Iran e Tang (1993) mostrano dei risultati decisamente congruenti tra loro (Figura 22): i valori del Fattore di Sicurezza dipendono dalla percentuale volumetrica considerata.

È possibile affermare che fino ad una proporzione volumetrica compresa tra il 25% e il 30% la presenza di blocchi non determina un sostanziale miglioramento del comportamento meccanico del bimrock; tuttavia, al di sopra di tale range, si osserva un notevole incremento in termini di stabilità del versante. Tale osservazione è conforme con quella suggerita da Lindquist (1994) che ha notato un incremento dell'angolo di attrito di circa 16°, rispetto all'angolo di attrito della sola matrice, per percentuali volumetriche comprese tra il 25% e il 70% (Capitolo 4).

3.4 Effetti della proporzione volumetrica sulla stabilità di un versante in bimrock: approccio numerico

Barbero et al. (2006) si sono occupati dello studio della stabilità di un versante in bimrock attraverso un approccio numerico e adoperando il software alle differenze finite FLAC.

Le simulazioni hanno condotto alla valutazione del Fattore di Sicurezza mediante il metodo SSR (descritto al Capitolo 5) e relativamente ad un versante con geometria molto semplice, ipotizzando inoltre che il mezzo sia modellabile come un continuo.

Le simulazioni numeriche sono state condotte al variare della percentuale volumetrica, della forma e delle dimensioni dei blocchi, Quest'ultimi sono stati generati mediante un processo di estrazione di tipo statistico.

Le caratteristiche geometriche dei materiali sono mostrate in Figura 24, le proprietà meccaniche in Tabella 3.2.

	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

Tabella 3.2 – Caratteristiche dei materiali costituenti il modello del versante (Barbero et al. 2006).

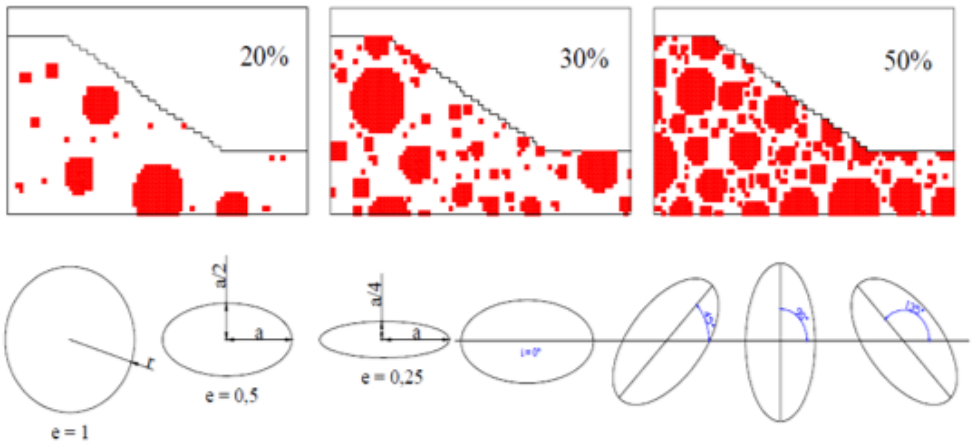


Figura 24 – Modello del versante per diverse VBP (in alto) e differenti geometrie del blocco adoperate (in basso), (Barbero et al. 2006).

I risultati ottenuti (Figura 25) hanno condotto alle seguenti considerazioni:

- il Fattore di Sicurezza assume valori crescenti all'aumentare della VBP, ciò è molto più evidente per valori superiori a VBP=20%. Tale percentuale rappresenta dunque un limite al di sotto del quale il versante si comporta come se fosse costituito esclusivamente dalla matrice (Barbero et al. 2006);
- per percentuali volumetriche del 20%, non si hanno sostanziali miglioramenti delle condizioni di stabilità rispetto al caso in cui i blocchi siano assenti e l'intero versante abbia le caratteristiche della matrice. Per percentuali del 50%, la stabilità del versante risulta, invece, nettamente migliorata (Barbero et al. 2006);
- nel caso di blocchi con forme ovali molto schiacciate il Fattore di Sicurezza assume un significativo incremento, mentre si registrano valori minimi in presenza di blocchi dalla forma circolare. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che i blocchi di forma ellittica ostacolano maggiormente lo sviluppo della superficie di scivolamento che diventa ancor più tortuosa (Barbero et al. 2006).

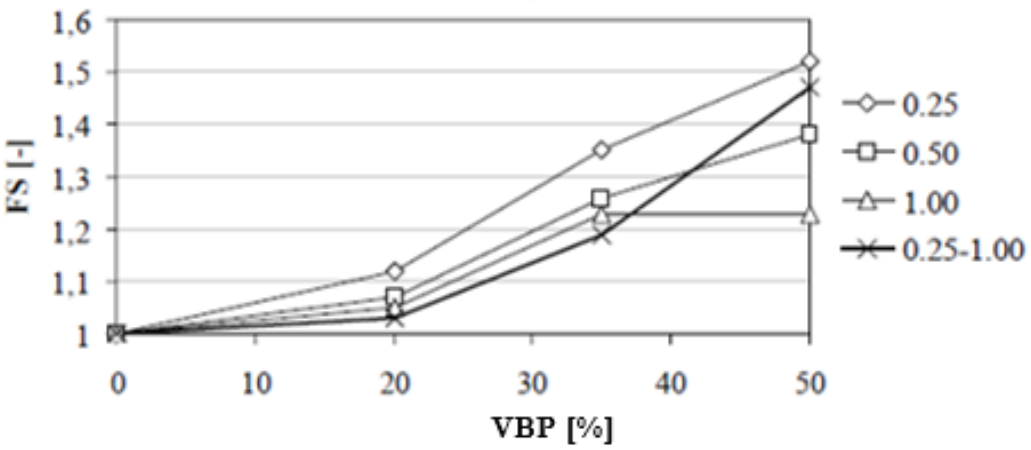


Figura 25 – Andamento del Fattore di Sicurezza al variare della VBP, per orientazione dei blocchi completamente casuali (Barbero et al. 2006).

Capitolo 4

Interpretazione delle caratteristiche meccaniche dei bimrocks mediante modelli

I bimrock sono costituiti strutturalmente da una parte di blocchi frequentemente di calcare o arenaria immersi in una matrice a grana fine, quest'ultima generalmente argillosa. A loro volta, i blocchi sono presenti in differenti dimensioni e, in funzione di ciò, il comportamento dell'ammasso risulta variabile. L'ampia variabilità dimensionale dei blocchi fa sì che la fase di caratterizzazione sia ampiamente condizionata dalle caratteristiche del sito e dalla scala d'indagine, quest'ultima dipendente dal caso studio investigato.

Inoltre, per una data scala di analisi, è opportuno introdurre un riferimento dimensionale che rappresenti un limite, chiamato "soglia blocco-matrice", al di sotto della quale i blocchi sono considerati, dal punto di vista meccanico, appartenenti alla matrice (Medley 1994, Medley 2002); viceversa, la rimanete parte, avente grandezza superiore a tale valore limite, è considerata come blocco e non come elemento assimilabile alla matrice.

Per tali ragioni assumono fondamentale importanza sia le indagini di laboratorio sia quelle *in situ* al fine di ottenere risultati a scala più ampia e che siano allo stesso tempo rappresentativi del caso di studio. Sebbene sia numeroso il numero di informazioni ricavabili dai fori di sondaggio, tali operazioni sono soggette ad una serie di problematiche legate all'esecuzione delle stesse: inaccessibilità all'area di studio e, soprattutto, difficoltà di prelievo di campioni indisturbati.

Qualora si riuscisse ad ottenere provini indisturbati (operazione difficile anche con materiali convenzionali) si potrebbe palesare il dubbio che il campione sia o meno rappresentativo dell'ammasso nella sua interezza.

A tutto questo si potrebbe aggiungere una ulteriore complicazione legata al fatto che la resistenza alla perforazione dei due materiali, costituenti l'ammasso, è talmente differente che la parte più compatta potrebbe interferire con quella meno resistente e recare disturbo e, eventualmente, anche una perdita di materiale meno consistente.

Un ulteriore limite delle indagini *in situ* consiste nell'andare a stimare l'influenza dell'effetto scala per passare dalla dimensione della prova a quella di interesse ingegneristico.

Alla luce di ciò, sono fondamentali anche le prove di laboratorio in cui, ad esempio, è possibile studiare, separatamente, i due materiali costituenti il bimrock e determinarne le caratteristiche meccaniche.

Tutto ciò determina un quadro estremamente complesso in cui non possono essere adoperate esclusivamente le classiche tipologie e modalità di indagine *in situ* e in laboratorio: è necessario tenere in considerazione la variabilità dimensionale dei blocchi e la scala di interesse.

Solo in questo modo è possibile effettuare un adeguato studio di stabilità di versante (Li, Liao et al. 2004, Medley and Rehermann 2004) e un'opportuna conoscenza dei problemi connessi alla progettazione di dighe o gallerie (Medley 2004).

A fronte di tali motivazioni, Medley (Medley and Goodman 1994, Medley 1994, Medley 2001, Medley 2002, Medley 2004), ma anche altri autori (Lindquist 1994, Kalender, Sonmez et al. 2014), hanno condotto degli studi sui melanges analizzando i risultati ottenuti da prove con fori di sondaggio e mediante l'interpretazione di mappe e di modelli fisici.

Sono stati quindi realizzati in laboratorio dei campioni di bimrock con forma cilindrica e sono stati sottoposti a prove di compressione triassiale, allo scopo di definire le caratteristiche delle superfici di rottura oltre che a determinare i parametri meccanici dei materiali.

4.1 Modello di Medley

Medley ha confezionato una serie di provini mediante i quali è stato possibile valutare il grado di incertezza nella valutazione della percentuale volumetrica ottenuta mediante fori di sondaggio.

Medley ha costruito quattro campioni la cui matrice è fatta di gesso, mentre i blocchi, da plastilina, riso nero e argilla (Medley 2002).

Nel dettaglio, le proporzioni volumetriche dei blocchi sono state assunte pari al:

- 13%;
- 32%;
- 42%;
- 55%.

La distribuzione dei blocchi, tipica del *Fransiscan Complex*, è stata ricostruita adoperando una dimensione frattale pari a 2,3.

Inoltre, è stata considerata una orientazione dei blocchi sia di tipo verticale che orizzontale.

Le dimensioni dei provini sono state assunte pari a:

- larghezza di 170 millimetri;
- altezza variabile tra i 110 millimetri e i 150 millimetri;
- profondità di 110 millimetri.

Ulteriori caratteristiche:

- area di base pari a 1700 mm^2;
- dimensione massima dei blocchi pari a circa 0,75· $\sqrt{A}$ = 98 millimetri.

Il numero di classi dimensionali in cui sono stati divisi i blocchi sono in tutto cinque e variano in un range compreso tra 0,05·$\sqrt{A}$ (3 mm – 6 mm) e 0,05·$\sqrt{A}$ (48 mm – 96 mm).

In tutti i modelli, la frequenza relativa dei blocchi è pari a:

- 79,9% qualora la dimensione sia superiore a 0,05·$\sqrt{A}$;
- 16,2% qualora la dimensione sia superiore a 0,1·$\sqrt{A}$;
- 3,3% qualora la dimensione si superiore a 0,2·$\sqrt{A}$;
- 0,7% qualora la dimensione sia superiore a 0,4·$\sqrt{A}$;
- 0,1% qualora la dimensione sia superiore a 0,7·$\sqrt{A}$.

In totale, il numero dei blocchi per ciascun modello varia da 2200, per il campione caratterizzato da una proporzione volumetrica pari al 13%, fino a 7350 per quanto riguarda, invece, il campione con proporzione volumetrica pari al 55%.

Durante la prova di laboratorio, i campioni sono stati tagliati in dieci porzioni e ogni parte è stata fotografata e sottoposta ad una attenta analisi.

Su ogni fotografia, sono state tracciate dieci tacche che rappresentano, in scala, gli ipotetici fori di sondaggio realizzati *in situ*, vedi Figura 26.

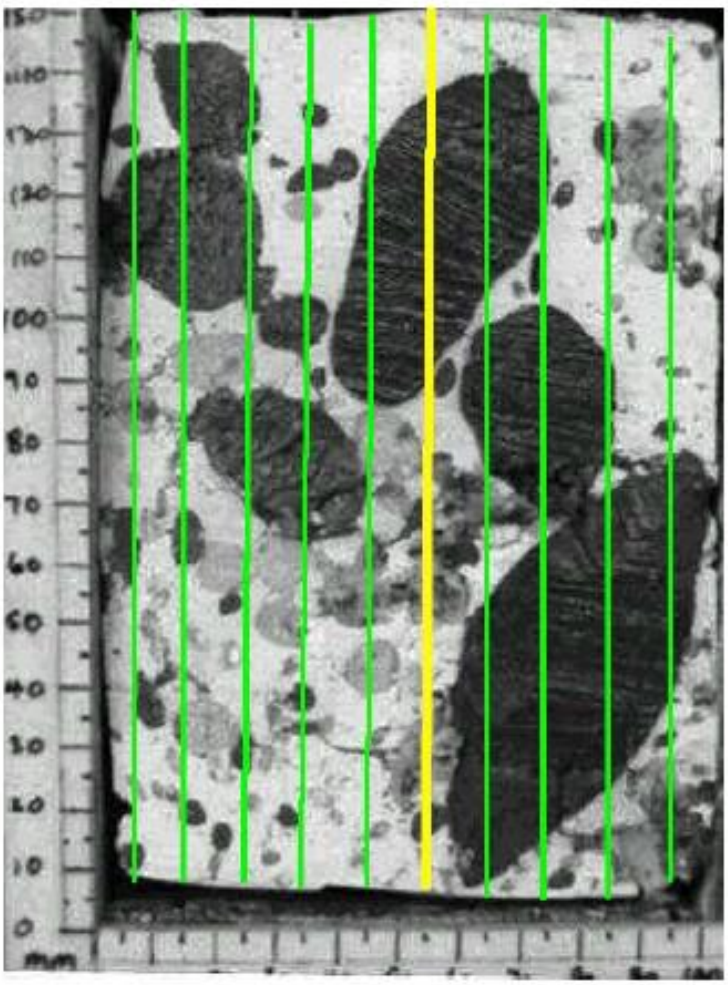


Figura 26 – Tipica porzione in cui è stato suddiviso il campione artificiale di bimrock sottoposto alla prova di laboratorio (Medley 2002).

Per ciascuno dei quattro modelli con differenti percentuali volumetriche, sono state dunque ottenute cento tracce mediante le quali è stato possibile calcolare le differenti proporzioni lineari dei blocchi.

Tali dati sono stati necessari per determinare l'incertezza nella valutazione della proporzione volumetrica dei blocchi a partire dalla proporzione lineare.

In Figura 26 è rappresentata una fetta, tra le dieci, in cui è stato suddiviso il provino. Il campione mostrato ha una proporzione volumetrica dei blocchi pari al 42% in cui, le scanlines (in verde) raffigurano quelle che, alla scala del deposito, sono le perforazioni dei fori di sondaggio e mediante le quali sono state ottenute informazioni relative alla proporzione lineare dei massi. La linea di colore giallo rappresenta, invece, il centro del campione.

A questo punto è stato possibile effettuare un confronto tra la distribuzione dimensionale dei blocchi (3D) e la lunghezza delle corde intercettate mediante scanlines, quest'ultime in totale sono 400. I risultati ottenuti da queste prove di laboratorio sono stati quindi assemblati in un diagramma riassuntivo che è mostrato in Figura 27.

L'istogramma rappresentato in Figura 27, mostra la frequenza relativa dei blocchi in funzione della loro dimensione che è proprio la corda intercettata dalla scanline, per ciascuno dei quattro modelli. In Figura 28, invece, è mostrata la frequenza cumulata della distribuzione tridimensionale originaria dei blocchi e quella delle lunghezze delle corde rappresentati sottoforma di frequenza relativa cumulata (Medley 2002).

In aggiunta, sono rappresentati anche i dati reali della distribuzione dimensionale tridimensionale dei massi presenti nella formazione eterogena.

Si nota che, sebbene il numero maggiore di blocchi nel modello appartiene alla classe 3 millimetri – 6 millimetri, a cui corrisponde una frequenza relativa pari al 80%, la lunghezza complessiva delle corde relative proprio a questa dimensione è decisamente bassa.

Per dare una spiegazione a ciò, basta pensare come effettivamente la probabilità di individuare elementi di piccoli dimensioni sulla parte della superficie laterale del provino sia ridotta, nonostante questi siano sufficientemente numerosi.

Tuttavia, nel senso opposto, i blocchi più grandi sono più facilmente individuabili dalle scanlines proprio per la loro estensione, sebbene la corda che li intercetta non coincida con la loro massima dimensione.

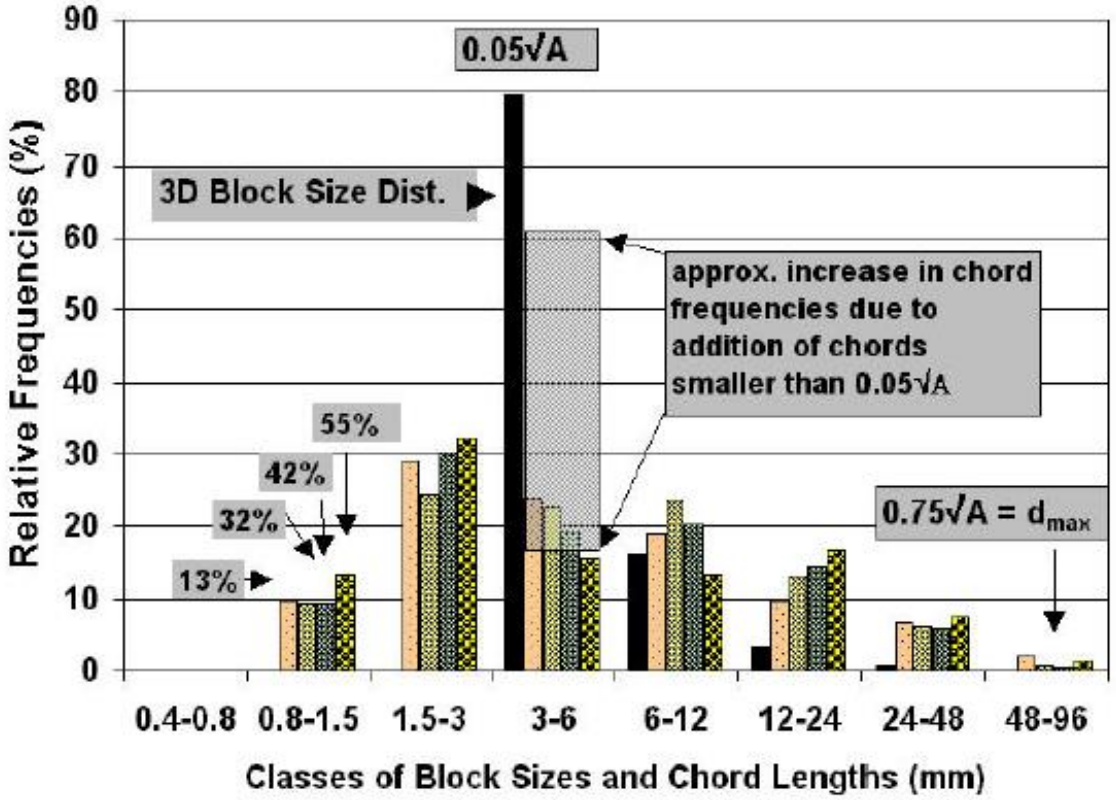


Figura 27 – Istogramma convenzionale della distribuzione della dimensione dei blocchi tridimensionali (barre nere) per i quattro modelli fisici di melange e distribuzioni delle lunghezze delle corde derivate da 400 scanlines, suddivise per proporzioni volumetriche (barre colorate), (Medley 2002).

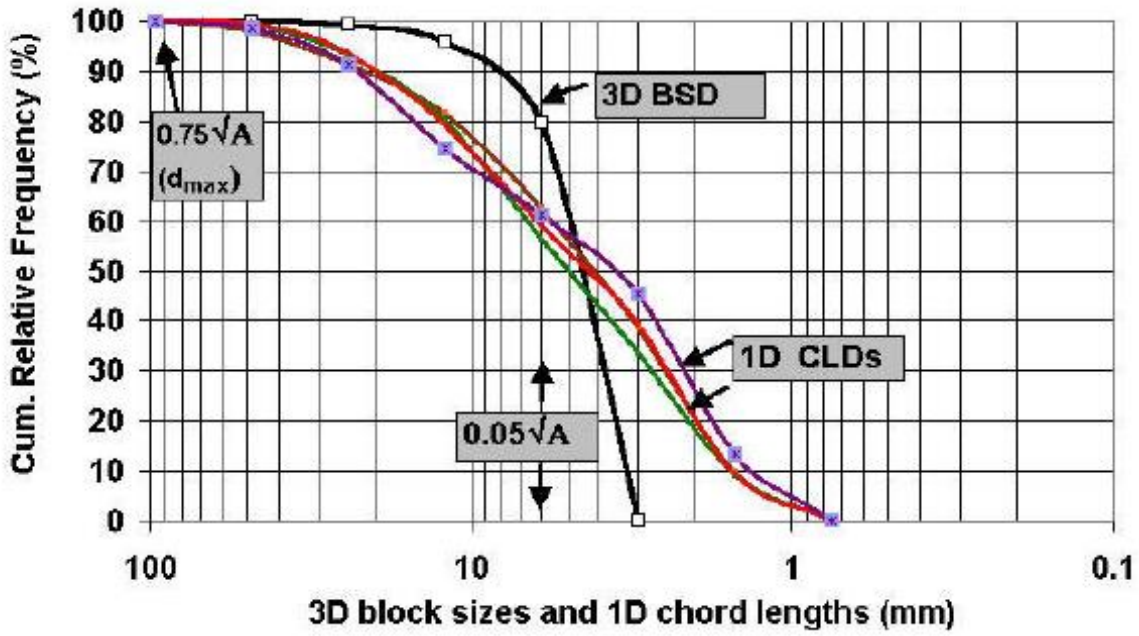


Figura 28 – Distribuzione dimensionale tridimensionale originaria e distribuzioni delle lunghezze delle corde rappresentati sottoforma di frequenza relativa cumulata (Medley 2002).

In Figura 28, invece, è presentata la frequenza cumulata della distribuzione dei blocchi ricavata dall'osservazione monodimensionale delle corde intercettate dalle scanlines e della reale distribuzione tridimensionale. In particolare si indica con:

- CDLs la distribuzione della lunghezza della corda;
- BSD la distribuzione dimensionale dei blocchi.

Da questa rappresentazione è possibile evincere che esistono differenze tra le due distribuzioni, sebbene sia vasta la quantità di dati ottenuti dalla sperimentazione:

- quasi il 60% dei blocchi individuati dalle CDLs hanno dimensione inferiore a $0{,}05\cdot\sqrt{A}$;
- la quantità pari a $0{,}05\cdot\sqrt{A}$ è il minimo valore che divide i blocchi del materiale appartenente alla matrice.

Questi aspetti indicano che le corde ricavate sono meno estese della dimensione minima dei blocchi e che quindi la corda, nella maggior parte dei casi, non coincide con la dimensione più grande del blocco (d_{mod}). Questo significa che le corde intercettate sono più piccole della dimensione minima dei blocchi e che quindi, generalmente, la corda non coincide con la reale dimensione massima del blocco. Diverse volte, gli addetti ai lavori, nel caso di caratterizzazione di un ammasso roccioso, si limitano ad effettuare pochi fori di sondaggio poiché un numero così basso è comunque sufficiente. Di conseguenza, ogni modello di Medley (Medley 2002) è stato indagato con 10 scanlines rispetto alla linea centrale del campione. Inoltre, la lunghezza totale del campionamento è pari a 15 o a 20 volte la d_{max} e ciò sarebbe comunque più che sufficiente per stimare la proporzione volumetrica dei blocchi nel *Fransiscan Complex* ma, allo stesso tempo, è palesemente insufficiente per valutarne la distribuzione in termini tridimensionali (Medley 2002). In Figura 29 si nota che le curve relative ai casi monodimensionali sono il risultato di un numero limitato di dati oltre che dipendere dall'orientazione verticale dei blocchi stessi.

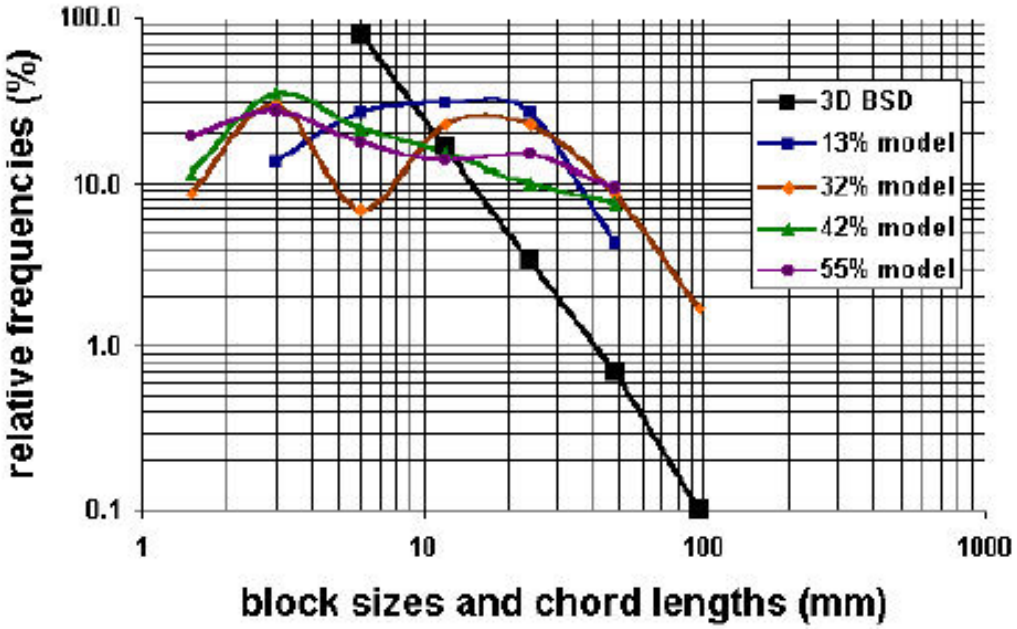


Figura 29 – Distribuzione lunghezza della corda basata sulle corde valutate su dieci campioni per ogni modello studiato da Medley, (Medley 2002).

4.2 Modello di Lindquist

Numerosi sono stati gli studi condotti, da vari autori, per quanto riguarda il comportamento meccanico delle formazioni rocciose complesse; tra questi, oltre al già citato Medley nel Paragrafo precedente, sono stati ottenuti importanti risultati anche da Lindquist (Lindquist 1994).

Questi, infatti, ha sottoposto più di cento campioni a prove di compressione triassiali al fine di poter definirne il comportamento meccanico.

I provini artificiali realizzati per tale studio hanno le seguenti caratteristiche:

- diametro pari a 150 mm;
- altezza pari a 300 mm.

Sono state considerate tre percentuali volumetriche dei blocchi, ovvero:

- 30% (con 425 blocchi);
- 50%;
- 70% (con 1190 blocchi).

E le seguenti orientazioni delle inclusioni di forma ellittica (angolo tra l'asse maggiore dei blocchi e la verticale):

- 0°;
- 30°;
- 60°;
- 90°.

Entrando nello specifico della prova, per una fissata distribuzione dimensionale dei blocchi (dimensione frattale pari a 2,0), sono state fatte variare sia la proporzione volumetrica dei blocchi sia la loro stessa orientazione.

Il modello di riferimento ha le seguenti caratteristiche:

- la forma dei blocchi varia da lenticolare a tubolare;
- il rapporto tra l'asse maggiore e quello minore, per tutti i blocchi, varia tra due e tre.

La forma, le dimensioni e le proprietà dei blocchi selezionate per i campioni sono scaturite da osservazioni fatte su una ampia varietà di descrizioni, documenti e fotografie relative a depositi eterogenei presenti in diverse aree del mondo e, in particolare, a quelli relativi al *Fransiscan Complex* situato a nord della California.

Dal momento che i blocchi, all'interno di un melange, possono avere dimensioni più o meno importanti in funzione del volume di interesse e considerando dei campioni cilindrici, la dimensione assiale massima dei blocchi introdotti è circa uguale alla metà del diametro del campione stesso.

Per realizzare i campioni, è stata adoperata una miscela di sabbia, cemento Portland e ceneri volanti per quanto riguarda i blocchi; per la realizzazione della matrice, invece, ne è stata creata un'altra mediante bentonite e cemento Portland (Tabella 4.1).

Materiale matrice	Parti per peso
Bentonite	20
Acqua	17
Cemento	20

Materiale Blocchi	Parti per peso
Sabbia	70
Ceneri volanti	35
Acqua	15
Cemento	7

Tabella 4.1– Proporzioni degli elementi per la realizzazione dei materiali per i modelli (Lindquist 1994).

Per simulare le zone di taglio nella matrice sono stati usati strati sottili di cera ricoperta da polvere di talco.

La dimensione media dei blocchi varia mediamente da circa 165 millimetri fino ad un valore minimo di 12 millimetri; quest'ultimo valore è considerato come soglia dimensionale tra la matrice e i blocchi (Tabella 4.2).

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

Tabella 4.2 – Distribuzione della dimensione dei blocchi (Lindquist 1994).

La Figura 30 mostra i vari tipi di modelli impiegati da Lindquist per le prove triassiali; è possibile osservare la presenza di frecce che indicano la direzione assiale lungo la quale è applicato il carico e l'angolo indicato rappresenta quello tra la direzione del carico assiale e l'orientazione principale dei blocchi.

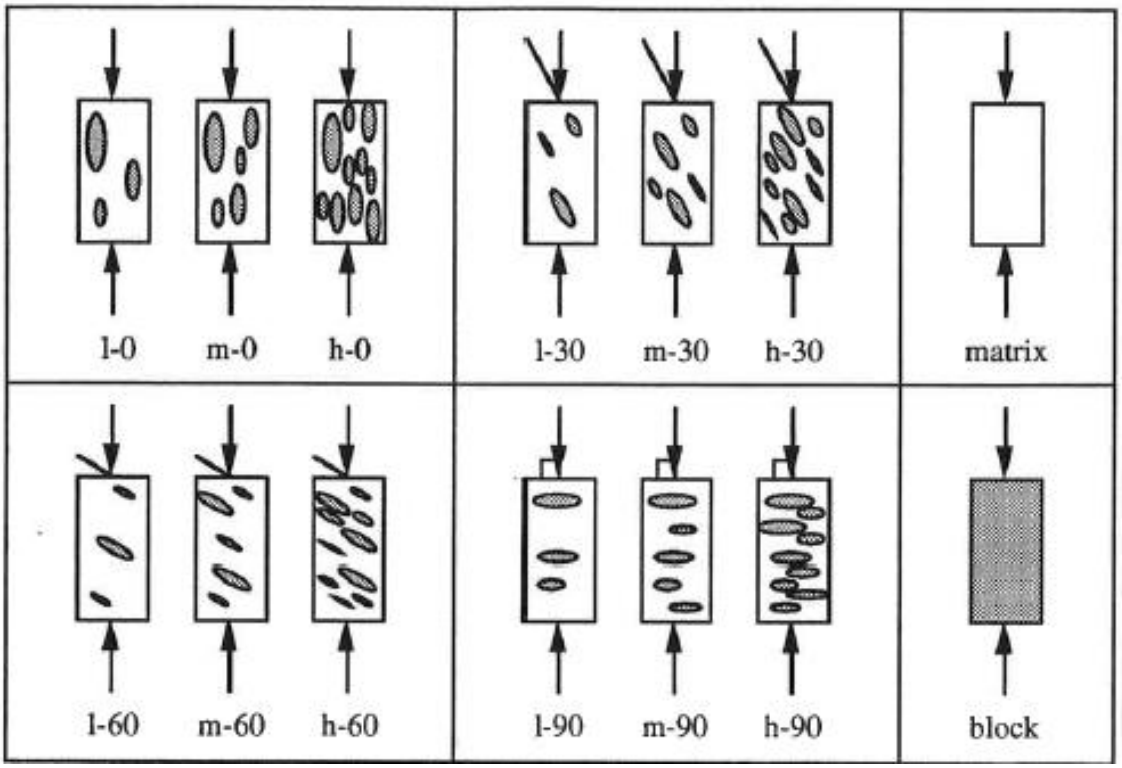


Figura 30 –Rappresentazione provino secondo il modello di Lindquist (Lindquist 1994).

Sono stati creati:

- 5 campioni per ogni tipologia;
- 7 campioni realizzati col materiale della sola matrice e aventi diametro pari a circa 200 millimetri;
- 10 campioni creati con il solo materiale dei blocchi, aventi diametro pari a circa 70 mm.

In Tabella 4.3, si riportano le informazioni riguardanti i provini sottoposti alle prove.

N° provini	Diametro [mm]
67	200
10	70

Tabella 4.3– Numero e diametro dei campioni (Lindquist 1994).

Tenendo in considerazione anche le miscele di tentativo, realizzate per definire il modello dei materiali e per individuare i metodi di preparazione dei provini, in totale, sono stati adoperati più di 180 campioni.

La superficie laterale dei provini è stata trasferita su una pellicola trasparente definendo così la superficie di rottura sviluppata nei provini sottoposti alle prove di compressione triassiale. Tale operazione è stata effettuata per poter operare un confronto: si può così valutare la differenza dei parametri geometrici, in termini di distribuzione dimensionale e di proporzione volumetrica dei blocchi, confrontando quelli noti dalle analisi 2D effettuate (fotografie ed immagini) e quelli ottenuti dal caso 1D.

La proporzione volumetrica dei blocchi è stata valutata prima dell'assemblaggio del campione, noto il peso di volume dei blocchi; inoltre, essa è stata confrontata con le stime ipotizzate dall'analisi dei tracciati e si è notato che la stima valutata sul campione in esame risulta superiore rispetto a quella valutata sulla superficie laterale dei provini di circa il 30%.

Questa differenza è giustificabile qualora si ipotizzasse che la densità dei blocchi sia più grande nella parte centrale del campione.

4.2.1 Analisi dei risultati

Nello studio condotto la Lindquist (Lindquist 1994), la resistenza a taglio di ogni provino è stata valutata mediante il criterio di Mohr Coulomb, introducendo opportune modifiche così come si evince dall'Equazione (4.1):

$$\tau_p = c_{matrice} \cdot (1 - VBP) + \sigma \cdot \tan(\varphi_{matrice} + \Delta\varphi_{matrice}\,(VBP)) \qquad (4.1)$$

- τ_p: resistenza a taglio equivalente del bimrock;
- $c_{matrice}$: coesione della matrice (assunta linearmente decrescente all'aumentare di VBP);
- $\varphi_{matrice}$: angolo di attrito della matrice;
- $\Delta\varphi_{matrice}(VBP)$: incremento dell'angolo di attrito assunto, per valori di VBP superiori al 25%, pari a 3° per ogni incremento della VBP del 10%.

Una volta sottoposti i provi alle prove di compressione triassiale sono stati raggruppati i risultati che sono mostrati in Figura 31.

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

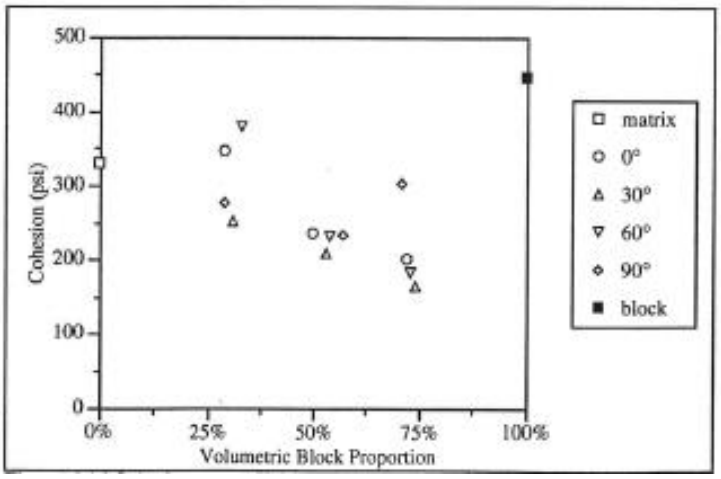


Figura 31 – Risultati dei test in termini di coesione e proporzione volumetrica dei blocchi (Lindquist 1994).

Attraverso la Figura 31, è possibile osservare che sussiste una riduzione della coesione all'aumentare della proporzione volumetrica e che campioni con alte proporzioni volumetriche (intorno al 70%) mostrano una coesione ridotta a circa la metà di quella della matrice.

Riportando su un diagramma i risultati ottenuti, relativamente ai valori di angolo di attrito, si osserva che il valore di φ aumenta al crescere della stessa proporzione volumetrica Figura 32.

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

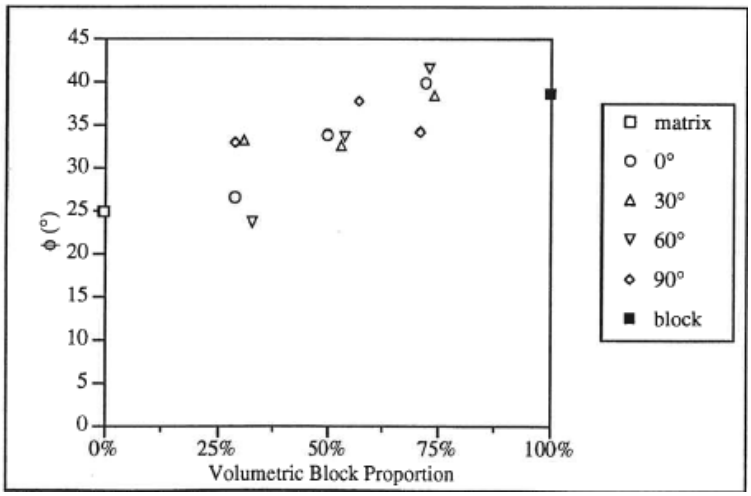


Figura 32 – Risultati dei test in termini di angolo di attrito (Lindquist 1994).

All'interno di materiali complessi come i bimrock, generalmente, è presente una iso-orientazione delle superfici di debolezza che può scaturire sia dall'allineamento dei blocchi che dalle zone di taglio principali.

I campioni studiati da Lindquist sono influenzati da caratteristiche anisotrope dovute all'orientazione dei blocchi con dimensioni maggiori.

È possibile osservare dai dati di output ottenuti dalle analisi condotte da Lindquist che i campioni con inclinazione dei blocchi di 30°, rispetto al carico assiale, sono caratterizzati da più bassi valori di coesione.

In aggiunta, i campioni a medio e alto valore di percentuale volumetrica dei blocchi, orientati 0° e a 90°, hanno coesione maggiore rispetto a quelli con orientazione 30° oppure 60° (Figura 33, Figura 34, Figura 35).

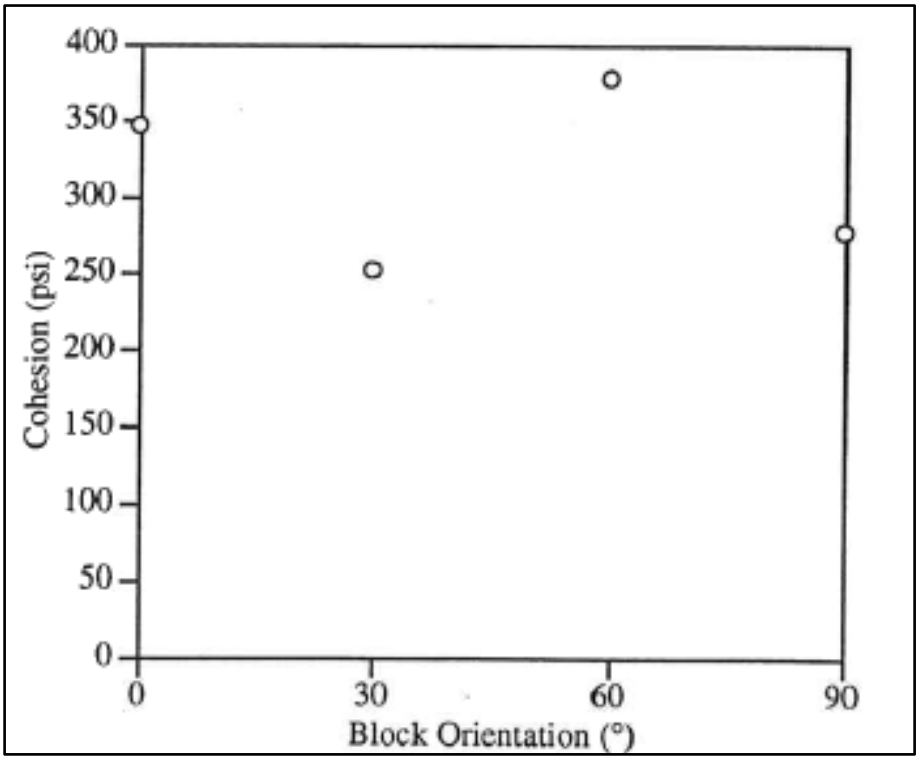


Figura 33 –Coesione e orientazione dei blocchi con bassa proporzione volumetrica (Lindquist 1994).

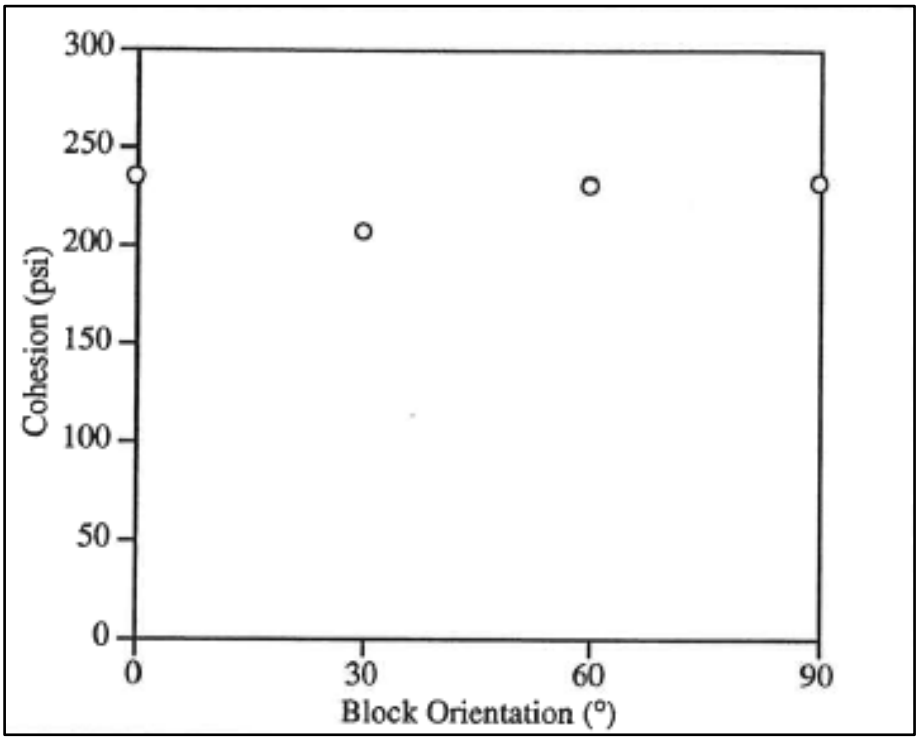


Figura 34 – Coesione e orientazione dei blocchi con media proporzione volumetrica (Lindquist 1994).

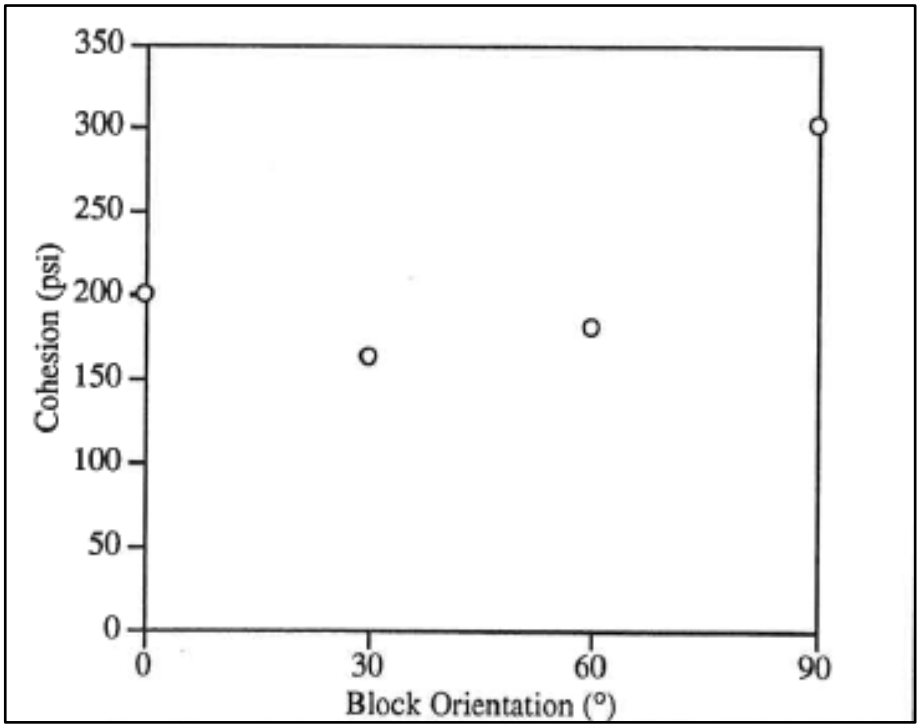


Figura 35 – Coesione e orientazione dei blocchi con alta proporzione volumetrica (Lindquist 1994).

Con riferimento alla Figura 32 si osserva che il valore dell'angolo di attrito φ valutato in provini con media e con alta proporzione volumetrica dei blocchi presenti al loro interno, non varia in termini significativi al variare dell'orientazione dei blocchi.

È inoltre possibile individuare un valore soglia di proporzione volumetrica al di sotto del quale la presenza dei blocchi ha una minima influenza sulla resistenza dell'ammasso.

In particolar modo, i risultati suggeriscono l'esistenza di un valore limite della proporzione volumetrica dei blocchi pari al 30% al di sotto del quale i parametri di resistenza sono poco influenzati.

Per quanto concerne i risultati in termini di angolo di attrito e di coesione, si riscontra che:

- campioni con orientazione dei blocchi a 0° e a 60° hanno valori simili, in termini di *c* e φ, a quelli riferiti alla matrice;
- campioni con orientazione di 30° e di 90° hanno coesione inferiore e angolo di attrito superiore ai valori corrispettivi nel caso di sola matrice.

Ponendo attenzione sulle superfici di rottura dei campioni studiati, è possibile spiegare in che modo la proporzione dei blocchi abbia effetti sulla coesione e sull'angolo di attrito interno.

Le superfici di rottura che si formano sui provini si sviluppano lungo le zone di contatto tra la matrice e i blocchi.

Ciò comporta che, all'aumentare delle proporzioni volumetriche, l'angolo di attrito interno cresce poiché le superfici di frattura diventano più tortuose (Lindquist 1994).

Le zone di rottura si generano lungo le zone di contatto tra i blocchi e la matrice piuttosto che attraversare i blocchi stessi. Ciò si verifica poiché la resistenza dei blocchi risulta il doppio di quella della matrice.

In Figura 36 è rappresentata la traccia dei blocchi sulla superficie laterale di due campioni.

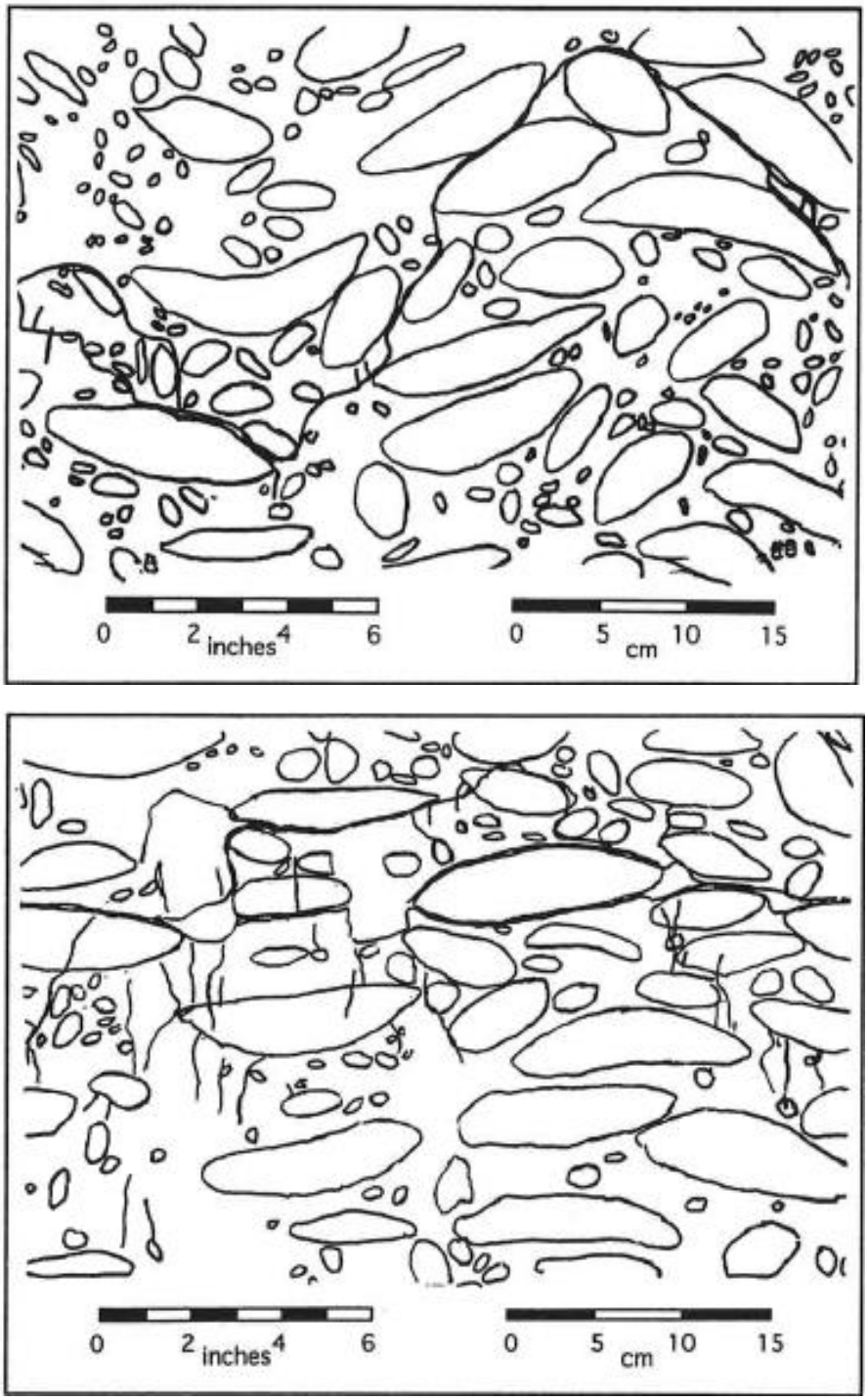


Figura 36 – Traccia dei blocchi sulla superficie laterale di due provini ad alta proporzione volumetrica (Lindquist 1994).

4.2.2 Effetti sul modulo di deformazione

Dagli studi condotti da Lindquist (1994) sono scaturite anche delle considerazioni in termini di modulo di deformazione, la cui variazione è funzione della proporzione volumetrica dei blocchi e dell'orientazione degli stessi.

Innanzitutto si fa riferimento a due condizioni differenti: il primo caso mostra il provino sottoposto a una condizione al contorno di deformazione uniforme mentre il secondo lo considera soggetto ad uno stato tensionale uniforme (Figura 37),(Lindquist 1994).

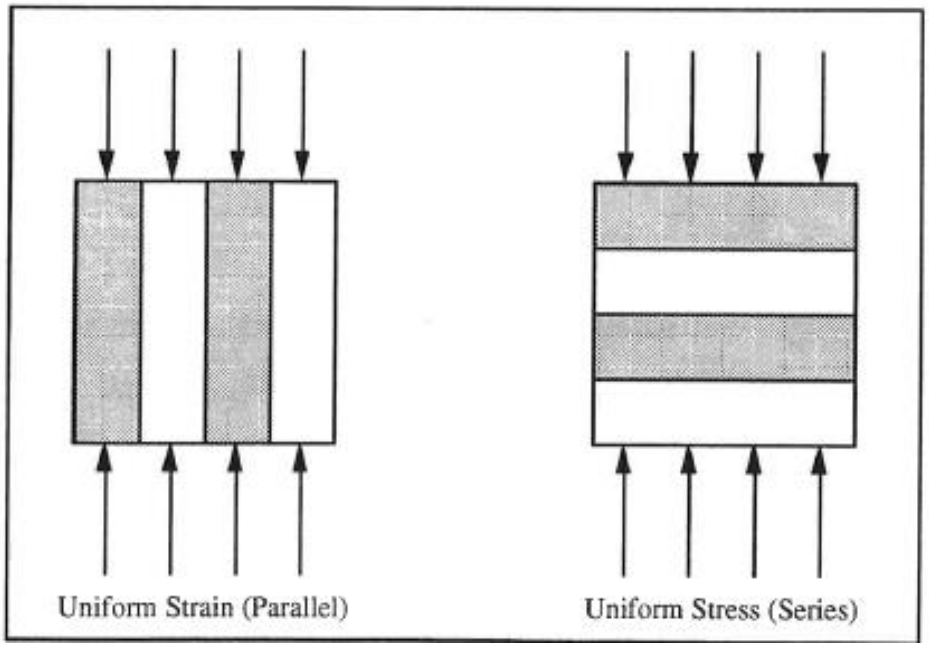


Figura 37 – Provino sottoposto a stato di deformazione uniforme a sinistra ed a stato di tensione uniforme a destra (Lindquist 1994).

A partire dalle prove di compressione triassiale, condotte in questo studio (Lindquist 1994), è possibile estrapolare un diagramma di tensioni e deformazioni in cui la pendenza della retta congiungente l'origine del diagramma con il punto, sulla curva di carico, in corrispondenza del 40% della massima tensione deviatorica, rappresenta il modulo di deformazione secante.

Il modulo di deformazione è adoperato al posto del modulo di elasticità qualora, durante l'applicazione del carico, il provino assumesse deformazioni reversibili (elastiche) e permanenti (plastiche).

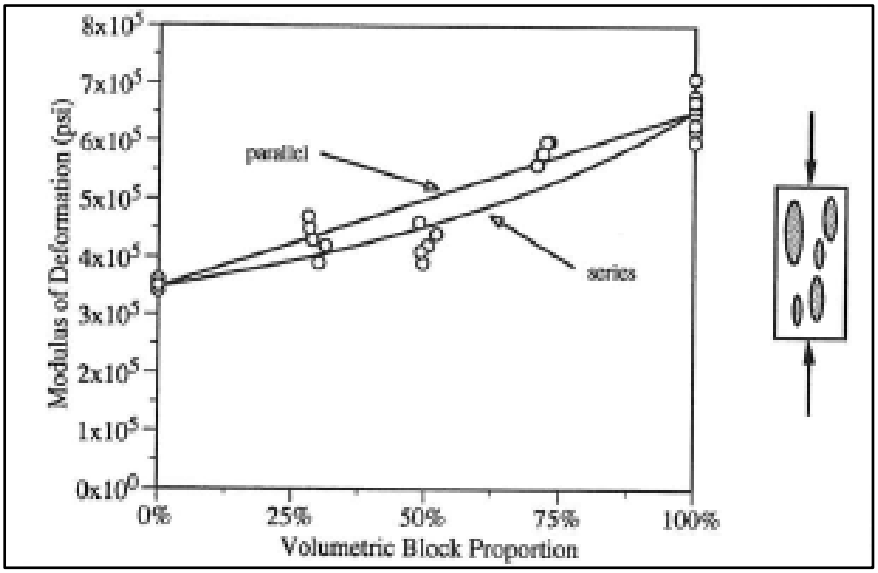


Figura 38 – Modulo di deformazione e proporzione volumetrica dei blocchi – orientazione di 0° (Lindquist 1994).

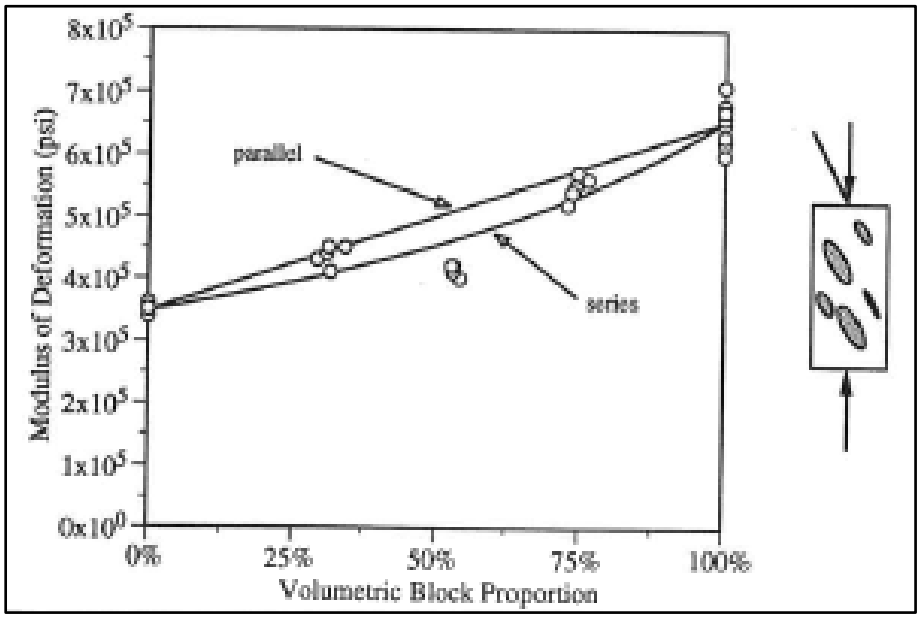


Figura 39 – Modulo di deformazione e proporzione volumetrica dei blocchi – orientazione di 30° (Lindquist 1994).

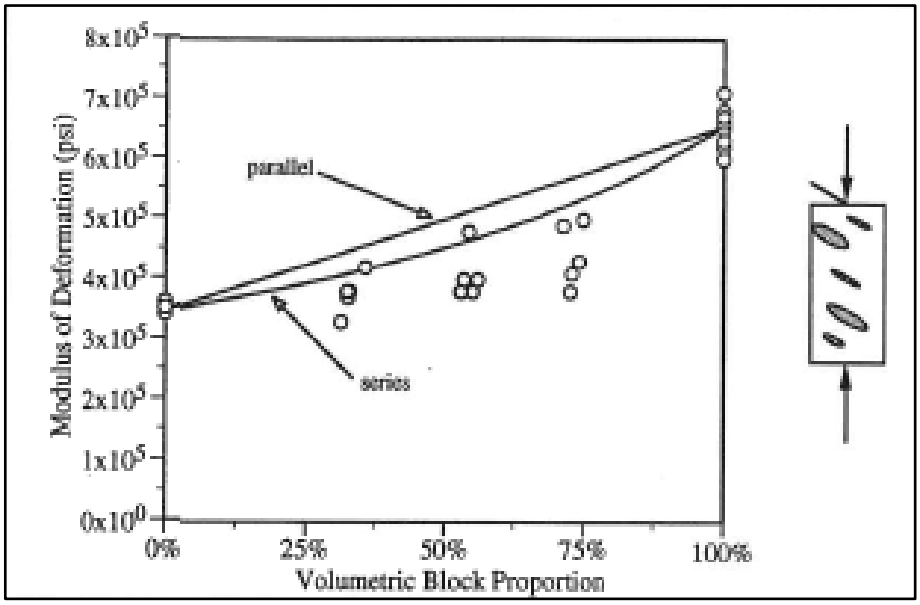


Figura 40 – Modulo di deformazione e proporzione volumetrica dei blocchi – orientazione di 60° (Lindquist 1994).

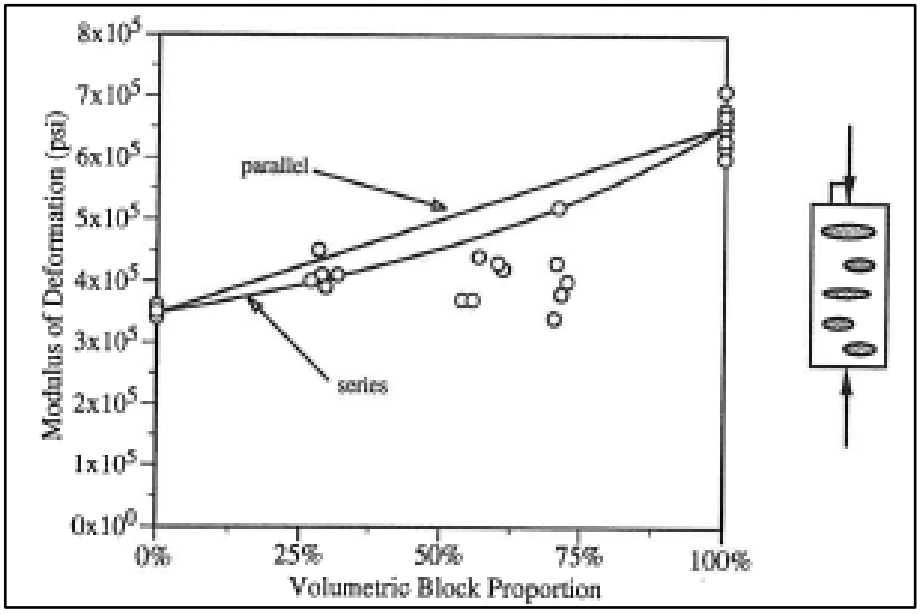


Figura 41 – Modulo di deformazione e proporzione volumetrica dei blocchi – orientazione di 90° (Lindquist 1994).

Dalla Figura 38 alla Figura 41 sono mostrati diversi casi di provini con differente orientazione dei blocchi. Si evince che l'incremento della proporzione volumetrica provoca un complessivo aumento del modulo di deformazione dei campioni analizzati.

Questo incremento è dovuto ad un irrigidimento del modello al crescere della proporzione volumetrica.

Inoltre, la velocità di incremento del modulo con la proporzione volumetrica decresce passando da un'orientazione dei blocchi verticale ad una orizzontale..

L'incremento del modulo risulta minore per campioni con blocchi disposti in orizzontale anche a causa dell'allineamento degli strati di cera.

Infatti, l'allineamento dei blocchi comporta un allineamento delle fratture di cera determinando la formazione di uno strato subparallelo.

Le caratteristiche meccaniche della cera sono note e, in particolare, essa possiede un valore pari ad un decimo del modulo della matrice; quindi, quando gli strati si presentano sub-orizzontali si avrà una drastica riduzione della rigidezza del modello.

Inoltre, a parità di orientazione dei blocchi relativamente al caso di 0° e 30°, i campioni con proporzione volumetrica media hanno moduli più bassi rispetto ai provini con proporzione alta o bassa.

Ciò appare non chiaro e non è stata definita una possibile causa di tale comportamento anomalo. Si aggiunge inoltre una ulteriore considerazione: su modelli con media proporzione volumetrica e con orientazione tra 0° e 30°, la maggior parte delle fratture sugli strati di cera si allinea orizzontalmente nonostante i blocchi abbiano una diversa inclinazione, anche maggiore.

Questa conformazione di tipo orizzontale potrebbe chiarire il comportamento inconsueto sopra esposto (Lindquist 1994).

4.2.3 Conclusioni sul modello di Lindquist

Dallo studio condotto da Lindquist, si osserva che i moduli di deformazione:

- crescono in corrispondenza dell'aumento della proporzione volumetrica dei blocchi e tale incremento è maggiore per campioni con i blocchi disposti con l'asse maggiore parallelo alla direzione del carico assiale 0° e minore per provini con blocchi perpendicolari alla direzione del carico assiale (90°).

Per quanto concerne, invece, i parametri di Mohr Coulomb:

- la coesione diminuisce mentre l'angolo di attrito interno aumenta in corrispondenza di un incremento della proporzione volumetrica, Figura 42.

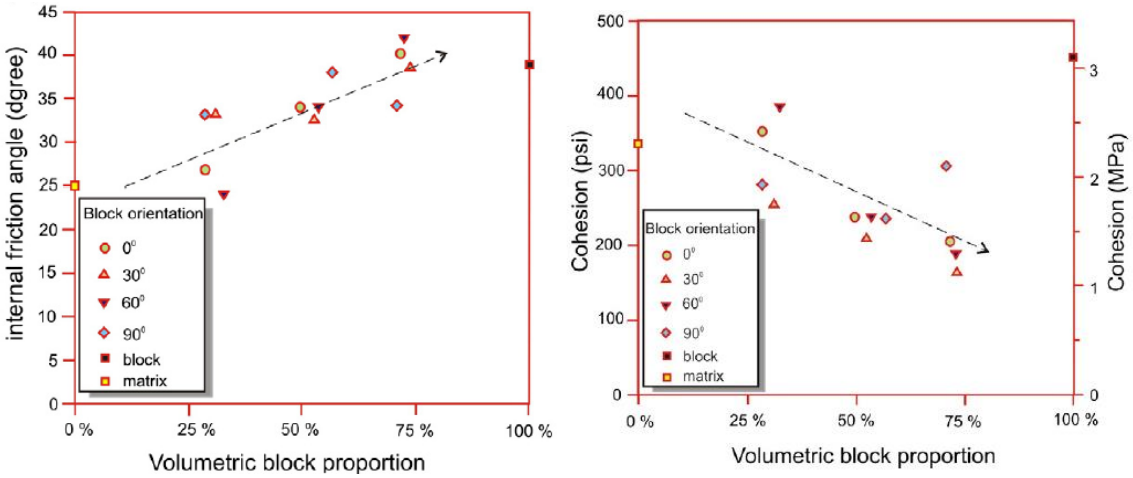


Figura 42 – Relazione tra angolo di attrito, coesione e VBP (Kalender, 2014).

Rispetto alla superficie di rottura:

- essa si presenta tortuosa e si sviluppa al contatto fra i blocchi e la matrice.

Pertanto, i parametri di resistenza e di deformazione dei materiali studiati da Lindquist sono influenzati, in maniera predominante, sia dalla proporzione volumetrica che dall'orientazione dei blocchi.

4.3 Criterio di resistenza proposto da Kalender

In letteratura sono numerosi gli studi empirici e le prove di laboratorio volte alla definizione dei parametri meccanici delle formazioni strutturalmente complesse; la proposta di Kalender è quella di definire un criterio di resistenza mediante un approccio empirico generalizzato, al fine di definire la resistenza di bimrocks non saldati e di bimsoils.

Il metodo, chiamato "*Bim strength criterion*", si basa sui principali precetti della Meccanica delle Rocce e dei Terreni e tiene conto dell'influenza della percentuale volumetrica dei blocchi disposti all'interno dei depositi strutturalmente complessi.

Mediante i risultati delle prove di compressione monoassiale e triassiale effettuate in laboratorio e su provini artificiali, sono state formulate delle equazioni empiriche utili per la predizione delle caratteristiche di resistenza dei bimrock. La validazione delle formulazioni proposte dall'autore è stata effettuata anche mediante l'utilizzo del database presente in letteratura.

Sonmez et al. (2004, 2005, 2006) hanno realizzato degli studi condotti sull'agglomerato di Ankara per poter valutare l'effetto dei contrasti meccanici tra la matrice di tufo e i blocchi di andesite variamente saldati alla matrice stessa.

I risultati hanno mostrato che la resistenza a compressione monoassiale del deposito vulcanico tende ad incrementarsi con l'aumento della proporzione volumetrica dei blocchi, così come gli stessi studiosi si aspettavano. Nello stesso tempo, è stato anche osservato che i contatti (di tipo "*welded*") tra i blocchi e la matrice possono giocare un ruolo importante nel comportamento meccanico della formazione vulcanica di Ankara.

Altre due autori (Kahraman e Alber, 2006) hanno analizzato il comportamento di una breccia composta da una matrice tendenzialmente più resistente dei blocchi, ottenendo come risultato dei valori di UCS dei nuclei di breccia sempre più bassi all'aumentare della VBP.

Pertanto, i due studi hanno condotto a differenti risultati, infatti quelli condotti da Sonmez (2004, 2005, 2006) hanno evidenziato un aumento della UCS all'aumentare della VBP.

Successivamente, è stata effettuata una classificazione geomeccanica, proposta da Riedmüller et al. (2001) e Altinsoy (2006), che comprende due grandi sottogruppi: i bimrock saldati (*welded*) e quelli non saldati (*unwelded*).

Tale distinzione tiene conto del fatto che i punti di contatto tra matrice e blocchi hanno medesima resistenza della matrice nel caso in cui siamo in presenza di bimrocks saldati; nel caso di bimrocks non saldati la resistenza dei punti di contatto sarà minore di quella della matrice.

In Figura 43 è presentata una schematizzazione, nel piano $\tau - \sigma$, del comportamento di bimrocks saldati e non saldati al variare della percentuale volumetrica.

Per bimrock non saldati, con bassi valori di tensione normale (σ_n) o di σ_3, la resistenza della matrice può essere superiore a quella del bimrock quando la VBP è sufficientemente elevata da ridurre sufficientemente la coesione (Kalender et al. 2014).

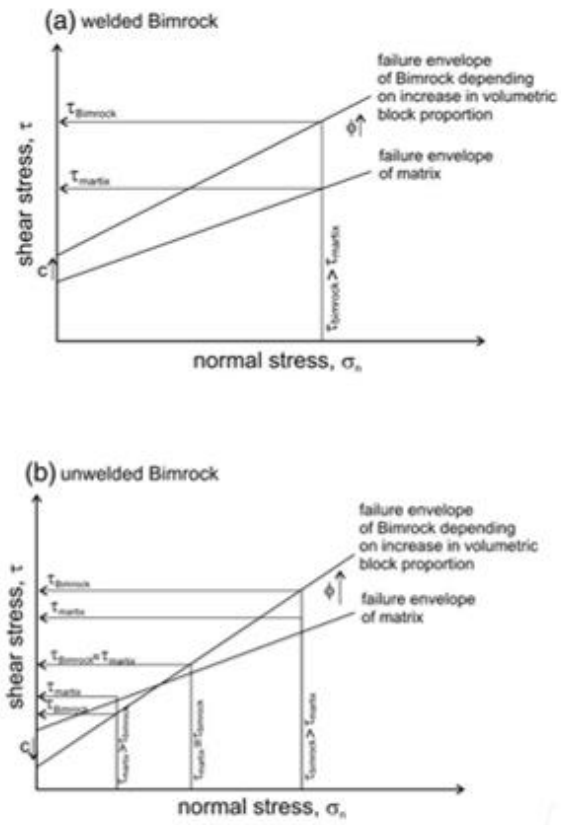


Figura 43 – Illustrazione schematica di bimrock saldato (a) e non saldato (b), (Kalender et al. 2014).

Per quanto riguarda le prove di laboratorio, Lindquist è stato uno tra i principali autori dedito allo studio e alla creazione di campioni artificiali per prove di caratterizzazione meccanica dei bimrock, così come già discusso precedentemente (Lindquist 1994).

La principale scoperta che è scaturita da tali studi riguarda la variazione dei parametri di coesione *c* e di angolo di attrito φ in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi. In particolare, al crescere della VBP, si ha:

- un incremento dell'angolo di attrito interno;
- una diminuzione dei valori di coesione.

In letteratura sono presenti, inoltre, considerazioni proposte da Sonmez (Sonmez et al. 2009) e Coskun (2010) riguardanti la relazione tra VBP e *φ*, che possono essere riassunte come segue:

- per 0% < VBP < 10%, non c'è nessun incremento dell'angolo di attrito al di sopra di $\varphi_{matrice}$. Nel caso di 10% < VBP < 75%, si osserva un marcato aumento di φ, a differenza del caso di VBP >75% in cui non si ha un incremento considerevole di *φ* ;
- $\varphi_{bimrock}$ può essere posto pari ad α (angolo a riposo dei blocchi) quando VBP >75%;
- $\alpha > \varphi_{matrice}$ qualora si abbia un incremento di $\varphi_{bimrock}$ e di VBP;
- per 0% < VBP < 100% il valore di $UCS_{bimrock}$ diminuisce, dal valore di $UCS_{matrice}$ fino a zero, dal momento che per VBP > 60% si presuppone che i contatti tra i blocchi siano nulli o comunque molto bassi.

Alla luce di tali osservazioni, Kalender et al. (2014) hanno definito un approccio empirico per la valutazione della resistenza per bimrocks non saldati o bimsoils. Per far ciò, l'autore ha assunto tali formazioni come depositi a comportamento omogeneo e isotropo ottenendo le seguenti equazioni:

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matrice}\left[1 + \frac{1000[\left(\frac{\alpha}{\varphi_{matrice}}\right) - 1]}{1000 + 5^{[\frac{100-VBP}{15}]}} \cdot \frac{VBP}{VBP+1}\right] \tag{4.2}$$

$$c_{bimrock} = \frac{UCS_{bimrock} \cdot (1 - sin\varphi_{bimrock})}{2\cos(\varphi_{bimrock})} \tag{4.3}$$

$$UCS_{bimrock} = \frac{(A - A^{\left(\frac{VBP}{100}\right)})}{(A-1)} \cdot UCS_{matrice} \tag{4.4}$$

Dove:

- $\varphi_{bimrock}$ e $\varphi_{matrice}$ sono rispettivamente gli angoli di attrito del bimrock e della matrice espressi in gradi;
- α è l'angolo di riposo dei blocchi, in gradi;
- $UCS_{bimrock}$ e $UCS_{matrice}$ sono rispettivamente la resistenza a compressione assiale del bimrock e della matrice;
- VBP è invece la percentuale volumetrica dei blocchi espressa in percentuale;
- A è una variabile che esprime il grado di contatto tra matrice e blocchi, il cui valore più conservativo è pari a 0,1.

L'utilizzo di UCS della matrice è un parametro di scala per ricavare il valore di UCS riferito al bimrock. Quando la proporzione volumetrica aumenta il valore normalizzato di UCS del bimrock (normalizzazione rispetto al valore di resistenza della matrice) diminuisce, come si evince dall'equazione (4.4).

Il grado di decremento, basato sulla percentuale volumetrica, è controllato proprio mediante il parametro "A" presente nelle formule empiriche sopra riportate, la cui determinazione è stata effettuata mediante back-analysis: i risultati predetti sono stati confrontati con quelli ottenuti dalle prove di laboratorio, come quelli ottenuti da Lindquist, Figura 44.

Il valore di tale parametro deve essere selezionato in funzione al grado di contatto tra blocchi e matrice: maggiore è la forza di contatto tra i due elementi, più alto sarà il valore della variabile "A".

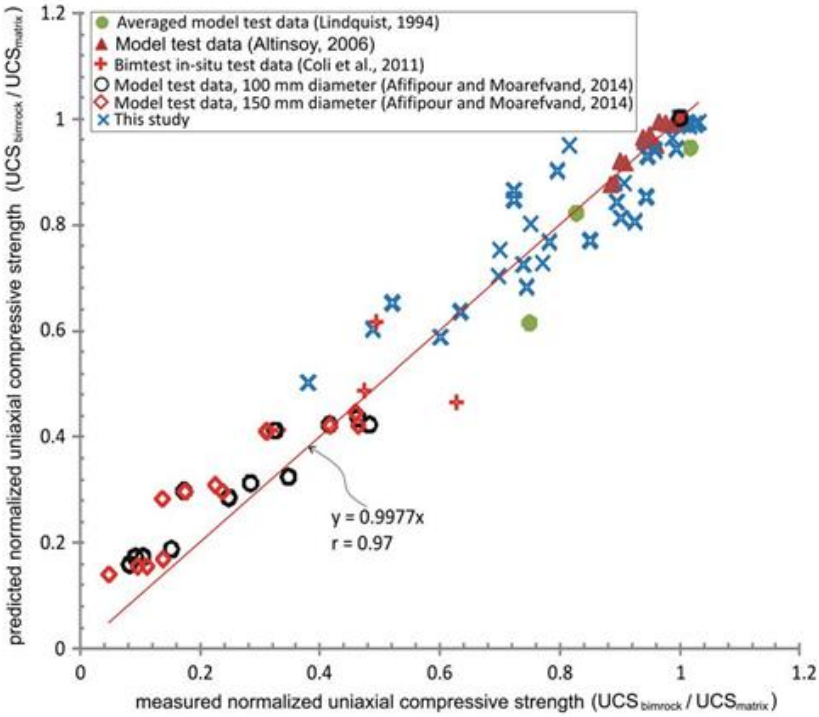


Figura 44 – Back analysis per definire il parametro "A" (Kalender et al. 2014).

Il legame tra blocchi e matrice è fortemente collegato alla tipo di matrice, all'angolarità e rugosità dei blocchi; mediante il grafico in Figura 45 è possibile selezionare il valore del parametro A da introdurre nelle equazioni empiriche proposte.

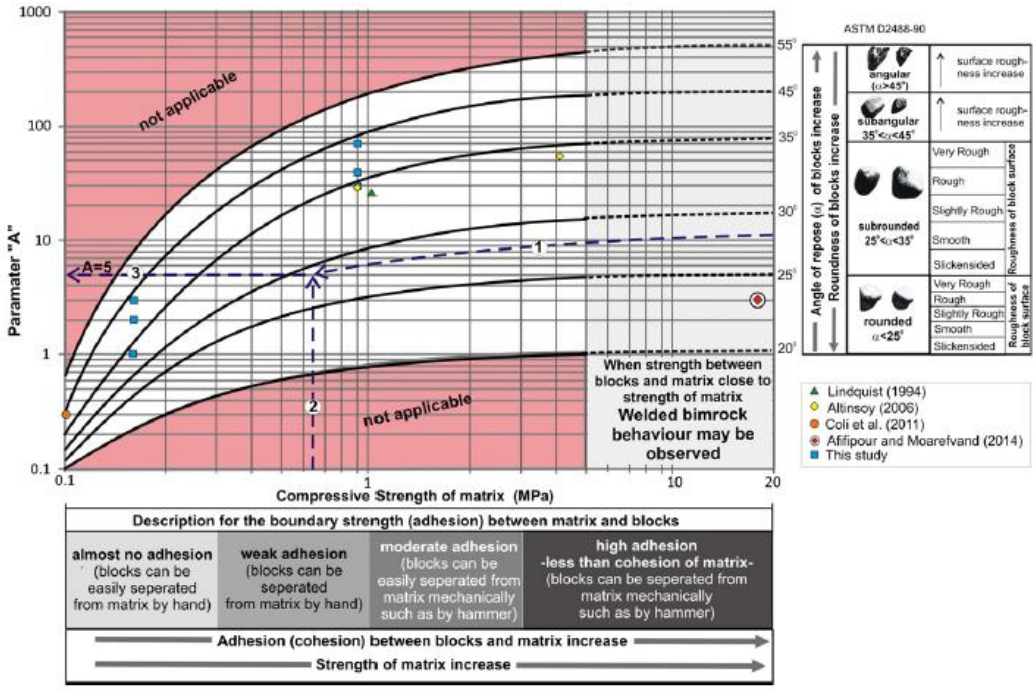


Figura 45 – Grafico per la selezione del parametro "A" in funzione delle caratteristiche di contatto tra blocchi e matrice, (Kalender et al. 2014).

In Figura 46 si osserva che per VBP alti, il limite superiore dell'angolo di attrito interno normalizzato è delimitato dal rapporto tra α e φ_{matrix}, (dove α è l'angolo di riposo dei blocchi). In maniera analoga, in Figura 47, le relazioni tra $UCS_{bimrock}$ e la percentuale volumetrica sono apparentemente definibili come una famiglia di curve di tipo non lineare caratterizzate dal parametro "A" (Kalender et al. 2014).

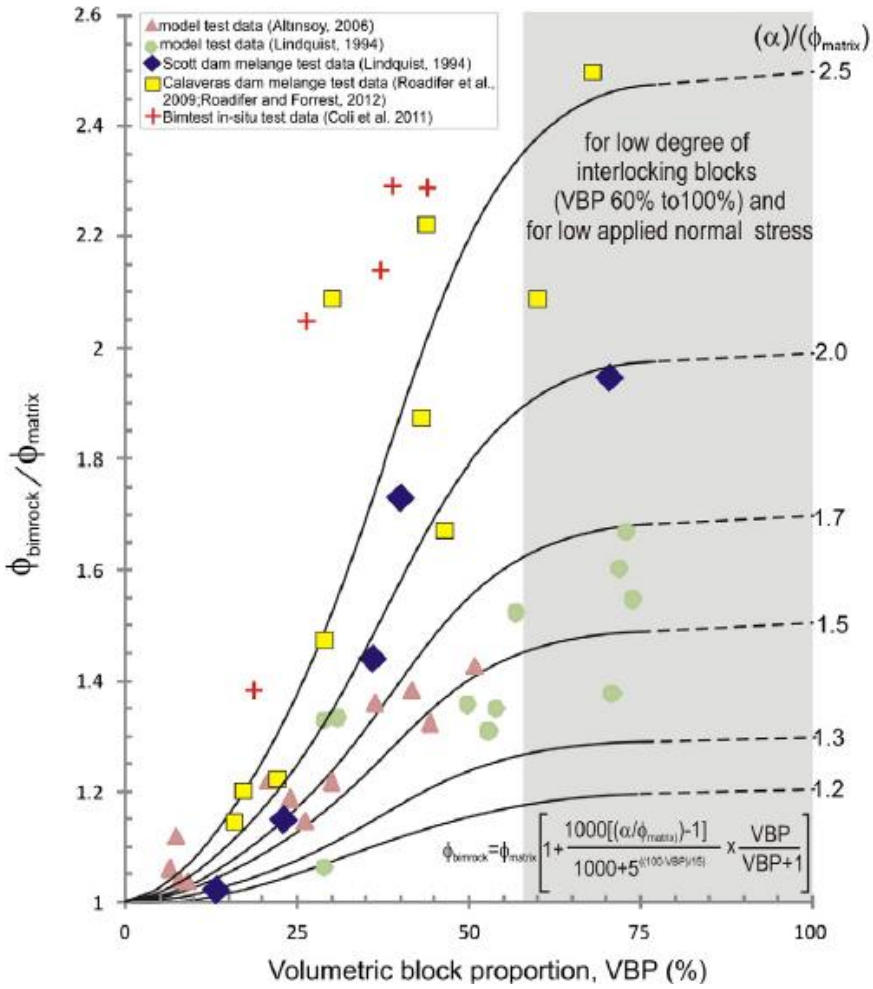


Figura 46 – Rappresentazione del metodo empirico per la predizione di $\varphi_{bimrock}$ (Kalender et al. 2014).

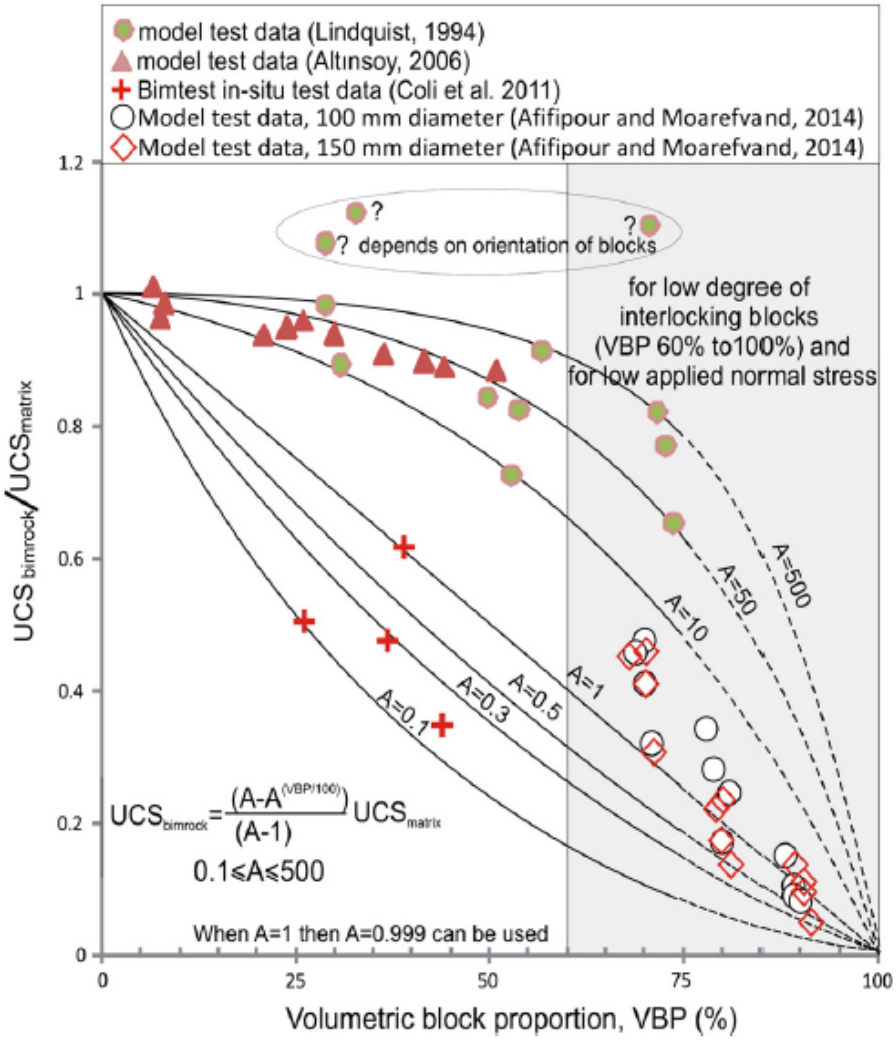


Figura 47 – Rappresentazione del metodo empirico per la predizione di $UCS_{bimrock}$ *(Kalender et al. 2014).*

4.3.1 Considerazioni sul metodo empirico proposto da Kalender

Attraverso gli studi condotti da Kalender (Kalender et al. 2014), è stato suggerito un approccio empirico preliminare, chiamato "*Bim strength criterion*", il cui scopo è quello di selezionare e attribuire dei parametri di resistenza alle formazioni strutturalmente complesse.

Il criterio suggerito dall'autore assume le formazioni in bimrock come depositi omogenei e a comportamento isotropo

La metodologia richiede semplici parametri in ingresso come ad esempio la resistenza a compressione della matrice, la proporzione volumetrica e l'angolo di riposo dei blocchi; in Figura 48 è mostrato un diagramma di flusso per capire come utilizzare i dati di input.

Tuttavia, il criterio può essere applicato nel caso di depositi sottoposti a basse pressioni di confinamento e, sulla base di un confronto con i dati disponibili, il *Bim strength criterion* tende generalmente a sottostimare i valori di resistenza.

Per tale ragione, il metodo è utile per predire il limite inferiore dei parametri di resistenza sia per i bimrocks non saldati sia per i bimsoils.

A fronte di tali considerazioni, è possibile affermare che il criterio di valutazione dei parametri di resistenza, per formazioni strutturalmente complesse, è definibile come un metodo preliminare per la determinazione dei parametri di resistenza. Tuttavia, è opportuno intervenire con ulteriori studi a riguardo, per comprendere meglio il comportamento dei bimrock non saldati e definirne le caratteristiche meccaniche.

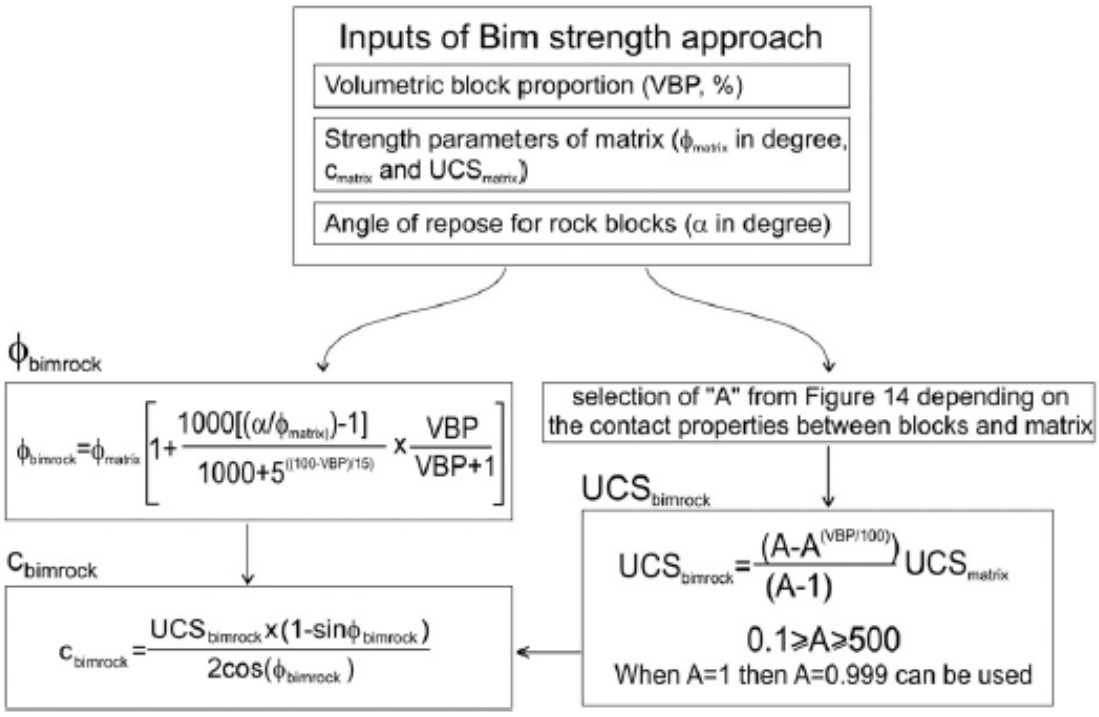


Figura 48 – Diagramma di flusso per applicazione del criterio empirico proposto per la definizione dei parametri meccanici dei bimrock e dei bimsoil (Kalender et al. 2014).

4.4 Studio del comportamento meccanico dei bimrocks

Di seguito sono proposti due studi presenti in letteratura (Barbero et al. 2006, Li et al. 2004) relativi alla variazione dei parametri di resistenza in funzione della percentuale volumetrica delle inclusioni presenti nella matrice.

4.4.1 Studio del comportamento meccanico: Barbero et al. (2006)

Allo scopo di valutare le caratteristiche meccaniche su un campione in bimrock alla scala di laboratorio, sono state simulate numericamente delle prove di compressione mediante il codice agli elementi finiti *Phase*^{2}.

Le analisi sono state eseguite in condizioni di deformazione piana. Nelle prove di compressione triassiale la pressione laterale di confinamento è stata mantenuta costante per tutta la prova mentre è stato applicato un carico verticale via via crescente. Alla base e in testa del campione è stata simulata la presenza di due piastre di acciaio. Tra le piastre ed il campione è stata posta un'opportuna interfaccia dotata di attrito. Per ogni prova sono stati valutati i valori di resistenza a compressione e il modulo di deformabilità.

Sono stati inseriti dei blocchi a sezione rettangolare, con il lato maggiore disposto in direzione orizzontale e posizionati casualmente all'interno della matrice.

Le caratteristiche del modello sono le seguenti:

- dimensione del campione: 15×30 cm;
- dimensioni massima e minima dei blocchi rispettivamente pari a: $0{,}75 \cdot L_c = 11{,}25$cm e $0{,}05 \cdot L_c = 0{,}75$cm;
- criterio di resistenza di Hoek e Brown.

Le percentuali volumetriche considerate sono pari a: 9.6%, 19%, 29%, 48% e 67%.

	Piastre	**Matrice**	**Blocchi**
Legge costitutiva	Elastica	Elastoplastica ideale	Elastoplastica ideale
E [MPa]	210000	2500	5000
ν	0,25	0,25	0,25
c [MPa]	-	2,28	3,07
φ [°]	-	24,7	38,3

Tabella 4.4 – Caratteristiche dei materiali costituenti il modello del campione (Barbero et al. 2006).

I risultati ottenuti dalle analisi hanno condotto alle seguenti osservazioni:

- gli inviluppi relativi al caso di sola matrice o di soli blocchi rappresentano i limiti di resistenza del bimrock;
- la resistenza complessiva del bimrock cresce all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi, soprattutto per valori di VBP superiori al 29%. Pertanto, al di sotto di questa soglia, la presenza dei blocchi sembra non influenzare il global comportamento meccanico del materiale (Figura 49);
- al crescere della percentuale volumetrica si registra un aumento del modulo di deformazione (soprattutto per valori maggiori del 29% di VBP), (Figura 50).

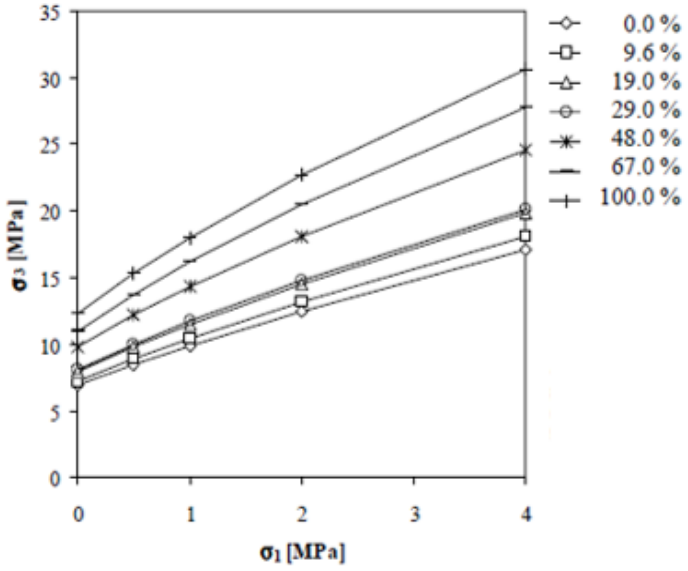


Figura 49 – Inviluppo di resistenza al variare della percentuale volumetrica (Barbero et al. 2006).

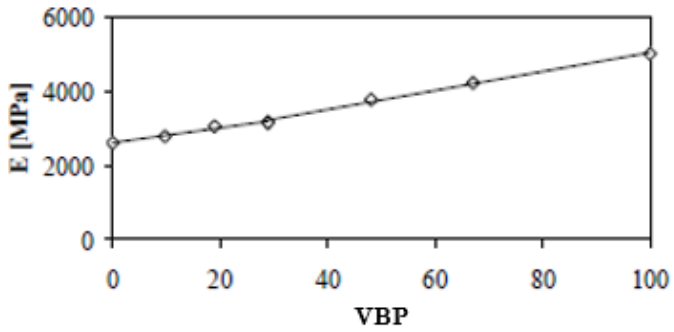


Figura 50 – Modulo di deformabilità al variare della percentuale volumetrica (Barbero et al. 2006).

4.4.2 Studio del comportamento meccanico: Li, Liao et al. (2004)

Li et al. (2004) hanno condotto degli studi sul comportamento meccanico di un aggregato di roccia e terreno (RSA) situato nel bacino di Three Gorges, in Cina.

Lo scopo di tali studi è stato quello di valutare i parametri di resistenza mediante prove *in situ* e di effettuare un confronto tra i risultati ricavati da tali prove e quelli ottenuti mediante simulazione numerica. L'approccio stocastico è stato condotto mediante l'applicazione del Metodo Monte Carlo per l'estrazione casuale dei blocchi presenti nel materiale analizzato.

Difatti oltre alla valutazione delle caratteristiche di resistenza, l'obiettivo è stato quello di verificare l'attendibilità dei risultati ricavati da un'analisi numerica eseguita mediante il software FLAC^{3D}.

Nell'area interessata dallo studio sono state quindi eseguite delle prove di taglio diretto, secondo lo schema mostrato in Figura 51.

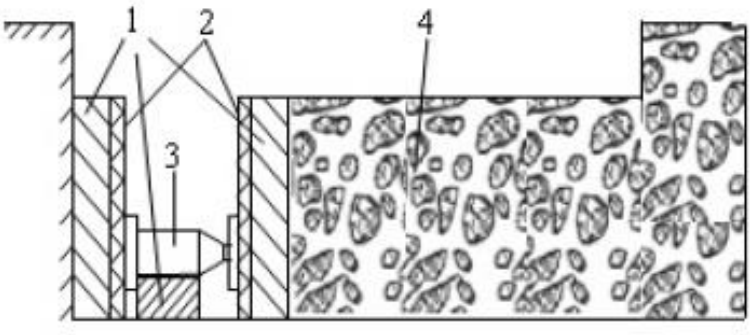


Figura 51 – Schema prova di taglio diretta in situ (1-traversine, 2-lastre in acciaio, 3-pistone, 4-campione di RSA), (Li et al. 2004).

Durante l'esecuzione della prova è stata applicata, mediante un pistone, una forza orizzontale agente su una piastra che, trasmessa al campione, induce lo sviluppo di deformazioni di taglio e conseguentemente la formazione della superfici di rottura. In Figura 52 sono mostrati i risultati ottenuti per tre campioni (T_1, T_2 e T_3) di RSA:

- T_1 con VBP = 54 %;
- T_2 con VBP = 42,1 %;
- T_3 con VBP = 38,3 %.

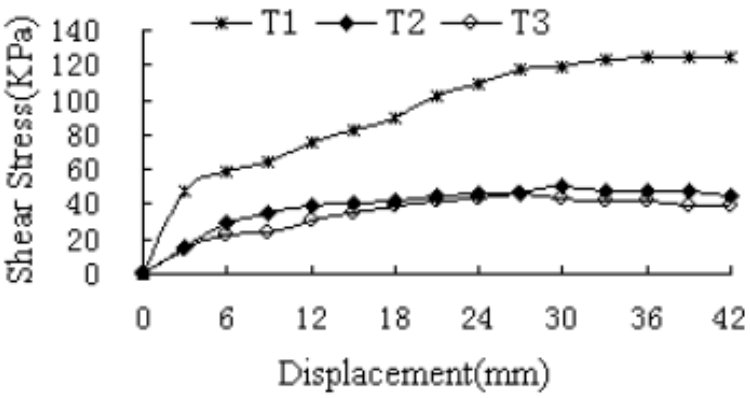


Figura 52 – Risultati ottenuti per tre provini di RSA (Li et al. 2004).

I risultati delle prove *in situ* indicano che con l'incremento della percentuale volumetrica dei blocchi, il Modulo di Young e la massima resistenza al taglio del materiale hanno valori pressoché simili nei campioni con bassa percentuale volumetrica (T_3 e T_2); tuttavia, si osserva un incremento significativo dei due parametri passando dal campione T_2 (VBP=42,1%) a quello T_1 (VBP=54%).

Di conseguenza, potrebbe esserci un valore soglia (compreso tra il 42,1% e il 54% di VBP) superato il quale la risposta meccanica del materiale varia in maniera considerevole.

Successivamente è stata effettuata una simulazione numerica. E' stato realizzato in FLAC^{3D} un modello di versante di RSA avente la medesima percentuale volumetrica presente nel campione T_1 e con le seguenti caratteristiche:

- larghezza pari a 240 cm;
- altezza pari a 110 cm;
- v = 1e^{-5} m/step (velocità orizzontale applicata a sinistra del modello per simulare l'applicazione del carico);
- legge costitutiva elastoplastica;
- criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

Per la creazione del modello è stata generata una serie casuale di coordinate (x_i, y_i) relative alle posizioni dei blocchi. Le inclusioni presenti nella matrice sono state modellate come elementi aventi forma quadrilatera, esagonale, ettaedrica e ottaedrica; l'inclinazione di tali poligoni è stata fatta variare, in maniera random, tra 0° e 360° (Figura 53).

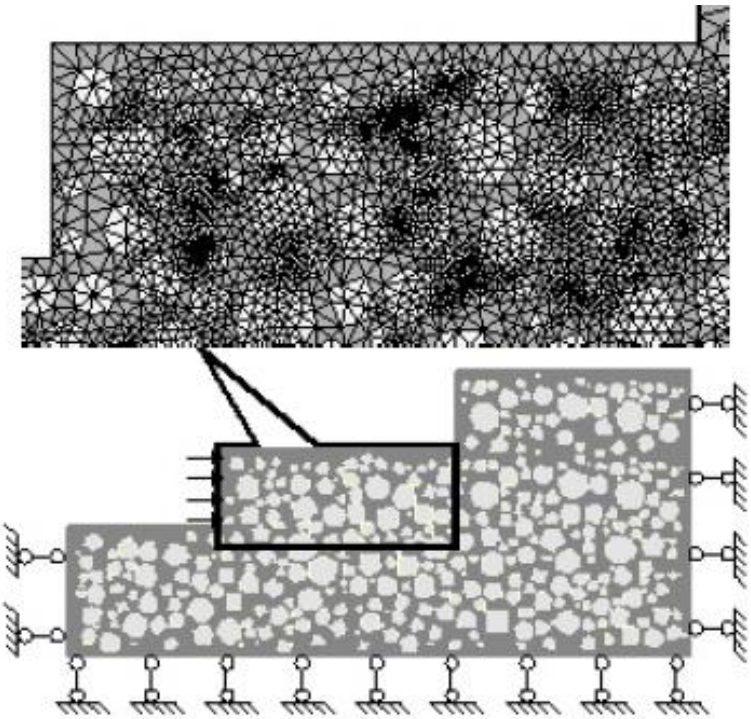


Figura 53 – Modello stocastico 2D relativo al campione T_1 di RSA (Li et al. 2004).

In Figura 54 sono mostrati i risulti ottenuti dalle prove *in situ* e dalla simulazione numerica relativa al campione T_1.

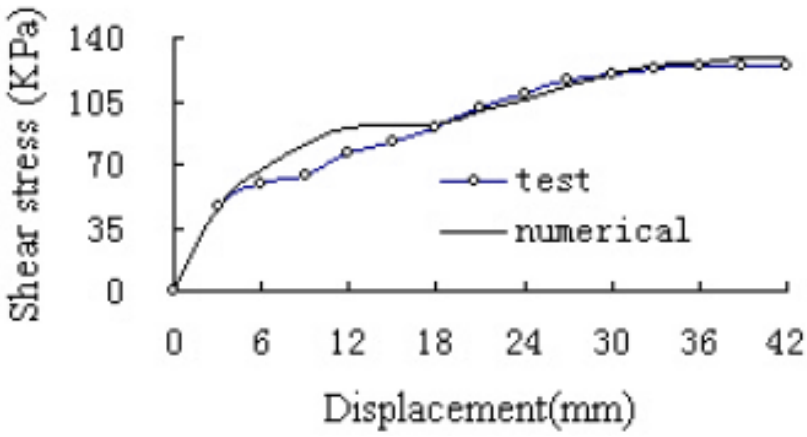


Figura 54 – Confronto dei risultati (metodo numerico e prove in situ) relativi al campione T_1 di RSA (Li et al. 2004).

Gli studi condotti sull'aggregato (RSA) presente nel bacino di Three Gorges (Li et al. 2004), hanno confermato la stretta correlazione tra il comportamento meccanico del materiale e la percentuale volumetrica dei blocchi presenti nella matrice.

A causa della struttura eterogenea del materiale, la variazione della resistenza a taglio e del modulo di Young non è proporzionale alla variazione della percentuale volumetrica. Ciò è stato confermato sia dai test *in situ* sia dalle simulazioni numeriche.

Inoltre, dal confronto dei risultati ottenuti mediante i due differenti approcci di indagine, si evince che la procedura numerica basata sul modello stocastico può essere efficace per lo studio del comportamento meccanico, soprattutto per esaminare lo sviluppo e la propagazione della superficie di rottura all'interno del materiale oggetto di indagine (Li et al. 2004).

4.5 Stato dell'arte

Dagli studi condotti relativamente alle formazioni in bimrock presenti in letteratura e trattati precedentemente, è possibile estrapolare le principali osservazioni e considerazioni a riguardo. In particolare, si osserva che:

- con il termine bimrock si indicano quelle formazioni rocciose strutturalmente complesse caratterizzate da una struttura detta a "blocco in matrice" in cui è riscontrabile una significativa differenza tra le resistenze dei materiali coinvolti. I rapporti tra i moduli elastici e gli angoli di attrito (Medley e Goodman 1994, Medley 2001) sono pari a:
-

$$\frac{E_{blocchi}}{E_{matrice}} \geq 2 \qquad (4.5)$$

$$\frac{tan\varphi_{blocchi}}{tan\varphi_{matrice}} \geq 1{,}5 \div 2 \qquad (4.6)$$

- la resistenza di un bimrock è influenzata dalla percentuale volumetrica dei blocchi, dalla loro forma, disposizione, orientazione e dai parametri di resistenza della matrice (Medley e Goodman 1994, Medley e Rehermann 2004);

- la dimensione minima e massima dei blocchi sono rispettivamente pari al 5% e al 75% della lunghezza caratteristica L_c, quest'ultima valutata in funzione dell'opera che si vuole realizzare (diametro di una galleria, area del sito oggetto di studio, dimensione di campione di laboratorio, etc.), (Kalender et al. 2014). All'interno di questo range di valori, le dimensioni dei blocchi seguono una legge di potenza in cui la dimensione frattale, ovvero l'esponente negativo, è mediamente pari a -2,3 (Turcotte 1997);

- se la percentuale volumetrica dei blocchi è minore del 25% si attribuiscono all'intero ammasso (matrice e blocchi) le proprietà di deformabilità e di resistenza della sola matrice (Medley 1994, Medley e Lindquist 1995);

- mediante i risultati ottenuti dalle prove di compressione triassiale si può affermare che le superfici di rottura si generano attorno ai blocchi e attraverso la matrice, assumendo così un andamento tortuoso. La tortuosità della superficie di scivolamento è più o meno accentuata in relazione all'orientazione, alla forma, alla disposizione delle inclusioni presenti nella matrice e alla VBP (Medley 2004);

- per percentuali volumetriche comprese tra il 20% e il 70% si osserva nel bimrocks un incremento significativo dei parametri di resistenza. All'interno di questo range si verifica un aumento dell'angolo di attrito φ e una diminuzione della coesione c (Lindquist 1994, Medley e Lindquist 1995);

- se la percentuale volumetrica supera il 75% allora i blocchi sono tra di loro in contatto. Tale condizione non comporta alcun vantaggio sul complessivo comportamento meccanico del bimrock (Lindquist 1994, Medley e Lindquist 1995) (Lindquist 1994, Medley and Lindquist 1995) (Lindquist 1994, Medley and Lindquist 1995) (Lindquist 1994, Medley and Lindquist 1995) (Lindquist 1994, Medley and Lindquist 1995).

Capitolo 5

Studio della stabilità di un versante in bimrock

Nel presente Capitolo verranno descritte le analisi di stabilità di un versante in bimrock eseguite mediante il software agli elementi finiti *Phase*^{2}.

Precedentemente è stato affrontato il problema di definire univocamente ed adeguatamente le formazioni rocciose complesse, di cui i bimrocks fanno parte, al fine di effettuare un'opportuna interpretazione delle proprietà meccaniche di tali ammassi.

Le caratteristiche meccaniche complessive delle formazioni rocciose complesse sono fortemente influenzate dalla forma, dall'orientazione e dalla percentuale volumetrica dei blocchi; quest'ultimo aspetto, in particolar modo, determina una variazione del Fattore di Sicurezza e influenza la tortuosità della potenziale superficie di rottura (Medley e Rehermann 2004).

5.1 Introduzione all'analisi di stabilità di versante

Nell'ambito dello studio di stabilità di un versante in bimrock sono state spesso adoperate delle metodologie alquanto approssimative per l'attribuzione delle proprietà meccaniche ai materiali presenti in tali ammassi eterogenei.

Un consueto approccio era quello di attribuire all'intero ammasso eterogeneo i parametri meccanici della matrice, che presenta minore resistenza.

Sebbene l'intento degli addetti ai lavori fosse quello di mettersi in sicurezza, in realtà questa non rappresenta, nella maggior parte dei casi, la scelta più sicura né quella più vantaggiosa: si commetterebbe l'errore di sottostimare di molto la resistenza complessiva dell'ammasso eterogeneo.

Secondo gli studi condotti da Medley e Sanz (2004) la presenza dei blocchi aumenta la stabilità di versante e, in particolare, nel caso di percentuale volumetrica compresa tra:

- 25% e 30% la presenza dei blocchi non comporta nessun vantaggio in termini di resistenza compressiva del bimrock;
- 30% e 55% il comportamento meccanico del versante migliora considerevolmente.

Queste considerazioni sono simili a quelle ottenute da Lindquist e Goodman (1994). Gli autori infatti hanno affermato che, con percentuale volumetrica compresa tra il 25% e il 70%, si ha un incremento delle prestazioni meccaniche complessive del bimrock, un aumento dell'angolo di attrito (di circa 15°÷20° rispetto a quello della matrice) e una diminuzione del valore di coesione.

Inoltre, come precedentemente discusso, escludere la presenza dei blocchi è un'operazione controproducente in termini di tempi e di eventuali costi di rimozione degli stessi blocchi durante la fase di esecuzione dei lavori.

Un'ulteriore strategia è stata quella di attribuire la resistenza dell'ammasso eterogeno in relazione alla stima della percentuale volumetrica dei blocchi, ottenuta mediante fori di sondaggio e attraverso mappatura o fotografie del sito. Anche in quest'ultimo caso sono presenti criticità.

Difatti, non è possibile definire con certezza la percentuale volumetrica dei blocchi presenti: se si ottenesse un valore di VBP più grande di quello effettivo allora si rischierebbe di attribuire delle caratteristiche meccaniche troppo ottimistiche; viceversa, si sottostimerebbe il problema.

A fronte di tali criticità è apparso opportuno procedere mediante simulazioni numeriche per approfondire lo studio del comportamento meccanico delle formazioni in bimrock, così come suggerito in letteratura (Li et al. 2004, Barbero 2006).

In questo Capitolo si intende quindi eseguire uno studio di stabilità di versante in bimrock mediante un software agli elementi finiti, costruendo dei modelli rappresentativi della realtà, adottando un approccio probabilistico per l'estrazione casuale dei blocchi e valutando, al variare della VBP, il Fattore di Sicurezza e i Volumi mobilitati.

Prima di descrivere i modelli e la geometria di analisi saranno messi in rassegna i programmi adoperati. In particolare sono stati utilizzati:

- *Matlab* per l'applicazione del Metodo Monte Carlo, al fine di effettuare l'estrazione casuale dei blocchi presenti nel versante;
- *Autocad* per la rappresentazione del modello geometrico e la trasformazione del file.txt in un file.dxf;
- *Phase*^{2} per l'esecuzione delle analisi di stabilità del pendio in bimrock.

5.2 Creazione del codice in Matlab

È stato creato un codice di calcolo in Matlab al fine di generare in modo casuale i blocchi all'interno del versante in bimrock, per assegnata percentuale volumetrica. L'estrazione casuale dei blocchi, definiti in termini dimensionali e di disposizione nel pendio, è stata effettuata grazie all'utilizzo del Metodo probabilistico Monte Carlo.

Nella fase di creazione del codice è stata posta particolare attenzione nell'escludere possibili intersezioni tra punti appartenenti a blocchi adiacenti e tra blocchi e contorno del modello; è stata inoltre eseguita una verifica sulla percentuale volumetrica desiderata e un ulteriore controllo sulla dimensione frattale dei blocchi.

Il codice ha quindi permesso di ottenere un file.txt, contenete le principali caratteristiche geometriche delle inclusioni nella matrice, necessario per la creazione del modello in *Phase*^{2}.

5.2.1 Metodo Monte Carlo

I Metodi Monte Carlo (MC) rappresentano una vasta classe di metodi computazionali basati sul campionamento casuale per ottenere risultati numerici. Questi ultimi sono particolarmente efficaci per affrontare problemi computazionali legati ai cosiddetti test esatti, cioè quei i metodi basati sul calcolo combinatorio e sulla distribuzione binomiale, nei quali per un numero considerevole di campioni si genererebbe un numero eccessivo di simulazioni.

Infatti, qualora le variabili siano elevate ma si desidera comunque conoscere la probabilità di un certo evento allora non è possibile svolgere analiticamente i calcoli e si fa ricorso a metodi di campionamento statistico: si esegue una simulazione della situazione per la quale si vuole calcolare la probabilità di un determinato evento. Ciò significa che la simulazione stocastica si esegue riproducendo l'avvenimento preso in esame, sostituendo alla valutazione analitica l'osservazione empirica del fenomeno e traendo da questa le informazioni utili non rilevabili per via analitica (Dapor 2006).

La simulazione MC calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza. Una volta calcolato il campione casuale, la simulazione esegue delle valutazioni sui parametri di interesse.

Il metodo è usato per trarre stime attraverso simulazioni e procede attraverso i seguenti passaggi:

- definizione del dominio di possibili dati di input;
- generazione di input casuali dal dominio con una certa distribuzione di probabilità;
- esecuzione di un calcolo deterministico utilizzando i dati in ingresso;
- aggregazione dei risultati dei singoli calcoli in quello finale.

In particolare, il metodo si basa su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro non correlati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare; nell'ambito di questo lavoro di tesi, si fa riferimento ad una distribuzione di tipo esponenziale dal momento che la distribuzione dei blocchi segue una legge di potenza (Medley 2002).

Il metodo quindi fa parte delle metodologie di indagine di tipo statistico, non parametrico e fa uso di numeri casuali anche se in realtà nessun software è in grado di generare una sequenza di

numeri autenticamente casuali; si dovrebbe parlare in realtà di numeri pseudo-casuali al fine di identificare una successione definita casuale.

Per la generazione di tali sequenze si fa riferimento così ad un algoritmo che inizia il suo processo con un numero intero positivo qualunque e si calcola poi i successivi numeri casuali mediante un'equazione che fa dipendere ogni nuovo numero da quello corrente. Così ogni nuovo elemento delle sequenza casuale è valutabile conoscendone il precedente (Dapor 2006).

Ad esempio, si supponga che r_n sia l'n-esimo numero casuale generato, allora il numero pseudo-casuale successivo, indicato con r_{n+1}, si ottiene da:

$$r_{n+1} = (a\, r_n + b) mod\ m \qquad (5.1)$$

Dove *a*, *b* e *m* sono numeri interi e scegliendo opportunatamente tali valori si possono ottenere sequenze corrispondenti al massimo periodo che è pari a *m* (Dapor 2006).

5.2.2 Applicazione del Metodo e creazione del codice

L'applicazione del Metodo Monte Carlo presuppone la conoscenza della geometria del versante e, per tale motivo, il primo passo è stato quello di definire su Matlab le caratteristiche del pendio oggetto di studio (Figura 55).

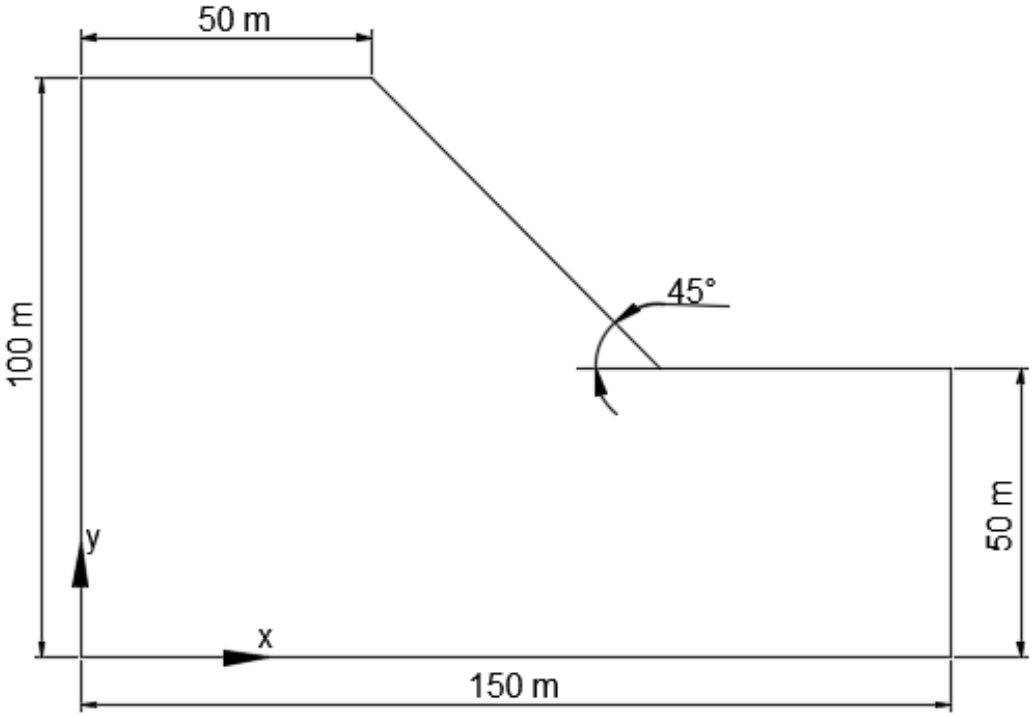


Figura 55 – Geometria del versante in bimrock.

Per quanto riguarda il bimrock, sono stati considerati dei blocchi ellittici, con eccentricità pari a 0,5 e un'inclinazione di 30° rispetto all'orizzontale (Figura 56).

Tale scelta è dovuta alle osservazioni effettuate sul *Fransiscan Complex*, attraverso le quali è stato possibile constatare che è spesso frequente questa forma geometrica dei blocchi (Medley e Rehermann 2004). Sono state considerate quattro differenti percentuali volumetriche (VBP) pari al:

- 25%;
- 40%;
- 55%;
- 70%.

Inoltre, dal momento che le analisi sono bidimensionali, le VBP coincidono con le "Areal Block Proportion" (ABP). Mediante il codice di calcolo creato in Matlab, sono state effettuate 15 estrazioni per ciascuna delle quattro percentuali volumetriche analizzate.

Nel codice di Matlab è stato inserito un valore accettabile di tolleranza per la percentuale volumetrica, pari a 1/40. Mentre la minima distanza tra due blocchi e tra un blocco e il versante deve rispettare una tolleranza di 0,10 m.

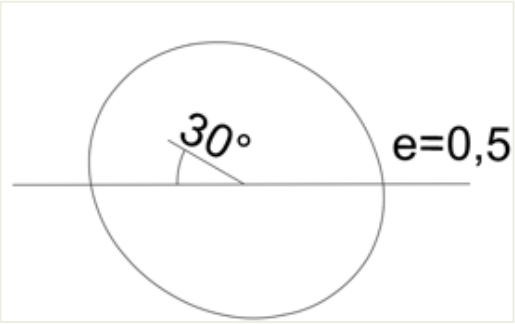


Figura 56 –Inclinazione, forma ed eccentricità del generico blocco presente nel versante in bimrock.

La dimensione dei blocchi è stata considerata compresa tra il 5% e il 75% della dimensione caratteristica (L_c), corrispondente all'altezza del versante in bimrock e quindi pari a 50 metri.

La legge di distribuzione dei blocchi segue una legge di potenza con la seguente funzione di densità di probabilità:

$$F_d = -\frac{(1+q)}{(a^{1+q} - b^{1-q})}\, d^q \qquad (5.2)$$

Dove:

- *q* è l'esponente della distribuzione di dimensione dei blocchi ed è pari a 2 (Medley e Lindquist 1995;
- *a* è l'asse maggiore delle inclusioni;
- *b* è l'asse minore delle inclusioni;
- *d* sono i valori degli assi tra *a* e *b*.

La definizione della distribuzione dimensionale delle ellissi è stata effettuata mediante due cicli while. In Allegato I è presente il codice di Matlab creato per tali estrazioni.

A questo punto è stata condotta una verifica rispetto alla dimensione frattale. Nel caso bidimensionale i valori tipici della dimensione frattale sono compresi tra 1,0 e 2,0 (Medley 1994).

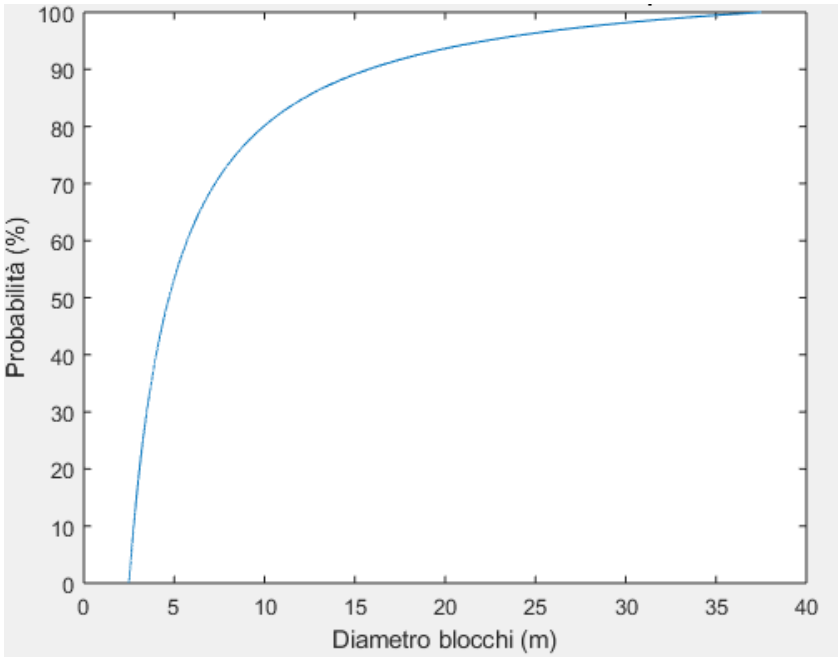
Il file genera dunque delle classi prendendo come punto di riferimento centrale il valore corrispondente a $0{,}04\sqrt{A}$ e dividendo e moltiplicando tale valore per se stesso (in modo da spostarci rispettivamente a sinistra e a destra di $0{,}04\sqrt{A}$).

I valori estremi sono definiti dal valore dell'asse maggiore e minore, rispettivamente pari al 5% e al 75% di L_c (Medley 1994).

La frequenza di ogni classe è definita dividendo il numero di elementi aventi una certa dimensione appartenente a tale classe e il numero totale di diametri facenti parte la classe stessa.

Un successivo controllo riguarda la percentuale volumetrica: la somma delle aree dei blocchi divisa per la superficie totale del pendio deve rispettare il valore di VBP desiderata e rientrare nella tolleranza prevista.

Il file ha permesso inoltre di ottenere la distribuzione del diametro dei blocchi in termini probabilistici e la rappresentazione della disposizione delle ellissi generata dal codice. A titolo di esempio, in Figura 57, sono mostrate le informazioni ricavate per una generica estrazione con percentuale volumetrica pari al 40%.



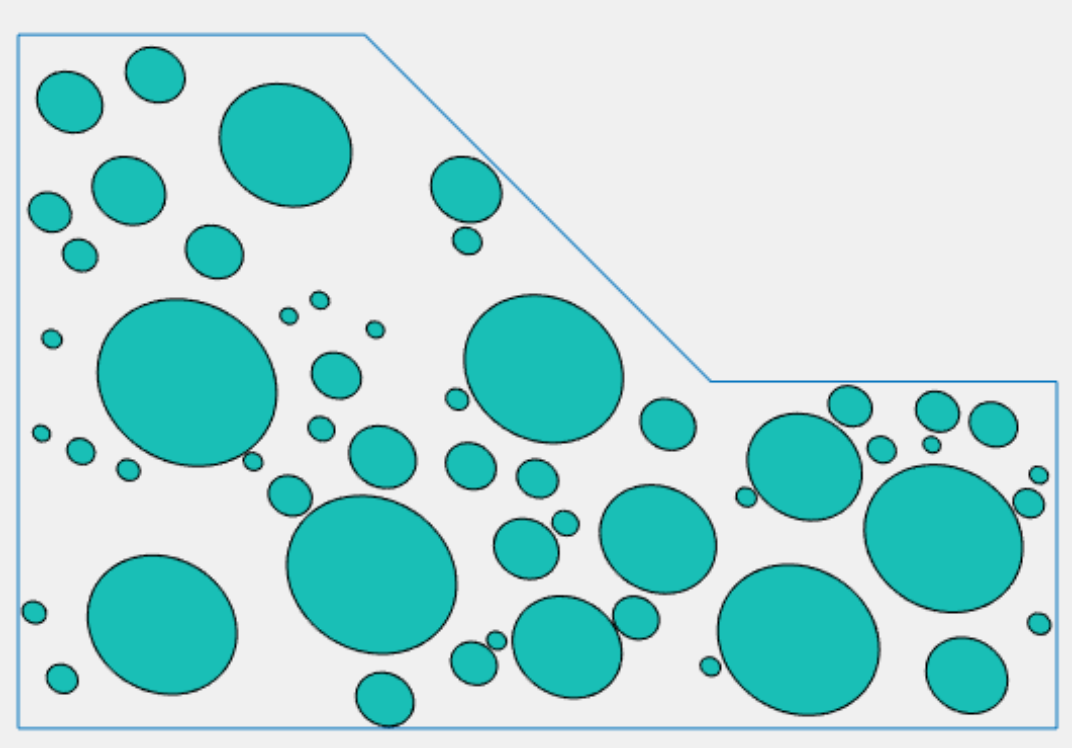


Figura 57 –Distribuzione del diametro dei blocchi in termini probabilistici per una generica estrazione con percentuale volumetrica pari al 40% (in alto) e rappresentazione della disposizione delle ellissi generata dal codice (in basso).

5.3 Rappresentazione del modello geometrico mediante AutoCad

Il codice creato in Matlab ha permesso di ottenere un file.txt contente le posizioni del centro e dei semiassi delle ellissi.

Per poter passare ad una rappresentazione della geometria del versante in AutoCad (passaggio necessario per poi utilizzare *Phase²*) è stato opportuno trasformare tale file in uno di tipo DXF scrivendo nella prima riga del file.txt la tipologia degli elementi rappresentati (ellissi).

Successivamente, mantenendo selezionato "Orto on", è stato utilizzato il comando "Plinetype" necessario per la trasformazione delle ellissi in polilinee.

5.4 Analisi numeriche mediante Phase²

Phase² è un programma agli elementi finiti 2D adoperato per lo studio di diversi problemi legati all'ingegneria civile. Il software permette di:

- creare e realizzare modelli complessi e multi-stage;
- considerare comportamenti elastici ed elastoplastici del materiale nella medesima simulazione;
- effettuare un'analisi di stabilità e valutare il Fattore di Sicurezza senza imporre a priori alcuna superficie di rottura critica.

In *Phase²* è inoltre possibile effettuare un'analisi di stabilità del versante mediante la tecnica SSR (*Shear Strength Reduction*). Questa operazione permette di trovare il Fattore di Sicurezza riducendo o aumentando progressivamente i parametri di resistenza dei materiali fino ad arrivare alla condizione di equilibrio limite, superata la quale si verifica il collasso.

Al modello, rappresentato con la propria configurazione geometrica, sono applicati i parametri di resistenza iniziali, detti "parametri caratteristici".

Successivamente si esegue una ripetizione della medesima verifica di stabilità ma introducendo parametri di resistenza differenti. I valori di coesione e di angolo di attrito inseriti nei calcoli (c_f e φ_f) sono determinati a partire dai valori caratteristici (c_k e φ_k) mediante le seguenti formulazioni:

$$c_f = \frac{c_k}{SRF} \tag{5.3}$$

$$\varphi_f = arcotan\left(\frac{tan\varphi_k}{SRF}\right) \tag{5.4}$$

Questo processo è ripetuto per diversi valori del fattore di riduzione (SRF), fino alla condizione di instabilità del modello (i risultati delle analisi non convergono).

Quando si giunge a tale situazione, il modello si trova in condizione di equilibrio limite e l'analisi fornisce il valore di SRF critico che rappresenta proprio il Fattore di Sicurezza cercato.

5.4.1 Utilizzo del software per le analisi di stabilità del versante in bimrock

Il software agli elementi finiti utilizzato per eseguire le analisi di stabilità è *Phase²* nella versione 8.0. Le fasi per la creazione del modello sono le seguenti:

- importazione della geometria del versante;
- definizione del numero di stages, discretizzazione e creazione della mesh;
- definizione delle condizioni al contorno;
- definizione dello stato tensionale inziale;
- attribuzione delle proprietà meccaniche ai materiali;
- avvio dell'analisi;
- interpretazione dei risultati.

Importazione della geometria del versante

Innanzitutto è stato importato il file.dxf ottenuto mediante AutoCad (Paragrafo 5.3). Nella fase di inserimento della geometria è stato necessario definire la *Geometry Cleanup* che permette una iniziale "pulizia" del modello per poter eseguire correttamente l'analisi.

In particolare, quando i vertici di confine tra due blocchi o tra i blocchi e i contorni sono molto vicini, la simulazione potrebbe subire degli errori e non concludersi; pertanto, assegnato un certo valore di tolleranza, questi punti sono fusi in un unico vertice.

Per escludere problemi deformativi ai bordi del modello, è stata considerata un'area maggiore rispetto a quella individuata dal pendio in bimrock (Figura 58, Figura 59), costituita da un materiale elastico ed omogeneo, avente le stesse caratteristiche della matrice.

Definizione del numero di stages, discretizzazione e creazione della mesh

Per la definizione del *Project Settings* è stato opportuno specificare i vari stages di analisi. Sono stati considerati complessivamente 11 stages con un progressivo scavo del bimrock di 5 metri per ciascuno stage per simulare l'effettivo stato di sollecitazione del versante e definendone il contorno (Figura 58, Figura 59). A questo punto è stato necessario effettuare la discretizzazione del dominio inserendo:

- il tipo di mesh → *graded;*
- la tipologia degli elementi → *triangolare a 6 nodi* (tipica nel caso di analisi con SSR);
- il numero di nodi sul contorno esterno → *60*.

Una volta effettuata la discretizzazione è stata creata la mesh, infittita opportunatamente nella zona interna al versante, laddove si riteneva possibile la formazione della potenziale superficie di scivolamento.

In funzione del quantitativo dei blocchi presenti e della loro disposizione nel pendio, sono stati aggiunti all'occorrenza ulteriori nodi sul fianco destro del versante (a confine con la parte di materiale rimossa mediante scavo).

Definizione delle condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state definite in termini di spostamento (Figura 58, Figura 59), in particolare:

- la parte superiore è stata lasciata libera;
- lungo i tre bordi perimetrali (i due laterali e quello inferiore) sono stati inseriti dei carrelli;
- agli spigoli sono stati adoperati degli appoggi.

Definizione dello stato tensionale inziale

In termini di *Field Stress* è stata applicata una sollecitazione di tipo gravitazionale con un valore di K_0 (coefficiente di spinta a riposo) pari a 1.

Attribuzione delle proprietà meccaniche ai materiali

Ai materiali costituenti il versante in bimrock è stata attribuita una legge costitutiva elastica nello Stage 1. A partire dallo Stage 2 (coincidente con l'inizio dello scavo per la rimozione dei primi 5 metri di materiale) è stata attribuita una legge costitutiva di tipo elastica perfettamente plastica.

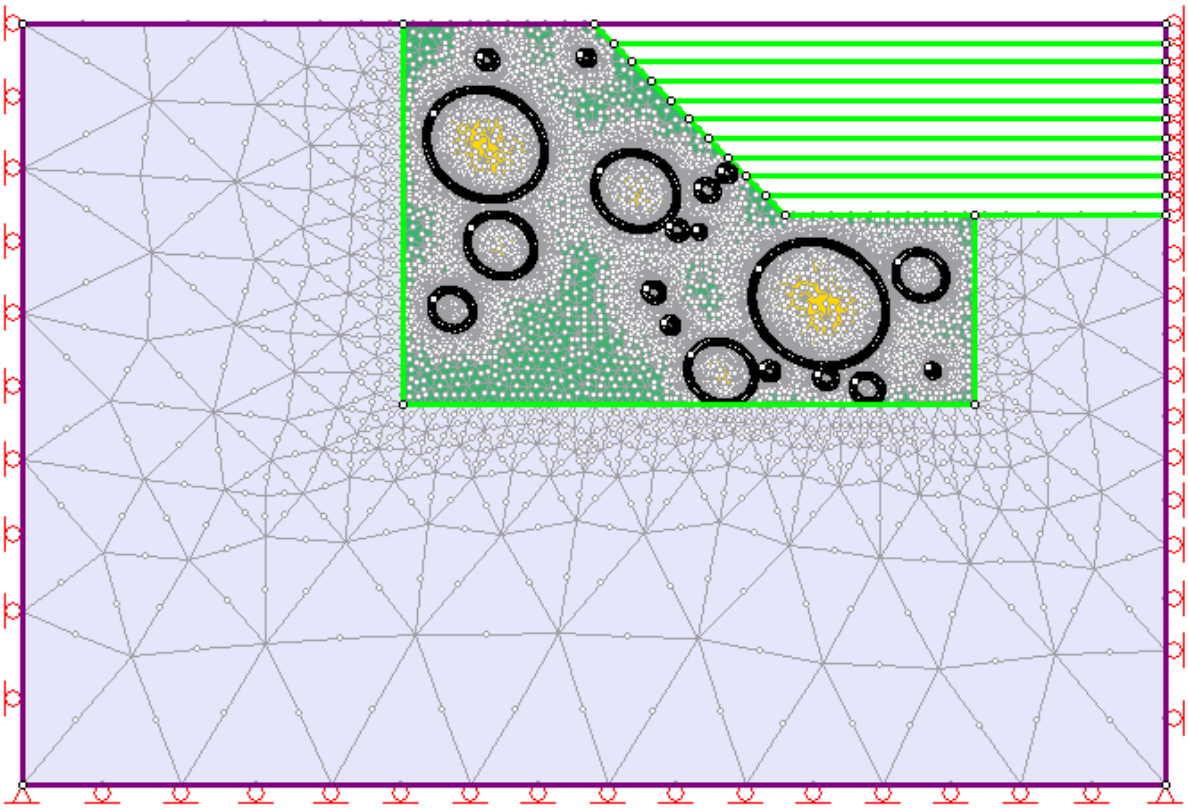


Figura 58 – Esempio di modello adoperato per le analisi con VBP=25% relativo allo Stage 11 (fine fase di scavo).

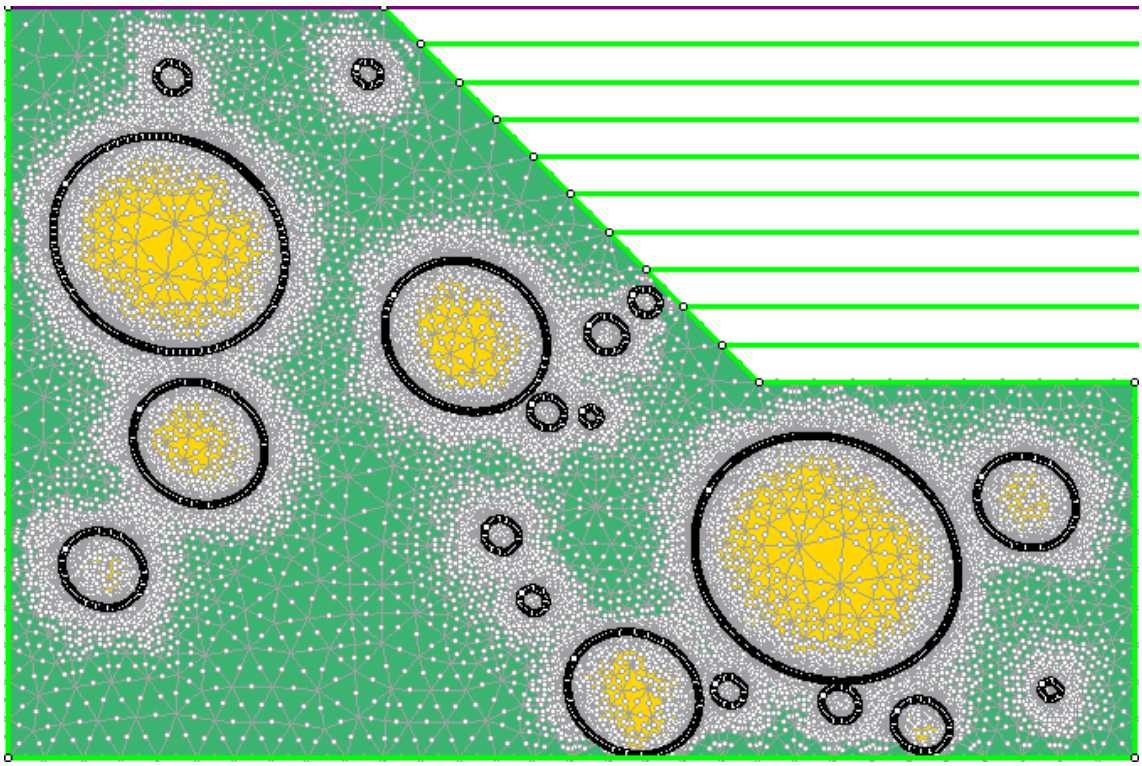


Figura 59 – Particolare del modello adoperato per le analisi con VBP=25% relativo allo Stage 11 (fine fase di scavo).

5.5 Analisi di stabilità

Sono state eseguite le analisi di stabilità relativamente a tre differenti modelli. In essi è stata mantenuta la medesima geometria del versante ma sono state fatte variare le proprietà dei materiali costituenti il bimrock e la percentuale volumetrica dei blocchi presenti all'interno della matrice.

Le differenti caratteristiche meccaniche adoperate derivano da studi e da prove di caratterizzazione meccanica di formazioni rocciose complesse, proposti da vari autori (Capitolo 4); in particolare sono stati creati:

- 1° modello: versante costituito da materiale eterogeneo (matrice e blocchi) con l'utilizzo dei parametri meccanici trovati da Li et al. (1994);
- 2° modello: versante costituito da materiale omogeneo equivalente, con parametri meccanici ottenuti mediante l'approccio proposto da Lindquist (1994);
- 3° modello: versante costituito da materiale omogeneo equivalente, con parametri meccanici ottenuti mediante l'approccio proposto da Kalender (2014).

Di seguito saranno presentati i risultati delle simulazioni in termini di Volumi mobilitati e di Fattore di Sicurezza.

Per la valutazione del Fattore di Sicurezza è stato utilizzato il metodo di riduzione delle caratteristiche meccaniche (SSR – *Shear Strength Reduction*) descritto al Paragrafo 5.4.

5.6 Analisi di stabilità con modello eterogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Li et al. (2004)

Per quanto riguarda le analisi di stabilità condotte con un modello di versante eterogeneo sono state eseguite complessivamente 60 simulazioni.

I parametri meccanici (Tabella 5.1) attribuiti ai materiali costituenti il bimrock (matrice e blocchi) sono quelli trovati da Li et al. (2004), (Capito 5).

In particolare, indicando con VBP la percentuale volumetrica considerata, sono state compiute:

- 1 analisi corrispondente alla presenza di sola matrice VBP=0%;
- 15 analisi con VBP=25%;
- 15 analisi con VBP=40%;
- 15 analisi con VBP=55%;
- 15 analisi con VBP=70%.

Come detto precedentemente, i blocchi presenti all'interno della formazione rocciosa complessa hanno forma ellittica e presentano le seguenti caratteristiche:

- *i* (inclinazione dell'asse maggiore del blocco rispetto all'orizzontale)= 30°*;*
- *e* (eccentricità dell'ellisse)= 0,5.

Matrice

c [kPa]	30
φ [°]	24
E [MPa]	37,5
ν	0,25
$\boldsymbol{\sigma_t}$ **[MPa]**	0,02
ϱ [kg/m^3]	2200
$\boldsymbol{\sigma_{ci}}$ **[kPa]**	92,4

Blocchi

c [kPa]	600
φ [°]	40
E [MPa]	5124
ν	0,22
$\boldsymbol{\sigma_t}$ **[MPa]**	0,5
ϱ [kg/m^3]	2700
$\boldsymbol{\sigma_{ci}}$ **[kPa]**	2573,4

Tabella 5.1–Tabella riassuntiva dei parametri meccanici adoperati per le analisi di stabilità (Li et al. 2004).

5.6.1 Analisi di stabilità del versante in bimrock: assenza dei blocchi (VBP=0%)

Il primo modello considerato è costituito esclusivamente dalla matrice. Sostanzialmente è stata trascurata la presenza dei blocchi per realizzare un modello di riferimento, utile per il confronto con le successive simulazioni. La Tabella 5.14 mostra il risultato dell'analisi in termini di Fattore di Sicurezza.

Modello	Fattore di Sicurezza (F_s)
Matrice (VBP=0%)	0,79

Tabella 5.2– Fattore di Sicurezza, in presenza di sola matrice (VBP=0%), ottenuto dall'analisi eseguita con Phase².

In Tabella 5.3 è mostrato il risultato ottenuto dall'analisi in termini di Volume mobilitato. Dalla Figura 60 si evince, come ci si aspetterebbe, la formazione di un superficie di scivolamento di tipo circolare.

Modello	**Volume mobilitato [m^3]**
Matrice (VBP=0%)	1522

Tabella 5.3– Volume mobilitato, in presenza di sola matrice (VBP=0%), ottenuto dall'analisi eseguita con Phase^2.

Figura 60 –Modello costituito da sola matrice (VBP=0%), in rosso l'andamento della superficie di scivolamento.

5.6.2 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=25%

Sono state eseguite 15 analisi di stabilità del versante in bimrock in cui, per fissata percentuale volumetrica (VBP=25%), i modelli differiscono tra loro per la disposizione e le dimensioni dei blocchi presenti nella matrice.

La Tabella 5.4 mostra i valori del Fattore di Sicurezza ottenuti.

VBP = 25%	
N° Analisi	**Fattore di Sicurezza (F_s)**
1	0,78
2	0,76
3	0,77
4	0,78
5	0,82
6	0,97
7	0,81
8	0,81
9	0,74
10	0,80
11	0,79
12	0,78
13	0,76
14	0,79
15	0,82

Tabella 5.4– Valori del Fattore di Sicurezza per versante con VBP=25%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

Il Fattore di Sicurezza è compreso tra 0,74 e 0,82 e, complessivamente, si osserva un'oscillazione attorno al valore ottenuto nel caso di sola matrice (Tabella 5.2).

Rispetto al modello precedente con VBP=0%, in questo caso la forma della superficie di scivolamento è differente. In presenza della sola matrice la superficie presentava una forma circolare; adesso, invece, assume un andamento parzialmente tortuoso: essa si sviluppa attraverso la matrice e attorno ai blocchi.

Considerando tutte le analisi condotte con VBP=25% (Allegato II), si nota che la tortuosità della superficie di scivolamento risulta più o meno marcata in relazione alla posizione e alla dimensione dei blocchi presenti.

A titolo di esempio, in Figura 61, è mostrata la superficie di scivolamento ottenuta dall'analisi n°13 con percentuale volumetrica pari al 25%.

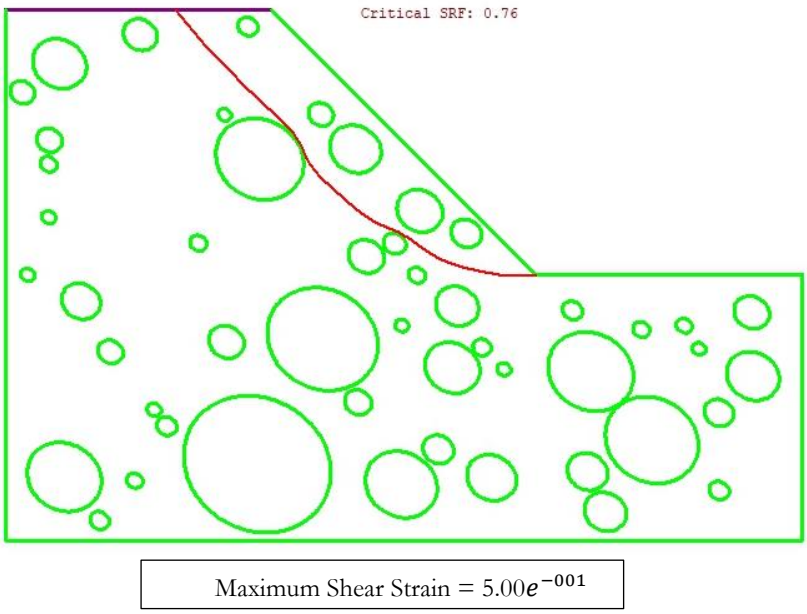


Figura 61 – Analisi n°13 e VBP=25%, in rosso l'andamento della superficie di scivolamento.

Per quanto riguarda la valutazione dei Volumi mobilitati, si è fatto riferimento all'area racchiusa dalla superficie di rottura, considerando una profondità di versante unitaria.

Dai risultati ottenuti (Tabella 5.5) si nota che i Volumi oscillano tra 940 m^3 e 1900 m^3 e, in funzione della dimensione e della posizione dei blocchi, si hanno dei valori maggiori o minori rispetto al caso sola matrice (Tabella 5.3).

VBP = 25%	
N° Analisi	**Volumi mobilitati [m³]**
1	1216
2	1127
3	1015
4	1148
5	1422
6	1900
7	1231
8	1395
9	700
10	1092
11	790
12	970
13	924
14	1270
15	1363

Tabella 5.5– Volumi mobilitati per versante con VBP=25%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

5.6.3 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=40%

Sono state eseguite 15 analisi di stabilità del versante in bimrock in cui, per fissata percentuale volumetrica (VBP=40%), i modelli differiscono tra loro per la disposizione e le dimensioni dei blocchi presenti nella matrice.

La Tabella 5.6 mostra i valori del Fattore di Sicurezza ottenuti.

VBP = 40%	
N° Analisi	**Fattore di Sicurezza (F_s)**
1	0,82
2	0,78
3	0,81
4	0,77
5	0,86
6	0,78
7	0,86
8	0,86
9	0,94
10	0,88
11	0,79
12	0,88
13	0,88
14	0,81
15	0,74

Tabella 5.6– Valori del Fattore di Sicurezza per versante con VBP=40%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

I valori del Fattore di Sicurezza ottenuti con VBP=40% variano tra 0,74 e 0,94. La variabilità dei risultati è considerevole e, facendo un confronto con il caso di sola matrice, alcune simulazioni mostrano dei risultati molto vicini al valore di F_s ricavato con VBP=0%. Come nel modello precedente (VBP=25%) anche in questo caso la superficie di scivolamento si forma all'interno della matrice e non attraversa mai i blocchi.

Considerando l'analisi n°5 (Figura 62), si nota che la tortuosità della superficie di scivolamento è decisamente più marcata rispetto al caso precedente in cui è stata considerata una percentuale volumetrica pari al 25%. Ciò è dovuto all'aumento del numero dei blocchi.

Anche in questo caso, la forma di tale superficie risulta più o meno tortuosa in relazione alla dimensione e alla disposizione dei blocchi presenti nel pendio.

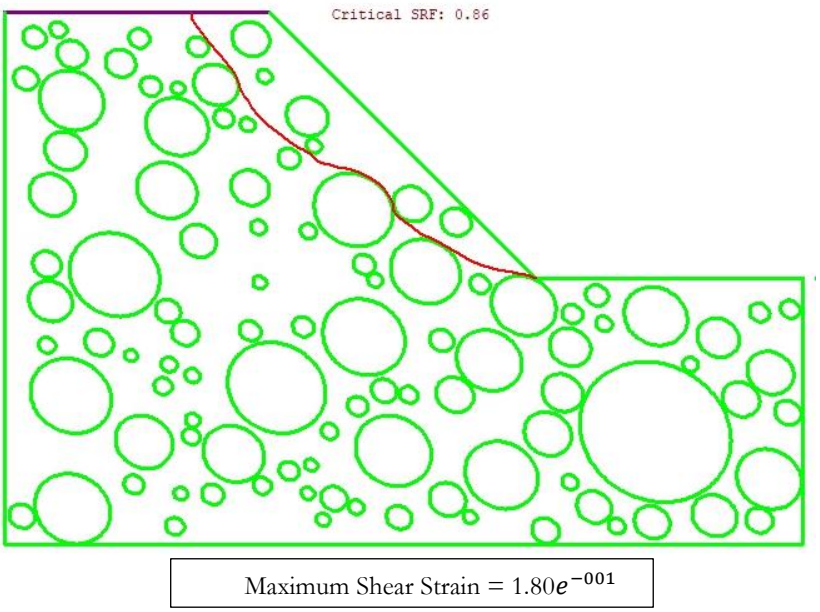


Figura 62 – Analisi n°5 e VBP=40%, in rosso l'andamento della superficie di scivolamento.

Inoltre, per quanto riguarda i Volumi mobilitati, tali valori oscillano tra 490 m^3 e 1708 m^3. Si osserva che il valore più piccolo ed anche quello più grande risultano comunque minori dei rispettivi valori ricavati nel caso precedente con VBP=25%.

VBP = 40%	
N° Analisi	**Volumi mobilitati [m^3]**
1	678
2	833
3	1415
4	490
5	749
6	1017
7	745
8	680
9	1708
10	482
11	718
12	1541
13	840
14	648
15	1014

Tabella 5.7– Volumi mobilitati per versante con VBP=40%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

5.6.4 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=55%

Sono state eseguite 15 analisi di stabilità del versante in bimrock in cui, per fissata percentuale volumetrica (VBP=55%), i modelli differiscono tra loro per la disposizione e le dimensioni dei blocchi presenti nella matrice.

La Tabella 5.8 mostra i valori del Fattore di Sicurezza ottenuti.

VBP = 55%	
N° Analisi	**Fattore di Sicurezza (F_s)**
1	0,97
2	1,02
3	0,93
4	0,89
5	0,96
6	0,85
7	0,95
8	0,96
9	0,90
10	0,99
11	0,94
12	1,07
13	1,02
14	1,03
15	0,90

Tabella 5.8– Valori del Fattore di Sicurezza per versante con VBP=55%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

I valori del Fattore di Sicurezza ottenuti con VBP=55% variano tra 0,90 e 1,07. La tortuosità della superficie di rottura è ancora più marcata rispetto ai due casi precedenti, dal momento che il numero di blocchi presenti è maggiore.

Tuttavia, anche in questo caso, tale superficie si presenta più o meno tortuosa in relazione alle dimensioni e alla disposizione dei blocchi.

In Figura 63, sono mostrati i risultati ottenuti per l'analisi n°15 con VBP=55%.

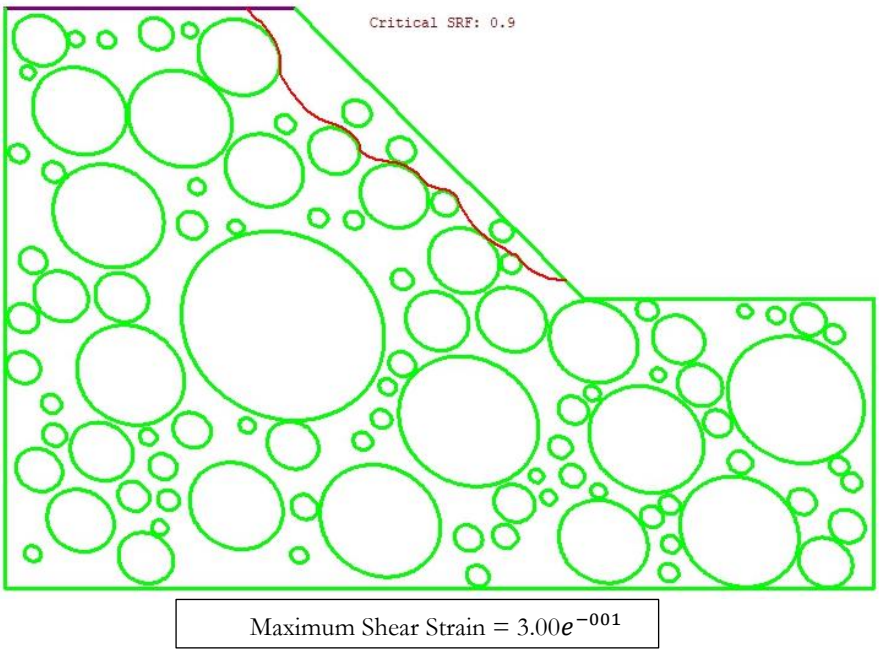


Figura 63 – Analisi n°15 e VBP=55%, in rosso l'andamento della superficie di scivolamento.

La Tabella 5.9 mostra i risultati in termini di Volumi mobilitati. Si osserva che il valore più basso (290 m^3) è più piccolo rispetto al più piccolo dei valori ricavati nel caso precedente con VBP=40%.

VBP = 55%	
N° Analisi	**Volumi mobilitati [m^3]**
1	352
2	950
3	491
4	402
5	315
6	522
7	806
8	352
9	1130
10	379
11	818
12	290
13	588
14	1854
15	310

Tabella 5.9– Volumi mobilitati per versante con VBP=55%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

5.6.5 Analisi di stabilità del versante in bimrock: VBP=70%

Sono state eseguite 15 analisi di stabilità del versante in bimrock in cui, per fissata percentuale volumetrica (VBP=70%), i modelli differiscono tra loro per la disposizione e le dimensioni dei blocchi presenti nella matrice.

In Tabella 5.10 sono mostrati i risultati ottenuti in termini di Fattore di Sicurezza.

VBP = 70%	
N° Analisi	**Fattore di Sicurezza (F_s)**
1	1,09
2	1,37
3	1,06
4	1,18
5	1,18
6	1,22
7	1
8	1,21
9	1,05
10	1,44
11	1,11
12	1,28
13	1,28
14	1,01
15	1,01

Tabella 5.10– Valori del Fattore di Sicurezza per versante con VBP=70%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

I valori del Fattore di Sicurezza ottenuti variano tra 1 e 1,44. A differenza dei modelli precedenti, nelle analisi eseguite con VBP=70% si nota che la tortuosità delle superfici di scivolamento è fortemente marcata nella maggior parte dei casi. Ciò si verifica a causa del gran numero di blocchi presenti nella matrice.

In Figura 64, sono mostrati i risultati ottenuti per l'analisi n°3 con VBP=70%.

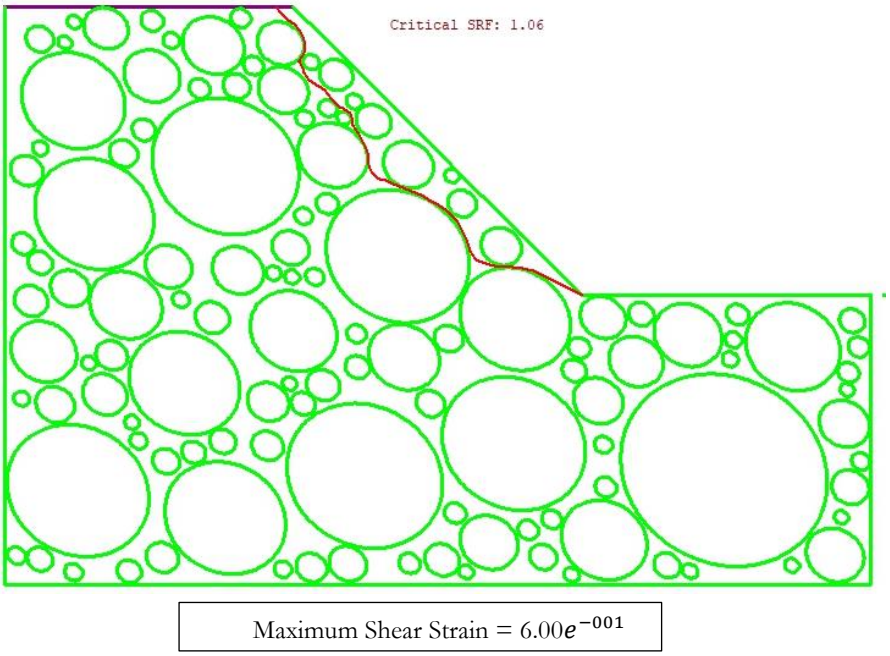


Figura 64 – Analisi n°3 e VBP=70%, in rosso l'andamento della superficie di scivolamento.

VBP = 70%	
N° Analisi	**Volumi mobilitati [m³]**
1	485
2	500
3	327
4	236
5	218
6	1248
7	484
8	409
9	310
10	1124
11	454
12	425
13	422
14	963
15	350

Tabella 5.11– Volumi mobilitati per versante con VBP=70%, ottenuti dall'analisi eseguita con Phase².

Dalla Tabella 5.11 si evince che i Volumi mobilitati variano tra 218 m^3e 1248 m^3. Inoltre, si osserva che il valore minore, ricavato per VBP=70%, è più piccolo rispetto a tutti i valori ricavati nei casi precedenti.

5.6.6 Analisi di stabilità del versante in bimrock: confronto dei risultati

Alla luce dei risultati presentati nei Paragrafi precedenti, è stata effettuata un'interpretazione statistica dei valori ottenuti in termini di Fattore di Sicurezza e di Volumi mobilitati.

Il confronto è stato eseguito valutando la variabilità dei risultati al variare delle percentuali volumetriche considerate.

La Tabella 5.12 mostra i valori medi del F_s e le relative deviazioni standard, per ogni VBP considerata.

VBP [%]	Fattore di Sicurezza (F_s)	
	F_s medio	Deviazione standard
0	0,79	-
25	0,80	0,053
40	0,83	0,054
55	0,96	0,060
70	1,17	0,136

Tabella 5.12– Valori del Fattore di Sicurezza medio e delle deviazioni standard per ogni VBP considerata.

Dalla Tabella 5.12 si nota, all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi, un netto incremento del valore del Fattore di Sicurezza medio e delle relative deviazioni standard (Figura 65, Figura 66, Figura 67).

L'incremento del Fattore di Sicurezza è dovuto principalmente alla forma della superficie di scivolamento: essa assume una tortuosità sempre più marcata all'aumentare del numero di blocchi presenti nel versante.

Tali risultati sono congruenti con quelli ottenuti, mediante analisi all'equilibrio limite, da Medley e Sanz (2004) e con i risultati, ottenuti da Barbero et al. (2006) e Napoli et al. (2018), ricavati mediante analisi numeriche.

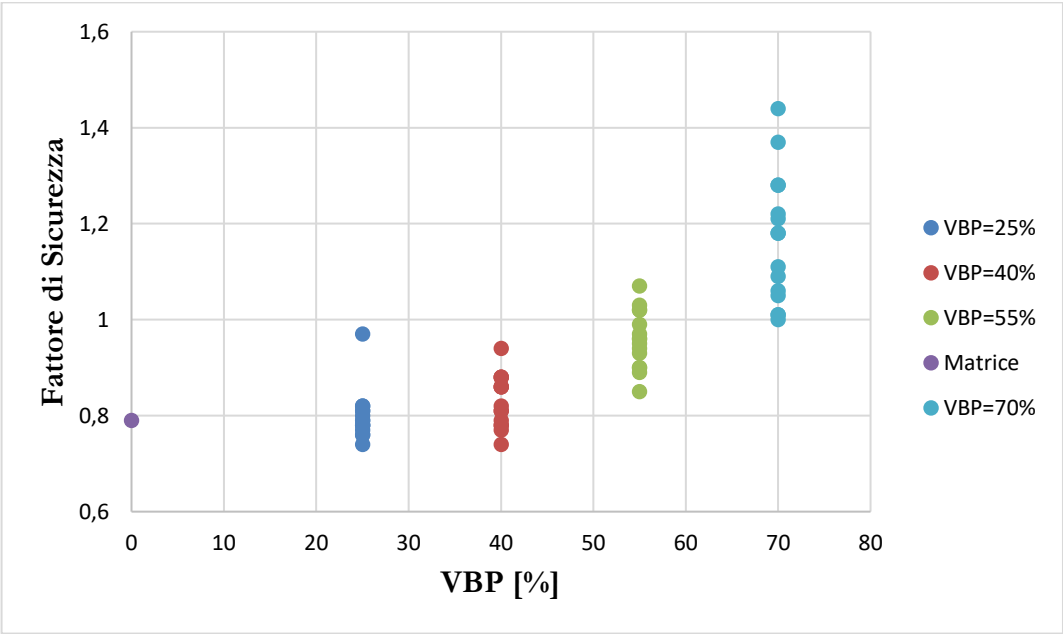


Figura 65 – Valori dei Fattori di Sicurezza al variare della VBP [%].

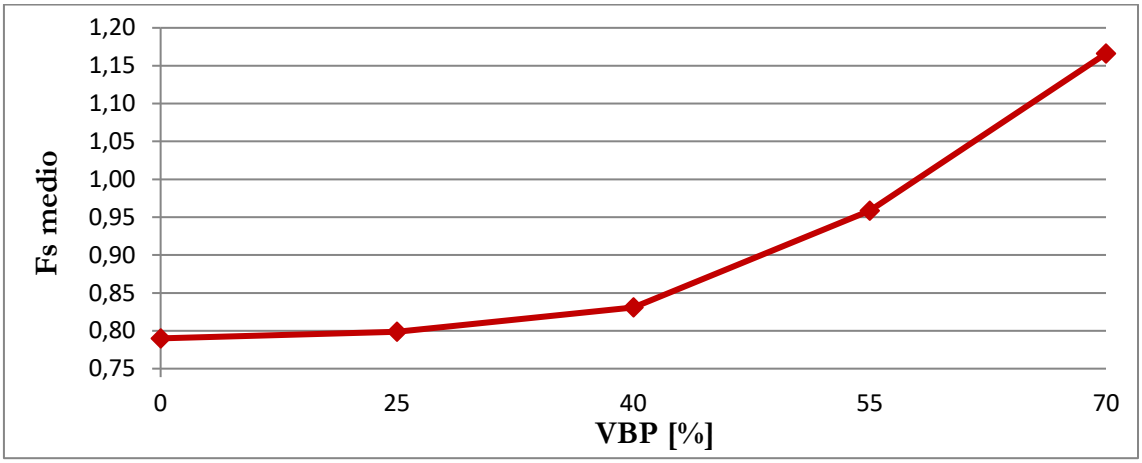


Figura 66 – Andamento del Fattore di Sicurezza medio al variare della VBP [%].

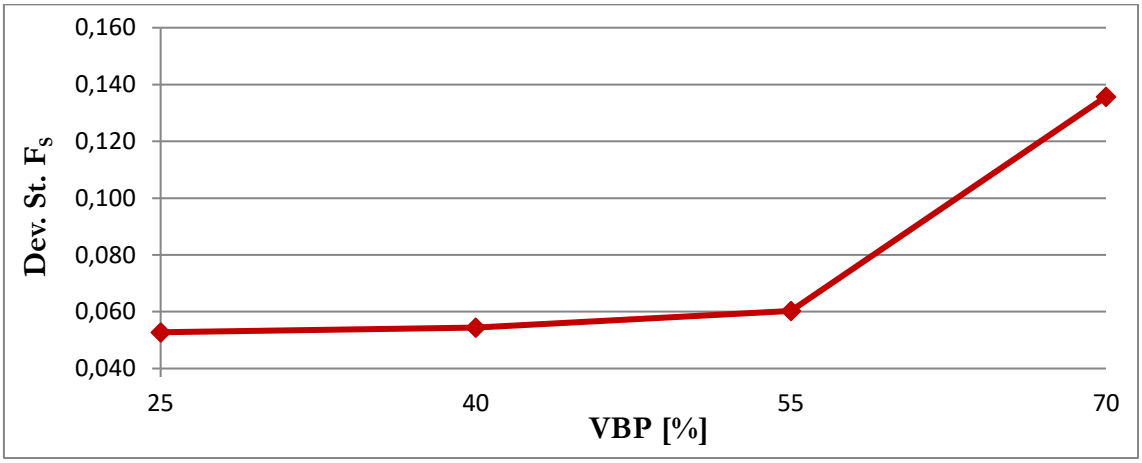


Figura 67 – Andamento della deviazione standard del Fs al variare della VBP [%].

In maniera analoga è stata effettuata un'interpretazione dei risultati in termini di Volumi mobilitati (Tabella 5.13).

VBP [%]	Volume mobilitato	
	Vol. medio [m³]	Deviazione standard
0	1522	-
25	1171	293
40	904	373
55	637	426
70	530	317

Tabella 5.13– Volumi medi mobilitati e relative deviazioni standard, al variare della VBP [%].

Dalla Tabella 5.13 si evince che i Volumi mediamente mobilitati decrescono mentre le relative deviazioni standard crescono, all'aumentare della percentuale volumetrica (Figura 69). Ciò non accede per il caso di VBP=70% in cui si registra una diminuzione del Volume coinvolto e della relativa deviazione standard.

Tali valori sono coerenti con quelli ottenuti in termini di Fattore di Sicurezza. Difatti, per valori crescenti della percentuale volumetrica, il valor medio di F_s aumenta e conseguentemente i volumi mobilitati saranno minori.

La variabilità della deviazione standard è attribuibile alla differente posizione dei blocchi (Figura 68, Figura 70).

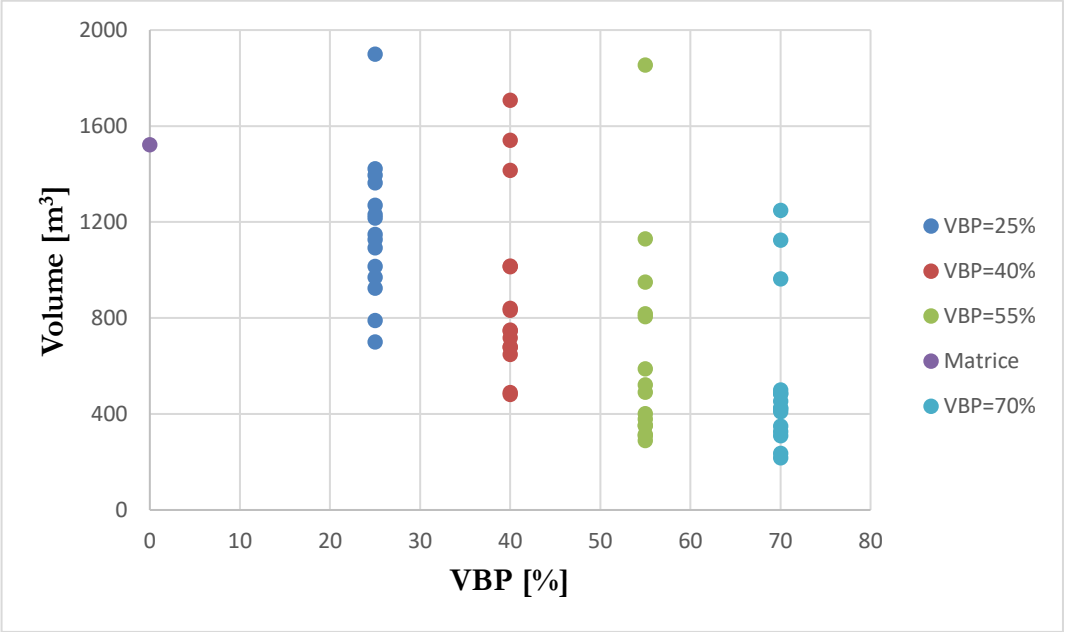


Figura 68 –Volumi mobilitati al variare della VBP [%].

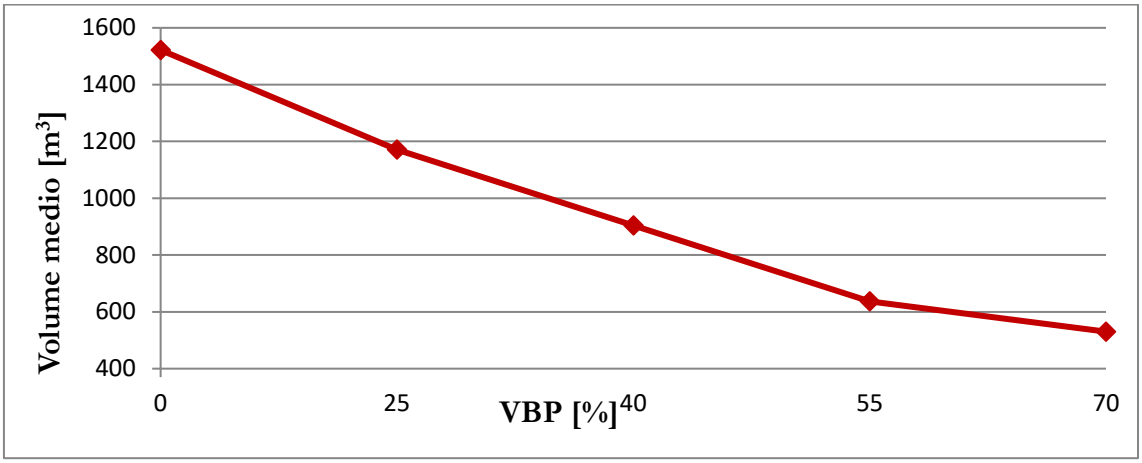


Figura 69 – Andamento dei Volumi mobilitati, al variare della VBP [%], ottenuti dalle analisi eseguite con Phase².

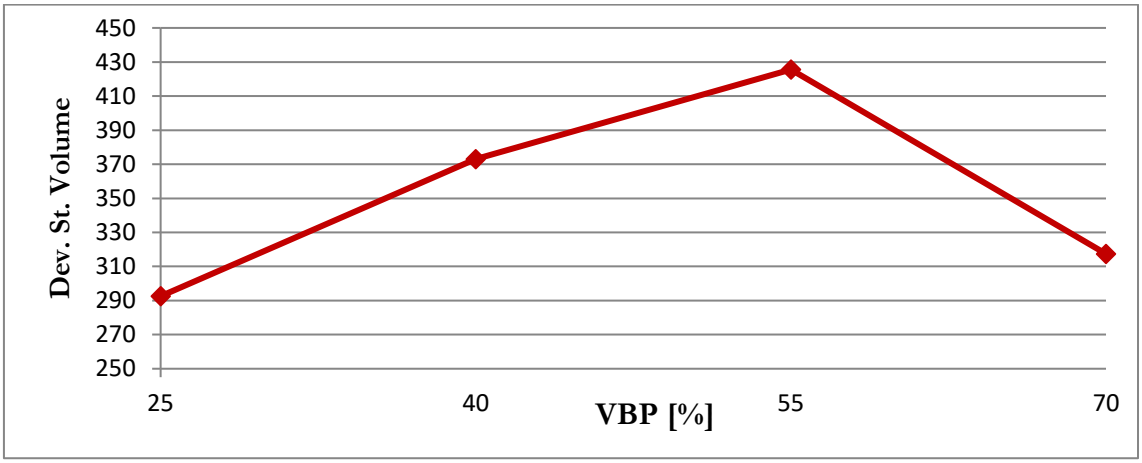


Figura 70 – Andamento dei valori di deviazione standard dei Volumi mobilitati al variare della VBP [%].

5.7 Applicazione del modello di versante omogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Lindquist (1994)

Alla luce degli studi condotti da Lindquist (si veda Paragrafo 4.2) è stato realizzato un modello di versante in cui i materiali (blocchi e matrice) costituenti il versante sono stati resi omogenei. Sostanzialmente è stato creato un modello omogeneo ed equivalente del bimrock in cui i parametri meccanici sono stati ricavati mediante la seguente Equazione:

$$\tau_p = c_{matrice} \cdot (1 - VBP) + \sigma \cdot \tan(\varphi_{matrice} + \Delta\varphi_{matrice}\,(VBP)) \qquad (5.5)$$

- τ_p: resistenza a taglio equivalente del bimrock;
- $c_{matrice}$: coesione della matrice (assunta linearmente decrescente all'aumentare di VBP);
- $\varphi_{matrice}$: angolo di attrito della matrice;
- $\Delta\varphi_{matrice}(VBP)$: incremento dell'angolo di attrito assunto, per valori di VBP superiori al 25%, pari a 3° per ogni incremento della VBP del 10%.

Quindi sono stati realizzati tre modelli di versante, uno per ogni percentuale volumetrica (40%, 55% e 70%). Per VBP pari al 25% i parametri di resistenza equivalenti del bimrock sono risultati sostanzialmente coincidenti con quelli della matrice e, per tale ragione, non è stato necessario effettuare un'ulteriore analisi. In Tabella 5.14 sono riportati i parametri meccanici adoperati.

VBP [%]	(1-VBP)	$\Delta\varphi_{matrice}$	$c_{bimrock} = c_{matrice}$(1-VBP) [kPa]	$\varphi_{bimrock}$ [°]
40	0,60	4,5	18	28,5
55	0,45	9	13,5	33
70	0,30	13,5	9	37,5

Tabella 5.14– Parametri meccanici ottenuti secondo l'approccio proposto da Lindquist (1994).

5.7.1 Analisi dei risultati

I risultati ottenuti, utilizzando l'approccio suggerito da Lindquist (1994), in termini di Fattore di Sicurezza e di Volumi mobilitati, sono mostrati in Tabella 5.15.1

VBP [%]	Fattore di Sicurezza (F_s)	Volumi mobilitati [m^3]
40	0,81	1178
55	0,85	808
70	0,92	542

Tabella 5.15– Risultati ottenuti dalle analisi di stabilità condotte secondo l'approccio proposto da Lindquist (1994).

Dalla Tabella 5.15 si nota che all'aumentare della percentuale volumetrica il Fattore di Sicurezza cresce e, parallelamente, si registra una diminuzione dei Volumi mobilitati (Figura 71, Figura 72). Pertanto i due andamenti sono in accordo con i risultati ottenuti nel caso di materiale eterogeno; tuttavia, nel caso di materiale omogeneizzato, si riscontra una sottostima dei valori di F_s e una sovrastima dei Volumi mobilitati (Paragrafo 5.6).

Tutti i risultati ricavati mediante le analisi di stabilità condotte mediante l'approccio proposto da Lindquist (1994) sono riportati in Allegato III.

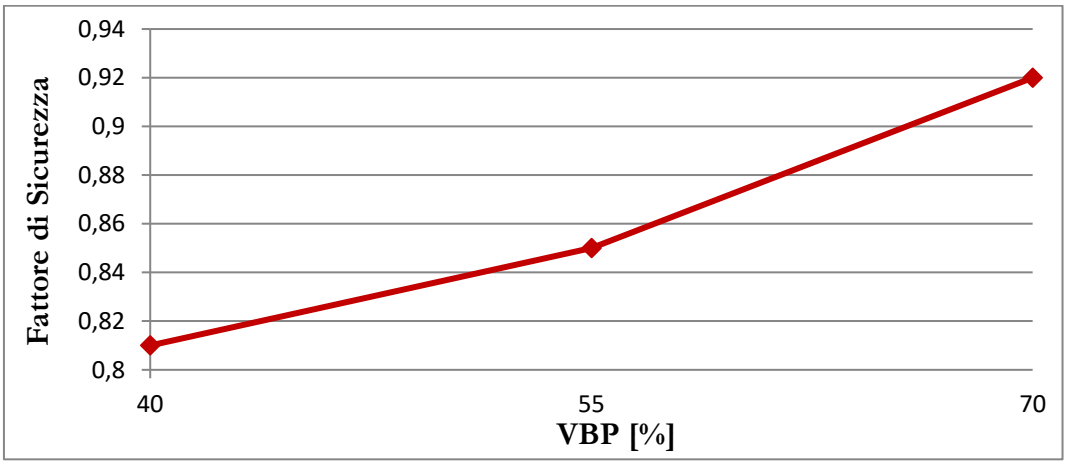


Figura 71 – Andamento del Fattore di Sicurezza al variare della VBP [%].

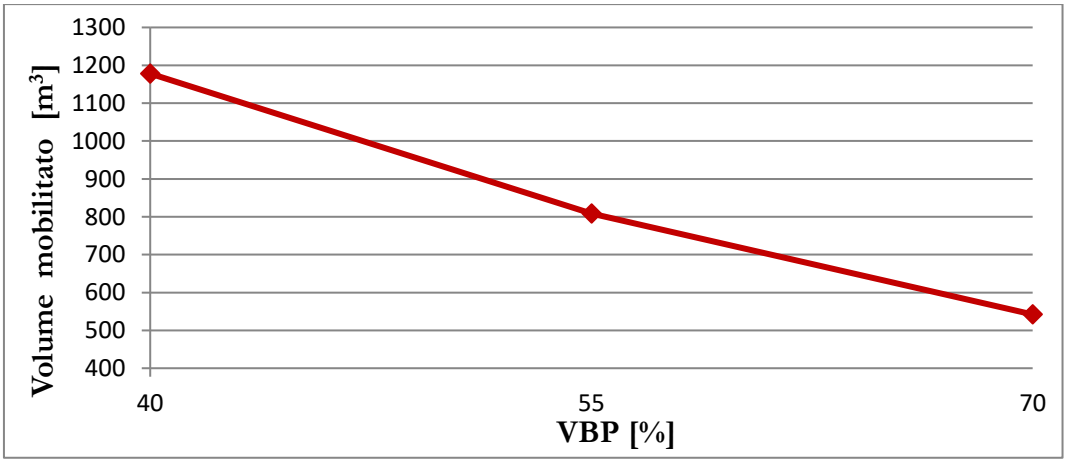


Figura 72 – Andamento dei Volumi mobilitati al variare della VBP [%].

5.8 Applicazione del modello omogeneo secondo i parametri meccanici proposti da Kalender (2014)

In relazione agli studi condotti da Kalender et al. (2014) (si veda Paragrafo 4.3) sono state eseguite altre quattro analisi di stabilità, una per ciascuna VBP analizzata, in cui il versante è stato modellato considerando un materiale omogeneo ed equivalente del bimrock.

Il valore della resistenza a compressione della matrice è stato considerato pari a 92,4 kPa (valore utilizzato nelle simulazioni con materiale eterogeno e proposto da Li et al. 2004).

Tuttavia il valore minimo di σ_{ci} della matrice suggerito da Kalender, necessario per ricavare gli altri parametri di resistenza, è pari a 100 kPa.

Pertanto, utilizzando tale valore, è stato ricavato il parametro A pari a 0,15 (Figura 45); le caratteristiche meccaniche che sono state quindi attribuite al modello sono riportate in Tabella 5.16.

VBP [%]	$\varphi_{bimrock}$ [°]	$\sigma_{ci\ bimrock}$ [MPa]	$c_{bimrock}$ [MPa]
25	25	0,056	0,018
40	28	0,037	0,011
55	29	0,024	0,007
70	30	0,014	0,004

Tabella 5.16– Parametri meccanici ottenuti secondo l'approccio proposto da Kalender et al. (2014).

5.8.1 Analisi dei risultati

I risultati ottenuti, in termini di Fattore di Sicurezza e di Volumi mobilitati, sono mostrati in Tabella 5.17.

VBP [%]	Fattore di Sicurezza (F_s)	Volumi mobilitati [m^3]
25	0,73	1340
40	0,72	1161
55	0,69	995
70	0,66	970

Tabella 5.17– Risultati ottenuti dalle analisi di stabilità condotte secondo l'approccio proposto da Kalender et al. (2014).

A differenza dei risultati ottenuti con i parametri proposti da Lindquist (Paragrafo 5.7) e di quelli ottenuti nel caso di materiale eterogeno (Paragrafo 5.6), in questo caso si nota che i valori del Fattore di Sicurezza diminuiscono all'aumentare della percentuale volumetrica (Figura 73) e, allo stesso tempo, i Volumi mobilitati seguono un andamento decrescente (Figura 74).

I risultati appena ricavati non sono quindi congruenti né con quelli ottenuti dalle analisi precedentemente descritte (Paragrafo 5.6, Paragrafo 5.7) né con quelli presenti in letteratura (Barbero et al. 2006, Medley e Sanz 2004).

Tutti i risultati ricavati mediante le analisi di stabilità condotte secondo l'approccio proposto da Kalender et al. (2014) sono riportati in Allegato IV.

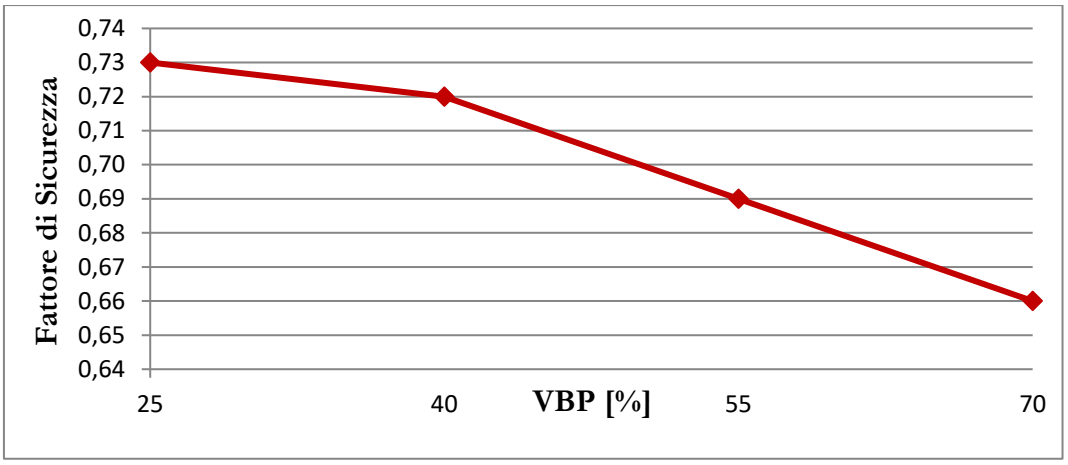


Figura 73 – Andamento del Fattore di Sicurezza al variare della VBP [%].

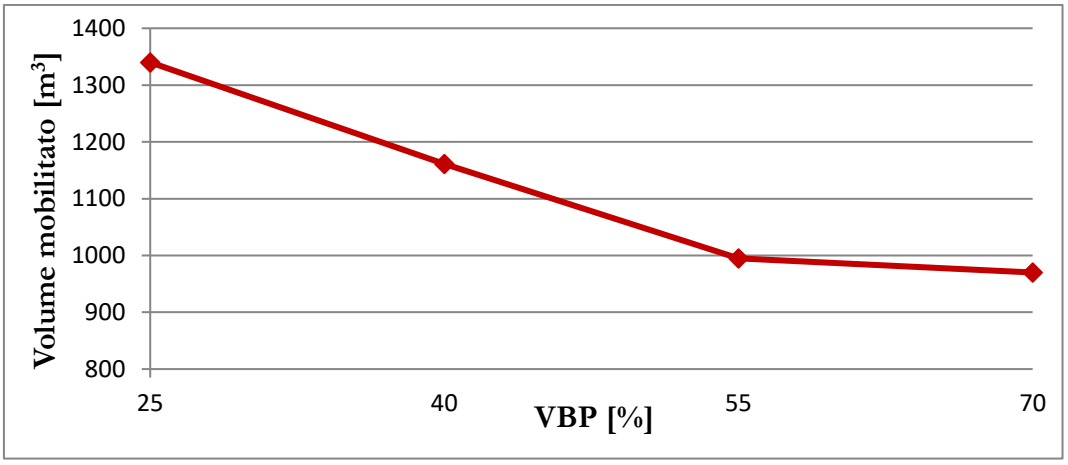


Figura 74 – Andamento dei Volumi mobilitati al variare della VBP [%].

In Figura 75 e in Figura 76, sono mostrati i confronti tra i risultati, in termini di Fattore di Sicurezza e di Volumi mobilitati, ricavati mediante le analisi condotte con materiale eterogeneo (Li et al. 1994) e con gli approcci proposti da Lindquist (1994) e da Kalender et al. (2014).

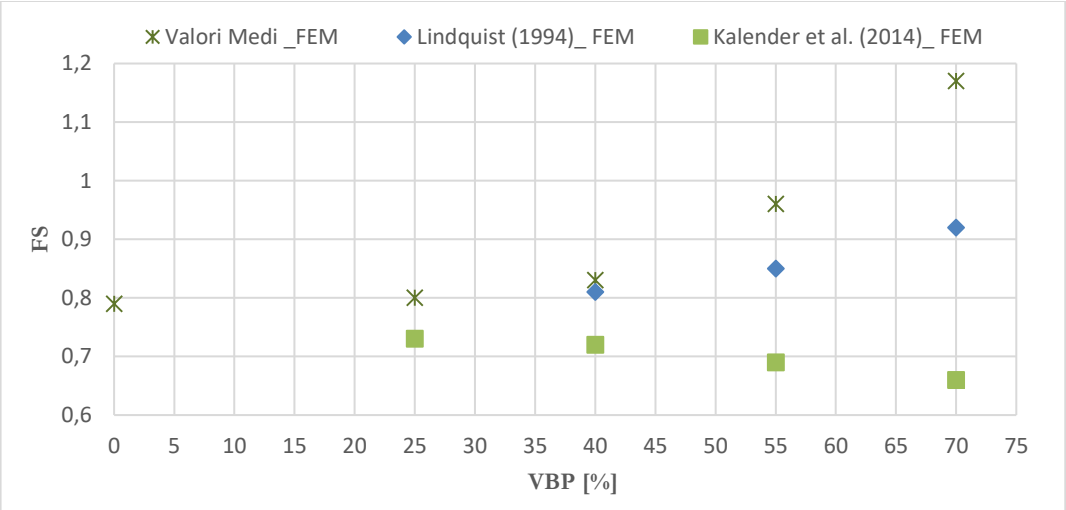


Figura 75 – Confronto tra i valori di Fs ricavati dalle diverse analisi condotte al variare della VBP.

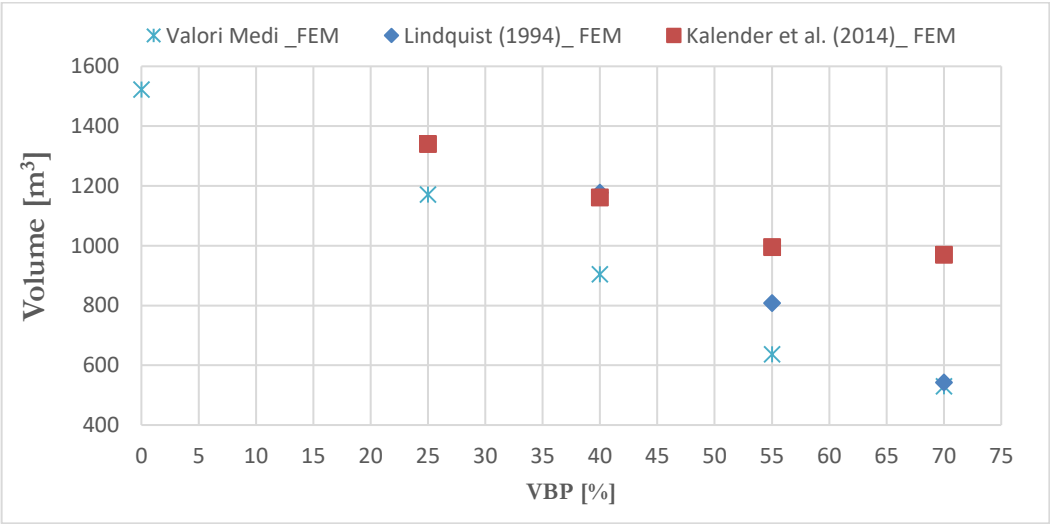


Figura 76 – Confronto tra i Volumi mobilitati ricavati dalle diverse analisi condotte al variare della VBP.

Capitolo 6

Analisi statistica

Nel Capitolo precedente sono state descritte le analisi di stabilità eseguite relativamente ad un versante in bimrock. Inoltre, sono stati presentati i risultati ottenuti dalle differenti simulazioni eseguite al variare della percentuale volumetrica dei blocchi presenti nel pendio.

L'obiettivo adesso è quello di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, in termini di Fattore di Sicurezza, attraverso un approccio di tipo statistico.

6.1 Scopo delle analisi statistiche

Le analisi di stabilità sono state condotte sia nel caso di pendio costituito da un materiale omogeneo ed equivalente del bimrock (Lindquist 1994, Kalender et al. 2014) sia per versante con materiale eterogeneo, composto da blocchi e matrice.

In quest'ultimo caso, per ogni percentuale volumetrica considerata (25%, 40%, 55% e 70%), sono state eseguite 15 simulazioni (Tabella 5.4, Tabella 5.6, Tabella 5.8, Tabella 5.10) in cui i parametri meccanici utilizzati sono quelli proposti da Li et al. (2004).

Al fine di verificare la rappresentatività statistica dei risultati ottenuti con un numero di simulazioni pari a 15, sono stati presi in considerazione i valori del Fattore di Sicurezza ricavati, esclusivamente, mediante le analisi eseguite con VBP pari al 40% (Tabella 6.1).

VBP=40%	
N° Analisi	**Fs**
1	0,82
2	0,78
3	0,81
4	0,77
5	0,86
6	0,78
7	0,86
8	0,86
9	0,94
10	0,88
11	0,79
12	0,88
13	0,88
14	0,81
15	0,74

Tabella 6.1– Valori del Fattore di Sicurezza, ricavati mediante analisi di stabilità eseguite con Phase², per il versante in bimrock costituito da matrice e blocchi con VBP=40%.

Pertanto, in aggiunta alle 15 simulazioni precedentemente effettuate (Paragrafo 5.6, Tabella 6.1) sono state eseguite altre 45 analisi di stabilità condotte con le medesime caratteristiche geometriche del versante, per un totale di 60 analisi con VBP=40%.

I risultati così ottenuti sono stati raggruppati in quattro gruppi da 15 analisi (Tabella 6.2).

Fattore di Sicurezza				
N° Analisi	**Gruppo 1**	**Gruppo 2**	**Gruppo 3**	**Gruppo 4**
1	0,82	0,88	0,78	0,83
2	0,78	0,74	0,85	0,78
3	0,81	0,79	0,82	0,77
4	0,77	0,89	0,88	0,92
5	0,86	0,78	0,82	0,81
6	0,78	0,92	0,82	0,78
7	0,86	0,83	0,82	0,88
8	0,86	0,76	0,83	0,86
9	0,94	0,88	0,87	0,89
10	0,88	0,86	0,84	0,84
11	0,79	0,83	0,85	0,8
12	0,88	0,83	0,89	0,79
13	0,88	0,83	0,8	0,78
14	0,81	0,77	0,79	0,87
15	0,74	0,78	0,84	0,74

Tabella 6.2– Valori del Fattore di Sicurezza per i quattro gruppi da 15 analisi con VBP=40%.

A questo punto, per ogni gruppo costituito da 15 analisi, con medesima percentuale volumetrica pari al 40%, sono statti valutati i valori medi del Fattore di Sicurezza e le relative deviazioni standard (Tabella 6.3).

Gruppo	**VBP=40%**	
	Fs medio	**Deviazione standard**
1	0,83	0,054
2	0,82	0,054
3	0,83	0,032
4	0,82	0,052
tot	0,83	0,048

Tabella 6.3– Valori medi del Fattore di Sicurezza e relative deviazioni standard per i quattro gruppi da 15 analisi con VBP=40%.

Come si può osservare dalla Tabella 6.3, i valori medi di F_s oscillano tra 0,82 e 0,83 e le rispettive deviazioni standard tra 0,032 e 0,054.

Sempre in Tabella 6.3, in ultima riga, sono riportati i valori del Fattore di Sicurezza medio e della relativa deviazione standard valutati complessivamente per le 60 analisi di stabilità di versante con VBP=40%.

La variazione dei dati e la validità dei risultati ricavati è stata quindi sottoposta ad una attenta verifica mediante i seguenti approcci statistici:

- test di Shapiro-Wilk;
- test del T-Student;
- Teorema del Limite Centrale.

Tali applicazioni sono state eseguite per differenti scopi di verifica e saranno accuratamente descritte nei seguenti Paragrafi.

6.2 Introduzione ai test statistici

Tutti i test statistici di significatività assumono inizialmente la cosiddetta "Ipotesi zero H_0" o "Ipotesi nulla", necessaria per effettuare un confronto tra due o più gruppi (campioni).

L'ipotesi zero si può riferire o alla legge di distribuzione oppure ai parametri caratteristici qualora sia nota la forma analitica della distribuzione stessa.

Se l'ipotesi H_0 specifica completamente la legge di distribuzione della variabile casuale, si dice "ipotesi semplice", nel caso opposto l'ipotesi viene detta "composita" oppure "composta".

Inoltre, se l'ipotesi H_0 riguarda i parametri caratteristici di una particolare distribuzione di cui si conosce la forma analitica si parla di "ipotesi parametrica"; si dice invece "non parametrica" (oppure *distribution free*), l'ipotesi statistica che non presuppone nota tale forma (Chiandotto, 2006).

Attraverso un test statistico si può decidere se accettare o meno l'ipotesi H_0 sulla base dei dati del campione studiato.

Se si indica con C l'universo dei campioni, cioè l'insieme di tutti i possibili risultati campionari, un test delle ipotesi consiste nel suddividere l'insieme C in due parti disgiunte (C_0 e C_1).

Pertanto si deciderà di rifiutare l'ipotesi H_0 se il punto campionario cade in C_1, di accettare l'ipotesi se invece il punto campionario cade in C_0.

Lo spazio C_1 di rifiuto di un'ipotesi viene generalmente chiamato "regione critica", invece si parla di "regione di accettazione" riferendoci all'area C_0 (Figura 77).

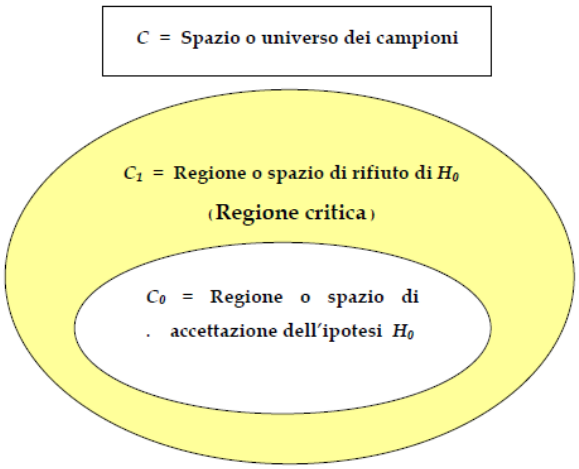


Figura 77 – Bipartizione dell'universo dei campioni (Chiandotto 2006).

Accettando o rifiutando una certa ipotesi nulla, si può agire correttamente e cioè accettare un'ipotesi vera o rifiutare un'ipotesi falsa oppure si possono commettere errori aventi diversa natura (Figura 78), come ad esempio:

- rifiutare un'ipotesi quando essa è vera, si parla di "Errore di I specie" o di "I tipo";
- accettare un'ipotesi quando essa è falsa, si parla in questo caso di "Errore di II Specie" o di "II tipo".

Stato di natura / Azioni	H_0 è vera	H_0 è falsa
Si accetta H_0	**Decisione corretta**	Si commette un **errore di II tipo**
Si rifiuta H_0	Si commette un **errore di I tipo**	**Decisione corretta**

Figura 78 – Tavola di decisione (Chiandotto,2006).

La probabilità di commettere un errore di primo tipo, cioè la probabilità di rifiutare una ipotesi quando essa è vera, è indicata usualmente con α ed è chiamata "livello di significatività del test".

$$\alpha = P(\underline{X} \in C_1/H_0) \qquad (6.1)$$

La probabilità di commettere un errore di II tipo, e cioè la probabilità di accettare un'ipotesi quando essa è falsa, è indicata con β e rappresenta la negazione dell'ipotesi H_0. Essa è chiamata "ipotesi alternativa" e permette di definire il contesto decisionale nel senso che, nella situazione esaminata, o è vera l'ipotesi nulla H_0 oppure è vera l'ipotesi alternativa H_1.

$$\beta(H_1) = P(\underline{X} \in C_0/H_1) \qquad (6.2)$$

Inoltre, in statistica, una volta fissata un'ipotesi nulla H_0 e un valore soglia α che indica come detto precedentemente il livello di significatività del test, si valuta il valore del *p-value* che rappresenta la probabilità di ottenere un risultato uguale o "più estremo" di quello osservato, supposta vera l'ipotesi nulla.

Calcolato il *p*-value relativo ai dati osservati è possibile ritrovarsi in differenti situazioni:

- se $p > a$ allora l'evidenza empirica non è sufficientemente contraria all'ipotesi nulla che quindi non può essere rifiutata;
- se $p \leq a$ allora l'evidenza empirica è fortemente contraria all'ipotesi nulla che quindi va rifiutata.

Tuttavia se $p \sim \alpha$ cioè si è vicini al valore soglia, è necessario prestare molta attenzione e considerare opportunatamente il caso analizzato dal momento che il valore *p* viene utilizzato per fornire informazioni su un test rispetto all'accettazione o al rifiuto, riferendosi sempre ad un certo livello di significatività opportunatamente scelto.

Per questo le analisi statistiche devono sempre riportare il valore del *p*-value osservato permettendo di trarre le dovute conclusioni.

6.3 Test di Shapiro-Wilk

In numerose metodologie statistiche è importante procedere mediante l'assunzione di normalità della distribuzione del parametro osservato. Questo aspetto è importante ed imprescindibile nel caso in cui si lavori ad esempio con i t-test.

Le comuni procedure per verificare se un campione casuale di osservazioni indipendenti provenga da una distribuzione normale sono i metodi grafici (diagrammi P-P plot e Q-Q plot), i metodi numerici (indici di asimmetria e curtosi) e i più formali test di normalità.

In questo lavoro di tesi è stato applicato il test di normalità di Shapiro-Wilk oltre alle definizione dei diagrammi di tipo P-P plot e Q-Q plot.

Il test di Shapiro-Wilk (SW) è stato introdotto nel 1965 da Samuel Shapiro e Martin Wilk ed è considerato in letteratura uno dei più potenti per la verifica dell'ipotesi di normalità.

Questa tipologia di test, che utilizza regressioni e combinazioni lineari, si basa sul fatto che una variabile indipendente:

$$Y \sim N(\mu, \sigma^2) \qquad (6.3)$$

può essere espressa anche nella forma:

$$Y = \mu + \sigma X \qquad (6.4)$$

dove:

$$X \sim N(0, 1) \qquad (6.5)$$

Se $X_1 \leq X_2 \leq .... \leq X_n$ si distingue un campione casuale e ordinato di dimensione N da una distribuzione normale standard ($\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$); si definisce inoltre $m' = (m_1, m_2, ..., m_n)$ il vettore dei valori attesi e $V = (v_{ij})$ la matrice di covarianza delle suddette statistiche ordinate.

Sia inoltre $Y' = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ un vettore di osservazioni casuali ordinate prese da una popolazione arbitraria. Se le Y(i) fossero osservazioni ordinate prese da una distribuzione normale con media μ e varianza σ^2 sconosciute, allora si potrebbe scrivere le Y(i) come:

$$Y(i) = \mu + \sigma X(i) \qquad (6.6)$$

dove:

$$i = 1, 2, 3, \dots, N. \qquad (6.7)$$

La statistica del test per la normalità può essere scritta come:

$$SW = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} a_i Y_i\right]^2}{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \hat{Y})^2} \qquad (6.8)$$

Dove:

- $a' = m'V - 1\ (m'V^{-1}V^{-1}m)^{-1/2}$;
- $a'a = 1$.

In alternativa se definiamo b=a'Y , sapendo che $a_i = -a_{n-i+1}$, otteniamo:

$$b = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a_{n-i+1(Y_{n-i+1}-Y_i)} \qquad (6.9)$$

e di conseguenza il test diventa:

$$SW = \frac{b^2}{\left((n-1)s^2\right)} \qquad (6.10)$$

dove a_i sono i pesi stimati e s^2 è la varianza campionaria.

Le ipotesi introdotte per l'esecuzione del test di Shapiro- Wilk sono le seguenti:

- **H_0** – Ipotesi nulla o Ipotesi zero - la variabile da cui è stato estratto il campione segue una distribuzione normale;
- **H_1** – Ipotesi alternativa ad H_0 - la variabile da cui è stato estratto il campione non segue una distribuzione normale.

I valori del Fattore di Sicurezza ricavati dalle 60 analisi con VBP=40% ed eseguite con il software *Phase²* sono stati quindi suddivisi in due distinti gruppi (Tabella 6.4).

Gruppo A	Gruppo B
0,82	0,88
0,78	0,74
0,81	0,79
0,77	0,89
0,86	0,78
0,78	0,92
0,86	0,83
0,86	0,76
0,94	0,88
0,88	0,86
0,79	0,83
0,88	0,83
0,88	0,83
0,81	0,77
0,74	0,78
	0,78
	0,85
	0,82
	0,88
	0,82
	0,82
	0,82
	0,83
	0,87
	0,84
	0,85
	0,89
	0,80
	0,79
	0,84

Tabella 6.4– Valori medi del Fattore di Sicurezza suddivisi in due gruppi (Gruppo A:15 analisi, Gruppo B: 45 analisi) con VBP=40%.

I risultati dei test di Shapiro-Wilk eseguiti separatamente per i due gruppi di analisi (Gruppo A e Gruppo B) sono presentati in Tabella 6.5.

Test di Shapiro-Wilk: Gruppo A	
W	0,956
P-value (test a due code)	0,620
α	0,05

Test di Shapiro-Wilk: Gruppo B	
W	0,971
P-value (test a due code)	0,324
α	0,05

Tabella 6.5– Risultati del test di SW applicati ai due campioni (Gruppo A – contenente 15 valori di Fs, Gruppo B – contenente 45 valori di Fs con VBP=40%).

Sia per il Gruppo A che per il Gruppo B, il test di Shapiro-Wilk ha indicato che il valore P-value calcolato è maggiore del livello di significatività $\alpha = 0{,}05$.

Per tale motivo è possibile concludere che non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla H_0. Ciò equivale a dire che le due distribuzioni del Fattore di Sicurezza seguono una legge di tipo normale.

In particolare:

- per il Gruppo A, il rischio di rifiutare l'ipotesi nulla H_0, con H_0 vera, è pari al 61,96%;
- per il Gruppo B, il rischio di rifiutare l'ipotesi nulla H_0, con H_0 vera, è pari al 32,37%.

Successivamente è stata condotta una verifica di normalità relativamente ai due campioni sottoposti al presente studio statistico (Gruppo A, Gruppo B) attraverso l'utilizzo dei diagrammi di tipo P-P plot ("Probability-Probability plot" oppure "Percent-Percent plot")e Q-Q plot ("Quantile-Quantile plot"), (Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82).

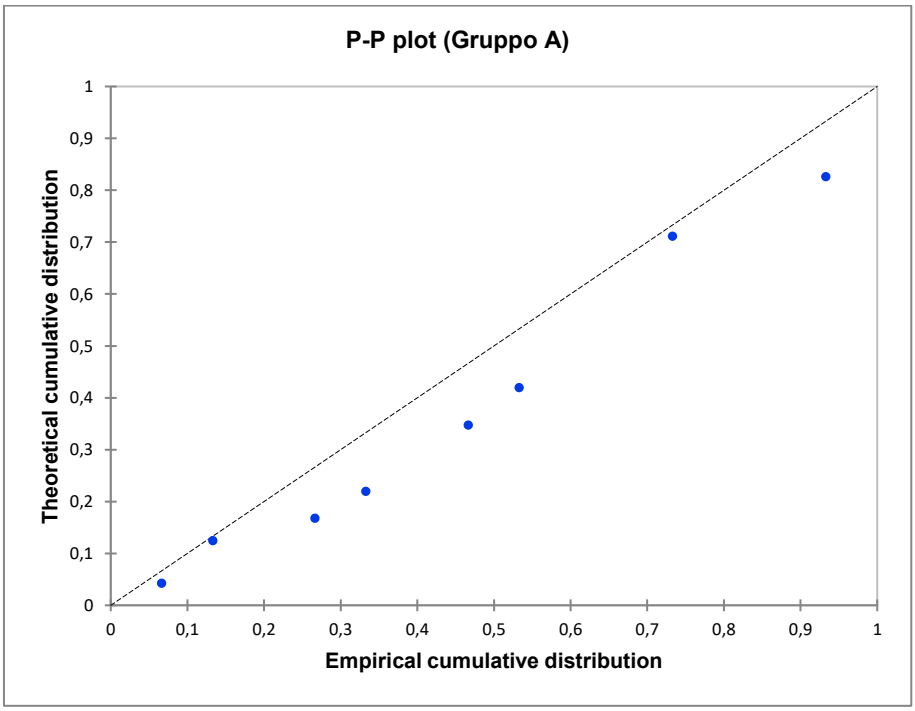


Figura 79 – P-P Plot relativi al Gruppo A.

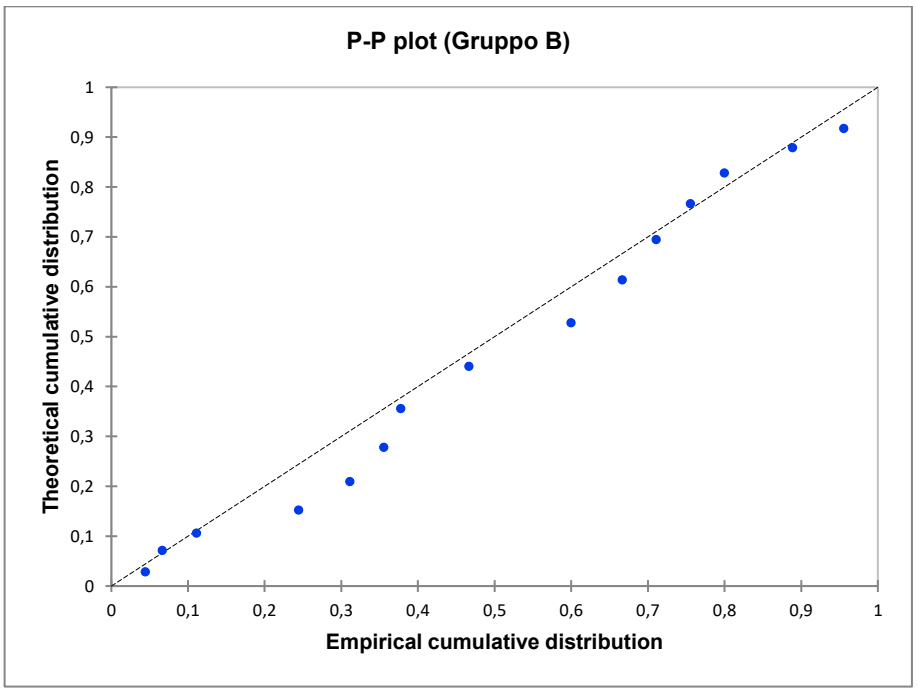


Figura 80 – P-P Plot relativi al Gruppo B.

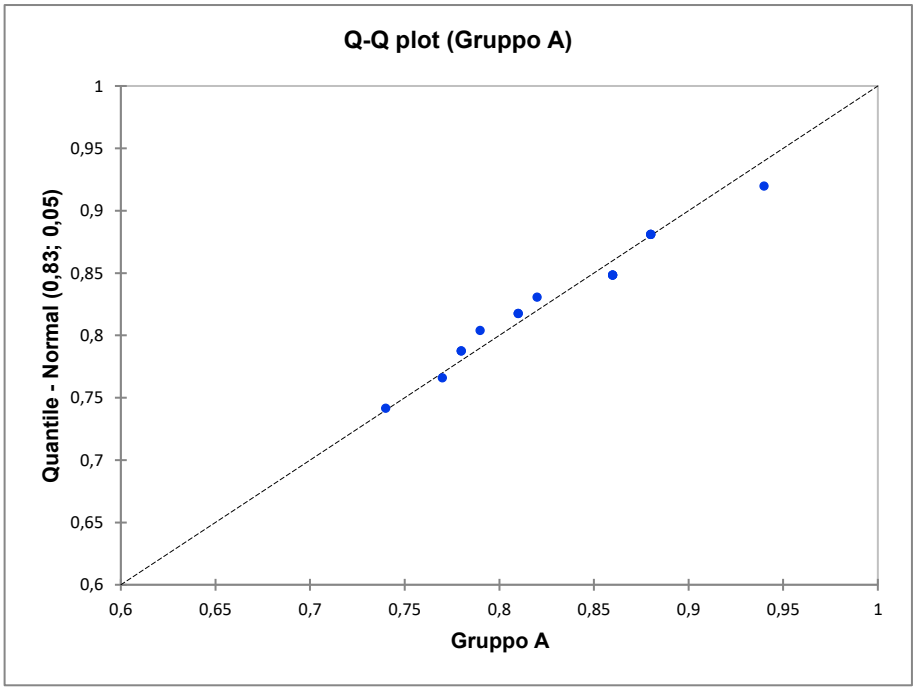


Figura 81 – Q-Q Plot relativi al Gruppo A.

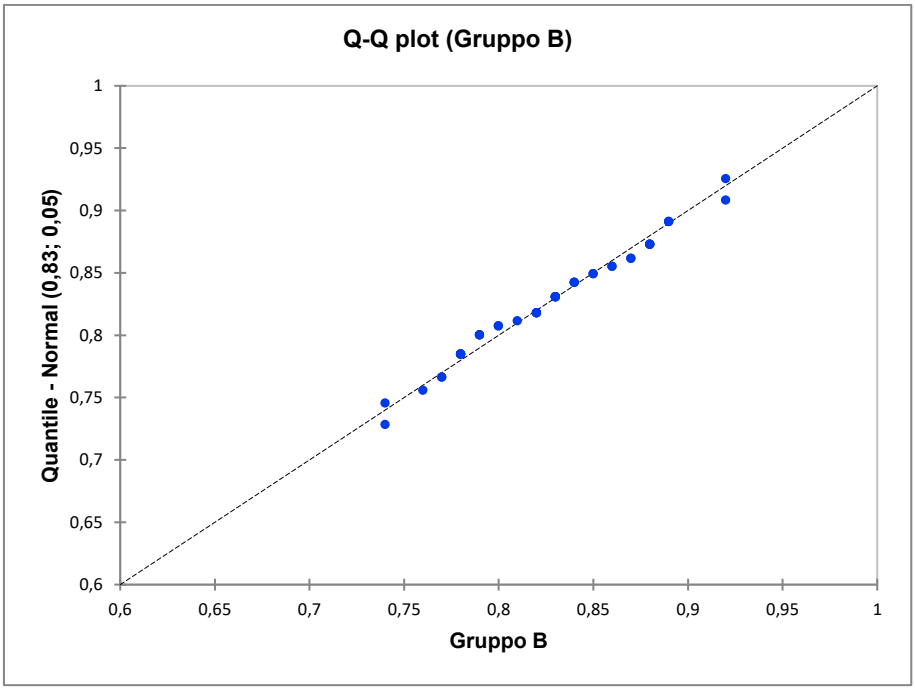


Figura 82 – Q-Q Plot relativi al Gruppo B.

I diagrammi Q-Q plot mostrano graficamente la distribuzione dei quantili della distribuzione studiata e, attraverso tali rappresentazioni, è possibile confrontare la distribuzione cumulata della variabile osservata con la distribuzione cumulata della normale.

Dal momento che la distribuzione della variabile (puntini in blu) si addensa mediamente lungo la diagonale allora è possibile affermare che la variabile studiata (ovvero la distribuzione dei valori del Fattore di Sicurezza) presenta una distribuzione normale (Figura 81, Figura 82).

Anche mediante i due P-P plot è possibile notare una buona approssimazione della distribuzione dei dati osservati con una legge di tipo normale (Figura 79, Figura 80).

6.4 Test del T-Student

Una volta verificato che la distribuzione della variabile statisticamente osservata segue una legge di tipo normale, è possibile applicare il test del T-Student in cui la statistica è definita come segue:

$$t = \frac{\overline{X} - \mu}{s}\sqrt{N-1} = \frac{\overline{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{N}}} \qquad (6.11)$$

Si considerino dei campioni di ampiezza N estratti da una popolazione normale (o approssimativamente normale) con media μ. Per ciascun campione sia calcolata la statistica *t* usando la media campionaria $\overline{X}$ e lo scarto quadratico medio campionario s (Equazione 6.11). Si ricava pertanto la legge detta "distribuzione T di Student" (Figura 83).

Tale distribuzione è data dalla seguente Equazione:

$$Y = \frac{Y_0}{\left(1+\frac{t^2}{N-1}\right)^{\frac{N}{2}}} = \frac{Y_0}{\left(1+\frac{t^2}{\nu}\right)^{\frac{(\nu+1)}{2}}} \qquad (6.12)$$

Dove Y_0 è una costante dipendente da N e l'area totale sotto la curva risulta pari all'unità. La costante ν = (N - 1) rappresenta invece il numero dei gradi di libertà.

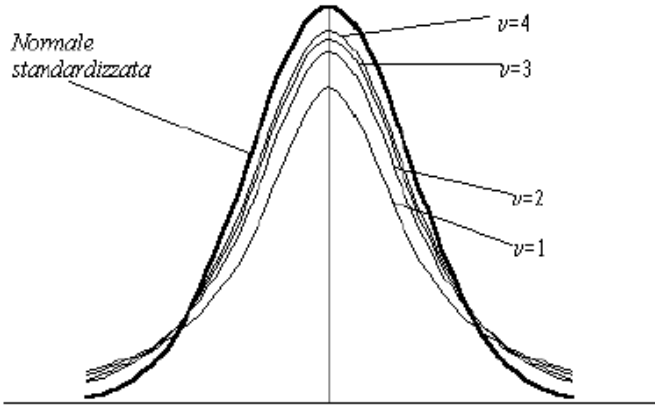


Figura 83 – Distribuzione di T-Student per diversi valori di ν (Murray 1976).

Il test del t-Student è generalmente applicato per diversi casi di studio e in funzione di un confronto tra:

1. la media di un campione e la media dell'universo o una generica media attesa;
2. un singolo dato e la media di un campione, per verificare se possono appartenere alla stessa popolazione;
3. la media delle differenze di due campioni dipendenti con una differenza attesa;
4. le medie di due campioni indipendenti.

Considerando il caso numero 4, è stato applicato il test relativamente ai due campioni precedentemente mostrati (Tabella 6.4).

Le ipotesi considerate sono le seguenti:

- **H_0** – Ipotesi nulla o Ipotesi zero - la media valutata sulle 15 analisi (Gruppo A) è uguale alla media valutata sulle 45 analisi (Gruppo B), ovvero $\mu_1 = \mu_2$;
- **H_1** – Ipotesi alternativa ad H_0 - la media valutata sulle 15 analisi (Gruppo A) non è uguale alla media valutata sulle 45 analisi (Gruppo B), ovvero $\mu_1 \neq \mu_2$.

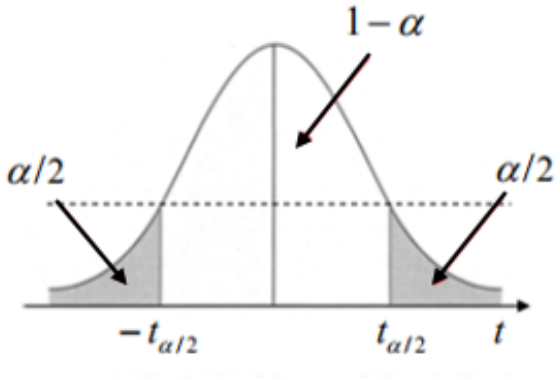


Figura 84 – Distribuzione t-Student a due code.

In questo caso si utilizza il test di Student nella forma bilaterale (Figura 84), detta anche a due code. Gli intervalli di confidenza definiti per tale test sono posti pari al 95% e al 99% ed è stata adoperata la tavola della distribuzione *t* per valutare, in funzione dei gradi di libertà e del livello di probabilità, i valori della p-value (Figura 85).

I gradi di libertà (ν) sono stati valutati come:

$$\nu = N_1 + N_2 - 2 \qquad (6.13)$$

Dove N_1 e N_2 rappresentano rispettivamente il numero di elementi presenti nel primo (Gruppo A) e nel secondo (Gruppo B) campione.

Assumendo varianze uguali tra i due campioni (per ipotesi le medie sono uguali, $\mu_1 = \mu_2$) il test di Student ha fornito i seguenti risultati:

α =0,05	**Gruppo A**	**Gruppo B**
Media	0,830666667	0,826888889
Varianza	0,00296381	0,002121919
Osservazioni	15	45
Varianza complessiva	0,002325134	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
ν	58	
Stat t	0,262777796	
P_value (T<=t) due code	0,793653042	
t critico due code	2,001717484	

Tabella 6.6– Risultati del test di Student per a=0,05.

α =0,01	**Gruppo A**	**Gruppo B**
Media	0,830666667	0,826888889
Varianza	0,00296381	0,002121919
Osservazioni	15	45
Varianza complessiva	0,002325134	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
GdL	58	
Stat t	0,262777796	
P_value (T<=t) due code	0,793653042	
t critico due code	2,663286954	

Tabella 6.7– Risultati del test di Student per a=0,01.

	α(2):	0,2	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
df	α(1):	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005	0,00005
51		1,30	1,68	2,01	2,40	2,68	3,49	4,22
52		1,30	1,67	2,01	2,40	2,67	3,49	4,21
53		1,30	1,67	2,01	2,40	2,67	3,48	4,21
54		1,30	1,67	2,00	2,40	2,67	3,48	4,20
55		1,30	1,67	2,00	2,40	2,67	3,48	4,20
56		1,30	1,67	2,00	2,39	2,67	3,47	4,19
57		1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	3,47	4,18
58		1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	3,47	4,18

Figura 85 – Stralcio della tavola statistica per applicazione del test di Student a due code.

Dai risultati del test di Student, in entrambi i casi studiati (α=0,05 e α=0,01), l'ipotesi H_0 è vera. Pertanto le medie dei due campioni (Gruppo A e Gruppo B) sono uguali ($\mu_1 = \mu_2$).

Ciò significa che le differenze tra le due medie è dovuta esclusivamente a fenomeni casuali e i due campioni appartengono alla medesima popolazione.

6.5 Teorema del Limite Centrale

Il Teorema del Limite Centrale (TLC) afferma che la somma di un numero elevato di variabili aleatorie indipendenti tende ad avere una distribuzione approssimativamente normale. L'importanza è duplice: da un lato si è in grado di ottenere una stima approssimativa delle probabilità che riguardano la somma di variabili aleatorie indipendenti, dall'altro è possibile giustificare il fatto che la distribuzione empirica delle frequenze di un gran numero di popolazioni naturali sia descritta da una forma a campana.

Inoltre, il TLC permette di determinare quanto grande deve essere la numerosità del campione affinché l'approssimazione normale sia valida (Ross 2008).

Siano X_1, X_2, …, X_n delle variabili aleatorie indipendenti e identicamente distribuite, tutte con media μ e varianza σ^2. Allora se N (numero di campioni) è grande, la somma è pari a:

$$X_1 + X_2, + \ldots + X_n \qquad (6.14)$$

Tale somma risulta approssimativamente normale con media $N \cdot \mu$ e varianza $N \cdot \sigma^2$ ed è possibile anche procedere ad una normalizzazione in modo da ottenere una distribuzione approssimativamente normale standard. Si ha infatti che:

$$\frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_3 - \mu N}{\sigma\sqrt{N}} \doteqdot N\,(0,1) \qquad (6.15)$$

dove con il simbolo $\doteqdot$ si intende "è approssimativamente distribuito come".

Per quanto riguarda quest'ultima parte del presente lavoro di tesi, l'obiettivo è stato quello di ricavare il numero minimo di Fattori di Sicurezza e quindi di analisi di stabilità da eseguire affinché i risultati siano statisticamente attendibili.

In particolare, lo scopo è stato quello di capire se le 15 analisi, effettuate per ciascuna percentuale volumetrica (25%, 40%, 55% e 70%), siano sufficientemente significative o sia necessario incrementarne il numero.

Pertanto è stato applicato il Teorema del Limite Centrale considerando i valori di F_s ricavati dalle 60 analisi di stabilità eseguite mediante *Phase*^{2}, con VBP=40% e con materiale di tipo eterogeneo ovvero costituito dalla matrice e dai blocchi.

Infatti il TLC, nella sua formulazione, definisce anche la condizione per la quale una successione di variabili casuali ed indipendenti converge alla distribuzione normale.

Tale condizione riguarda sostanzialmente la distribuzione delle variabili e l'esistenza dei loro momenti.

Difatti è stato possibile constatare che per una data sequenza di prove, all'aumentare del numero delle stesse, la frequenza relativa con cui un evento si manifesta tende a stabilizzarsi e, allo stesso tempo, la media del campione si stabilizzerà e convergerà verso la media della popolazione.

Dunque attraverso l'applicazione del TLC è possibile osservare che:

- la media tenderà, all'aumentare del numero di campioni, ad assestarsi ad un valore fisso;
- la varianza della media (coincidente con la varianza del fenomeno per N che tende ad infinito) avrà un andamento del tipo $\frac{1}{\sqrt{N}}$ in cui N è il numero di campioni, cioè il numero di analisi.

Se queste due condizioni sono soddisfatte è possibile valutare il numero minimo di campioni (di Fattori di Sicurezza e di analisi numeriche) statisticamente valido.

La convergenza può essere valutata mediante la "*Relative Standard Deviation*" (RSD), definita come segue:

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \overline{x})}}{\overline{x}} \qquad (6.16)$$

- RSD: Relative Standard Deviation;
- $x_1, x_2, \ldots, x_n$: set di dati;
- $\overline{x}$: valore medio del set di dati;
- N: dimensione del set di dati del campione.

In particolare, si distingue una "varianza delle estrazioni" (delle analisi) che determina un differente valore di F_s medio per ogni gruppo di 15 analisi e, una "varianza del fenomeno" che comporta, per ogni simulazione, un differente valore di F_s.

Il valore di "RSD" è l'errore sulla stima del valore di F_s medio e quindi rappresenta la varianza delle estrazioni.

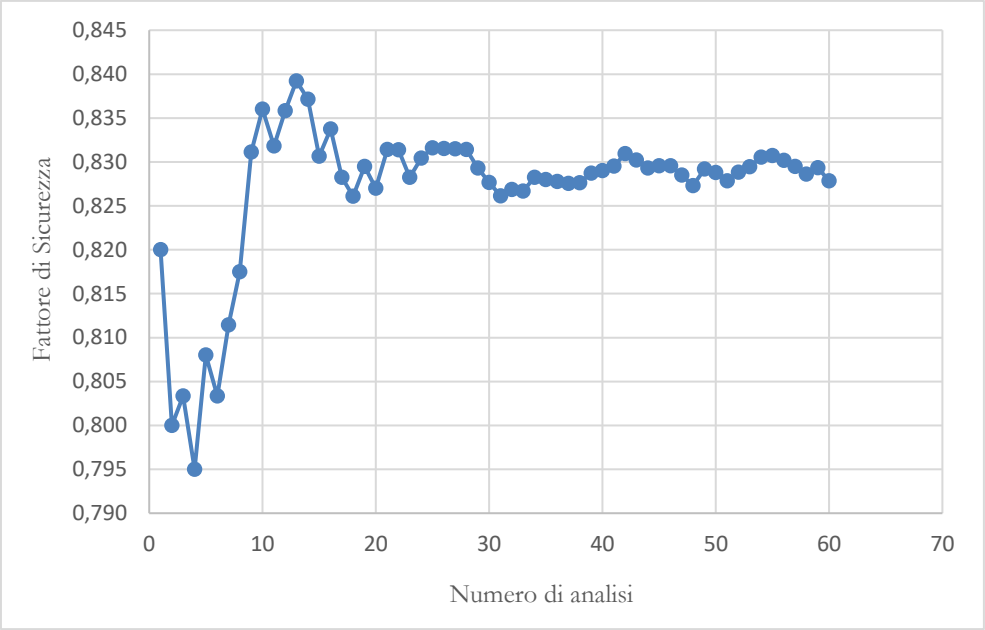


Figura 86 – Andamento del Fattore di Sicurezza.

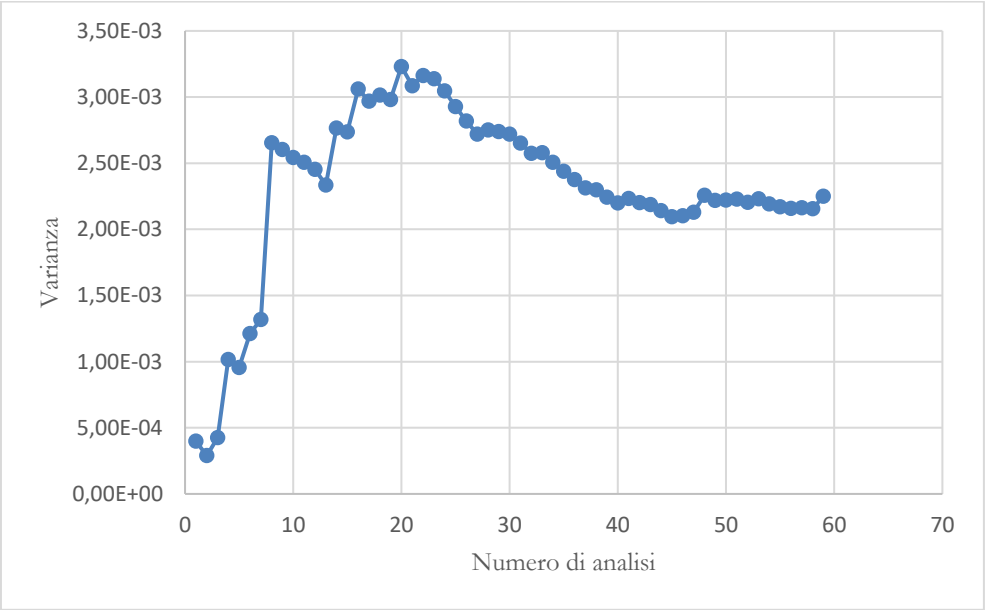


Figura 87 –Andamento dei valori di varianza associati ai Fattori di Sicurezza.

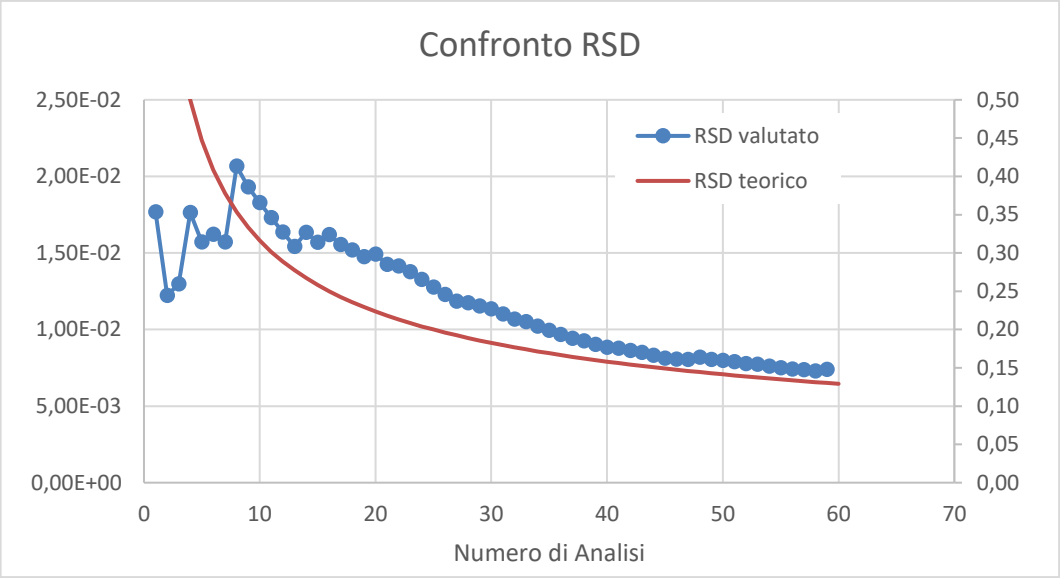


Figura 88 – Confronto tra l'andamento di RSD teorico e di quello valutato statisticamente sul campione osservato.

Dai risultati dell'applicazione del Teorema del Limite Centrale si evince che il Fattore di Sicurezza medio valutato con 15 simulazioni ($\bar{F}_{15}$), pari a 0,83 (Tabella 5.12), presenta un errore di stima pari al 4,89%.

Pertanto, è possibile affermare che si ha il 99,7% di probabilità che il Fattore di Sicurezza medio effettivo ($\bar{F}_{eff,}$), cioè quello che si otterrebbe per un numero infinito di simulazioni (N→∞), sia all'interno del seguente intervallo:

$$(\bar{F}_{15} - 3 \cdot RSD) \leq \bar{F}_{eff,} \leq (\bar{F}_{15} + 3 \cdot RSD)$$

In cui RSD è la varianza sulla stima del Fattore di Sicurezza medio calcolata per le prime 15 analisi e pari al 1,63% (Figura 88).

È possibile dunque affermare che un numero di simulazioni pari a 15 è sufficiente per la determinazione del valore medio del Fattore di Sicurezza. Difatti, i risultati ottenuti sono statisticamente significativi e l'errore stimato è piccolo.

Altresì, un aumento del numero di analisi determinerebbe una diminuzione non significativa dell'errore sulla stima del Fattore di Sicurezza medio e, contemporaneamente, comporterebbe un considerevole incremento dell'onere computazionale.

In Allegato V sono presentati, nel dettaglio, i calcoli effettuati per l'applicazione del Teorema del Limite Centrale.

Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi è stato lo studio del comportamento meccanico di un versante in bimrock. Il lavoro si è concentrato sulle analisi di stabilità condotte mediante un approccio numerico agli elementi finiti, usando il programma RS2 di Rocscience.

Le suddette analisi sono state eseguite su di una geometria semplice di versante ed effettuando, attraverso il metodo probabilistico Monte Carlo, delle estrazioni casuali dei blocchi in termini dimensionali e di diposizione all'interno del versante.

Al fine di ottenere una sufficiente validità statistica dei risultati, sono state eseguite 15 estrazioni per ogni percentuale volumetrica dei blocchi considerata (25%, 40%, 55% e 70%), mantenendo invariata sia la forma (ellissi con eccentricità pari a 0,5) sia l'inclinazione dell'asse maggiore (30° rispetto all'orizzontale) delle inclusioni presenti nella matrice.

Inoltre, sono state effettuate delle analisi di stabilità, sugli stessi modelli, considerando il mezzo come omogeneo equivalente, secondo quanto suggerito in letteratura da alcuni autori (Lindquist 1994, Kalender et al. 2014).

Le caratteristiche meccaniche di blocchi e matrice sono state derivate da studi e da prove di caratterizzazione di formazioni rocciose complesse proposti in letteratura. In particolare, sono stati creati tre modelli del versante:

- 1° modello: versante costituito da materiale eterogeneo (matrice e blocchi) con l'utilizzo dei parametri meccanici trovati da Li et al. (2004);
- 2° modello: versante costituito da materiale omogeneo equivalente con parametri meccanici ottenuti attraverso l'approccio proposto da Lindquist (1994);
- 3° modello: versante costituito da materiale omogeneo equivalente con parametri meccanici ottenuti mediante l'approccio proposto da Kalender et al. (2014).

I risultati ottenuti dalle analisi numeriche condotte mediante il modello eterogeneo (Li et al. 2004) sono perfettamente in accordo con quanto presente in letteratura, infatti è stato constatato che:

- all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi (VBP) si ha un incremento del Fattore di Sicurezza;
- l'andamento del Fattore di Sicurezza, al variare della VBP, è congruente con i risulti ottenuti da Medley e Sanz (2004) mediante analisi all'equilibrio limite e da Barbero et al. (2006) e Napoli et al. (2018) attraverso analisi numeriche;
- la presenza dei blocchi non fornisce un incremento del F_s rispetto al caso di versante costituito da sola matrice (VBP=0%) per basse percentuali volumetriche (VBP=25%) mentre si registra un vantaggio in termini di resistenza del versante per alte percentuali (VBP=70%);
- è stata osservata una maggiore variabilità dei valori del Fattore di Sicurezza per percentuali volumetriche elevate (VBP=70%), attribuibile alla differente posizione dei blocchi;
- all'aumentare della VBP si è registrata una diminuzione dei volumi mediamente mobilitati (in concomitanza con un incremento dei F_s) a causa di una maggiore tortuosità della superficie di scivolamento;
- è stata riscontrata complessivamente una forte correlazione tra la tortuosità della superficie di scivolamento e la posizione e dimensione dei blocchi.

Per quanto concerne le analisi numeriche condotte mediante il modello omogeneo equivalente, con parametri meccanici ottenuti attraverso l'approccio proposto da Lindquist (1994), è possibile riscontrare che:

- all'aumentare della VBP si ha un incremento del Fattore di Sicurezza ed un decremento dei volumi mobilitati. Pertanto i risultati sono congruenti con quelli ricavati mediante le analisi con materiale eterogeneo. Tuttavia, nel caso di materiale omogeneizzato, si osserva una sottostima dei valori del Fattore di Sicurezza ed una sovrastima dei volumi mediamente mobilitati;
- il ricorso ad una modellazione semplificata con mezzo omogeneo equivalente comporta una scorretta previsione della posizione e della forma della superficie di scivolamento.

Per quanto riguarda le analisi eseguite mediante il modello omogeneo equivalente, con i parametri meccanici ottenuti attraverso l'approccio suggerito da Kalender et al. (2014), i risultati sembrano essere in netta contrapposizione con quelli precedentemente menzionati.

In particolare, è stata osservata una riduzione dei valori del Fattore di Sicurezza e dei volumi mediamente mobilitati all'aumentare della percentuale volumetrica. Tali incongruenze possono essere spiegate tenendo presente quanto segue.

Li et al. (2004) hanno condotto degli studi di caratterizzazione meccanica del materiale presente presso il bacino di Three Gorges, in Cina. Si tratta di un materiale costituito principalmente da blocchi di roccia, argilla e argilla sabbiosa. Gli autori hanno proposto anche un'analisi di stabilità in cui, a causa della struttura del materiale, non è stata introdotta alcuna interfaccia tra blocchi e matrice. Secondo la definizione introdotta da Kalender, siamo quindi in presenza di un materiale saldato cioè di tipo *welded*.

Lindquist (1994) ha lavorato con campioni artificiali, costruiti in laboratorio, in cui sia i blocchi che la matrice sono stati realizzati in parte con cemento; per simulare le zone di taglio sono stati inseriti degli strati molto sottili di cera, ricoperti da polvere di talco. Sostanzialmente, anche in questo caso, secondo la definizione proposta da Kalender, siamo in presenza di una struttura vicina a quella di un materiale di tipo *welded*.

I parametri della matrice, adoperati per ricavare le caratteristiche meccaniche del mezzo omogeneo equivalente attraverso le formulazioni proposte da Kalender et al. (2014), sono gli stessi dei due modelli precedentemente menzionati (in cui si è parlato di materiale *welded*). Tuttavia, nonostante si utilizzino gli stessi parametri iniziali, adoperando il diagramma (Figura 45) fornito dagli stessi autori (Kalender et al. 2014) per la stima dei parametri meccanici del materiale omogeneizzato, si ricade all'interno della zona caratteristica dei materiali di tipo *unwelded*.

Alla luce di tali aspetti, è possibile affermare che esiste una sostanziale ambiguità tra la definizione di materiale *welded* e *unwelded* e l'utilizzo del diagramma proposto dall'autore.

L'ambiguità probabilmente deriva dalla differenziazione tra materiale *welded* e *unwelded* che sembra essere legata esclusivamente alle caratteristiche di resistenza della matrice.

Difatti, al crescere della resistenza a compressione monoassiale della matrice si ipotizza una transizione da materiali di tipo *unwelded* a quelli di tipo *welded*, non considerando tuttavia quei materiali dotati di medie caratteristiche meccaniche che presentano comunque un comportamento di tipo *welded*.

Inoltre, è necessario aggiungere che le analisi di stabilità, condotte con tale modellazione semplificata, hanno determinato un'errata previsione della forma e della posizione della superficie di scivolamento.

Per quanto riguarda gli approcci statistici utilizzati al fine di verificare l'attendibilità dei risultati delle analisi di stabilità effettuate considerando esclusivamente il caso di VBP=40%, è possibile affermare quanto segue.

Il test di Shapiro-Wilk ha dimostrato che i valori del Fattore di Sicurezza, ricavati dalle simulazioni numeriche, si distribuiscono secondo una legge di tipo normale.

Mediante il test del T-Student è stato confermato che la differenza tra i valori medi del Fattore di Sicurezza ricavati per due gruppi di analisi, con un diverso numero di campioni, è dovuta esclusivamente a fenomeni casuali ed aleatori.

Dai risultati dell'applicazione del Teorema del Limite Centrale si evince che il Fattore di Sicurezza medio valutato con 15 simulazioni ($\bar{F}_{15}$), pari a 0,83 (Tabella 5.12), presenta un errore di stima pari al 4,89%.

Pertanto, è possibile affermare che si ha il 99,7% di probabilità che il Fattore di Sicurezza medio effettivo ($\bar{F}_{eff,}$), cioè quello che si otterrebbe per un numero infinito di simulazioni (N→∞), ricada all'interno del seguente intervallo:

$$(\bar{F}_{15} - 3 \cdot RSD) \leq \bar{F}_{eff,} \leq (\bar{F}_{15} + 3 \cdot RSD)$$

in cui "RSD" è la varianza sulla stima del Fattore di Sicurezza medio, calcolata per le prime 15 analisi e pari al 1,63% (Figura 88).

È possibile dunque affermare che un numero di simulazioni pari a 15 è sufficiente per la determinazione del valore medio del Fattore di Sicurezza. Difatti, i risultati ottenuti sono statisticamente significativi e l'errore stimato è piccolo.

Altresì, un aumento del numero di analisi non determinerebbe una notevole diminuzione dell'errore sulla stima del Fattore di Sicurezza medio e, contemporaneamente, comporterebbe un considerevole incremento dell'onere computazionale.

Indice delle figure

FIGURA 1 – CLASSIFICAZIONE DELLE FORMAZIONI COMPLESSE SECONDO A.G.I. (A.G.I. 1979). 10
FIGURA 2 –RAPPRESENTAZIONE DELLA CONFIGURAZIONE CAOTICA DEL FRANSISCAN COMPLEX (MEDLEY 1994)..... 11
FIGURA 3 – DIFFERENTI FORMAZIONI DI MELANGE (MEDLEY 2001). 12
FIGURA 4 – COLLOCAZIONE DEI MELANGES NEI VARI PAESI DEL MONDO (MEDLEY 1994). 13
FIGURA 5 – DEPOSITO IN SIERRA NEVADA (MEDLEY 2007)..... 16
FIGURA 6 – BLOCCHI ROCCIOSI ALL'INTERNO DI UN MELANGE SPORGONO DALLA COLLINA, GRECIA (MEDLEY 2007)..... 16
FIGURA 7 – DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE DEI BLOCCHI 1D STIMATA, IN VERDE, A CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE REALE 3D, IN BLU (MEDLEY 2001). 18
FIGURA 8 – CONFRONTO TRA LA MASSIMA DIMENSIONE OSSERVATA D_{MOD} E IL DIAMETRO DI UN BLOCCO (MEDLEY 2001). 19
FIGURA 9 – SCORRETTA VALUTAZIONE DELL'AMMASSO A PARTIRE DA FORI DI SONDAGGIO, (MEDLEY 2001)..... 20
FIGURA 10 – CONCETTO DI SOGLIA TRA BLOCCO E MATRICE: SCALE DI INTERESSE (MEDLEY 2001). 21
FIGURA 11 – TIPICO FRANSISCAN MELANGE, SCALA DI RIFERIMENTO 1,5 METRI (MEDLEY 2002). 23
FIGURA 12 – RAPPRESENTAZIONE DEI DATI IN TERMINI DI DIMENSIONE DEI 1900 BLOCCHI APPARTENENTI AL FRANSISCAN COMPLEX (MEDLEY 2002). 24
FIGURA 13 – CORRELAZIONE SPERIMENTALE TRA PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI E ANGOLO DI ATTRITO, (MEDLEY 1994) 26
FIGURA 14 – INCERTEZZA NELLA VALUTAZIONE DELLA PERCENTUALE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI, IN FUNZIONE DELLA LUNGHEZZA LINEARE DI CAMPIONAMENTO, ESPRESSA COME UN MULTIPLO (N) DELLA LUNGHEZZA MASSIMA DEI BLOCCHI (D_{MAX}),(MEDLEY 2001). 28
FIGURA 15 – SUPERFICIE DI POSSIBILE SCIVOLAMENTO CON ANDAMENTO TORTUOSO (MEDLEY 2004). 30
FIGURA 16 – SUPERFICI DI ROTTURA SU SUPERFICIE LATERALE DI TRE PROVINI SOTTOPOSTI A PROVE TRIASSIALI (MEDLEY 2004). 31
FIGURA 17 – SUPERFICI DI ROTTURA CON ANDAMENTO TORTUOSO (MEDLEY 2004). 32
FIGURA 18 – SUPERFICI DI ROTTURA CONFRONTATE CON I PROFILI DI RUGOSITÀ (MEDLEY 2004). 32

FIGURA 19 –PARAMETRI MISURATI MEDIANTE LINEE DI ROTTURA TRACCIATE DA LINDQUIST (MEDLEY 2004). 33
FIGURA 20 –PARAMETRI MISURATI DA LINDQUIST: INDICE DI LUNGHEZZA TORTUOSA, PROFONDITÀ MEDIA TORTUOSA E INDICE DI CONTATTO DEI BLOCCHI (MEDLEY 2004). 34
FIGURA 21 – MODELLO DI VERSANTE IN BIMROCK CON DISTRIBUZIONE CASUALE DEI BLOCCHI E PERCENTUALE VOLUMETRICA PARI AL 50%; LA CURVA TRATTEGGIATA (IN ROSSO) RAFFIGURA LA SUPERFICIE DI ROTTURA NEL CASO DI VERSANTE COSTITUITO DALLA SOLA MATRICE; LE ALTRE CURVE (IN NERO) RAPPRESENTANO LE POSSIBILI SUPERFICI DI ROTTURA DEL BIMROCK (MEDLEY E SANZ 2004). 37
FIGURA 22 – CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI DALL'ANALISI DEL COLLUVIO DI HONG KONG (IRAN E TANG 1993) E QUELLI RELATIVI ALLO STUDIO DEL FRANCISCAN MELANGE (MEDLEY E SANZ 2004)..... 37
FIGURA 23 – MODELLO DEL COLLUVIO ROCCIOSO AVENTE VBP PARI AL 20%; LA CURVA TRATTEGGIATA (IN NERO) RAPPRESENTA LA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO PER LA SOLA MATRICE; LA CURVA IN ARANCIONE RAPPRESENTA UNA PROBABILE SUPERFICIE DI ROTTURA CON ANDAMENTO TORTUOSO (IRAN E TANG 1993)..... 38
FIGURA 24 – MODELLO DEL VERSANTE PER DIVERSE VBP (IN ALTO) E DIFFERENTI GEOMETRIE DEL BLOCCO ADOPERATE (IN BASSO), (BARBERO ET AL. 2006)..... 40
FIGURA 25 – ANDAMENTO DEL FATTORE DI SICUREZZA AL VARIARE DELLA VBP, PER ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI COMPLETAMENTE CASUALI (BARBERO ET AL. 2006).. 41
FIGURA 26 – TIPICA PORZIONE IN CUI È STATO SUDDIVISO IL CAMPIONE ARTIFICIALE DI BIMROCK SOTTOPOSTO ALLA PROVA DI LABORATORIO (MEDLEY 2002)..... 46
FIGURA 27 – ISTOGRAMMA CONVENZIONALE DELLA DISTRIBUZIONE DELLA DIMENSIONE DEI BLOCCHI TRIDIMENSIONALI (BARRE NERE) PER I QUATTRO MODELLI FISICI DI MELANGE E DISTRIBUZIONI DELLE LUNGHEZZE DELLE CORDE DERIVATE DA 400 SCANLINES, SUDDIVISE PER PROPORZIONI VOLUMETRICHE (BARRE COLORATE), (MEDLEY 2002). 48
FIGURA 28 – DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE TRIDIMENSIONALE ORIGINARIA E DISTRIBUZIONI DELLE LUNGHEZZE DELLE CORDE RAPPRESENTATI SOTTOFORMA DI FREQUENZA RELATIVA CUMULATA (MEDLEY 2002). 48
FIGURA 29 – DISTRIBUZIONE LUNGHEZZA DELLA CORDA BASATA SULLE CORDE VALUTATE SU DIECI CAMPIONI PER OGNI MODELLO STUDIATO DA MEDLEY, (MEDLEY 2002). 49
FIGURA 30 –RAPPRESENTAZIONE PROVINO SECONDO IL MODELLO DI LINDQUIST (LINDQUIST 1994). 52
FIGURA 31 – RISULTATI DEI TEST IN TERMINI DI COESIONE E PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI (LINDQUIST 1994). 54
FIGURA 32 – RISULTATI DEI TEST IN TERMINI DI ANGOLO DI ATTRITO (LINDQUIST 1994)..... 55
FIGURA 33 –COESIONE E ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI CON BASSA PROPORZIONE VOLUMETRICA (LINDQUIST 1994). 56

FIGURA 34 – COESIONE E ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI CON MEDIA PROPORZIONE VOLUMETRICA (LINDQUIST 1994). 56
FIGURA 35 – COESIONE E ORIENTAZIONE DEI BLOCCHI CON ALTA PROPORZIONE VOLUMETRICA (LINDQUIST 1994). 57
FIGURA 36 – TRACCIA DEI BLOCCHI SULLA SUPERFICIE LATERALE DI DUE PROVINI AD ALTA PROPORZIONE VOLUMETRICA (LINDQUIST 1994). 58
FIGURA 37 – PROVINO SOTTOPOSTO A STATO DI DEFORMAZIONE UNIFORME A SINISTRA ED A STATO DI TENSIONE UNIFORME A DESTRA (LINDQUIST 1994). 59
FIGURA 38 – MODULO DI DEFORMAZIONE E PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI – ORIENTAZIONE DI 0° (LINDQUIST 1994). 60
FIGURA 39 – MODULO DI DEFORMAZIONE E PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI – ORIENTAZIONE DI 30° (LINDQUIST 1994). 60
FIGURA 40 – MODULO DI DEFORMAZIONE E PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI – ORIENTAZIONE DI 60° (LINDQUIST 1994). 61
FIGURA 41 – MODULO DI DEFORMAZIONE E PROPORZIONE VOLUMETRICA DEI BLOCCHI – ORIENTAZIONE DI 90° (LINDQUIST 1994). 61
FIGURA 42 – RELAZIONE TRA ANGOLO DI ATTRITO, COESIONE E VBP (KALENDER, 2014). 63
FIGURA 43 – ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DI BIMROCK SALDATO (A) E NON SALDATO (B), (KALENDER ET AL. 2014). 65
FIGURA 44 – BACK ANALYSIS PER DEFINIRE IL PARAMETRO "A" (KALENDER ET AL. 2014). 67
FIGURA 45 – GRAFICO PER LA SELEZIONE DEL PARAMETRO "A" IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI CONTATTO TRA BLOCCHI E MATRICE, (KALENDER ET AL. 2014). 67
FIGURA 46 – RAPPRESENTAZIONE DEL METODO EMPIRICO PER LA PREDIZIONE DI $\varphi bimrock$ (KALENDER ET AL. 2014). 68
FIGURA 47 – RAPPRESENTAZIONE DEL METODO EMPIRICO PER LA PREDIZIONE DI $UCSbimrock$ (KALENDER ET AL. 2014). 69
FIGURA 48 – DIAGRAMMA DI FLUSSO PER APPLICAZIONE DEL CRITERIO EMPIRICO PROPOSTO PER LA DEFINIZIONE DEI PARAMETRI MECCANICI DEI BIMROCK E DEI BIMSOIL (KALENDER ET AL. 2014). 70
FIGURA 49 – INVILUPPO DI RESISTENZA AL VARIARE DELLA PERCENTUALE VOLUMETRICA (BARBERO ET AL. 2006). 72
FIGURA 50 – MODULO DI DEFORMABILITÀ AL VARIARE DELLA PERCENTUALE VOLUMETRICA (BARBERO ET AL. 2006). 72
FIGURA 51 – SCHEMA PROVA DI TAGLIO DIRETTA IN SITU (1-TRAVERSINE, 2-LASTRE IN ACCIAIO, 3-PISTONE, 4-CAMPIONE DI RSA), (LI ET AL. 2004). 73
FIGURA 52 – RISULTATI OTTENUTI PER TRE PROVINI DI RSA (LI ET AL. 2004). 73
FIGURA 53 – MODELLO STOCASTICO 2D RELATIVO AL CAMPIONE T_1 DI RSA (LI ET AL. 2004). 74
FIGURA 54 – CONFRONTO DEI RISULTATI (METODO NUMERICO E PROVE IN SITU) RELATIVI AL CAMPIONE T_1 DI RSA (LI ET AL. 2004). 75
FIGURA 55 – GEOMETRIA DEL VERSANTE IN BIMROCK. 82

FIGURA 56 –INCLINAZIONE, FORMA ED ECCENTRICITÀ DEL GENERICO BLOCCO PRESENTE NEL VERSANTE IN BIMROCK. 83
FIGURA 57 –DISTRIBUZIONE DEL DIAMETRO DEI BLOCCHI IN TERMINI PROBABILISTICI PER UNA GENERICA ESTRAZIONE CON PERCENTUALE VOLUMETRICA PARI AL 40% (IN ALTO) E RAPPRESENTAZIONE DELLA DISPOSIZIONE DELLE ELLISSI GENERATA DAL CODICE (IN BASSO)..... 85
FIGURA 58 – ESEMPIO DI MODELLO ADOPERATO PER LE ANALISI CON VBP=25% RELATIVO ALLO STAGE 11 (FINE FASE DI SCAVO)..... 89
FIGURA 59 – PARTICOLARE DEL MODELLO ADOPERATO PER LE ANALISI CON VBP=25% RELATIVO ALLO STAGE 11 (FINE FASE DI SCAVO). 89
FIGURA 60 –MODELLO COSTITUITO DA SOLA MATRICE (VBP=0%), IN ROSSO L'ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO. 92
FIGURA 61 – ANALISI N°13 E VBP=25%, IN ROSSO L'ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO. 94
FIGURA 62 – ANALISI N°5 E VBP=40%, IN ROSSO L'ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO. 96
FIGURA 63 – ANALISI N°15 E VBP=55%, IN ROSSO L'ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO. 98
FIGURA 64 – ANALISI N°3 E VBP=70%, IN ROSSO L'ANDAMENTO DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO. 100
FIGURA 65 – VALORI DEI FATTORI DI SICUREZZA AL VARIARE DELLA VBP [%]. 101
FIGURA 66 – ANDAMENTO DEL FATTORE DI SICUREZZA MEDIO AL VARIARE DELLA VBP [%]. 102
FIGURA 67 – ANDAMENTO DELLA DEVIAZIONE STANDARD DEL FS AL VARIARE DELLA VBP [%]. 102
FIGURA 68 –VOLUMI MOBILITATI AL VARIARE DELLA VBP [%]. 103
FIGURA 69 – ANDAMENTO DEI VOLUMI MOBILITATI, AL VARIARE DELLA VBP [%], OTTENUTI DALLE ANALISI ESEGUITE CON PHASE^2. 104
FIGURA 70 – ANDAMENTO DEI VALORI DI DEVIAZIONE STANDARD DEI VOLUMI MOBILITATI AL VARIARE DELLA VBP [%]. 104
FIGURA 71 – ANDAMENTO DEL FATTORE DI SICUREZZA AL VARIARE DELLA VBP [%]. 106
FIGURA 72 – ANDAMENTO DEI VOLUMI MOBILITATI AL VARIARE DELLA VBP [%]. 106
FIGURA 73 – ANDAMENTO DEL FATTORE DI SICUREZZA AL VARIARE DELLA VBP [%]. 108
FIGURA 74 – ANDAMENTO DEI VOLUMI MOBILITATI AL VARIARE DELLA VBP [%]. 108
FIGURA 75 – CONFRONTO TRA I VALORI DI FS RICAVATI DALLE DIVERSE ANALISI CONDOTTE AL VARIARE DELLA VBP. 109
FIGURA 76 – CONFRONTO TRA I VOLUMI MOBILITATI RICAVATI DALLE DIVERSE ANALISI CONDOTTE AL VARIARE DELLA VBP. 109
FIGURA 77 – BIPARTIZIONE DELL'UNIVERSO DEI CAMPIONI (CHIANDOTTO 2006). 115
FIGURA 78 – TAVOLA DI DECISIONE (CHIANDOTTO,2006). 116
FIGURA 79 – P-P PLOT RELATIVI AL GRUPPO A. 120
FIGURA 80 – P-P PLOT RELATIVI AL GRUPPO B. 121

FIGURA 81 – Q-Q PLOT RELATIVI AL GRUPPO A. 121
FIGURA 82 – Q-Q PLOT RELATIVI AL GRUPPO B. 122
FIGURA 83 – DISTRIBUZIONE DI T-STUDENT PER DIVERSI VALORI DI N (MURRAY 1976) 123
FIGURA 84 – DISTRIBUZIONE T-STUDENT A DUE CODE. 124
FIGURA 85 – STRALCIO DELLA TAVOLA STATISTICA PER APPLICAZIONE DEL TEST DI STUDENT A DUE CODE. 125
FIGURA 86 – ANDAMENTO DEL FATTORE DI SICUREZZA. 128
FIGURA 87 –ANDAMENTO DEI VALORI DI VARIANZA ASSOCIATI AI FATTORI DI SICUREZZA. 128
FIGURA 88 – CONFRONTO TRA L'ANDAMENTO DI RSD TEORICO E DI QUELLO VALUTATO STATISTICAMENTE SUL CAMPIONE OSSERVATO. 129

Indice delle tabelle

TABELLA 3.1– RISULTATI OTTENUTI DA LINDQUIST, (MEDLEY 2004). 35
TABELLA 3.2 – CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI IL MODELLO DEL VERSANTE (BARBERO ET AL. 2006). 40
TABELLA 4.1– PROPORZIONI DEGLI ELEMENTI PER LA REALIZZAZIONE DEI MATERIALI PER I MODELLI (LINDQUIST 1994). 51
TABELLA 4.2 – DISTRIBUZIONE DELLA DIMENSIONE DEI BLOCCHI (LINDQUIST 1994). 51
TABELLA 4.3– NUMERO E DIAMETRO DEI CAMPIONI (LINDQUIST 1994). 52
TABELLA 4.4 – CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI IL MODELLO DEL CAMPIONE (BARBERO ET AL. 2006). 71
TABELLA 5.1–TABELLA RIASSUNTIVA DEI PARAMETRI MECCANICI ADOPERATI PER LE ANALISI DI STABILITÀ (LI ET AL. 2004). 91
TABELLA 5.2– FATTORE DI SICUREZZA, IN PRESENZA DI SOLA MATRICE (VBP=0%), OTTENUTO DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 91
TABELLA 5.3– VOLUME MOBILITATO, IN PRESENZA DI SOLA MATRICE (VBP=0%), OTTENUTO DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 92
TABELLA 5.4– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA PER VERSANTE CON VBP=25%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 93
TABELLA 5.5– VOLUMI MOBILITATI PER VERSANTE CON VBP=25%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 94
TABELLA 5.6– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA PER VERSANTE CON VBP=40%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 95
TABELLA 5.7– VOLUMI MOBILITATI PER VERSANTE CON VBP=40%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 96
TABELLA 5.8– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA PER VERSANTE CON VBP=55%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 97
TABELLA 5.9– VOLUMI MOBILITATI PER VERSANTE CON VBP=55%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE^2. 98

TABELLA 5.10– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA PER VERSANTE CON VBP=70%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE². 99
TABELLA 5.11– VOLUMI MOBILITATI PER VERSANTE CON VBP=70%, OTTENUTI DALL'ANALISI ESEGUITA CON PHASE². 100
TABELLA 5.12– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA MEDIO E DELLE DEVIAZIONI STANDARD PER OGNI VBP CONSIDERATA. 101
TABELLA 5.13– VOLUMI MEDI MOBILITATI E RELATIVE DEVIAZIONI STANDARD, AL VARIARE DELLA VBP [%]. 103
TABELLA 5.14– PARAMETRI MECCANICI OTTENUTI SECONDO L'APPROCCIO PROPOSTO DA LINDQUIST (1994). 105
TABELLA 5.15– RISULTATI OTTENUTI DALLE ANALISI DI STABILITÀ CONDOTTE SECONDO L'APPROCCIO PROPOSTO DA LINDQUIST (1994). 106
TABELLA 5.16– PARAMETRI MECCANICI OTTENUTI SECONDO L'APPROCCIO PROPOSTO DA KALENDER ET AL. (2014). 107
TABELLA 5.17– RISULTATI OTTENUTI DALLE ANALISI DI STABILITÀ CONDOTTE SECONDO L'APPROCCIO PROPOSTO DA KALENDER ET AL. (2014). 107
TABELLA 6.1– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA, RICAVATI MEDIANTE ANALISI DI STABILITÀ ESEGUITE CON PHASE², PER IL VERSANTE IN BIMROCK COSTITUITO DA MATRICE E BLOCCHI CON VBP=40%. 112
TABELLA 6.2– VALORI DEL FATTORE DI SICUREZZA PER I QUATTRO GRUPPI DA 15 ANALISI CON VBP=40%. 113
TABELLA 6.3– VALORI MEDI DEL FATTORE DI SICUREZZA E RELATIVE DEVIAZIONI STANDARD PER I QUATTRO GRUPPI DA 15 ANALISI CON VBP=40%. 113
TABELLA 6.4– VALORI MEDI DEL FATTORE DI SICUREZZA SUDDIVISI IN DUE GRUPPI (GRUPPO A:15 ANALISI, GRUPPO B: 45 ANALISI) CON VBP=40%. 119
TABELLA 6.5– RISULTATI DEL TEST DI SW APPLICATI AI DUE CAMPIONI (GRUPPO A – CONTENENTE 15 VALORI DI FS, GRUPPO B – CONTENENTE 45 VALORI DI FS CON VBP=40%). 120
TABELLA 6.6– RISULTATI DEL TEST DI STUDENT PER A=0,05. 125
TABELLA 6.7– RISULTATI DEL TEST DI STUDENT PER A=0,01. 125

Allegato I

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            GENERAZIONE CASUALE DI BLOCCHI ALL'INTERNO DEL DOMINIO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc;
%
tic;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                              CARATTERISTICHE PENDIO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% dimensioni del dominio, unità in m
B  = 150;   % base del dominio
H  = 100;   % altezza totale del dominio
L1 = 50;   % dall'estremo del dominio all'inizio del pendio (sx--->dx)
L2 = 100;   % dall'estremo del dominio alla fine del pendio (sx--->dx)
L3 = 50;   % dalla base del pendio alla fine del dominio (a dx)
Lp = 50;    % larghezza sull'orizzontale del pendio
H1 = 50;    % dimensione caratteristica altezza del pendio
H2 = 50;    % altezza dall'estremo del dominio alla base del pendio
%
A  = (L1*H)+(1/2*Lp*H1)+(Lp*H2)+(L3*H2);    % Area

% 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 l'altezza del pendio (H1)
a     = 0.05*H1;
b     = 0.75*H1;
F     = 0:0.0001:1;
q     = -1.99;
```

```
dp    = ((-F*((a^(1+q))-(b^(1+q))))+(a^(1+q))).^(1/(1+q));

%distanza minima tra 2 blocchi e tra blocchi e dominio
toll_pos = 0.10;
F2 = F.*100;
figure(1)
plot(dp,F2)
 title('Distribuzione dei blocchi in termini probabilistici');
   xlabel('D. blocchi (m)');
   ylabel('Probabilità (%)');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                                             Distribuzione dimensionale blocchi
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

d_medio = zeros([],2); %vettore con asse maggiore e asse minore di ogni ellisse
vv    = 0;
i     = 0;

       while vv<=(PV*A-toll*A)
     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,

     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

     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;
       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
          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)');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                              Verifica della dimensione frattale
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% generazione delle classi
node = 0.04*sqrt(A);
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= cont_2 + 1;
    cont_2 = classe_2;
  end
  if (node_classe_3<do(i,1)) && (node_classe_4>do(i,1))
    classe_3= cont_3 + 1;
    cont_3 = classe_3;
  end
  if (node_classe_4<do(i,1)) && (node_classe_5>do(i,1))
    classe_4= 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
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 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)=30;
   R = rotx(ang(idx));
```

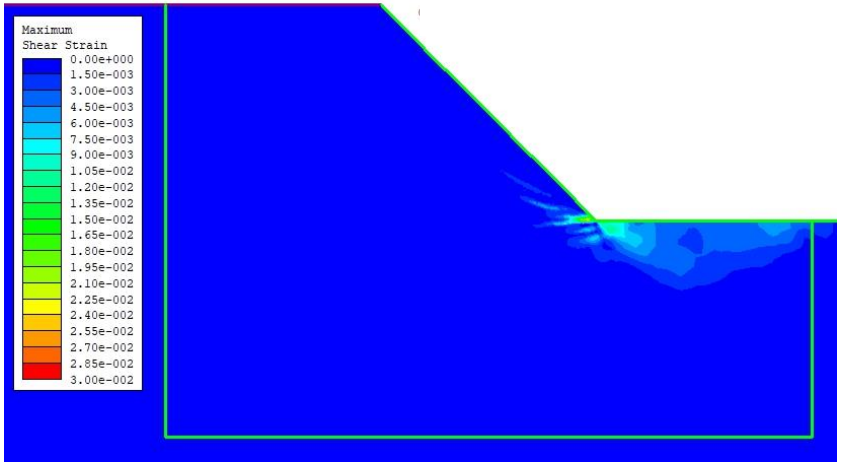
```
% generate random positions and radii until we have a hit
while ~is_good
matrix=zeros(length(ta),n-1); %matrice per calcoli di verifica non inters ellissi
    %%%% genero coordinate random del centro dell'ellisse idx
    pos(idx,1)=rand(1)*B;
    %%%% genero le coordinate dei punti di contorno dell'ellisse 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)
      if pos(idx,1)<=L1
         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)<=L1
            vetymax(iii)=H;
            else
            vetymax(iii)=H2+(L1+Lp-Pkx(iii,idx))*(H-H2)/Lp;
            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)>= L2
        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)>=L2
            vetymax(iii)=H2;
            else
            vetymax(iii)=H2+(L1+Lp-Pkx(iii,idx))*(H-H2)/Lp;
            end
```

```
            end
            while er==1
            pos(idx,2) = rand(1)*H2;
            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)>L1 && pos(idx,1)<L2
            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)>=L2
                vetymax(iii)=H2;
                elseif Pkx(iii,idx)<=L1
                vetymax(iii)=H1;
                else
                vetymax(iii)=H2+(L1+Lp-Pkx(iii,idx))*(H-H2)/Lp;
                end
            end
            while er==1
            pos(idx,2) = rand(1)*(H2+(L1+Lp-pos(idx,1))*(H-H2)/Lp);
            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
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 non ruotate
            DumF1 = R*[0 posF1(idx,2) posF1(idx,1)]';
            DumF2 = R*[0 posF2(idx,2) posF2(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
```

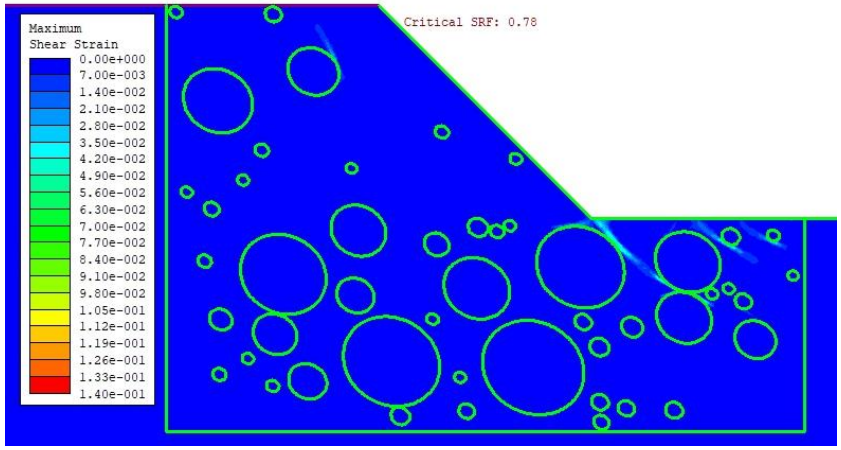
```
            matrix(:,j)=((Pkx(:,idx)-posF1(j,1)).^2+(Pky(:,idx)-posF1(j,2)).^2).^0.5+
      +((Pkx(:,idx)-posF2(j,1)).^2+(Pky(:,idx)-posF2(j,2)).^2).^0.5-2*radiix(j)-3*toll_pos;
            end

          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 L1 (L1+Lp) B B 0];
coordy=[0 H H H2 H2 0 0 ];
figure(5)
plot(coordx,coordy)

%%%%%da sistemare
m=[Pkx(1,:)',Pky(1,:)',Pkx(101,:)',Pky(101,:)',radiiy];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                               Generazione file di coordinate
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
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);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                              Controllo percentuale volumetrica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
format long
PV
test=vv/A
```

Allegato II

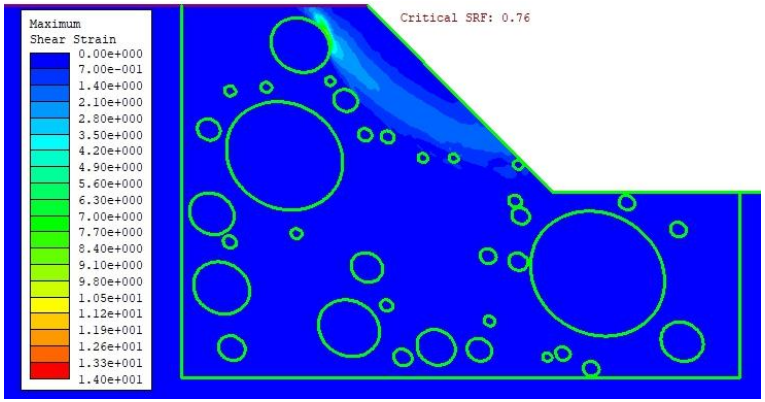
VBP=0% - Matrice



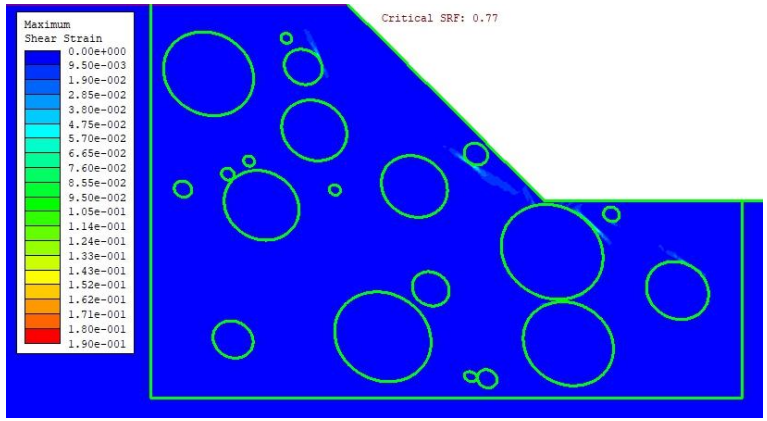
VBP=25% - N°1



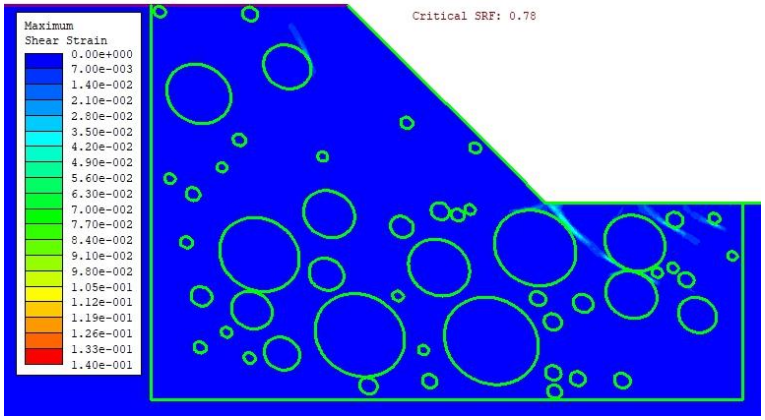
VBP=25% - N°2



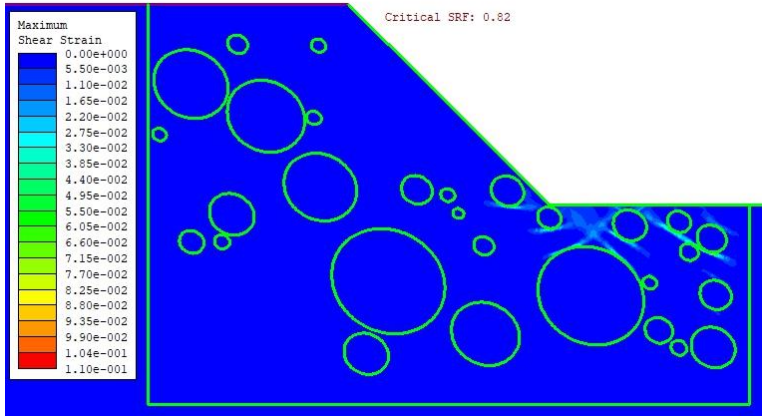
VBP=25% - N°3



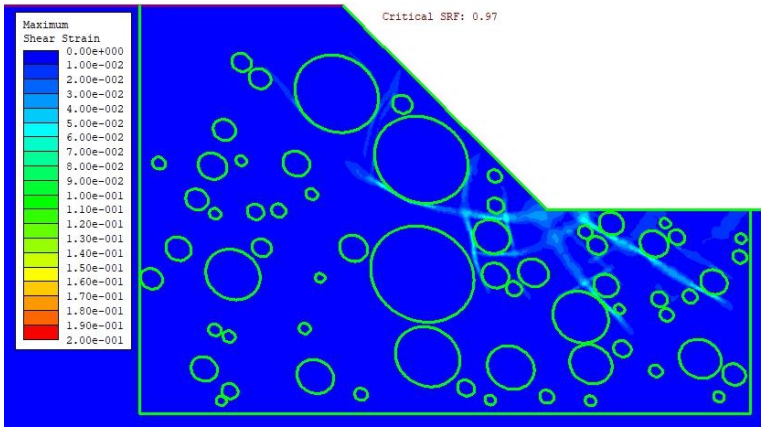
VBP=25% - N°4



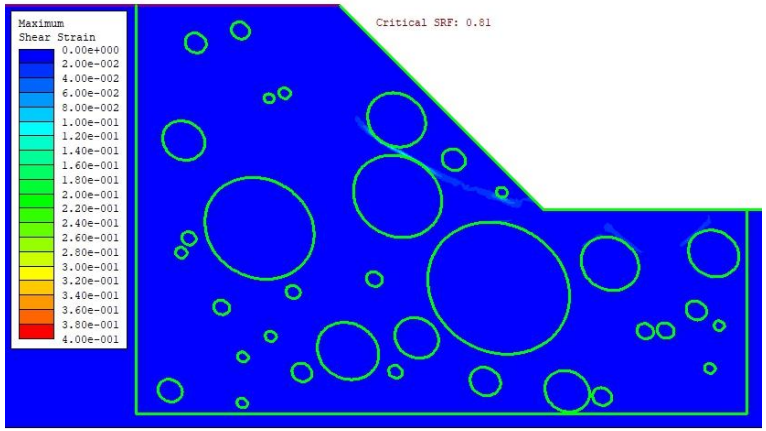
VBP=25% - N°5



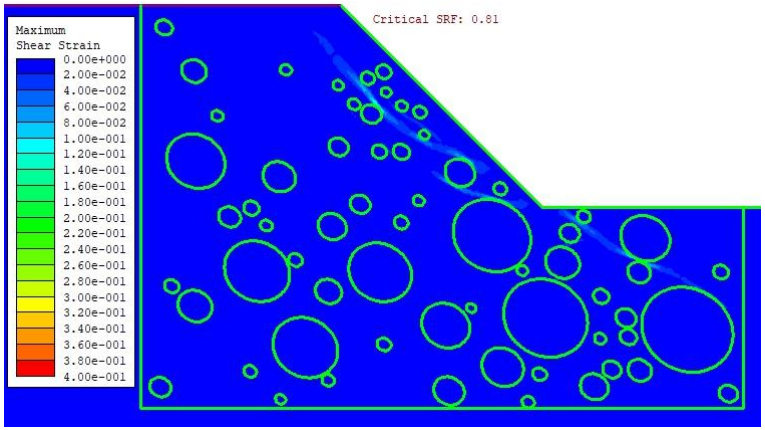
VBP=25% - N°6



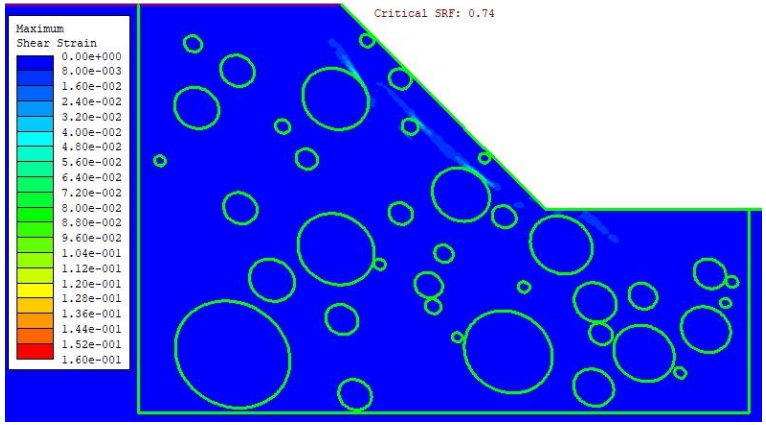
VBP=25% - N°7



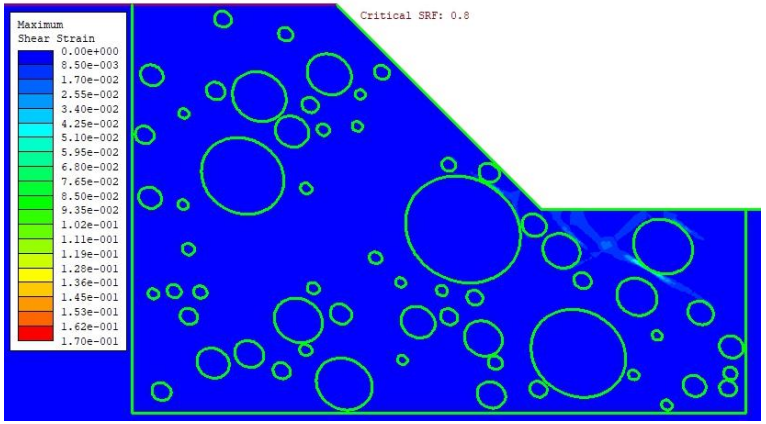
VBP=25% - N°8



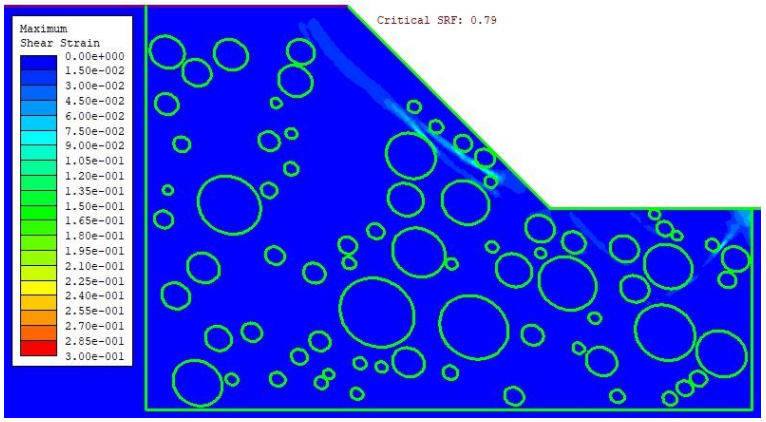
VBP=25% - N°9



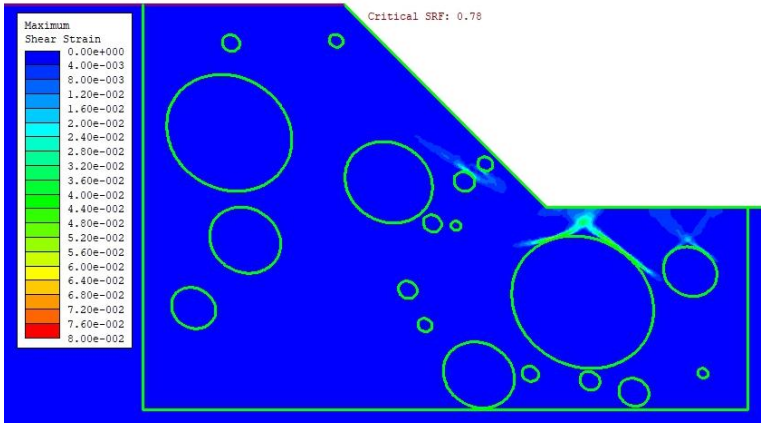
VBP=25% - N°10



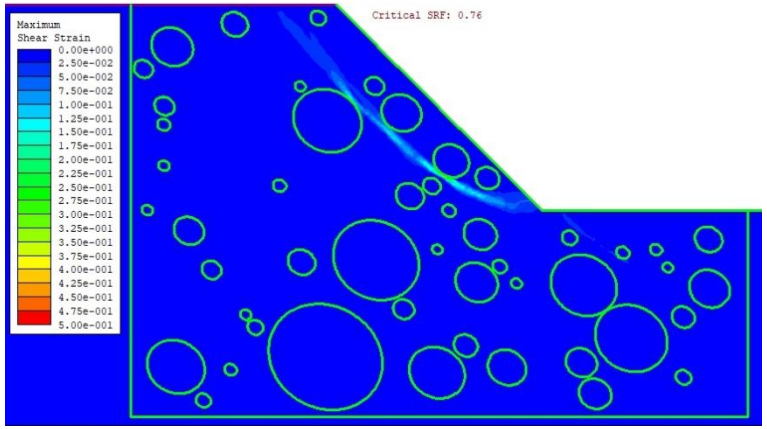
VBP=25% - N°11



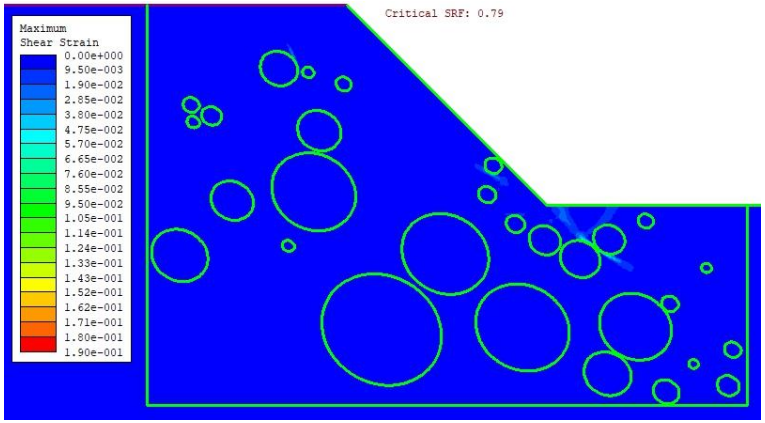
VBP=25% - N°12



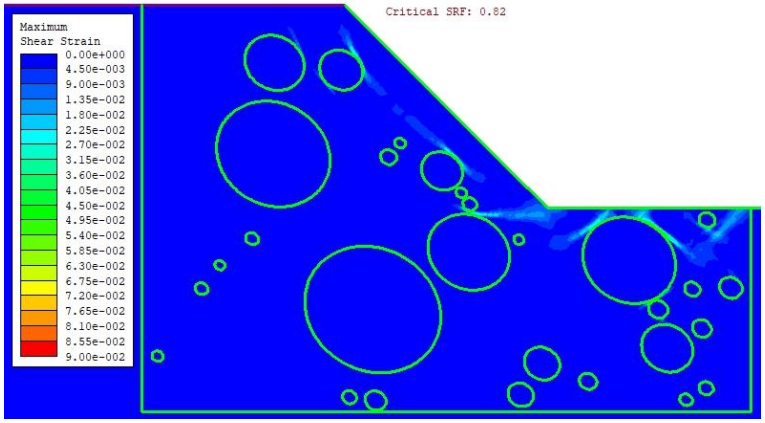
VBP=25% - N°13



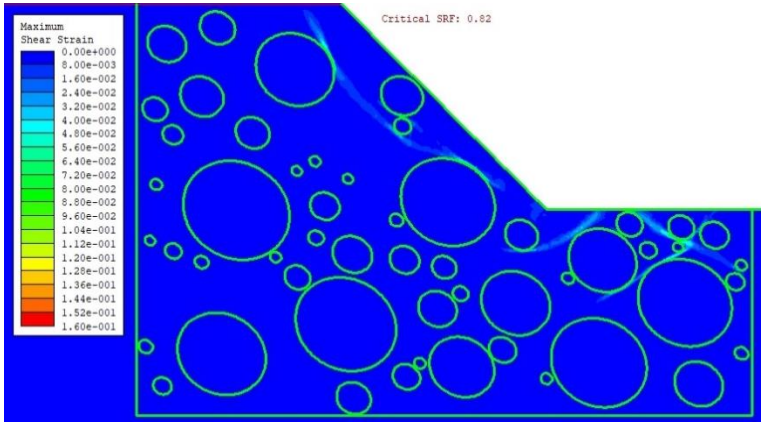
VBP=25% - N°14



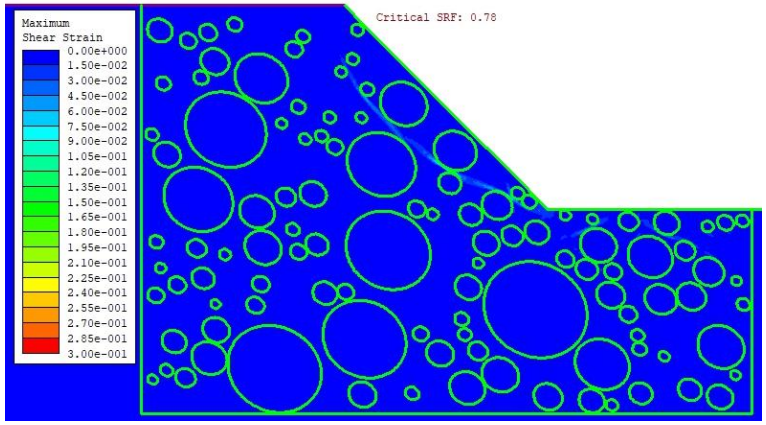
VBP=25% - N°15



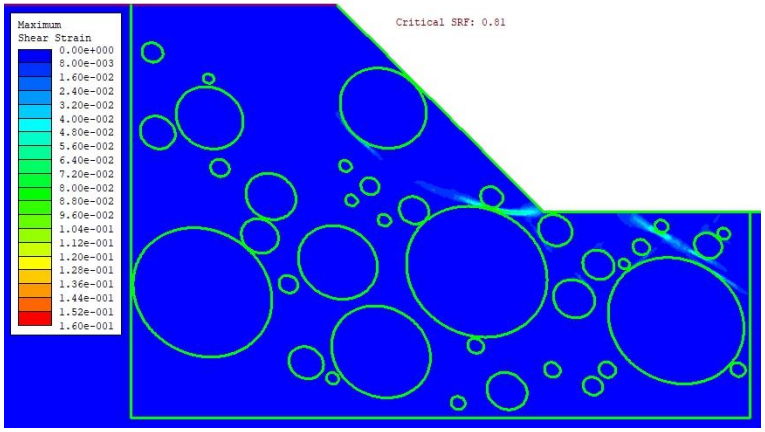
VBP=40% - N°1



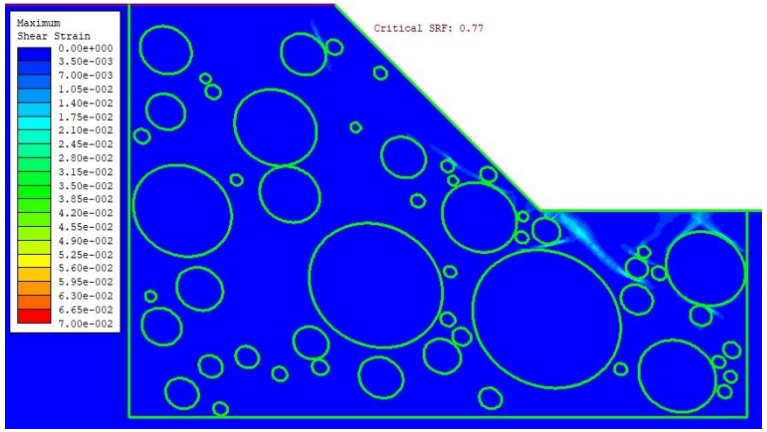
VBP=40% - N°2



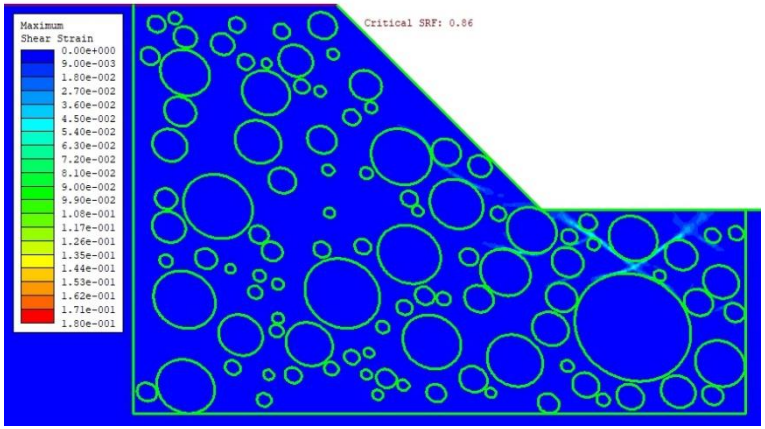
VBP=40% - N°3



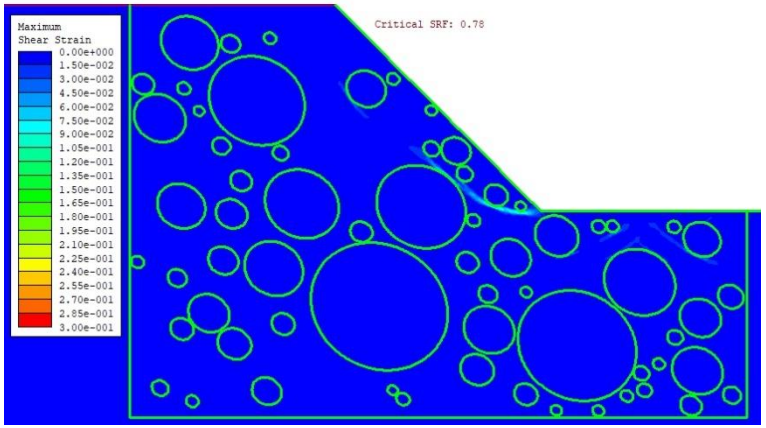
VBP=40% - N°4



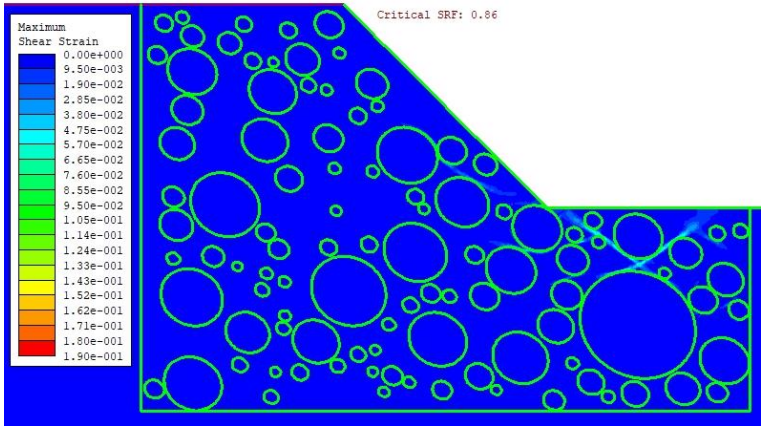
VBP=40% - N°5



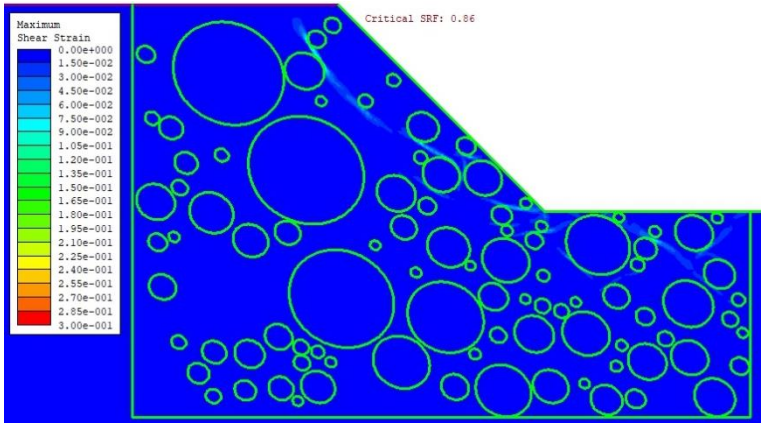
VBP=40% - N°6



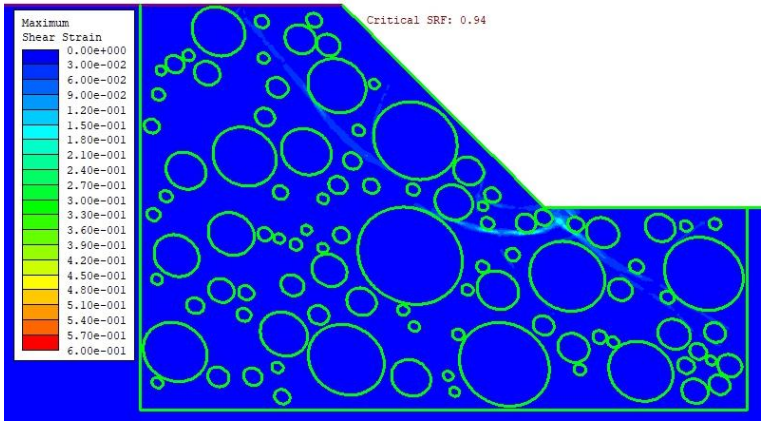
VBP=40% - N°7



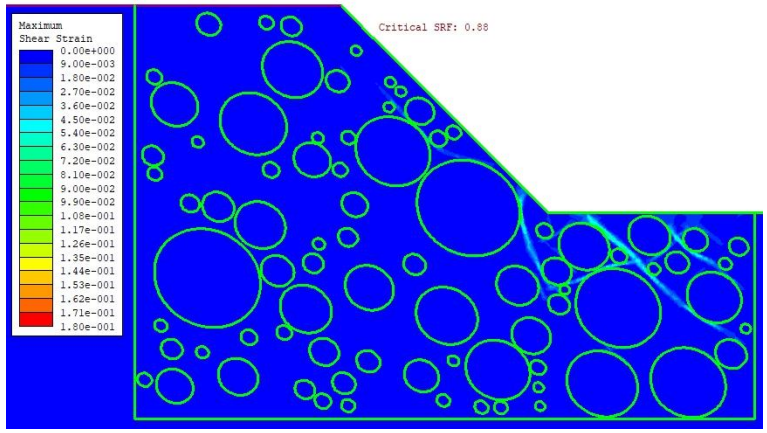
VBP=40% - N°8



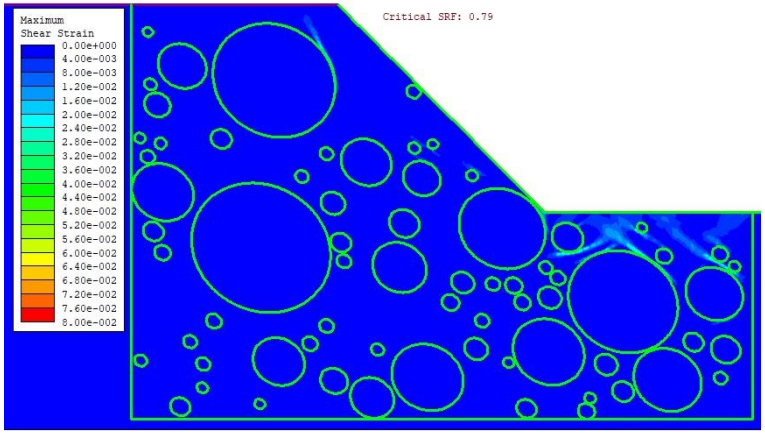
VBP=40% - N°9



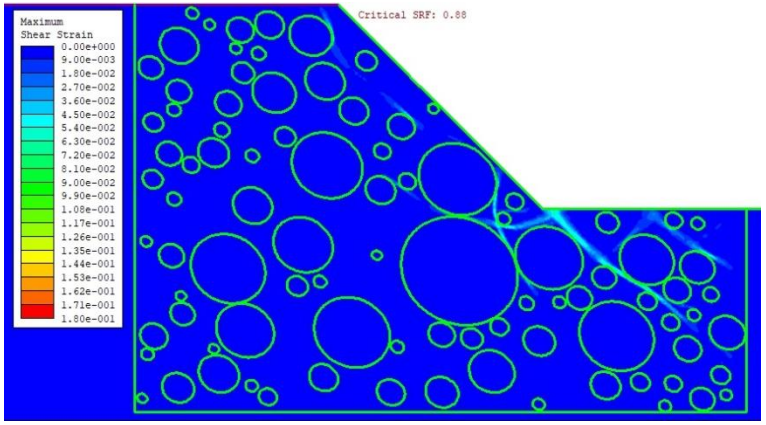
VBP=40% - N°10



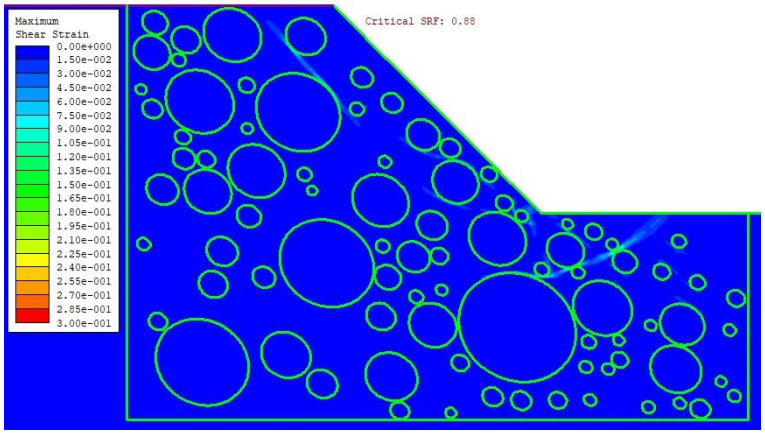
VBP=40% - N°11



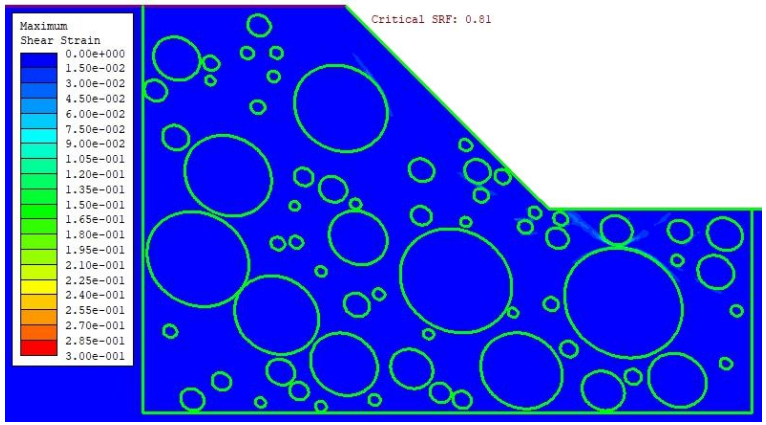
VBP=40% - N°12



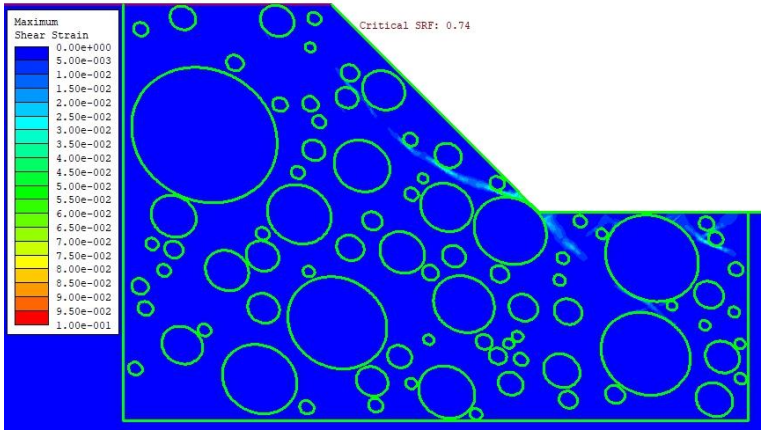
VBP=40% - N°13



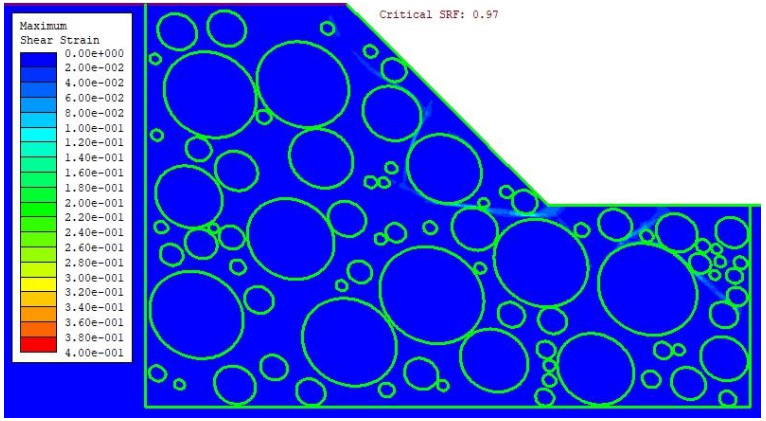
VBP=40% - N°14



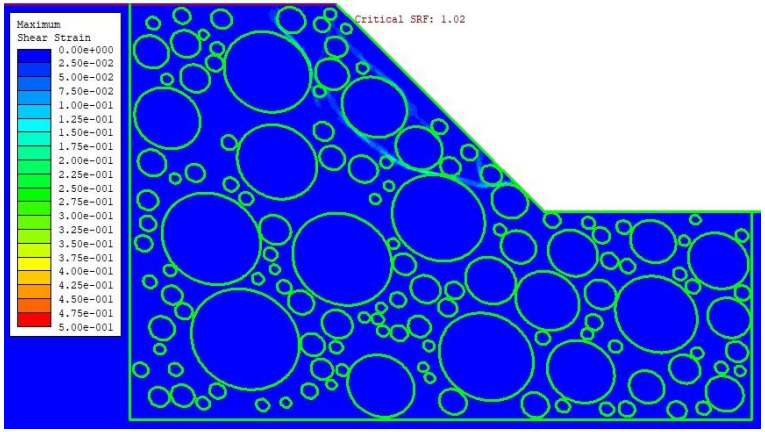
VBP=40% - N°15



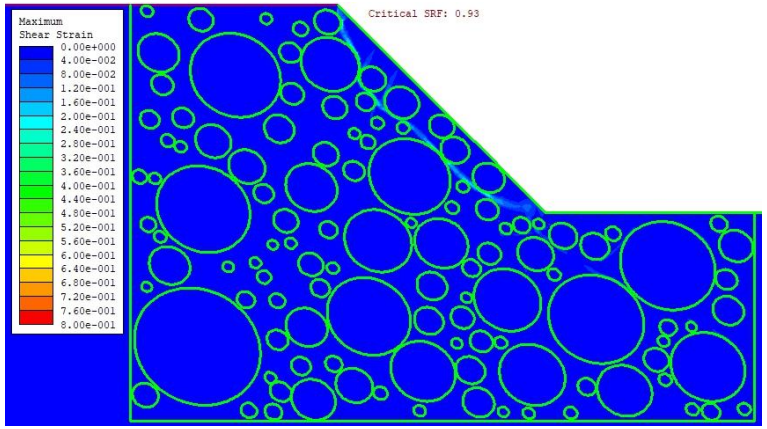
VBP=55% - N°1



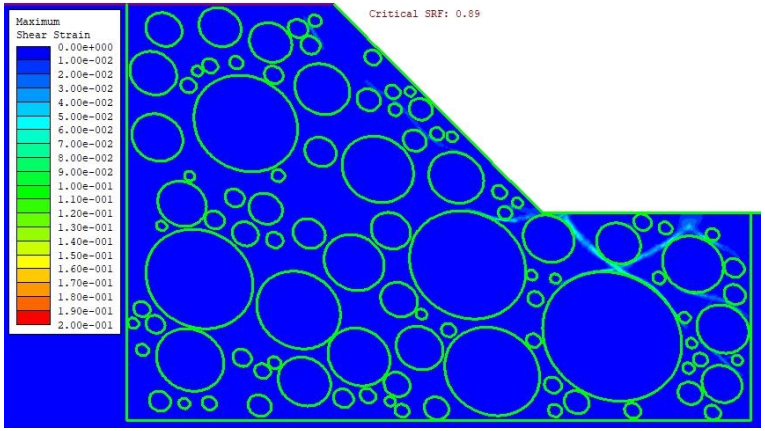
VBP=55% - N°2



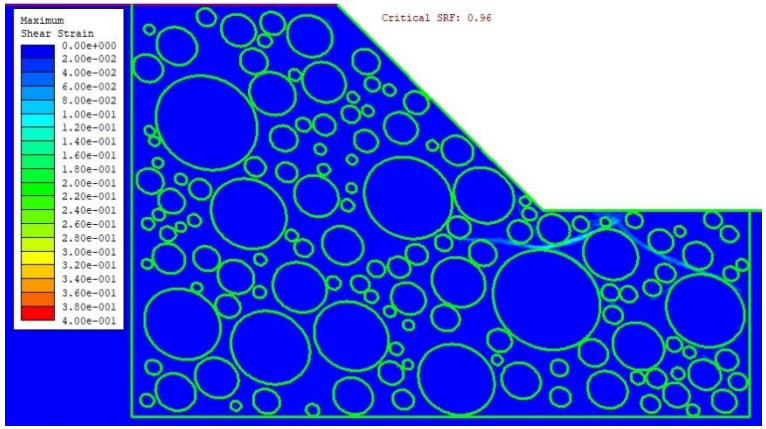
VBP=55% - N°3



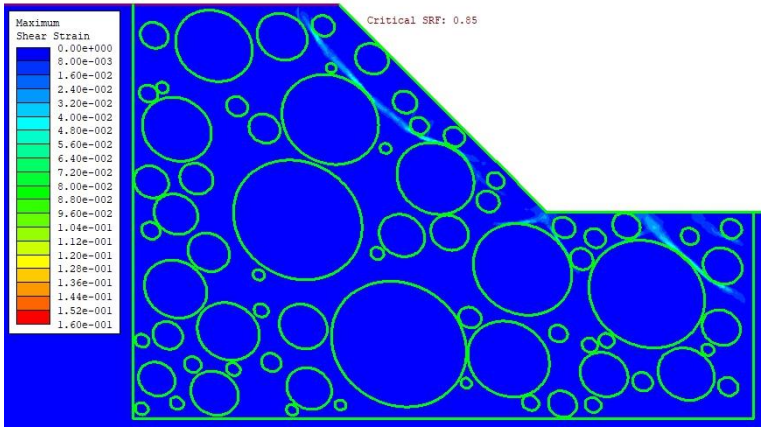
VBP=55% - N°4



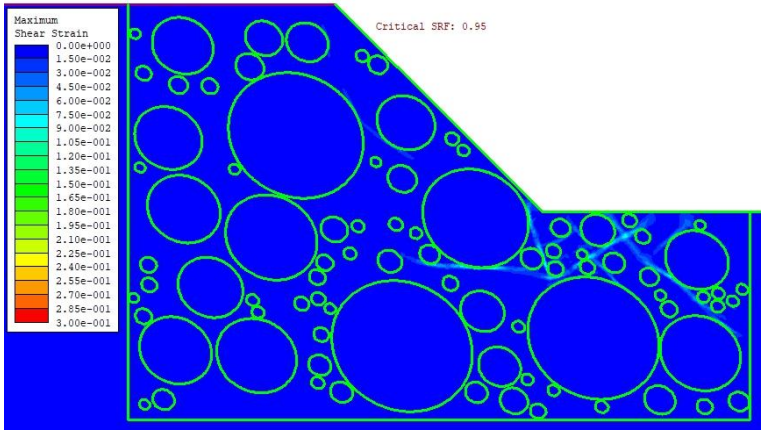
VBP=55% - N°5



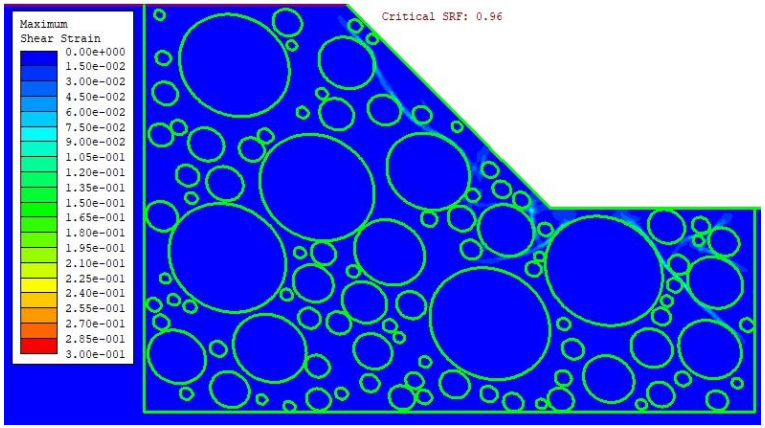
VBP=55% - N°6



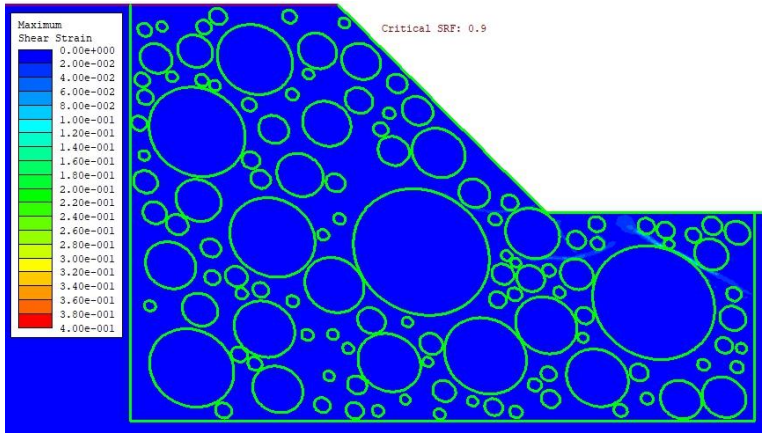
VBP=55% - N°7



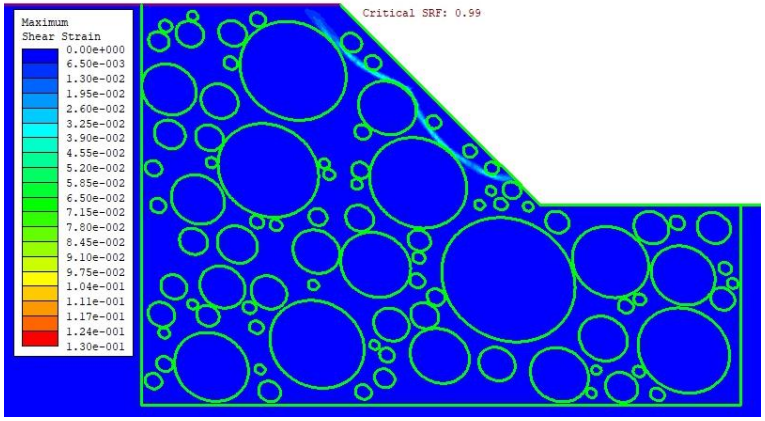
VBP=55% - N°8



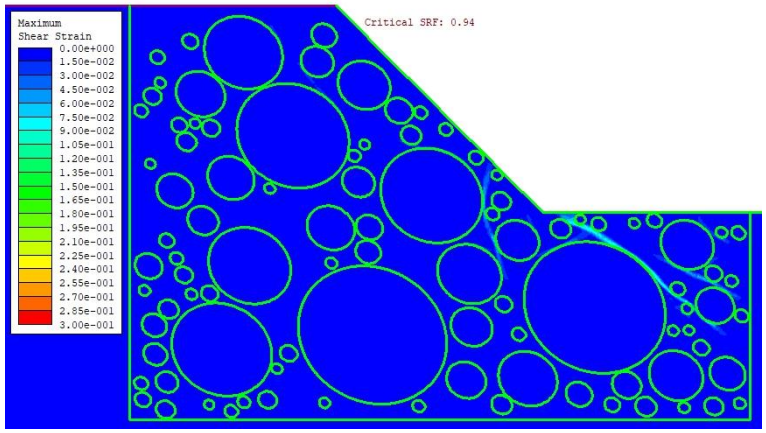
VBP=55% - N°9



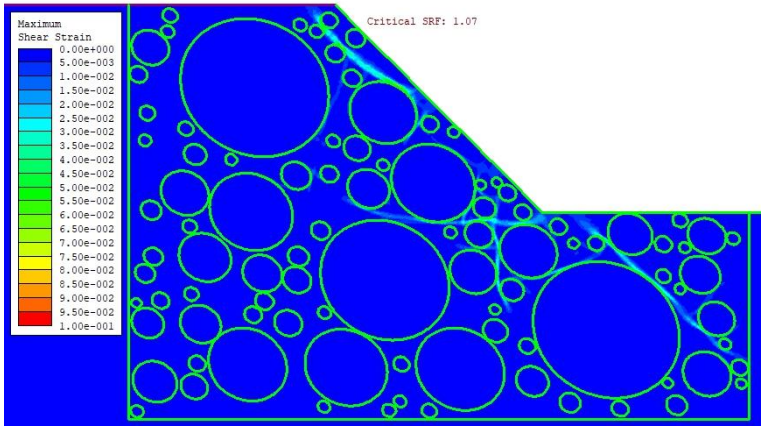
VBP=55% - N°10



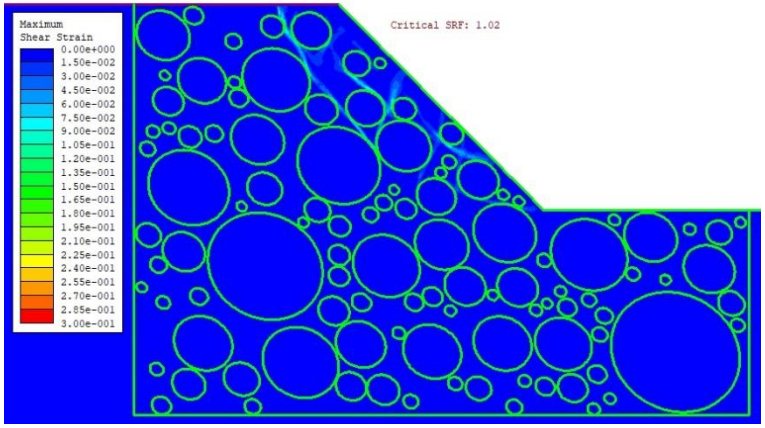
VBP=55% - N°11



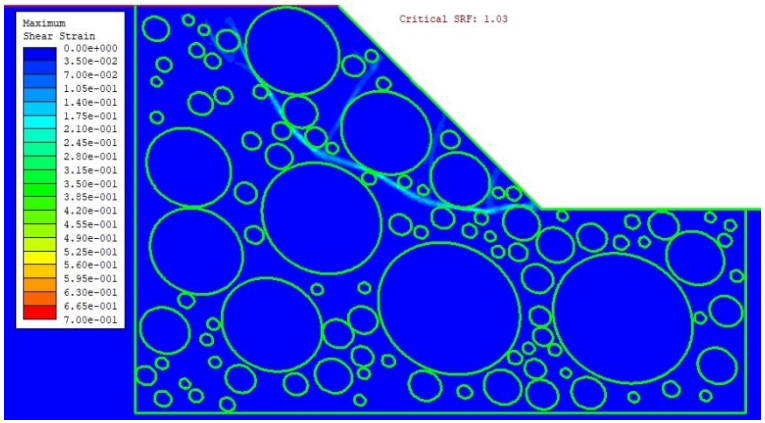
VBP=55% - N°12



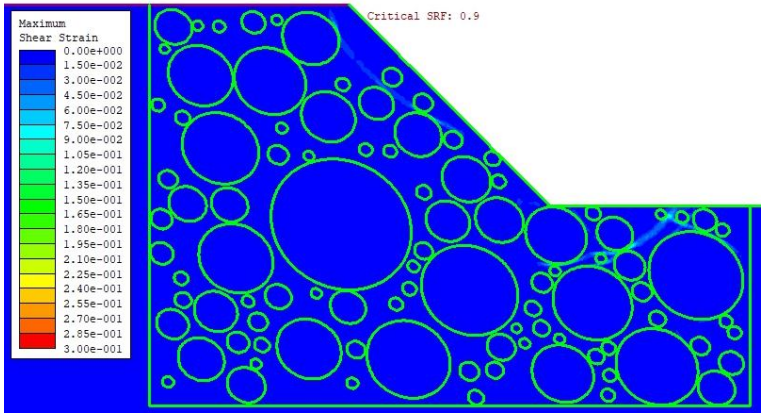
VBP=55% - N°13



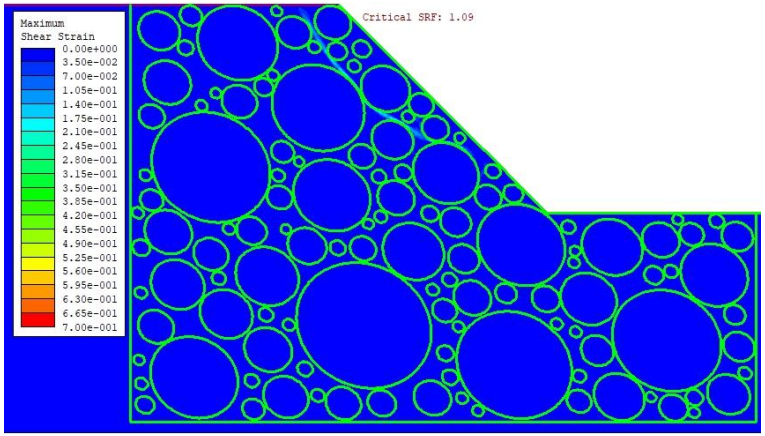
VBP=55% - N°14



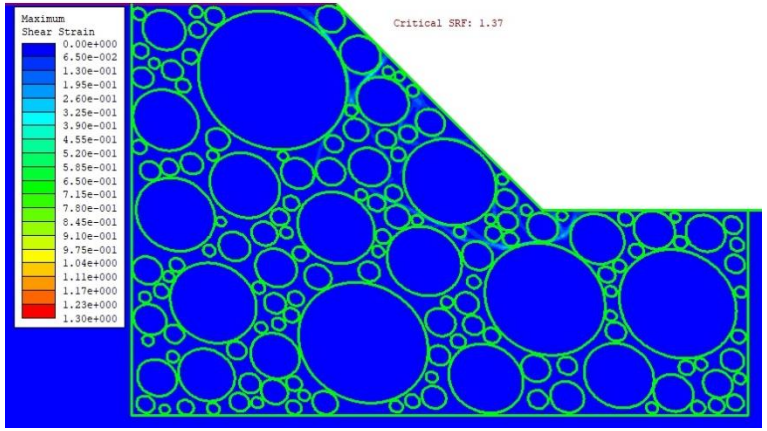
VBP=55% - N°15



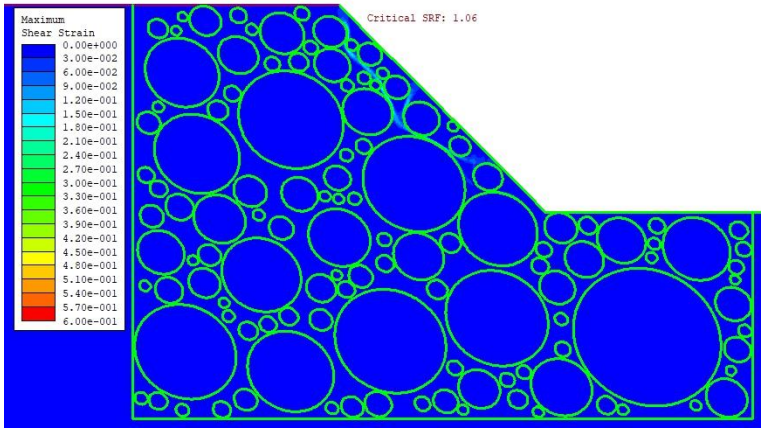
VBP=70% - N°1



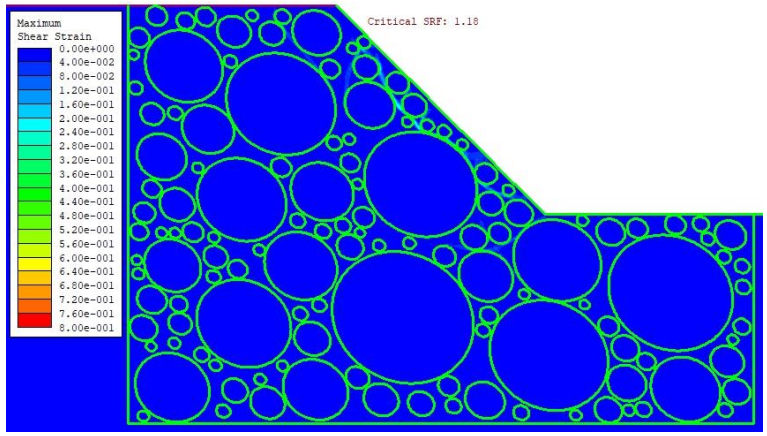
VBP=70% - N°2



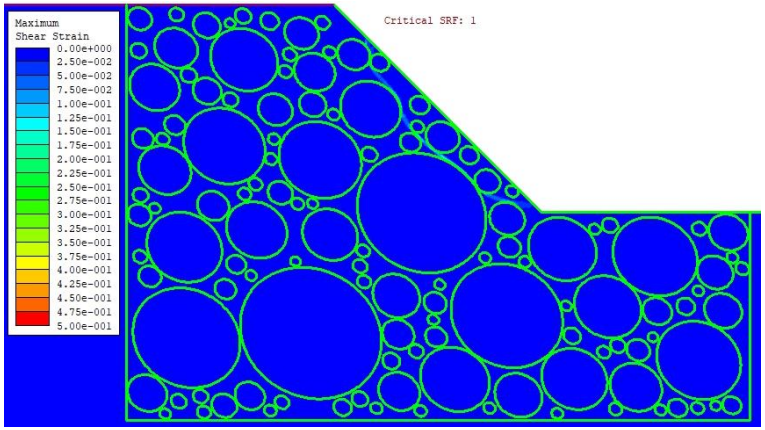
VBP=70% - N°3



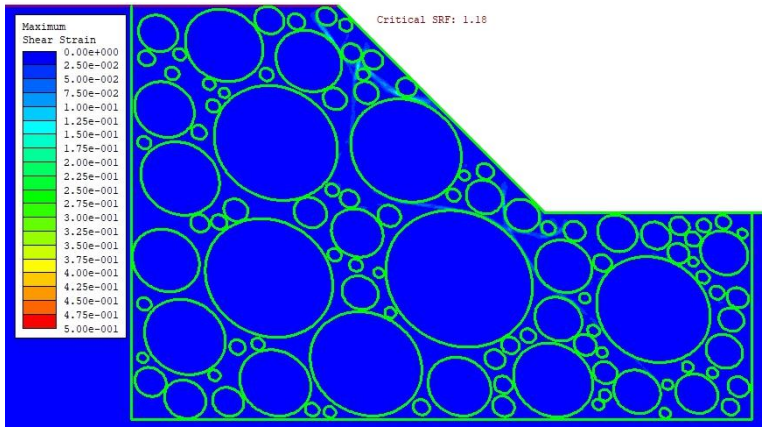
VBP=70% - N°4



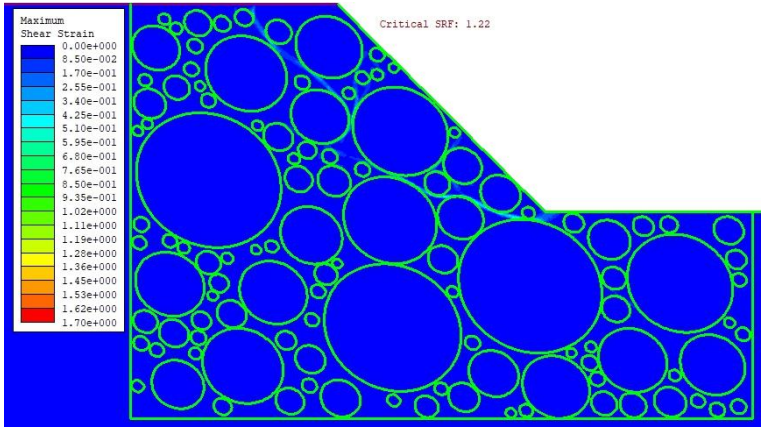
VBP=70% - N°5



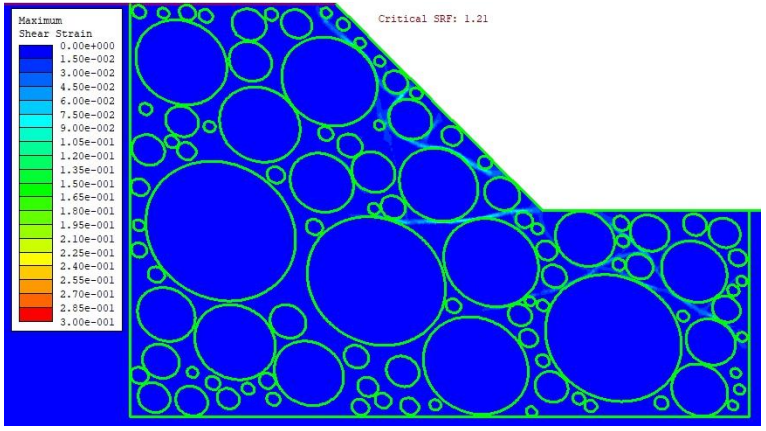
VBP=70% - N°6



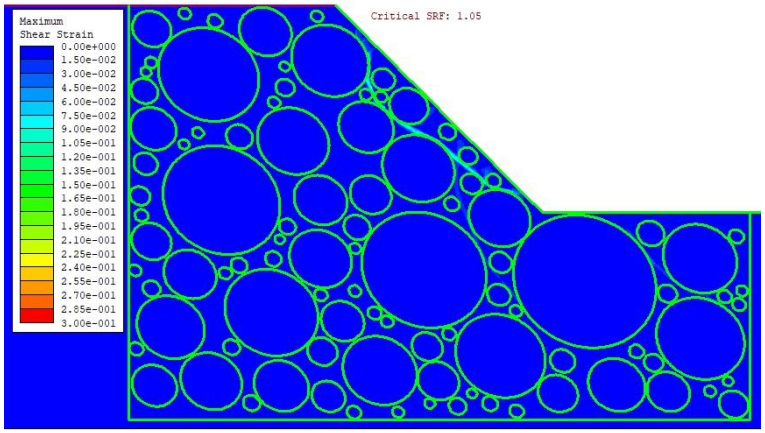
VBP=70% - N°7



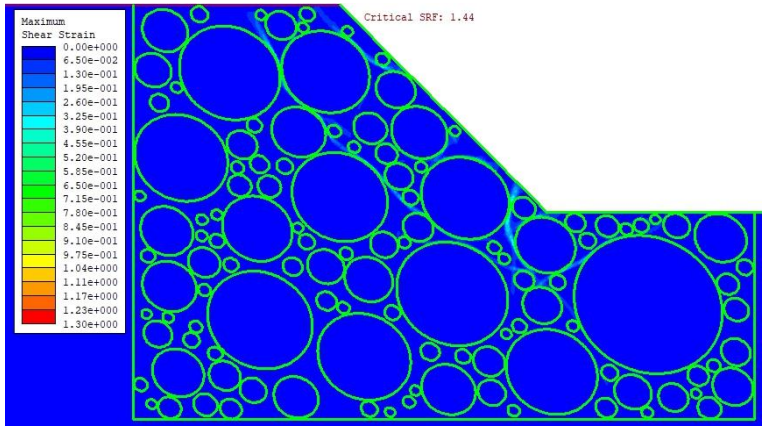
VBP=70% - N°8



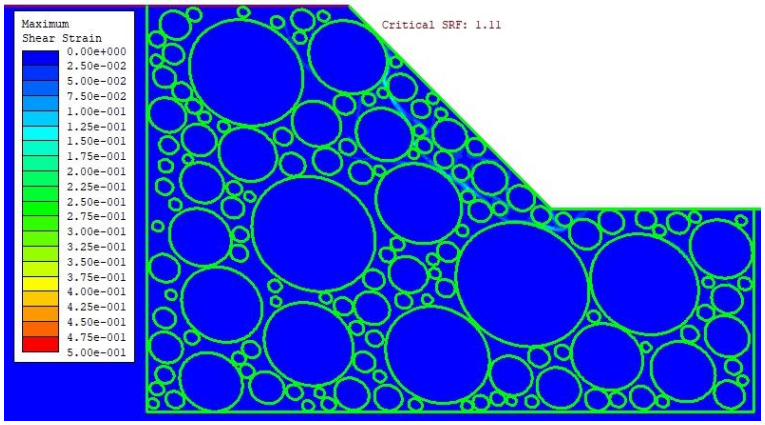
VBP=70% - N°9



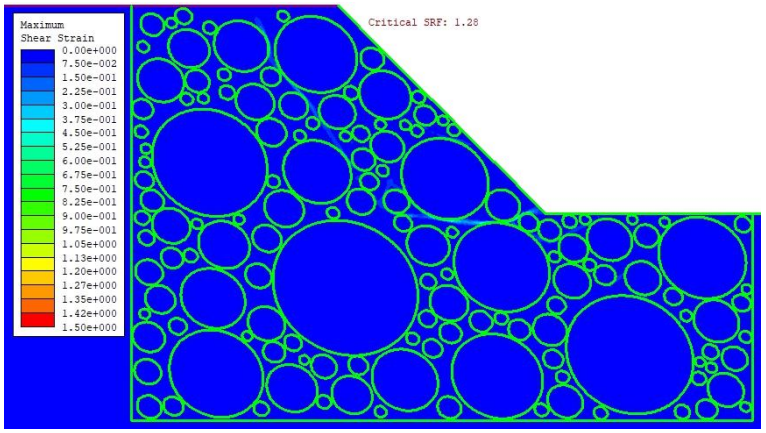
VBP=70% - N°10



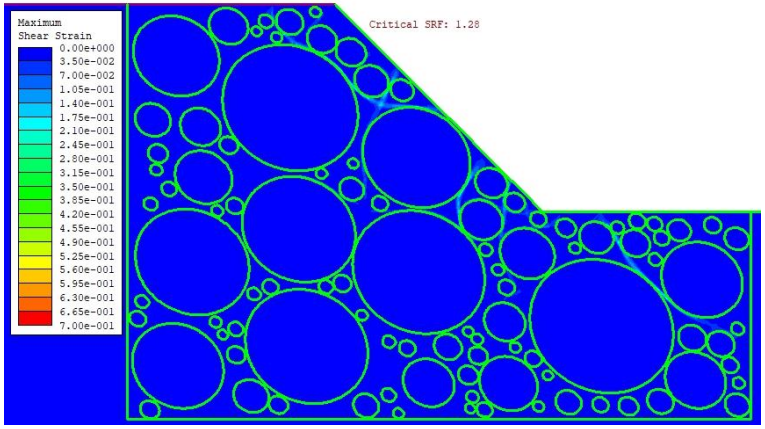
VBP=70% - N°11



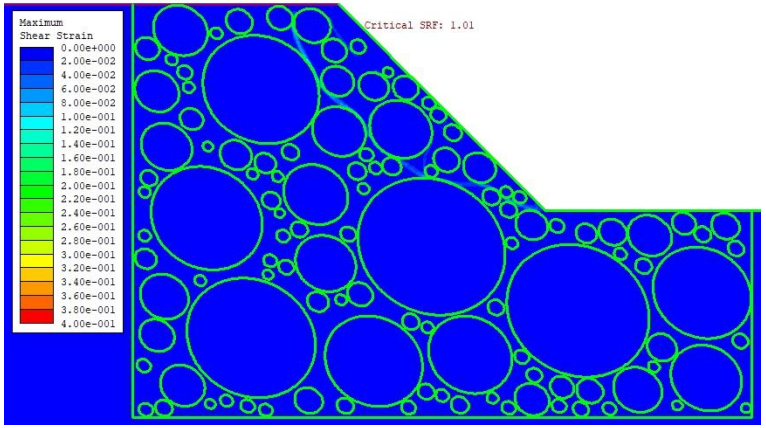
VBP=70% - N°12



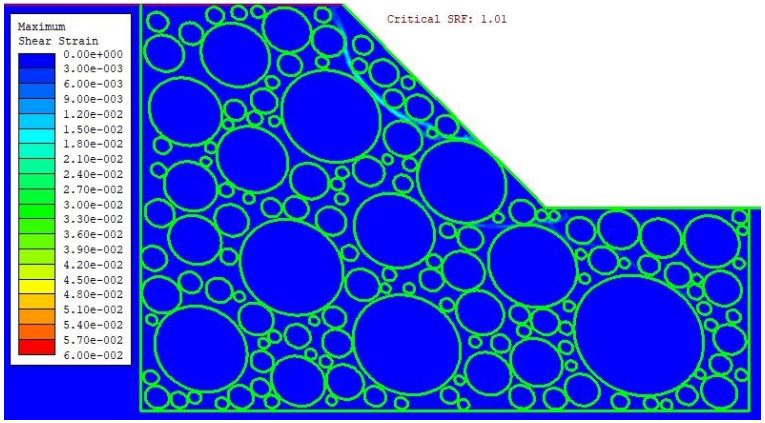
VBP=70% - N°13



VBP=70% - N°14

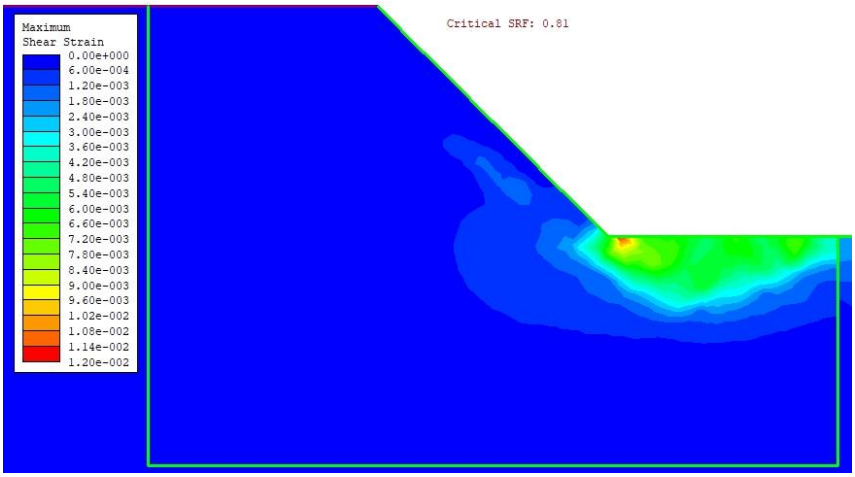


VBP=70% - N°15

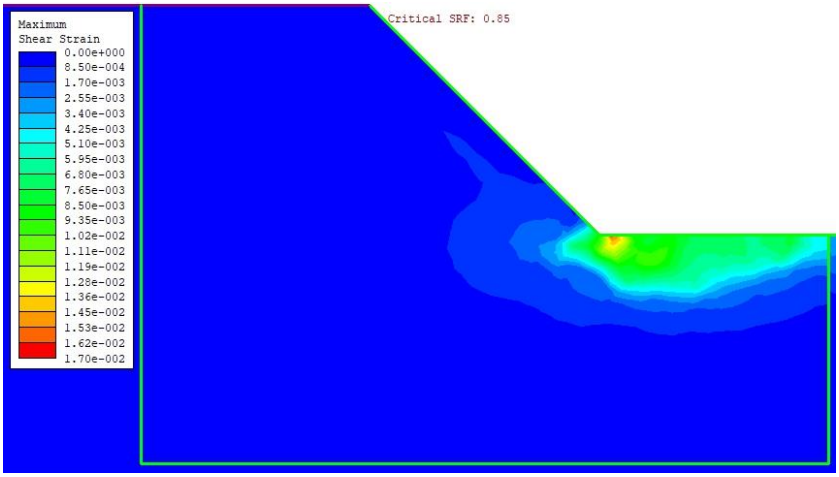


Allegato III

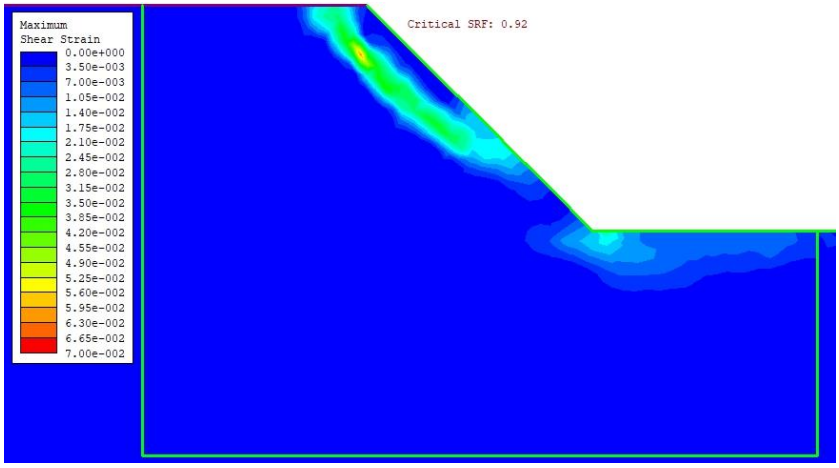
Lindquist – VBP=40%



Lindquist – VBP=55%

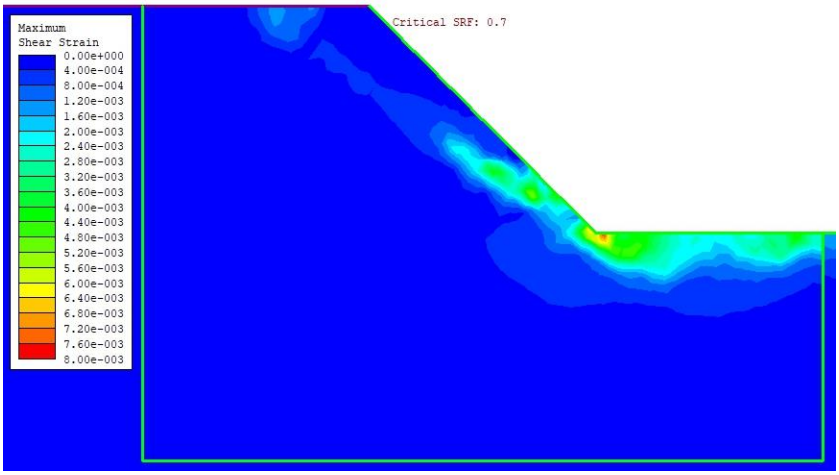


Lindquist – VBP=70%

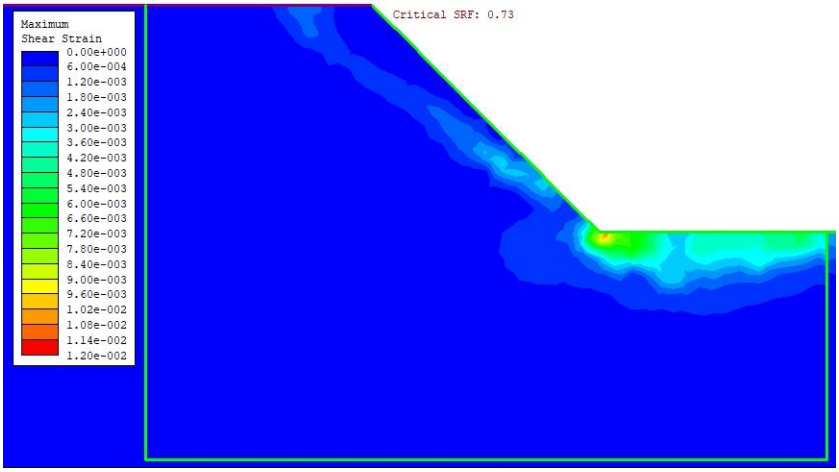


Allegato IV

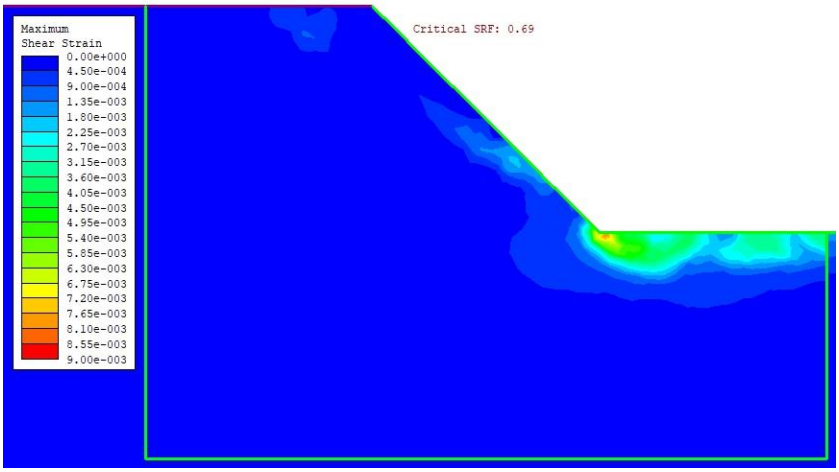
Kalender – VBP=25%



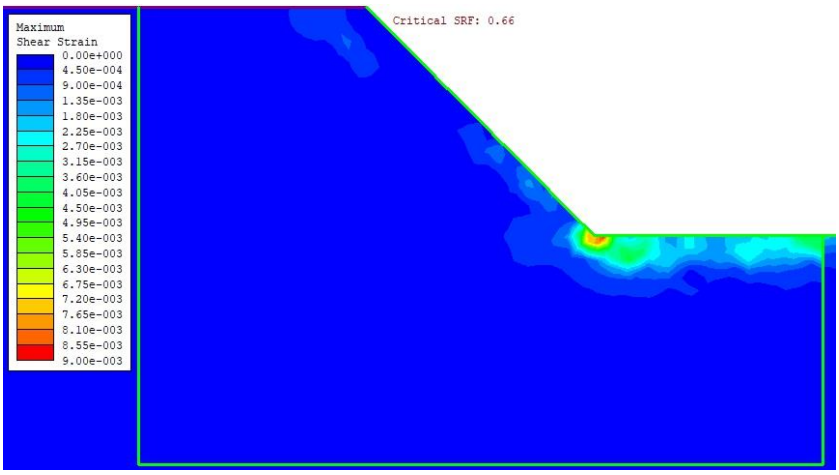
Kalender – VBP=40%



Kalender – VBP=55%



Kalender – VBP=70%



Allegato V

Applicazione Teorema del Limite Centrale

1° Gruppo	N°Analisi	x	μ	x^2	M^2	varianza	RSD	1/sqrt(N)
	1	0,82	0,82	0,67	0,67	0,00E+00	0,00E+00	1,00
	2	0,78	0,80	0,61	0,64	4,00E-04	1,77E-02	0,71
	3	0,81	0,80	0,66	0,65	2,89E-04	1,22E-02	0,58
	4	0,77	0,80	0,59	0,63	4,25E-04	1,30E-02	0,50
	5	0,86	0,81	0,74	0,65	1,02E-03	1,76E-02	0,45
	6	0,78	0,80	0,61	0,65	9,56E-04	1,57E-02	0,41
	7	0,86	0,81	0,74	0,66	1,21E-03	1,62E-02	0,38
	8	0,86	0,82	0,74	0,67	1,32E-03	1,57E-02	0,35
	9	0,94	0,83	0,88	0,69	2,65E-03	2,07E-02	0,33
	10	0,88	0,84	0,77	0,70	2,60E-03	1,93E-02	0,32
	11	0,79	0,83	0,62	0,69	2,54E-03	1,83E-02	0,30
	12	0,88	0,84	0,77	0,70	2,51E-03	1,73E-02	0,29
	13	0,88	0,84	0,77	0,71	2,45E-03	1,64E-02	0,28
	14	0,81	0,84	0,66	0,70	2,33E-03	1,54E-02	0,27
2° Gruppo	15	0,74	0,83	0,55	0,69	2,77E-03	1,63E-02	0,26
	16	0,88	0,83	0,77	0,70	2,74E-03	1,57E-02	0,25
	17	0,74	0,83	0,55	0,69	3,06E-03	1,62E-02	0,24
	18	0,79	0,83	0,62	0,69	2,97E-03	1,55E-02	0,24
	19	0,89	0,83	0,79	0,69	3,02E-03	1,52E-02	0,23
	20	0,78	0,83	0,61	0,69	2,98E-03	1,48E-02	0,22
	21	0,92	0,83	0,85	0,69	3,23E-03	1,49E-02	0,22
	22	0,83	0,83	0,69	0,69	3,08E-03	1,42E-02	0,21
	23	0,76	0,83	0,58	0,69	3,16E-03	1,42E-02	0,21
	24	0,88	0,83	0,77	0,69	3,14E-03	1,38E-02	0,20
	25	0,86	0,83	0,74	0,69	3,05E-03	1,33E-02	0,20
	26	0,83	0,83	0,69	0,69	2,93E-03	1,28E-02	0,20
	27	0,83	0,83	0,69	0,69	2,82E-03	1,23E-02	0,19
	28	0,83	0,83	0,69	0,69	2,72E-03	1,19E-02	0,19
	29	0,77	0,83	0,59	0,69	2,75E-03	1,17E-02	0,19
	30	0,78	0,83	0,61	0,69	2,74E-03	1,15E-02	0,18

2° Gruppo	N°Analisi	x	μ	x^2	M^2	varianza	RSD	1/sqrt(N)
	31	0,78	0,83	0,61	0,69	2,72E-03	1,13E-02	0,18
	32	0,85	0,83	0,72	0,69	2,65E-03	1,10E-02	0,18
	33	0,82	0,83	0,67	0,69	2,57E-03	1,07E-02	0,17
	34	0,88	0,83	0,77	0,69	2,58E-03	1,05E-02	0,17
	35	0,82	0,83	0,67	0,69	2,51E-03	1,02E-02	0,17
	36	0,82	0,83	0,67	0,69	2,44E-03	9,94E-03	0,17
	37	0,82	0,83	0,67	0,69	2,38E-03	9,68E-03	0,16
	38	0,83	0,83	0,69	0,69	2,31E-03	9,43E-03	0,16
	39	0,87	0,83	0,76	0,69	2,30E-03	9,26E-03	0,16
	40	0,84	0,83	0,71	0,69	2,24E-03	9,03E-03	0,16
	41	0,85	0,83	0,72	0,69	2,20E-03	8,83E-03	0,16
	42	0,89	0,83	0,79	0,69	2,23E-03	8,77E-03	0,15
	43	0,80	0,83	0,64	0,69	2,20E-03	8,62E-03	0,15
	44	0,79	0,83	0,62	0,69	2,19E-03	8,50E-03	0,15
3° Gruppo	45	0,84	0,83	0,71	0,69	2,14E-03	8,32E-03	0,15
	46	0,83	0,83	0,69	0,69	2,10E-03	8,14E-03	0,15
	47	0,78	0,83	0,61	0,69	2,10E-03	8,07E-03	0,15
	48	0,77	0,83	0,59	0,69	2,13E-03	8,05E-03	0,14
	49	0,92	0,83	0,85	0,69	2,26E-03	8,18E-03	0,14
	50	0,81	0,83	0,66	0,69	2,22E-03	8,04E-03	0,14
	51	0,78	0,83	0,61	0,69	2,22E-03	7,97E-03	0,14
	52	0,88	0,83	0,77	0,69	2,23E-03	7,90E-03	0,14
	53	0,86	0,83	0,74	0,69	2,21E-03	7,78E-03	0,14
	54	0,89	0,83	0,79	0,69	2,23E-03	7,74E-03	0,14
	55	0,84	0,83	0,71	0,69	2,19E-03	7,60E-03	0,13
	56	0,80	0,83	0,64	0,69	2,17E-03	7,50E-03	0,13
	57	0,79	0,83	0,62	0,69	2,16E-03	7,42E-03	0,13
	58	0,78	0,83	0,61	0,69	2,16E-03	7,37E-03	0,13
	59	0,87	0,83	0,76	0,69	2,16E-03	7,29E-03	0,13
	60	0,74	0,83	0,55	0,69	2,25E-03	7,40E-03	0,13

- x: variabile;
- μ: media;
- RSD: Relative Standard Deviation;
- N: dimensione del set di dati del campione;
- M^2: momento del II ordine.

$$M^2 = \frac{x_n + x_{n+1}}{n}$$

Vorrei ringraziare la Prof.ssa Monica Barbero e l'Ing. Maria Lia Napoli,
per il prezioso aiuto e la grande disponibilità.

Ringrazio Giuliana, Martina, Federica e Martina
per aver condiviso con me questo percorso.

Grazie alla mia famiglia,
per avermi sopportata, supportata ed incoraggiata.

Ad Andrea,
per avere sempre creduto in me
e per avermi insegnato a non mollare mai.

Riferimenti Bibliografici

[1] A.G.I. (1979). Some Italian experiences on the mechanical characterization of structurally complex Formations, Montreaux.

[2] Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., (2006). Analisi numeriche della stabilità di un versante in bimrock.

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

[4] Bottoli, D. (2014). "Confronto tra diversi tipi di test di normalitÃ, uno studio tramite metodo montecarlo."

[5] Coli, N., P. Berry, D. Boldini and R. Bruno (2011). "The contribution of geostatistics to the characterisation of some bimrock properties." Engineering geology 137: 53-63.

[6] Dapor, M. (2006). "Il metodo di Monte Carlo." Atti della accademia roveretana degli agiati. Classe di scienze matematiche, fisiche e naturali 6(256): 5-14.

[7] Irfan, T. and K. Tang (1993). Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department.

[8] Kalender, A., H. Sonmez, E. Medley, C. Tunusluoglu and K. E. Kasapoglu (2014). "An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils." Engineering Geology 183: 65-79.

[9] Li, X., Q. Liao and J. He (2004). "In situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the three gorges reservoir area, China." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(3): 494.

[10] Lindquist, E. (1994). The Strength and Deformation Properties of Melange. Department of Civil Engineering. P. D. dissertation. University of California, Berkeley.

[11] Medley, E. and R. E. Goodman (1994). Estimating the Block Volumetric Proportions of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks). 1st North American Rock Mechanics Symposium. Austin, Texas, American Rock Mechanics Association.

[12] Medley, E. and E. S. Lindquist (1995). The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan melanges in California, USA. The 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Reno, Nevada, American Rock Mechanics Association.

[13] Medley, E. W. (1994). "The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix (bimrocks)." Doctor of philosophy -university of California(Barkely).

[14] Medley, E. W. (1996). "The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)."

[15] Medley, E. W. (2001). "Orderly characterization of chaotic Franciscan Melanges." Felsbau Rock Soil Eng 19(4): 20-33.

[16] Medley, E. W. (2002). Estimating block size distributions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). Proc. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.

[17] Medley, E. W. (2004). "Observations on tortuous failure surfaces in Bimrocks." Felsbau Rock Soil Eng 5: 35-43.

[18] Medley, E. W. (2007). Bimrocks Article Part 2: Case Histories and Practical Guidelines. . Newsletter of HSSMGE. No. 8,.

[19] Medley, E. W. (2007). " Bimrocks Article Part 1: Introduction." Newsletter of HSSMGE No. 7.

[20] Medley, E. W. and P. F. S. Rehermann (2004). "Characterization of bimrocks (rock/soil mixtures) with application to slope stability problems."

[21] Medley, E. W. and D. Zekkos (2011). "Geopractitioner approaches to working with anti-social mélanges." Geological Society of America Special Papers 480: 261-277.

[22] Murray, S. (1976). Teoria e applicazioni della statistica, Etas Libri.

[23] Napoli, M. L., M. Barbero and C. Scavia (2018). "Uso di un approccio stocastico per l'analisi di stabilità di versanti in bimrock."

[24] Phase2 (201). "Theory documentations provided by the developers of the software

[25] " https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/tutorials/Phase2_Tutorials.htm.

[26] Riedmüller, G., F. J. Brosch, K. Klima and E. W. Medley (2001). "Engineering geological characterization of brittle faults and classification of fault rocks." Felsbau 19(4): 13-19.

[27] Rocscience (2004). "A new era in slope stability analysis: Shear strength reduction Finite Element Technique." RocNews: 2-9.

[28] Ross, S. M. (2008). Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze, Apogeo Editore.

[29] Sullivan, W. G., E. M. Wicks and J. T. Luxhoj (2006). Economia applicata all'ingegneria. Pearson Italia Spa.

[30] Turcotte, D. L. (1997). Fractals and chaos in geology and geophysics, Cambridge university press.