

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale



## **Studio delle formazioni complesse a blocco in matrice**

### **Relatori:**

Prof. Claudio Scavia

Prof.ssa Monica Barbero

Ing. Maria Lia Napoli

### **Candidato:**

Chiara Buemi

ANNO ACCADEMICO 2018 / 2019



# Indice

Introduzione .....	10
1. Bimrocks .....	11
1.1. Generalità.....	11
1.1.1. Caratterizzazione strutturale .....	12
1.1.2. Dimensione rappresentativa dei Blocchi .....	14
1.1.3. Definizione della lunghezza caratteristica .....	16
1.1.4. Metodologie di indagine per la valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi.....	17
1.1.5. Risultati del modello di Medley.....	21
1.2. Caratterizzazione meccanica.....	23
1.2.1. Il modello di Lindquist .....	24
1.2.2. Studi sulla tortuosità della superficie di rottura .....	27
1.2.3. Approccio di Kalender et al. ....	30
1.3. Caratterizzazione meccanica mediante analisi numerica.....	34
2. Case histories: Coleman beach e diga Scott .....	39
3. Mélange dell’Oltrepò Pavese.....	43
3.1. Autosomiglianza e invarianza di scala.....	43
3.2. Stima della percentuale dei blocchi .....	52
4. Stabilità di versanti in bimrock .....	58
4.1. Analisi di stabilità mediante modellazione numerica .....	61
4.2. Analisi di stabilità mediante LEM e FEM .....	63
5. Analisi della stabilità di un versante con blocchi ellittici isoorientati .....	66
5.1. Creazione del modello geometrico .....	66
5.2. Modellazione agli elementi finiti.....	68
6. Risultati della modellazione numerica.....	72
6.1. Modelli con inclinazione dei blocchi di 30° .....	73
6.2. Inclinazione dei blocchi di 60° .....	79
6.3. Influenza della forma e inclinazione dei blocchi e confronti.....	82
Conclusioni .....	84
Bibliografia .....	86
Allegato 1: Verifica dell’autosomiglianza e calcolo della percentuale lineare .....	92

Allegato 2: Codice Matlab.....	106
Allegato 3: Massime deformazioni di taglio .....	115

## Indice delle figure

<i>Figura 1.1 Formazione complessa del “Franciscan mélange” nel Marin County a nord di San Francisco (Medley,2001).</i> .....	12
<i>Figura 1.2 Caratteristiche identificabili delle Bimrock (Wakabayashi and Medley,2004)</i> .....	13
<i>Figura 1.3 Confronto tra diametro del blocco e massima dimensione osservabile <math>d_{mod}</math> (Medley,2001).</i> .....	14
<i>Figura 1.4 Andamenti della distribuzione dei blocchi reale (3D) e quella ottenuta dai fori di sondaggio(1D).(Medley,2001)</i> .....	15
<i>Figura 1.5 Istogrammi su scala bi-logaritmica della dimensione dei blocchi nel Franciscan mélange, per due diverse scale di osservazione (Medley,1994).</i> .....	16
<i>Figura 1.6 Linee di scansione realizzate su una tipica immagine di mélange (Medley 2002).</i> .....	19
<i>Figura 1.7 Valori di percentuale lineare che variano in un intervallo da 0% a 61%(Medley,1997).</i> .....	20
<i>Figura 1.8 Stima del fattore di incertezza nella valutazione della proporzione volumetrica (Medley,2001).</i> .....	20
<i>Figura 1.9 Frequenza relativa reale (3D) riportata con il colore nero e Frequenza relativa valutata con le linee di scansione riportava nei 4 diversi colori. (Medley 2002).</i> .....	22
<i>Figura 1.10 Confronto tra la frequenza relativa cumulata 3D e quella calcolata con le linee di scansione. (Medley,2002).</i> .....	23
<i>Figura 1.11 Pesi degli elementi che costituiscono la matrice e i blocchi (Lindquist,1994).</i> .....	24
<i>Figura 1.12 Schema dei diversi modelli realizzati da Lindquist (Lindquist,1994).</i> ..	25
<i>Figura 1.13 Variazione dell’angolo di attrito per i diversi VBP (Coli,2010).</i> .....	26
<i>Figura 1.14 Variazione della coesione per i diversi VBP (Coli,2010).</i> .....	26
<i>Figura 1.15 Proiezione sul piano della superficie cilindrica realizzata da Lindquist nel 1994, in blu vengono rappresentati i contatti blocchi matrice, in giallo la lunghezza della superficie di rottura,in rosso la superficie di rottura della sola matrice.(Medley,2004).</i> .....	28

<i>Figura 1.16 Andamenti delle superfici di rottura suddivise per percentuali volumetriche diverse confrontate con i profili di JRC. (Medley,2004).</i>	28
<i>Figura 1.17 Il grafico in alto esprime la variazione del rapporto <math>L'/L_0</math> per i diversi VBP, il grafico centrale esprime la variazione di rugosità per i diversi VBP, il grafico in basso esprime la variazione di <math>t/L'</math> per i diversi VBP. (Medley,2004).</i>	30
<i>Figura 1.18 Schema riassuntivo dei risultati ottenuti da Sonmez et al. e Coskun. (Sonmez,2009)</i>	31
<i>Figura 1.19 Andamento di UCS per il bimrock al variare di VBP (Kalender,2014).</i>	32
<i>Figura 1.20 Andamento della variazione del rapporto tra angolo di attrito del bimrock e della matrice al variare di VBP. (Kalender,2014).</i>	33
<i>Figura 1.21 Grafico con relativa linea guida per la valutazione del parametro A (Kalender,2014)</i>	33
<i>Figura 1.22 Variazione della resistenza a compressione non confinata all'aumentare di VBP. (Barbero et al.,2012).</i>	36
<i>Figura 1.23 Involuppi di rottura di Hoek &amp; Brown pe diversi VBP. (Barbero et al.,2012)</i>	36
<i>Figura 1.24 Istogramma di variazione di m e <math>\sigma_{ci}</math> per diverse percentuali volumetriche. (Barbero et al.,2012)</i>	37
<i>Figura 1.25 Rappresentazione dei provini con le relative aree plasticizzare di colore grigio scuro.(Barbero et al.,2012)</i>	38
<i>Figura 2.1 In alto vi è il profilo del versante con il presunto substrato roccioso individuato, in basso vi è il versante costituiti dai blocchi intersecati dai sondaggi esplorativi (Medley,2007).</i>	40
<i>Figura 2.2 Rappresentazione della sezione della diga Scott, la traccia rossa è un tipico sondaggio esplorativo, in blu vi è la fascia di taglio che causo lo scivolamento dell'opera. (Medley,2007).</i>	41
<i>Figura 2.3 Fotografia di un sondaggio realizzato presso la diga Scott (Medley,2007).</i>	41
<i>Figura 2.4 Calcolo della proporzione lineare dei blocchi, in arancione vi è l'intersezione del sondaggio con i blocchi, TD è la lunghezza del foro di sondaggio.(Medley,2008).</i>	42

<i>Figura 2.5 Andamento che dimostra l'incremento dell'angolo di attrito all'aumentare di VBP, i risultati sono stati ottenuti dalla realizzazione di prove triassiali su campioni prelevati al di sotto della diga Scott. (Goodman e Ahlgren,2000).</i>	42
<i>Figura 3.1 Fotografie degli spezzoni di mélange sedimentario estratti nella zona del Pavese e tagliati, in alto vi è lo spezzone 1 in basso lo spezzone 2.</i>	44
<i>Figura 3.2 Progressiva riduzione delle finestre di osservazione, spezzone 1.</i>	45
<i>Figura 3.3 Classificazione delle inclusioni presenti nella fotografia del blocco 1 in funzione della massima dimensione osservabile.</i>	46
<i>Figura 3.4 Classificazione delle inclusioni presenti nella fotografia del blocco 2 in funzione della massima dimensione osservabile.</i>	46
<i>Figura 3.5 Finestra di indagine pari a 25%, spezzone 1</i>	48
<i>Figura 3.6 Finestra di indagine pari a 6.25%, spezzone 1</i>	49
<i>Figura 3.7 Finestra di indagine pari a 1,56%, spezzone 1</i>	49
<i>Figura 3.8 Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, spezzone 1.</i>	51
<i>Figura 3.9 Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, spezzone 2.</i>	51
<i>Figura 3.10 Grafico che mostra l'andamento della percentuale lineare cumulata al variare della lunghezza di campionamento <math>N \cdot d_{max}</math>. (Medley,1997).</i>	52
<i>Figura 3.11 Rappresentazione delle linee di scansione che simulano i fori di sondaggio, i blocchi con dimensioni superiori al valore di soglia sono contornati in rosso, lo spezzone 1.</i>	53
<i>Figura 3.12 Rappresentazione delle linee di scansione che simulano i fori di sondaggio, i blocchi con dimensioni superiori al valore di soglia sono contornati in rosso, spezzone 2.</i>	54
<i>Figura 3.13 Percentuale lineare cumulata funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 1</i>	55
<i>Figura 3.14 Percentuale lineare cumulata media funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2.</i>	56
<i>Figura 3.15 Percentuale lineare cumulata funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2.</i>	56

<i>Figura 3.16 Percentuale lineare cumulata media funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2</i> .....	57
<i>Figura 4.1 Particolari condizioni di pendii instabili (Medley &amp; Sanz,2004).</i> .....	58
<i>Figura 4.2 Blocchi disposti in modo casuale in un pendio in bimrock, il tratteggio descrive la superficie di scivolamento in presenza di sola matrice, le linee nere definiscono due potenziali superfici di scivolamento considerando anche la presenza dei blocchi (Medley &amp; Sanz,2004).</i> .....	59
<i>Figura 4.3 Pendio contenente terreno alluvionale di Hong Kong,il tratteggio delinea la superficie di scivolamento nel caso di versante con sola matrice, la curva arancione identifica la superficie e zig zag per effetto della presenza dei blocchi.(Irfan e Tang,1993).....</i>	60
<i>Figura 4.4 Confronto in termini di fattore di sicurezza tra il Franciscan melange e il deposito alluvionale di Hong Kong (Medley &amp; Sanz,2004).</i> .....	61
<i>Figura 4.5 A) versanti con diverse VBP; B) diverse estensioni e inclinazioni dei blocchi; C) andamento del fattore di sicurezza al variare della percentuale volumetrica per diverse eccentricità dei blocchi. (Barbero et al. 2006).....</i>	62
<i>Figura 4.6 Modello di versante in bimrock per analisi numerica (Napoli et al. 2018).</i> .....	64
<i>Figura 4.7 Confronto in termini di fattore di sicurezza tra modelli con VBP pari a 55% , a sinistra è applicato il metodo FEM a destra il metodo LEM (Napoli et al.2018).</i>	65
<i>Figura 5.1 Distribuzione delle dimensioni dei blocchi</i> .....	67
<i>Figura 5.2 Esempio di modello con blocchi inclinati di 60°</i> .....	70
<i>Figura 5.3 Modello 12 con VBP 25% e blocchi inclinati di 30°, particolare dello sviluppo della superficie di rottura.</i> .....	71
<i>Figura 6.1 Sviluppo delle massime deformazioni di taglio in caso di sola matrice...</i>	73
<i>Figura 6.2 Modello 12, VBP 25%</i> .....	75
<i>Figura 6.3 Modello 12 VBP 40%</i> .....	76
<i>Figura 6.4 Modello 12 VBP 70%</i> .....	79
<i>Figura 6.5 Blocchi inglobati all'interno della superficie di rottura</i> .....	82
<i>Figura 6.6 Confronto tra Fattori di sicurezza, i blocchi circolari per VBP=70% favoriscono maggiormente la stabilità del versante rispetto ai blocchi di forma</i>	

*ellittica. Per VBP inferiori i blocchi di forma ellittica sono più efficaci ai fini della stabilizzazione del versante* ..... 83

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 1.1 Parametri meccanici dei blocchi e delle inclusioni (Barbero et al.,2012)</i>	34
<i>Tabella 3.1 Classificazione dei blocchi spezzone 1 per A=100%</i>	47
<i>Tabella 3.2 Classificazione dei blocchi spezzone 2 per A=100%</i>	47
<i>Tabella 3.3 Classificazione per lo spezzone 1 A=25% quadrante 1</i>	48
<i>Tabella 3.4 Classificazione per lo spezzone 1 A=6,25% quadrante 1</i>	48
<i>Tabella 3.5 Classificazione per lo spezzone 1 A=1,56% quadrante 1</i>	49
<i>Tabella 4.1 Tabella che mostra il progressivo decremento del fattore di sicurezza per VBP crescenti (Napoli et al.2018).</i>	63
<i>Tabella 4.2 Parametri meccanici assegnati alla matrice e ai blocchi. (Napoli et al.2018)</i>	64
<i>Tabella 5.1 Parametri dei materiali</i>	70
<i>Tabella 6.1 Fattore di sicurezza e volume mobilitato</i>	72
<i>Tabella 6.2 Fattori di sicurezza VBP 25%</i>	74
<i>Tabella 6.3 Volumi mobilitati VBP 25%</i>	74
<i>Tabella 6.4 Fattori di sicurezza VBP 40%</i>	75
<i>Tabella 6.5 Volumi mobilitati VBP 40%</i>	76
<i>Tabella 6.6 Fattori di sicurezza VBP 55%</i>	77
<i>Tabella 6.7 Volumi mobilitati VBP 55%</i>	77
<i>Tabella 6.8 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 70%</i>	78
<i>Tabella 6.9 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 25%</i>	79
<i>Tabella 6.10 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 40%</i>	80
<i>Tabella 6.11 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 55%</i>	81
<i>Tabella 6.12 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 70%</i>	82
<i>Tabella 6.13 Confronti in termini di FS tra blocchi di forma circolare e blocchi ellittici</i>	83

# Introduzione

Gli ammassi rocciosi strutturalmente complessi a blocchi in matrice sono formazioni costituite da clasti rocciosi di dimensione variabile immersi in una matrice a granulometria fine con caratteristiche meccaniche più scadenti. Tali corpi geologici risultano difficilmente classificabili e comportano notevoli problematiche in fase di caratterizzazione e definizione dei parametri di resistenza (A.G.I.,1979; Houska,1982; Meyerof,1982; Picarelli 1986).

In questo lavoro di tesi vengono sottolineate le criticità di questi materiali che posseggono proprietà meccaniche variegata per effetto della presenza di blocchi in roccia e matrice. Vengono effettuate analisi su campioni di *mélange* prelevati nel pavese per dimostrarne l'autosomiglianza e l'indipendenza di scala, viene poi eseguita una stima della percentuale areale e lineare dei blocchi per le sezioni di indagine. In seguito, viene eseguita l'analisi di stabilità di versanti costituiti da clasti rocciosi disposti in posizioni random immersi nella matrice, e se ne studia l'influenza in termini di percentuale volumetrica dei blocchi e orientazione degli stessi. Le analisi vengono eseguite seguendo un approccio stocastico (Napoli et al.,2018).

In particolare nel capitolo 1 vengono introdotte le caratteristiche principali del bimrock dal punto di vista geometrico e meccanico sulla base di studi precedentemente affrontati reperiti in letteratura. Nel capitolo 2 vengono descritti due casi di progettazioni errate causate dalla complessità del bimrock. Nel capitolo 3 seguendo una procedura già utilizzata, in precedenza da altri autori, si studia la natura frattale di spezzoni di bimrock prelevati a Pavia; viene inoltre calcolata la percentuale lineare dei blocchi presenti nelle due foto considerate. Il capitolo 4 riporta la letteratura relativa alla modellazione numerica della stabilità di versanti in bimrock. Il capitolo 5 ha lo scopo di descrivere in maniera specifica l'approccio affrontato per valutare la stabilità di versanti in bimrock con blocchi ellittici isoorientati, usato nella presente tesi. Il capitolo 6 illustra i risultati ottenuti mediante confronti tra i modelli di versante realizzati.

# 1. Bimrocks

## 1.1. Generalità

Il termine Bimrock viene introdotto da Medley nel 1994 come acronimo dell'espressione "block in matrix" coniata da Raymond nel 1984. È interessante porre l'attenzione sulla definizione completa proposta da Medley di questo materiale: "*a mixture of rocks composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture*". Con "*geotechnically significant blocks*" viene sottolineato il contrasto in termini di resistenza meccanica tra blocchi e matrice e che le dimensioni e numero di clasti presenti giocano un ruolo fondamentale nella valutazione delle proprietà meccaniche dell'ammasso. Queste formazioni rappresentano una importante sfida della geoingegneria per la loro difficile classificazione che non rientra né in quella di terreno né in quella di ammasso roccioso. Appartengono alla categoria dei bimrock le rocce sedimentarie (conglomerati in roccia, breccia, tillite), le rocce vulcaniche ignee (agglomerati, piroclastiti, inclusioni di xenolite in estrusioni vulcaniche), rocce formate da diapirismo (serpentinati), anche cataclasiti di faglia, *mélanges*, olistostromi e *mélanges* ofiolitici.

Formazioni complesse particolarmente diffuse che possono essere classificate come bimrock sono i *mélanges*; essi nascono in aree montuose a seguito di moti di subduzione in oltre 60 paesi nel mondo. Studi geotecnici abbastanza recenti (ad opera di Medley 1994) hanno riguardato un tipo particolare di *mélange*, individuato nella parte settentrionale della California (*Figura 1.1*), il *Franciscan mélange*.

Questa formazione geologica è costituita da clasti di roccia sedimentaria immersi in una matrice di argillite. Lindquist (1994) ne definisce i principali aspetti:

- Possiede blocchi con buone proprietà meccaniche immersi in una matrice argillosa;
- La matrice ha una struttura anisotropa e varia da debolmente fissile a marcatamente squamosa; inoltre le deformazioni di taglio si concentrano lungo i margini dei blocchi quindi nei contatti blocchi-matrice;

- I blocchi possono essere rotondi o allungati ma anche lenticolari e rettangolari;
- L'asse maggiore di ciascun blocco tende ad allinearsi lungo la direzione del piano di deformazione di taglio, inoltre i blocchi di dimensione minore tendono ad allinearsi con quelli di dimensione maggiore;
- Le dimensioni dei blocchi variano, possono infatti essere frammenti quasi invisibili ad occhio nudo ma anche lastre lunghe migliaia di metri.

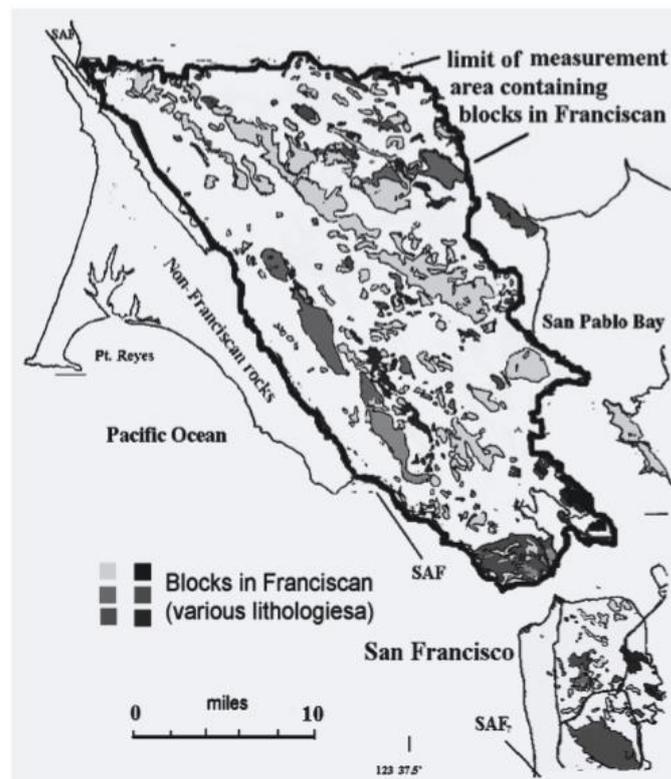


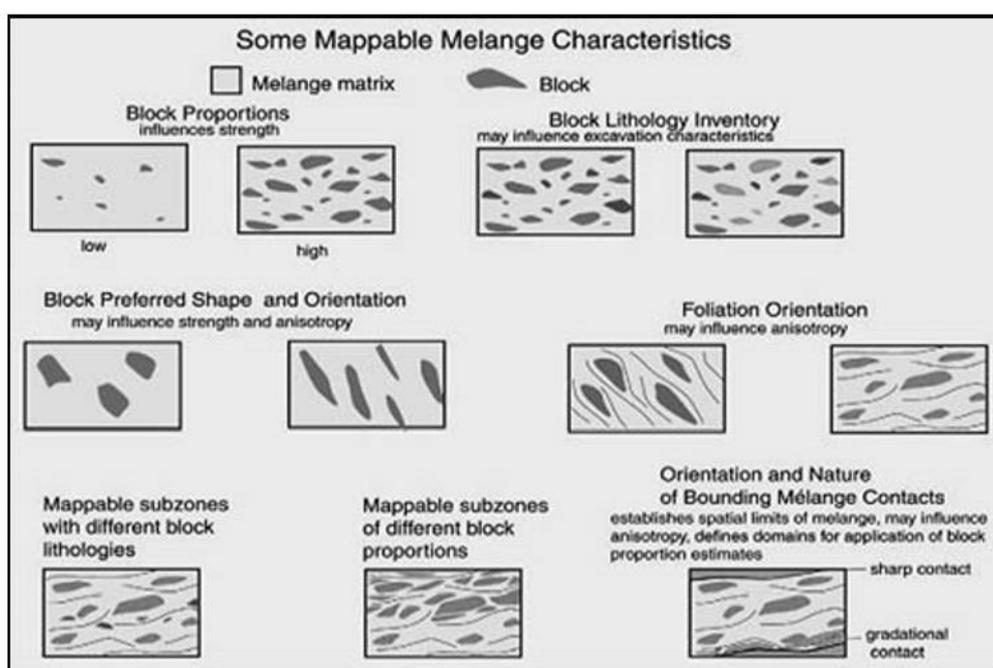
Figura 1.1 Formazione complessa del “Franciscan mélangé” nel Marin County a nord di San Francisco (Medley, 2001).

### 1.1.1. Caratterizzazione strutturale

Il riconoscimento di un bimrock avviene sul terreno attraverso un attento rilievo geologico (Wakabayashi and Medley 2004). Nella fase di osservazione della morfologia del sito si nota che zone soggette a fenomeni franosi e vallate sono dotate di una bassa percentuale di blocchi a differenza di zone costiere o promontori scoscesi lungo gli argini di fiumi o ancora affioramenti resistenti a fenomeni di erosione nei quali è possibile osservare una vasta presenza di clasti rocciosi. Tipicamente questi

ammassi presentano un'alternanza irregolare di clasti rocciosi e matrice ma possono essere scambiati per depositi colluviali, se molto alterati.

In *Figura 1.2* vengono riportate alcune caratteristiche tessiturali dei bimrock; la matrice quasi sempre a litologia argillosa, è frequentemente caratterizzata da una struttura a scaglie, dovuta alla presenza di piani di foliazione e di clivaggio che possono assumere una orientazione preferenziale all'interno dell'ammasso e possono giocare un ruolo determinante nel comportamento meccanico (Medley and Rehermann,2004).

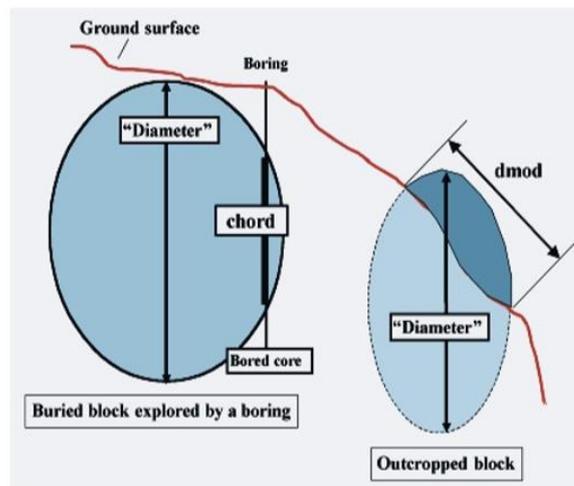


*Figura 1.2* Caratteristiche identificabili delle Bimrock (Wakabayashi and Medley,2004)

Uno studio attento della struttura dell'ammasso risulta essere fondamentale ai fini della successiva valutazione delle sue proprietà meccaniche. La distribuzione dei blocchi, la loro forma, il loro arrangiamento spaziale all'interno della matrice e il loro contenuto volumetrico rappresentano elementi di influenza per la risposta meccanica dell'ammasso; Spesso in fase progettuale si assume che i bimrocks possiedano le proprietà meccaniche della sola matrice trascurando la presenza dei blocchi questo modo di procedere però si è scoperto che produce un errore significativo, in particolare conduce ad un approccio troppo conservativo poiché esclude presenze di clasti rocciosi che ne migliorano il comportamento meccanico.

### 1.1.2. Dimensione rappresentativa dei Blocchi

Come è stato sottolineato in precedenza la presenza dei blocchi interrompe la continuità della matrice. La stima della proporzione volumetrica dei blocchi all'interno del bimrock dovrebbe dipendere da un'analisi bidimensionale dei clasti con riconoscimento geologico e un'analisi monodimensionale tramite perforazioni di sondaggio. L'analisi monodimensionale prevede che la dimensione caratteristica del blocco sia definita come la corda intercettata dalla perforazione. Tale risultato però è fortemente influenzato dalla orientazione dei blocchi in relazione alla direzione di perforazione. Inoltre, da un rilievo geologico è quasi impossibile che l'estensione della porzione di blocco affiorante coincida con il diametro reale del clasto (*Figura 1.3*).



*Figura 1.3 Confronto tra diametro del blocco e massima dimensione osservabile  $d_{mod}$  (Medley, 2001).*

Si è dimostrato che fare riferimento all'analisi di carote estratte da fori di sondaggio porta ad una sovrastima della dimensione dei blocchi più piccoli ed una sottostima di quelli più grandi (*Figura 1.4*).

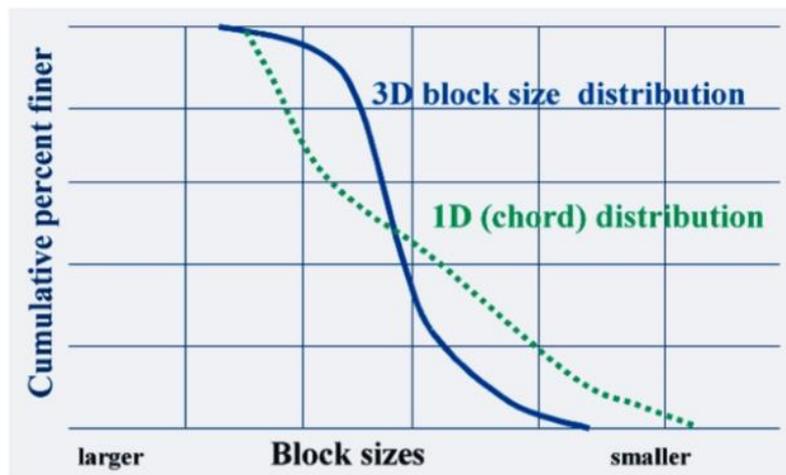


Figura 1.4 Andamenti della distribuzione dei blocchi reale (3D) e quella ottenuta dai fori di sondaggio(1D). (Medley, 2001)

La dimensione rappresentativa dei blocchi viene definita con “ $d_{mod}$ ” che non è il diametro del clasto, poiché come detto in precedenza esso sarebbe di difficile determinazione, ma è la massima estensione del blocco misurabile a seguito di una osservazione dell'affioramento.

Medley e Linquist (1994) hanno dimostrato che la distribuzione delle massime dimensioni osservabili dei blocchi è di tipo frattale quindi segue una legge di potenza che in questo caso è negativa:  $N = r^{-D}$  dove N rappresenta la frequenza relativa di elementi con una dimensione lineare più grande di r, l'esponente D è anche detto *dimensione frattale* (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1997).

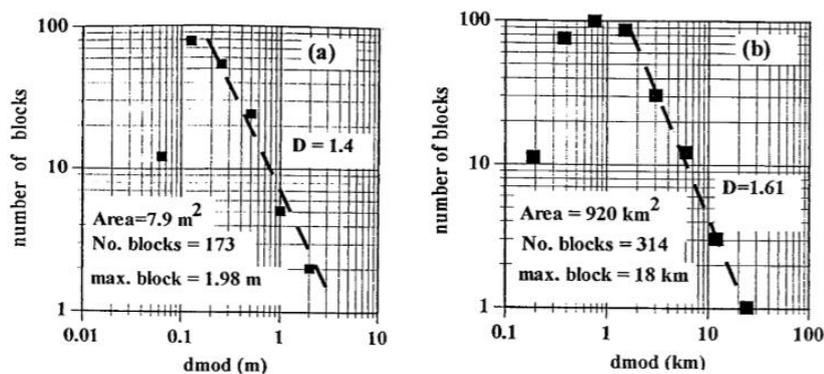
Le principali proprietà della teoria dei frattali sono l'autosomiglianza e l'invarianza scalare. Con la prima si sottintende che, considerata un'area e una sua sotto area, quest'ultima risulta essere una replica esatta dell'area madre. Il significato di invarianza scalare è che l'istogramma di frequenza della dimensione degli elementi non cambia al variare della scala di osservazione ed è caratterizzato da un numero crescente di elementi al diminuire della dimensione. Quindi incrementando la scala di osservazione la dimensione assoluta degli elementi varia ma non la dimensione frattale  $D$ .

Il coefficiente  $D$  deve chiaramente essere misurabile ed è una misura della distribuzione degli elementi all'interno di un'area indipendentemente dalla scala di osservazione. Dal punto di vista matematico questo termine viene calcolato come

limite di un rapporto:  $\lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log N(l)}{\log(l)}$  dove  $N$  è la frequenza numerica della variabile  $l$  ed  $l$

è il numero di intervalli di classi di frequenza.

Una distribuzione frattale auto somigliante espressa in un diagramma bilogarithmico  $N(l)-l$  mostra un ramo discendente la cui retta di regressione ha coefficiente angolare  $D$ . In *Figura 1.5* è possibile osservare due istogrammi di frequenza: il grafico di sinistra fa riferimento ad un'area di indagine di  $7,9 \text{ m}^2$ , la massima dimensione osservabile ( $d_{\text{mod}}$ ) è pari a  $1,98$  metri e il valore di dimensione frattale  $D$  è  $1,4$ ; il grafico di destra è il risultato di un'area indagata pari a  $920 \text{ Km}^2$  la massima dimensione osservabile è in questo caso pari a  $18 \text{ Km}$  e la dimensione frattale  $D$  è  $1,61$ . Dai grafici si può quindi dedurre che, sebbene le scale di indagine siano diverse, le distribuzioni di frequenza nelle due superfici sono molto simili.



*Figura 1.5 Istogrammi su scala bi-logarithmica della dimensione dei blocchi nel Franciscan mélange, per due diverse scale di osservazione (Medley, 1994).*

### 1.1.3. Definizione della lunghezza caratteristica

La lunghezza caratteristica  $L_c$  di un problema ingegneristico viene definita da Medley nel 1994 come la dimensione che descrive la geometria del problema in esame. Essa può essere nel caso di una frana la sua profondità media o l'altezza del pendio (Medley e Sanz 2004), per una galleria, alla scala del fronte di scavo  $L_c$  può essere definita dal diametro dello scavo; inoltre, nel caso di riprese fotografiche essa può essere definita da  $\sqrt{A}$  dove  $A$  rappresenta la superficie fotografata.

Nel caso del bimrock la dimensione caratteristica di interesse ingegneristico viene definita da Medley nel 1994, 2002 e Medley e Lindquist nel 1995 come  $\sqrt{A}$  e

introducono il concetto di soglia blocchi -matrice. Quest'ultima è il valore sotto il quale un blocco può essere considerato parte della matrice perché troppo piccolo per influenzare i parametri di resistenza del bimrock. La soglia blocchi-matrice è assunta pari a 5% di  $L_c$  quindi  $0,05\sqrt{A}$ . Medley (1994) considera inoltre come dimensione massima del blocco 75% di  $L_c$  quindi  $0,75\sqrt{A}$ , quest'ultima è il valore oltre il quale la formazione non è più definibile come bimrock ma per le notevoli dimensioni esso è considerato come un ammasso roccioso.

#### **1.1.4. Metodologie di indagine per la valutazione della percentuale volumetrica dei blocchi**

Le indagini sul bimrock possono essere eseguite mediante diverse metodologie:

- Metodi 1D con interpretazione di stratigrafie o fori di sondaggio;
- Metodi 2D basati sull'analisi digitale di immagini;
- Metodi 3D con vagliatura fisica del materiale.

I tre metodi hanno lo scopo di conoscere la percentuale volumetrica dei blocchi presenti all'interno del bimrock.

I metodi 3D sono basati sull'analisi granulometrica tramite vagliatura fisica del materiale, applicabile alla scala di laboratorio. Tale metodo, tuttavia, a scale di lavoro maggiore risulta essere più complicato e dispendioso. Inoltre, con questa procedura si è in grado di conoscere la percentuale cumulata in peso di blocchi e non la loro forma e la loro variabilità spaziale.

Vi sono poi i metodi 2D basati sull'analisi digitale di immagini e sullo studio di riprese fotografiche andando ad individuare i blocchi presenti; questa procedura consente di raccogliere un gran numero di dati sulle proprietà geometriche dei blocchi quindi dimensione, forma, orientazione, distribuzione spaziale. Le incertezze legate a questa tipologia di analisi dipendono dalla forma e dalla esposizione dei blocchi rispetto al piano esposto, dalla disponibilità di affioramenti per i rilievi fotografici, nonché dal contrasto di colore tra blocco e matrice. Gli errori di sottostima possono raggiungere il 44% per la percentuale volumetrica (Haneberg 2004).

I metodi 1D consistono in analisi lineari del problema. Viene calcolata una percentuale lineare dei blocchi che è la somma delle lunghezze delle corde dei blocchi intercettati dai sondaggi rapportata alla lunghezza complessiva di campione estratto. Questa procedura implica che si sia fissata preventivamente una soglia blocchi/ matrice con lo scopo di comprendere quali elementi considerare come blocchi e valutarne quindi la corda intercettata e quali scartare perché facenti parte della matrice.

La percentuale lineare calcolata coincide con quella volumetrica solo in presenza di un'adeguata densità di campionamento ma, poiché i blocchi hanno forme irregolari e sono distribuiti nell'ammasso in maniera non uniforme, risulta estremamente complesso stimare la percentuale volumetrica da pochi fori di sondaggio. Medley (1994) in particolare nei suoi studi ha sottolineato il livello di incertezza che nasce dall'utilizzo di questa procedura e lo dimostra praticamente realizzando 4 modelli fisici di bimrock costituiti da 4 diverse percentuali volumetriche di blocchi: 13%, 32%, 42%, 55%. I modelli sono composti da gesso che simula il comportamento della matrice e da elementi ellissoidici in argilla e plastilina che fungono da blocchi di roccia; viene inoltre adoperato il riso per simulare la presenza di blocchi di dimensioni molto ridotte.

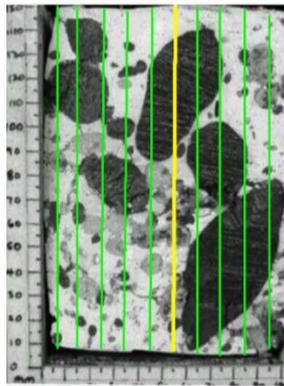
I provini hanno forma prismatica con larghezza pari a 170 mm, profondità di 100 mm e altezza di 150 mm ma la superficie di indagine scelta è inferiore rispetto all'area del provino, cioè pari a  $170 \text{ cm}^2$  con  $\sqrt{A}= 13 \text{ cm}$ .

Viene assunta come lunghezza caratteristica  $\sqrt{A}$  e vengono realizzati blocchi con dimensioni appartenenti a 5 classi nell'intervallo compreso tra  $0,05\sqrt{A}$  (3mm-6mm) e  $0,75\sqrt{A}$  (98mm). Viene stabilito che tutti i modelli abbiano la stessa frequenza di blocchi per ciascuna classe:

- 1) 79,7 % per la classe  $0,05\sqrt{A}$ ;
- 2) 16,2 % per la classe  $0,1\sqrt{A}$ ;
- 3) 3,3 % per la classe  $0,2\sqrt{A}$ ;
- 4) 16,2 % per la classe  $0,1\sqrt{A}$ ;
- 5) 0,7% per la classe  $0,75\sqrt{A}$ ;

Il numero totale di clasti per ogni modello varia tra 2200 nel caso di percentuale di blocchi presenti del 13% a 7350 per percentuale volumetrica di 55%.

I campioni vengono preparati aggregando il gesso con i blocchi in argilla realizzati e una volta pronti vengono suddivisi in 10 parti; ciascuna fetta viene a questo punto fotografata e su ciascuna foto vengono tracciate 10 linee di scansione che simulano i sondaggi realmente realizzati nel bimrock. Ogni modello quindi è come se fosse soggetto a 100 fori di sondaggio tramite i quali viene valutata la percentuale lineare dei blocchi (*Figura 1.6*).



*Figura 1.6* Linee di scansione realizzate su una tipica immagine di *mélange* (Medley 2002).

Secondo la legge fondamentale della stereologia nel caso di un'adeguata densità di campionamento la percentuale lineare dei blocchi coincide con quella volumetrica.

I risultati ottenuti da Medley confermano questa teoria. In *Figura 1.7* infatti vengono riportati 100 valori di percentuale lineare ottenuti nel caso di modello caratterizzato da percentuale volumetrica pari al 32%; la media dei 100 valori è circa uguale a 32% ma questa conferma era ampiamente prevedibile dato l'enorme numero di dati ottenuti.

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

Figura 1.7 Valori di percentuale lineare che variano in un intervallo da 0% a 61%(Medley,1997).

Nella realtà è pressoché impossibile realizzare un numero così elevato di fori di sondaggio. Per ovviare a tale difficoltà Medley nel 2001 ha proposto di introdurre l'approccio statistico di Montecarlo. Aumentando in maniera considerevole le posizioni di realizzazione dei sondaggi e avendo innumerevoli dati a disposizione, egli analizza la variazione del grado di incertezza, di errore tra percentuale lineare e volumetrica dei blocchi al variare della percentuale di blocchi presenti e lunghezza di perforazione. In Figura 1.8 sull'asse delle ascisse viene riportato il risultato ottenuto di  $N_{dmax}$  (rapporto tra lunghezza totale di perforazione e dimensione del blocco più grande presente nel modello); sull'asse delle ordinate vi è il fattore di incertezza che è il rapporto tra la deviazione standard (differenza tra percentuale lineare calcolata e percentuale volumetrica reale) e la media delle lunghezze ottenute.

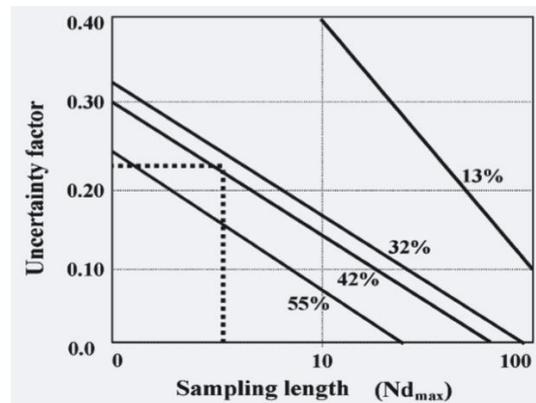


Figura 1.8 Stima del fattore di incertezza nella valutazione della proporzione volumetrica (Medley,2001).

Dal grafico (*Figura 1.8*) si evince che all'aumentare della lunghezza di perforazione il grado di incertezza si riduce e questo è dato dal fatto che in questo caso vi è una maggiore possibilità di intercettare i blocchi; inoltre per una percentuale volumetrica bassa si osserva un errore elevato perché stavolta essendo gli elementi in roccia pochi e radi vi è una minore possibilità di intercettarne e si evidenzia un valore basso di corde.

È interessante notare che sfruttare il grafico può essere molto utile nella valutazione della percentuale volumetrica poiché a partire dalla lunghezza di perforazione per una certa percentuale lineare si conosce l'errore rispetto al valore effettivo di percentuale volumetrica.; ad esempio per un  $N_{dmax}$  pari a 5 e un valore di percentuale lineare pari a 42% si ottiene un fattore di incertezza pari a 0,22 dunque la percentuale volumetrica sarà pari a 42% +/- 0,22\*42% cioè 42+- 9%.

### **1.1.5. Risultati del modello di Medley**

Medley ha effettuato un confronto tra la frequenza relativa di corde intercettate mediante l'esecuzione di sondaggi e la frequenza dei blocchi realmente presenti nelle differenti classi dimensionali. I risultati sono riportati in *Figura 1.9* ed è possibile osservare che, nel caso di classe costituita da blocchi di dimensione 3-6 mm, vi è una importante discrepanza tra la frequenza relativa reale (numero di blocchi di quella classe realmente presenti) e quella ottenuta dalle linee di scansione. Il metodo dei fori di sondaggio in questo caso porta a risultati di gran lunga inferiori a quelli reali, le corde intercettate sono in misura ridotta probabilmente perché è più complesso incontrare clasti di piccole dimensioni nonostante siano presenti in misura maggiore. Nel caso invece di blocchi di dimensioni maggiori si osservano risultati opposti, la frequenza relativa reale è inferiore rispetto a quella osservata andando a misurare le corde intercettate, questo perché le corde sono più estese e quindi il calcolo della loro frequenza misurata in questi termini porta ad una sovrastima del numero dei blocchi realmente presenti di quella classe.

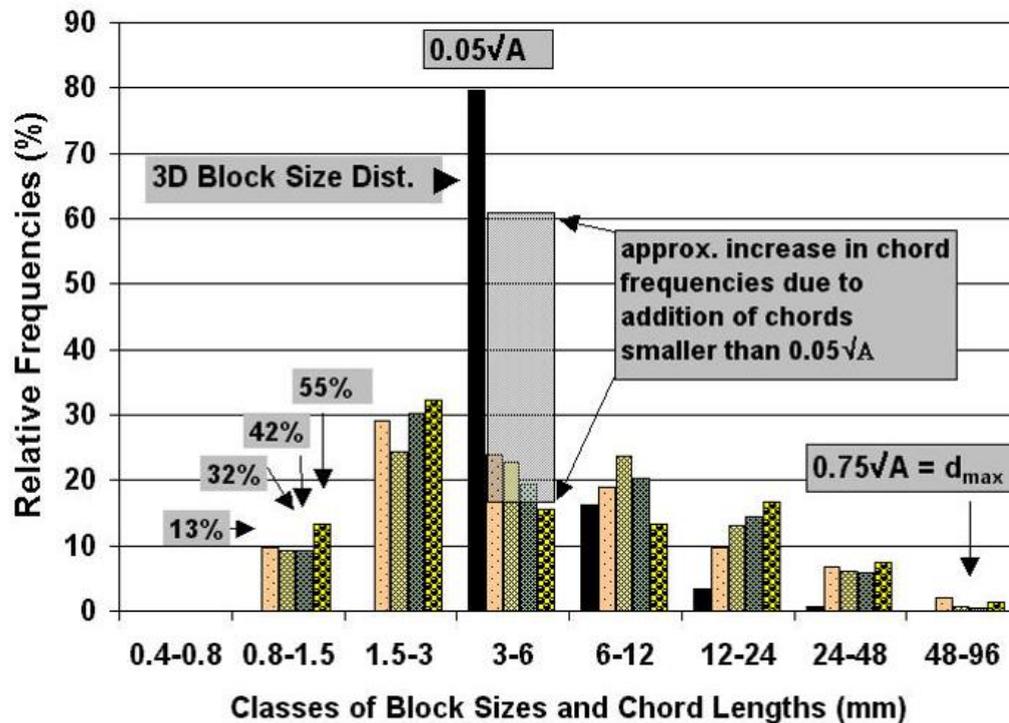


Figura 1.9 Frequenza relativa reale (3D) riportata con il colore nero e Frequenza relativa valutata con le linee di scansione riportata nei 4 diversi colori. (Medley 2002).

Un altro confronto affrontato da Medley è riportato in *Figura 1.9*, dove viene rilevata la frequenza cumulata di corde intercettate (1D CLDs) e di quella dei blocchi realmente presenti. Si osserva che le due distribuzioni non coincidono, infatti il metodo monodimensionale registra un numero elevato di blocchi aventi dimensione inferiore al valore di soglia  $0,05\sqrt{A}$ . Nella realtà il maggior numero di elementi in roccia possiede una dimensione più elevata della soglia e viene quindi dimostrato in via sperimentale da Medley che le corde intercettate non coincidono quasi mai con la dimensione massima del blocco.

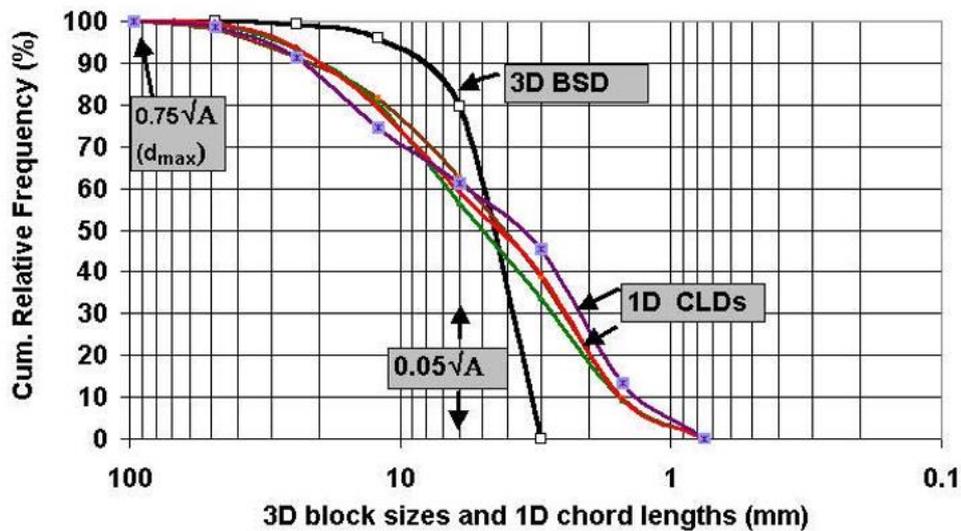


Figura 1.10 Confronto tra la frequenza relativa cumulata 3D e quella calcolata con le linee di scansione. (Medley, 2002).

## 1.2. Caratterizzazione meccanica

I bimrock come è stato già esposto sono formazioni che contengono al loro interno blocchi immersi in una matrice e quindi un corpo geologico può essere classificato come bimrock se soddisfa alcune proprietà fondamentali:

- Il VBP (percentuale di volume unitario costituita da blocchi) compreso tra 5% e 75%, secondo gli studi proposti da Lindquist (1994), Kim et al. (2004), Sonmez et al., (2004) e Pan et al.(2008). Al di sotto del 25 % infatti le caratteristiche di resistenza sono controllate dalle proprietà della matrice. Con VBP superiore a 75% il comportamento può essere assimilato a quello di un ammasso roccioso estremamente fratturato. I due elementi blocchi e matrice possiedono una elevata differenza in termini di resistenza e proprio questo contrasto fa sviluppare deformazioni di taglio nella matrice secondo percorsi tortuosi;
- Il valore di soglia in termini di angolo di attrito è  $\tan\phi_{\text{blocchi}} / \tan\phi_{\text{matrice}} \geq 2$  mentre in termini di modulo di Young è  $E_{\text{blocchi}} / E_{\text{matrice}} \geq 2$ . Sono dei valori di soglia poiché in presenza di contrasti minori la superficie di rottura tende a

svilupparsi anche all'interno dei blocchi piuttosto che solo nella matrice e il comportamento meccanico si avvicina a quello di mezzo omogeneo. Quando il contrasto di resistenza supera il valore di soglia la resistenza propria dei blocchi gioca un ruolo rilevante sulle proprietà meccaniche d'ammasso.

Lindquist nel 1994 effettua le prime osservazioni su provini artificiali che simulano il comportamento del bimrock e sulla base dei risultati ottenuti mette in evidenza l'aumento di resistenza all'aumentare del contenuto volumetrico dei blocchi.

### 1.2.1. Il modello di Lindquist

Lindquist, a partire dalle osservazioni effettuate sul *mélange* californiano da Medley (1994), riproduce in laboratorio provini con caratteristiche simili da sottoporre a prove triassiali per determinarne i parametri di resistenza di Mohr-Coulomb e il comportamento tenso- deformativo. I provini hanno forma cilindrica con altezza di 300 mm e diametro di 150 mm, i blocchi vengono distribuiti con una dimensione frattale pari a 2 e vengono realizzati con un rapporto asse maggiore/ asse minore pari a 2/3.

Viene scelto come principale materiale che costituisce la matrice il cemento Portland con bentonite e, per simulare le superfici di taglio presenti all'interno, vengono introdotti all'interno come piani di debolezza degli strati di cera; inoltre, per ridurre l'eccessivo attrito tra i materiali, gli strati vengono rivestiti di talco. I blocchi vengono invece realizzati con sabbia, cenere volante, cemento e acqua (*Figura 1.11*).

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

*Figura 1.11* Pesì degli elementi che costituiscono la matrice e i blocchi (Lindquist,1994).

Vengono creati dei provini di sola matrice, altri costituiti dal materiale dei blocchi e altri che simulano il *mélange*, quindi contenenti all'interno clasti e matrice; questi

ultimi sono costituiti da tre diverse percentuali volumetriche: basso (30%), medio (50%) e alto (70%), ciascuna con blocchi aventi tre diversi livelli di inclinazione rispetto al piano orizzontale: 0°, 30°, 60°, 90° (Figura 1.12).

Il risultato è la realizzazione di oltre 100 provini che Lindquist ripartisce in 4 classi:

- 1) 10mm-19 mm con frequenza relativa pari a 75,3%;
- 2) 19mm-38mm con frequenza relativa pari a 18,9%;
- 3) 38mm-75mm con frequenza relativa pari a 4,7%;
- 4) 75mm-150mm con frequenza relativa pari a 1,2%.

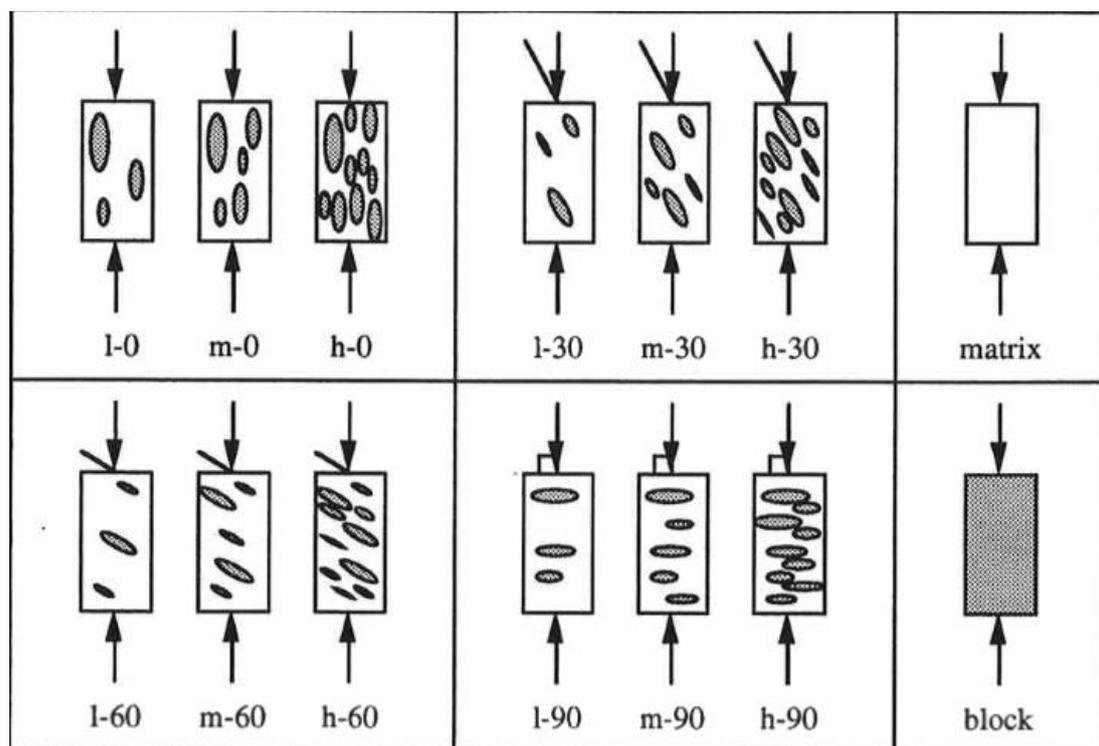


Figura 1.12 Schema dei diversi modelli realizzati da Lindquist (Lindquist, 1994).

I vari elementi vengono sottoposti a prove triassiali con lo scopo di misurare la variazione delle proprietà meccaniche in funzione della diversa percentuale volumetrica dei blocchi e della loro orientazione.

Lindquist osserva i seguenti aspetti:

- Il modulo di deformazione è maggiore nei provini con percentuali volumetriche più elevate;
- Il modulo di deformazione assume valori più elevati quando il carico è applicato parallelamente alla orientazione dei blocchi;

- Un incremento della percentuale volumetrica (VBP) implica una riduzione di coesione a causa delle scadenti proprietà dell'interfaccia intorno ai bordi dei blocchi dove si sviluppano le deformazioni; i valori più bassi di coesione sono stati registrati nel caso di inclinazione dei blocchi di 30° rispetto alla direzione di applicazione del carico (Figura 1.14);
- Un aumento dell'angolo di attrito di 15°-20° su quello della sola matrice all'aumentare del VBP (Figura 1.13).

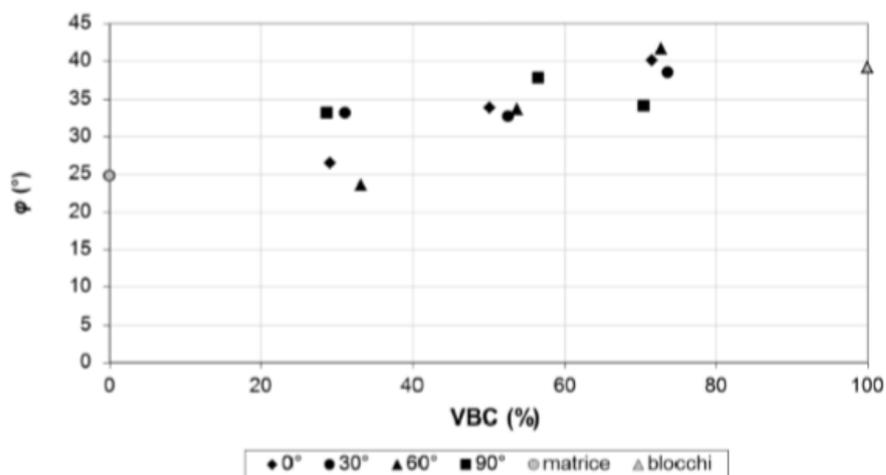


Figura 1.13 Variazione dell'angolo di attrito per i diversi VBP (Coli,2010).

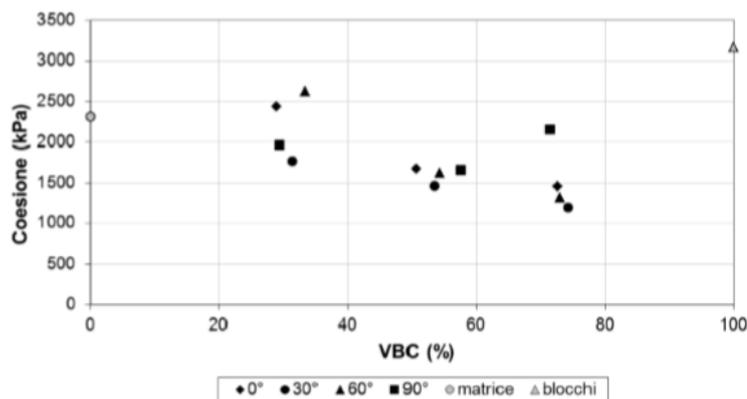


Figura 1.14 Variazione della coesione per i diversi VBP (Coli,2010).

In conclusione del suo lavoro di ricerca Lindquist propone una modifica al criterio di Mohr Coulomb introducendo l'effetto del VBP. L'approccio da lui indicato nasce sulla base dei risultati prodotti dalle prove triassiali appena descritti e quelli di provini prelevati presso la diga Scott in California:

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

$\tau$  è la resistenza al taglio del bimrock che è funzione della coesione nella matrice, dell'angolo di attrito e della percentuale volumetrica dei blocchi.

$\Delta\varphi(\text{VBP})$  è l'incremento di angolo di attrito, Lindquist propone che esso aumenti di  $3^\circ$  per ogni incremento del 10% nel valore di VBP al di sopra di  $\text{VBP}=25\%$ .

### 1.2.2. Studi sulla tortuosità della superficie di rottura

Le zone di contatto blocchi- matrice sono superfici di debolezza per i bimrocks. Lindquist (1994) ha dimostrato che la superficie di rottura in una formazione bimrock segue i contatti blocchi-matrice e ha evidenziato che la tortuosità della superficie è causata dalla presenza di blocchi di dimensioni variegata. Lindquist (1994) ha documentato l'andamento delle superfici di taglio di oltre 60 provini. Per fare questo, dopo aver eseguito su di essi prove triassiali, li ha tagliati e avvolti in una pellicola aderente tracciando su di essa il contorno dei blocchi e l'andamento delle superfici di taglio (*Figura 1.15*). Medley (2004) riprende gli studi affrontati da Lindquist per indagare sulle caratteristiche delle superfici di rottura che presentano una forma tortuosa e vengono rappresentate in figura con la traccia gialla; nella fase successiva dispone una corda che segue esattamente il percorso della superficie di rottura e ne misura la lunghezza  $L'$ ; la traccia rossa invece rappresenta l'andamento della superficie di rottura in assenza di blocchi quindi in presenza della sola matrice e viene misurata analogamente definendo il parametro  $L_0$ . Infine esegue una traccia in blu dei contatti blocco-matrice e ne misura la lunghezza totale  $t$ . Questa procedura è stata ripetuta su ciascun provino con lo scopo di confrontare gli andamenti delle superfici di taglio di provini aventi analoghe orientazioni dei blocchi. In figura si nota come i vari andamenti hanno poco in comune tra loro; vengono inoltre confrontati con i profili di rugosità più comuni negli ammassi rocciosi (JRC compreso tra 10 e 20) risultando notevolmente più tortuosi (*Figura 1.16*).

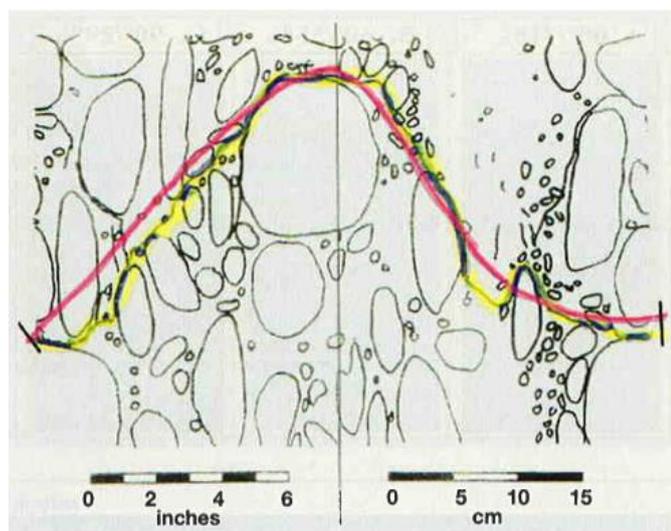


Figura 1.15 Proiezione sul piano della superficie cilindrica realizzata da Lindquist nel 1994, in blu vengono rappresentati i contatti blocchi matrice, in giallo la lunghezza della superficie di rottura, in rosso la superficie di rottura della sola matrice. (Medley, 2004).

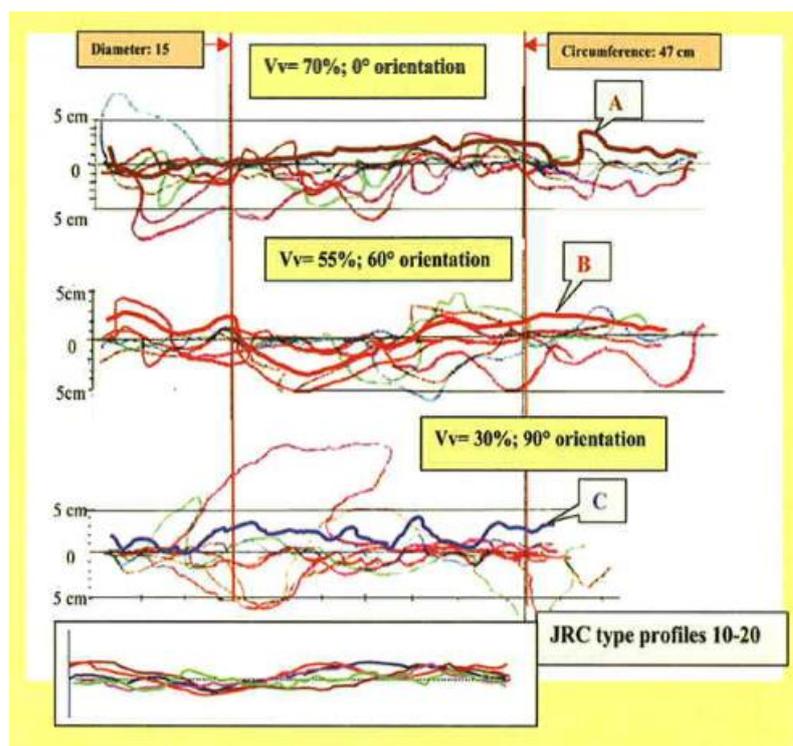


Figura 1.16 Andamenti delle superfici di rottura suddivise per percentuali volumetriche diverse confrontate con i profili di JRC. (Medley, 2004).

Una misura della tortuosità è data dal rapporto tra  $L'$  ed  $L_0$  che viene confrontato con i valori di percentuali volumetriche dei blocchi, in Figura 1.17 si osserva che vi è poca variabilità del rapporto  $L'/L_0$  nel caso di bimrock con VBP del 50% e 70%, si

osservano maggiori differenze nel caso di VBP pari al 30%. Viene inoltre considerato il rapporto  $A/L_0$  dove  $A$  è l'area totale compresa tra la superficie di rottura in presenza di blocchi e quindi tortuosa e quella che si ha nel caso di sola matrice.  $A/L_0$  non è altro che la misura della rugosità della superficie di rottura che viene confrontata al variare di VBP (*Figura 1.17*). In *Figura 1.17* si osserva una lieve variazione della rugosità al variare della orientazione dei blocchi e della percentuale volumetrica, una maggiore dispersione dei dati si ha per VBP pari al 30%. Il valore medio osservato in 73 provini di  $A/L_0$  è circa pari a 1,44 cm, considerando che il diametro di questi ultimi è di 15 cm, questa misura è circa il 10% del loro diametro.

In definitiva Medley sottolinea che è più prudente definire zone di rottura nei bimrocks di spessore pari a 5%- 15% della dimensione caratteristica, inoltre dimostra come sia inappropriato confrontare la “rugosità” delle superfici di taglio con quella definita dal parametro JRC della meccanica delle rocce in quanto quest'ultima fa riferimento a profili di asperità molto meno marcati rispetto a quelli che si osservano nei bimrocks .

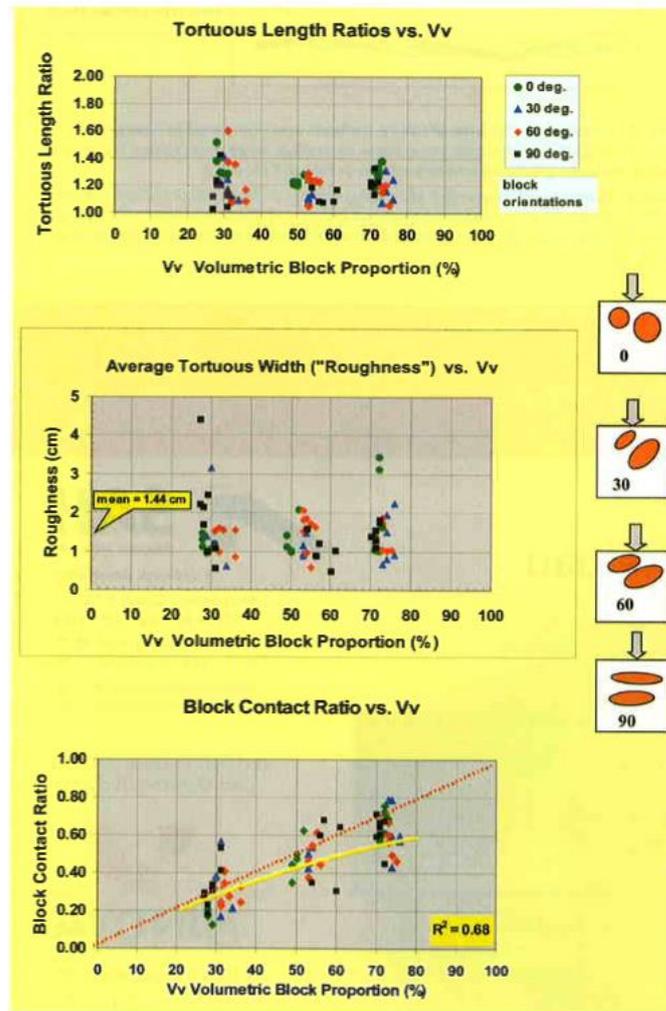


Figura 1.17 Il grafico in alto esprime la variazione del rapporto  $L'/L_0$  per i diversi VBP, il grafico centrale esprime la variazione di rugosità per i diversi VBP, il grafico in basso esprime la variazione di  $t/L'$  per i diversi VBP. (Medley,2004).

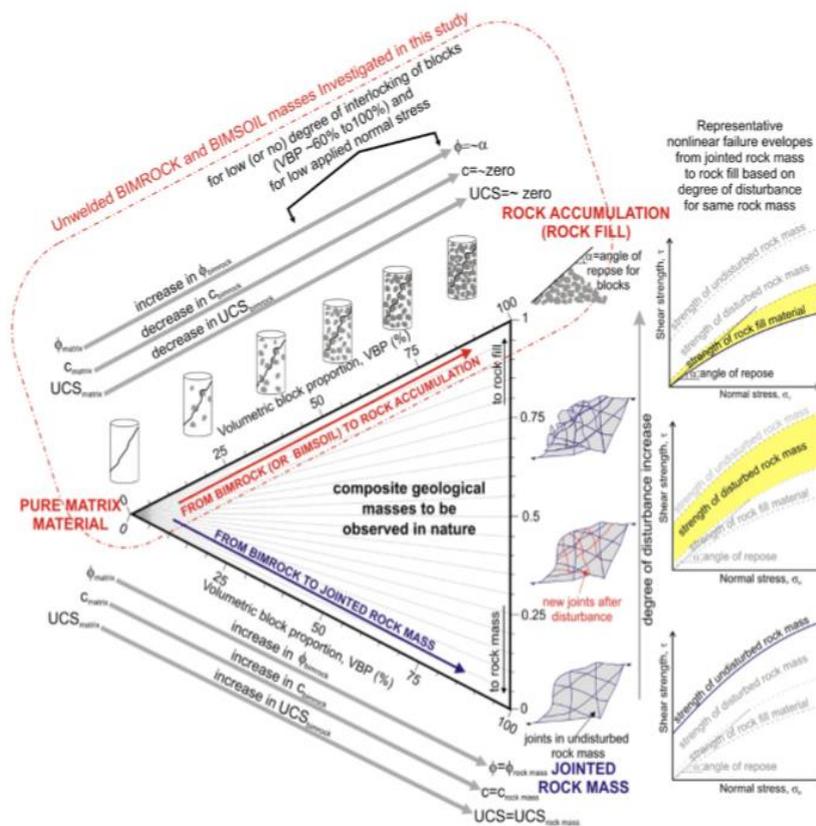
### 1.2.3. Approccio di Kalender et al.

Viene di seguito riportato l'approccio empirico di Kalender (2014) introdotto sulla base di risultati ottenuti preliminarmente da Sonmez et al. (2009) e Coskun (2010) per le "unwelded" bimrock; lo scopo principale di questo studio è quello di prevedere valori di coesione, angolo di attrito e resistenza a compressione uniassiale in funzione di diverse percentuali volumetriche dei blocchi del bimrock.

I risultati di Sonmez et al. e Coskun rivelano i seguenti aspetti:

- Si osserva un sostanziale incremento dell'angolo di attrito per VBP compresi tra 10% e 75%: al di sotto di 10% il comportamento è assimilabile a quello della matrice, al di sopra di 75% si osservano incrementi poco significativi.
- Per  $VBP > 75\%$  l'angolo di attrito può essere assunto pari all'angolo  $\alpha$  a riposo dei blocchi poiché per alti valori di VBP il grado di interlocking tra i blocchi può essere assunto nullo.
- Si assume che  $\alpha > \phi_{matrice}$  aumenta con l'incremento di  $\phi_{blocchi}$ .
- Il valore di resistenza a compressione uniassiale  $UCS_{bimrock}$  decresce all'aumentare di VBP poiché il grado di interlocking è quasi nullo per  $VBP > 60\%$ .

I concetti appena elencati vengono riportati in *Figura 1.18*:

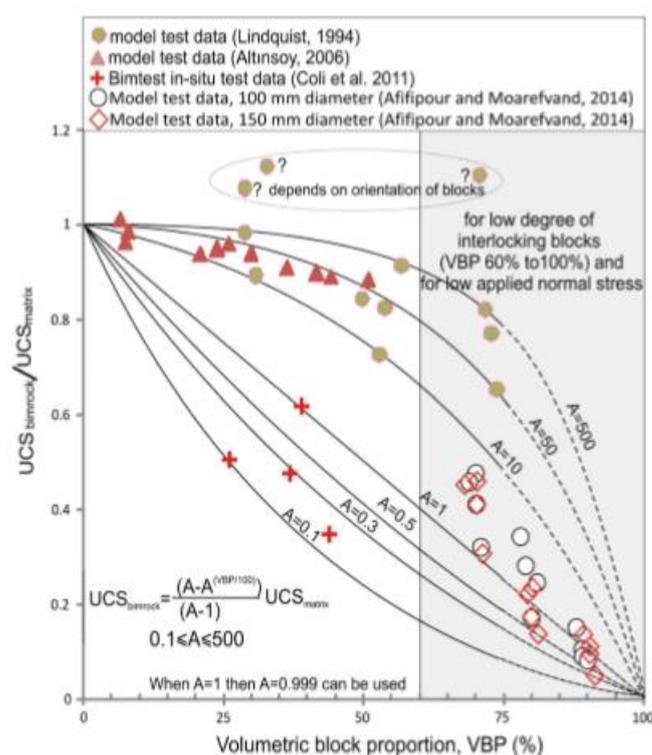


*Figura 1.18* Schema riassuntivo dei risultati ottenuti da Sonmez et al. e Coskun. (Sonmez, 2009)

Kalender ha sfruttato dati precedentemente ottenuti da altri studiosi quali Lindquist (1994), Altinsov (2006), Afifipour e Moarefvand (2014) insieme a test in situ di Coli

et al.(2011) e dati reali ottenuti da Goodman e Ahlgren nella diga Scott in California. Questi dati sperimentali hanno prodotto come risultato i seguenti grafici utili a prevedere i parametri di resistenza del bimrock:

In *Figura 1.19* viene riportata la variazione del rapporto  $UCS_{bimrock}/UCS_{matrice}$  al variare di VBP secondo un parametro A che definisce la forza di contatto blocco-matrice che assume un valore maggiore per forze di contatto più elevate. Tali forze dipendono dalla rugosità dei blocchi, dalla loro angolarità e dalle caratteristiche della matrice.



*Figura 1.19* Andamento di UCS per il bimrock al variare di VBP (Kalender,2014).

In *Figura 1.20* viene graficizzato come varia il rapporto  $\phi_{bimrock}/\phi_{matrice}$  per diverse percentuali VBP, tenendo presente le indicazioni proposte da Sonmez e Coskun.

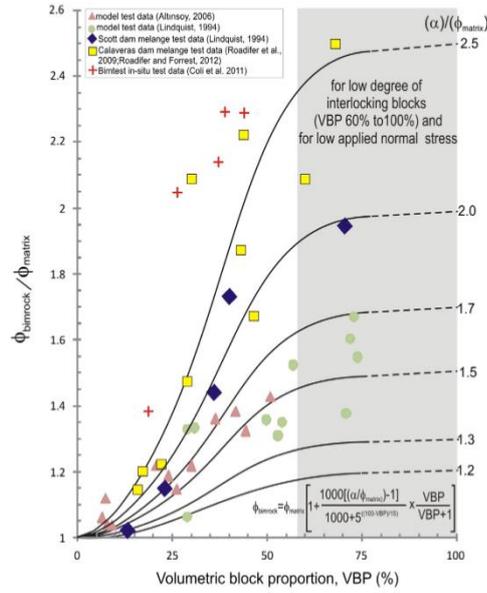


Figura 1.20 Andamento della variazione del rapporto tra angolo di attrito del bimrock e della matrice al variare di VBP. (Kalender,2014).

Di seguito si riporta il grafico proposto da Kalender che non è altro che una guida pratica per la scelta del parametro A in funzione del grado di adesione tra i blocchi e la matrice (Figura 1.21).

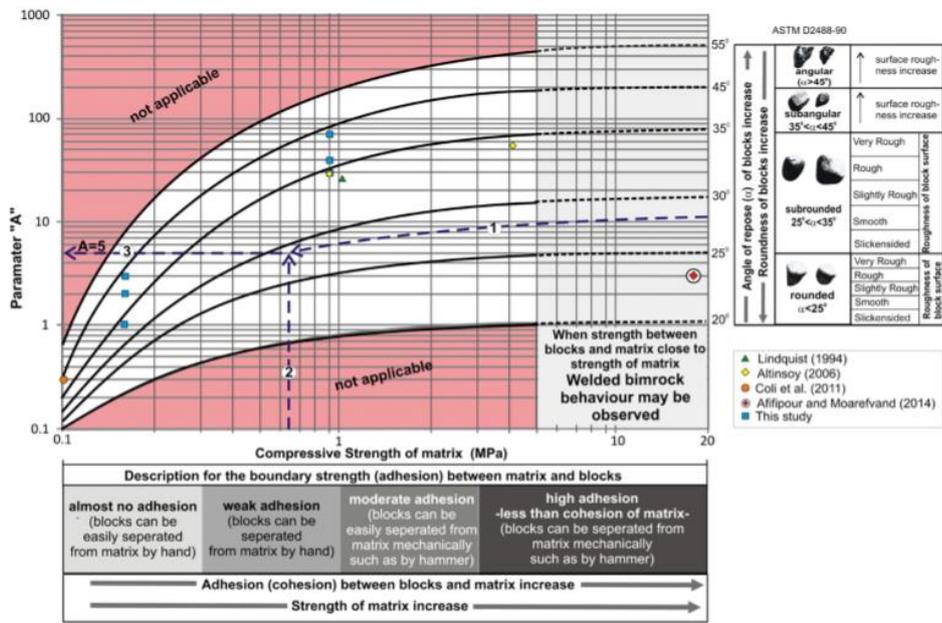


Figura 1.21 Grafico con relativa linea guida per la valutazione del parametro A (Kalender,2014)

Dal confronto tra i dati di letteratura e quelli predetti dall'approccio di Kalender viene dimostrata l'utilità dell'utilizzo delle formulazioni empiriche.

Si è osservato che il criterio fornisce come risultati un angolo di attrito di 4° inferiore rispetto a quello reale, il risultato è quindi una sottostima di questo parametro. I valori ottenuti di UCS e di coesione sono piuttosto soddisfacenti se comparati con quelli reali e quindi in definitiva questa procedura può essere considerata adeguata per una stima preliminare dei parametri di resistenza.

### **1.3. Caratterizzazione meccanica mediante analisi numerica**

IL gruppo di ricerca costituito da M. Barbero, M. Bonini e M. Borri-Brunetto (2012) affrontano il problema della caratterizzazione meccanica mediante la realizzazione di modelli 2D e 3D che simulano il comportamento reale di provini in bimrock.

Si tratta di provini cilindrici in cui, in modo random, vengono introdotte inclusioni ellittiche fino al raggiungimento del VBP richiesto. A partire da questi elementi creati mediante algoritmo è possibile effettuare appropriate analisi numeriche mediante i software FLAC e ADINA.

I provini bidimensionali hanno larghezza di 5cm e altezza di 10cm, viene fissata come dimensione caratteristica 5cm, di conseguenza il valore massimo e minimo dei blocchi sarà rispettivamente 3,75 cm e 0,25 cm. Si assume che i blocchi abbiano forma circolare o ellittica e che sia la matrice che i blocchi seguano il comportamento elastico perfettamente plastico di Mohr Coulomb; In *Tabella 1.1* si riportano i parametri fissati, analoghi a quelli adoperati da Lindquist e Goodman nel 1994.

	E [GPa]	$\nu$ [-]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\phi'$ [deg]	$c'$ [MPa]
Matrix	2.5	0.25	7.12	0.712	24.7	2.28
Inclusions	5.0	0.25	12.68	1.268	38.3	3.07

*Tabella 1.1 Parametri meccanici dei blocchi e delle inclusioni (Barbero et al.,2012)*

Vengono realizzati prove confinate e non confinate, nel primo caso il provino fissato alla base e soggetto a un carico verticale imposto, non è libero di spanciare poiché è soggetto anche sui lati ad una pressione esterna; nel secondo caso il provino non presenta carichi applicati ai lati.

I provini possiedono al loro interno blocchi circolari ed ellittici questi ultimi con un rapporto asse maggiore/asse minore pari a 2. La discretizzazione, eseguita con il software FLAC, viene effettuata con una mesh quadrilatera e ad ogni cella vengono assegnate le rispettive proprietà meccaniche dei blocchi e della matrice. I provini aventi blocchi circolari vengono suddivisi in 4 classi di VBP: 12%, 24%, 38%, 54%. Nel caso di provini con blocchi ellittici si fa riferimento invece a 3 valori di VBP: 12%, 24%, 37%. Vengono svolte tre analisi non confinate per ciascun provino e due analisi per ciascun valore di pressione di confinamento applicata ai provini contenenti blocchi con forma circolare. La pressione di confinamento applicata è crescente ed è pari a 0,5 MPa, 1,5MPa, 3MPa.

Le analisi con ADINA vengono effettuate esclusivamente in provini con blocchi circolari, la mesh è di tipo triangolare e vengono scelti 7 valori di VBP da sottoporre a prove di compressione. Per ogni VBP viene affrontato un test non confinato e tre test confinati, uno per ciascun valore di pressione applicata ai lati del provino (0,5 MPa, 1 MPa, 2MPa).

In *Figura 1.22* vengono riportati i valori di resistenza a compressione monoassiale ottenuta dai due software al variare del VBP. La griglia di discretizzazione nel caso del software FLAC viene disposta sul modello geometrico e adattata ad esso, questo è il motivo principale per cui le analisi svolte con FLAC si arrestano a VBP pari a 37%; inoltre la mesh quadrilatera porta ad una sottostima della resistenza a causa, probabilmente, della sua ridotta capacità di discretizzare le inclusioni più piccole.

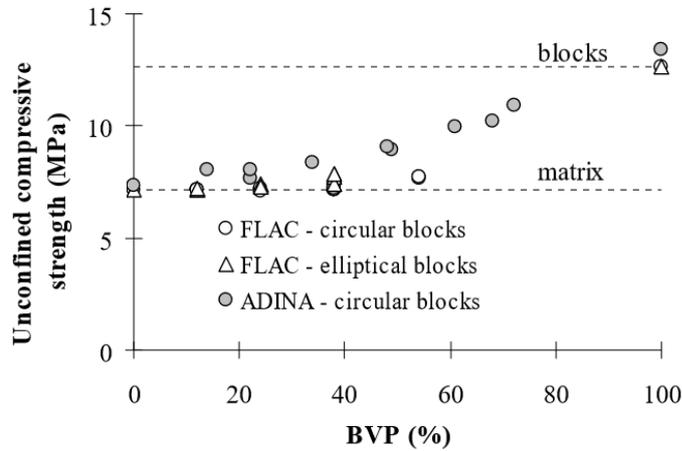


Figura 1.22 Variazione della resistenza a compressione non confinata all'aumentare di VBP. (Barbero et al.,2012).

Viene inoltre sfruttato il criterio di Hoek & Brown per interpretare i risultati ottenuti dai test di compressione. I provini vengono raggruppati in 4 classi di VBP: 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%; infine parametri  $m$  e  $\sigma_{ci}$  sono calcolati mediante regressione lineare dei dati ottenuti. In Figura 1.23 i punti rappresentano i corrispondenti valori di tensioni di rottura al variare di VBP le linee invece sono gli involuipi di rottura per le differenti percentuali volumetriche.

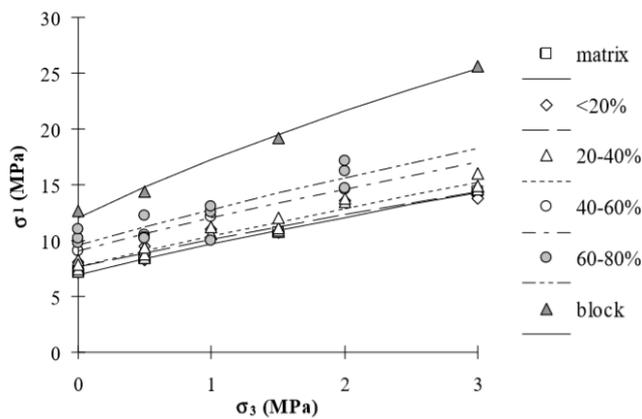


Figura 1.23 Involucri di rottura di Hoek & Brown pe diversi VBP. (Barbero et al.,2012)

L'influenza positiva data dalla presenza dei blocchi sui parametri di resistenza viene maggiormente sottolineato nell'istogramma in Figura 1.24 dove si osserva un incremento di  $m$  e di  $\sigma_{ci}$  per VBP via via più elevati.

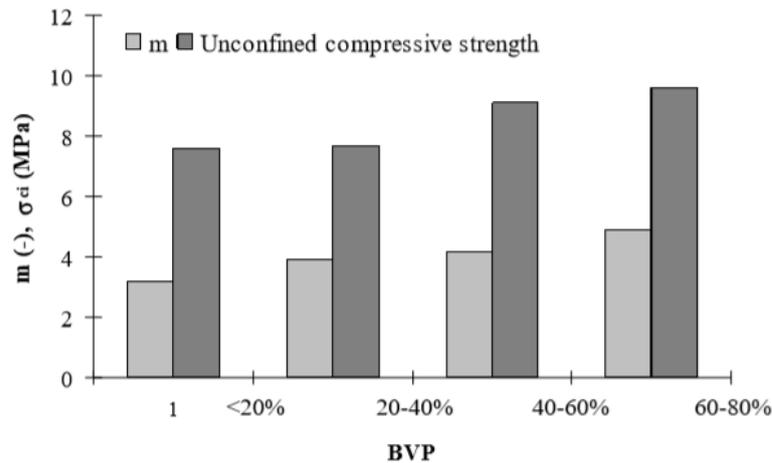


Figura 1.24 Istogramma di variazione di  $m$  e  $\sigma_{ci}$  per diverse percentuali volumetriche. (Barbero et al., 2012)

Barbero et al. (2012) affrontano anche il problema della modellazione 3D, il lavoro di ricerca consiste nella creazione di provini cilindrici aventi le stesse proprietà precedentemente riportate e contenenti inclusioni secondo una funzione di densità di probabilità:

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

Dove  $q = -2.3$  e  $a$  e  $b$  il diametro massimo e minimo dei blocchi.

Una volta assegnati i dati di input dei provini cioè diametro, altezza, VBP le inclusioni vengono generate garantendo la non compenetrazione tra esse. Questa procedura fornisce come file una lista con coordinate del centro e raggio di ciascuna sfera, il formato del file è adatto ad essere importato in ADINA che può così effettuare simulazioni numeriche. Il passo successivo consiste nella discretizzazione delle inclusioni, della matrice e della superficie esterna dei blocchi e i due materiali vengono descritti da un modello di comportamento elastico perfettamente plastico secondo la legge di Drucker-Prager. Vengono realizzati 12 provini cioè tre per ciascuna percentuale di inclusione (VBP=10%, 20%, 30% 40%), inoltre l'analisi viene svolta fissandoli alla base e garantendo solo spostamenti verticali secondo step di deformazione assiale di 0,001. Le superfici laterali di ciascun provino vengono sottoposte a pressioni pari a 0 MPa (caso uniassiale), 0.5 MPa, 1 MPa, 2MPa.

In Figura 1.25 vengono rappresentati i provini in cui si possono riscontrare zone plasticizzate in grigio scuro, si può osservare che per un VBP al di sotto del 10% i

parametri di resistenza sono analoghi a quelli della matrice e la plasticizzazione è uniforme (Figura 1.25 (a), (b)), una percentuale volumetrica del 20% può essere vista come un valore di soglia superato il quale la presenza dei blocchi implica parametri di resistenza notevolmente maggiori; superato questo valore infatti, la plasticizzazione si sviluppa attorno alle superfici delle inclusioni fino a propagarsi all'interno dei blocchi, alla fine della prova gli elementi sferici risultano plasticizzati invece parte della matrice presenta comportamento elastico. Tutti i dati sono poi stati interpretati sfruttando il criterio di Hoek & Brown e i parametri  $m$  e  $\sigma_{ci}$  sono stati ottenuti per ogni VBP con regressione lineare.

In definitiva, come sottolinea lo studio affrontato da Barbero et al., le simulazioni con metodo 2D e 3D dimostrano entrambe che la risposta dei provini in bimrock soggetti a compressione è fortemente influenzata dal comportamento del materiale presente all'interfaccia blocco/matrice, per questo motivo sarebbe utile modellare opportunamente queste zone di interazione.

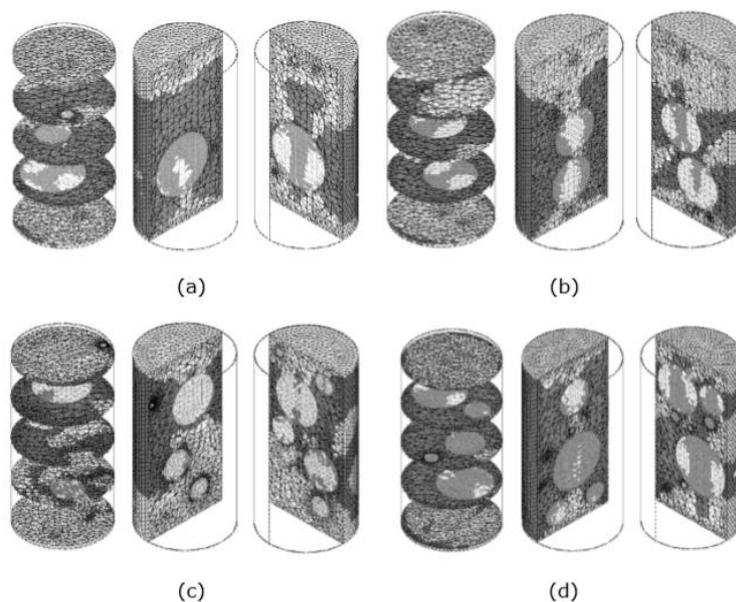


Figura 1.25 Rappresentazione dei provini con le relative aree plasticizzate di colore grigio scuro. (Barbero et al., 2012)

## 2. Case histories: Coleman beach e diga Scott

La variabilità spaziale, litologica e meccanica dei bimrock ha spesso reso complicata la progettazione di opere in questi materiali e una sua errata caratterizzazione ha implicato in passato enormi costi aggiuntivi e ritardi nelle tempistiche di costruzione. Ne è un esempio il caso di Coleman beach in California descritto da Medley (2007) dove inizialmente si era proposto di affrontare interventi di mitigazione di frane che spesso invadevano la strada principale. I sondaggi esplorativi sono stati affrontati fino a 2 metri di profondità poiché a quel livello si era localizzato il substrato roccioso; gli esperti hanno quindi concluso che la frana fosse di tipo superficiale composta da argillite e blocchi di tipo alluvionale soggetti a scivolamento sul substrato in arenaria situato nella porzione sottostante. I costi previsti parevano quindi modesti perché si trattava di rimuovere una piccola parte di materiale per riassetare il versante. Durante questa operazione però si sono accorti rapidamente che l'argillite conteneva al suo interno massi di grandi dimensioni la cui rimozione era complessa dato che interventi di natura esplosiva non erano consentiti. Si era quindi compiuto un errore nel considerare i blocchi molto estesi come un substrato roccioso, si è intervenuto così con ulteriori scavi più profondi che hanno implicato un aumento smisurato dei costi. Nella realtà il fenomeno franoso consisteva in uno flusso di materiale ben sedimentato disposto su *mélange* che i sondaggi verticali non avevano rilevato (*Figura 2.1*).

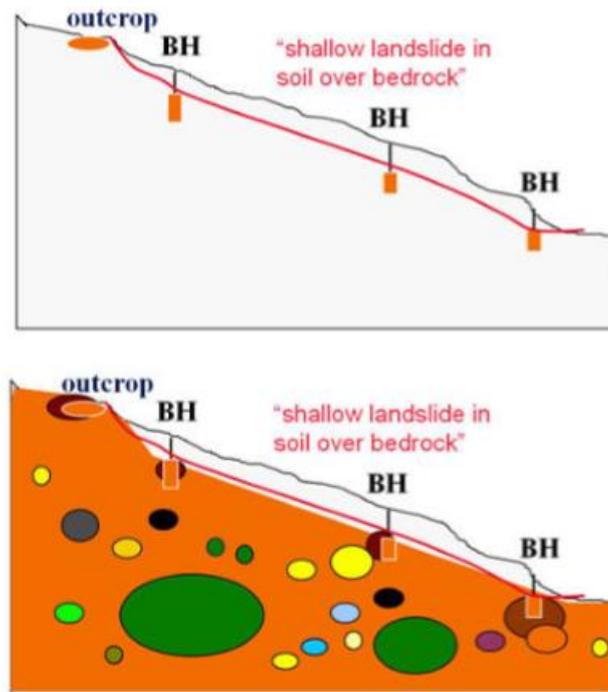


Figura 2.1 In alto vi è il profilo del versante con il presunto substrato roccioso individuato, in basso vi è il versante costituiti dai blocchi intersecati dai sondaggi esplorativi (Medley,2007).

Medley (2007) sottolinea quindi come un corretto metodo di caratterizzazione del *mélange* sia fondamentale ai fini di qualunque progettazione ingegneristica e la procedura applicata nel caso della diga Scott in California può essere considerata esemplare per evitare di compiere errori. La diga crea uno sbarramento del fiume Eel andando a realizzare un bacino artificiale cioè il lago Pillsbury a 160 Km a nord di San Francisco. La struttura che è stata realizzata nel 1920 ed è uno sbarramento in muratura a gravità alto circa 40 metri, giace sulla formazione del *Franciscan mélange*. Gli studi geotecnici affrontati nel 1970 hanno rivelato che se le caratteristiche di resistenza del *mélange* fossero state simili alla matrice la diga avrebbe subito fenomeni di scivolamento, il fatto che questo non si sia verificato ha dimostrato che la formazione contenesse al suo interno blocchi che garantivano maggiore stabilità (Volpe and others, 1991, Goodman and Ahlgren,2000).

Per la caratterizzazione meccanica viene definita la dimensione caratteristica  $L_c$  di 3 metri, pari a quella di un eventuale spessore della superficie di scivolamento che si sarebbe creato in assenza di blocchi (Figura 2.2).

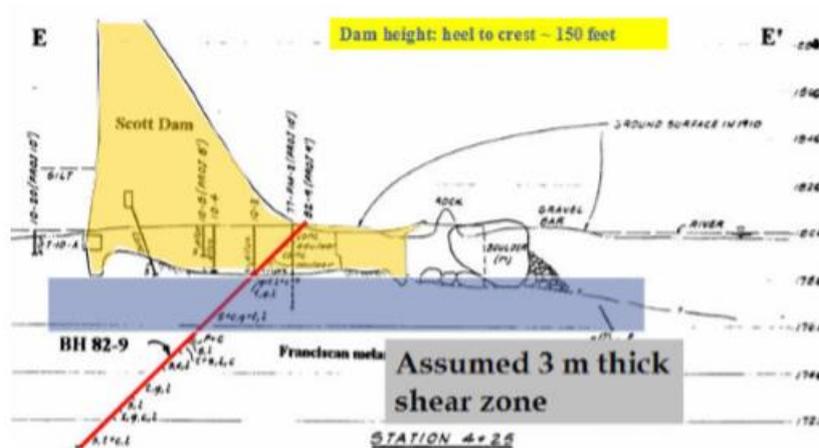


Figura 2.2 Rappresentazione della sezione della diga Scott, la traccia rossa è un tipico sondaggio esplorativo, in blu vi è la fascia di taglio che causo lo scivolamento dell'opera. (Medley,2007).

Viene valutata la proporzione lineare dei blocchi mediante dei sondaggi esplorativi andando a calcolare il rapporto tra le corde intercettate dei blocchi e la profondità totale di sondaggio. Per le carote di materiale prelevate viene stabilito come valore di soglia blocchi/ matrice 0,15 metri quindi il 5% di  $L_c$  e dalle fotografie è risultato che la percentuale lineare fosse del 40% (Figura 2.3).

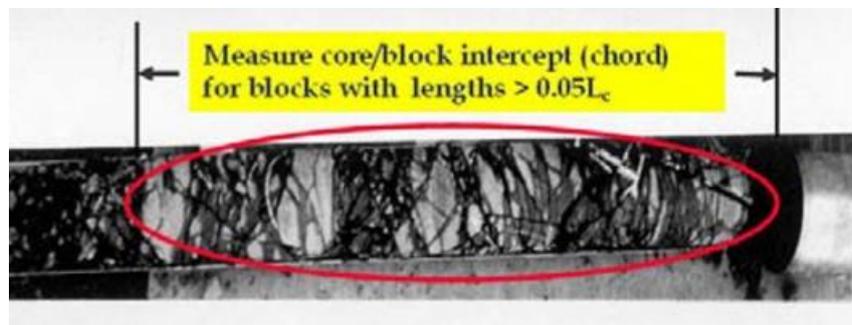


Figura 2.3 Fotografia di un sondaggio realizzato presso la diga Scott (Medley,2007).

Come è stato già specificato un numero sufficiente di dati garantisce che la proporzione lineare sia equivalente alla proporzione volumetrica. Per ottenere una corretta stima della percentuale è quindi necessario eseguire sondaggi con una profondità pari a 10 volte il diametro massimo dei blocchi. Nel caso della diga Scott però i massi più estesi hanno un diametro che varia da 30 metri a 43 metri; sondaggi a profondità di 300 metri o 400 metri benché fossero preferibili sono risultati irrealizzabili e quindi gli studiosi non hanno indagato oltre i 150 metri cioè  $5 \cdot d_{\max}$  (Figura 2.4).

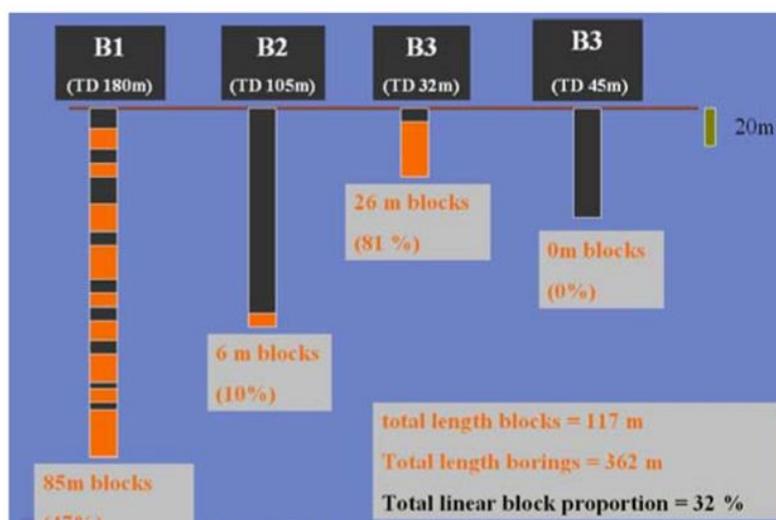


Figura 2.4 Calcolo della proporzione lineare dei blocchi, in arancione vi è il l'intersezione del sondaggio con i blocchi, TD è la lunghezza del foro di sondaggio. (Medley, 2008).

Vi è quindi una incertezza, nella valutazione della percentuale lineare ottenuta, pari a 0,2; quindi in definitiva, come descrive Medley (1997), il valore stabilito è stato di 40% +/- 0,2\*40% che a favore di sicurezza è stato modificato stabilendo una percentuale lineare del 32%.

I provini di mélange della diga Scott sono stati prelevati e sottoposti a prove triassiali per ottenerne i parametri di resistenza meccanica. In Figura 2.5 si osserva l'andamento lineare dell'angolo di attrito al variare di VBP. Il grafico conferma che l'incremento della percentuale dei blocchi implica un aumento delle proprietà meccaniche del materiale sul quale è situata la diga, il che giustifica la stabilità dell'opera.

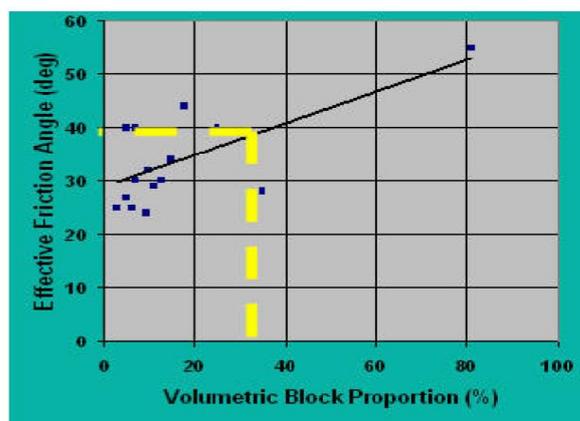


Figura 2.5 Andamento che dimostra l'incremento dell'angolo di attrito all'aumentare di VBP, i risultati sono stati ottenuti dalla realizzazione di prove triassiali su campioni prelevati al di sotto della diga Scott. (Goodman e Ahlgren, 2000).

### 3. Mélange dell'Oltrepò Pavese

Come è stato ampiamente sottolineato, il mélange risulta essere un materiale caotico all'interno del quale vi sono inclusioni calcaree immerse in una matrice argillosa. Si è osservato che è presente del materiale che possiede tali caratteristiche nella zona dell'Oltrepò Pavese e per tale ragione si sono affrontati dei prelievi di campioni in quest'area. I campioni estratti sono stati opportunamente tagliati e sulla base delle fotografie degli spezzoni si è eseguito lo studio sull'autosomiglianza e frattalità del materiale, un confronto tra la percentuale areale e lineare e, infine, una valutazione della profondità di campionamento per cui si ha una percentuale lineare dei blocchi costante.

Nel seguente capitolo vengono dimostrate innanzitutto l'autosomiglianza ed indipendenza di scala sulla base dei processi operativi eseguiti da Medley e in seguito si effettua una stima della percentuale lineare.

#### **3.1. Autosomiglianza e invarianza di scala**

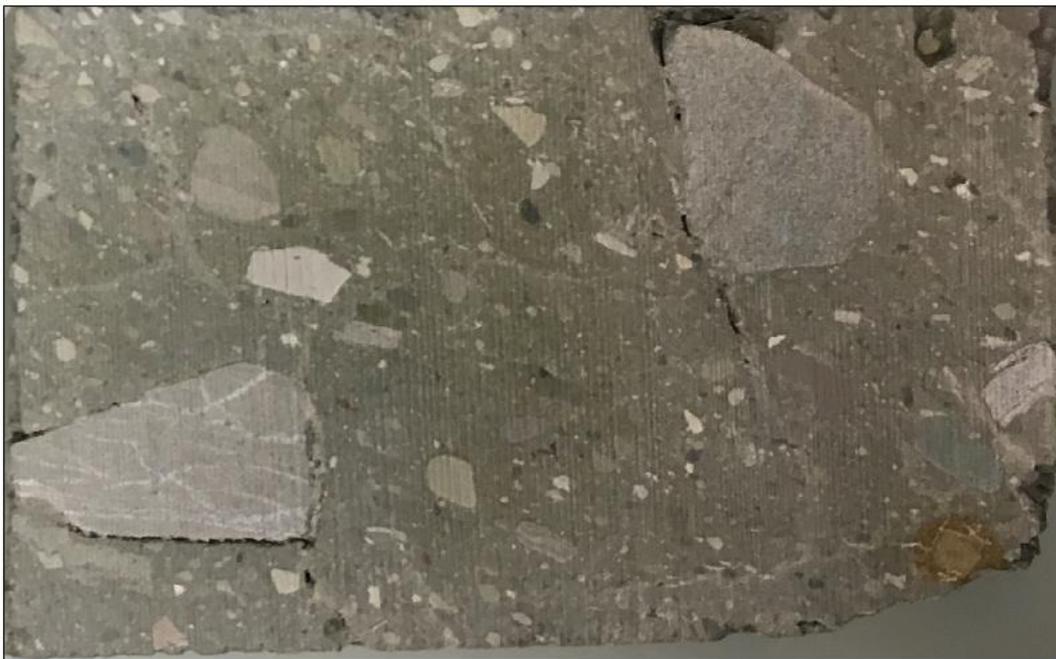
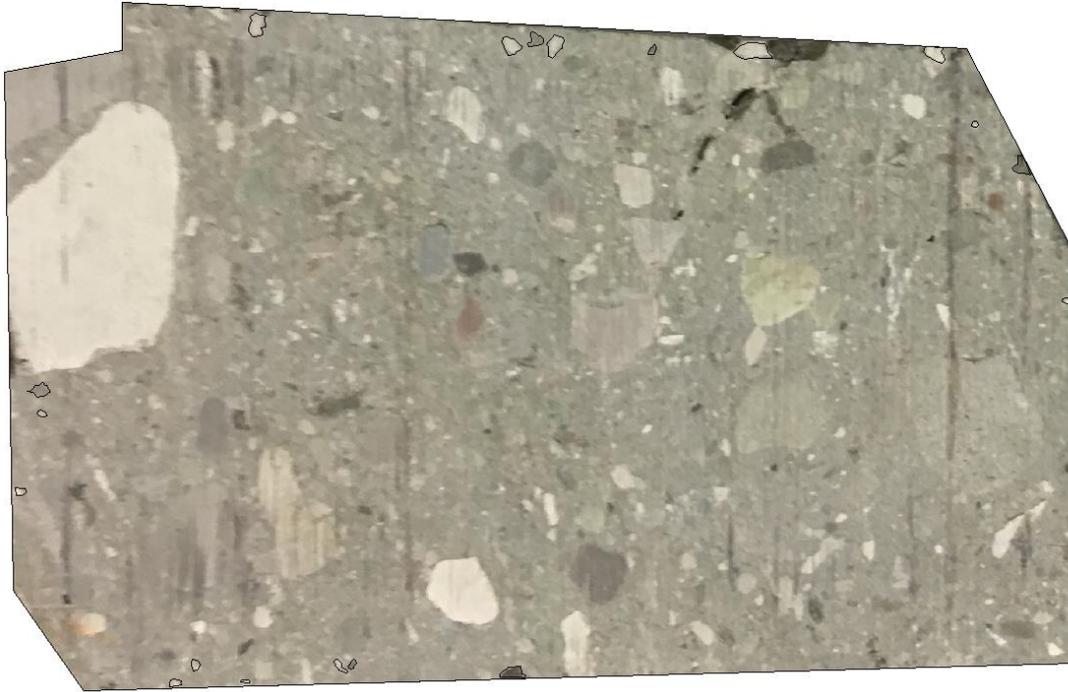
Medley dimostra nel 1994 l'autosomiglianza andando ad analizzare la frequenza dei blocchi presenti in un'area e nelle sotto aree contenute nella superficie madre; le sue conclusioni hanno dimostrato che la frequenza relativa dei blocchi presenti non subisce variazioni per diverse scale di osservazione.

La procedura effettuata da Medley è stata ripetuta mediante l'utilizzo del software Autocad che ha consentito di analizzare le immagini degli spezzoni e di poterne misurare le inclusioni.

Come prima operazione si sono scalate le fotografie definendo il loro lato maggiore pari a 100 unità (*Figura 3.1*). Il motivo di questa scelta è legato ad una mancanza di informazioni circa le reali dimensioni dei blocchi.

Per la verifica della proprietà di autosomiglianza si è partiti dall'analisi dell'intera superficie fotografata ( $A=100\%$ ) su di essa si sono registrate le massime dimensioni di ciascun blocco presente e le misure sono state inserite in 6 differenti classi. In

maniera analoga si è proceduto per finestre di osservazioni più piccole facendo quindi riferimento ad aree pari a  $A=25\%$ ,  $A=6,25\%$  e  $A=1,56\%$  (Figura 3.2).



*Figura 3.1 Fotografie degli spezzoni di mélange sedimentario estratti nella zona del Pavese e tagliati, in alto vi è lo spezzone 1 in basso lo spezzone 2.*

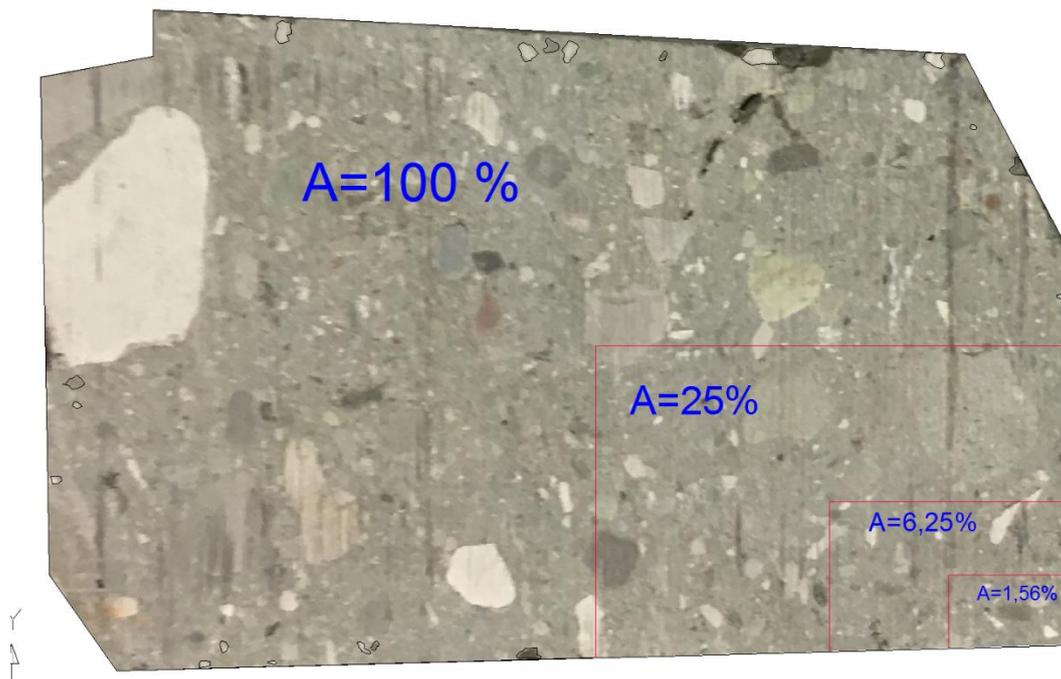


Figura 3.2 Progressiva riduzione delle finestre di osservazione, spezzone 1.

La lunghezza individuata per ciascun blocco rappresenta la sua massima dimensione osservabile e sulla base di questa misura il blocco viene inserito in una certa classe dimensionale, tali classi vengono di seguito riportate:

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

Le differenti classi vengono identificate da 6 colori rappresentati dalla legenda in *Figura 3.3* e *Figura 3.4* e nel caso di area pari a 100% nella prima classe si sono considerate le inclusioni di dimensione superiore a  $5\% \sqrt{A}/8$ .

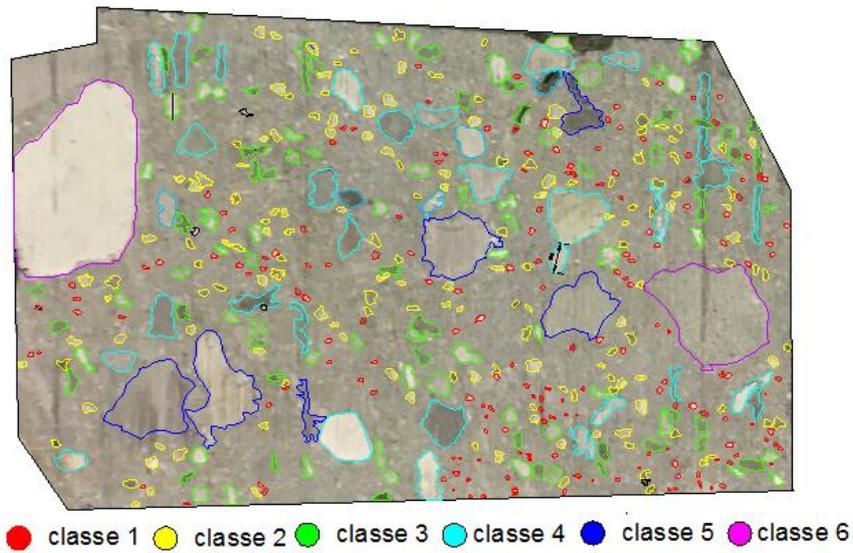


Figura 3.3 Classificazione delle inclusioni presenti nella fotografia del blocco 1 in funzione della massima dimensione osservabile.

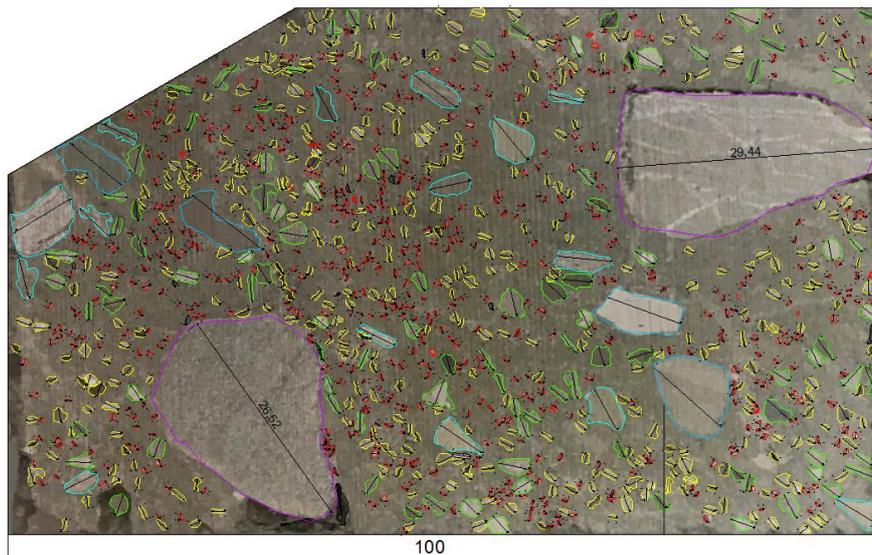


Figura 3.4 Classificazione delle inclusioni presenti nella fotografia del blocco 2 in funzione della massima dimensione osservabile.

Terminata la classificazione si è proceduto con il calcolo della frequenza assoluta e relativa dove la prima è data dal numero di elementi individuati per la classe  $i$ -esima, la seconda è il numero di elementi individuati in ciascuna classe rapportato al numero totale di inclusioni presenti nell'area indagata.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per l'intera area nei due spezzoni (*Tabella 3.1* *Tabella 3.2*):

**Spezzone 1 A=100%**

A	6880
dmod	29,23

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	0,52 - 1,04	79	25,00	0,0125
classe 2	1,04 - 2,07	117	37,03	0,01875
classe 3	2,07 - 4,15	78	24,68	0,0375
classe 4	4,15 - 8,29	35	11,08	0,075
classe 5	8,29 - 16,59	6	1,90	0,15
classe 6	> 16,59	1	0,32	0,2
	Tot	316		

*Tabella 3.1 Classificazione dei blocchi spezzone 1 per A=100%*

**Spezzone 2 A=100%**

A	5750
dmod	29,44

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	0,47 - 0,95	555	52,26	0,0125
classe 2	0,95 - 1,90	388	36,53	0,01875
classe 3	1,90 - 3,79	98	9,23	0,0375
classe 4	3,79 - 7,58	15	1,41	0,075
classe 5	7,58 - 15,17	4	0,38	0,15
classe 6	> 15,17	2	0,19	0,2
	Tot	1062		

*Tabella 3.2 Classificazione dei blocchi spezzone 2 per A=100%*

Conclusa questa operazione si è proseguito analogamente per le altre finestre di osservazione, in realtà per ciascuna percentuale di area individuata si sono indagati due quadranti.

Di seguito si riportano nelle *Tabelle 3.3,3.4,3.5* quanto effettuato per lo spezzone 1 facendo riferimento ad un solo quadrante, quelle che invece esprimono la procedura effettuata per il secondo quadrante dello spezzone 1 e per il secondo spezzone sono presenti in *Allegato 1*.

### Spezzone 1 A=25%

A	1720
dmod	16,06

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,52	9	10,98	0,0125
classe 2	0,52 - 1,04	24	29,27	0,01875
classe 3	1,04 - 2,07	29	35,37	0,0375
classe 4	2,07 - 4,15	14	17,07	0,075
classe 5	4,15 - 8,29	4	4,88	0,15
classe 6	> 8,29	2	2,44	0,2
	Tot	82		

Tabella 3.3 Classificazione per lo spezzone 1 A=25% quadrante 1

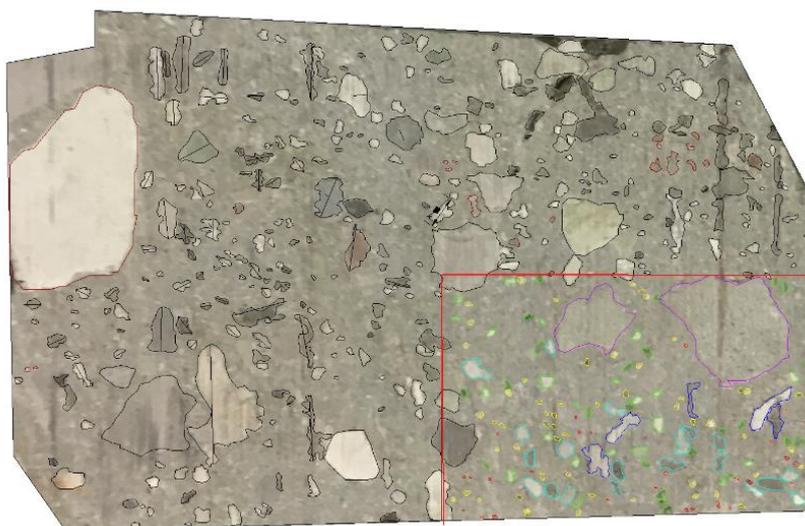


Figura 3.5 Finestra di indagine pari a 25%, spezzone 1

### Spezzone 1 A=6,25%

A	430
dmod	4,13

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,26	0	0,01	0,0125
classe 2	0,26 - 0,52	0	0,01	0,01875
classe 3	0,52 - 1,04	23	54,76	0,0375
classe 4	1,04 - 2,07	17	40,48	0,075
classe 5	2,07 - 4,15	1	2,38	0,15
classe 6	> 4,15	2	4,76	0,2
	Tot	42		

Tabella 3.4 Classificazione per lo spezzone 1 A=6,25% quadrante 1

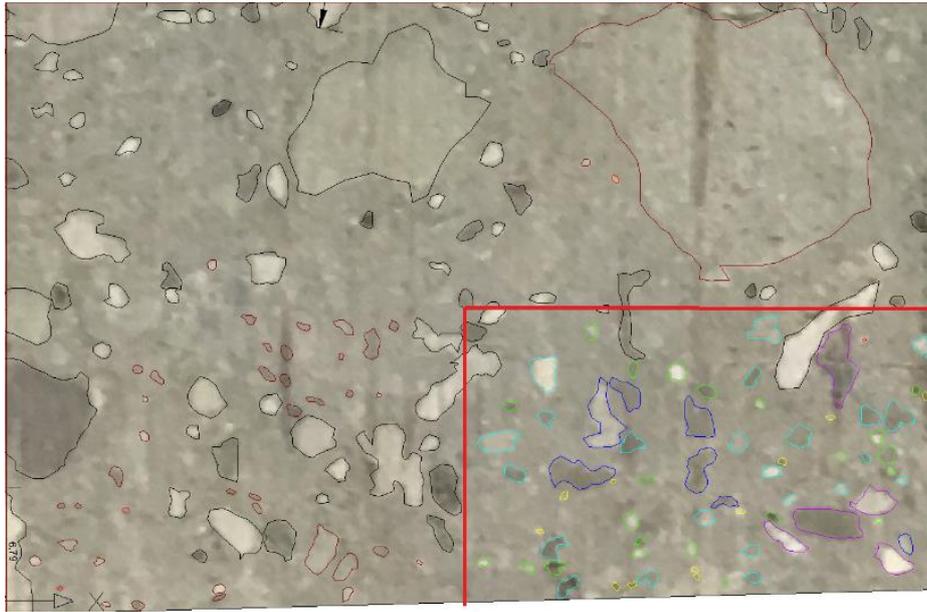


Figura 3.6 Finestra di indagine pari a 6.25%, spezzone 1

**Spezzone 1 A=1,56%**

A	107,328
dmod	4,13

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,13	0	0,01	0,0125
classe 2	0,13 - 0,26	2	14,29	0,01875
classe 3	0,26 - 0,52	4	28,57	0,0375
classe 4	0,52 - 1,04	6	42,86	0,075
classe 5	1,04 - 2,07	2	14,29	0,15
classe 6	> 2,07	0	0,01	0,2
	Tot	14		

Tabella 3.5 Classificazione per lo spezzone 1 A=1,56% quadrante 1

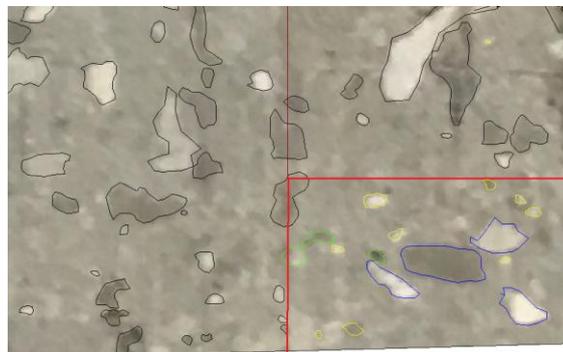


Figura 3.7 Finestra di indagine pari a 1,56%, spezzone 1

L'autosomiglianza viene dimostrata dal grafico in *Figura 3.8* e *Figura 3.9*, sull'asse delle ascisse vi è il rapporto  $d_{mod}/\sqrt{A}$  che per ciascuna classe è il valore di mezzieria tra la dimensione superiore e la dimensione inferiore di ciascun intervallo ; ad esempio per la classe 3 l'intervallo è caratterizzato dagli estremi  $5\%\sqrt{A}/2$  e  $5\%\sqrt{A}$  il corrispondente valore di  $d_{mod}/\sqrt{A}$  è calcolato come  $(0.05/2+0.05)/(2*\sqrt{A})/\sqrt{A}$ .

In entrambi i grafici è possibile osservare la somiglianza tra gli andamenti della frequenza relativa nelle varie scale di osservazione. Per ciascuna area indagata si osserva un maggior numero di blocchi appartenenti alle classi 2,3 e 4 nel caso di area di indagine pari a 100%; si osserva inoltre che un gran numero di inclusioni rientra nella prima classe e che l'andamento della frequenza relativa è decrescente essendo presenti in un numero modesto i blocchi di grande dimensione.

Nel caso di finestra di analisi pari a 1,56% è risultato particolarmente complesso per entrambi gli spezzoni trovare inclusioni che rientrassero nelle classi 1 e 2, sicuramente a causa di una non sufficiente risoluzione della fotografia. Nel complesso però lo spezzone 2 ha garantito l'individuazione di un numero più elevato di elementi di varie dimensioni al suo interno dimostrando così la presenza di inclusioni di dimensione variabile a ciascuna scala di osservazione.

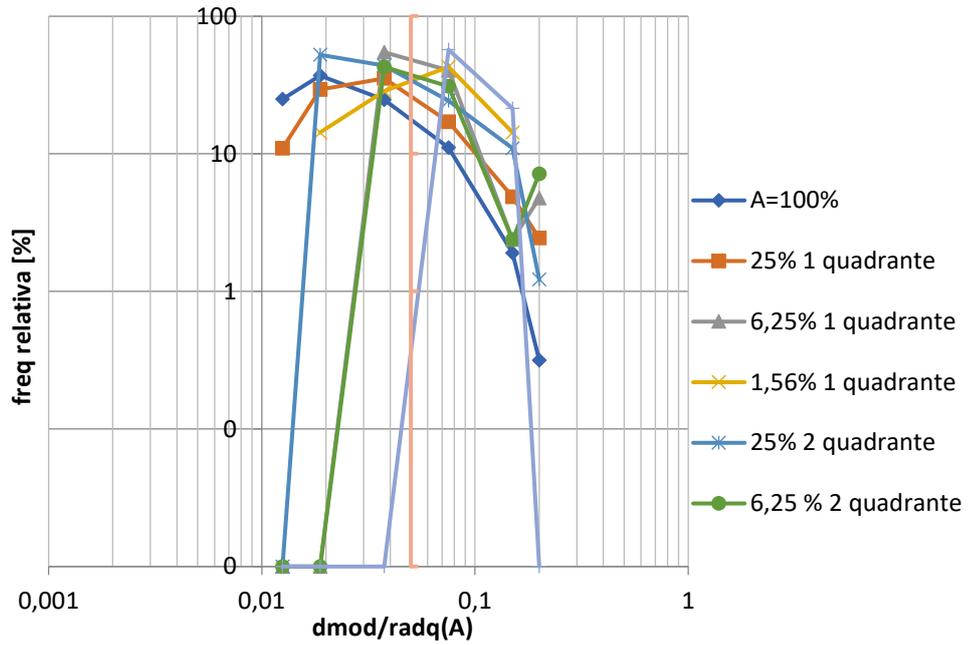


Figura 3.8 Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, spezzone 1.

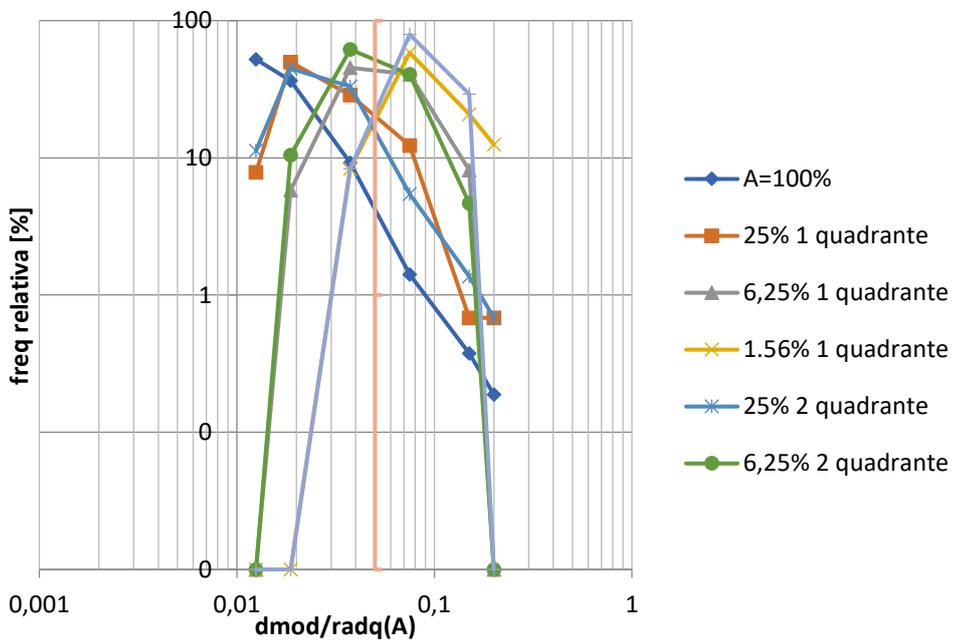


Figura 3.9 Andamento della frequenza relativa dei blocchi per ciascuna classe dimensionale, spezzone 2.

### 3.2. Stima della percentuale dei blocchi

Medley, come viene spiegato nel paragrafo 1.1.3, ha eseguito una stima della percentuale lineare dei blocchi simulando una campagna di sondaggi su provini artificiali di cui conosceva la percentuale volumetrica.

Ha analizzato 40 immagini andando a studiare le fotografie di 10 porzioni di ciascuno dei 4 provini. Su ciascuna immagine ha realizzato 10 linee di scansione con lo scopo di simulare i fori di sondaggio. Mediante l'uso dell'approccio statistico di Montecarlo ha potuto realizzare innumerevoli simulazioni andando a disporre in maniera random le linee di scansione e i dati ottenuti hanno portato alla realizzazione del grafico in *Figura 3.10*. I risultati sono stati valutati in termini di percentuale lineare cumulata disposta sull'asse delle ordinate, sull'asse delle ascisse invece vi è il parametro  $N \cdot d_{max}$  che non è altro che una misura della lunghezza di campionamento ma anche multiplo della dimensione massima osservabile.

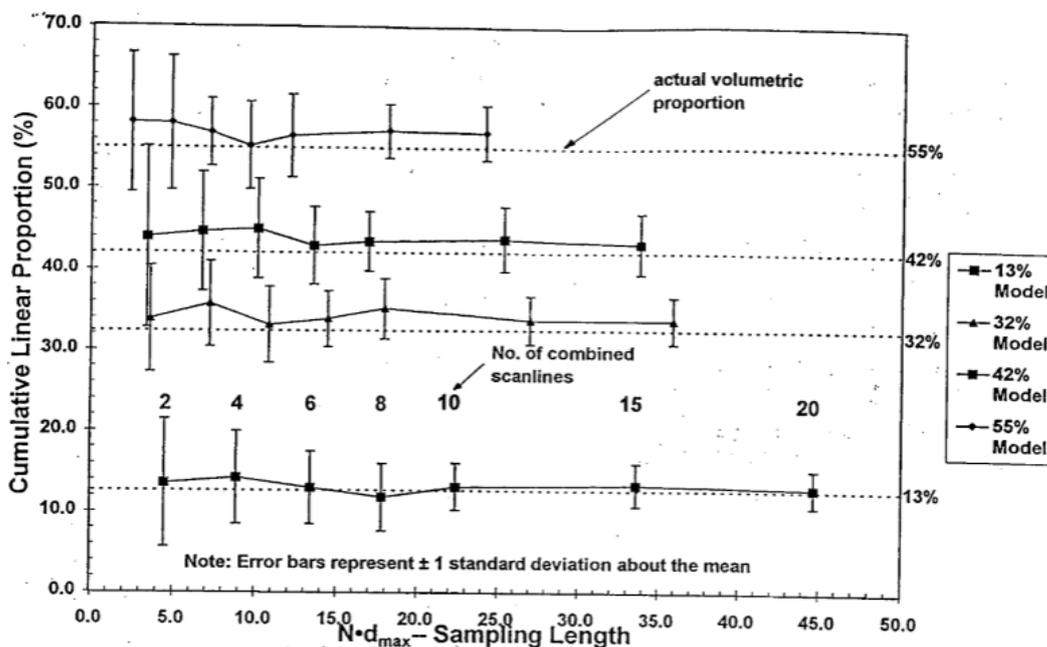
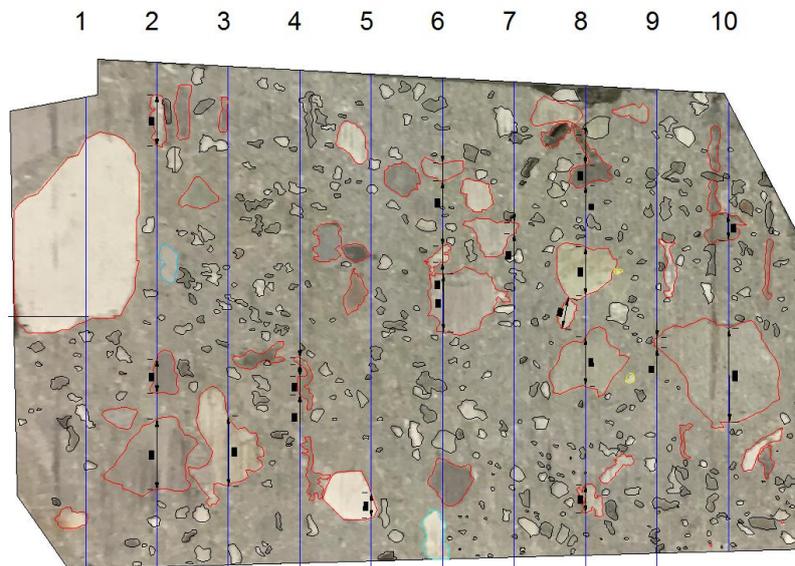


Figura 3.10 Grafico che mostra l'andamento della percentuale lineare cumulata al variare della lunghezza di campionamento  $N \cdot d_{max}$ . (Medley, 1997).

Medley ha osservato che per valori di  $N \cdot d_{max}$  crescenti i corrispettivi valori medi di percentuali cumulate si assestavano mantenendosi costanti; inoltre, come è mostrato in *Figura 3.10*, ha dimostrato che per una certa profondità di campionamento il valore

noto di percentuale volumetrica diventa pressochè identico a quello di percentuale lineare. Il valore di  $N \cdot d_{max}$  per cui viene confermata tale coincidenza è risultato pari a  $10 d_{max}$ .

Nel seguente lavoro di tesi viene applicata la medesima procedura realizzando però un numero inferiore di simulazioni random. Sulla base delle fotografie dei due spezzoni adoperate per le precedenti operazioni si sono tracciate, con l'ausilio del software Autocad, 10 linee di scansione e si sono considerate le corde intercettate dai blocchi di dimensioni superiori alla soglia blocchi/ matrice e inferiori a  $0.75\sqrt{A}$ . (Figura 3.11 e 3.12)



*Figura 3.11 Rappresentazione delle linee di scansione che simulano i fori di sondaggio, i blocchi con dimensioni superiori al valore di soglia sono contornati in rosso, lo spezzone 1.*

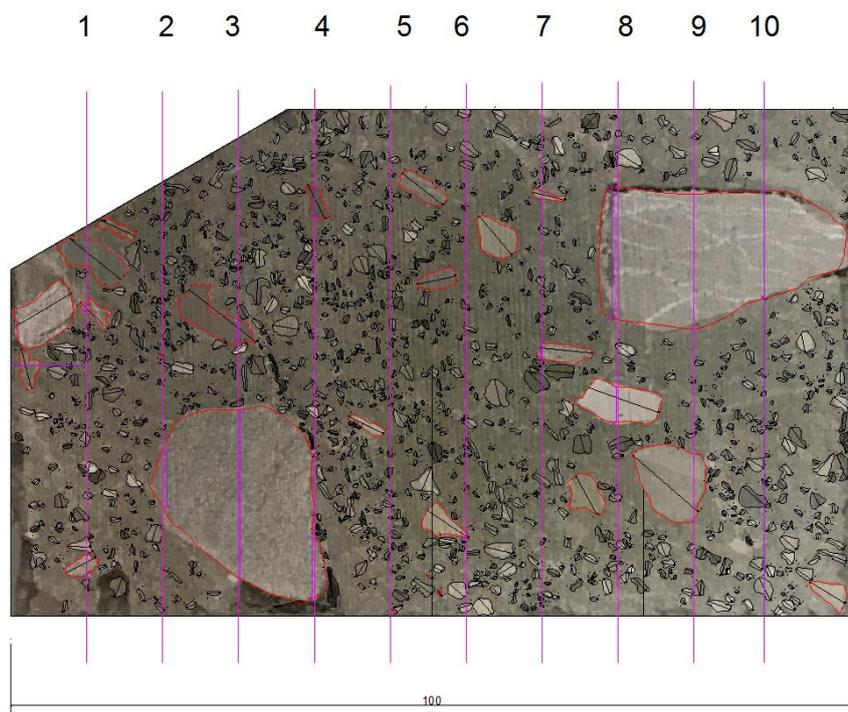


Figura 3.12 Rappresentazione delle linee di scansione che simulano i fori di sondaggio, i blocchi con dimensioni superiori al valore di soglia sono contornati in rosso, spezzone 2.

Il primo calcolo ha riguardato la valutazione della percentuale areale di ciascuno spezzone andando a dividere la somma delle aree dei blocchi aventi il range di dimensioni precedentemente definito per l'area totale della immagine. Tali percentuali sono risultate praticamente uguali e pari a 18,8% e 18,3% rispettivamente per lo spezzone 1 e 2.

Il passo successivo è stato quello di calcolare la percentuale lineare cumulata sulla base della procedura affrontata da Medley, quindi mediante l'approccio statistico Montecarlo. Si sono ipotizzati 5 scenari differenti di posizioni dei sondaggi in modo random e i risultati sono stati graficizzati in funzione della lunghezza di campionamento.

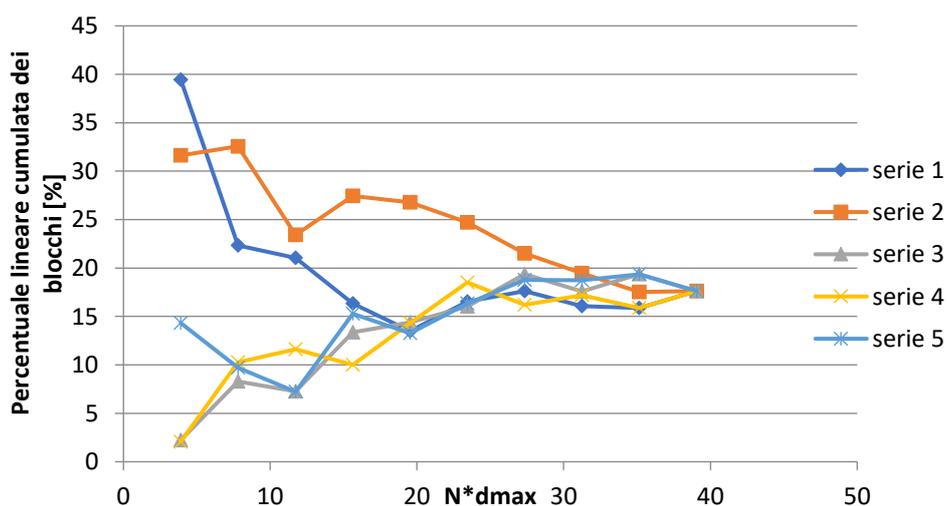
Per ciascuna serie random sull'asse delle ordinate è riportato il valore della percentuale lineare cumulata che viene calcolata nel seguente modo:

- Si calcola la somma delle corde intersecate dalla prima linea di scansione considerata ( $Lc1$ ) e si divide per la lunghezza della scanline  $Ls1 \rightarrow Lc1/Ls1$ .

- Si calcola la somma delle corde intersecate dalla seconda linea di scansione considerata (Lc2) e la si somma ad Lc1, tale risultato viene diviso per la somma della lunghezza delle due scanlines  $\rightarrow (Lc1+Lc2)/(Ls1+Ls2)$ .
- Si prende in considerazione la terza linea di scansione, si calcola la somma delle corde che essa interseca ottenendo così Lc3. Si va a sommare questo risultato a Lc1+Lc2, questa somma si divide per la lunghezza delle tre scanlines  $Ls1+Ls2+Ls3 \rightarrow (Lc1+Lc2+Lc3)/(Ls1+Ls2+Ls3)$ .
- Si procede analogamente fino alla decima linea di scansione per ciascuna serie random.

Sull'asse delle ascisse come è stato anticipato viene riportata la lunghezza di campionamento, definita per la prima linea di scansione come rapporto tra la lunghezza della prima scanline e dmax ( $Ls1/dmax$ ). Nel caso di esecuzione di due sondaggi la lunghezza di campionamento è data dal rapporto  $(Ls1+Ls2)/dmax$ , quindi come somma delle linee di scansione considerate rapportata alla dimensione massima osservabile; si procede quindi analogamente fino al decimo sondaggio.

In *Allegato 1* sono riportati i calcoli svolti e i rispettivi risultati ottenuti che vengono anche graficizzati in *Figura 3.13, 3.14, 3.15, 3.16*.



*Figura 3.13 Percentuale lineare cumulata funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 1*

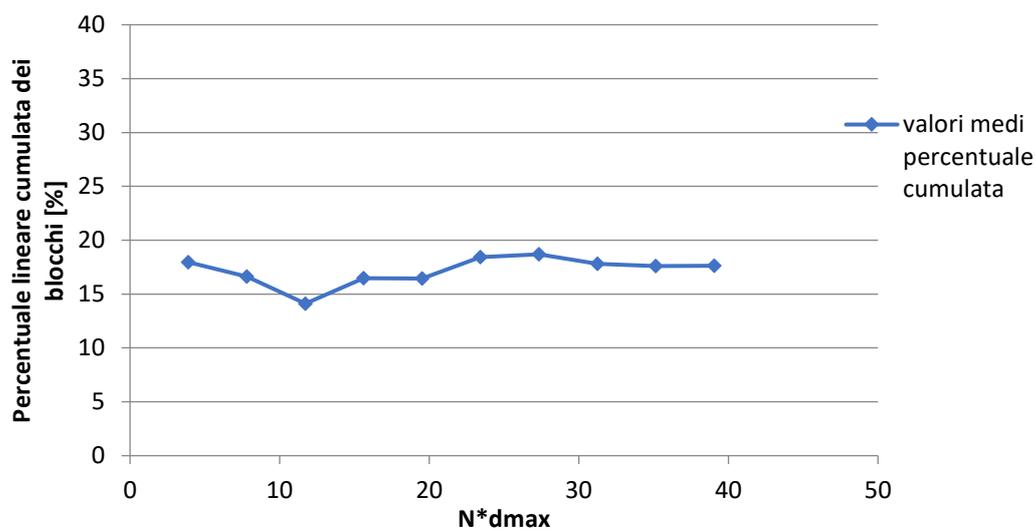


Figura 3.14 Percentuale lineare cumulata media funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2.

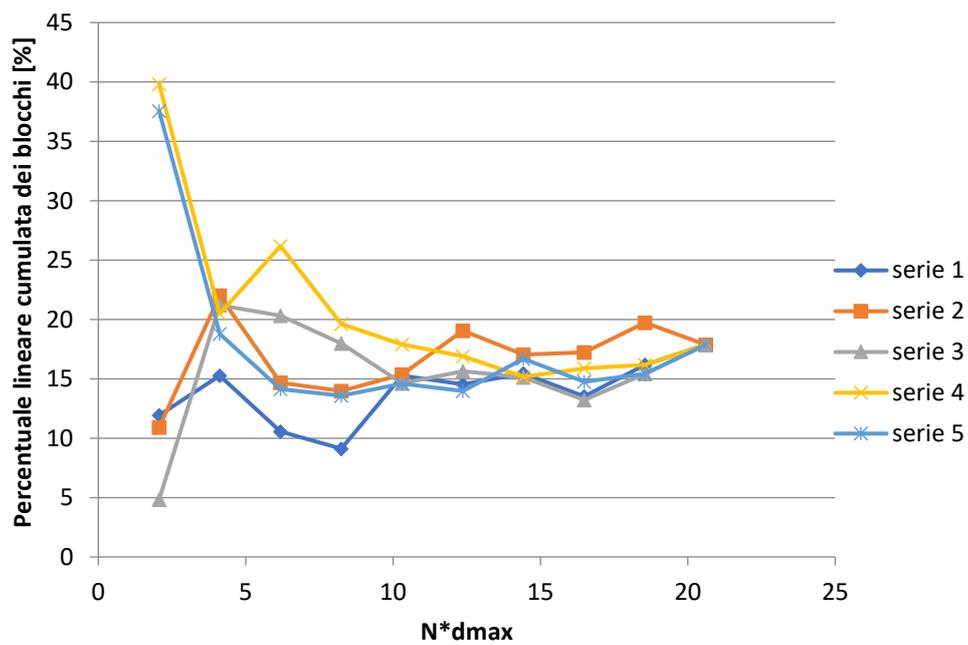


Figura 3.15 Percentuale lineare cumulata funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2.

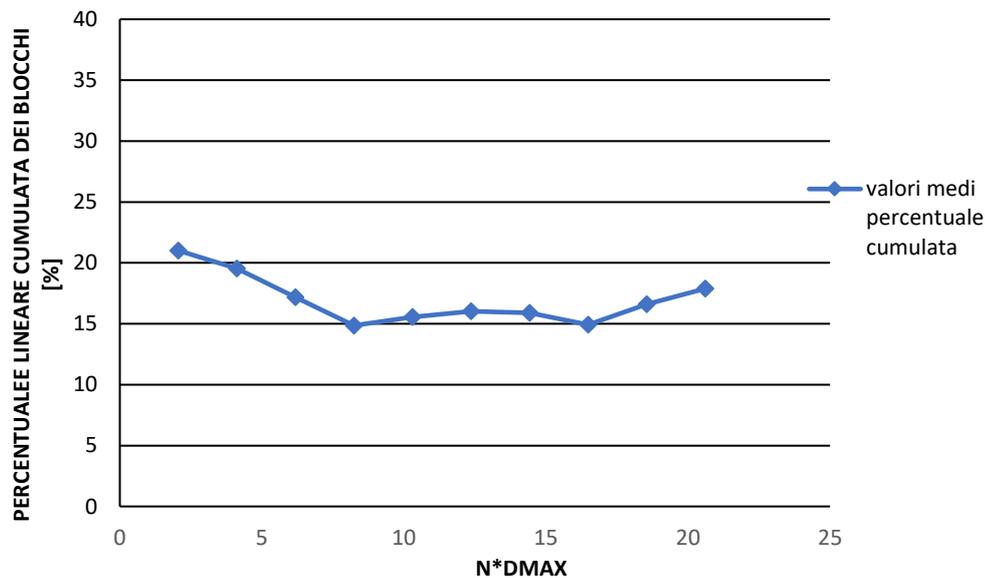


Figura 3.16 Percentuale lineare cumulata media funzione della lunghezza di campionamento, spezzone 2

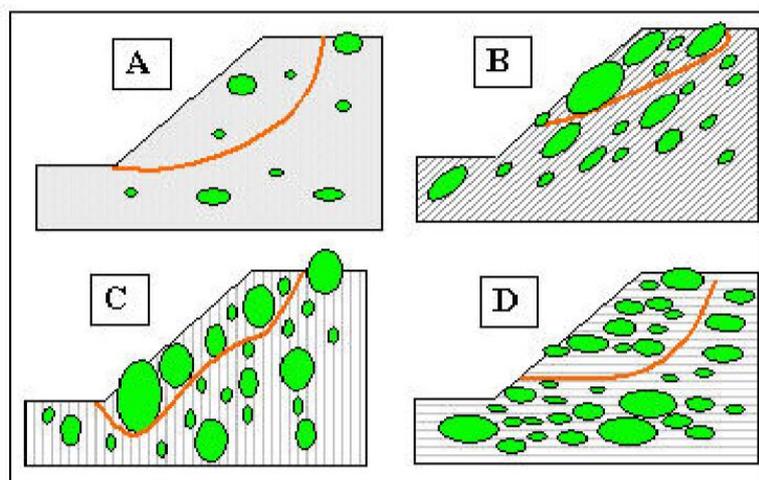
In Figura 3.13 e 3.16 vengono graficizzate le percentuali medie cumulate rispettivamente degli spezzoni 1 e 2. Si può osservare che gli andamenti si stabilizzano in corrispondenza di  $20 \cdot d_{max}$  per lo spezzone 1 e di circa  $12 \cdot d_{max}$  per lo spezzone 2 e per dei valori di percentuali lineari del 18 % circa.

Si può notare quindi una certa coincidenza tra il risultato di percentuale areale ottenuto per entrambi gli spezzoni e quello di percentuale lineare. Una maggiore stabilizzazione del risultato è riscontrabile nel caso dello spezzone 1 (Figura 3.13) il cui andamento si avvicina molto a quello ottenuto da Medley; egli però, aveva evidenziato nei suoi studi sul *Franciscan mélange* che la percentuale lineare assumeva valori costanti per una lunghezza di campionamento di valore nettamente inferiore a quello individuato nel caso in esame. Il motivo di tale discrepanza è molto probabilmente dovuto ad un ridotto numero di serie random analizzate in questo lavoro di tesi.

## 4. Stabilità di versanti in bimrock

La caratterizzazione dei bimrock fino ad ora trattata ha lo scopo di definire questo corpo geologico, caotico, che spesso può causare ostacoli alla realizzazione di gallerie, per la presenza di blocchi durante le operazioni di scavo e influenzare la stabilità dei versanti. La disposizione spaziale e l'orientazione dei clasti rocciosi in un pendio giocano un ruolo importante nella stabilità e nella forma della potenziale superficie di scivolamento. In *Figura 4.1* sono rappresentate quattro possibili condizioni di pendii instabili (Medley e Sanz 2004):

- A) Un basso contenuto volumetrico di blocchi la superficie di scivolamento non è influenzata dalla presenza dei clasti.
- B) Anisotropia in bimrock, tipo il *mélange* in cui i blocchi sono orientati nella direzione del pendio e la superficie di scivolamento segue tale struttura.
- C) Bimrock anisotropo in cui i blocchi sono disposti verticalmente, questo implica la formazione di una superficie di scivolamento maggiormente tortuosa che migliora la stabilità del pendio.
- D) Si possono individuare aree con una elevata densità di blocchi e aree con VBP inferiori, separate dalla superficie di scivolamento; questa condizione riduce il grado di stabilità a causa del peso della porzione di versante superiore più pesante per la presenza di un maggior numero di blocchi.



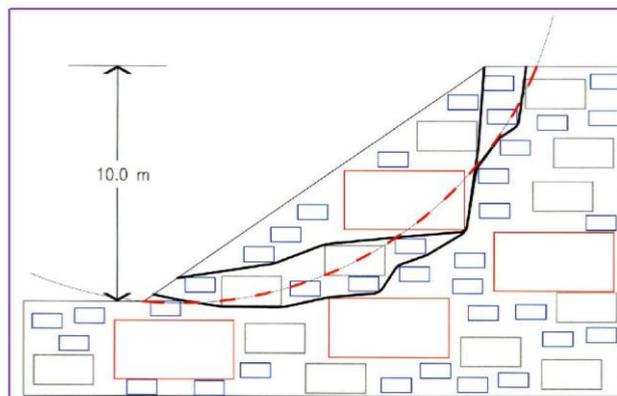
*Figura 4.1 Particolari condizioni di pendii instabili (Medley & Sanz, 2004).*

Modellare un versante in bimrock può essere utile per dimostrare l'effetto positivo che rivestono i blocchi, disposti secondo una certa orientazione e una certa densità, ai fini della stabilità. Medley e Sanz (2003) realizzano il modello riportato in *Figura 4.2*, in cui il pendio è inclinato di  $35^\circ$  e la sua altezza è di 10 metri assunta come dimensione caratteristica del problema ingegneristico. I blocchi ellissoidici del *Franciscan mélange* vengono modellati con rettangoli disposti orizzontalmente e distribuiti in maniera random secondo proporzioni areali di 50%, 25% e 13%; assumono inoltre che tali percentuali coincidano con le proporzioni volumetriche.

I parametri di resistenza della matrice cioè coesione e angolo di attrito vengono posti pari rispettivamente a 10 KPa e 25 gradi sulla base delle esperienze del *Franciscan mélange*, viene invece trascurata la resistenza dei blocchi e viene considerata la presenza di una falda al di sotto dell'area di studio.

Tramite l'utilizzo del metodo all'equilibrio limite viene inizialmente individuata la superficie di rottura che si forma in presenza della sola matrice. Essa è identificata dal tratteggio in *Figura 4.2* e fornisce un fattore di sicurezza pari a 1,26.

Grazie all'utilizzo di un programma di grafica ingegneristica a partire da tale superficie vengono tracciati i possibili percorsi di altre superfici di scivolamento tortuose all'interno di modelli con percentuali volumetriche di blocchi definite (*Figura 4.2*). Tutte le superfici di rottura ipotizzate vengono successivamente importate nel software SlopeW<sup>TM</sup> che effettua le analisi di stabilità con il metodo all'equilibrio limite e fornisce i fattori di sicurezza.



*Figura 4.2* Blocchi disposti in modo casuale in un pendio in bimrock, il tratteggio descrive la superficie di scivolamento in presenza di sola matrice, le linee nere definiscono due potenziali superfici di scivolamento considerando anche la presenza dei blocchi (Medley & Sanz, 2004).

Viene effettuata una comparazione tra i fattori di sicurezza ottenuti da Medley e Sanz (2004) e quelli ottenuti da Irfan & Tang (1993); quest'ultimo realizza un modello di pendio diverso dal precedente esso infatti è alto 10 metri e possiede una pendenza di 60 gradi; inoltre vi sono blocchi disposti nella direzione di pendenza del versante e con una proporzione volumetrica che varia da 10% a 55%. I parametri di resistenza della matrice sono i seguenti:  $c'=5\text{KPa}$  e  $\phi'=35^\circ$ . Viene adoperato per le analisi di stabilità il metodo di Morgenstern & Price su potenziali superfici di rottura che toccano gli spigoli di blocchi adiacenti. (Figura 4.3).

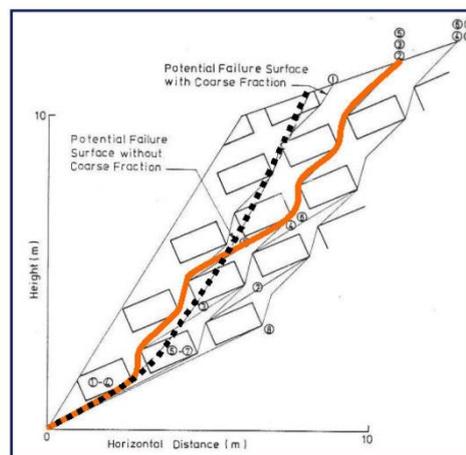


Figura 4.3 Pendio contenente terreno alluvionale di Hong Kong, il tratteggio delinea la superficie di scivolamento nel caso di versante con sola matrice, la curva arancione identifica la superficie e zig zag per effetto della presenza dei blocchi. (Irfan e Tang, 1993)

Dalla comparazione dei risultati ottenuti nei due casi Medley & Sanz espongono le seguenti conclusioni:

- Per VBP compresi tra 25% e 30% la presenza dei blocchi crea pochi vantaggi dal punto di vista della stabilità; da queste percentuali in poi invece si osserva un incremento di stabilità.
- I risultati coincidono con quelli ottenuti da Lindquist e Goodman secondo i quali per VBP compresi tra 25% e 70% si hanno incrementi di oltre  $16^\circ$  dell'angolo di attrito rispetto a quello della sola matrice.
- Irfan & Tang dimostrano che la stratificazione dei blocchi gioca un ruolo rilevante quasi quanto la loro proporzione volumetrica; inoltre, i blocchi orientati parallelamente al pendio tendono ad instabilizzare il versante riducendone il fattore di sicurezza, se invece i blocchi sono disposti nella

direzione normale al pendio generano superfici di rottura maggiormente tortuose favorendo così la stabilità del versante.

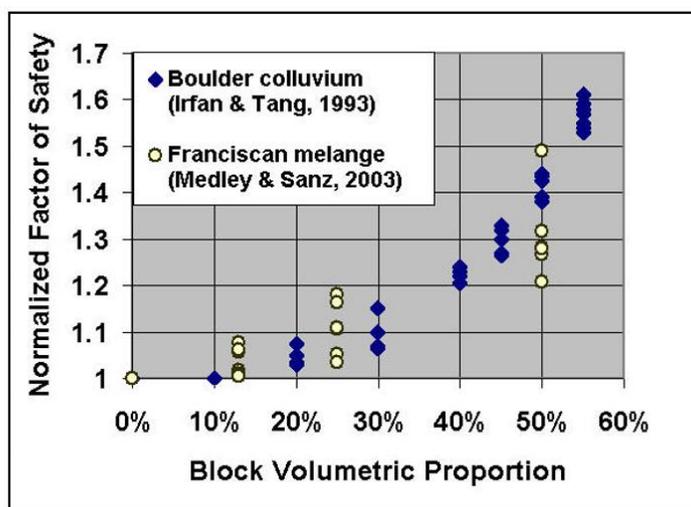


Figura 4.4 Confronto in termini di fattore di sicurezza tra il Franciscan melange e il deposito alluvionale di Hong Kong (Medley & Sanz, 2004).

#### 4.1. Analisi di stabilità mediante modellazione numerica

Diversi autori hanno analizzato la stabilità di versanti in bimrock utilizzando modelli numerici, al fine di valutare l'influenza di particolari parametri meccanici caratteristici del bimrock.

Barbero et al.(2006) affrontano l'analisi numerica mediante il codice alle differenze finite FLAC. La procedura necessita in primo luogo di un software che definisca i parametri di ingresso del codice FLAC che sono i seguenti:

- la percentuale volumetrica dei blocchi;
- l'esponente della distribuzione di frequenza delle dimensioni dei blocchi;
- le massime e minime dimensioni delle ellissi e il rapporto tra l'asse maggiore e l'asse minore;
- la direzione media e lo scarto del diametro massimo.

Viene quindi creato un programma che genera un file compatibile con il codice FLAC che presenta gli indici delle celle il cui centro appartiene ad un blocco, il processo che sta alla base del software è di tipo statistico di estrazione casuale in termini di

dimensione ed orientazione delle ellissi. Le analisi sono state affrontate per percentuali volumetriche pari a 20%, 30% e 50%, per eccentricità dei blocchi di 1,0.5 e 0.25 infine per diverse inclinazioni delle ellissi pari a 0°,45°,90° e 135° (Figura 4.5). Il coefficiente di sicurezza FS viene valutato con il metodo SRF (Strenght Reduction Factor, vedi *paragrafo 5.2*) ed il suo valore porta alle seguenti conclusioni:

- FS cresce al crescere della percentuale volumetrica soprattutto per VBP superiori al 20% che quindi può essere assunto come valore di soglia;
- Le forme dei blocchi influenzano il valore del fattore di sicurezza infatti blocchi di forma ovale schiacciata rendono più tortuoso l'andamento della superficie di scivolamento e questo comporta maggiore stabilità del versante (FS maggiore);
- L'orientazione dei blocchi sembra non influenzare in modo sostanziale il fattore di sicurezza;

La metodologia eseguita da Barbero et al. pone le basi per approcci nuovi nel campo dell'analisi di stabilità di versante poiché introduce modelli di pendii in cui vi sono all'interno della matrice blocchi ottenuti da un'estrazione casuale.

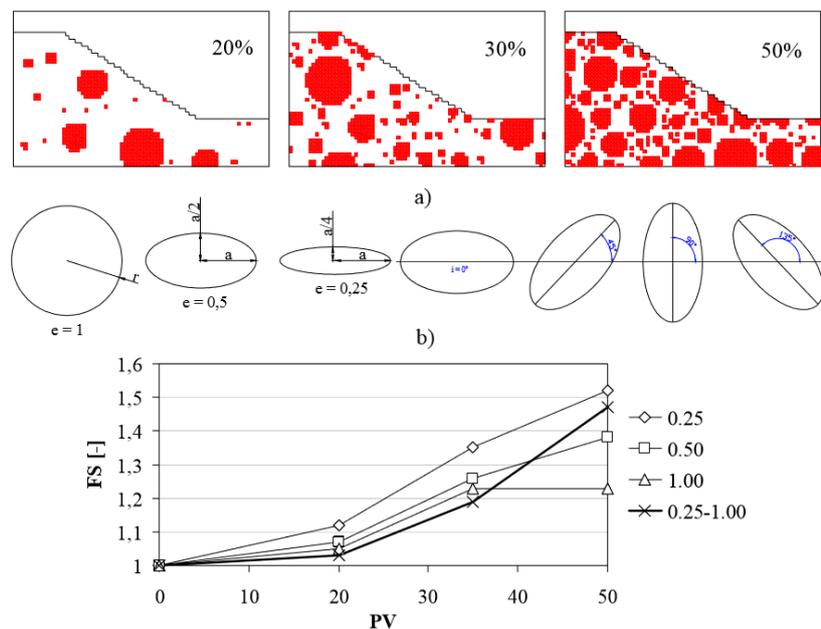


Figura 4.5 A) versanti con diverse VBP; B) diverse estensioni e inclinazioni dei blocchi; C) andamento del fattore di sicurezza al variare della percentuale volumetrica per diverse eccentricità dei blocchi. (Barbero et al. 2006)

## 4.2. Analisi di stabilità mediante LEM e FEM

Napoli et al. (2018) hanno eseguito ulteriori approfondimenti per la valutazione della stabilità di versanti in bimrock. Sono state svolte più di 90 analisi 2D su modelli di versanti sfruttando sia il metodo all'equilibrio limite LEM che il metodo numerico agli elementi finiti FEM.

I modelli di versanti contenenti al loro interno blocchi le cui posizioni e dimensioni vengono estratte casualmente con tecnica Montecarlo da opportune distribuzioni statistiche, sono costruiti mediante un programma creato con il codice Matlab.

In sostanza per ciascun VBP considerato pari a 25%,40%,55%,70% il codice Matlab realizza 10 files ciascuno contenente una diversa distribuzione dei blocchi; questa procedura implica la possibilità di avere dieci configurazioni di versante per ciascun VBP da poter analizzare successivamente con il metodo LEM o FEM.

L'analisi all'equilibrio limite viene effettuata con il codice Slide (v.5.0 Rocscience) con i metodi di Bishop e Spencer che forniscono risultati analoghi, per questo nello studio affrontato da Napoli et al. si fa riferimento ai risultati ottenuti con il metodo di Bishop semplificato. Si osserva che la tortuosità della potenziale superficie di rottura non viene tenuta in conto con questo metodo di analisi perché la superficie di rottura ha una forma circolare; inoltre, dai risultati presenti in *Tabella 4.1*, è possibile notare che un sostanziale aumento del fattore di sicurezza si ha per VBP pari a 55% e 70%.

VBP [%]	Safety factors		
	Average SF	Standard deviation	Coefficient of variation [%]
0 (matrix-only)	1,08	–	–
25	1,21	0,043	3,6
40	1,27	0,028	2,2
55	1,80	0,474	26,3
70	2,43	0,554	22,8

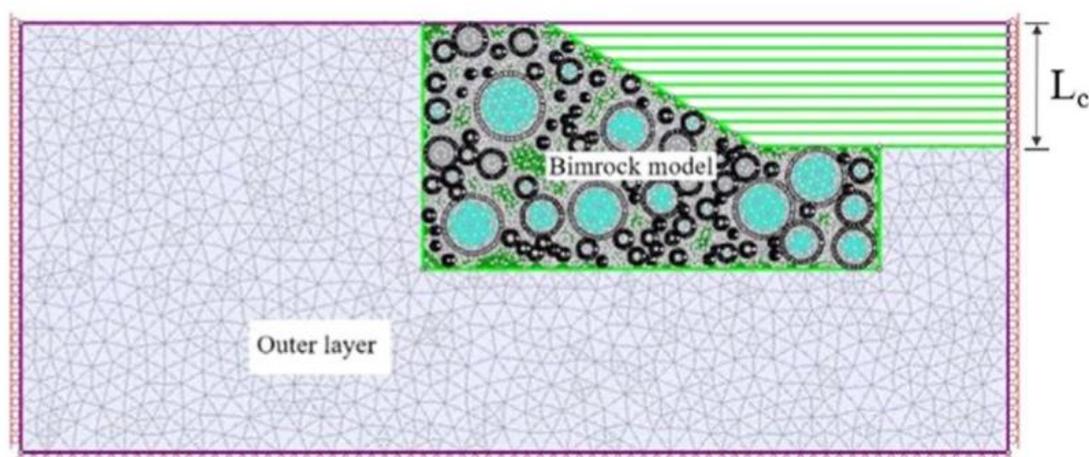
*Tabella 4.1* Tabella che mostra il progressivo decremento del fattore di sicurezza per VBP crescenti (Napoli et al.2018).

Le analisi con il metodo FEM vengono eseguite con il software Phase<sup>2</sup> (v.8.0 Rocscience). Il versante viene inserito all'interno di un modello più esteso con lo scopo di evitare l'influenza del contorno esterno e dei vincoli sull'analisi di stabilità del

pendio; viene inoltre scelta una mesh triangolare e viene simulato uno scavo in 10 stage che realizza alla fine il profilo del versante. I parametri meccanici dei blocchi e della matrice, riportati in *Tabella 4.2*, vengono assegnati ai vari elementi imponendo che il modello in bimrock assuma un comportamento elastico perfettamente plastico e invece la parte esterna si comporti in maniera elastica (*Figura 4.6*).

Parameter	Matrix	Blocks
E [GPa]	2,5	7,2
$\nu$ [-]	0,3	0,3
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	23	23
c [kPa]	10	1000
$\phi$ [°]	28	50

*Tabella 4.2 Parametri meccanici assegnati alla matrice e ai blocchi. (Napoli et al.2018)*



*Figura 4.6 Modello di versante in bimrock per analisi numerica (Napoli et al. 2018).*

Per la valutazione del fattore di sicurezza viene adoperato il metodo SSR che riduce i parametri di resistenza fino a quando non si verifica la rottura. In *Figura 4.7* sono rappresentati i confronti tra i due metodi e con gli approcci empirici di Kalender e Lindquist (*paragrafo 1.2.3*) che hanno portato alle seguenti conclusioni:

- Per VBP pari a 25% l'incremento del fattore di sicurezza, rispetto a quello che si ha in presenza di sola matrice, è marginale sia nel caso FEM che nel caso LEM;
- Nel caso delle analisi FEM si osservano importanti incrementi del fattore di sicurezza per alte percentuali volumetriche e all'interno della stessa classe

di VBP vi è una considerevole variabilità dei valori di coefficiente di sicurezza per effetto delle differenti posizioni dei blocchi.

- Quando si effettua un'analisi di un materiale eterogeneo è sconsigliato utilizzare un approccio all'equilibrio limite poiché quest'ultimo fornisce una superficie di rottura circolare; nella realtà infatti un materiale non omogeneo presenta una superficie di rottura tortuosa e questa informazione è confermata dalle analisi FEM;
- Il metodo LEM produce una sovrastima del fattore di sicurezza poiché le superfici di rottura circolari individuate risultano nettamente più superficiali rispetto a quelle tortuose fornite dal metodo FEM;

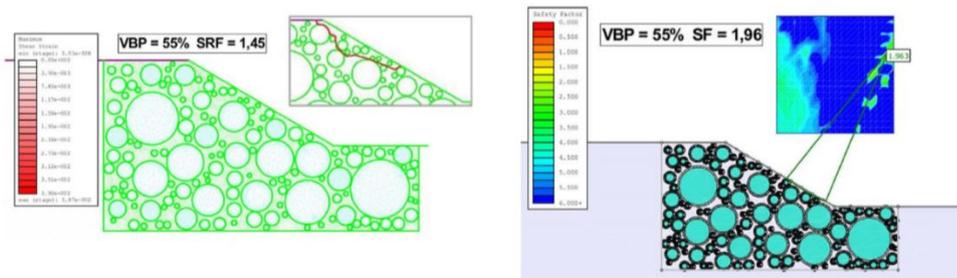


Figura 4.7 Confronto in termini di fattore di sicurezza tra modelli con VBP pari a 55% , a sinistra è applicato il metodo FEM a destra il metodo LEM (Napoli et al.2018).

## 5. Analisi della stabilità di un versante con blocchi ellittici isoorientati

Nel presente lavoro di tesi vengono realizzati modelli di versanti sulla base del procedimento seguito da Napoli et al. (2018), con lo scopo di indagare l'influenza della presenza dei blocchi ellittici isoorientati sulla stabilità; trascurarne la presenza infatti sottostima in maniera considerevole le proprietà meccaniche del bimrock che costituisce il pendio.

I blocchi, di dimensione variabile secondo una legge di distribuzione di probabilità (vedi *paragrafo 5.1*), vengono disposti all'interno del modello in modo casuale; per fare questo si sfrutta il codice Matlab che fornisce un file in formato *.txt* con le dimensioni e le coordinate dei centri delle inclusioni. Successivamente tale file viene convertito nel formato *.scr*, importato in Autocad e salvato come file *.dxf*. A questo punto il modello geometrico *.dxf* viene importato nel software agli elementi finiti RS<sup>2</sup> (v. 9.0 Rocscience) e ne vengono definite le proprietà meccaniche. Di seguito si riportano nel dettaglio i vari step affrontati per la definizione del modello.

### 5.1. Creazione del modello geometrico

Il codice Matlab genera casualmente le dimensioni e la posizione dei blocchi partendo dai seguenti dati di input:

- Caratteristiche geometriche del pendio;
- Eccentricità delle inclusioni ellittiche;
- Percentuale volumetrica.

Fissata la percentuale volumetrica il risultato viene fornito con una tolleranza pari a 1/40 VBP. Il codice estrae in maniera random le coordinate dei blocchi rispettando però particolari vincoli legati alle dimensioni massime e minime dei clasti; questi ultimi infatti hanno l'asse maggiore e l'asse minore rispettivamente compresi tra  $a$  e  $b$  dove  $a$  è 5% della dimensione caratteristica ( $L_c$ ), mentre  $b$  è il 75% di  $L_c$ .

Viene fissata come dimensione caratteristica l'altezza del pendio posta pari a 50 metri.

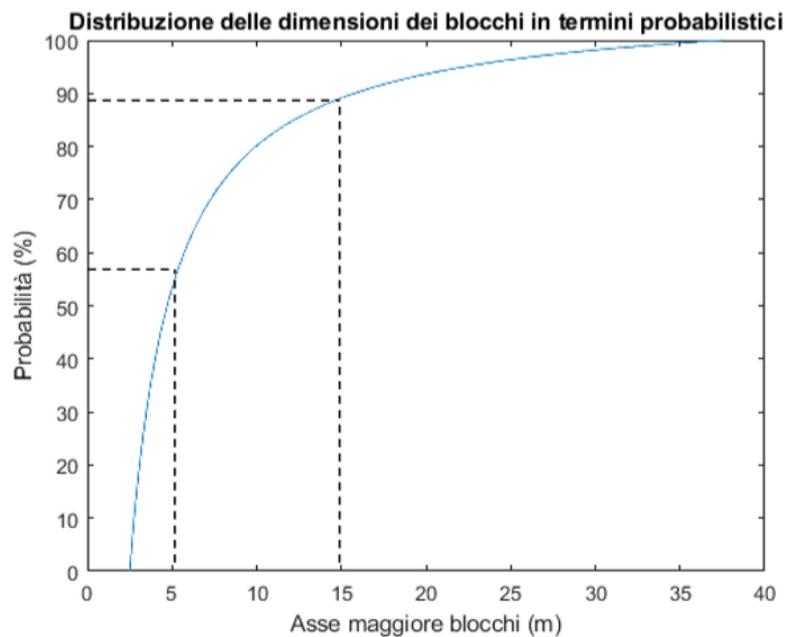
La funzione di distribuzione dei blocchi è di seguito riportata:

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

Questa funzione è analoga a quella adoperata da Napoli et al. (2018); in essa entrano in gioco i seguenti parametri:

- q è l'esponente della distribuzione dimensionale dei blocchi assunto pari a 2 come nel mélange (Medley, Lindquist,1995);
- a è la lunghezza dell'asse minore delle inclusioni (0,05Lc);
- b è la lunghezza dell'asse maggiore delle inclusioni (0,75Lc);
- d è il "diametro" compreso tra i due valori (a e b);

La distribuzione viene riportata in *Figura 4.1*:



*Figura 5.1 Distribuzione delle dimensioni dei blocchi*

Il codice Matlab esegue un ciclo "while" che ripete un gruppo di istruzioni un numero indefinito di volte attraverso il controllo di una condizione logica. Il ciclo si arresta quando viene raggiunta la percentuale volumetrica richiesta nei dati di input (*Allegato 2*); la percentuale VBP viene calcolata come rapporto tra la somma delle aree dei blocchi estratti e l'area della sezione del versante quindi come fosse una percentuale areale. Il programma dispone in maniera casuale i blocchi all'interno del pendio facendo in modo che non si intersechino.

Per la corretta visualizzazione delle ellissi in Autocad è necessario trasformare il file .txt in un formato .scr inserendo all'interno le diciture "orto on" ed "ellisse" rispettivamente nella prima e nella seconda riga. Una volta avviato il software Autocad e digitato sulla riga di comando la funzione "script" diventa possibile importare il file .scr e visualizzarlo. Il passo successivo consiste nella modifica delle ellissi in polilinee poiché solo in questo modo sarà possibile riconoscere i blocchi nel programma di calcolo agli elementi finiti RS<sup>2</sup>(v. 9.0 Rocscience). Il file Autocad contenente le ellissi viene innanzitutto salvato in formato R12/LT2; in questo modo si è effettuata una trasformazione delle inclusioni di forma ellittica in polilinee 3D, successivamente mediante il comando "esplosi" e il successivo comando "edita polilinea" il file contiene al suo interno polilinee 2D. Il file è così pronto per essere utilizzato dal software RS<sup>2</sup> non prima però di averlo salvato nel formato .dxf.

## **5.2. Modellazione agli elementi finiti**

La modellazione agli elementi finiti viene eseguita mediante il programma RS<sup>2</sup> che fa parte dei programmi presenti nel pacchetto Rocscience di softwares utilizzati per progettazione nell'ambito dell'ingegneria civile geotecnica.

Il fattore di sicurezza globale del versante è stimato mediante il metodo SSR (strength reduction factor). L'approccio SSR consiste nella riduzione dei parametri di resistenza del pendio di un fattore (SRF) fino al raggiungimento dell'incipiente rottura; tale fattore SRF è esattamente il fattore di sicurezza richiesto.

Questo approccio nel caso di materiali a comportamento elasto-plastico e assumendo come criterio di rottura quello di Mohr Coulomb può essere espresso dalla seguente formulazione:

$$\frac{\tau}{F} = \frac{c'}{F} + \frac{\tan\phi'}{F}$$

Dove  $\tau$  è la resistenza al taglio del materiale,  $c'$  la coesione e  $\phi'$  l'angolo di attrito interno.

La modellazione ad elementi finiti ha il vantaggio, fra gli altri, di non richiedere che si definisca a priori la superficie di rottura (come accade nei metodi LEM), ma essa viene fornita come risultato dell'analisi.

Inoltre, il metodo riesce a monitorare in modo graduale lo sviluppo di deformazioni di taglio fino alla completa formazione della superficie di scivolamento.

Come è stato precedentemente affermato il software Autocad fornisce un file *dxf* che deve essere importato in RS<sup>2</sup>. Il primo passo però, una volta avviato il programma, è quello di realizzare il modello di pendio andando a tracciarne le delimitazioni. Il versante ha un'altezza di 50 metri ed è inclinato di 45° rispetto all'orizzontale ed è inserito all'interno di un modello di dimensioni maggiori, cioè vengono aggiunte aree di contorno per evitare che il pendio sia influenzato dai vincoli. Conclusa questa fase è possibile importare il file *dxf* e visualizzare le ellissi all'interno del modello.

Dopo aver scelto la mesh, costituita da elementi triangolari a sei nodi, vengono fissati come vincoli le cerniere alla base del modello che impediscono spostamenti orizzontali e verticali e i carrelli ai bordi laterali verticali che impediscono spostamenti orizzontali. Una corretta definizione della mesh è fondamentale al fine di ottenere risultati privi di errori e precisi. Per fare in modo che la discretizzazione sia ottimale RS2 fornisce il comando *show mesh quality* che mette in evidenza le porzioni aventi una mesh di scarsa qualità e che quindi richiedono una discretizzazione ulteriore. La scarsa qualità della mesh è legata ai seguenti aspetti:

- Se il rapporto tra il lato maggiore e il lato minore dell'elemento triangolare è superiore a 30;
- L'angolo interno tra due lati che costituiscono l'elemento triangolare è inferiore a 2°;
- L'angolo interno tra due lati che costituiscono l'elemento triangolare è superiore a 75°;

Se vengono quindi segnalati elementi contenenti tali "errori" è bene procedere con l'incremento della densità della mesh.

Vengono a questo punto definite le proprietà dei materiali, in *Tabella 5.1* sono riassunte le proprietà dei blocchi e della matrice. La legge costitutiva assunta è quella Elastica idealmente plastica, con criterio di resistenza di Mohr Coulomb.

	c [kPa]	$\varphi$ [°]	E [MPa]	$\nu$	$\sigma_t$ [MPa]	$\sigma_c$ [kPa]	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Matrice	30	24	37,5	0,25	0,02	92,4	2200
Blocchi	600	40	5124	0,22	0,5	2573,4	2700

Tabella 5.1 Parametri dei materiali

Vengono definiti in totale 11 stage di analisi poiché si simula la realizzazione dello scavo in 10 fasi per le quali all'ultimo stadio si ottiene il profilo del pendio. Nella prima fase di analisi si assegna a tutti i materiali un comportamento costitutivo di tipo elastico lineare, al fine di inizializzare il modello; al termine della prima fase si azzerano gli spostamenti indotti. Nei 10 step successivi viene assegnato a matrice e blocchi un comportamento elastico idealmente plastico mentre alla porzione esterna del modello un comportamento elastico per tutta la durata della simulazione. Un esempio di modello utilizzato è riportato in *Figura 5.2*.

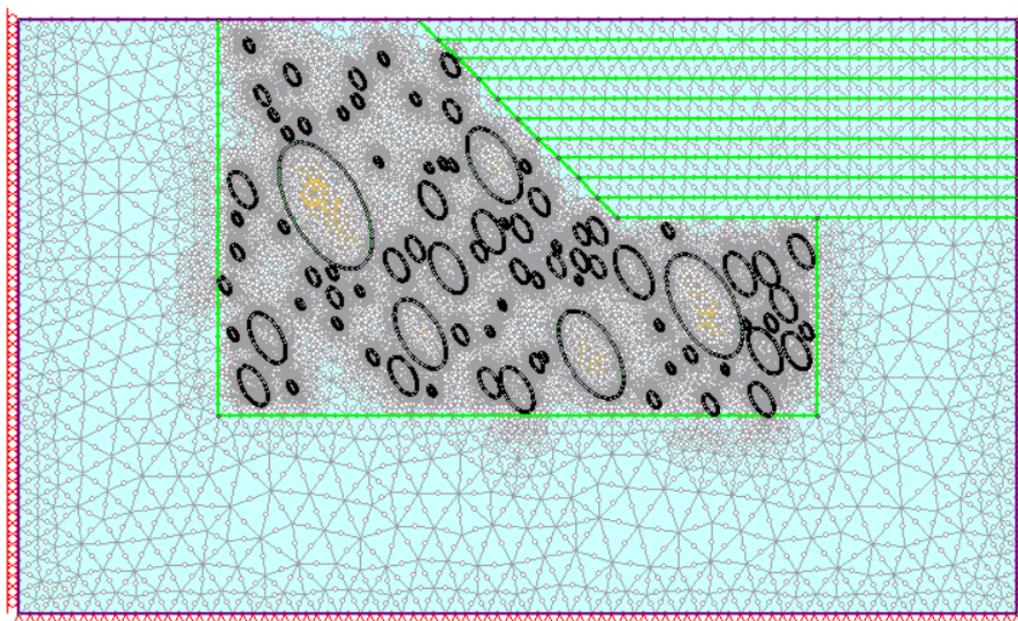


Figura 5.2 Esempio di modello con blocchi inclinati di 60°

Una volta imposto a tutto il pendio uno stato tensionale di tipo gravitazionale il programma in automatico riconosce la tensione verticale agente su ciascun elemento in funzione del peso del materiale che lo sovrasta. Essendo il modello bidimensionale, nella terza direzione (perpendicolare alla sezione) lo stato tensionale agente è quello relativo alle condizioni di deformazione piana.

Concluse queste fasi di impostazione del modello è possibile avviare l'analisi che grazie al metodo SRF fornisce il fattore di sicurezza critico del versante.

Noto il coefficiente di sicurezza si è in grado di riconoscere le zone di versante soggette a fenomeni di plasticizzazione ed è inoltre possibile tracciare la superficie di rottura posizionata dove le deformazioni di taglio sono massime.

Per individuare opportunamente la superficie di scivolamento si procede a filtrare i risultati mediante il comando (*Stage settings* → *Reference stage*). Si impone che lo stage di riferimento sia quello con SRF pari a 1 se il valore di SRF ottenuto è maggiore di 1. Se il valore di SRF ottenuto è minore di 1 si fa riferimento allo stage in cui si ha SRF minimo. La traccia dovrebbe apparire in maniera evidente ma se questo non accade si può fare riferimento all'andamento degli spostamenti massimi. Individuata la superficie di scivolamento si procede con il calcolo del volume instabile che non è altro che l'area racchiusa dalla traccia moltiplicata per 1 metro di profondità. Il calcolo dell'area verrà effettuato dopo aver importato la polilinea, che definisce la superficie di scivolamento, su Autocad grazie agli strumenti di misurazione del programma.

(Figura 5.3)

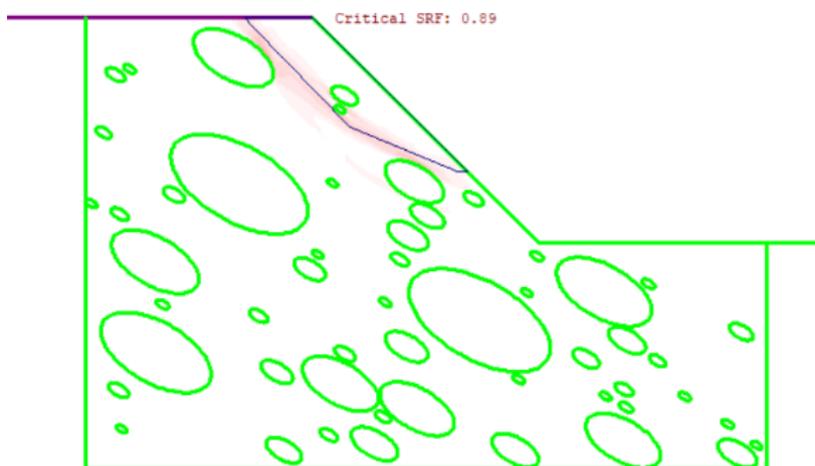


Figura 5.3 Modello 12 con VBP 25% e blocchi inclinati di 30°, particolare dello sviluppo della superficie di rottura.

## 6. Risultati della modellazione numerica

Nel presente lavoro è stato effettuato un numero elevato di simulazioni affinché i risultati potessero apparire statisticamente affidabili.

I due principali aspetti su cui è stata posta l'attenzione sono gli effetti sul grado di stabilità del versante, dell'incremento della percentuale volumetrica dei blocchi ellittici e della loro inclinazione rispetto al piano orizzontale. Si sono considerate quindici estrazioni per quattro percentuali volumetriche ottenendo così 60 risultati in termini di fattore di sicurezza e volume mobilitato; questa procedura è stata praticata facendo riferimento a blocchi ellittici disposti nel pendio con una inclinazione di 30 gradi e successivamente di 60 gradi.

Il primo passo ha riguardato la valutazione del fattore di sicurezza e del volume mobilitato nel caso in cui il versante sia costituito da sola matrice; il risultato ottenuto ha giocato il ruolo di termine di paragone con tutte le differenti simulazioni in cui nel versante oltre alla matrice vi fossero anche i blocchi presenti.

Il pendio costituito da sola matrice ha riportato come fattore di sicurezza e volume mobilitato i valori presenti in *Tabella 6.1*.

<b>Modello</b>	<b>FS</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>
matrice	0,93	1130

*Tabella 6.1 Fattore di sicurezza e volume mobilitato*

In *Figura 6.1* vi è l'andamento della massima deformazione di taglio da cui è possibile stimare la superficie di scivolamento e misurarla andando a ricalcare i tratti con valore di deformazione maggiore, caratterizzati dalla tonalità di colore più scura. Si può notare come la superficie di rottura si sviluppi in maniera piuttosto profonda e possieda una forma circolare.

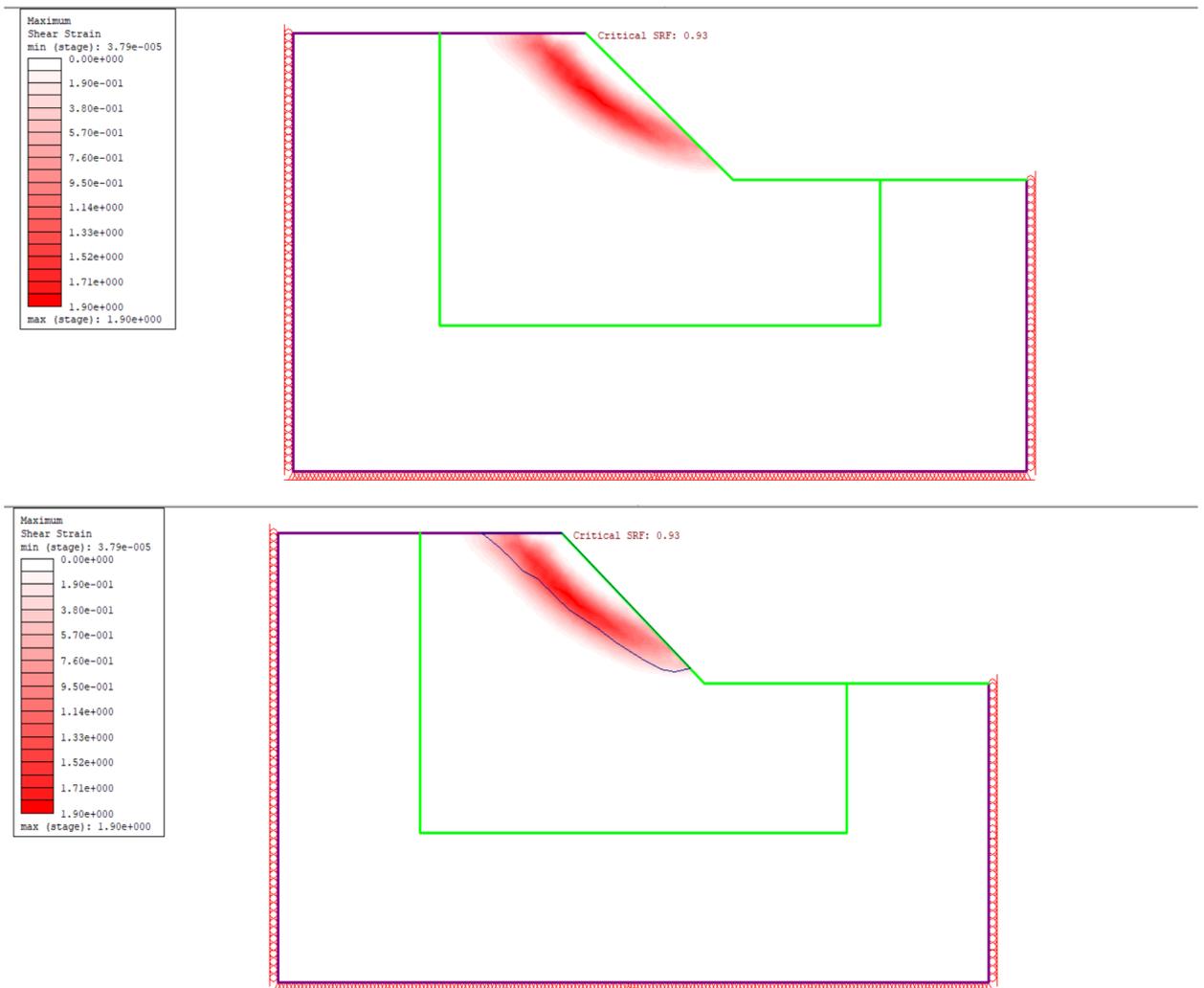


Figura 6.1 Sviluppo delle massime deformazioni di taglio in caso di sola matrice

### 6.1. Modelli con inclinazione dei blocchi di 30°

Una volta ottenuto questo risultato si è passati alla valutazione dei fattori di sicurezza dei 15 modelli con percentuali volumetriche VBP pari a 25 % ed inclinazione dei blocchi di 30°. I risultati sono riportati in *Tabella 6.2*; i fattori di sicurezza variano in un intervallo compreso tra 1,09 e 0,86. È possibile osservare che due modelli possiedono un coefficiente inferiore a quello ottenuto nel caso di pendio con sola matrice ma il valore medio risulta superiore e pari a 0,99; si dimostra quindi che i blocchi seppur presenti in maniera modesta incrementano la stabilità globale del versante.

<b>Modello 25%</b>	
<b>estrazione</b>	<b>FS</b>
1	1,09
2	1,06
3	1,05
4	1,06
5	0,86
6	1,06
7	0,98
8	1,05
9	0,94
10	0,92
11	0,88
12	0,89
13	1,03
14	1,05
15	0,93

*Tabella 6.2 Fattori di sicurezza VBP 25%*

In *Tabella 6.3* sono riportati i volumi mobilitati il cui valore medio è pari a circa 684 m<sup>3</sup> quindi inferiore al caso di sola matrice.

<b>Modello 25%</b>	
<b>estrazione</b>	<b>Volume[m3]</b>
1	475
2	738
3	606
4	785
5	606
6	818
7	940
8	688
9	543
10	975
11	705
12	472
13	599
14	628
15	694

*Tabella 6.3 Volumi mobilitati VBP 25%*

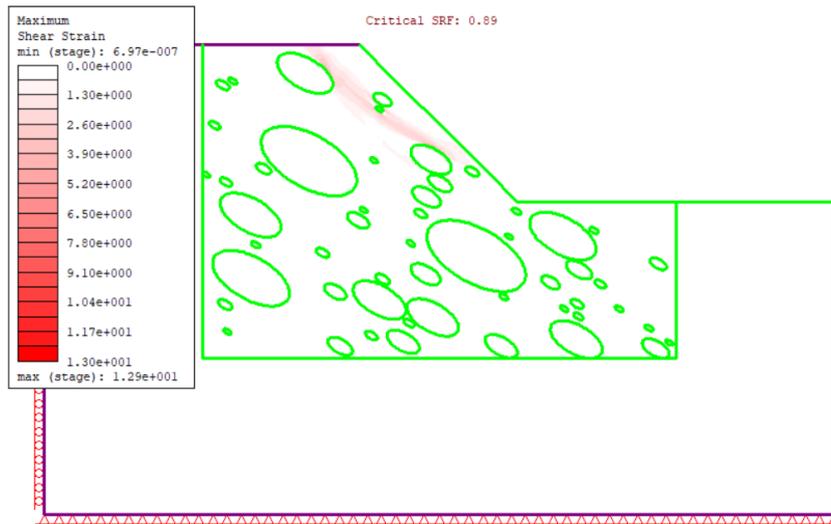


Figura 6.2 Modello 12, VBP 25%

Le 15 analisi successive hanno riguardato modelli con VBP pari a 40% e aventi blocchi inclinati di 30°; i valori di fattore di sicurezza ottenuti sono riportati in *Tabella 6.4*.

Modello 40%	
estrazione	FS
1	0,91
2	1,05
3	0,87
4	0,88
5	0,98
6	1,18
7	0,92
8	1,04
9	1,07
10	1
11	0,91
12	0,9
13	1.11
14	1,23
15	0,94

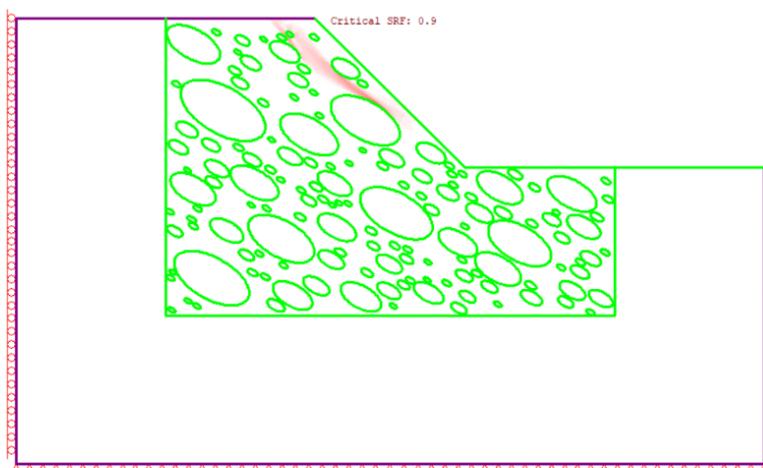
Tabella 6.4 Fattori di sicurezza VBP 40%

Questa volta l'intervallo di variazione del coefficiente di sicurezza oscilla tra 0,88 e 1,23, con valore medio invece risulta essere pari a 0,99. Si osserva che non vi è un incremento della stabilità sebbene vi sia un maggior numero di casi in cui il fattore di sicurezza supera l'unità.

I volumi mobilitati di questi modelli sono riportati in *Tabella 6.5* il loro valore medio è pari a 690 m<sup>3</sup>; sebbene in alcuni casi i volumi mobilitati siano nettamente inferiori al caso precedente il valore medio si discosta di poco e questo è in linea con quanto accade per il fattore di sicurezza. I due casi presentano quindi differenze marginali.

Modello 40%	
estrazione	Volume[m <sup>3</sup> ]
1	655
2	840
3	462
4	1210
5	998
6	310
7	926
8	541
9	746
10	740
11	1066
12	461
13	548
14	526
15	319

*Tabella 6.5 Volumi mobilitati VBP 40%*



*Figura 6.3 Modello 12 VBP 40%*

I 15 casi analizzati con VBP pari a 55% i cui risultati in termini di fattore di sicurezza sono riportati in *Tabella 6.6* presentano delle differenze in quanto si osservano risultati

in termini di fattore di sicurezza superiori rispetto ai casi precedenti. Esso assume valori superiori all'unità in 13 estrazioni, il valore medio è infatti pari a 1,04.

<b>Modello 55%</b>	
<b>estrazione</b>	<b>FS</b>
1	0,94
2	1,17
3	1,02
4	0,94
5	1,04
6	1,09
7	1,08
8	0,91
9	1,01
10	0,91
11	1,1
12	1,3
13	1
14	1,09
15	1,04

*Tabella 6.6 Fattori di sicurezza VBP 55%*

I volumi mobilitati riportati in *Tabella 6.7* assumono valori inferiori ai precedenti casi, con un valor medio ottenuto è di 620 m<sup>3</sup>

<b>Modello 55%</b>	
<b>estrazione</b>	<b>Volume[m3]</b>
1	324
2	527
3	930
4	650
5	380
6	556
7	970
8	982
9	600
10	933
11	792
12	439
13	512
14	380
15	402

*Tabella 6.7 Volumi mobilitati VBP 55%*

L'ultimo caso analizzato facendo riferimento a blocchi inclinati di 30° rispetto all'orizzontale riguarda le 15 estrazioni con VBP pari a 70%. Si può osservare in *Tabella 6.8* che il fattore di sicurezza assume in quasi tutti i casi valori superiori all'unità ed il valore medio è pari a 1,08, mostrando quindi un incremento rispetto al caso di VBP pari a 55%.

<b>Modello 70%</b>		<b>Modello 70%</b>
<b>estrazione</b>	<b>FS</b>	<b>Volume[m3]</b>
1	1,07	571
2	1,03	573
3	1,07	487
4	1,08	349
5	1,15	454
6	1,04	1120
7	1,05	1136
8	0,98	1219
9	1,13	462
10	1,22	474
11	1,13	477
12	1,06	818
13	1,08	831
14	1,23	105
15	0,94	255

*Tabella 6.8 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 70%*

Il valore medio dei volumi coinvolti (*Tabella 6.8*), subisce una piccola riduzione rispetto al caso precedente; esso è infatti pari a 620 m<sup>3</sup>. Questa modesta differenza è causata dalla presenza di situazioni (casi 6,7,8) in cui i volumi mobilitati sono elevati; questa anomalia può essere causata dalla posizione random dei blocchi che in questi casi vengono inglobati nel volume potenzialmente instabile. Negli altri casi i metri cubi coinvolti sono di gran lunga inferiori per un effetto favorevole dei blocchi che limitano lo sviluppo della superficie di scivolamento nel pendio rendendola maggiormente superficiale e tortuosa. Le immagini relative a tutti i modelli studiati sono presenti in *Allegato 3*.

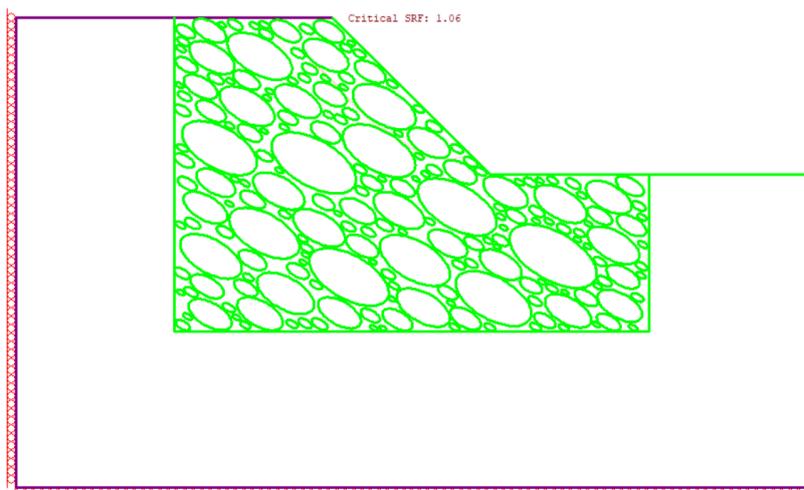


Figura 6.4 Modello 12 VBP 70%

## 6.2. Inclinazione dei blocchi di 60°

Le analisi dei 60 modelli in cui i blocchi sono disposti con inclinazione di 60 gradi rispetto all'orizzontale, hanno fornito i risultati relativi alla VBP 25%, in termini di fattore di sicurezza e volumi mobilitati, riportati nella *Tabella 6.9*, il fattore di sicurezza medio è pari a 0,99, il volume mobilitato medio è pari a 690 m<sup>3</sup>.

Modello 25%		Modello 25%
estrazione	FS	Volume[m <sup>3</sup> ]
1	0,94	858
2	1,16	789
3	0,89	598
4	0,91	945
5	1,08	726
6	0,95	649
7	1,22	1032
8	0,98	589
9	0,92	449
10	0,95	532
11	0,95	551
12	0,94	435
13	0,9	757
14	0,91	713
15	0,92	728

Tabella 6.9 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 25%

I risultati ottenuti per VBP pari a 40% sono molto simili ai precedenti (*Tabella 6.10*), non si osservano quindi particolari effetti dall'incremento della percentuale volumetrica da 25% a 40% come è accaduto nei modelli con inclinazione dei blocchi di 30°. Il volume mobilitato medio è lievemente inferiore al precedente poiché è pari a 670 m<sup>3</sup>, il fattore di sicurezza medio è anch'esso di poco inferiore cioè pari a 0,96 ma è possibile affermare che i due casi sono sostanzialmente analoghi.

Modello 40%		Modello 40%
estrazione	FS	Volume[m3]
1	0,92	426
2	0,96	823
3	0,91	1214
4	0,93	627
5	0,96	237
6	0,9	788
7	1,01	708
8	1	963
9	1	453
10	1,02	946
11	0,95	781
12	0,99	534
13	0,92	553
14	0,97	472
15	1,02	510

*Tabella 6.10 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 40%*

Il fattore di sicurezza subisce un incremento nel caso di VBP pari a 55% e il volume di materiale coinvolto è inferiore. Il valore di FS medio è risultato pari a 0,99 mentre il volume mobilitato medio è circa pari a 560 m<sup>3</sup>; la *Tabella 6.11* mostra i singoli valori delle 15 estrazioni. Si osserva quindi un incremento di stabilità del versante e si verificano molti casi in cui la superficie di rottura non ingloba i blocchi ma risulta deviata e si allontana dalla forma circolare assunta invece nel caso di percentuali volumetriche di clasti inferiori.

Modello 55%		Modello 55%
estrazione	FS	Volume[m3]
1	0,97	438
2	0,995	250
3	0,95	360
4	1,01	676
5	0,99	341
6	0,98	501
7	0,92	379
8	0,92	1018
9	0,95	403
10	0,95	471
11	1,05	1074
12	1,06	555
13	1,06	221
14	1,04	1078
15	1,08	739

*Tabella 6.11 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 55%*

La percentuale volumetrica del 70% mostra risultati maggiormente significativi; la presenza preponderante dei blocchi genera un notevole incremento del fattore di sicurezza medio che è pari a 1,21 e una riduzione del volume mobilitato il cui valore medio è di 440 m<sup>3</sup>. Nella *Tabella 6.12* sono riportati i risultati ottenuti nei 15 modelli, se si pone l'attenzione sui valori di volumi mobilitati si osservano anomalie nei casi 11 e 12, nei quali il materiale coinvolto assume valori superiori al caso di pendio costituito da sola matrice. Si ripete quindi quanto accaduto nel caso di modelli aventi percentuali volumetriche di 70% ma inclinazione dei blocchi di 30°, ovvero si conferma che in alcune situazioni i volumi mobilizzati e quindi le superfici di rottura contengono al loro interno blocchi di grandi dimensioni disposti in superficie facendo in modo che la massa potenzialmente instabile risulti maggiore.

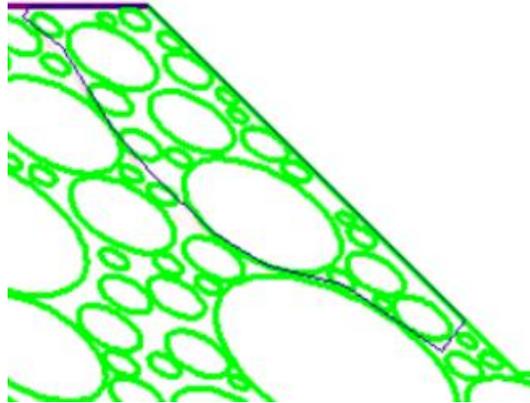


Figura 6.5 Blocchi inglobati all'interno della superficie di rottura

Modello 70%		Modello 70%
estrazione	FS	Volume[m3]
1	1,33	229
2	1,16	223
3	1,36	239
4	1,37	130
5	1,13	107
6	1,17	269
7	1,25	369
8	1,1	493
9	1,24	354
10	1,19	596
11	1,08	1088
12	1,1	1114
13	1,22	220
14	1,2	677
15	1,3	499

Tabella 6.12 Fattori di sicurezza e Volumi mobilitati VBP 70%

### **6.3. Influenza della forma e inclinazione dei blocchi e confronti**

Per comprendere se la forma e l'orientazione dei blocchi influenzano la stabilità dei versanti vengono di seguito eseguiti dei confronti in termini di fattore di sicurezza con altre analisi eseguite in lavori precedenti (*Effetti di anisotropia nella analisi di stabilità di un versante in bimrock*, Tesi L.Lai A.A 2017/2018, *Influenza dell'anisotropia della matrice nell'analisi di stabilità di pendio in bimrock*, Tesi G.Cabiddu 2018) che

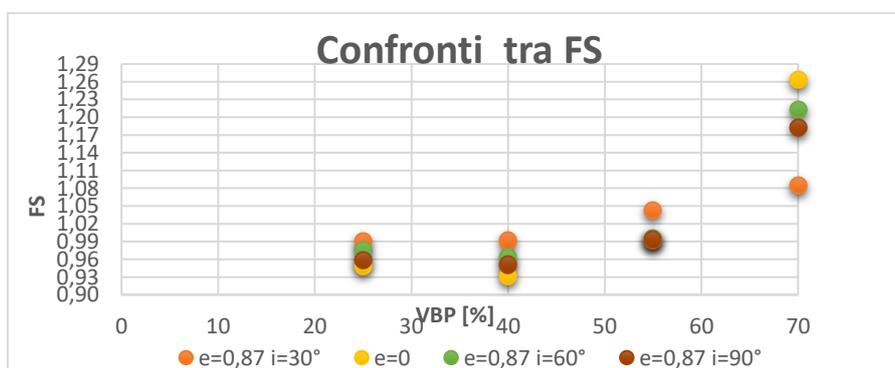
riguardano inclusioni di forma circolare e di forma ellittica con eccentricità pari a 0,87 ma inclinati di 90°. In *Tabella 6.13* sono riportati valori medi dei fattori di sicurezza ottenuti dai quali è possibile effettuare le seguenti osservazioni:

- A parità di forma ellittica l'inclinazione di 30° dei blocchi ha effetti positivi per la stabilità nei casi di VBP pari a 25%, 40% e 55%. Per VBP pari a 70% i fattori di sicurezza più elevati sono invece dati dalla presenza di inclusioni inclinate di 60° e 90°.
- Vi è una certa analogia tra i risultati ottenuti nel caso di blocchi circolari e quelli ellittici e inclinati di 60° entrambi infatti offrono simili effetti benefici nei confronti della stabilità.

	e=0	e=0,87 i=30°	e=0,87 i=60°	e=0,87 i=90°
VBP	FS medio	FS medio	FS medio	FS medio
25%	0,95	0,99	0,97	0,96
40%	0,93	0,99	0,96	0,95
55%	0,99	1,04	1,00	0,99
70%	1,26	1,08	1,21	1,18

*Tabella 6.13 Confronti in termini di FS tra blocchi di forma circolare e blocchi ellittici*

In definitiva è possibile affermare che risulta molto complesso esprimere in maniera certa se sia l'eccentricità o l'inclinazione dei blocchi ad avere effetti preponderanti nei confronti della stabilità dei versanti; per percentuali elevate di inclusioni sembrano essere i blocchi di forma circolare a favorire la stabilità sebbene, come viene sottolineato nel *paragrafo 4.1*, clasti di forma più schiacciata ed allungata appaiano più efficaci ai fini di una stabilizzazione del versante.



*Figura 6.6 Confronto tra Fattori di sicurezza, i blocchi circolari per VBP=70% favoriscono maggiormente la stabilità del versante rispetto ai blocchi di forma ellittica. Per VBP inferiori i blocchi di forma ellittica sono più efficaci ai fini della stabilizzazione del versante*

## Conclusioni

In questo lavoro di tesi vengono, nella prima parte, date informazioni di carattere generale sulle caratteristiche principali delle formazioni rocciose a struttura blocco-in-matrice (bimrock) sulla base di studi reperiti in letteratura. In seguito, con riferimento a quanto suggerito da Medley (1994), si è utilizzato un approccio analogo per dimostrare le proprietà di invarianza di scala e di autosomiglianza di due campioni di mélange prelevati nella zona del Pavese.

Si è osservato che la distribuzione dimensionale dei blocchi risulta essere simile per le diverse scale di osservazione in entrambi gli spezzoni. Per ciascuna superficie analizzata si è diagrammata la frequenza relativa in funzione della massima dimensione osservata  $d_{mod}$ , normalizzata rispetto all'area di indagine, e si è notata la somiglianza tra i diversi andamenti.

Si è in seguito effettuata una stima della percentuale lineare cumulata dei blocchi adoperando l'approccio statistico di Montecarlo. Si è osservato che il valore di percentuale lineare cumulato medio si stabilizza per una profondità di campionamento di  $20 \cdot d_{max}$  per lo spezzone 1 e  $12 \cdot d_{max}$  per lo spezzone 2. Per tali profondità si è dimostrata la coincidenza tra il valore ottenuto di percentuale areale e quello di percentuale lineare.

Nel presente elaborato sono stati inoltre studiati dei modelli di versanti teorici costituiti da bimrock, applicando l'approccio stocastico di Napoli et al.(2018). Le simulazioni, numeriche agli elementi finiti, hanno considerato la presenza di blocchi ellittici, con una inclinazione, rispetto all'orizzontale, di  $60^\circ$  e  $30^\circ$ . La procedura è stata quella di considerare pendii aventi percentuali via via crescenti di inclusioni al loro interno e disposti in maniera random. In particolare si sono eseguite 15 estrazioni per ciascuna delle quattro percentuali volumetriche (VBP), pari a 25%,40%,55% e 70%. L'analisi è stata quindi svolta su 60 modelli per ciascuna delle due orientazioni dei blocchi ( $60^\circ$  e  $30^\circ$ ).

I risultati delle analisi sono stati forniti in termini di fattori di sicurezza e di volumi mobilitati e sono stati confrontati con quelli ottenuti da precedenti analisi (*Effetti di*

*anisotropia nella analisi di stabilità di un versante in bimrock*, Tesi L.Lai A.A 2017/2018, *Influenza dell'anisotropia della matrice nell'analisi di stabilità di pendio in bimrock*, Tesi G.Cabiddu 2018 )portando alle seguenti conclusioni:

- Si è osservato un incremento del fattore di sicurezza all'aumentare della percentuale volumetrica delle inclusioni, tale incremento è risultato marginale per VBP pari a 25% e 40%.
- Nel caso di blocchi di forma ellittica, si è notato che l'orientazione di 30° ha effetti maggiormente positivi nei confronti della stabilità per VBP pari a 25%,40% e 55%. Per VBP pari a 70% inclusioni inclinate di 60° e 90° garantiscono fattori di sicurezza più elevati.
- I valori dei volumi mobilitati mediati tra le 15 estrazioni per ciascuna VBP sono risultati via via decrescenti, confermando l'ipotesi che un aumento della percentuale dei blocchi sembra produrre volumi mobilitati minori. Si sono però riscontrate anomalie poiché i metri cubi mobilitati in alcuni casi sono risultati di valore doppio rispetto a quelli valutati nel caso di pendio costituito da sola matrice. Volumi potenzialmente instabili così elevati possono essere causati dal fatto che i blocchi disposti in una particolare posizione vengano inglobati nella superficie di rottura piuttosto che deviarla. Questo conferma che la posizione relativa dei blocchi con differenti dimensioni governa il volume potenzialmente coinvolto dall'instabilità.

## Bibliografia

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

**Altinsoy, H., 2006** Matriks içinde blok içeren kayaların makaslama dayanımının belirlenmesi için fiziksel model esaslı bir araştırma [M. Sc. Thesis] Ankara: Hacettepe Univ.

**Afifipour, M., Moarefvand, P., 2014** *Mechanical behavior of bimrocks having high rockblock proportion*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 65, 40-48.

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

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

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

**Coli, N., Berry, P., Boldini, D., 2011** *In situ non conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock (Bimtest)*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 48, 95- 102.

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

**Haneberg, W.C., (2004)** *Simulation of 3D block populations to characterize outcrop sampling bias in bimrocks.* Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling Vol.22, No.5, 19-26.

**Houska, J., 1982** *Proceedings of the international symposium on the geotechnics of structurally complex formations.* Eng. Geol., 19(1), 78-79.

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

**Kalender, A., Somnez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., 2014** *An approach to predict the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils.* Engineering Geology, vol.183, 65-79.

**Kim, C., Snell, C., Medley, E., 2004.** *Shear Strength of Franciscan Complex Melange as Calculated From Back-Analysis of a Landslide.* Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, Paper 2-33, 1-8.

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

**Lindquist, E.S., Goodman, R.E., 1994.** *Strenght deformation properties of a physical model melange.* Proceedings 1st North American Rock Mech. Symp., Austin, Texas, 843- 850.

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

**Medley, E., 1994** *The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in – Matrix Rocks (Bimrocks)*. Dept of Civil Engineering University of California, Berkley, California, PhD diss., UMI Diss. Svc., Ann Arbor, MI.

**Medley, E., Lindquist, E.S., 1995.** *The engineering significance of the scale independence of some Franciscan melanges in California, USA*. Proceedings of the 35th US Rock Mechanics Symposium, Reno, 907-914.

**Medley, E., 1997.** *Uncertainty in estimates volumetric proportions in melange bimrocks*. Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, 23-27 June 1997, eds P.G Marinos et al., 267-272.

**Medley, E., 2001.** *Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges*. Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling Vol. 19, No. 4, pp. 20-33.

**Medley, E., 2002.** *Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in Matrix Rocks (Bimrocks)*. Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), Toronto, July 2002, 509-606.

**Medley, E., 2004.** *Observations on tortuous failure surface in bimrocks*. Felsbau Vol.22 (2004), No. 5, 35-43.

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

**Medley, E., Wakabayashi, J., 2004.** *Geological Characterization of Melanges for Practitioners*. Felsbau Rock and Soil Engineering-Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 22(5), 10-18.

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

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

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

**Napoli, M.L., Barbero, M., Ravera, E., Scavia, C., 2018.** A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol.101, 41–49.

**Pan, Y.W., M.H. Hsieh, M.H., Liao, J.J., 2008.** Mechanical Properties of virtual block-in- matrix colluvium. In: Proceedings of ARMA 2008, American Rock Mechanics Association, 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Francisco, USA, ARMA08-51, 8.

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

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

**Rocscience, 2004.** A new era in slope stability analysis: Shear strength reduction Finite Element Technique. RocNews, Summer 2004, 2-9.

**RS2** Theory documentations provided by the developers of the software.

[https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=getting\\_started%2FRS2\\_Applications\\_Overview.w.htm](https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=getting_started%2FRS2_Applications_Overview.w.htm) (2018)

**Phase<sup>2</sup>:** <https://www.roscience.com/documents/pdfs/uploads/9195.pdf>

**Slide:** A synopsis of slope stability analysis with SLIDE v.4.0

<https://roscience.com/documents/pdfs/uploads/7772.pdf>

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

**Turcotte, D.L., 1997** *Fractals and Chaos in geology and geophysics.* Second Edition. Cambridge University Press, 398pp.

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



## Allegato 1: Verifica dell'autosomiglianza e calcolo della percentuale lineare

### Spezzone 1 (quadrante 2)

**A= 25%**

A	1720
dmod	8,96

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,52	0	0,01	0,0125
classe 2	0,52 - 1,04	43	52,44	0,01875
classe 3	1,04 - 2,07	36	43,90	0,0375
classe 4	2,07 - 4,15	20	24,39	0,075
classe 5	4,15 - 8,29	9	10,98	0,15
classe 6	> 8,29	1	1,22	0,2
	Tot	109		

**A=6,25%**

A	430
dmod	8,25

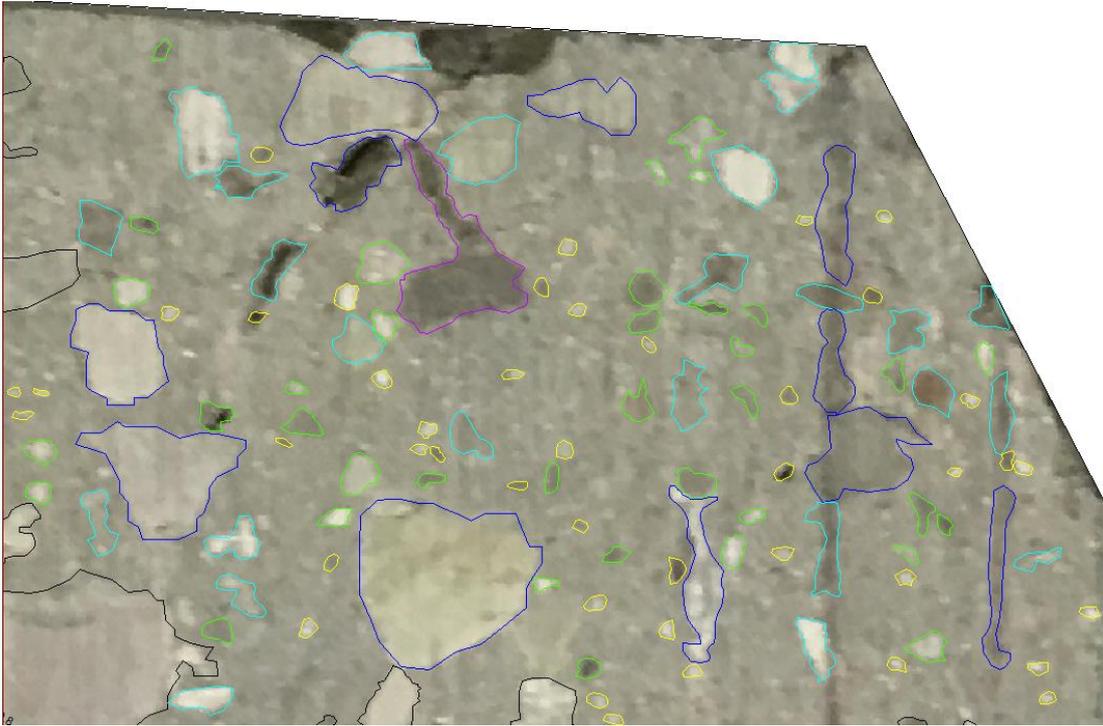
		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,26	0	0,01	0,0125
classe 2	0,26 - 0,52	0	0,01	0,01875
classe 3	0,52 - 1,04	18	42,86	0,0375
classe 4	1,04 - 2,07	13	30,95	0,075
classe 5	2,07 - 4,15	1	2,38	0,15
classe 6	> 4,15	3	7,14	0,2
	Tot	35		

**A=1,56%**

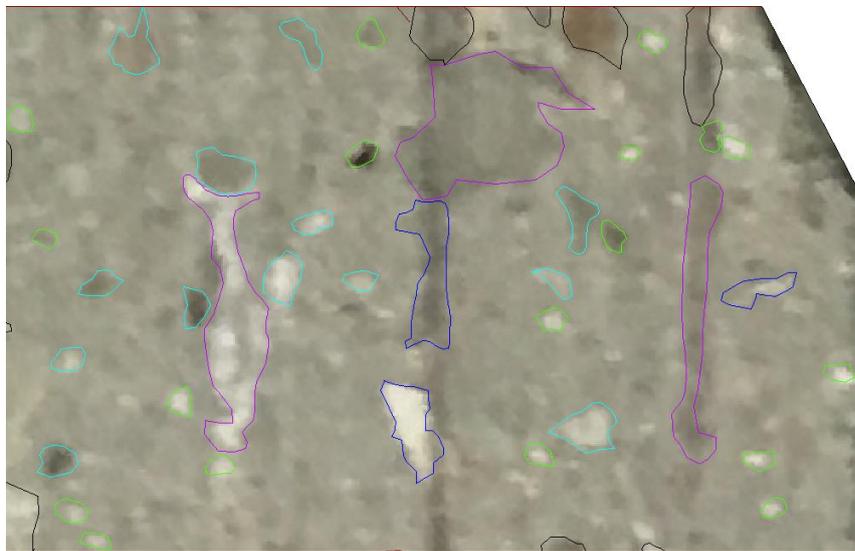
A	107,328
dmod	1,59

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	< 0,13	0	0,01	0,0125
classe 2	0,13 - 0,26	0	0,01	0,01875
classe 3	0,26 - 0,52	0	0,01	0,0375
classe 4	0,52 - 1,04	8	57,14	0,075
classe 5	1,04 - 2,07	3	21,43	0,15
classe 6	> 2,07	0	0,01	0,2
	Tot	11		

**A=25% quadrante 2 Spezzone1**



**A=6,25% quadrante 2 Spezzone1**



**A=1,56% quadrante 2 Spezzone1**



## Spezzione 2 (quadrante 1)

### A=100%

A	5750
dmod	29,44

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	0,47 - 0,95	555	52,26	0,0125
classe 2	0,95 - 1,90	388	36,53	0,01875
classe 3	1,90 - 3,79	98	9,23	0,0375
classe 4	3,79 - 7,58	15	1,41	0,075
classe 5	7,58 - 15,17	4	0,38	0,15
classe 6	> 15,17	2	0,19	0,2
	Tot	1062		

### A=25%

A	1437,5
dmod	10,28

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,47	23	7,85	0,0125
classe 2	0,47 - 0,95	146	49,83	0,01875
classe 3	0,95 - 1,90	84	28,67	0,0375
classe 4	1,90 - 3,79	36	12,29	0,075
classe 5	3,79 - 7,58	2	0,68	0,15
classe 6	> 7,58	2	0,68	0,2
	Tot	293		

### A=6,25%

A	359,375
dmod	3,59

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,24	0	0,01	0,0125
classe 2	0,24 - 0,47	5	5,81	0,01875
classe 3	0,47 - 0,95	39	45,35	0,0375
classe 4	0,95 - 1,90	35	40,70	0,075
classe 5	1,90 - 3,79	7	8,14	0,15
classe 6	> 3,79	0	0,01	0,2
	Tot	86		

**A=1,56%**

A	89,7
dmod	2,5

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,12	0	0,01	0,0125
classe 2	0,12 - 0,24	0	0,01	0,01875
classe 3	0,24 - 0,47	2	8,33	0,0375
classe 4	0,47 - 0,95	14	58,33	0,075
classe 5	0,95 - 1,89	5	20,83	0,15
classe 6	> 1,89	3	12,50	0,2
	Tot	24		

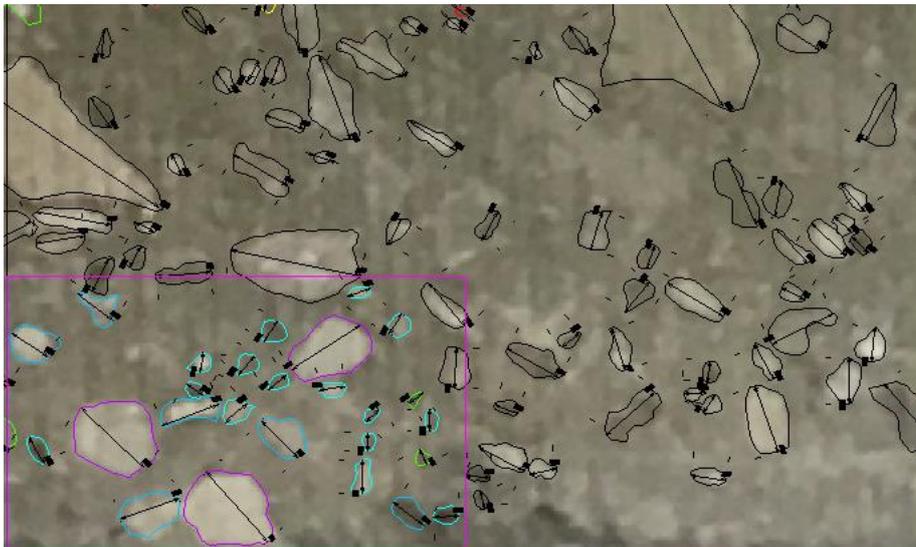
**A=25% spezzone 2 quadrante 1**



**A=6,25% spezzone 2 quadrante 1**



**A=1,56% spezzone 2 quadrante 1**



## Spezzione 2 (quadrante 2)

A=25%

A	1437,5
dmod	10,14

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,47	33	11,26	0,0125
classe 2	0,47 - 0,95	131	44,71	0,01875
classe 3	0,95 - 1,90	97	33,11	0,0375
classe 4	1,90 - 3,79	16	5,46	0,075
classe 5	3,79 - 7,58	4	1,37	0,15
classe 6	> 7,58	2	0,68	0,2
	Tot	283		

A=6,25%

A	359,375
dmod	3,15

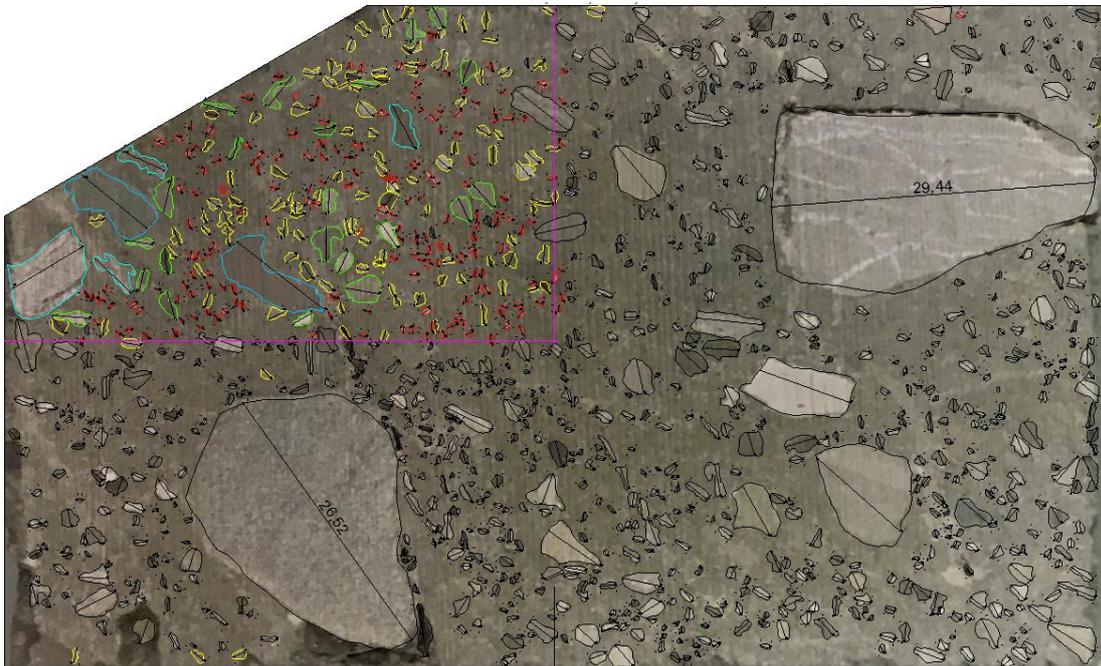
		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,24	0	0,01	0,0125
classe 2	0,24 - 0,47	9	10,47	0,01875
classe 3	0,47 - 0,95	53	61,63	0,0375
classe 4	0,95 - 1,90	35	40,70	0,075
classe 5	1,90 - 3,79	4	4,65	0,15
classe 6	> 3,79	0	0,01	0,2
	Tot	101		

A=1,56%

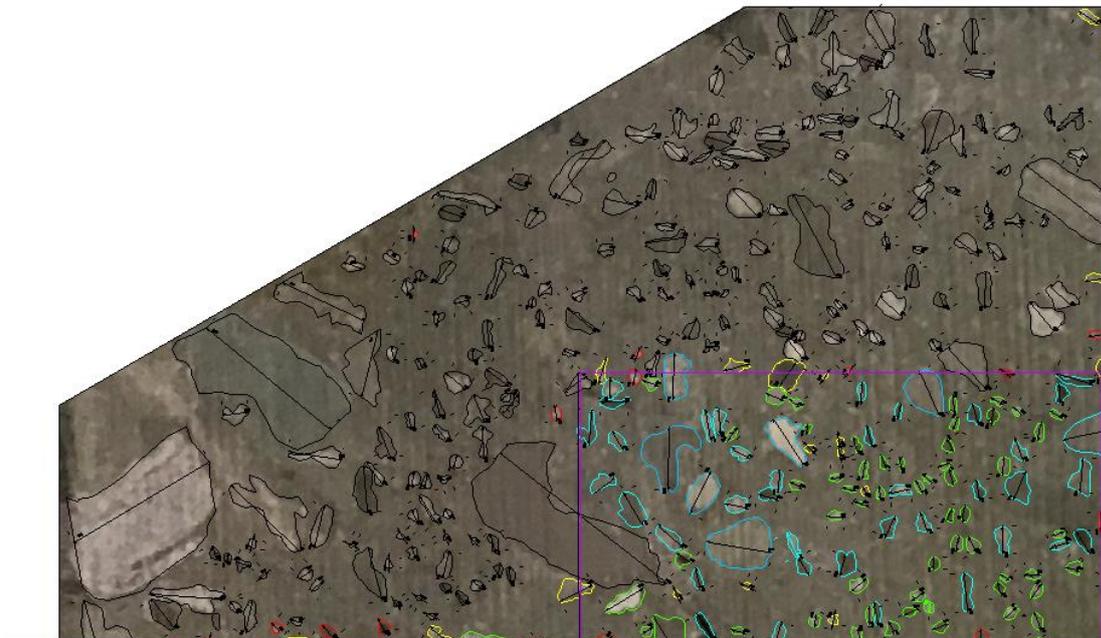
A	89,7
dmod	1,83

		Frequenza	Freq. Relativa [%]	dmod/radq(A)
classe 1	<0,12	0	0,01	0,0125
classe 2	0,12 - 0,24	0	0,01	0,01875
classe 3	0,24 - 0,47	2	8,33	0,0375
classe 4	0,47 - 0,95	19	79,17	0,075
classe 5	0,95 - 1,89	7	29,17	0,15
classe 6	> 1,89	0	0,01	0,2
	Tot	28		

**A=25% spezzone 2 quadrante 2**



**A=6,25% spezzone 2 quadrante 2**



**A=1,56% spezzone 2 quadrante 2**



## *Percentuale lineare dei blocchi*

### Spezzone 1

#### Serie random 1

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
1	4	6	7	6
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
9	2	10	5	3

<b>Ls</b>	67,45
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	26,6	0,395	3,9	39,45
<b>Lc2</b>	3,5	0,223	7,8	22,33
<b>Lc3</b>	12,5	0,210	11,7	21,05
<b>Lc4</b>	1,5	0,163	15,6	16,35
<b>Lc5</b>	1,4	0,135	19,5	13,49
<b>Lc6</b>	21,3	0,165	23,4	16,52
<b>Lc7</b>	16,4	0,176	27,3	17,62
<b>Lc8</b>	3,5	0,161	31,2	16,06
<b>Lc9</b>	9,7	0,159	35,2	15,86
<b>Lc10</b>	22,6	0,176	39,1	17,63

#### Serie random 2

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
2	8	5	1	10
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
3	7	4	9	6

<b>Ls</b>	67,45
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	21,3	0,316	3,9	31,64
<b>Lc2</b>	22,6	0,326	7,8	32,56
<b>Lc3</b>	3,5	0,234	11,7	23,41
<b>Lc4</b>	26,6	0,274	15,6	27,42
<b>Lc5</b>	16,4	0,268	19,5	26,79
<b>Lc6</b>	9,7	0,247	23,4	24,71
<b>Lc7</b>	1,5	0,215	27,3	21,50
<b>Lc8</b>	3,5	0,195	31,2	19,46
<b>Lc9</b>	1,4	0,175	35,2	17,53
<b>Lc10</b>	12,5	0,176	39,1	17,63

### Serie random 3

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
7	3	4	2	6
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
10	1	5	8	9

<b>Ls</b>	67,45
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	1,5	0,022	3,9	2,24
<b>Lc2</b>	9,7	0,083	7,8	8,28
<b>Lc3</b>	3,5	0,073	11,7	7,25
<b>Lc4</b>	21,3	0,134	15,6	13,35
<b>Lc5</b>	12,5	0,144	19,5	14,38
<b>Lc6</b>	16,4	0,160	23,4	16,02
<b>Lc7</b>	26,6	0,194	27,3	19,37
<b>Lc8</b>	3,5	0,176	31,2	17,59
<b>Lc9</b>	22,6	0,194	35,2	19,35
<b>Lc10</b>	1,4	0,176	39,1	17,63

### Serie random 4

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
9	6	3	5	2
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
1	7	10	4	8

<b>Ls</b>	67,45
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	1,4	0,021	3,9	2,08
<b>Lc2</b>	12,5	0,103	7,8	10,28
<b>Lc3</b>	9,7	0,116	11,7	11,63
<b>Lc4</b>	3,5	0,100	15,6	10,00
<b>Lc5</b>	21,3	0,143	19,5	14,33
<b>Lc6</b>	26,6	0,185	23,4	18,51
<b>Lc7</b>	1,5	0,162	27,3	16,19
<b>Lc8</b>	16,4	0,172	31,2	17,20
<b>Lc9</b>	3,5	0,159	35,2	15,86
<b>Lc10</b>	22,6	0,176	39,1	17,63

### Serie random 5

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
3	5	7	1	4
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
2	8	6	10	9

<b>Ls</b>	67,45
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	9,7	0,143	3,9	14,32
<b>Lc2</b>	3,5	0,097	7,8	9,72
<b>Lc3</b>	1,5	0,072	11,7	7,23
<b>Lc4</b>	26,6	0,153	15,6	15,28
<b>Lc5</b>	3,5	0,133	19,5	13,27
<b>Lc6</b>	21,3	0,163	23,4	16,33
<b>Lc7</b>	22,6	0,188	27,3	18,78
<b>Lc8</b>	12,5	0,187	31,2	18,74
<b>Lc9</b>	16,4	0,194	35,2	19,35
<b>Lc10</b>	1,4	0,176	39,1	17,63

<b>Asse x</b>	<b>Media Asse y [%]</b>	<b>Dev St</b>
3,9	17,95	17,04
7,8	16,63	10,54
11,7	14,11	7,67
15,6	16,48	6,58
19,5	16,45	5,80
23,4	18,42	3,65
27,3	18,69	1,98
31,2	17,81	1,33
35,2	17,59	1,75
39,1	17,63	0,00

### Spezzone 2

### Serie random 1

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
1	4	6	7	9
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
2	10	5	3	8

<b>Ls</b>	60,67
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	7,2	0,12	2,1	11,9
<b>Lc2</b>	11,3	0,15	4,1	15,3
<b>Lc3</b>	0,7	0,11	6,2	10,5
<b>Lc4</b>	2,9	0,09	8,2	9,1
<b>Lc5</b>	24,2	0,15	10,3	15,3
<b>Lc6</b>	6,6	0,15	12,4	14,5
<b>Lc7</b>	12,7	0,15	14,4	15,4
<b>Lc8</b>	0,0	0,14	16,5	13,5
<b>Lc9</b>	22,8	0,16	18,5	16,2
<b>Lc10</b>	20,1	0,18	20,6	17,9

**Serie random 2**

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
2	8	5	1	10
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
3	7	4	9	6

<b>Ls</b>	60,67
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	6,6	0,1	2,1	10,9
<b>Lc2</b>	20,1	0,2	4,1	22,0
<b>Lc3</b>	0,0	0,15	6,2	14,7
<b>Lc4</b>	7,2	0,14	8,2	14,0
<b>Lc5</b>	12,7	0,15	10,3	15,4
<b>Lc6</b>	22,8	0,19	12,4	19,1
<b>Lc7</b>	2,9	0,17	14,4	17,0
<b>Lc8</b>	11,3	0,17	16,5	17,2
<b>Lc9</b>	24,2	0,20	18,5	19,7
<b>Lc10</b>	0,7	0,18	20,6	17,9

**Serie random 3**

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
7	3	4	2	6
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
10	1	5	8	9

<b>Ls</b>	60,67
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	2,9	0,0	2,1	4,8
<b>Lc2</b>	22,8	0,2	4,1	21,2
<b>Lc3</b>	11,3	0,20	6,2	20,3
<b>Lc4</b>	6,6	0,18	8,2	18,0
<b>Lc5</b>	0,7	0,15	10,3	14,6
<b>Lc6</b>	12,7	0,16	12,4	15,7
<b>Lc7</b>	7,2	0,15	14,4	15,1
<b>Lc8</b>	0,0	0,13	16,5	13,2
<b>Lc9</b>	20,1	0,15	18,5	15,4
<b>Lc10</b>	24,2	0,18	20,6	17,9

**Serie random 4**

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
9	6	3	5	2
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
1	7	10	4	8

<b>Ls</b>	60,67
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	24,2	0,4	2,1	39,8
<b>Lc2</b>	0,7	0,2	4,1	20,5
<b>Lc3</b>	22,8	0,26	6,2	26,2
<b>Lc4</b>	0,0	0,20	8,2	19,6
<b>Lc5</b>	6,6	0,18	10,3	17,9
<b>Lc6</b>	7,2	0,17	12,4	16,9
<b>Lc7</b>	2,9	0,15	14,4	15,2
<b>Lc8</b>	12,7	0,16	16,5	15,9
<b>Lc9</b>	11,3	0,16	18,5	16,2
<b>Lc10</b>	20,1	0,18	20,6	17,9

**Serie random 5**

<b>Pos.1</b>	<b>Pos.2</b>	<b>Pos.3</b>	<b>Pos.4</b>	<b>Pos.5</b>
3	5	7	1	4
<b>Pos.6</b>	<b>Pos.7</b>	<b>Pos.8</b>	<b>Pos.9</b>	<b>Pos.10</b>
2	8	6	10	9

<b>Ls</b>	60,67
-----------	-------

		<b>Asse y</b>	<b>Asse x</b>	<b>Asse y [%]</b>
<b>Lc1</b>	22,79	0,376	2,061	37,56
<b>Lc2</b>	0	0,188	4,122	18,78
<b>Lc3</b>	2,93	0,14	6,182	14,13
<b>Lc4</b>	7,23	0,14	8,243	13,58
<b>Lc5</b>	11,28	0,15	10,304	14,58
<b>Lc6</b>	6,62	0,14	12,365	13,97
<b>Lc7</b>	20,08	0,17	14,426	16,70
<b>Lc8</b>	0,69	0,15	16,486	14,76
<b>Lc9</b>	12,67	0,15	18,547	15,44
<b>Lc10</b>	24,16	0,18	20,608	17,88

<b>Asse x</b>	<b>Media Asse y [%]</b>	<b>Dev St</b>
2,06	21,01	16,39
4,12	19,54	2,68
6,18	17,17	6,13
8,24	14,86	4,12
10,30	15,54	1,36
12,36	16,02	2,03
14,43	15,89	0,90
16,49	14,92	1,67
18,55	16,60	1,79
20,61	17,88	0,00

## Allegato 2: Codice Matlab

```
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%          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 = 0.70;
toll = 1/70*PV;

%eccentricità ellisse
e=0.866;

% 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 diametri dei blocchi in termini probabilistici');
xlabel('Diametro 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, pari al diametro dei
cerchi nella versione con blocchi circolari
d_medio(i,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore dell'ellisse, pari
all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
vvi = pi*(d_medio(i,1)/2)*(d_medio(i,2)/2); %area dell'ellisse i-esima =
pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
vv = vv+vvi;
end
vvb=vv-vvi;
Nd = numel(d_medio)/2; %numero di ellissi generate (diviso 2 perchè numel=n.
elem. matrice,2=n. di colonne)
while vv>=(PV*A+toll*A)
temp = round(rand(1)*length(F));
if (temp==0), temp = 1; end
d_medio(Nd,1) = dp(temp); %asse maggiore dell'ellisse, pari al diametro dei
cerchi nella versione con blocchi circolari
d_medio(Nd,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore dell'ellisse,
pari all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
vvi = pi*(d_medio(i,1)/2)*(d_medio(i,2)/2); %area dell'ellisse i-esima =
pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
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, pari al diametro
dei cerchi nella versione con blocchi circolari
    d_medio(Nd,2) = (dp(temp)^2-e^2*dp(temp)^2)^0.5; %asse minore
dell'ellisse, pari all'asse maggiore per 3/4 per e=0.5
    vvi = pi*(d_medio(i,1)/2)*(d_medio(i,2)/2); %area dell'ellisse i-esima =
pigreco*semiassemaggiore*semiasseminore
    vv = vvb+vvi;
end
end

do = sort(d_medio,'descend');
figure(2)
plot(do,'x');
title('Distribuzione dimensionale blocchi');
xlabel('Blocchi');
ylabel('Diametro blocchi (m)');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               %
%          Verifica della dimensione frattale          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% generazione delle classi
node = 0.04*sqrt(A); % valore di riferimento per rappres. grafica--> ATT.|| valutare
se inserire 0.05 al posto di 0.04
node_classe_1= node/2;
node_classe_2= node;
node_classe_3= node*2;
node_classe_4= node_classe_3*2;
node_classe_5= node_classe_4*2;

%definizione delle frequenze per le classi --- considerando l'asse maggiore
ii=0;
cont_1=0;
cont_2=0;
cont_3=0;
cont_4=0;
for i=1:Nd
    if (node_classe_1<do(i,1)) && (node_classe_2>do(i,1))
        classe_1= cont_1 + 1;
        cont_1 = classe_1;
    end
    if (node_classe_2<do(i,1)) && (node_classe_3>do(i,1))

```

```

    classe_2= 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)=60;
    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
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,:)',radii];

%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%
%
%           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);

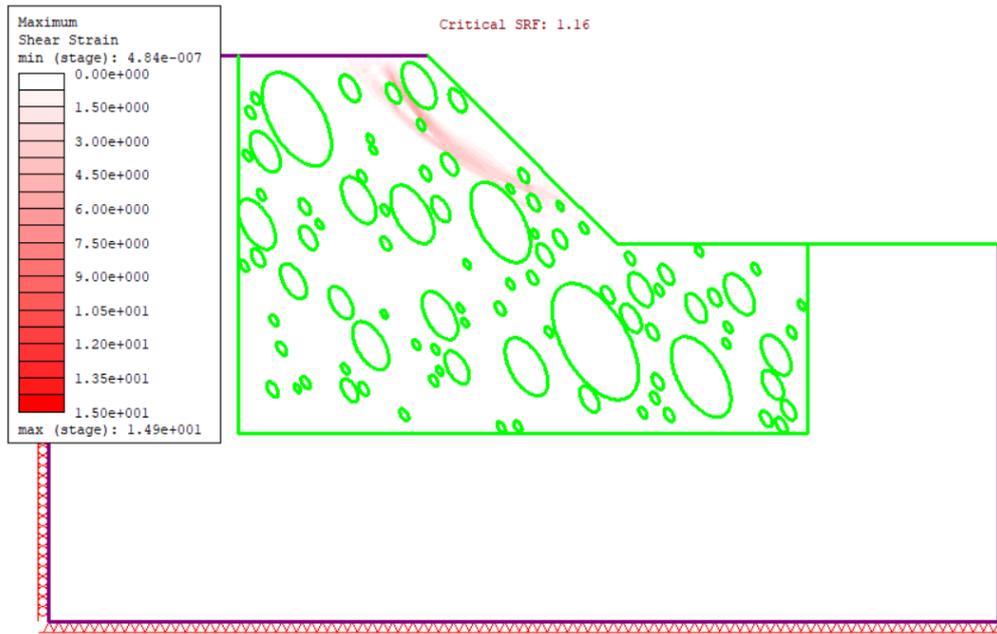
%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%
%
%           Controllo percentuale volumetrica           %
%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%
format long
PV
test=vw/A

```

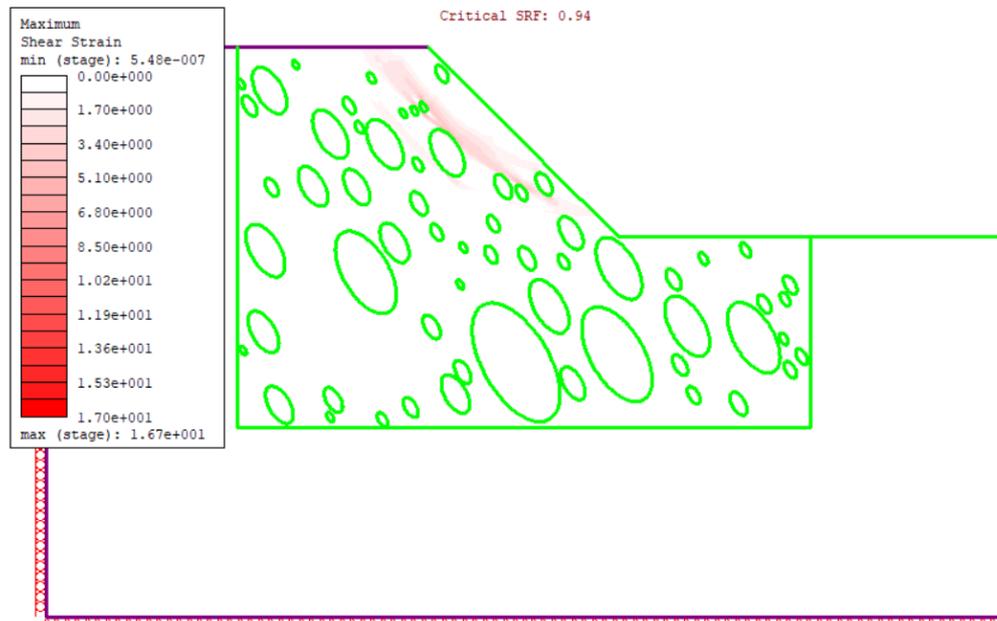


## Allegato 3: Massime deformazioni di taglio

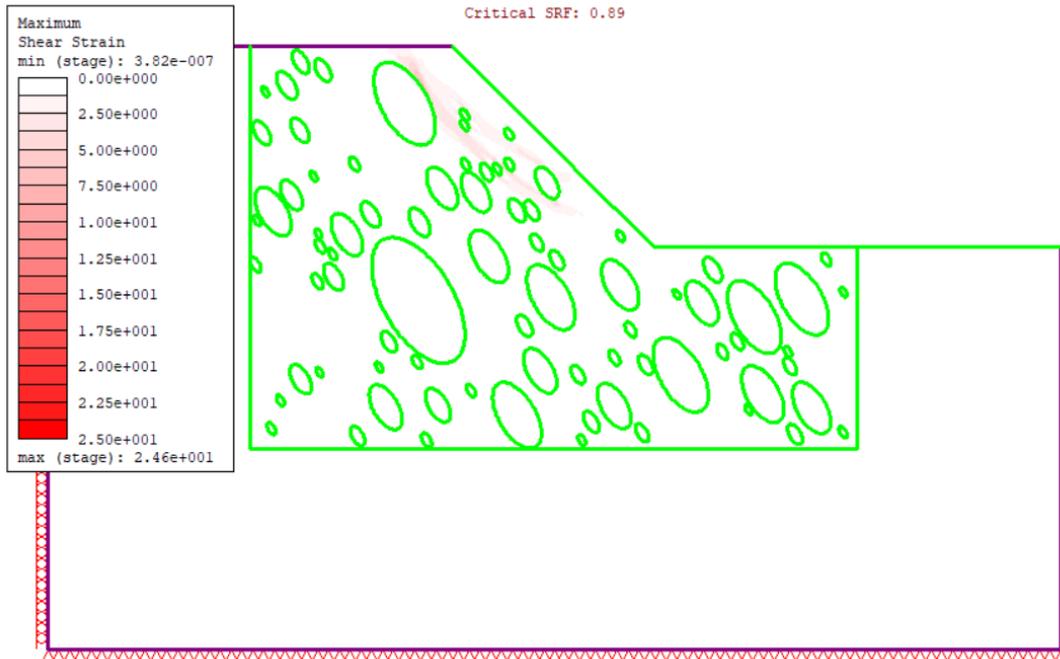
### Modelli con inclinazione dei blocchi di 60°



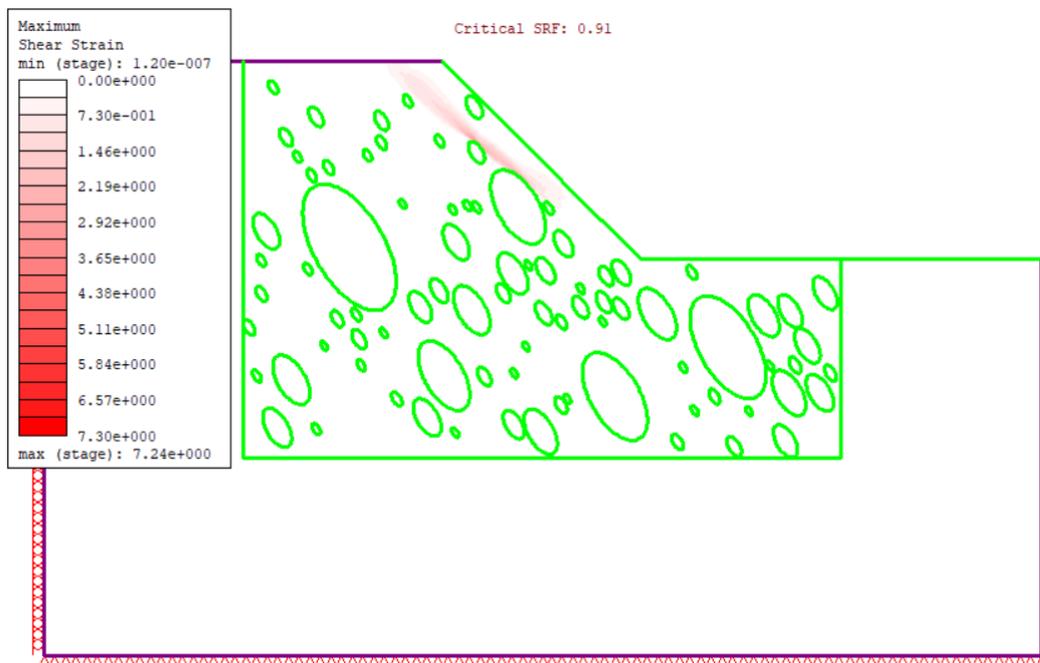
Allegato 3.1: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=25%



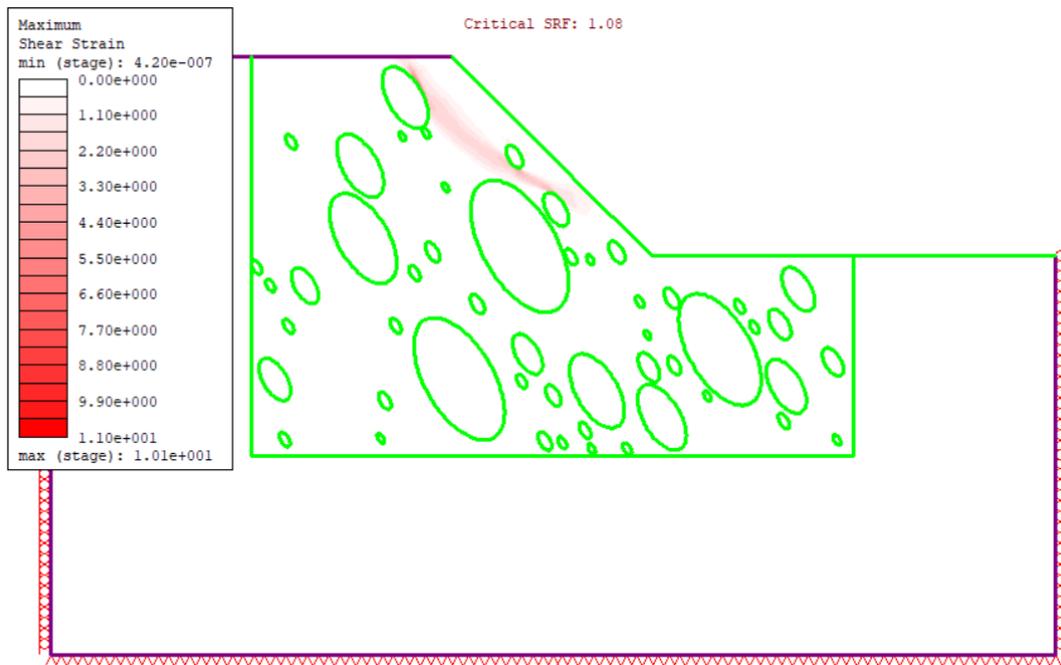
Allegato 3.2: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=25%



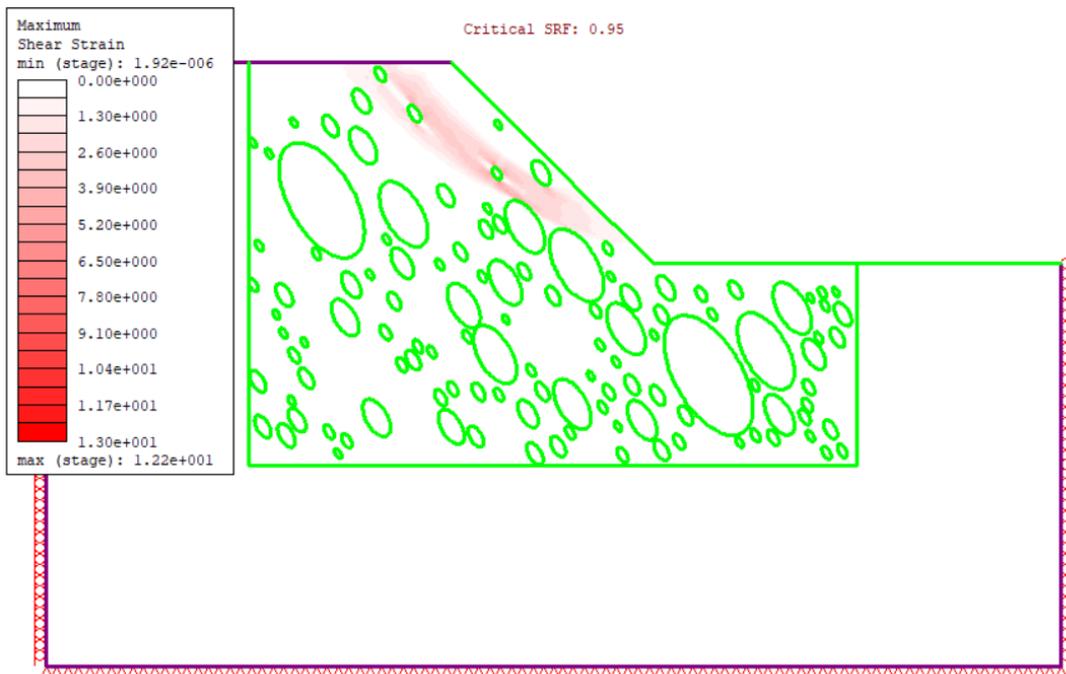
Allegato 3.3: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=25%



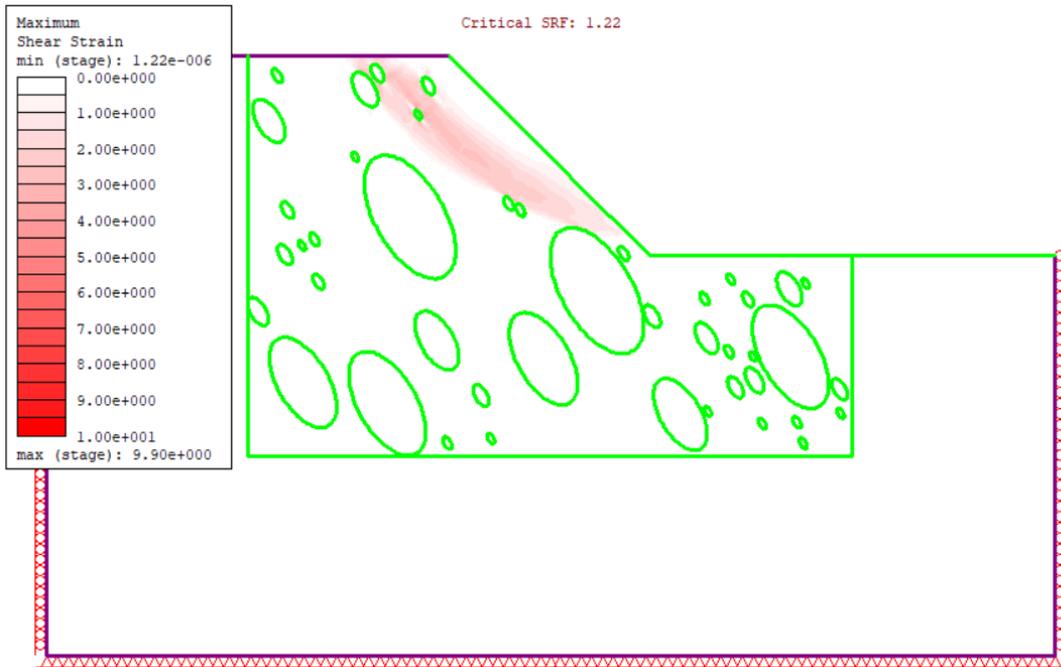
Allegato 3.4: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=25%



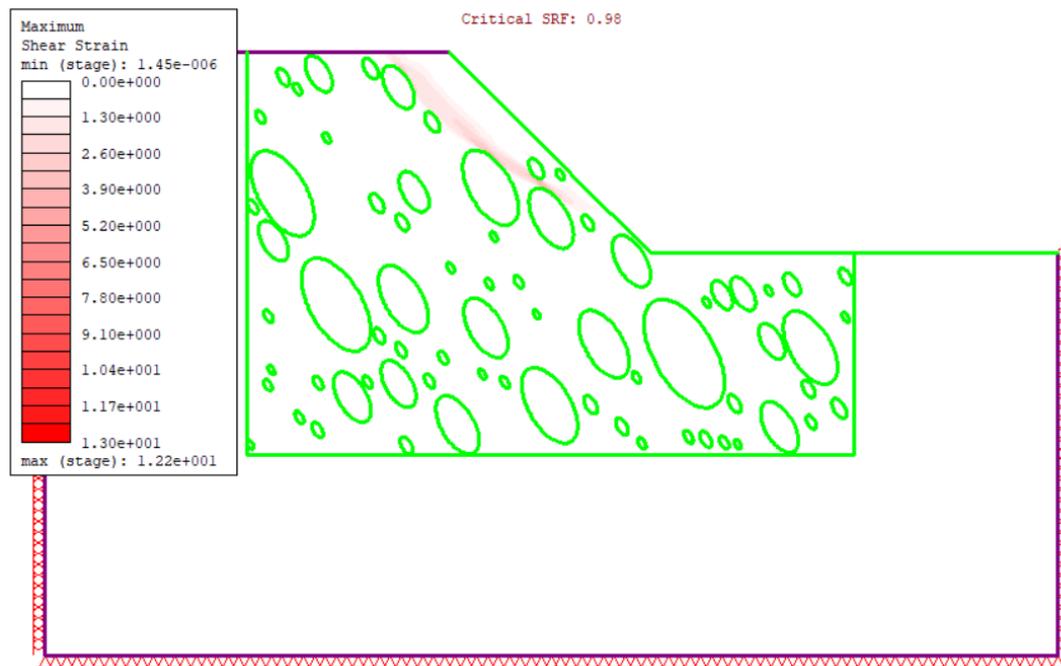
Allegato 3.5: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=25%



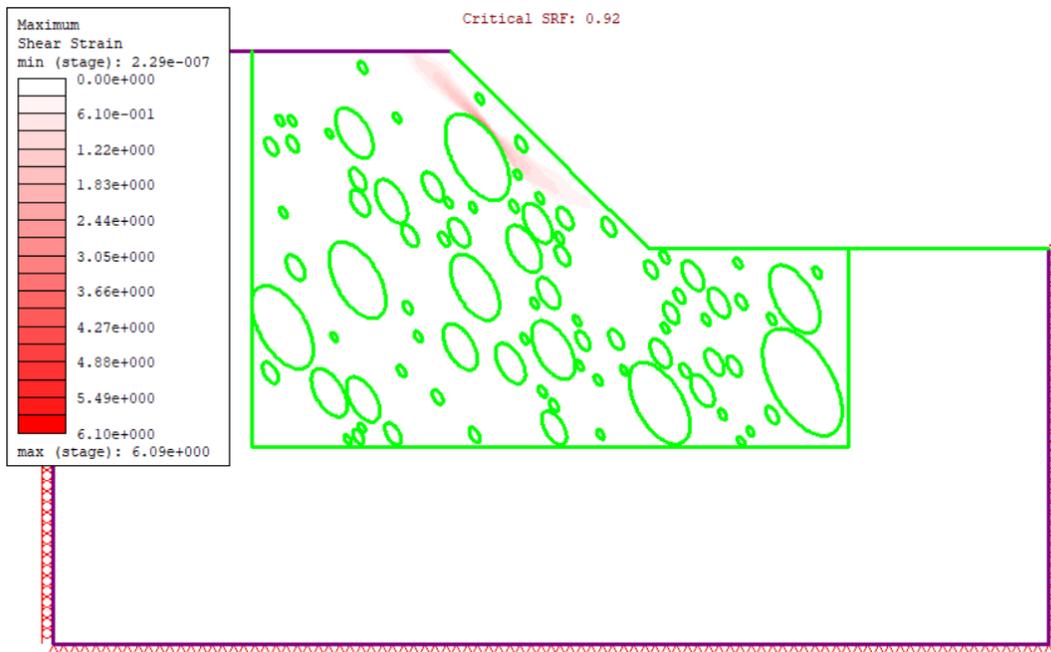
Allegato 3.6: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=25%



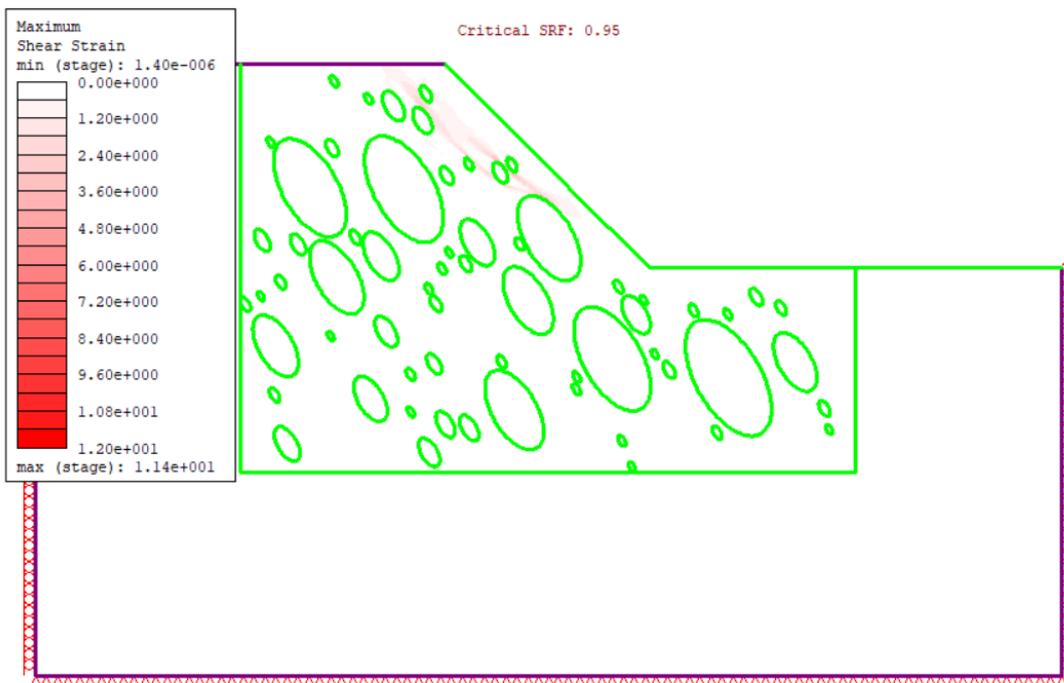
*Allegato 3.7: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=25%*



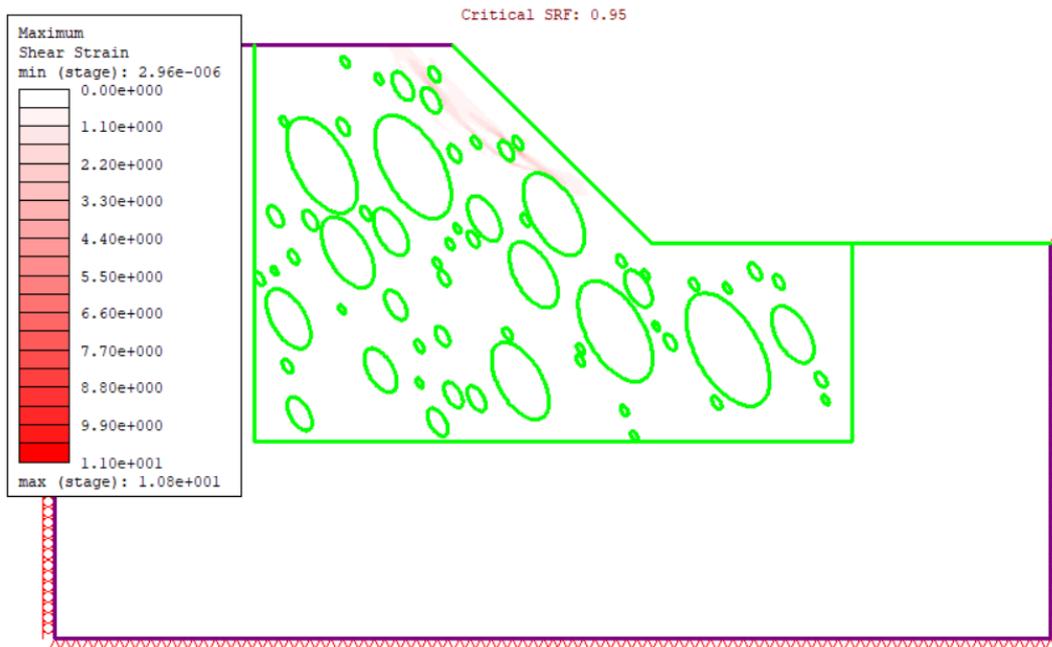
*Allegato 3.8: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=25%*



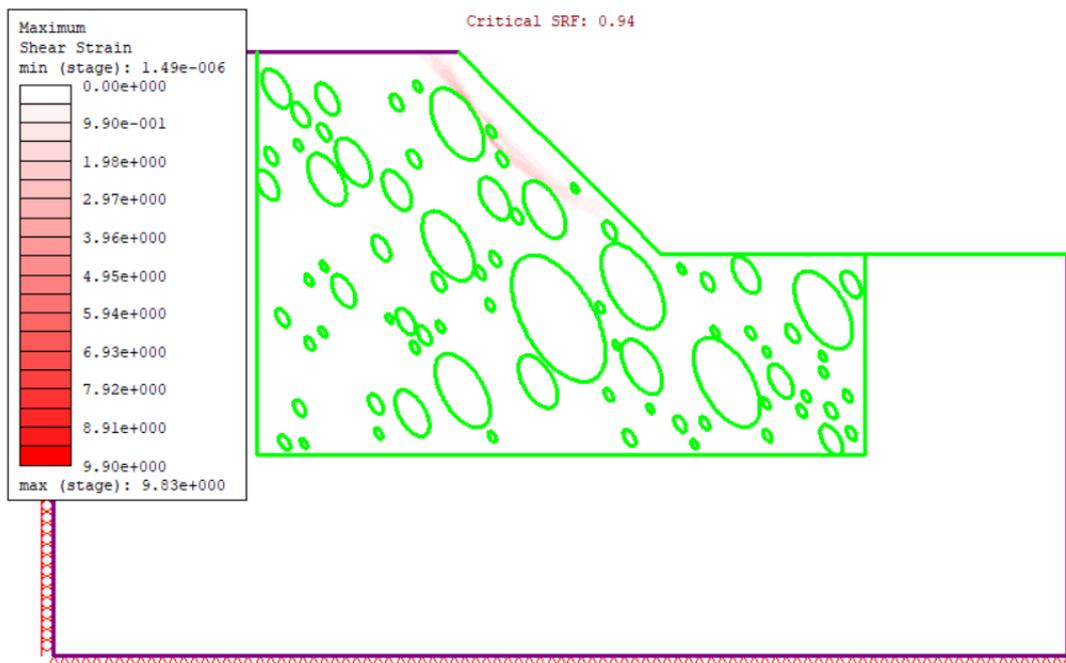
*Allegato 3.9: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=25%*



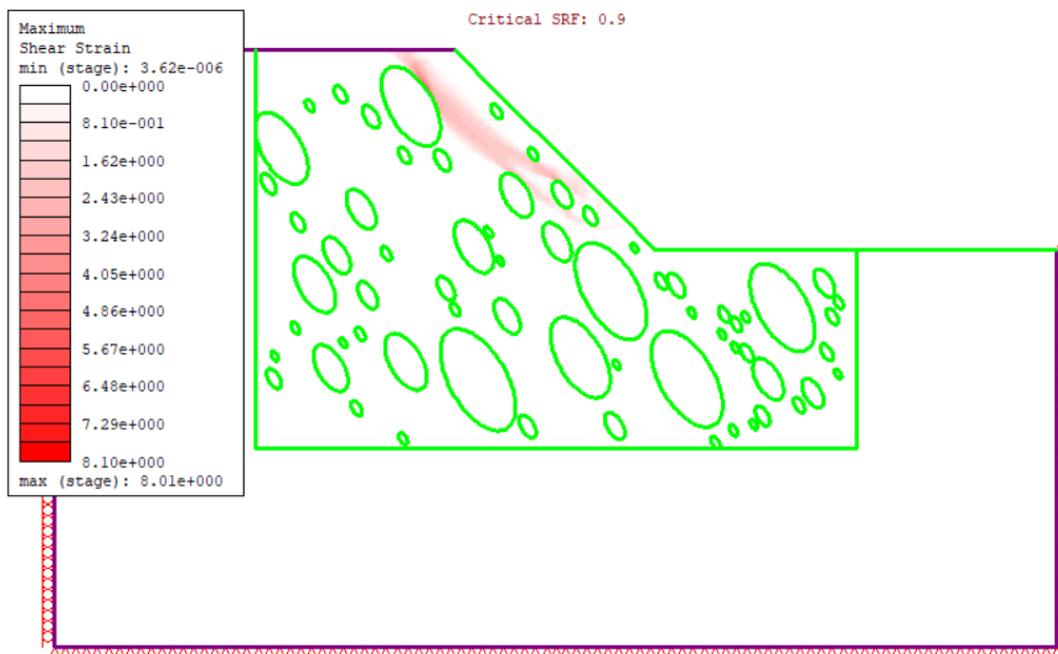
*Allegato 3.10: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=25%*



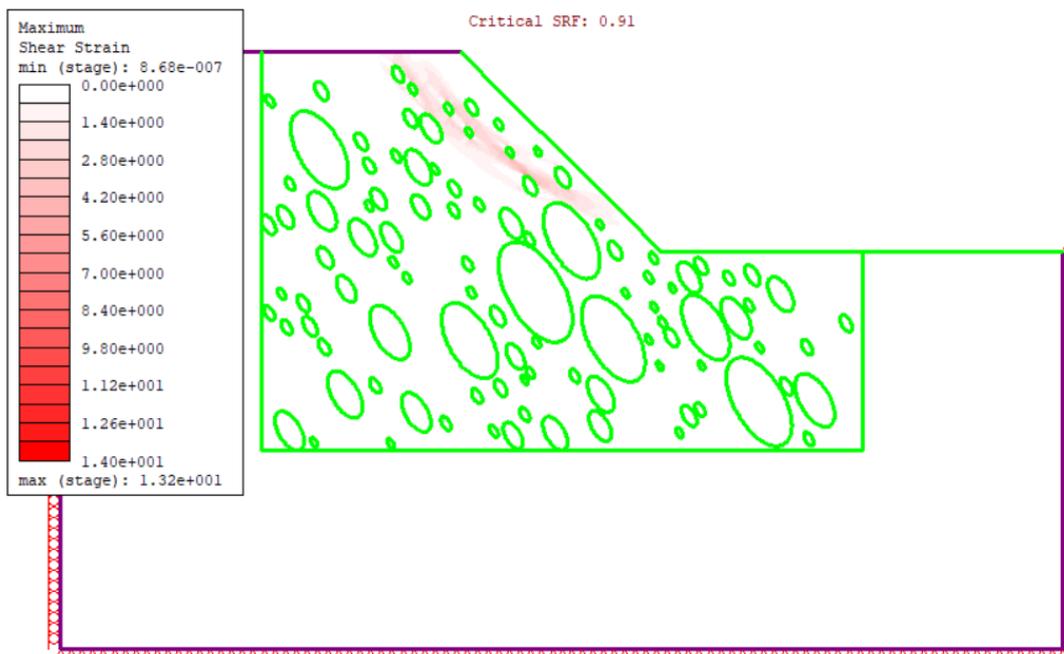
Allegato 3.11: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=25%



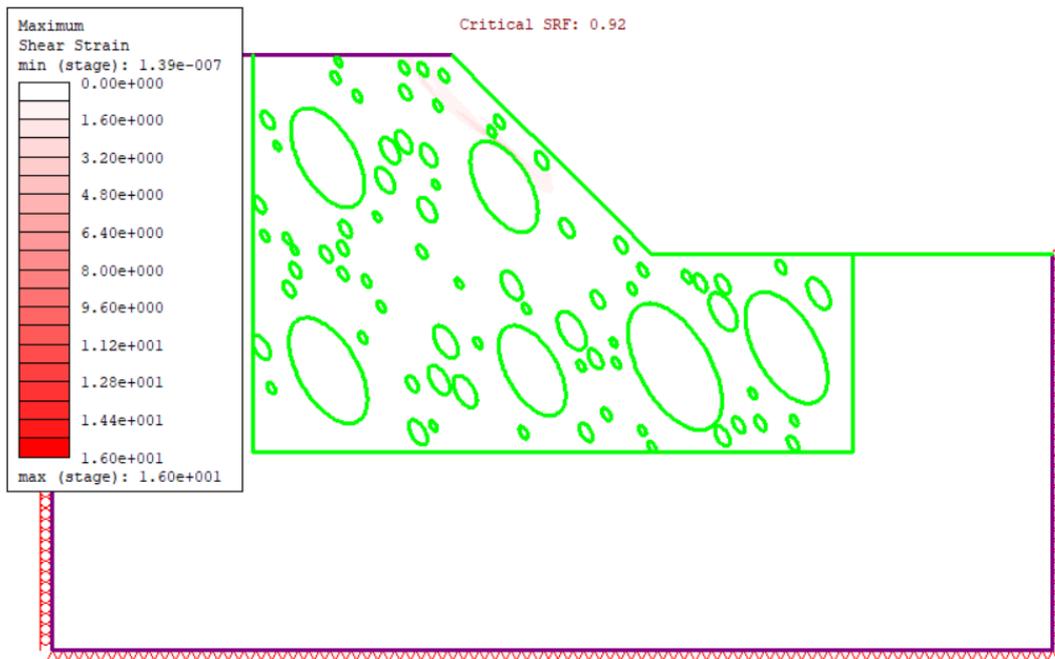
Allegato 3.12: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=25%



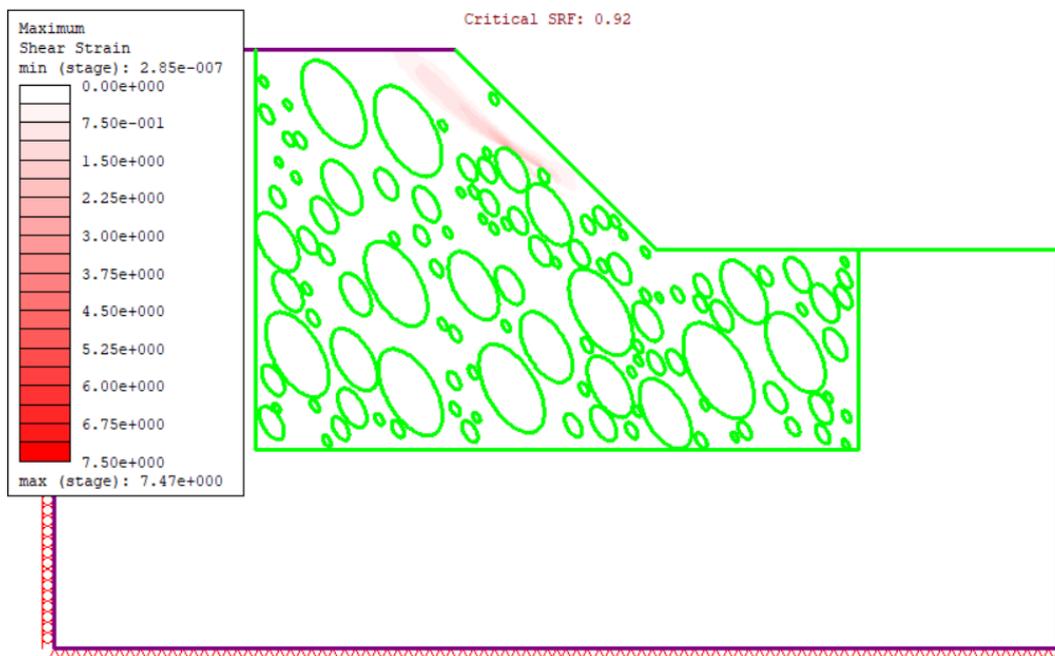
Allegato 3.13: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=25%



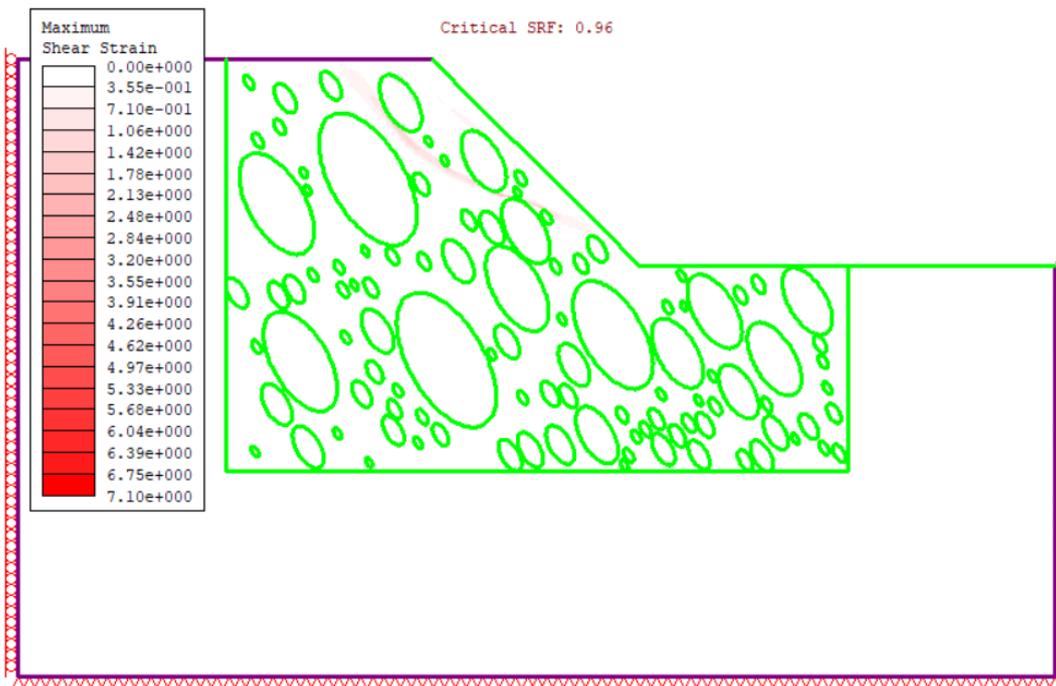
Allegato 3.14: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=25%



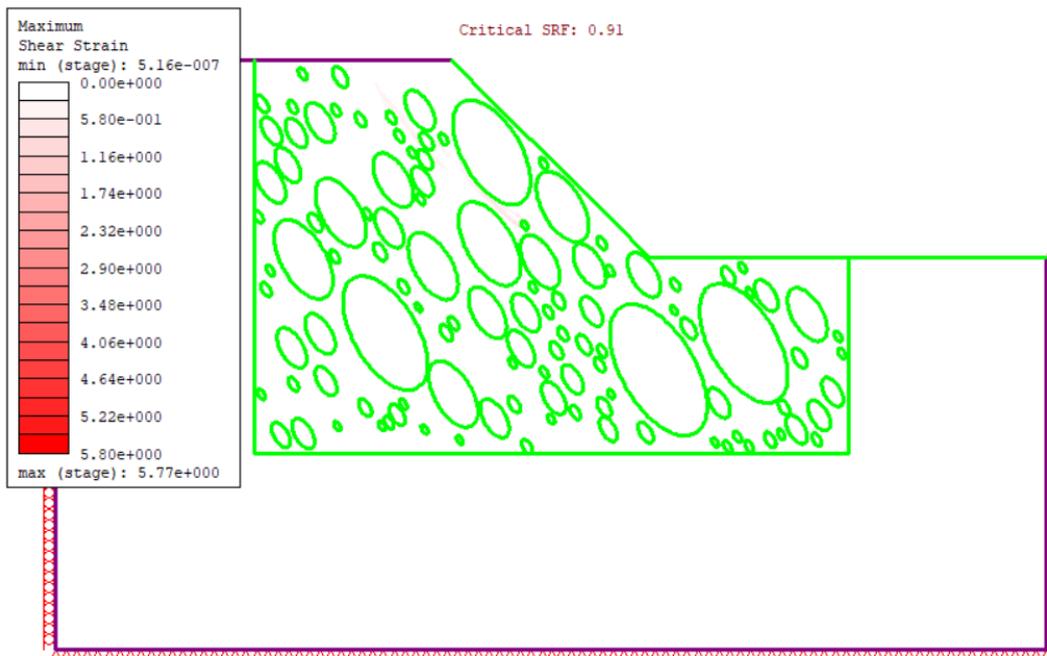
Allegato 3.15: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=25%



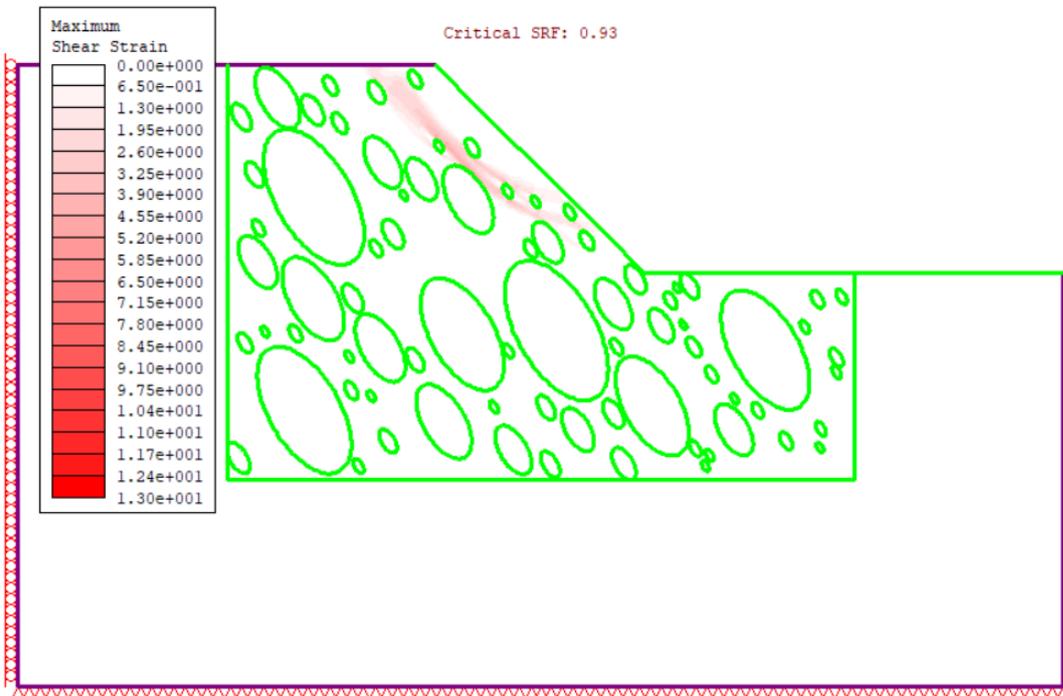
Allegato 3.16: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=40%



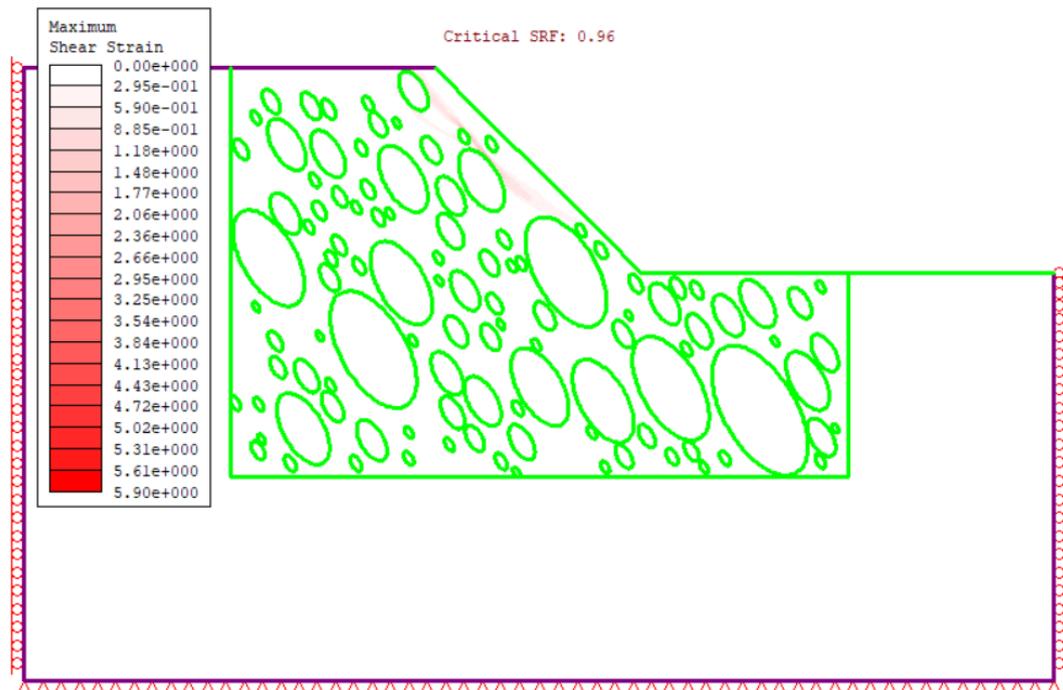
Allegato 3.17: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=40%



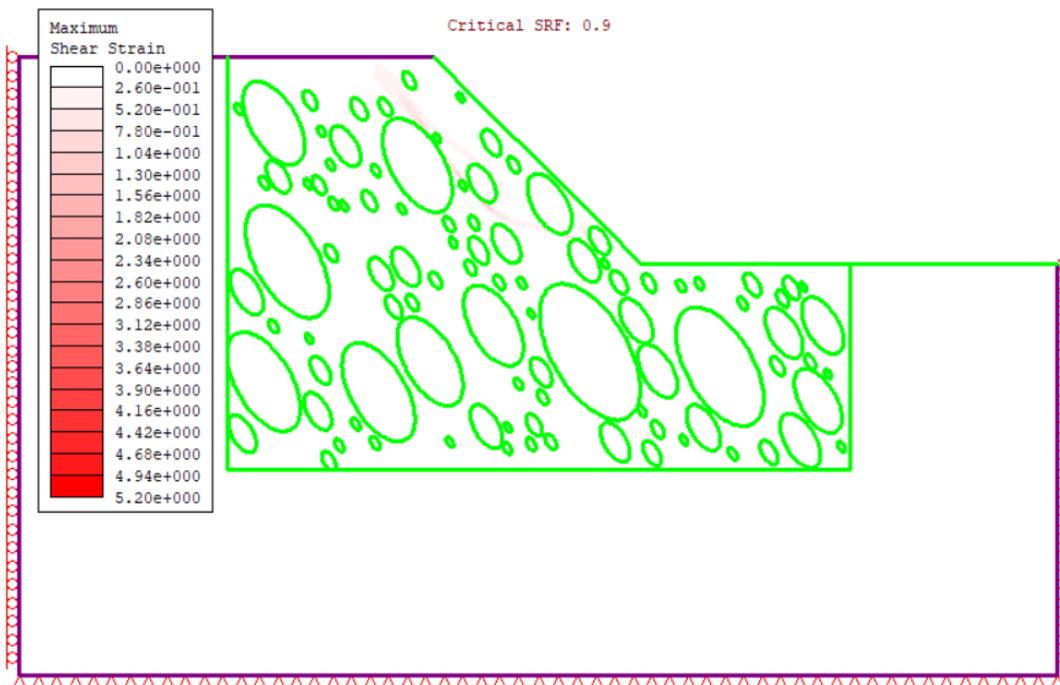
Allegato 3.18: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=40%



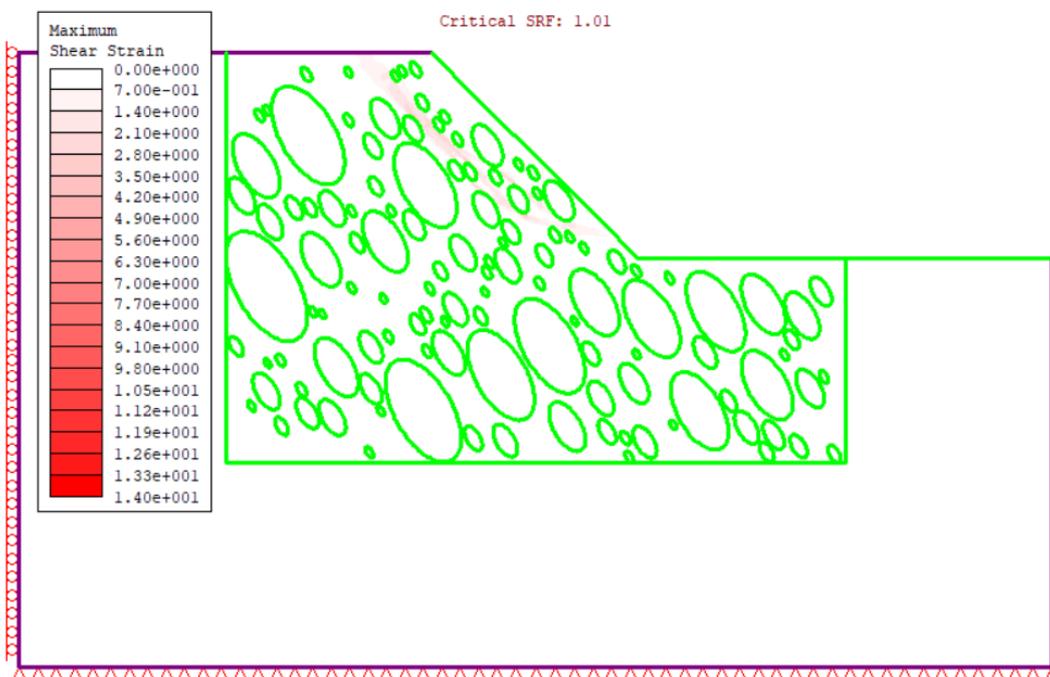
Allegato 3.19: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=40%



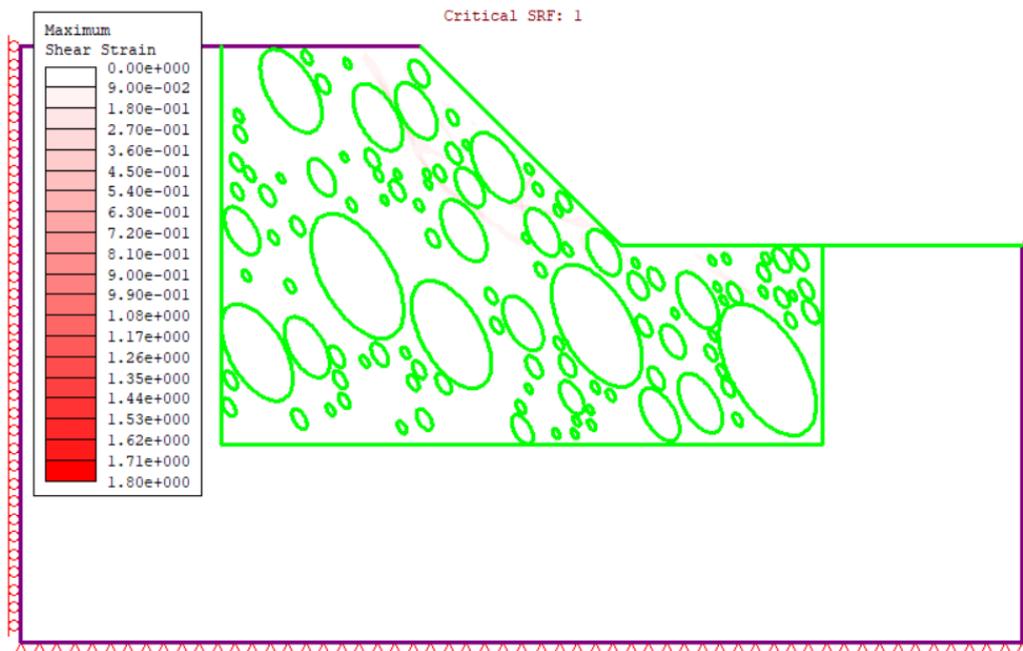
Allegato 3.20: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=40%



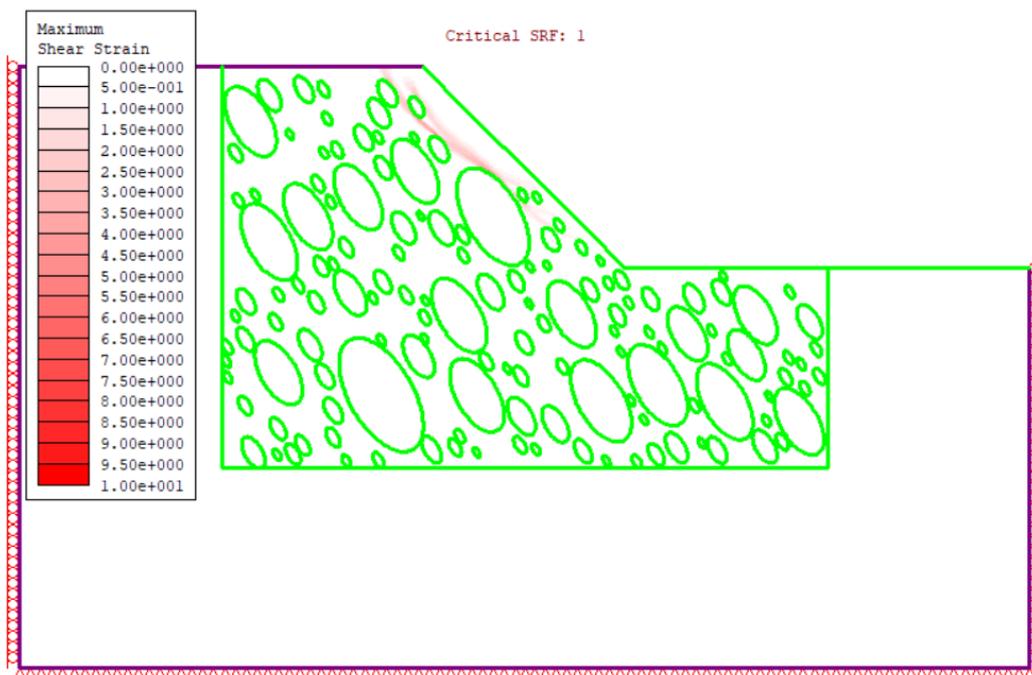
Allegato 3.21: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=40%



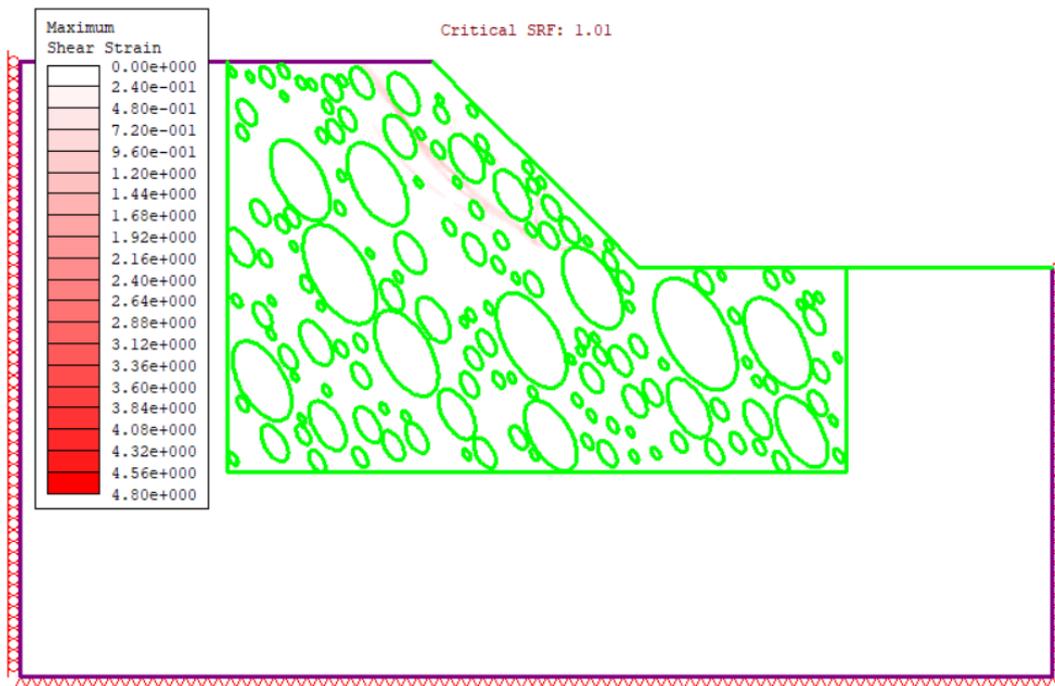
Allegato 3.22: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=40%



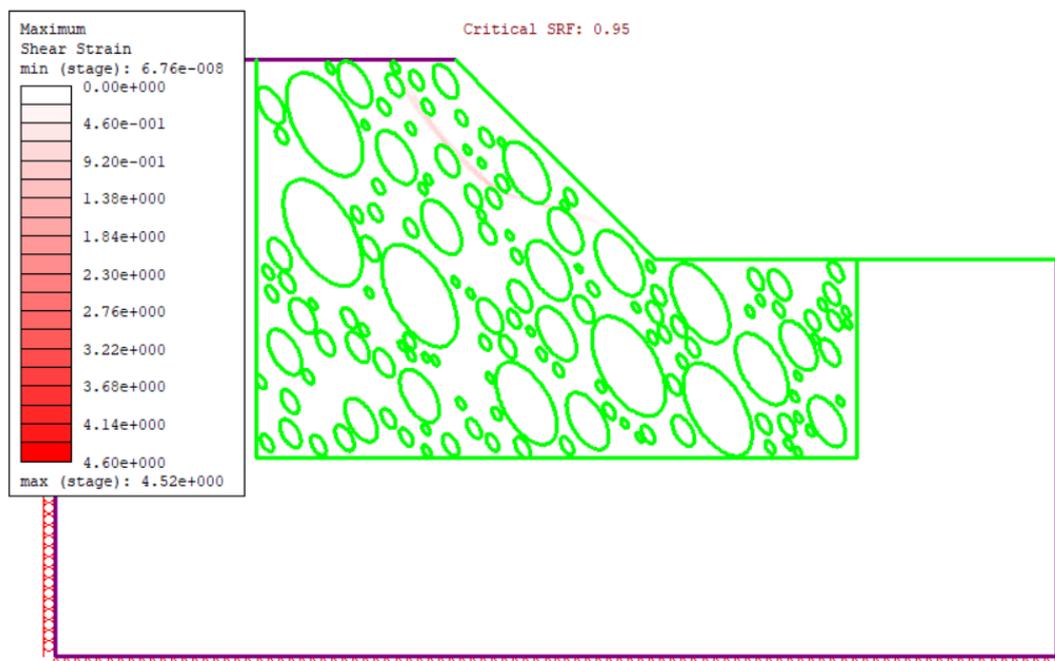
Allegato 3.23: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=40%



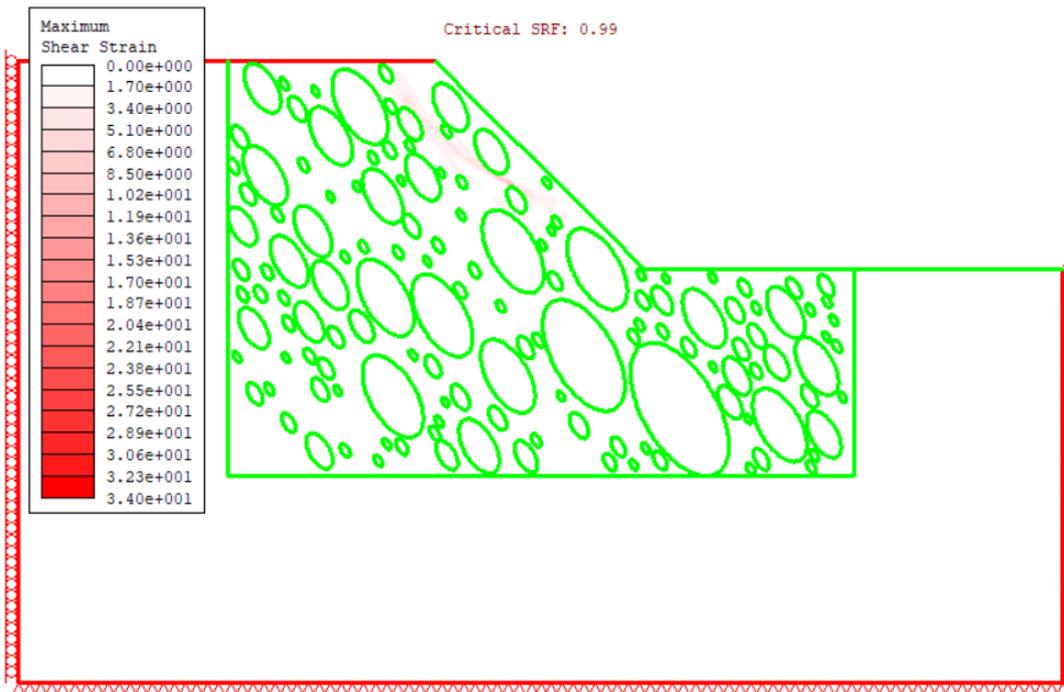
Allegato 3.24: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=40%



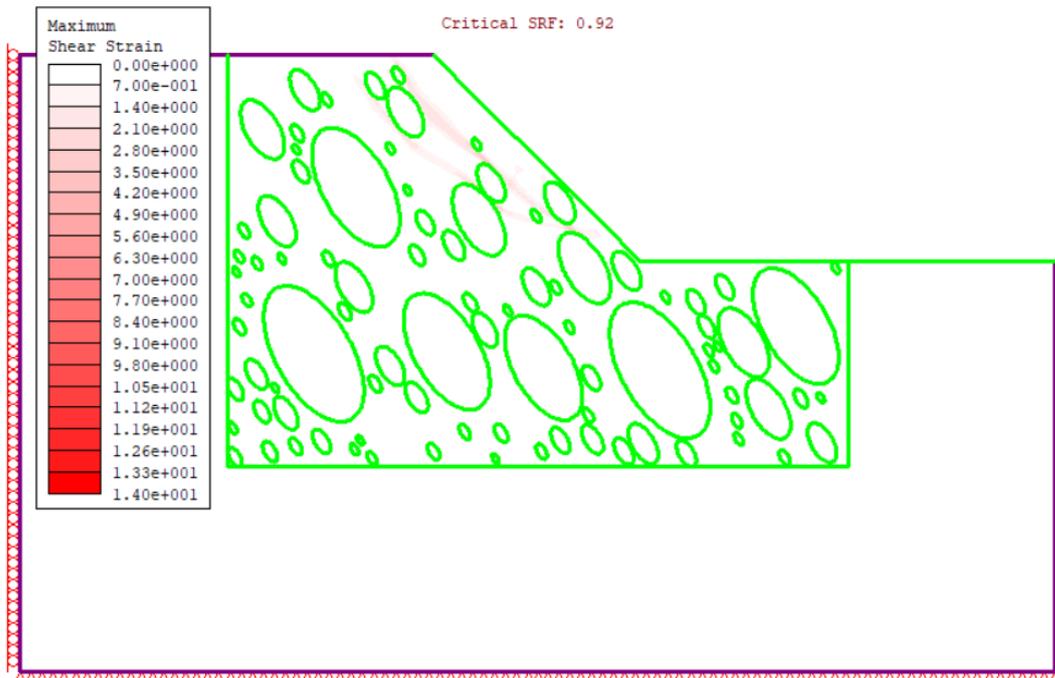
Allegato 3.25: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=40%



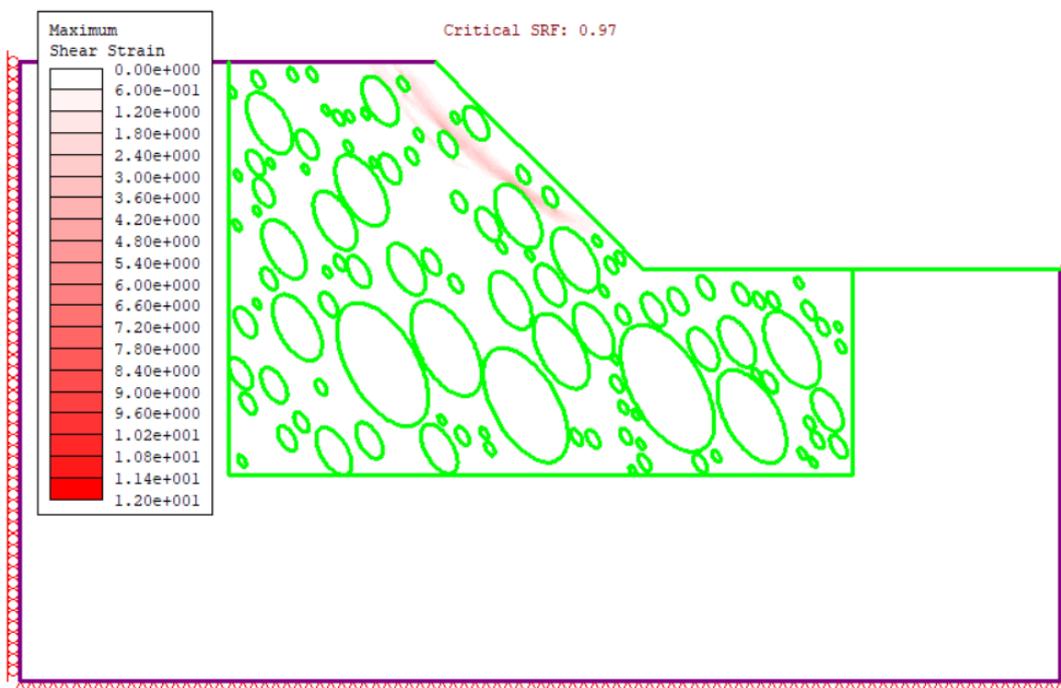
Allegato 3.26: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=40%



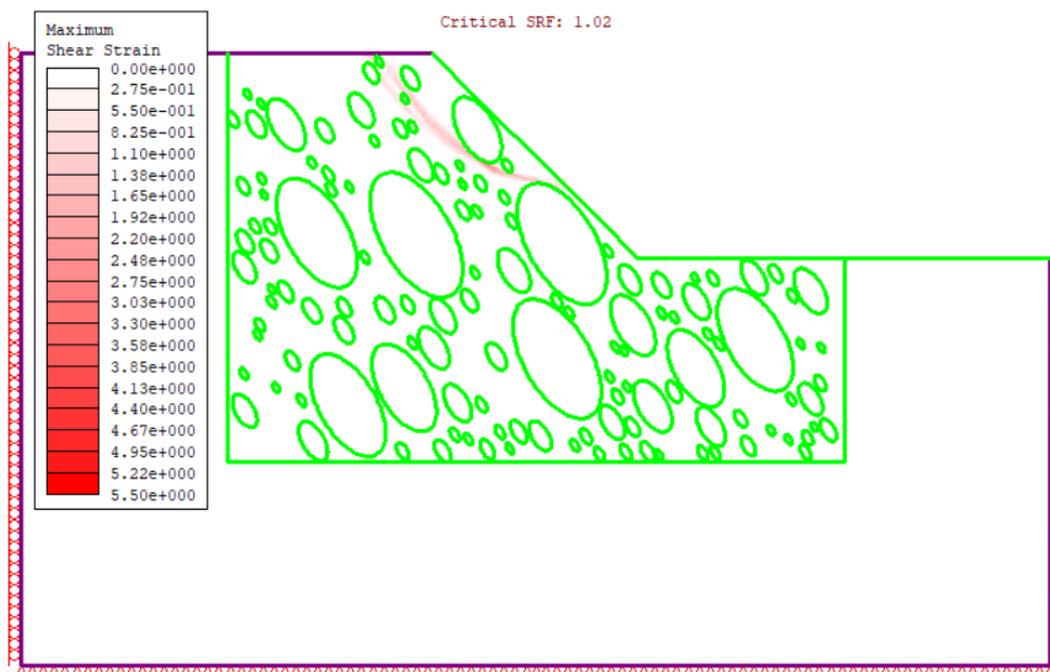
Allegato 3.27: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=40%



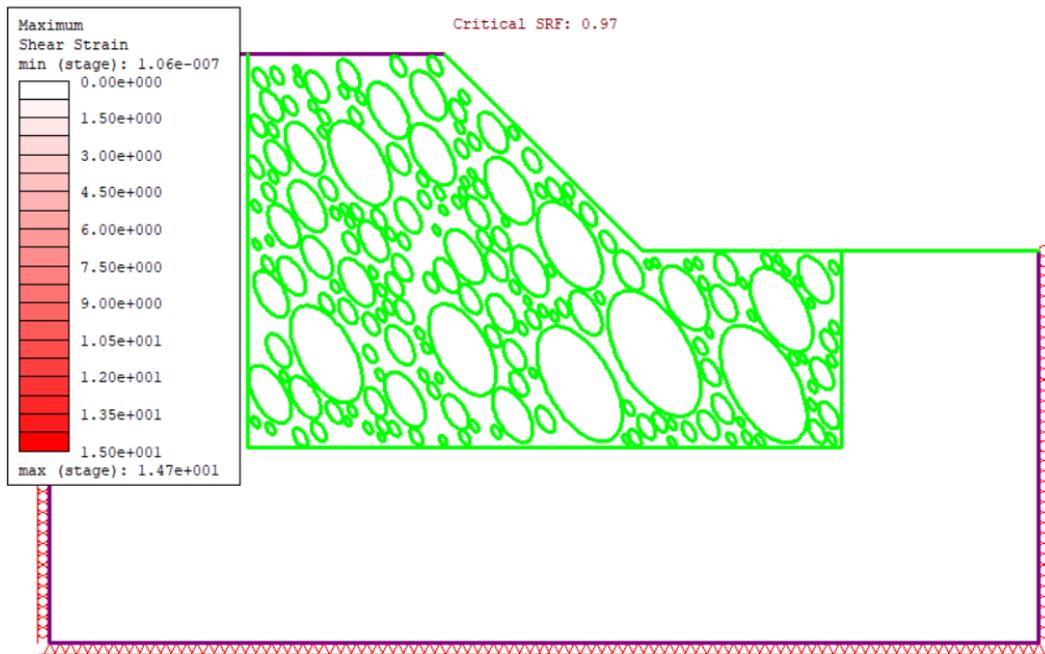
Allegato 3.28: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=40%



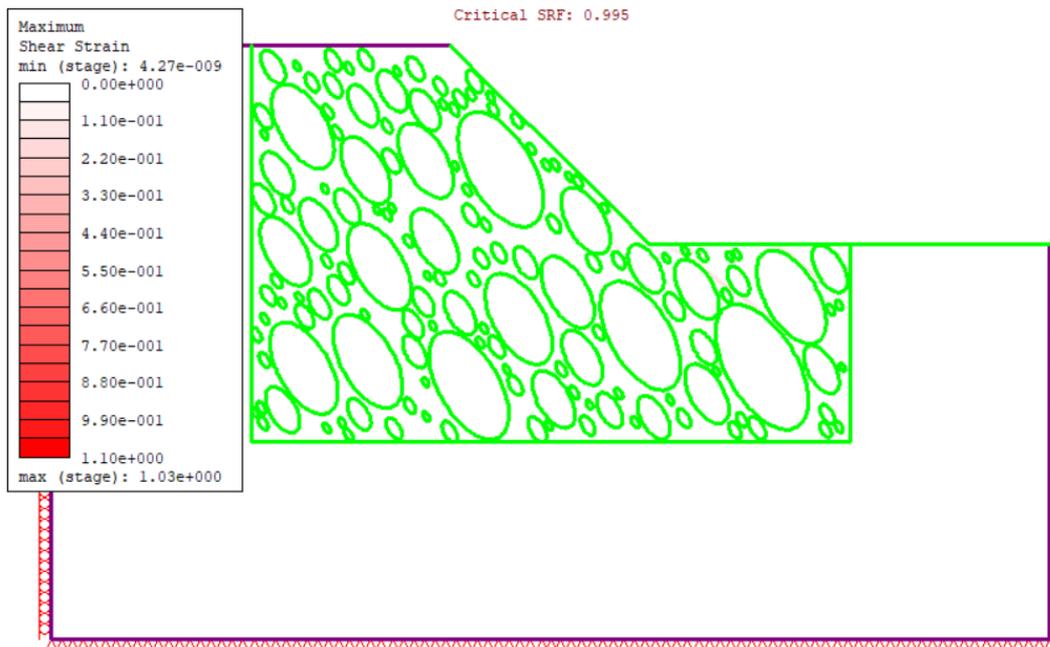
Allegato 3.29: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=40%



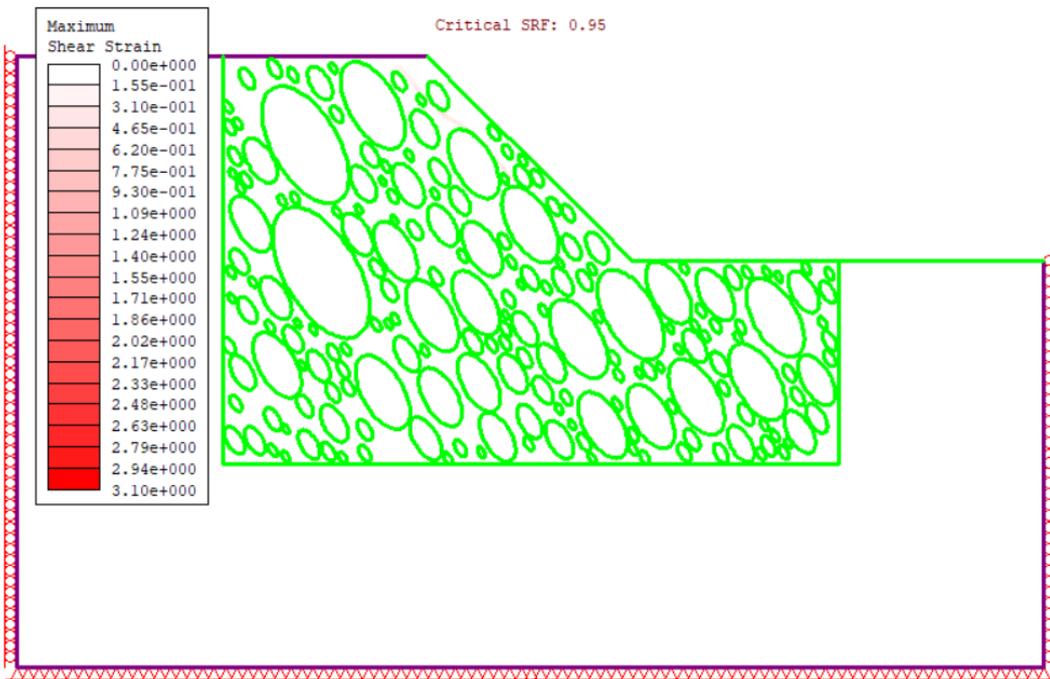
Allegato 3.30: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=40%



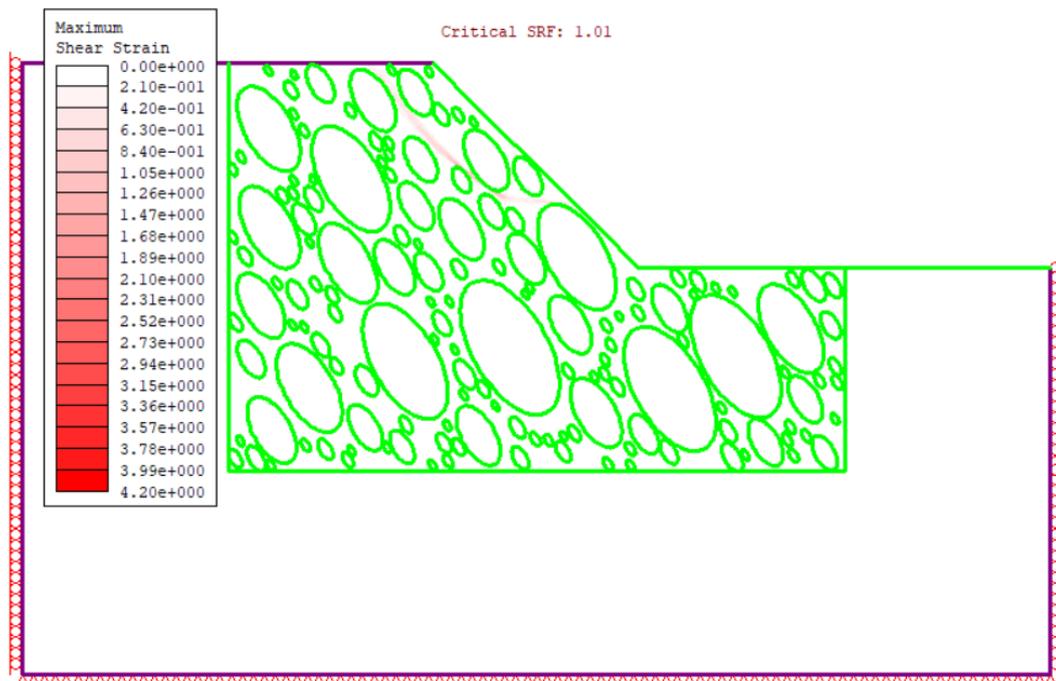
Allegato 3.31: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=55%



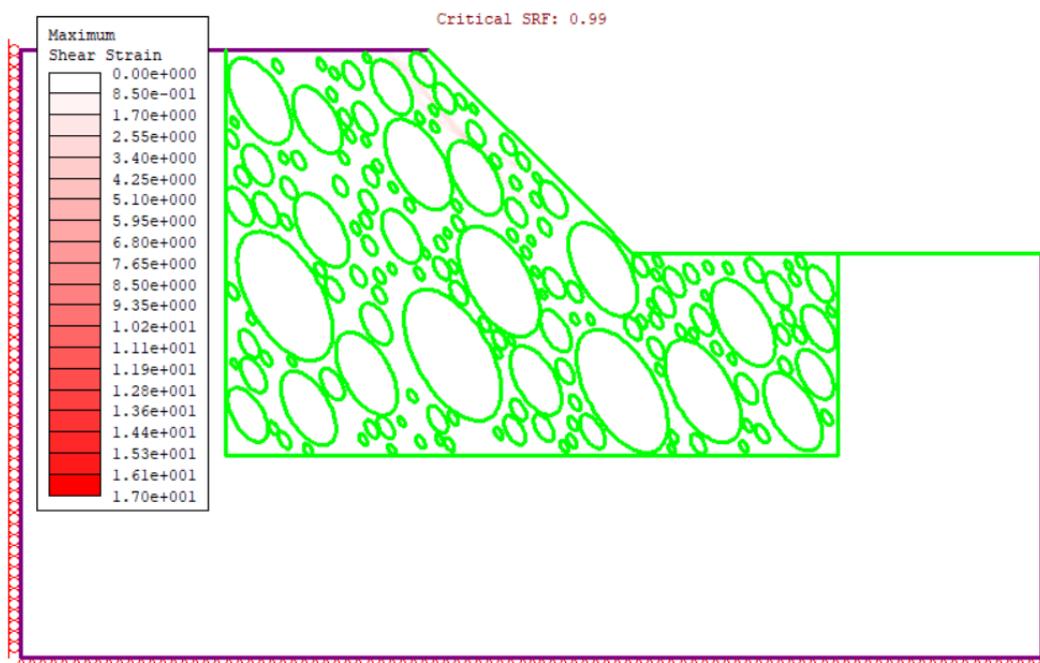
Allegato 3.32: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=55%



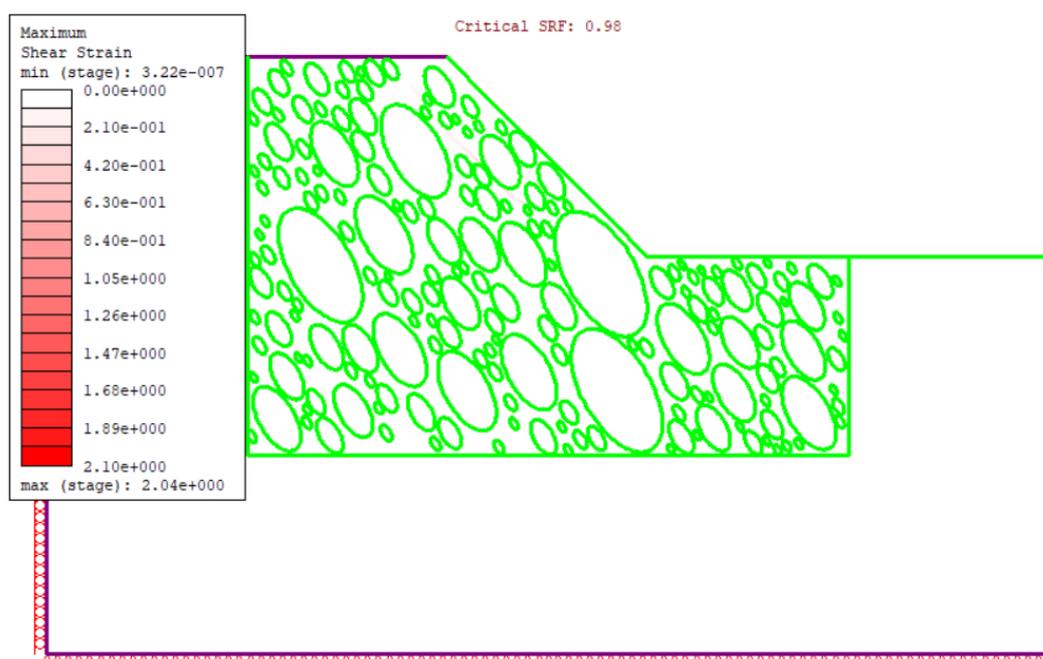
Allegato 3.33: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=55%



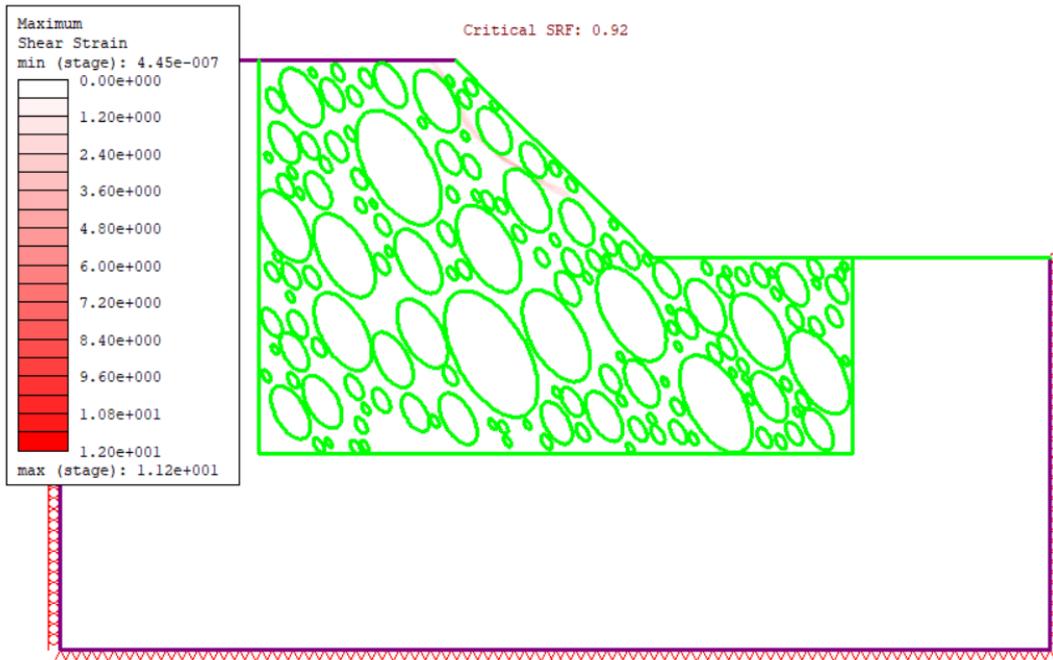
Allegato 3.34: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=55%



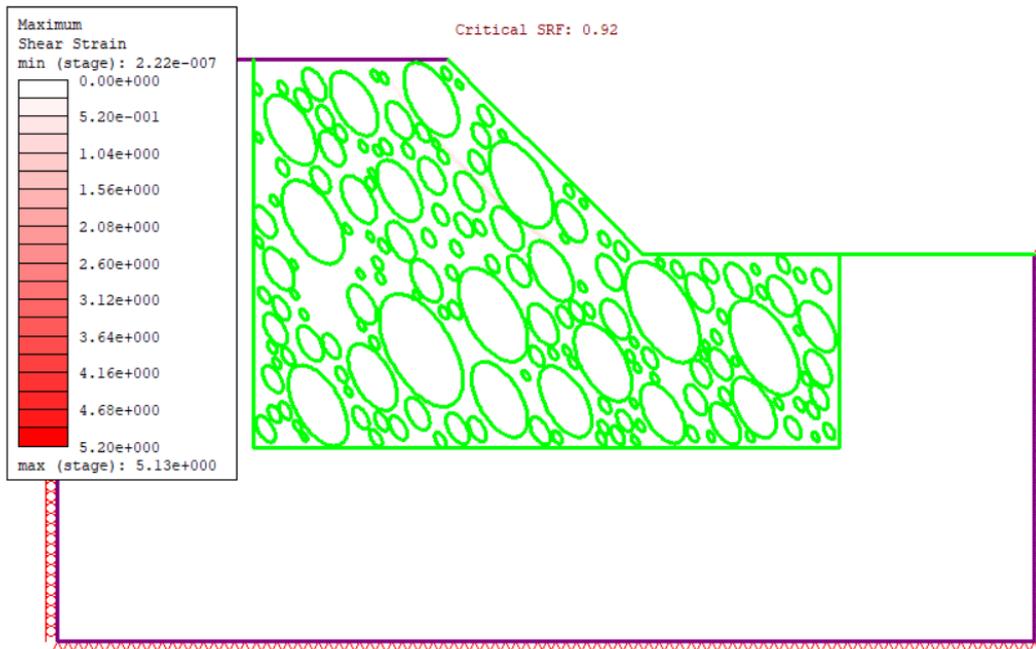
*Allegato 3.35: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=55%*



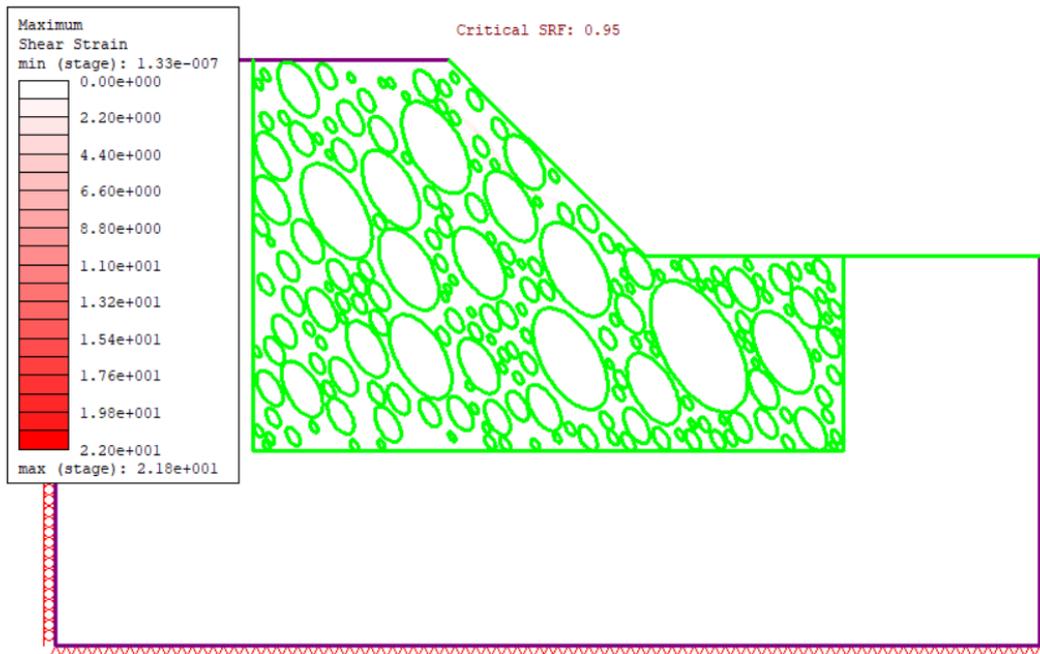
*Allegato 3.36: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=55%*



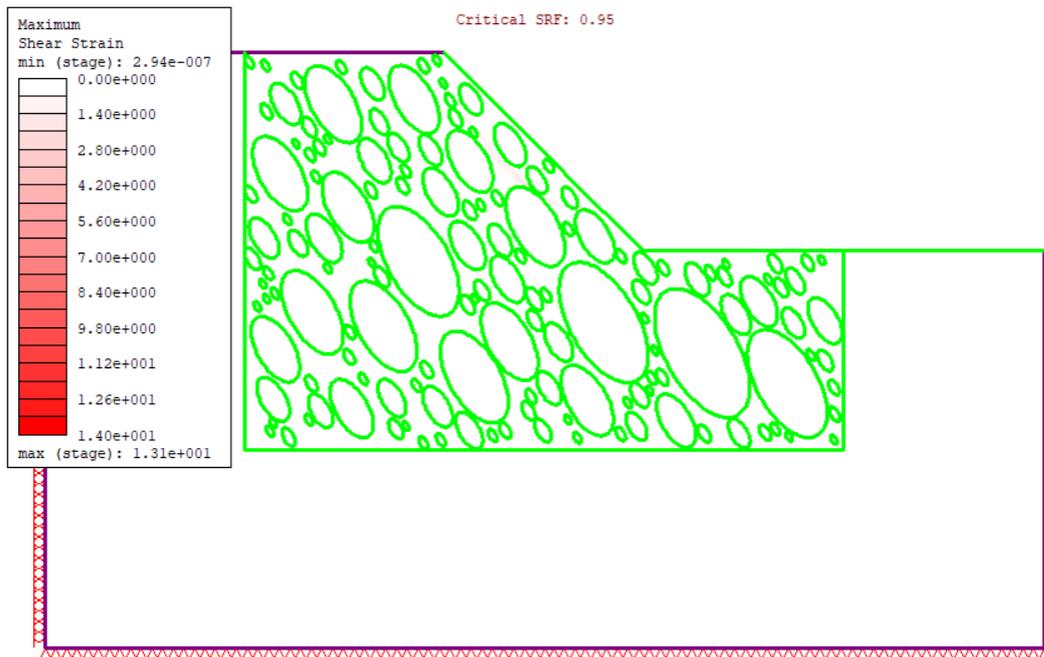
Allegato 3.37: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=55%



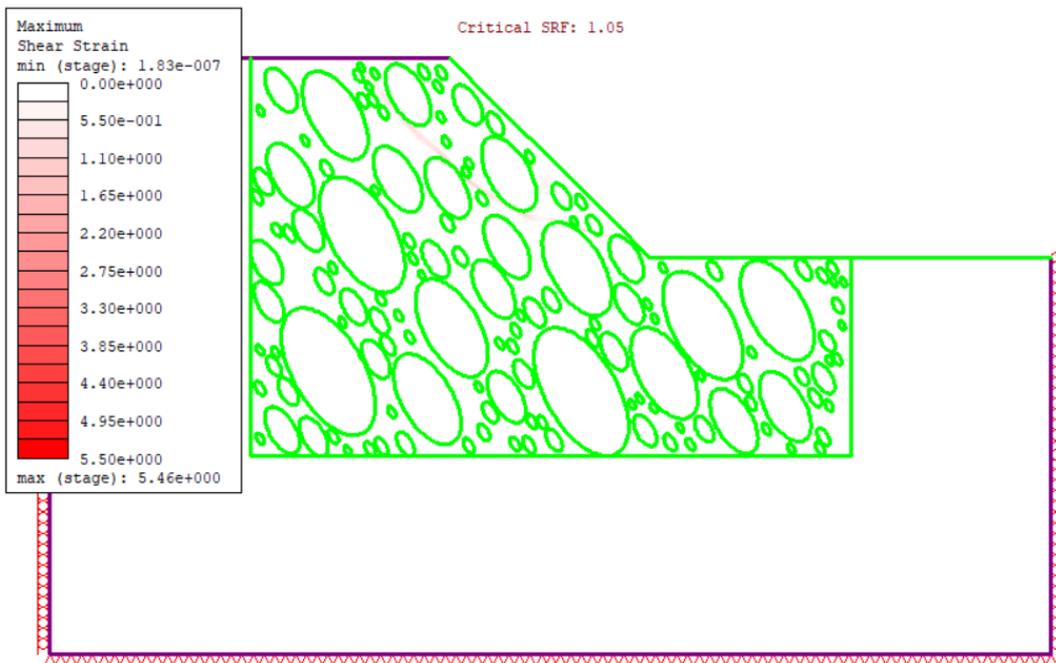
Allegato 3.38: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=55%



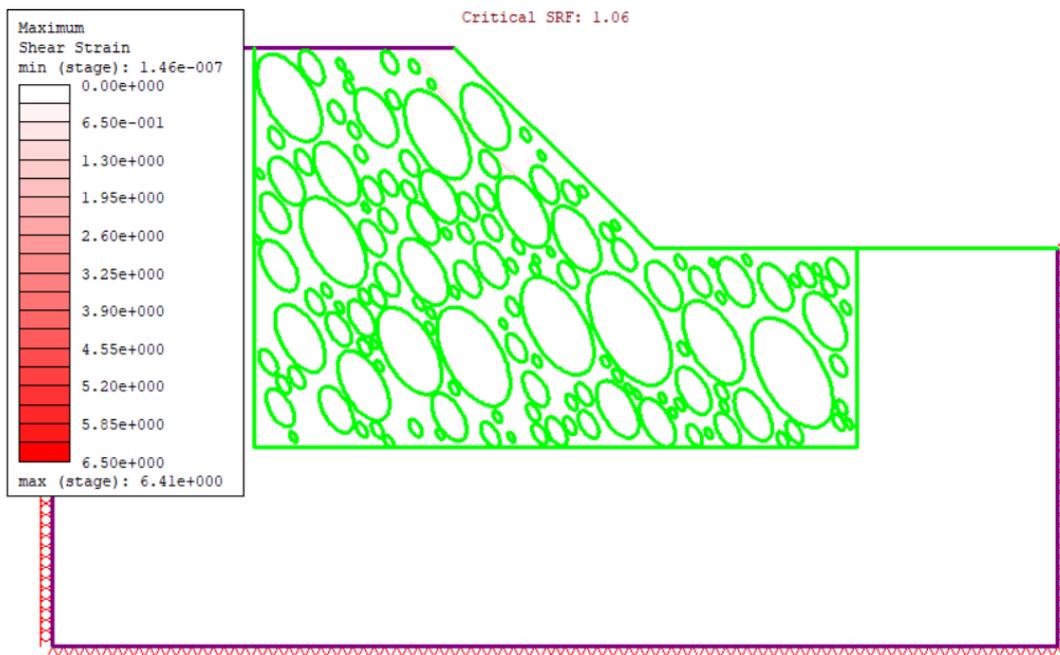
Allegato 3.39: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=55%



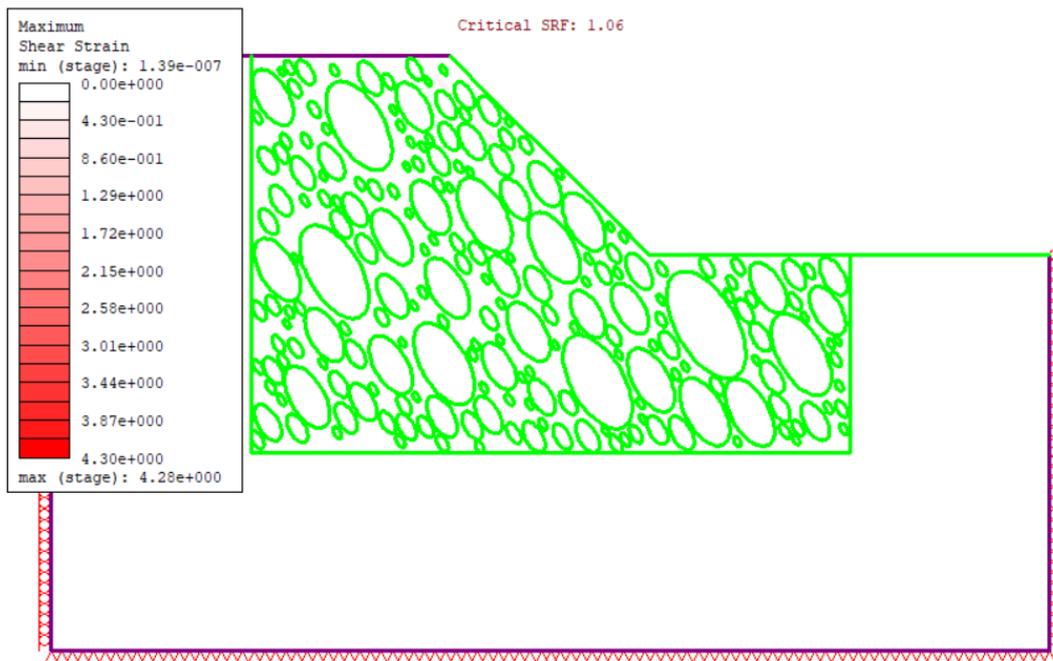
Allegato 3.40: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=55%



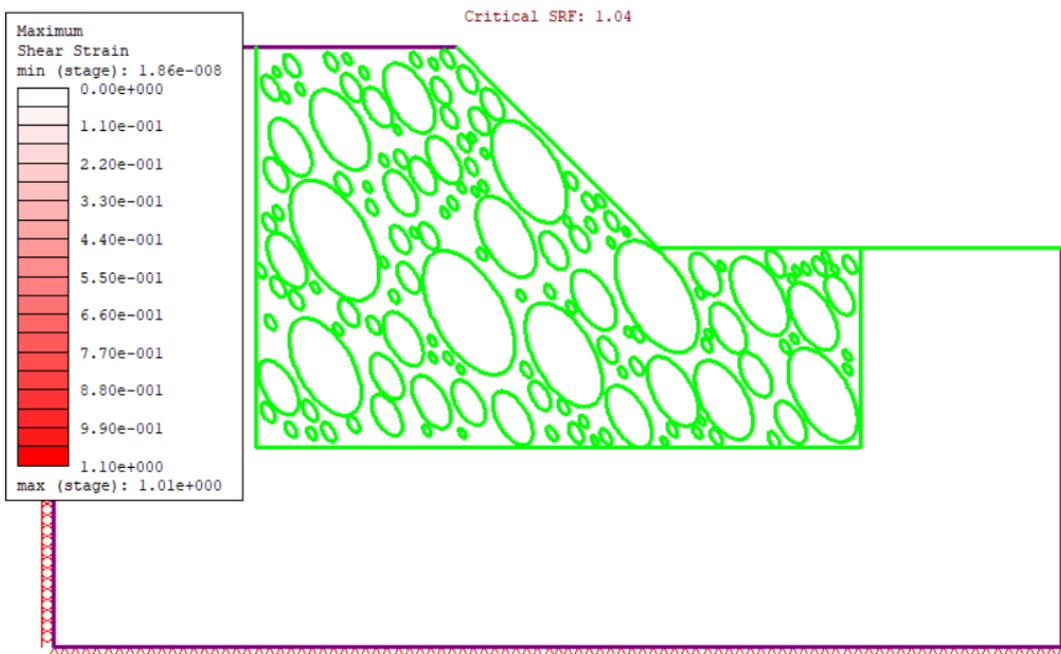
*Allegato 3.41: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=55%*



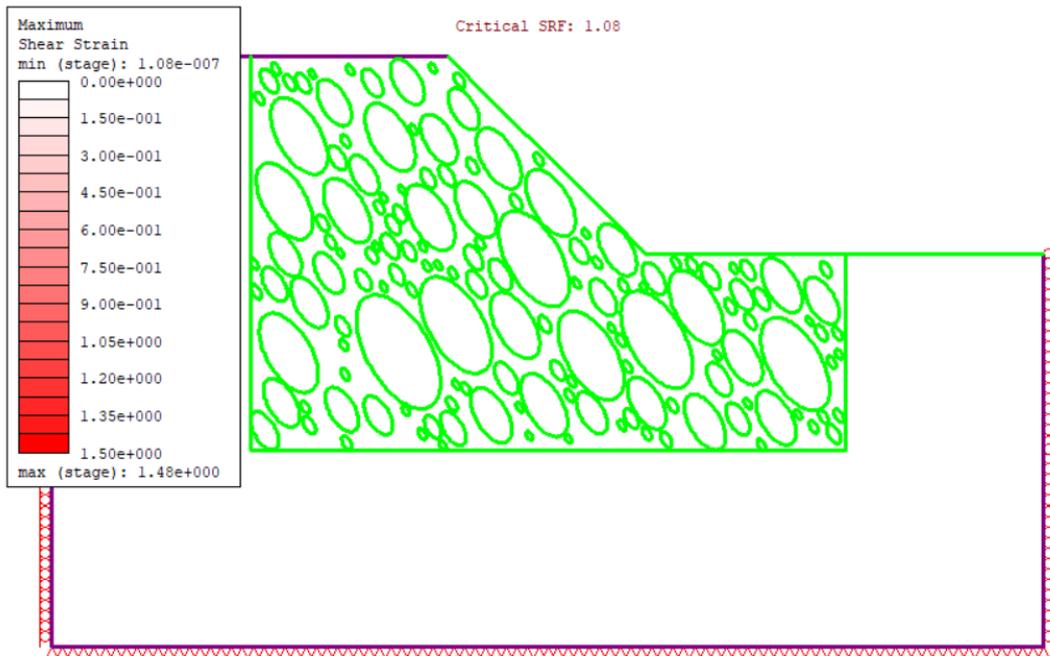
*Allegato 3.42: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=55%*



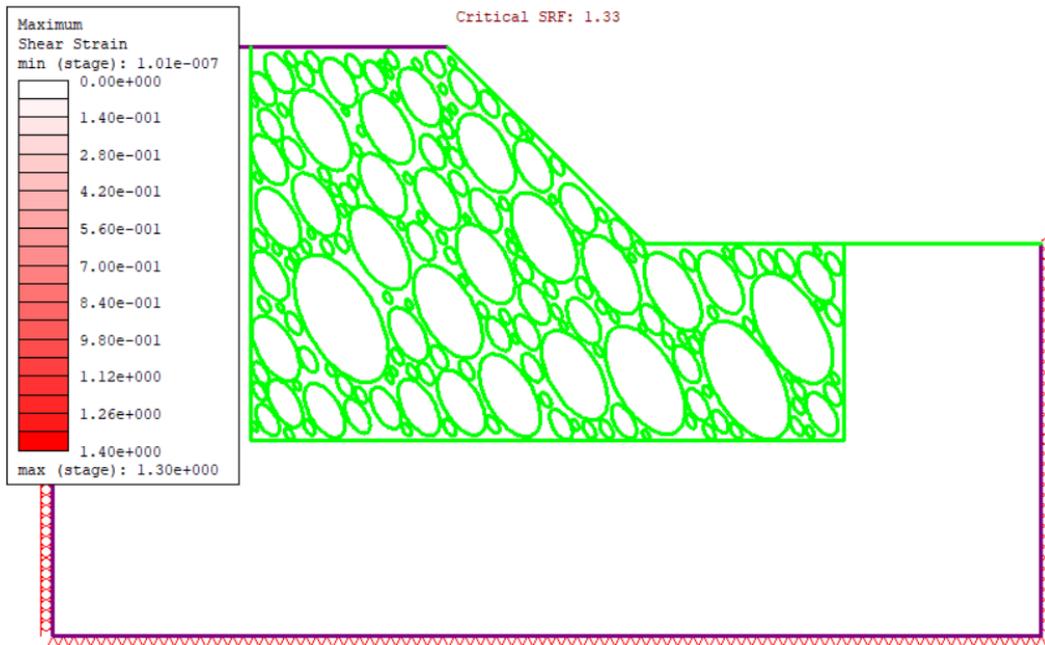
Allegato 3.43: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=55%



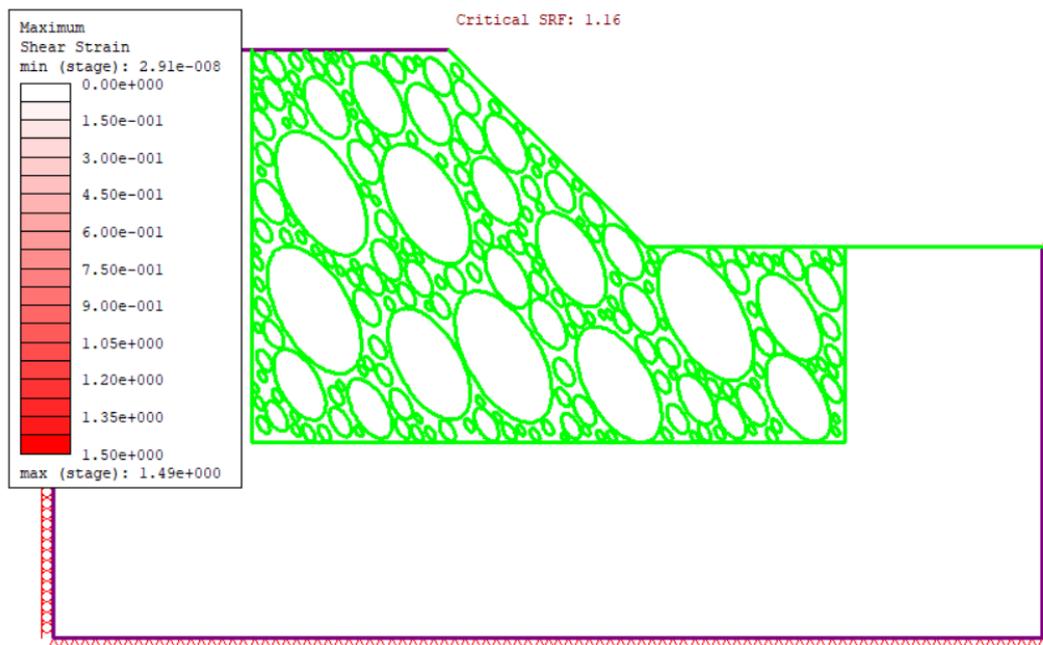
Allegato 3.44: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=55%



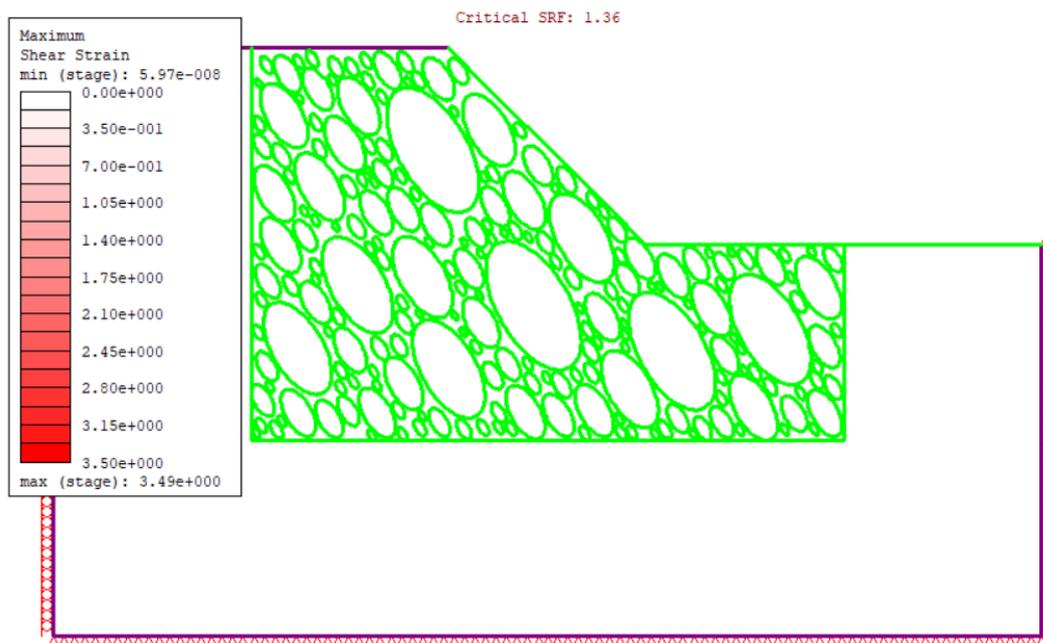
Allegato 3.45: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=55%



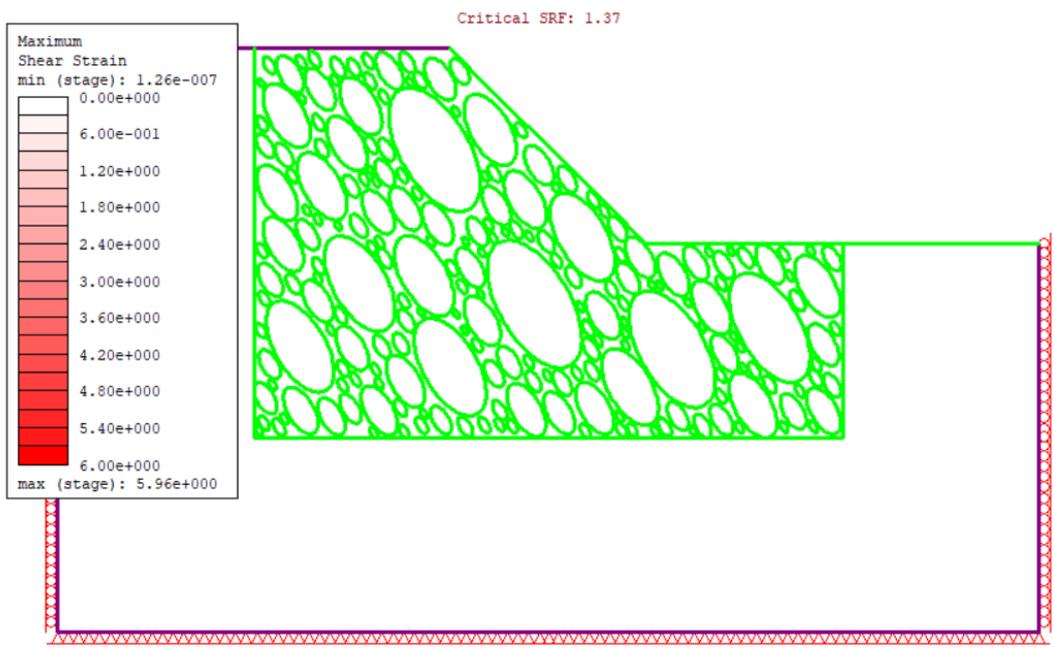
Allegato 3.46: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=70%



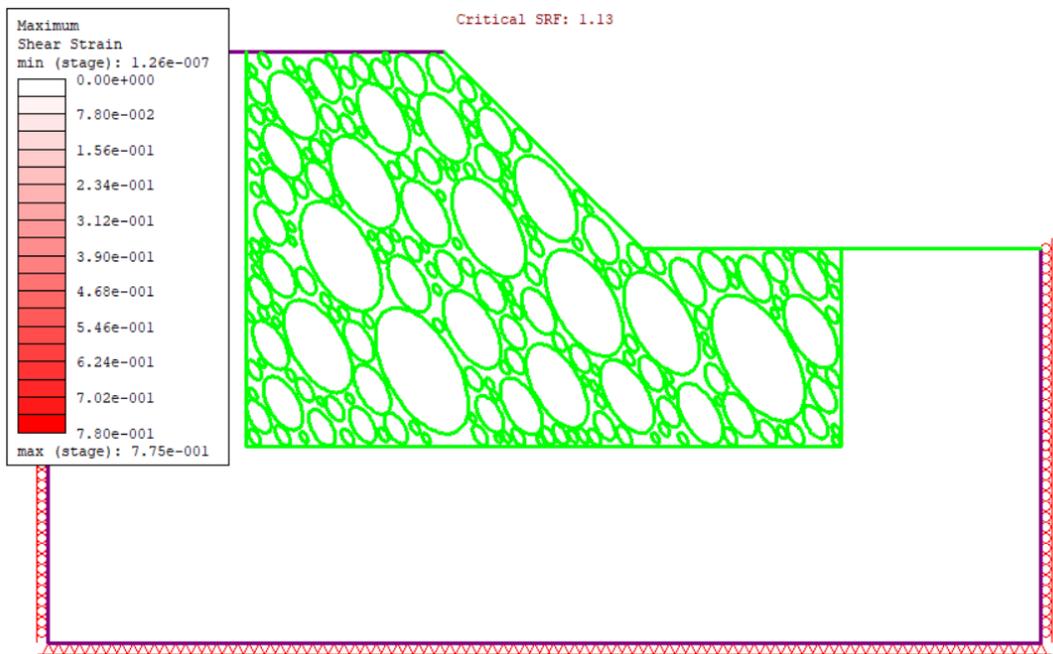
*Allegato 3.47: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=70%*



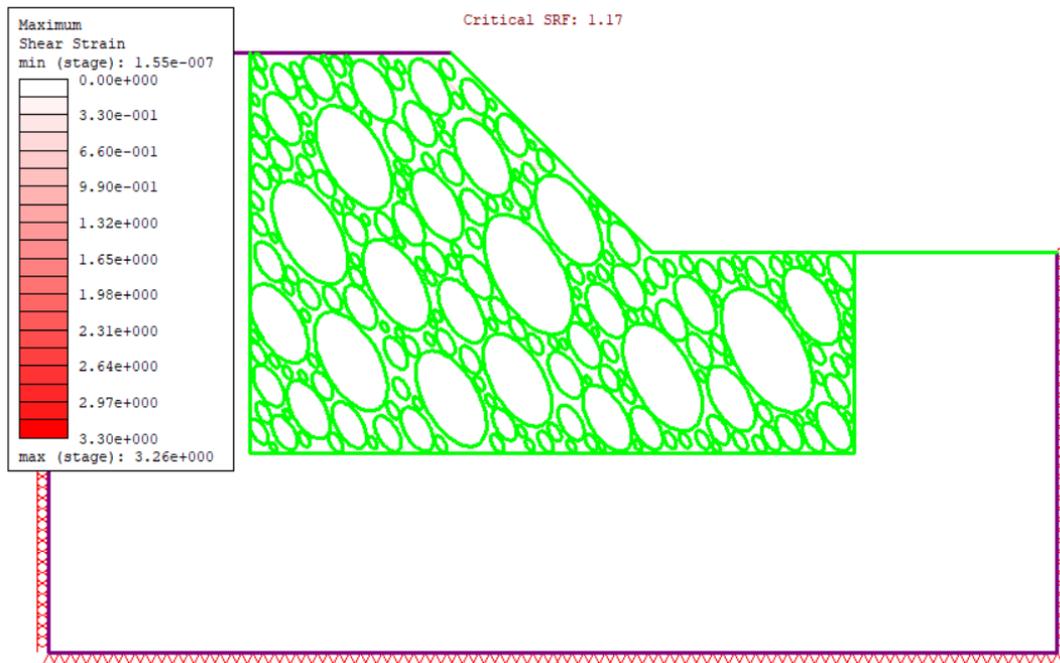
*Allegato 3.48: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=70%*



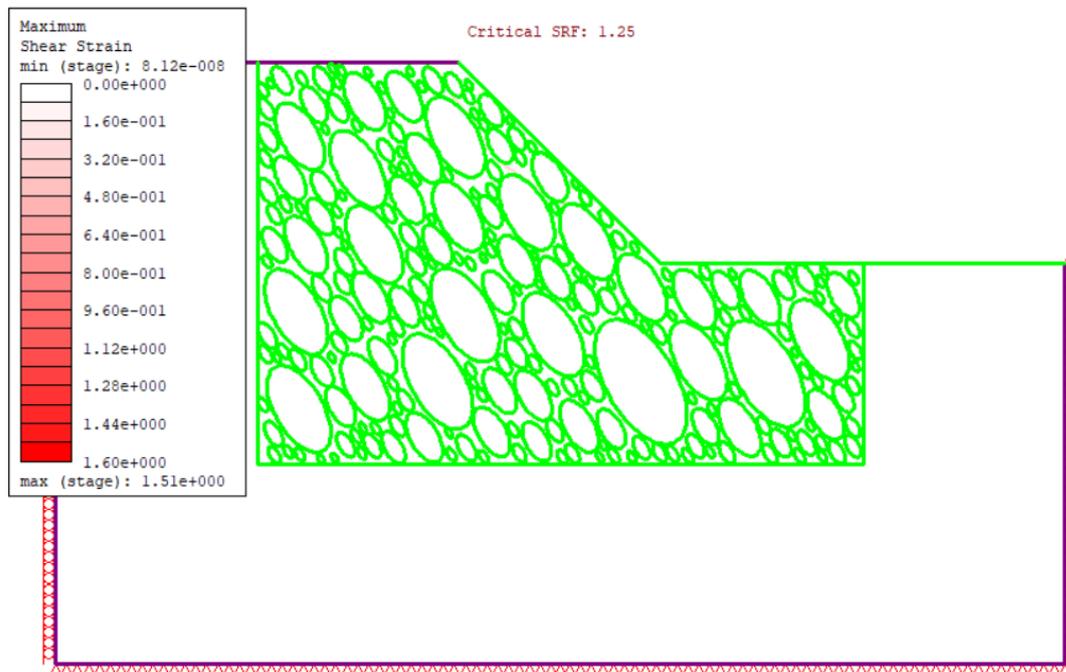
*Allegato 3.49: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=70%*



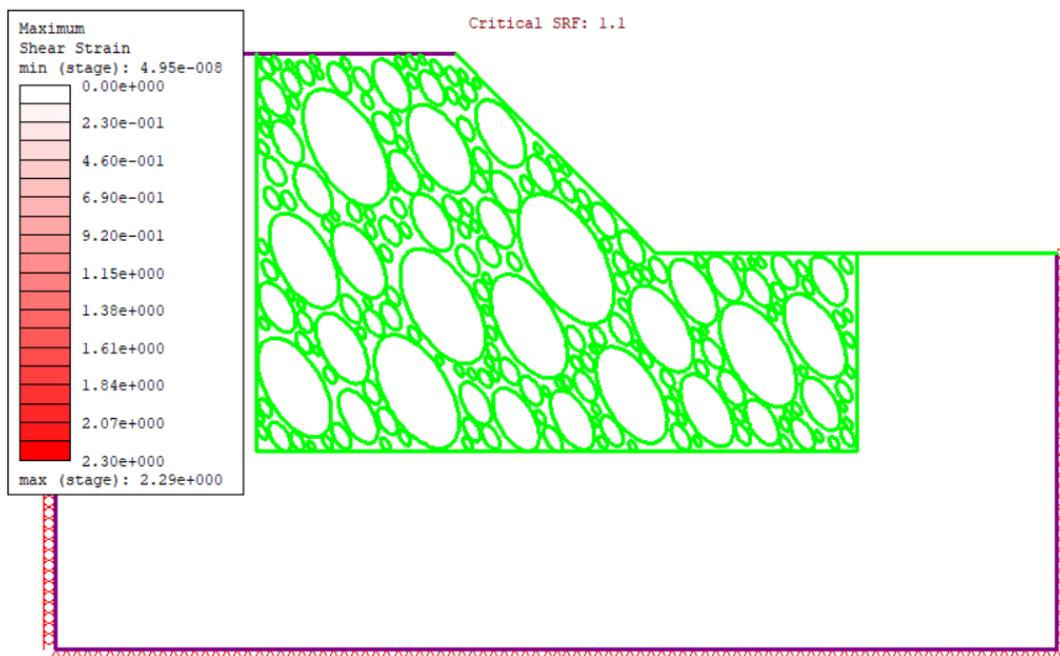
*Allegato 3.50: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=70%*



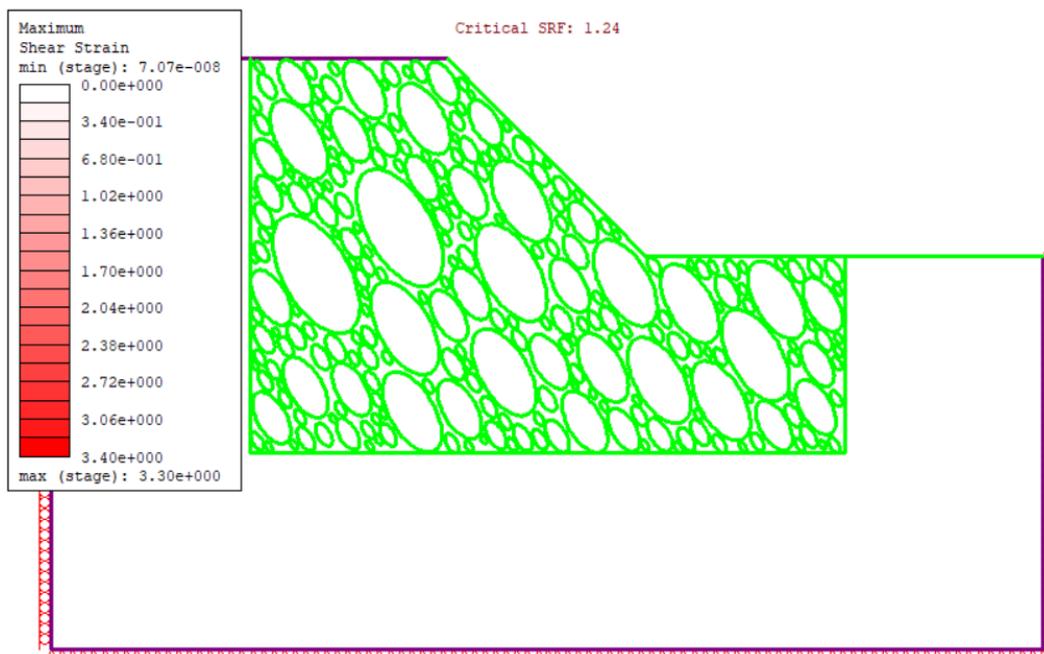
*Allegato 3.51: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=70%*



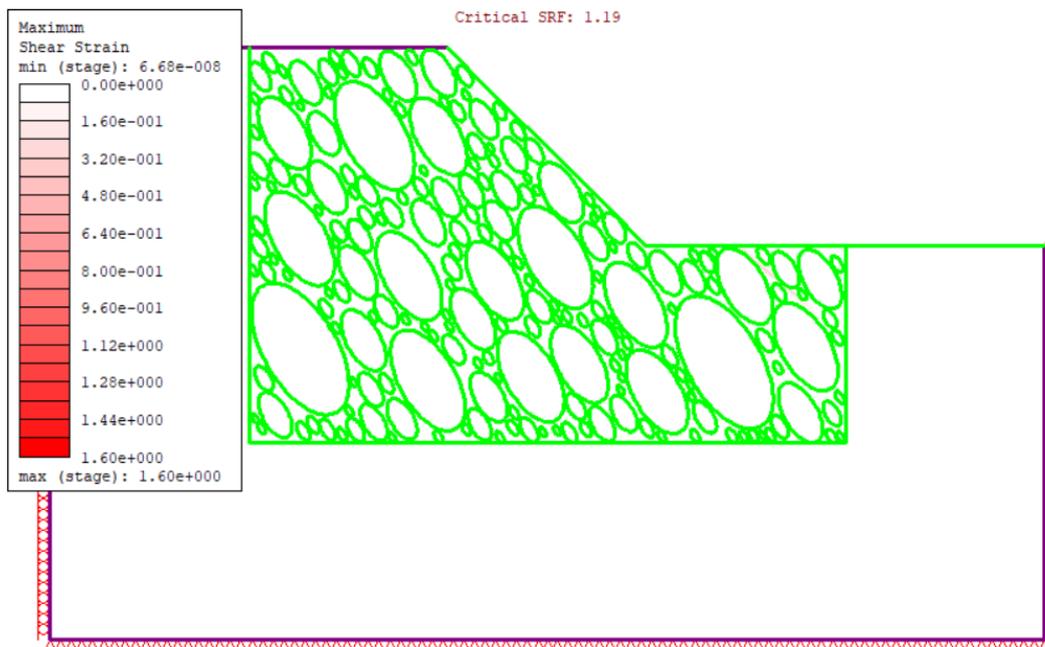
*Allegato 3.52: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=70%*



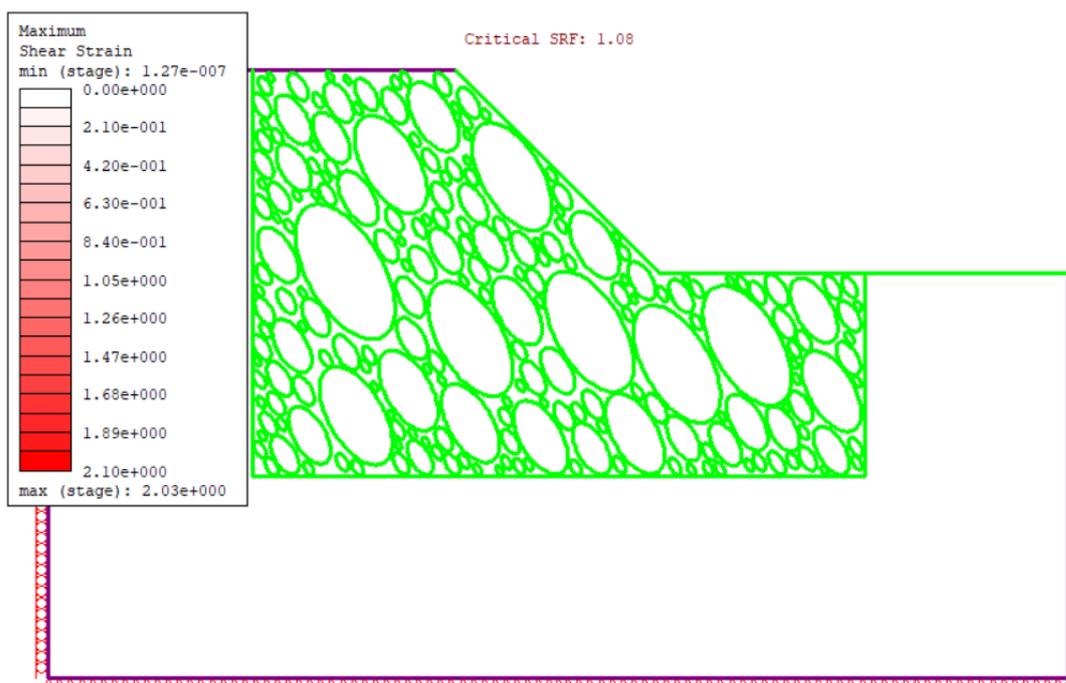
Allegato 3.53: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=70%



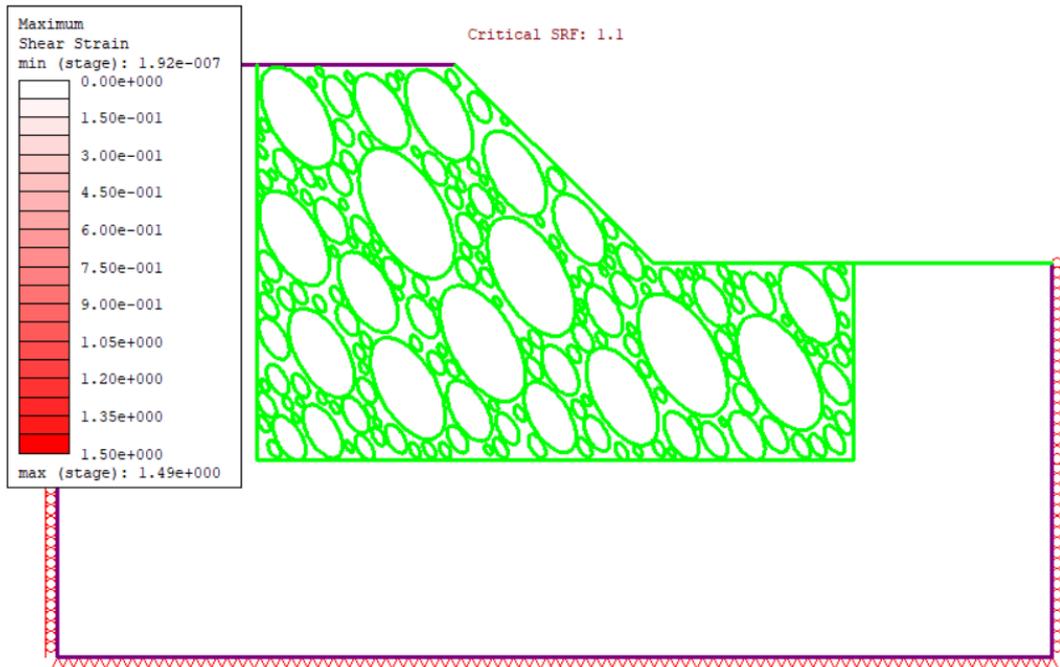
Allegato 3.54: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=70%



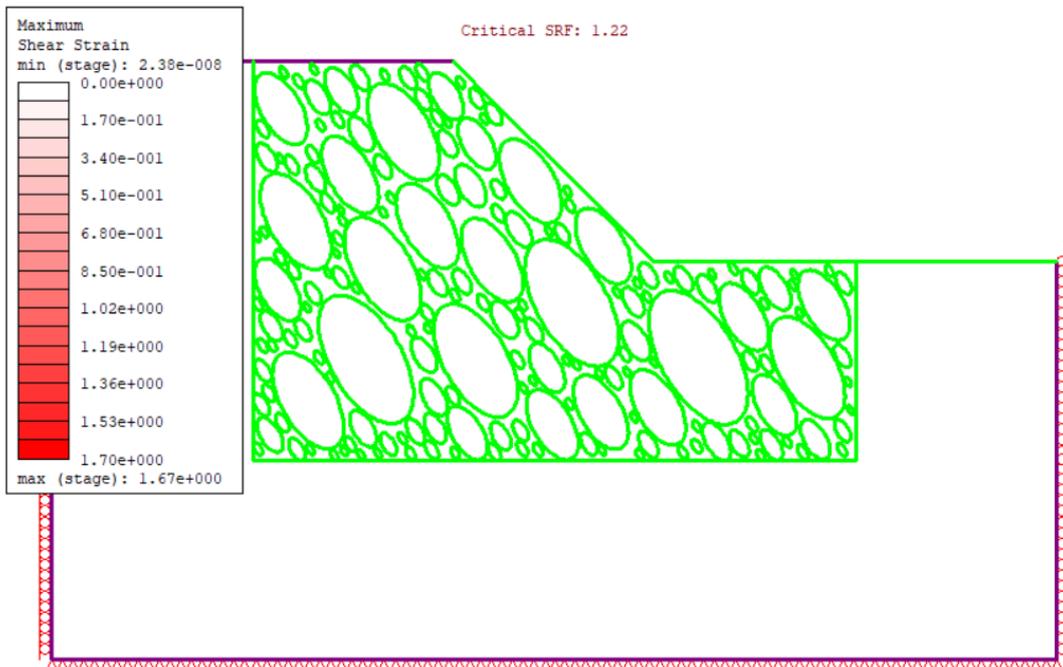
*Allegato 3.55: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=70%*



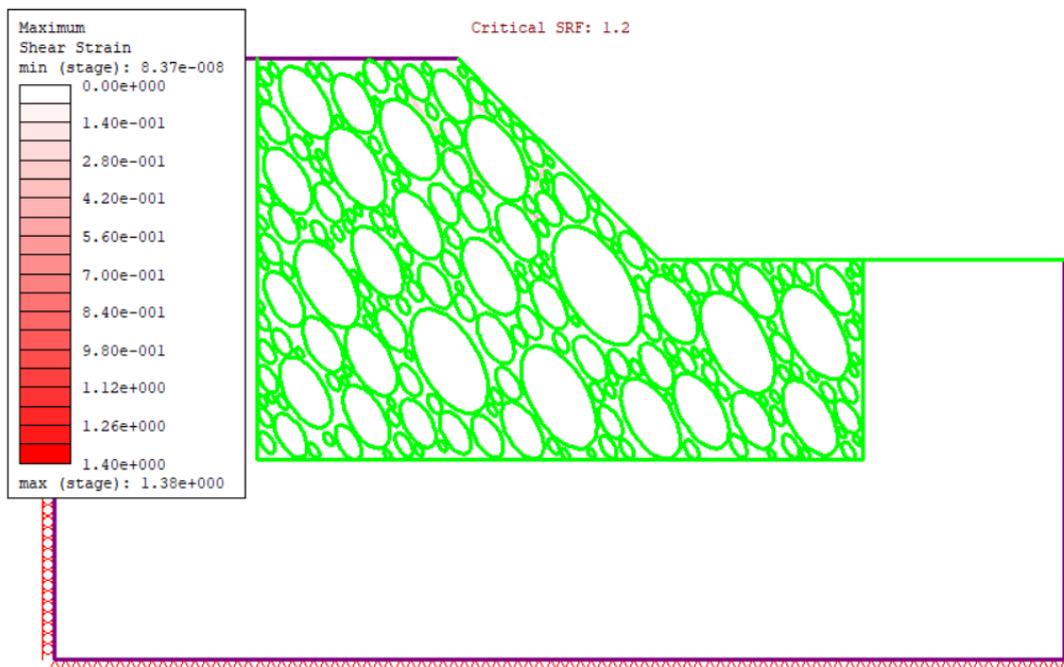
*Allegato 3.56: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=70%*



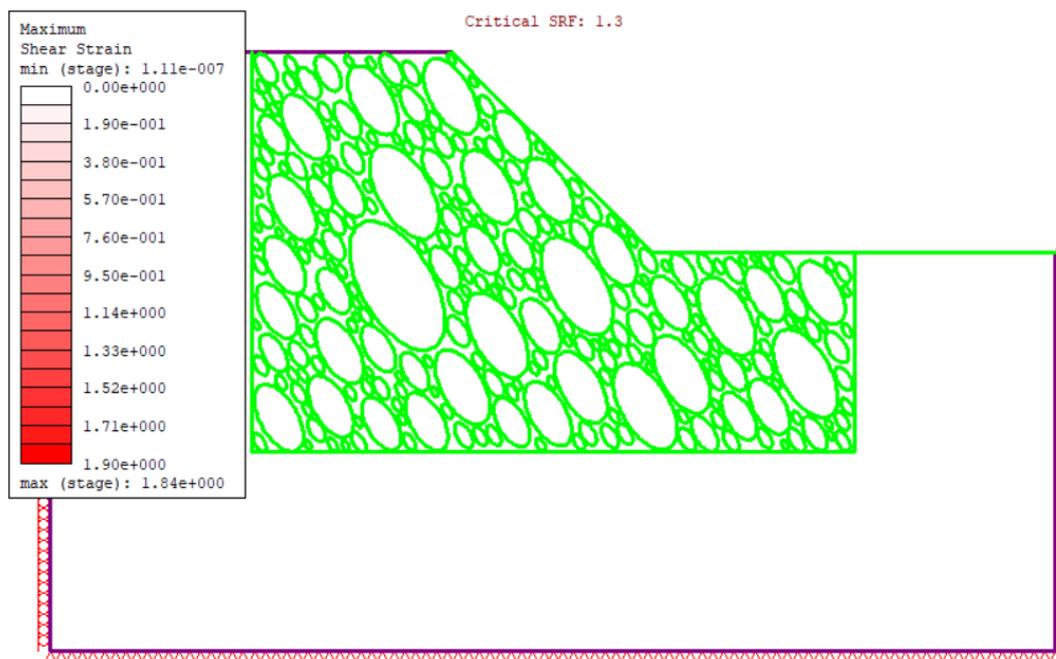
Allegato 3.57: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=70%



Allegato 3.58: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=70%

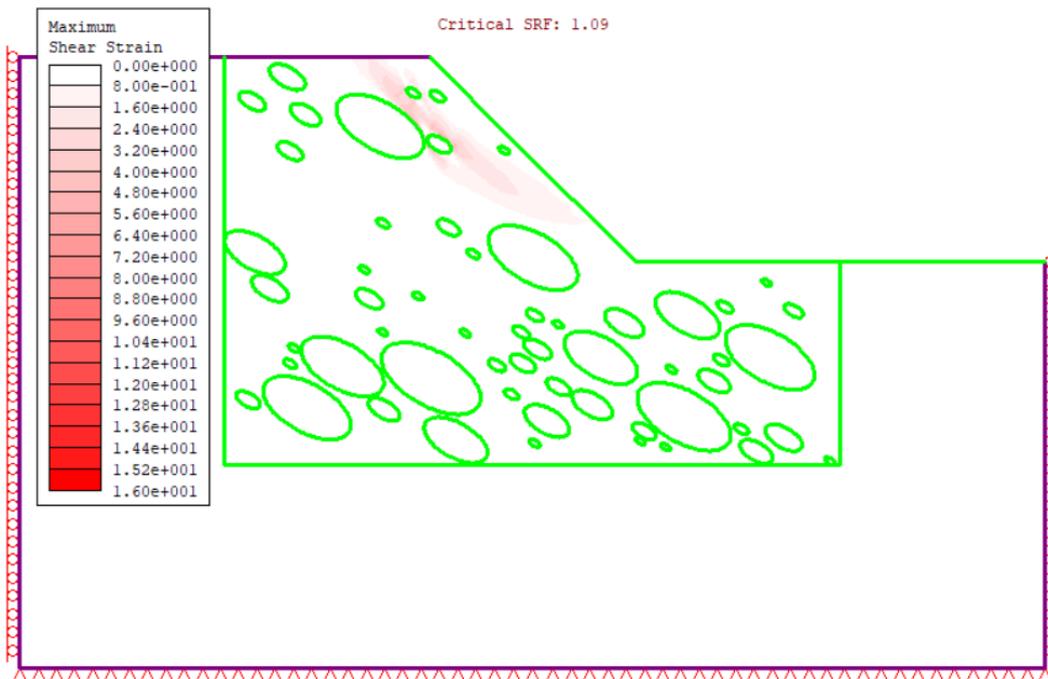


Allegato 3.59: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=70%

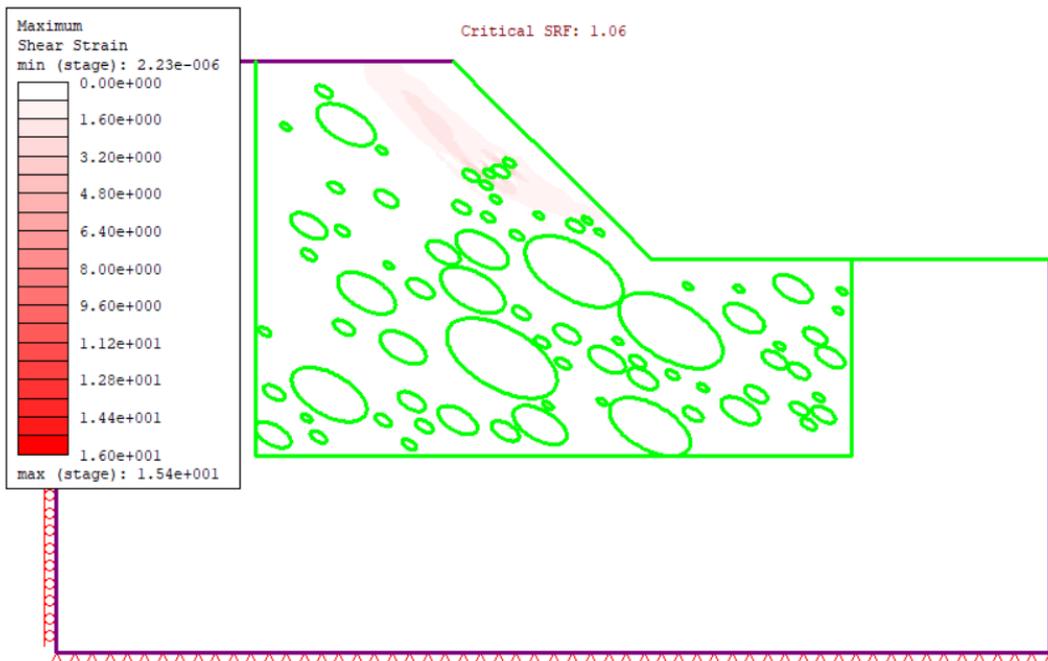


Allegato 3.60: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=70%

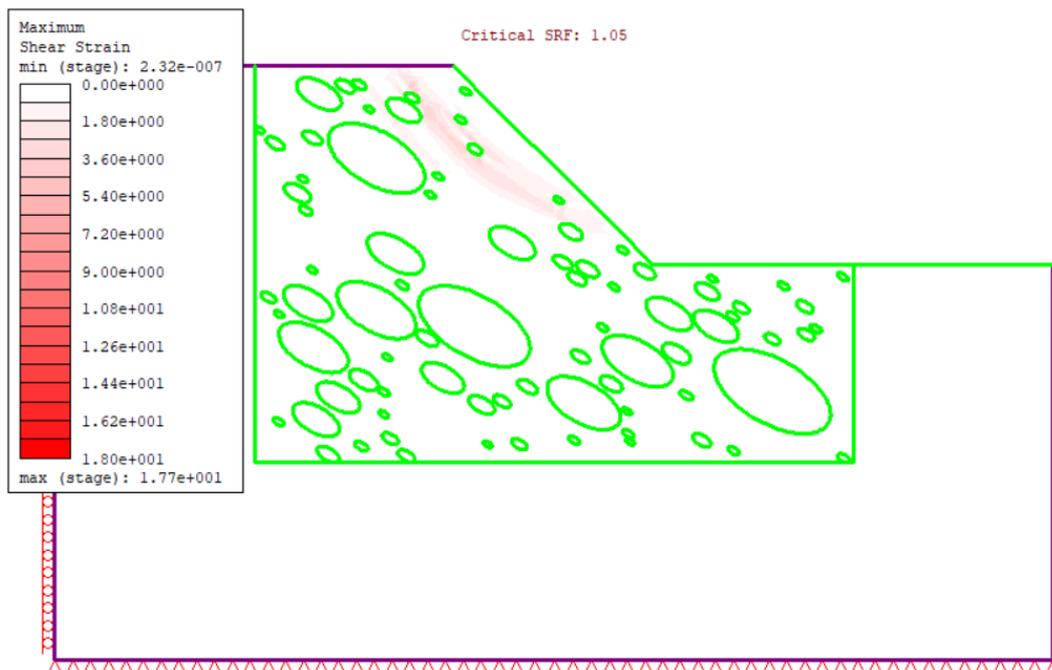
## Modelli con inclinazione dei blocchi di 30°



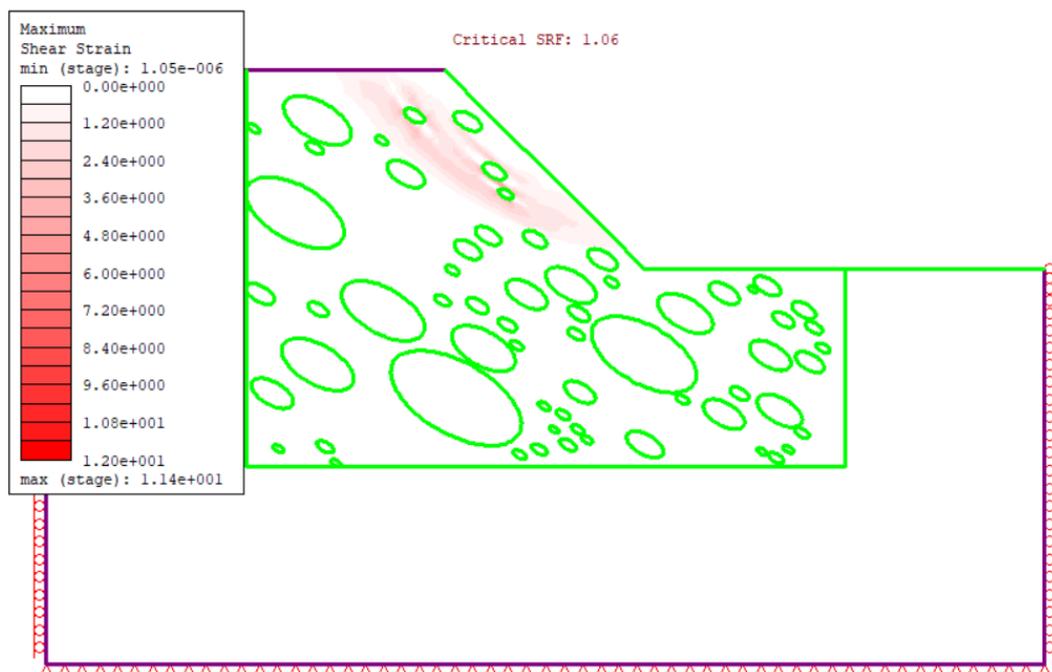
Allegato 3.61: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=25%



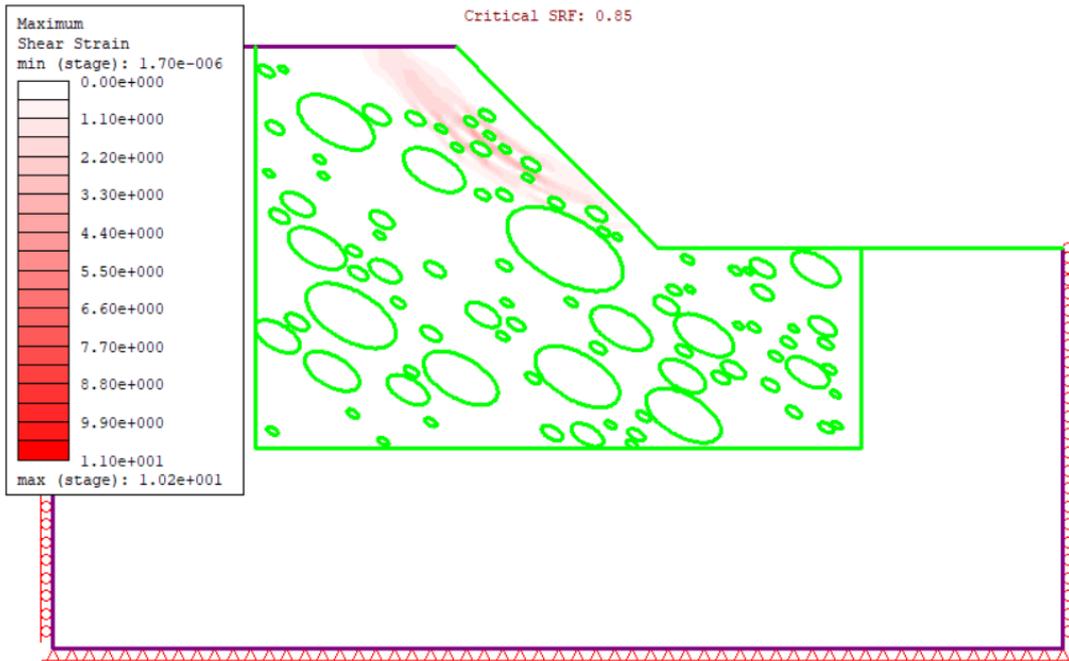
Allegato 3.62: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=25%



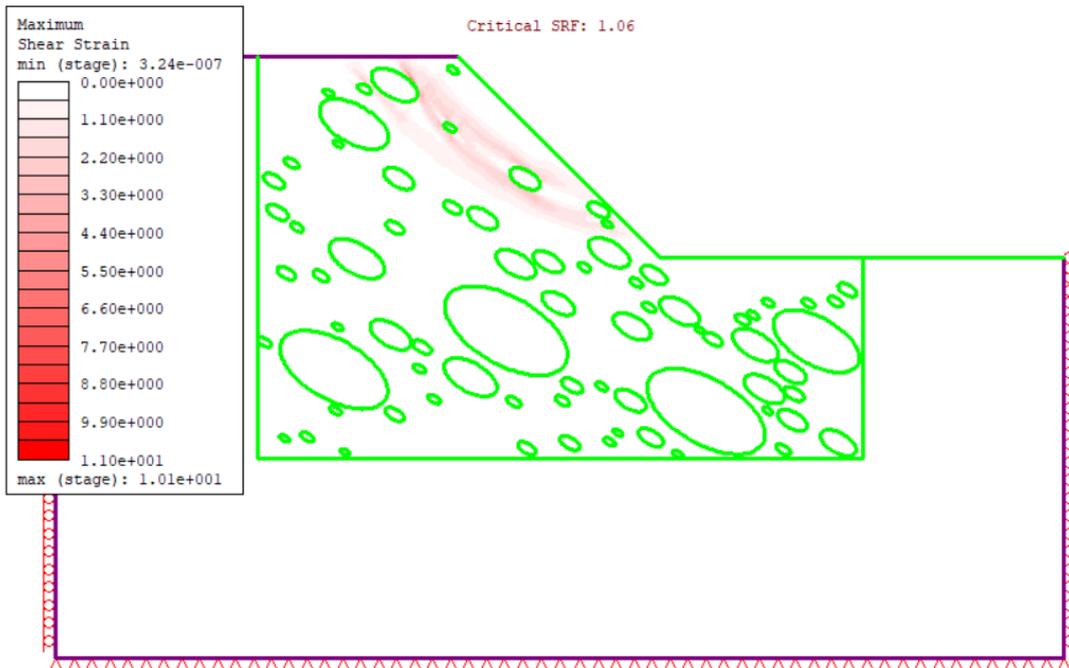
Allegato 3.63: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=25%



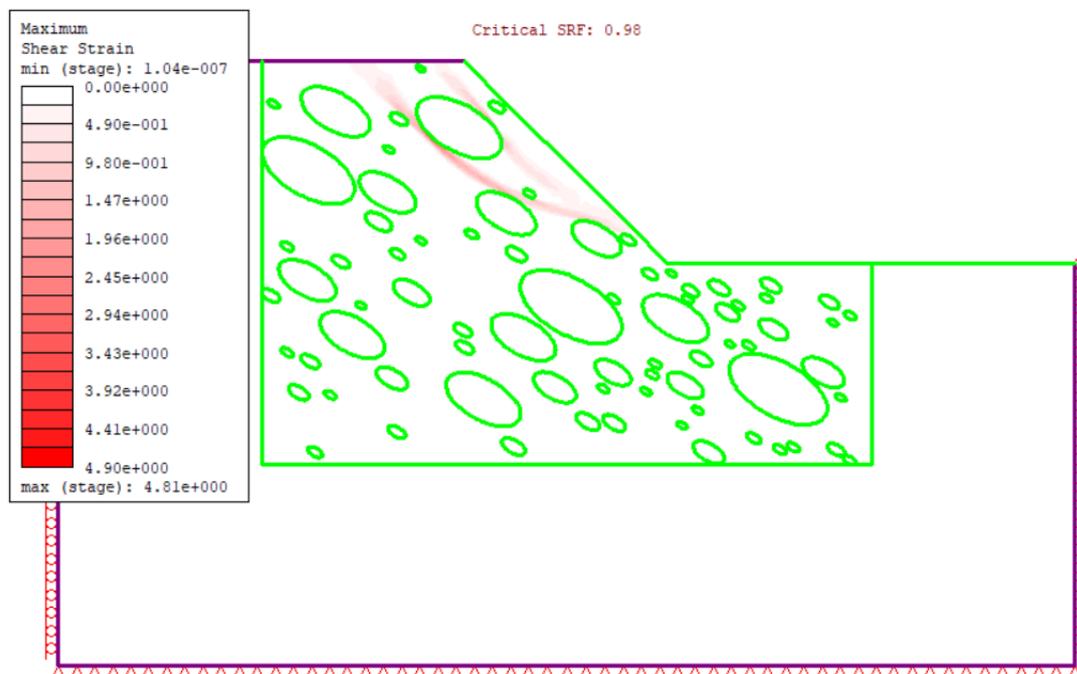
Allegato 3.64: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=25%



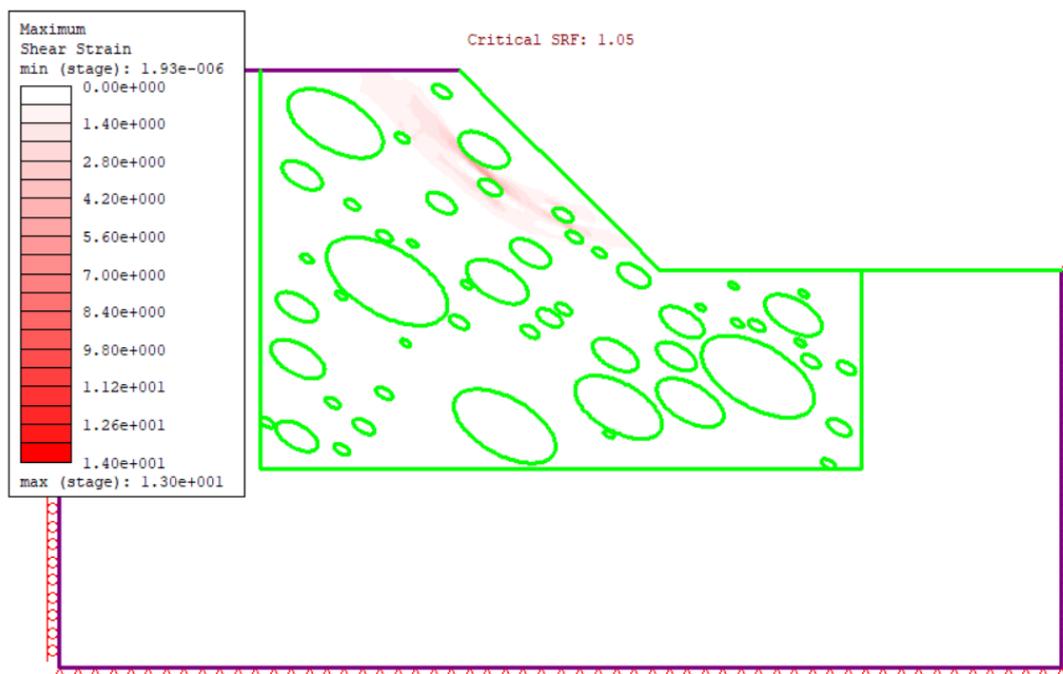
Allegato 3.65: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=25%



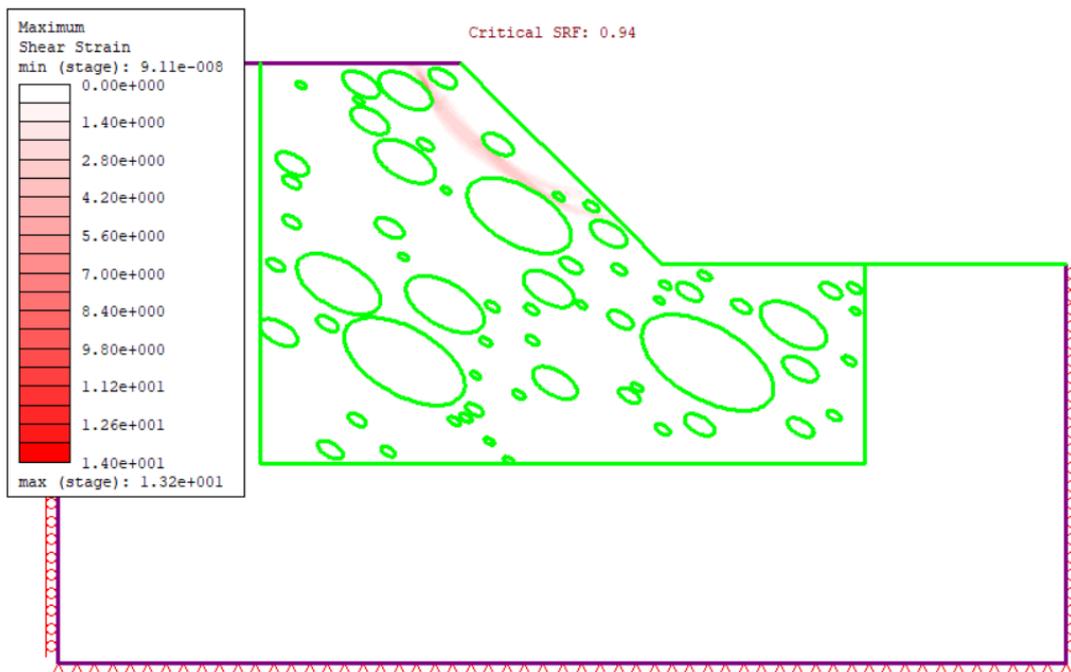
Allegato 3.66: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=25%



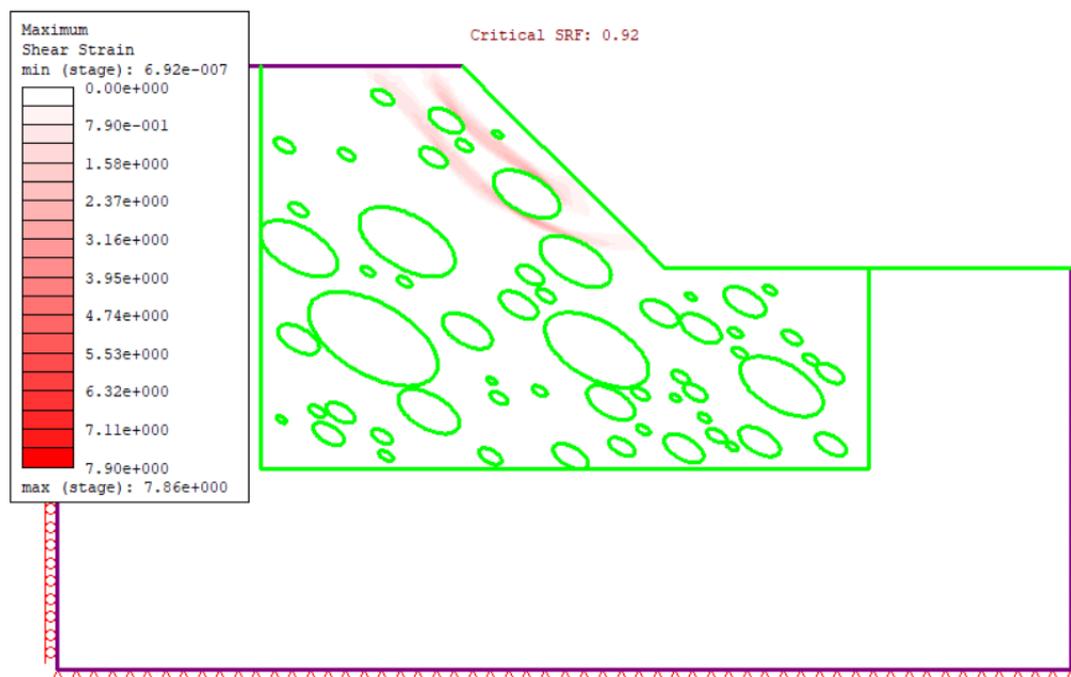
*Allegato 3.67: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=25%*



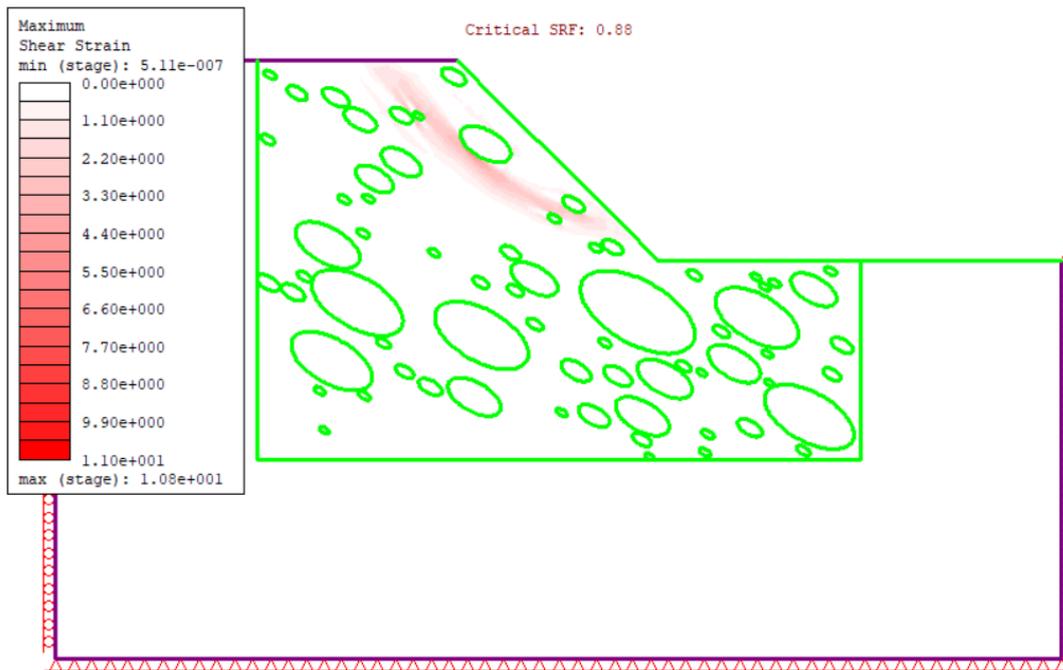
*Allegato 3.68: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=25%*



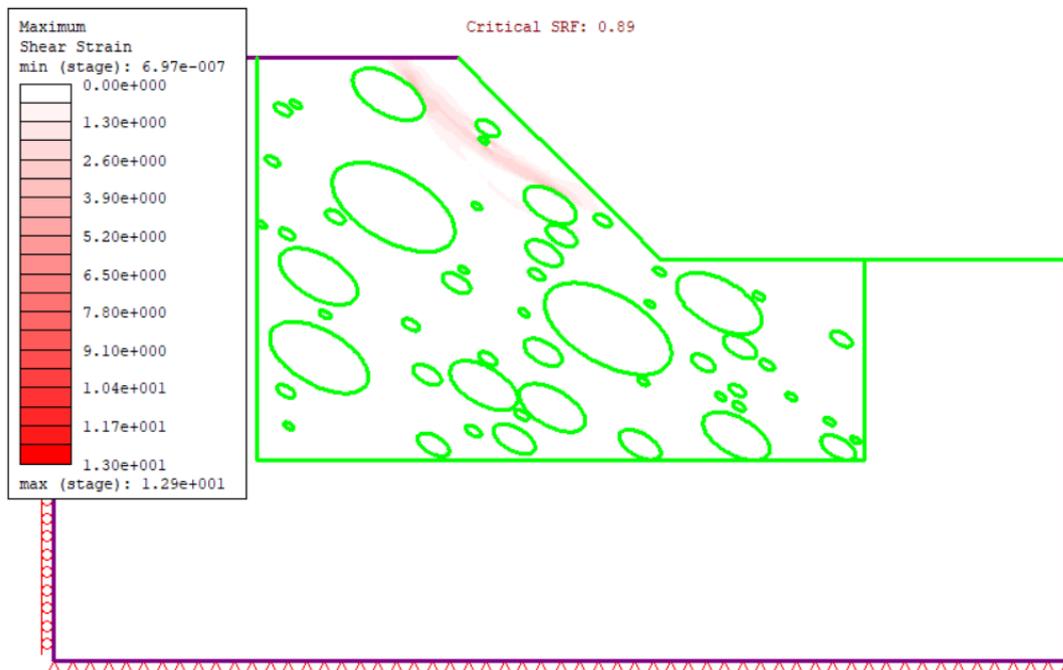
Allegato 3.69: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=25%



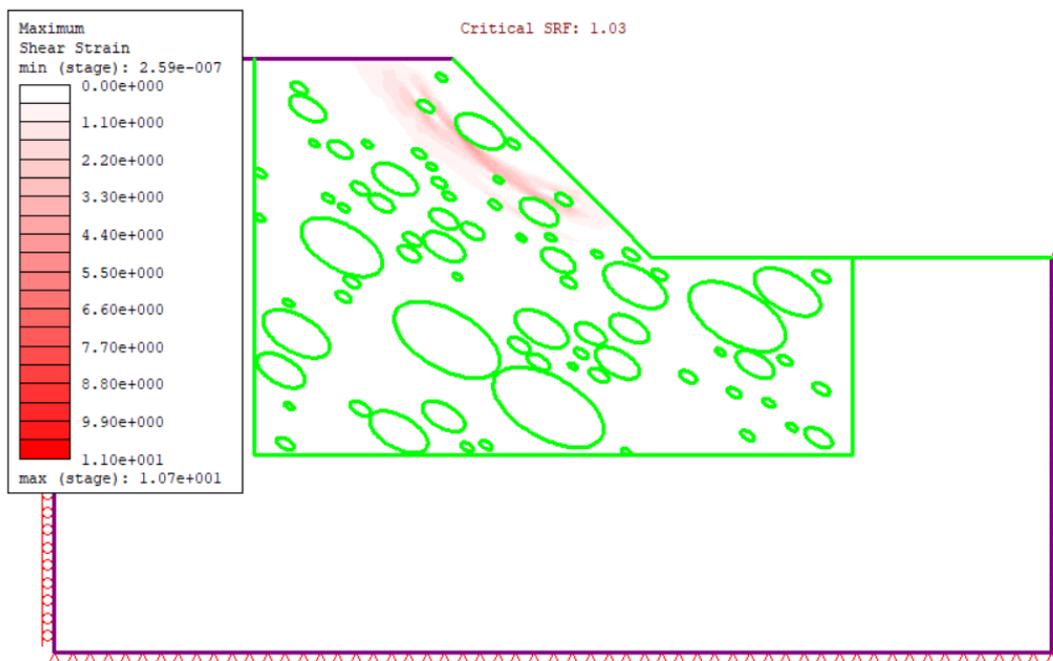
Allegato 3.70: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=25%



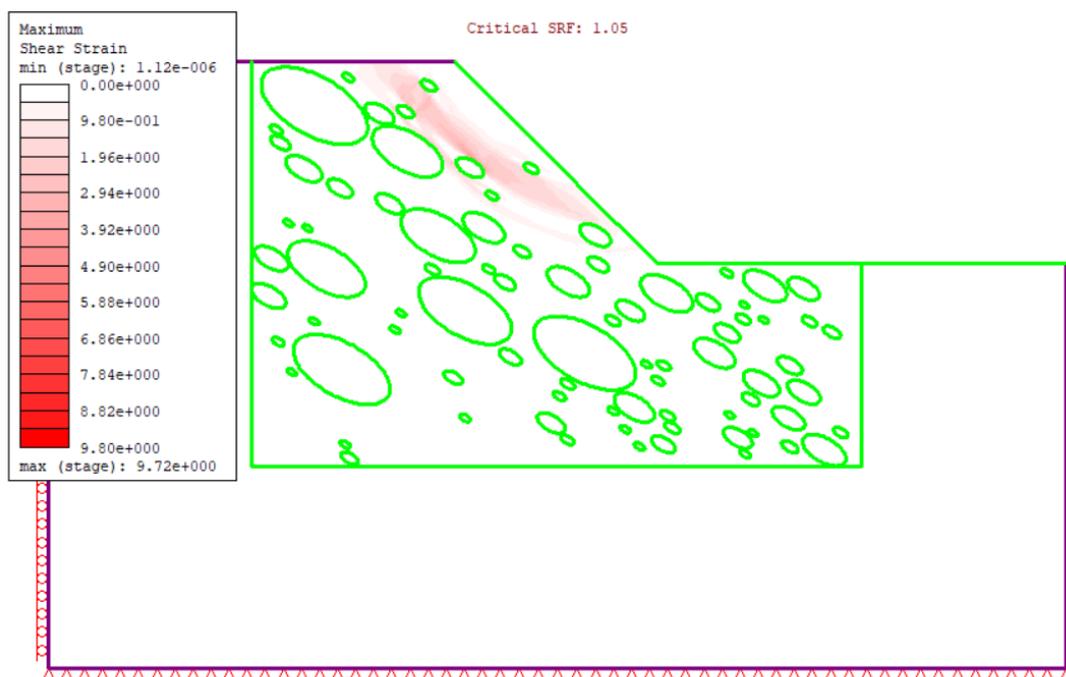
Allegato 3.71: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=25%



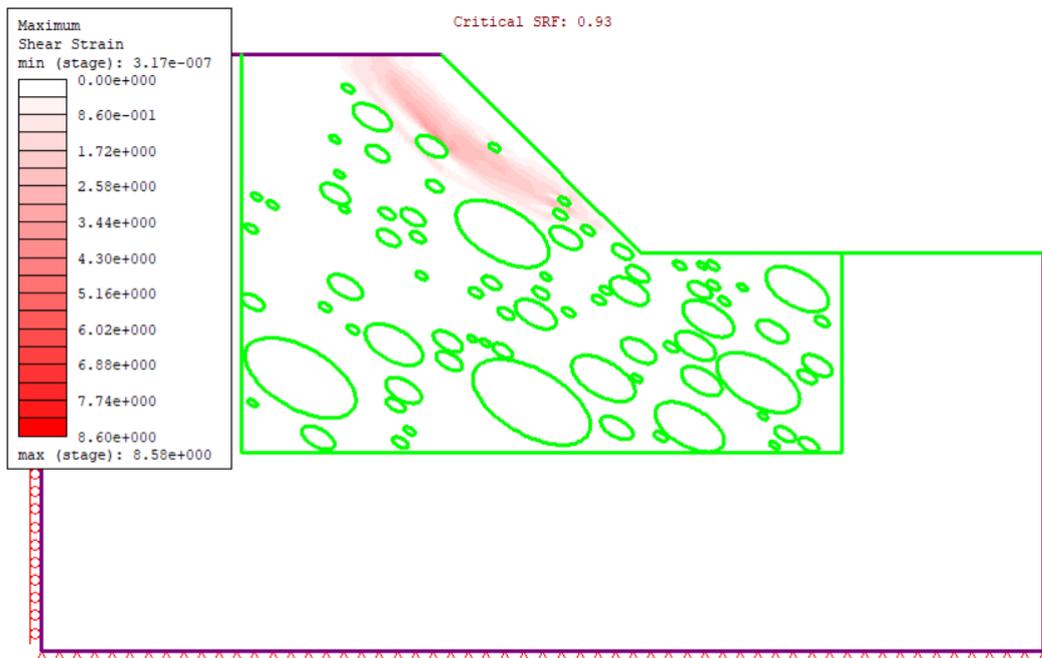
Allegato 3.72: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=25%



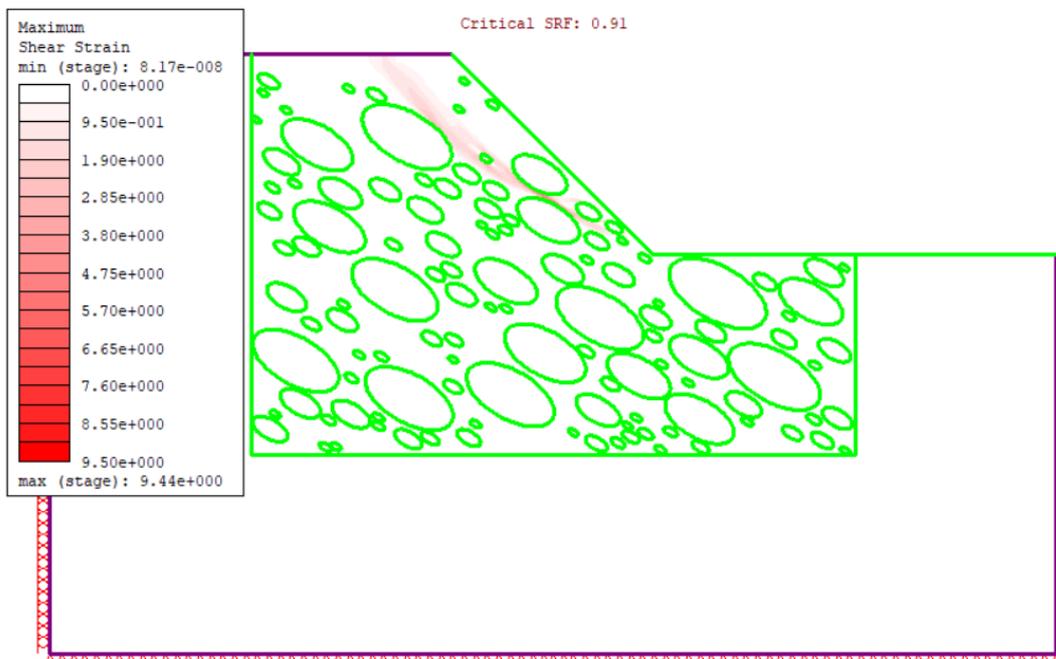
Allegato 3.73: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=25%



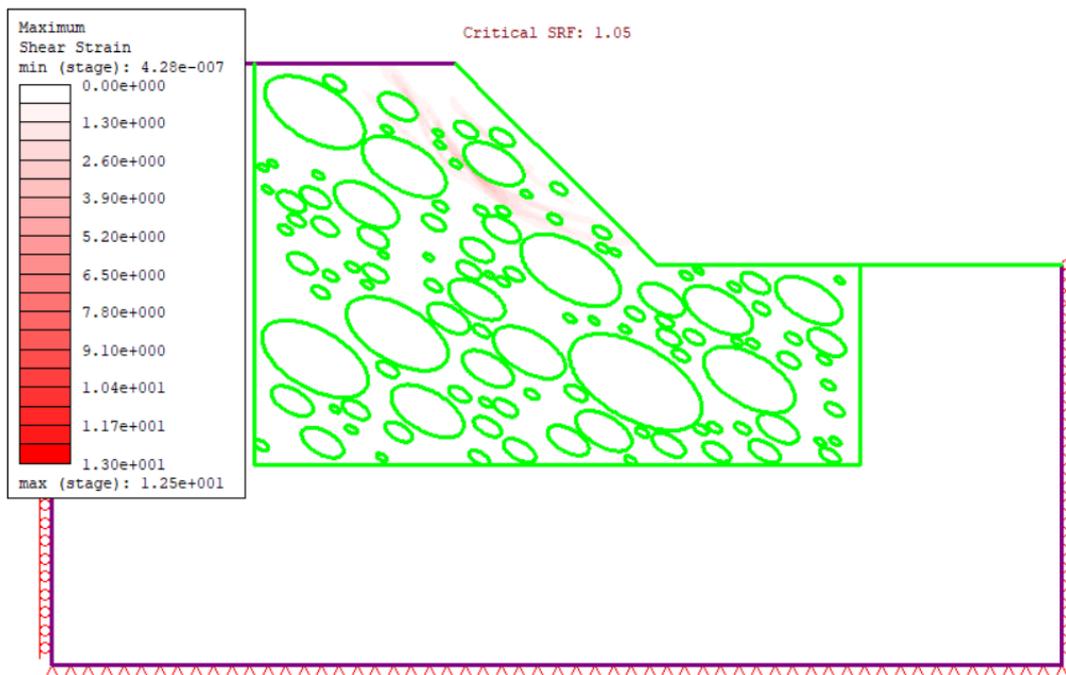
Allegato 3.74: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=25%



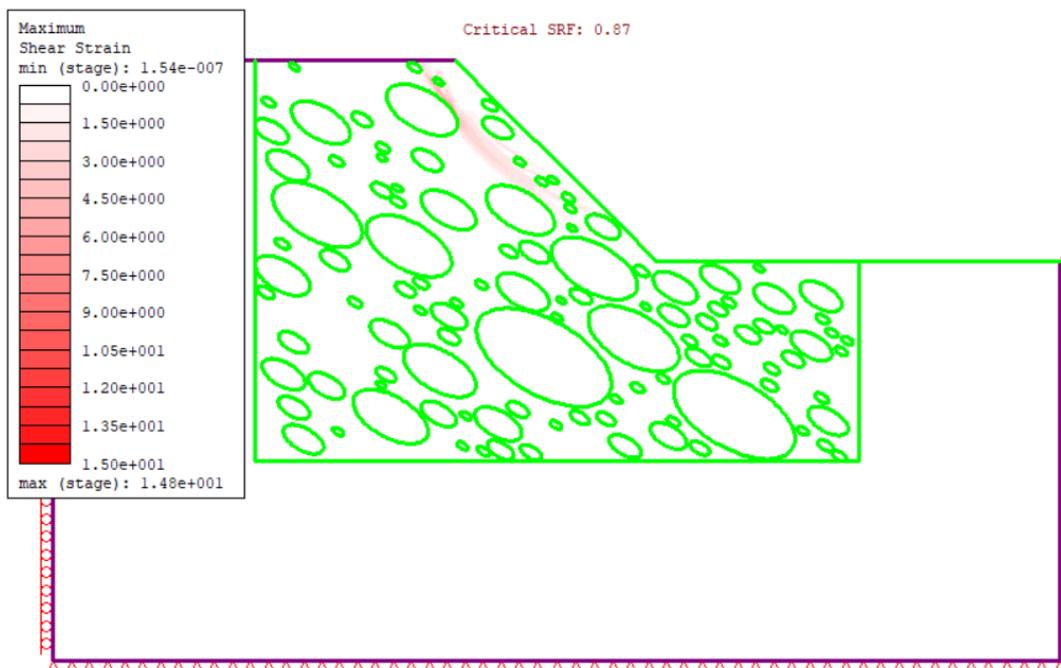
Allegato 3.75: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=25%



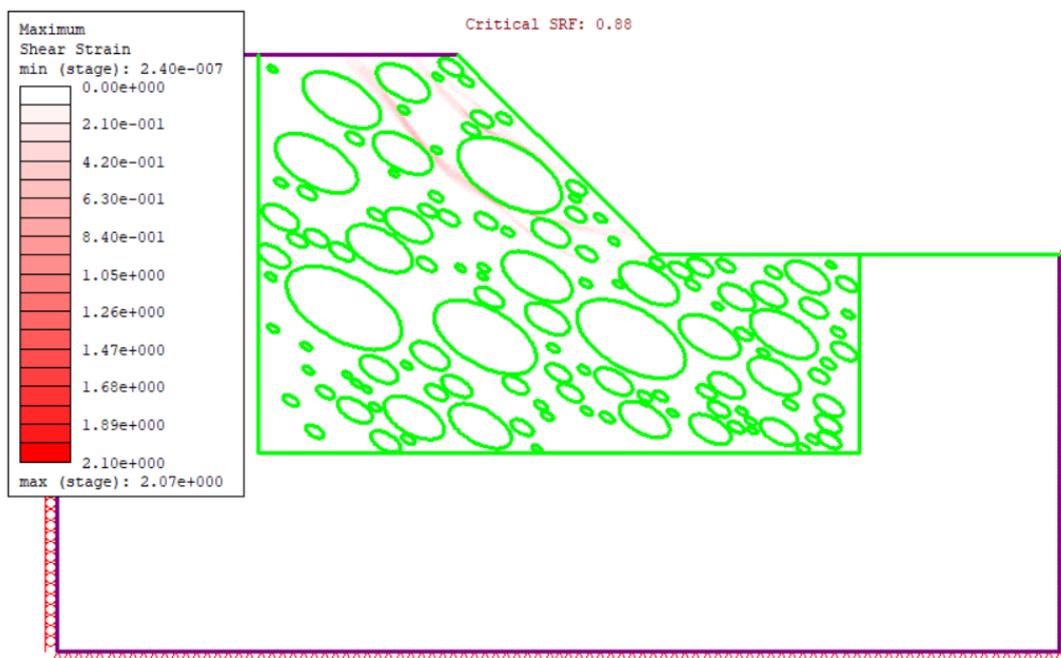
Allegato 3.76: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=40%



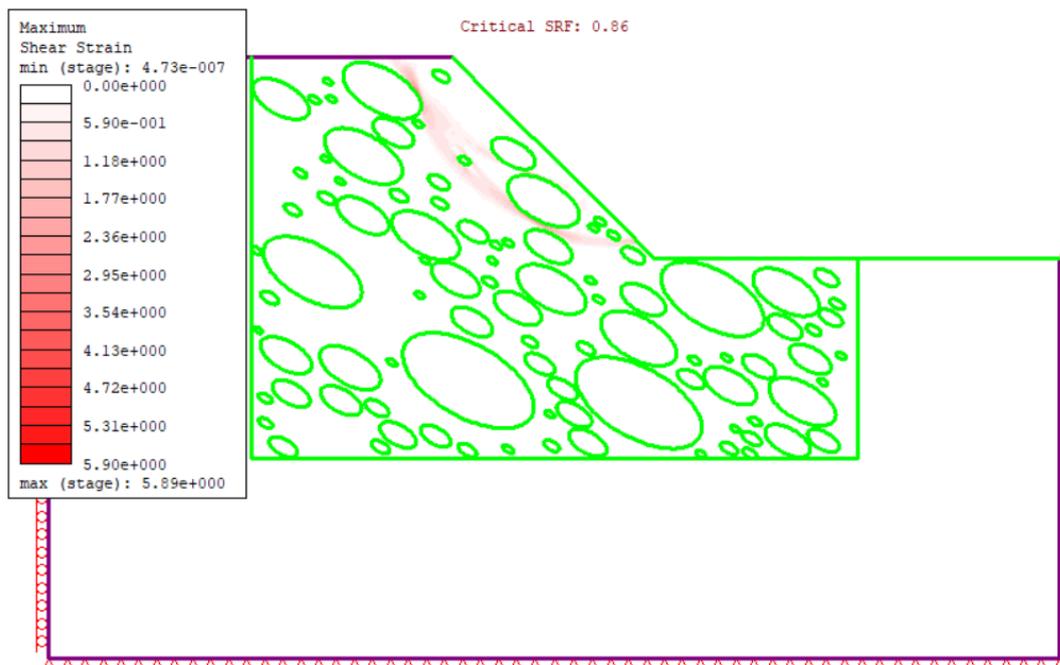
Allegato 3.77: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=40%



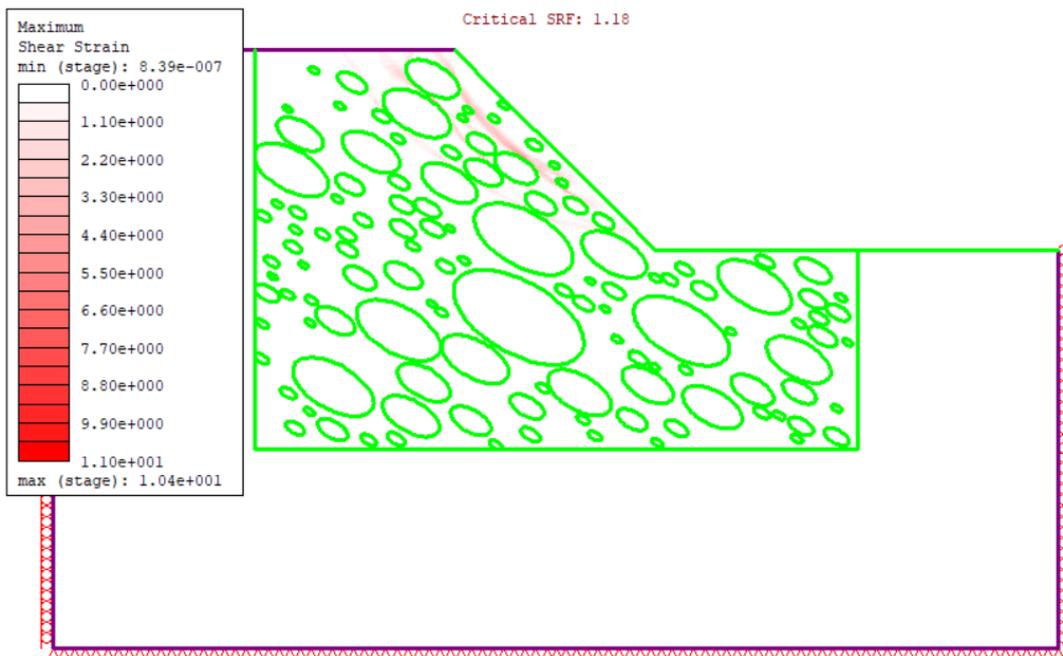
Allegato 3.78: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=40%



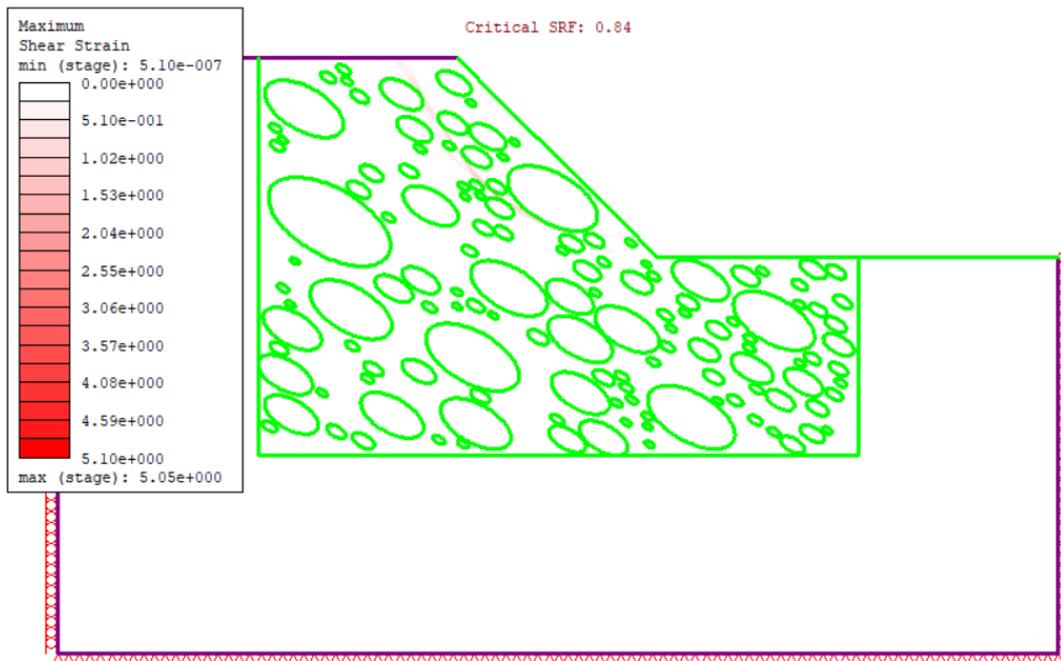
Allegato 3.79: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=40%



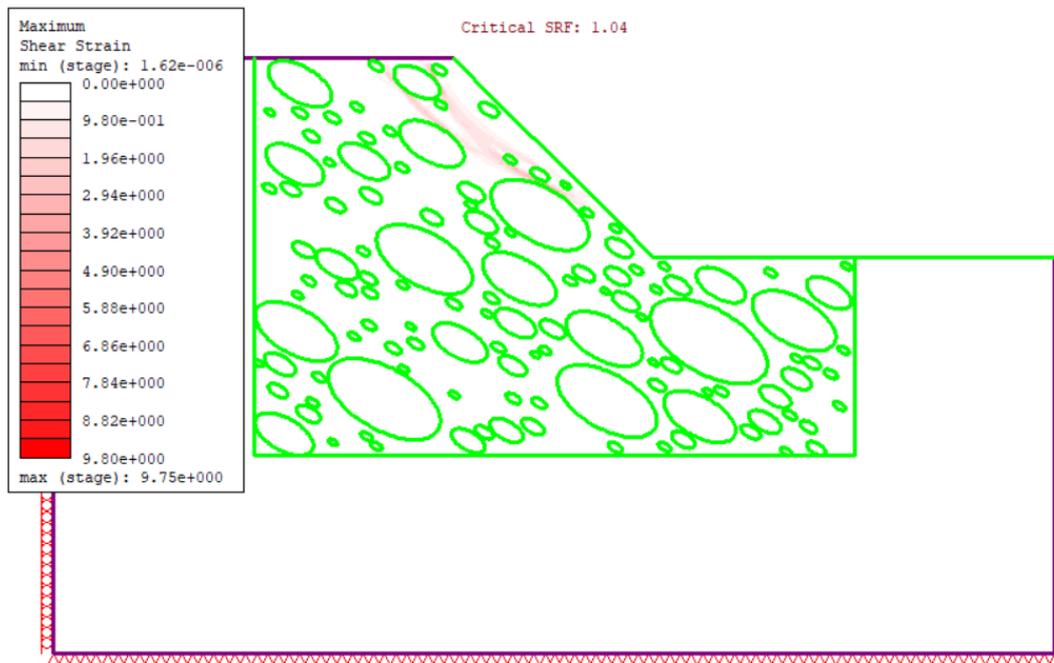
Allegato 3.80: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=40%



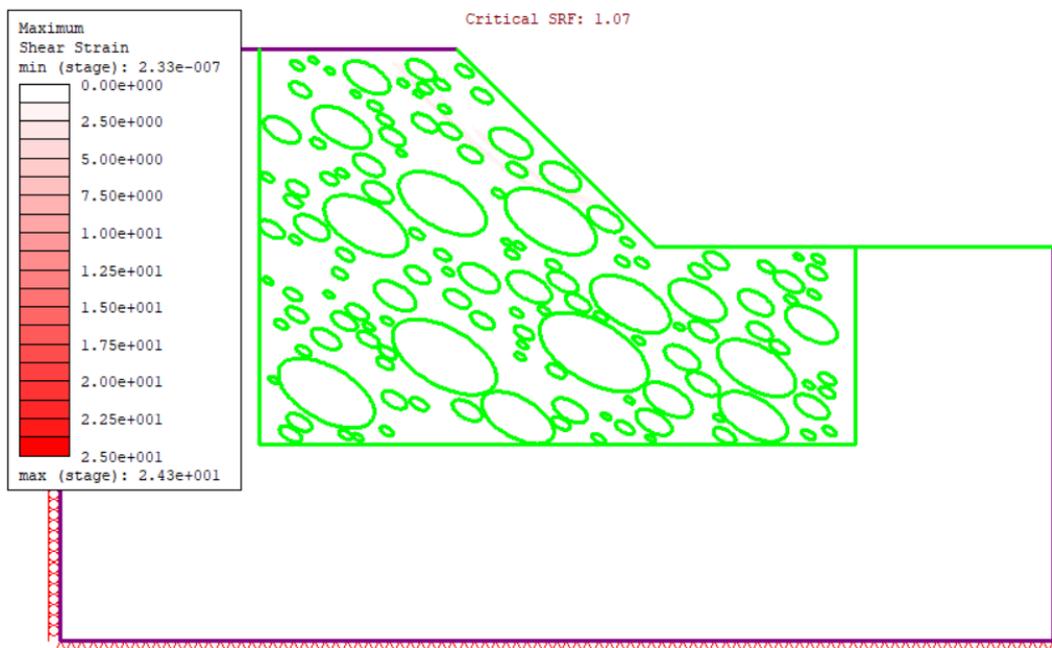
Allegato 3.81: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=40%



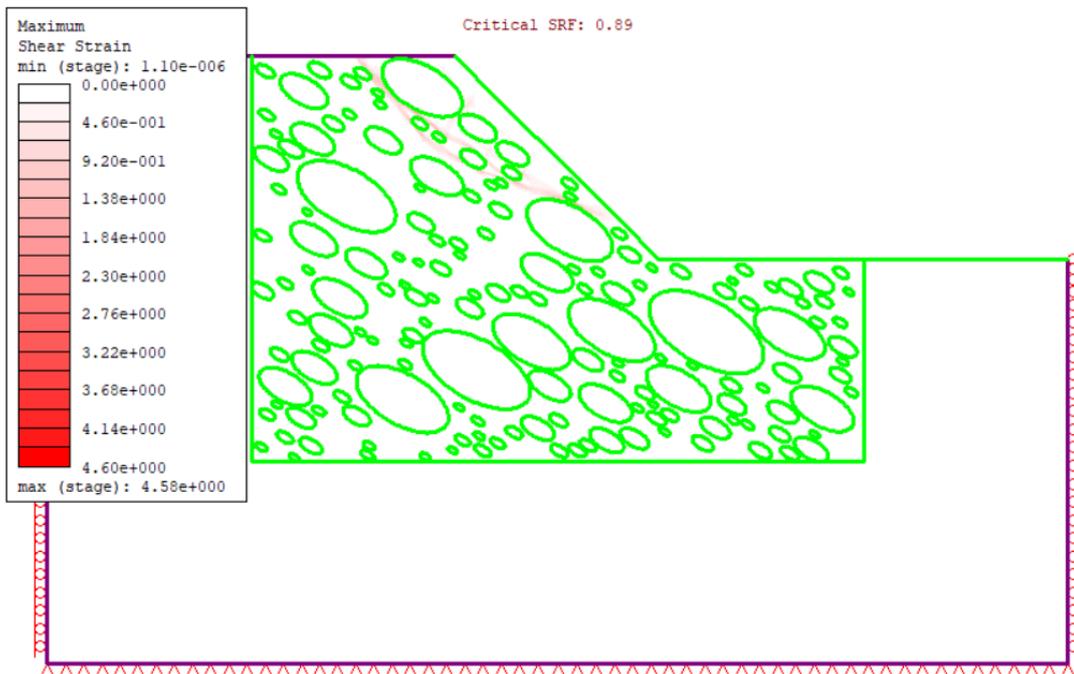
Allegato 3.82: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=40%



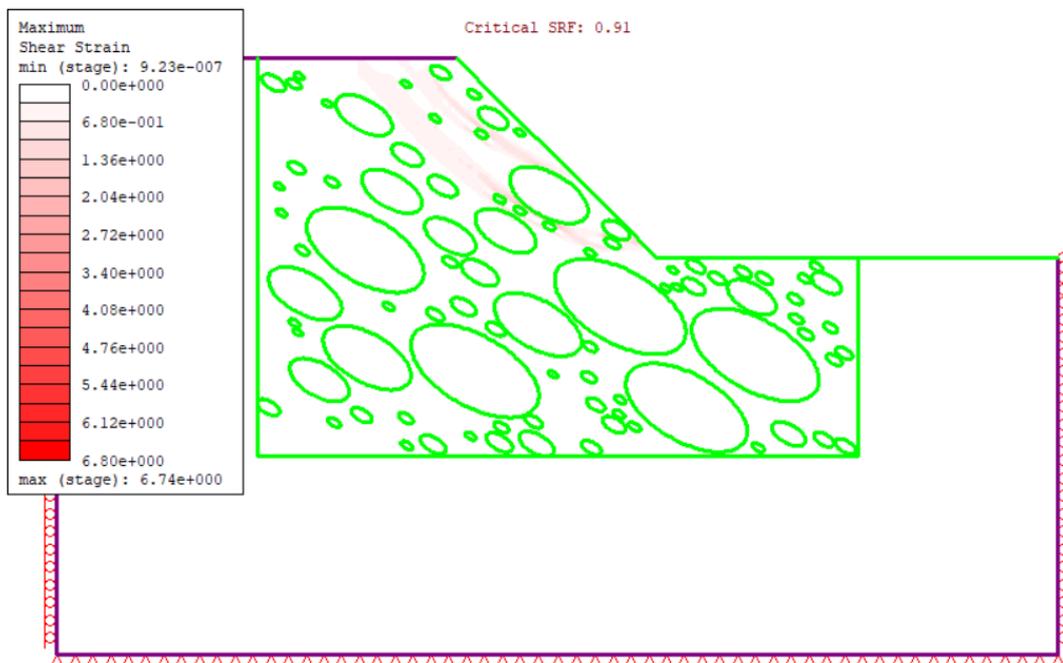
Allegato 3.83: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=40%



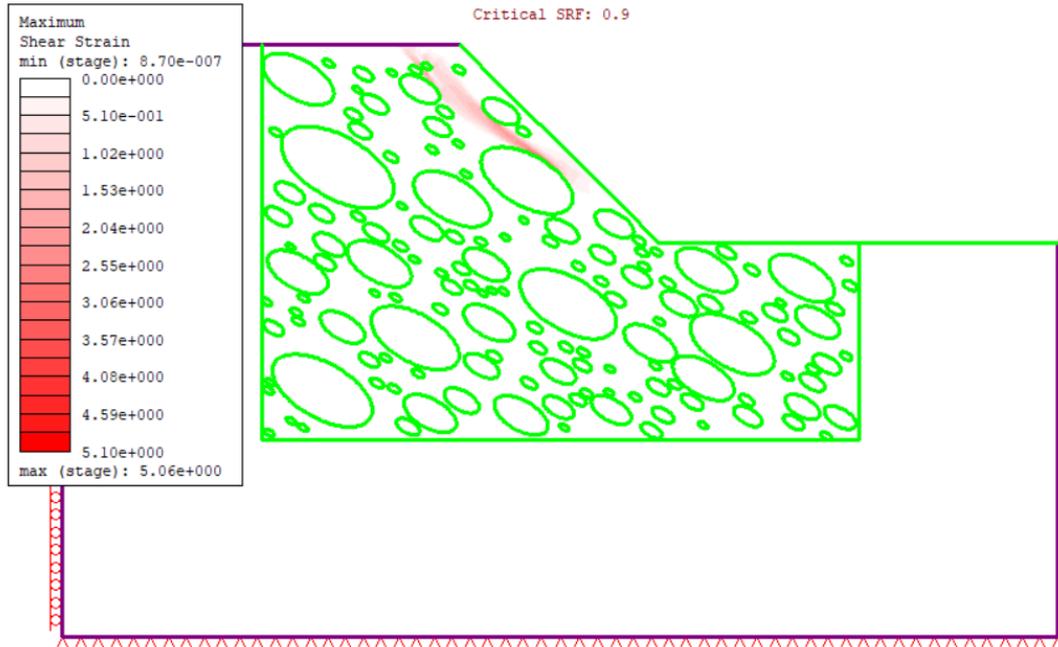
Allegato 3.84: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=40%



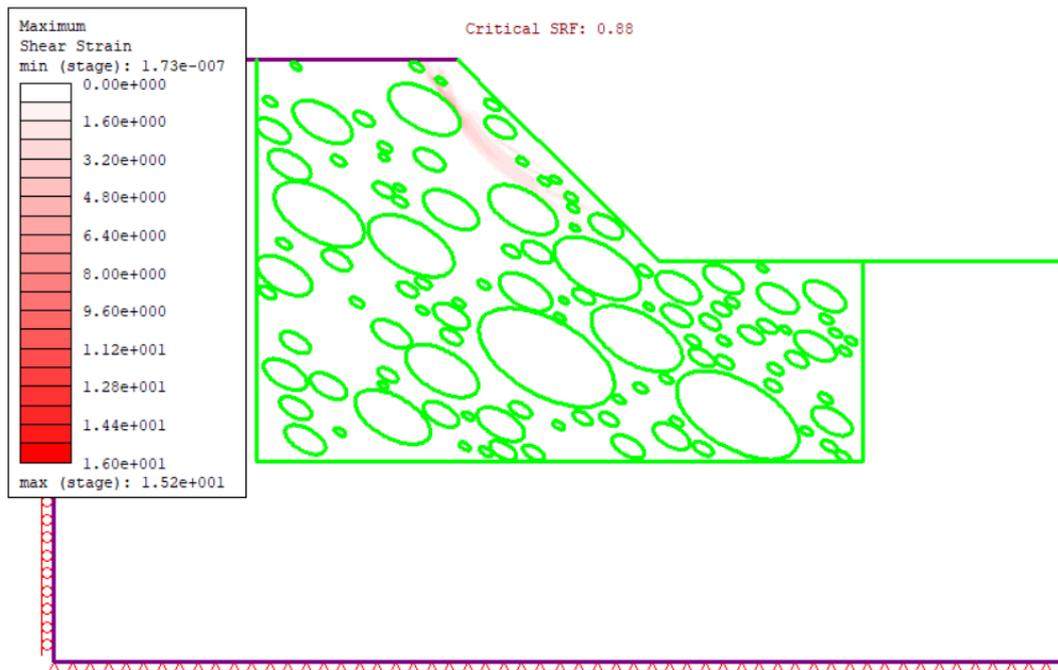
Allegato 3.85: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=40%



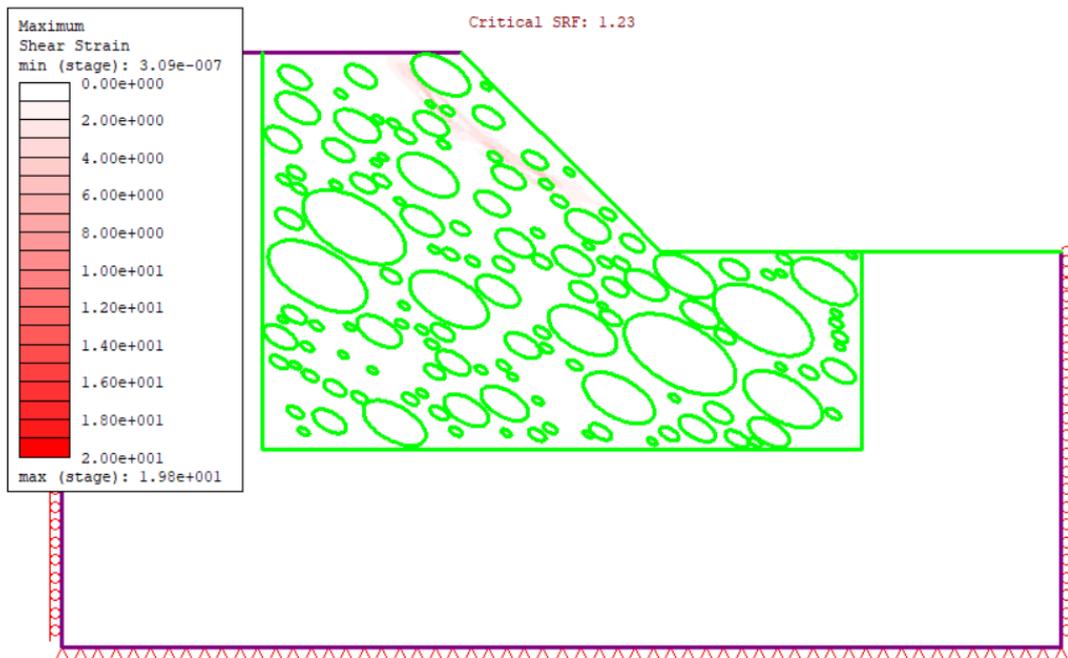
Allegato 3.86: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=40%



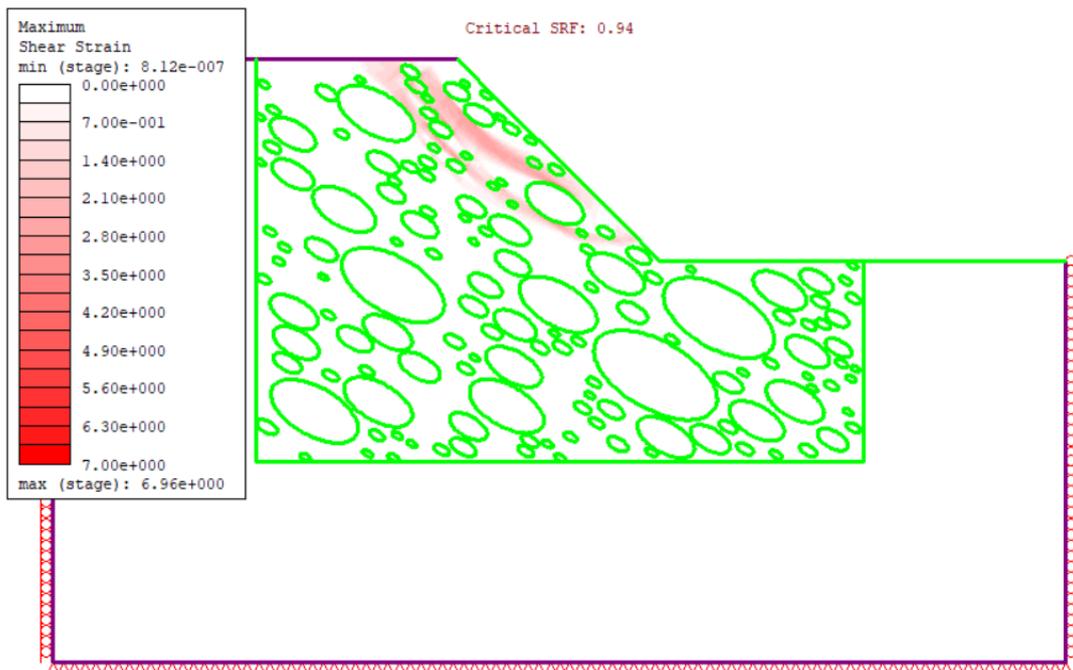
Allegato 3.87: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=40%



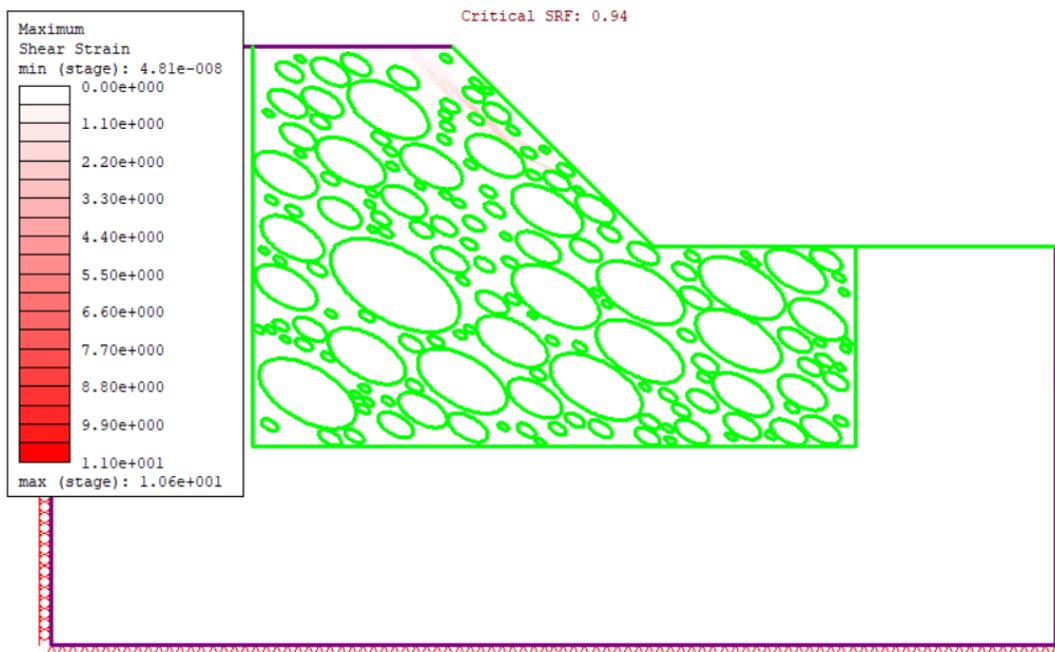
Allegato 3.88: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=40%



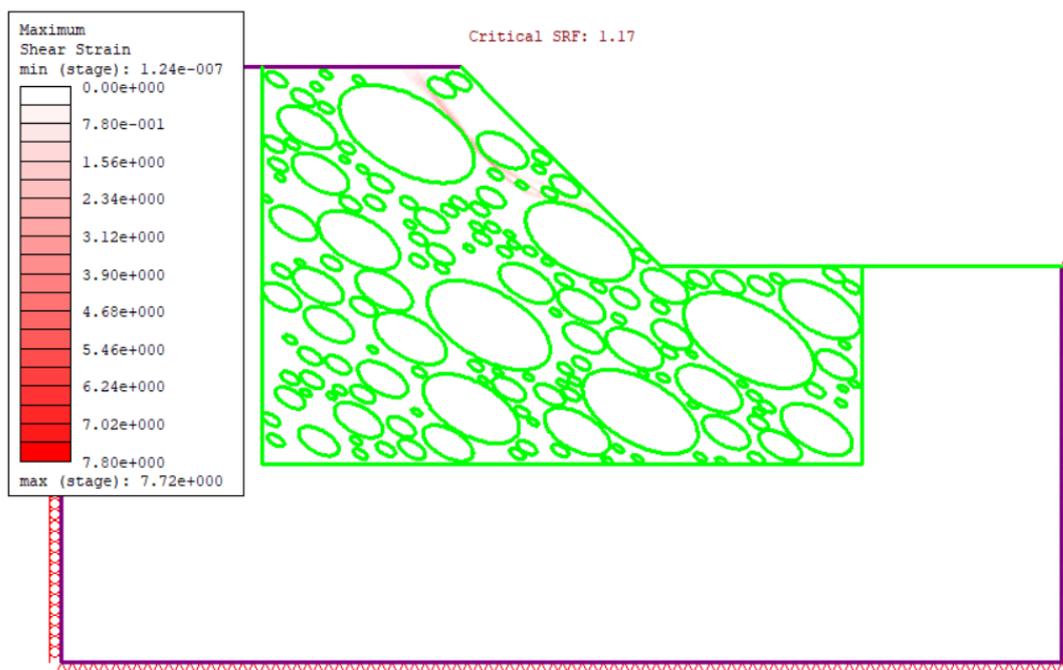
Allegato 3.89: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=40%



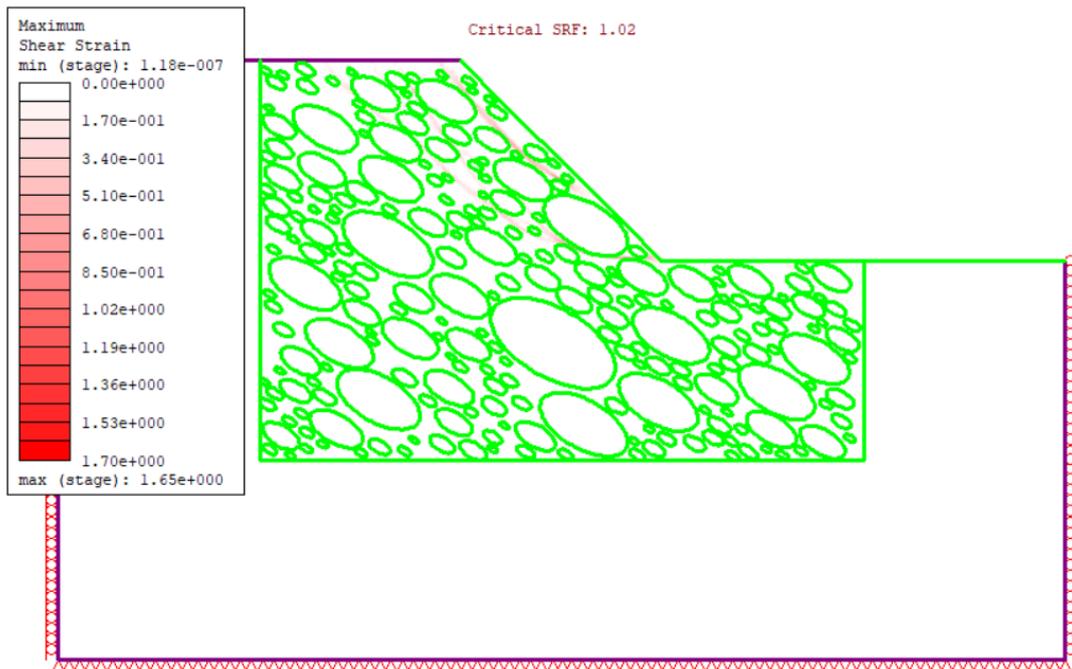
Allegato 3.90: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=40%



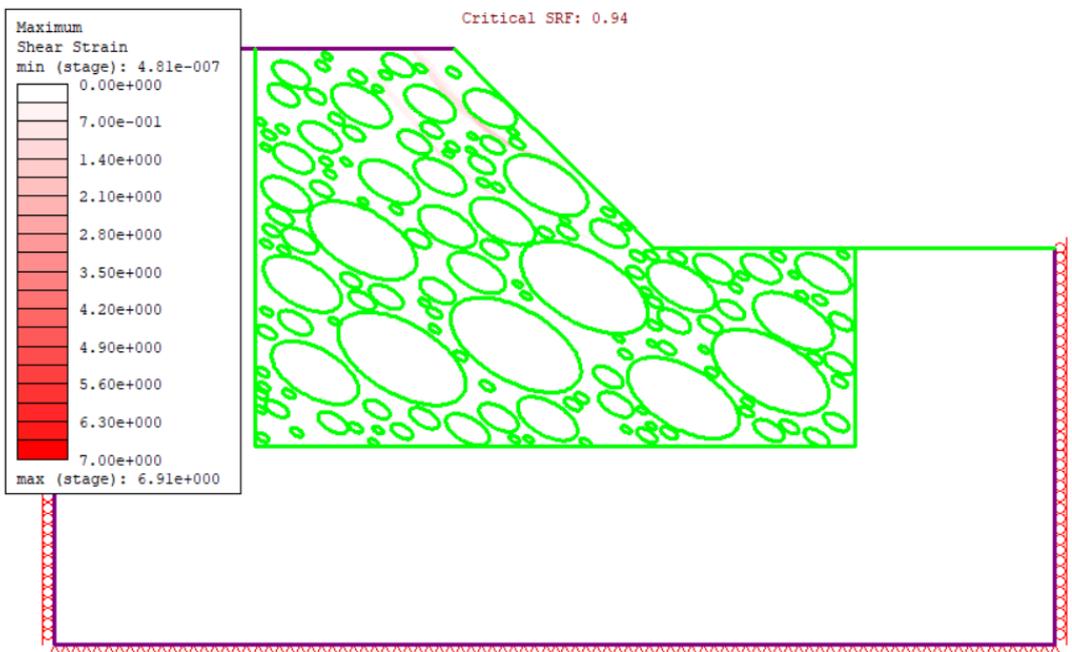
*Allegato 3.91: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=55%*



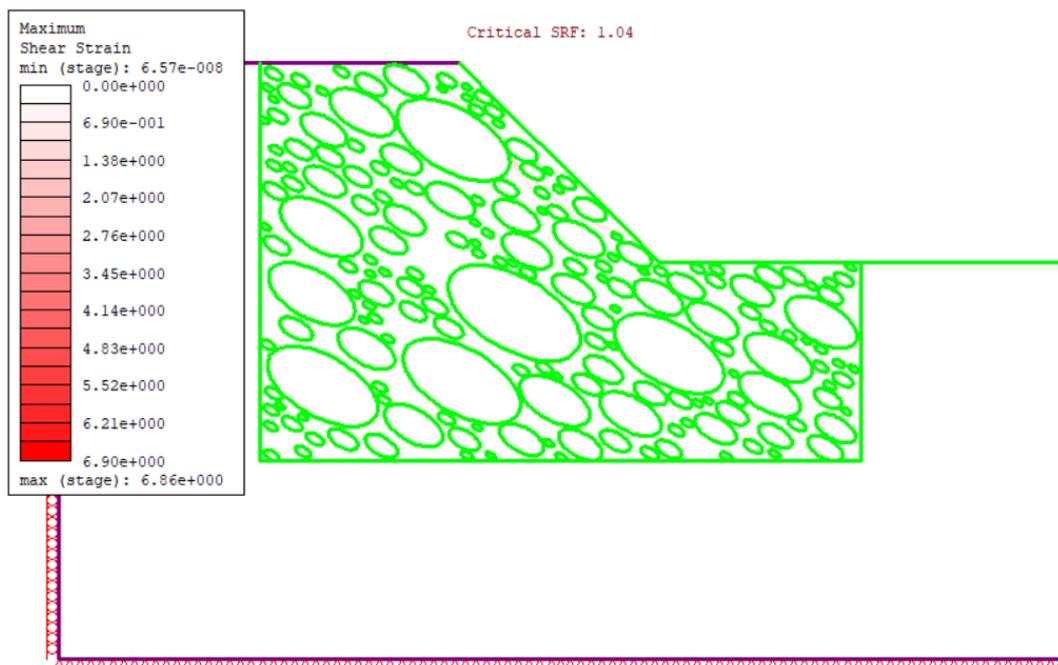
*Allegato 3.92: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=55%*



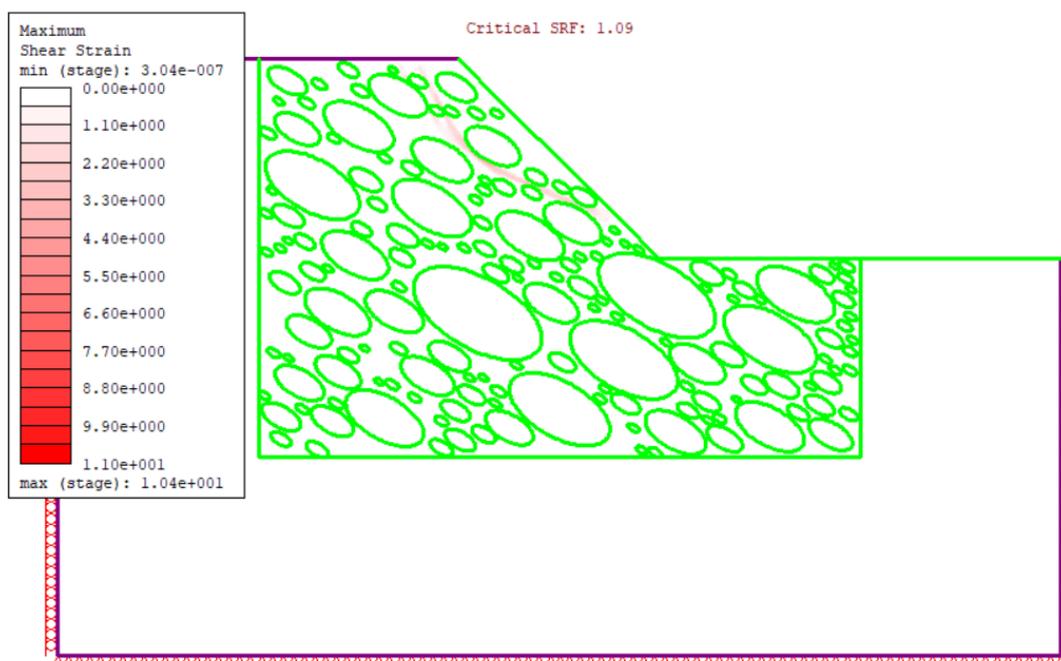
Allegato 3.93: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=55%



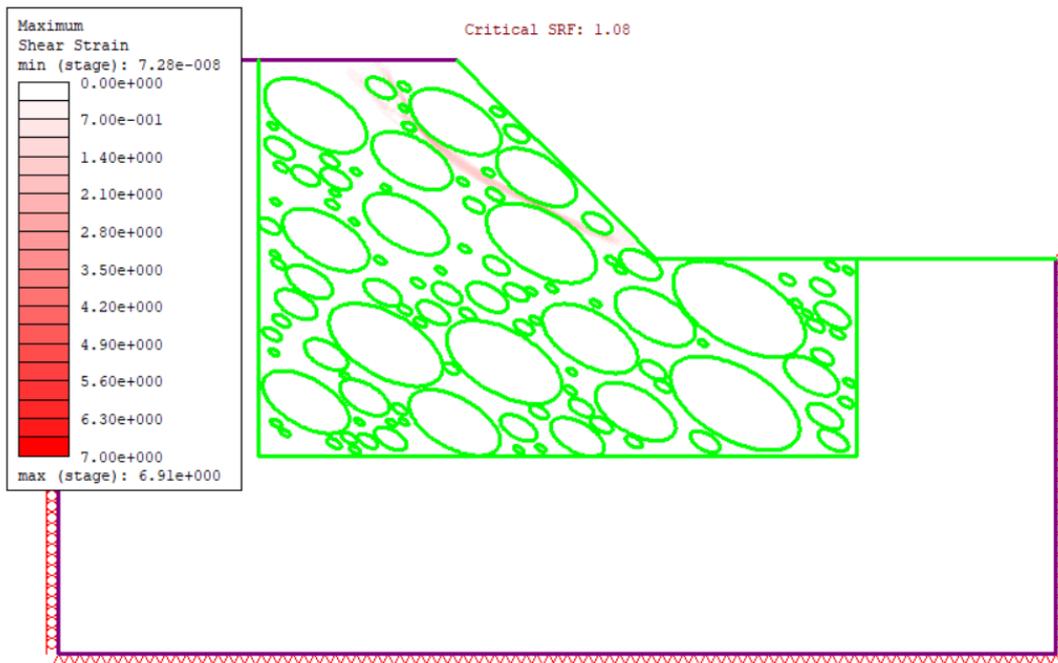
Allegato 3.94: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=55%



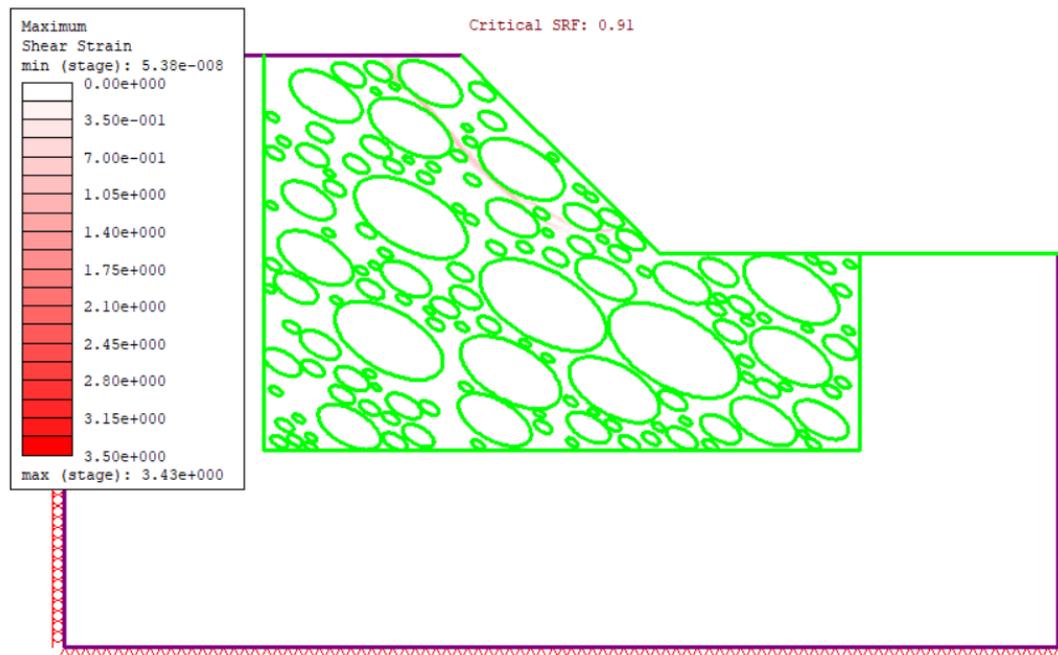
Allegato 3.95: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=55%



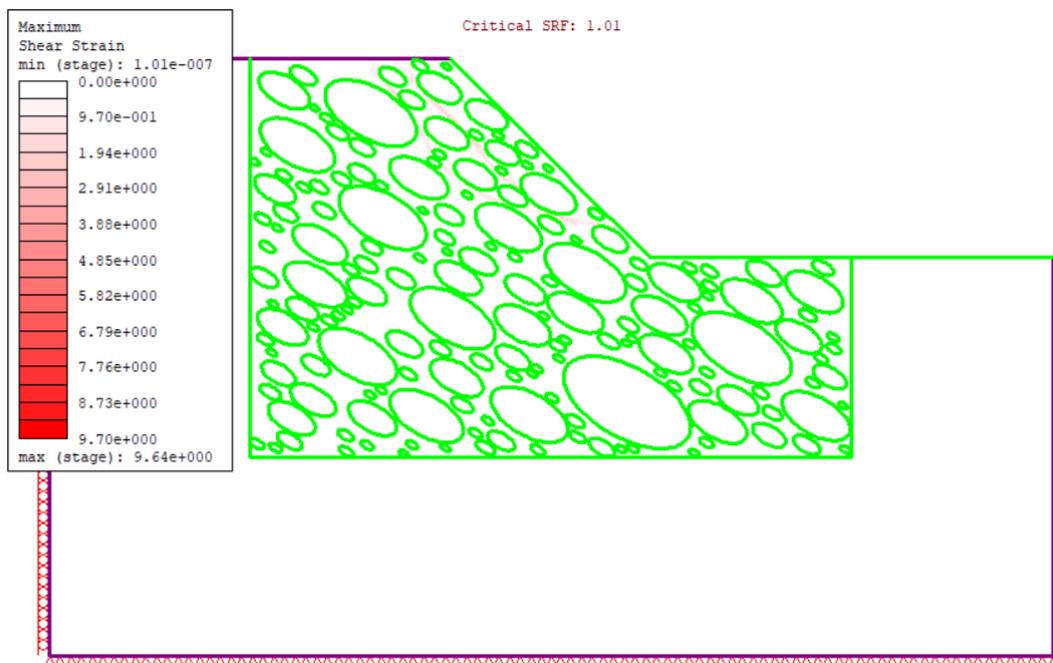
Allegato 3.96: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=55%



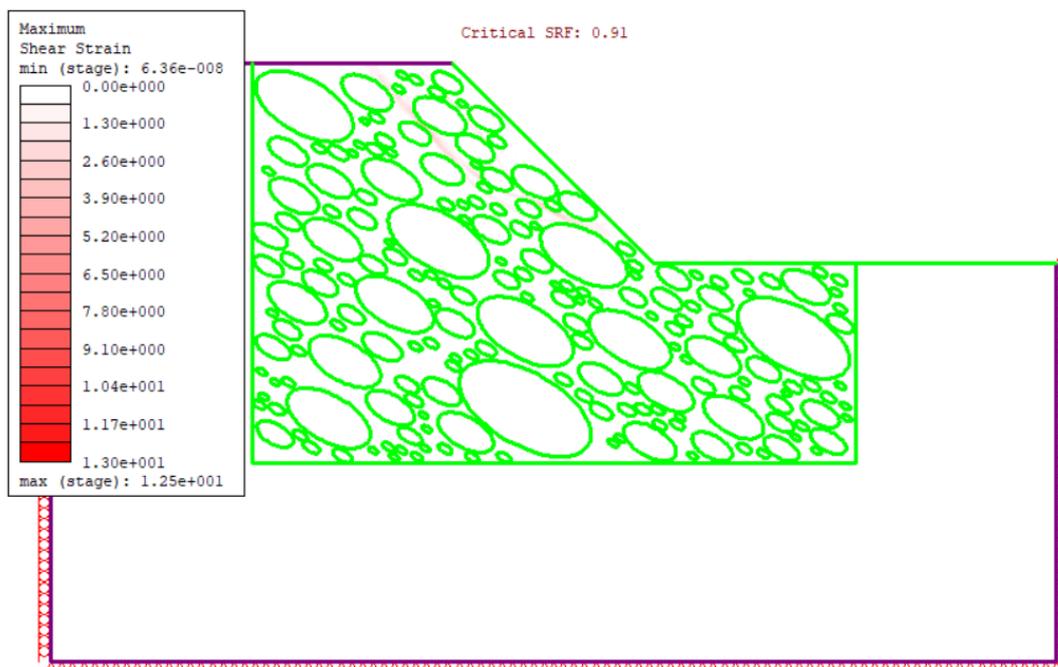
Allegato 3.97: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=55%



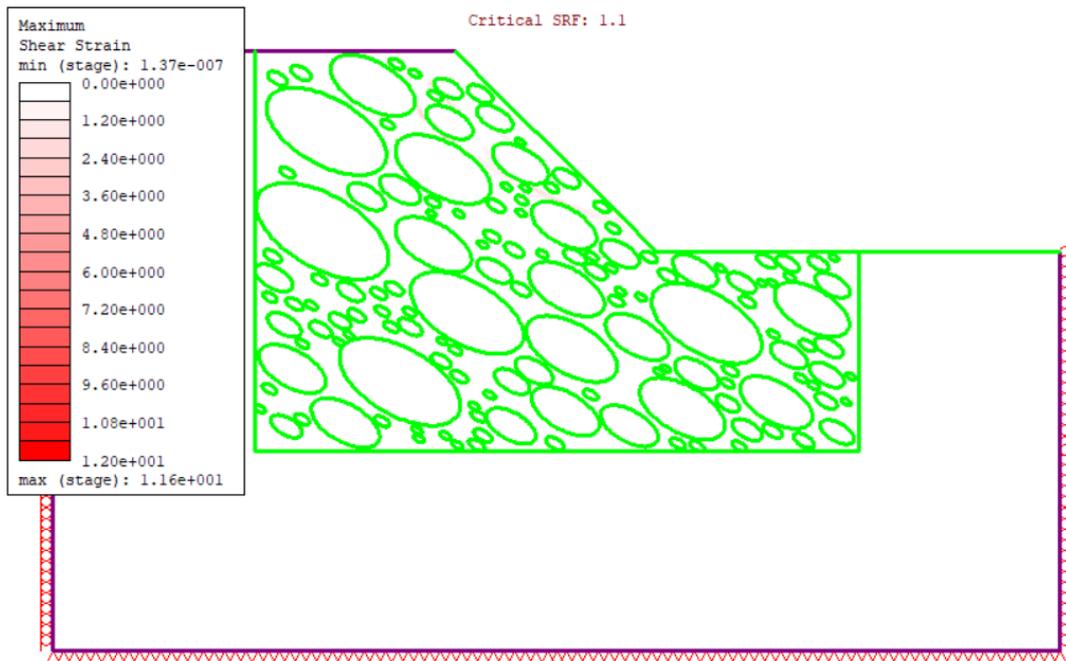
Allegato 3.98: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=55%



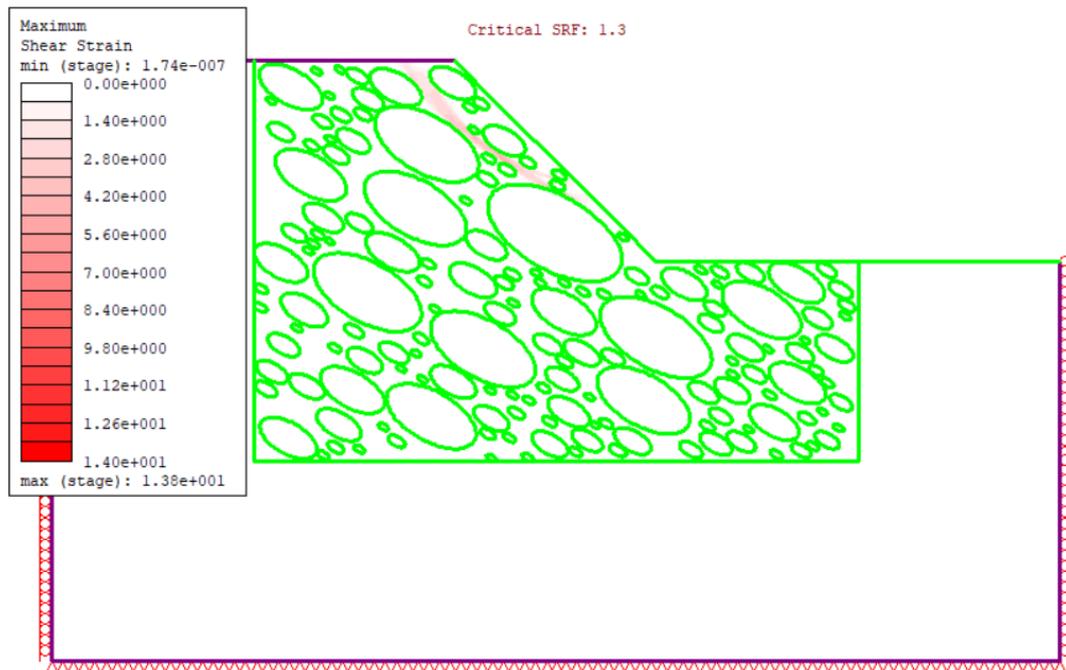
*Allegato 3.99: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=55%*



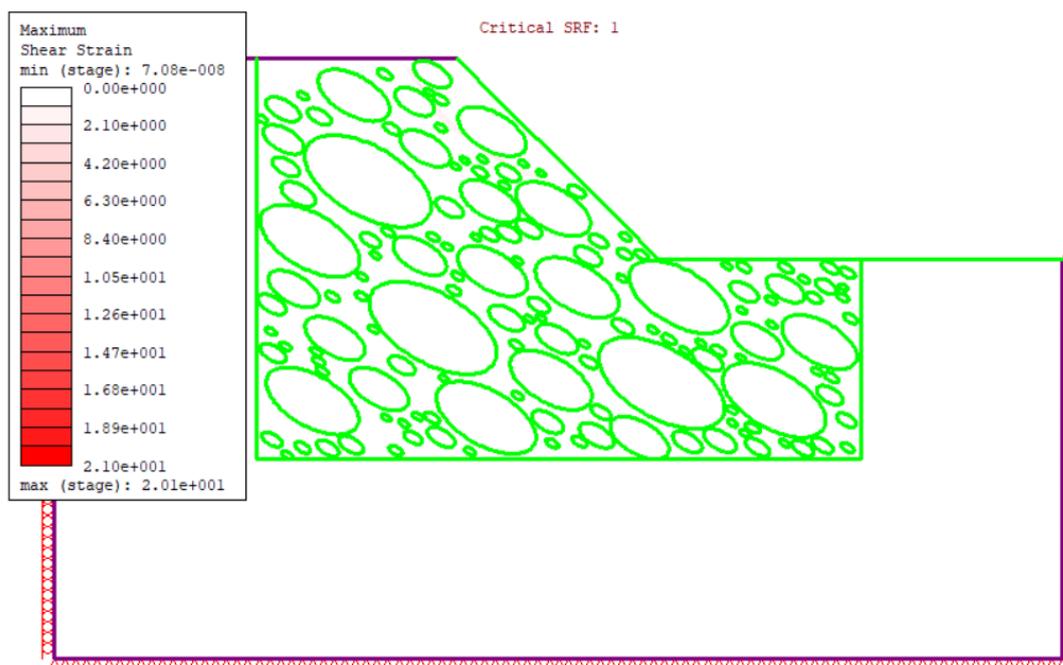
*Allegato 3.100: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=55%*



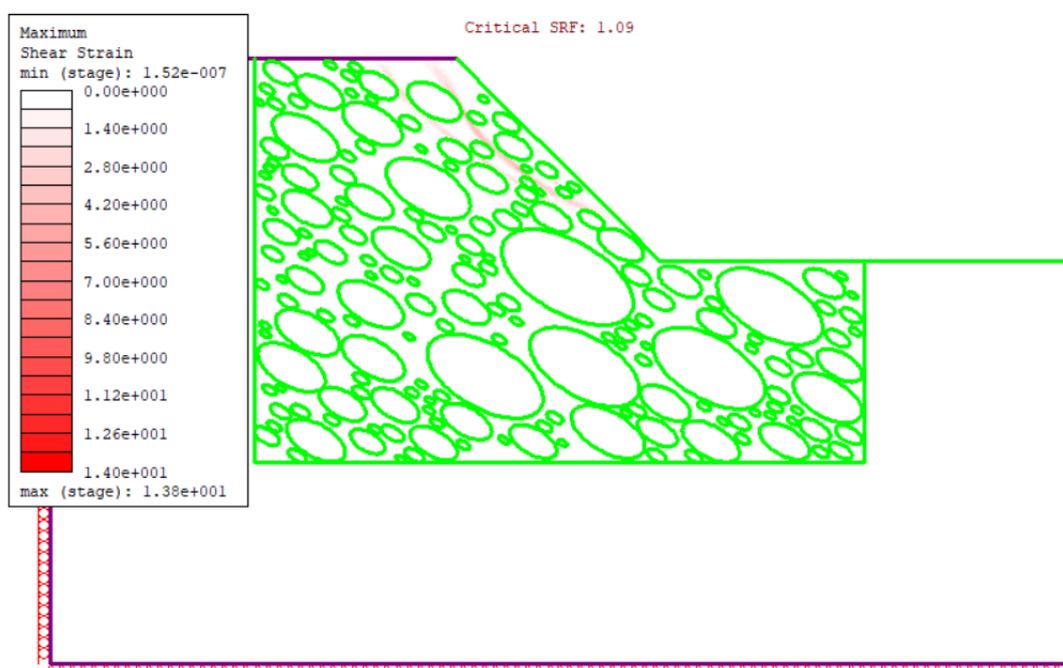
*Allegato 3.101: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=55%*



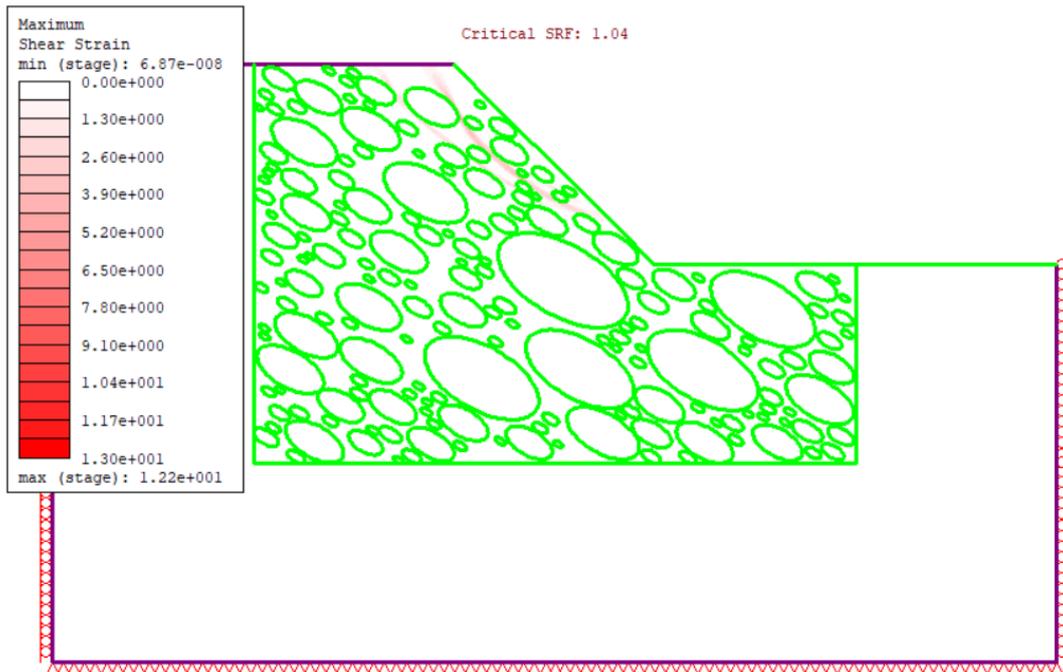
*Allegato 3.102: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=55%*



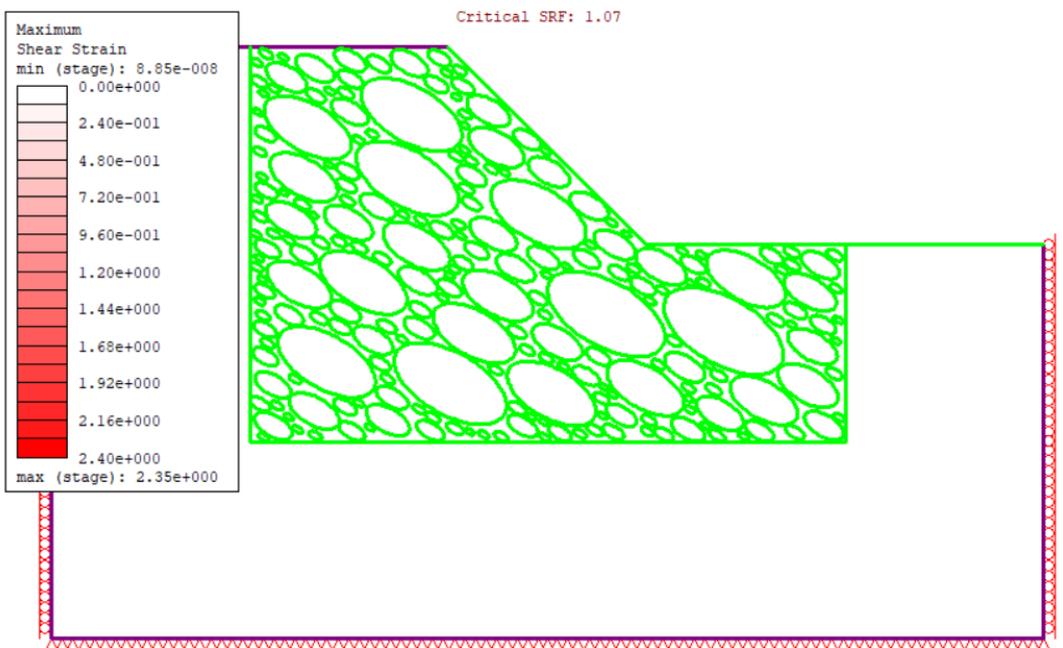
Allegato 3.103: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=55%



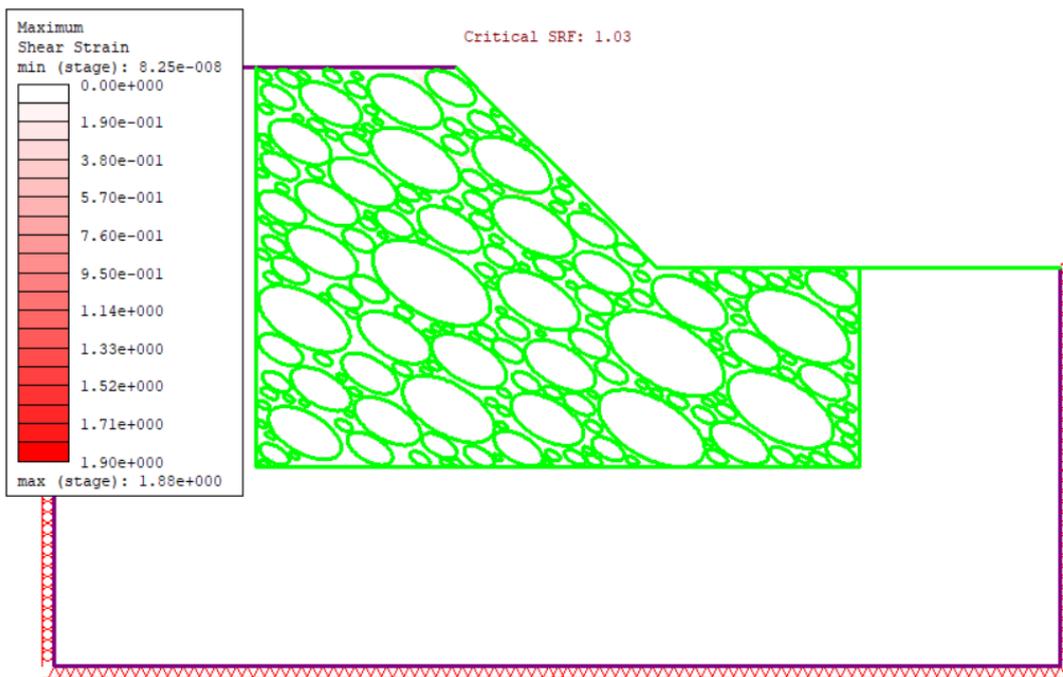
Allegato 3.104: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=55%



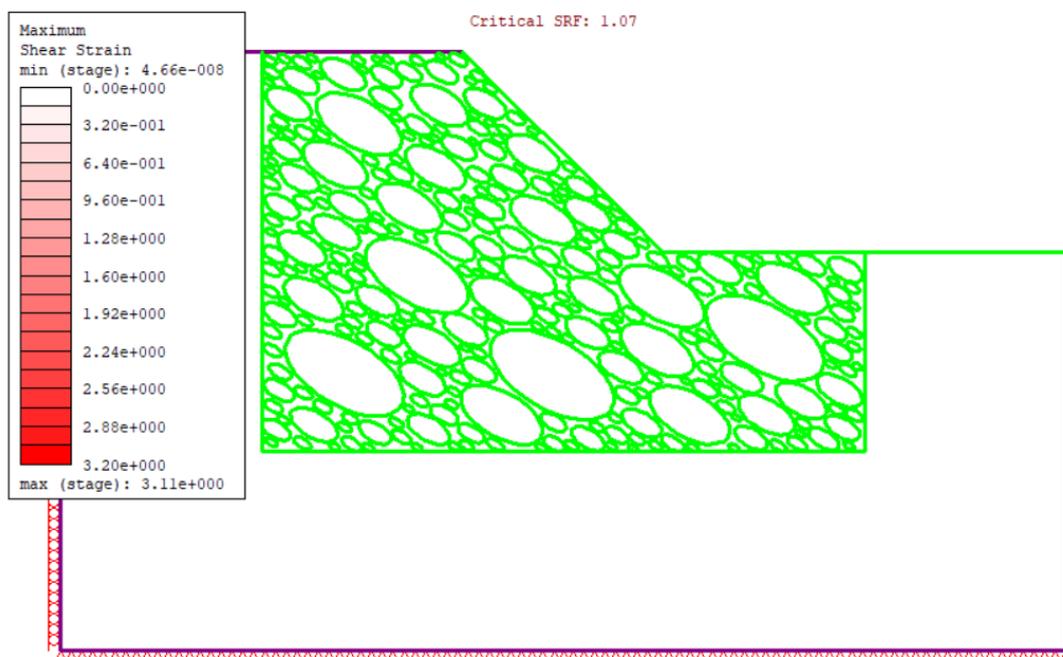
Allegato 3.105: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=55%



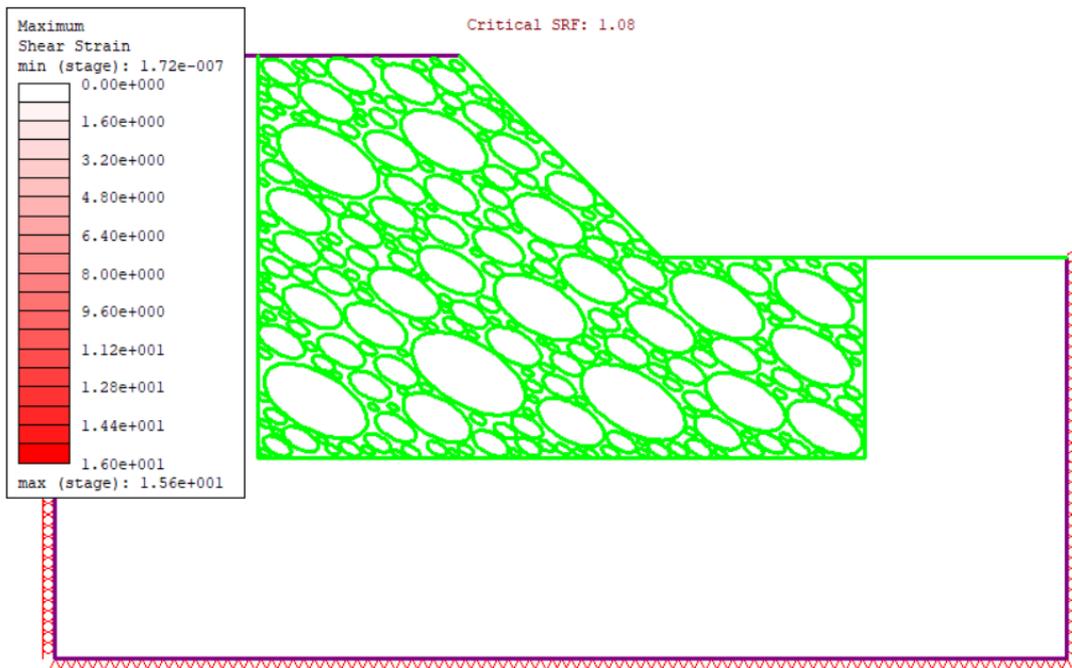
Allegato 3.106: Massime deformazioni di taglio estrazione 1 VBP=70%



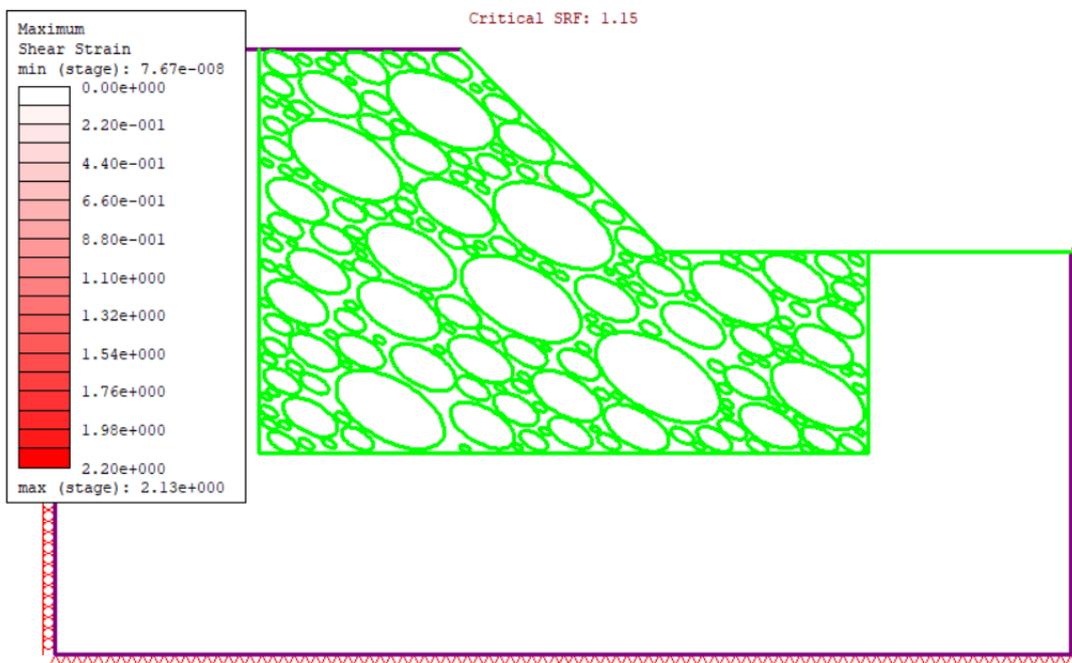
*Allegato 3.107: Massime deformazioni di taglio estrazione 2 VBP=70%*



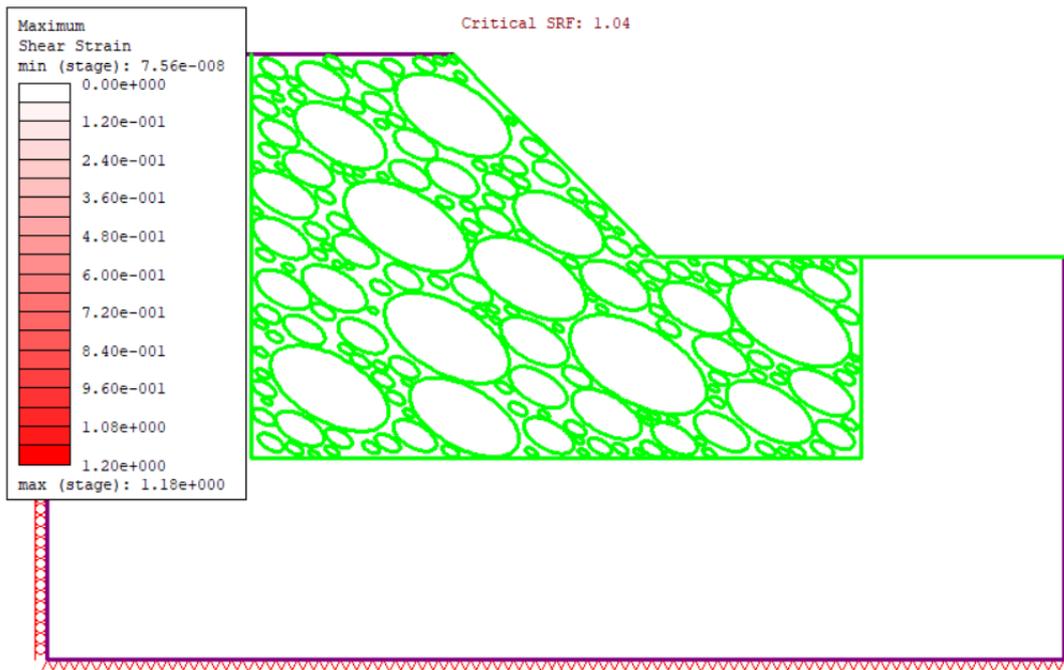
*Allegato 3.108: Massime deformazioni di taglio estrazione 3 VBP=70%*



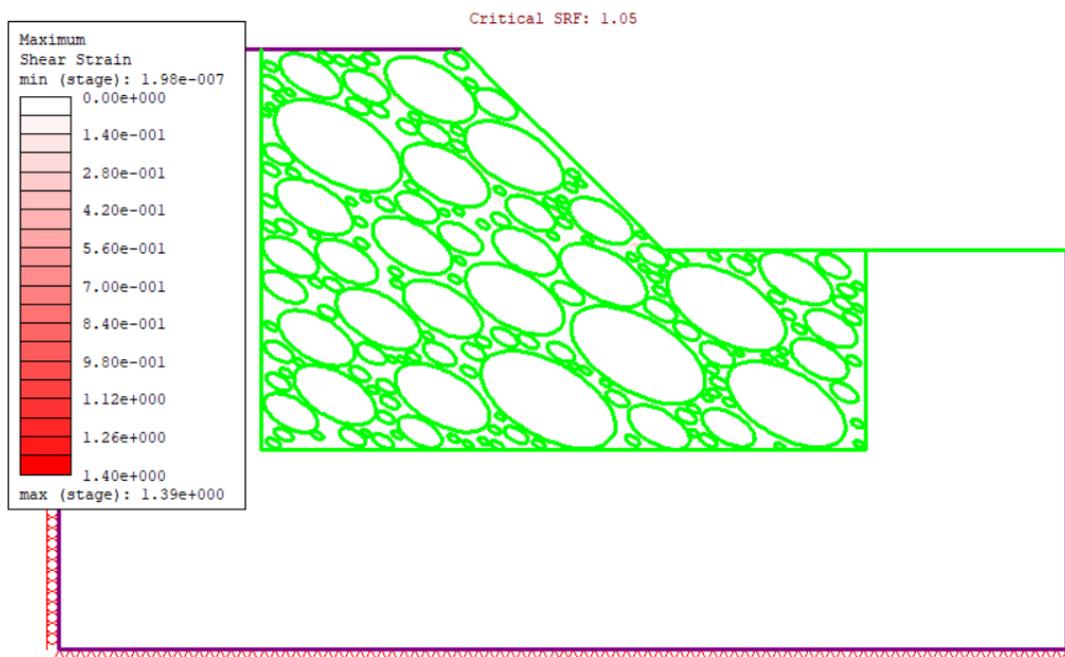
*Allegato 3.109: Massime deformazioni di taglio estrazione 4 VBP=70%*



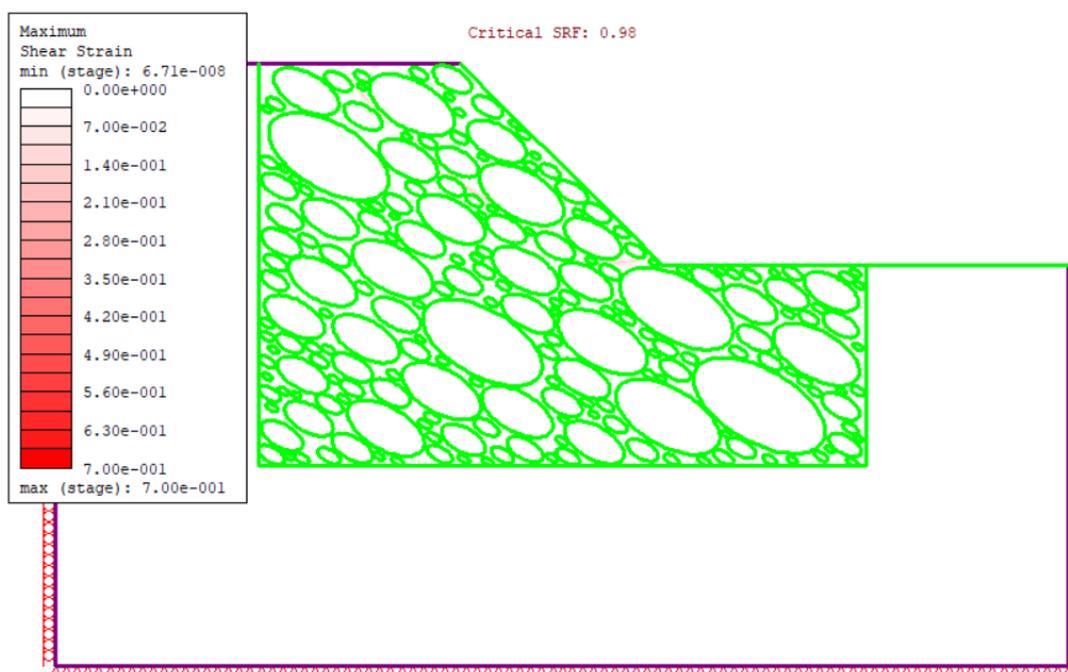
*Allegato 3.110: Massime deformazioni di taglio estrazione 5 VBP=70%*



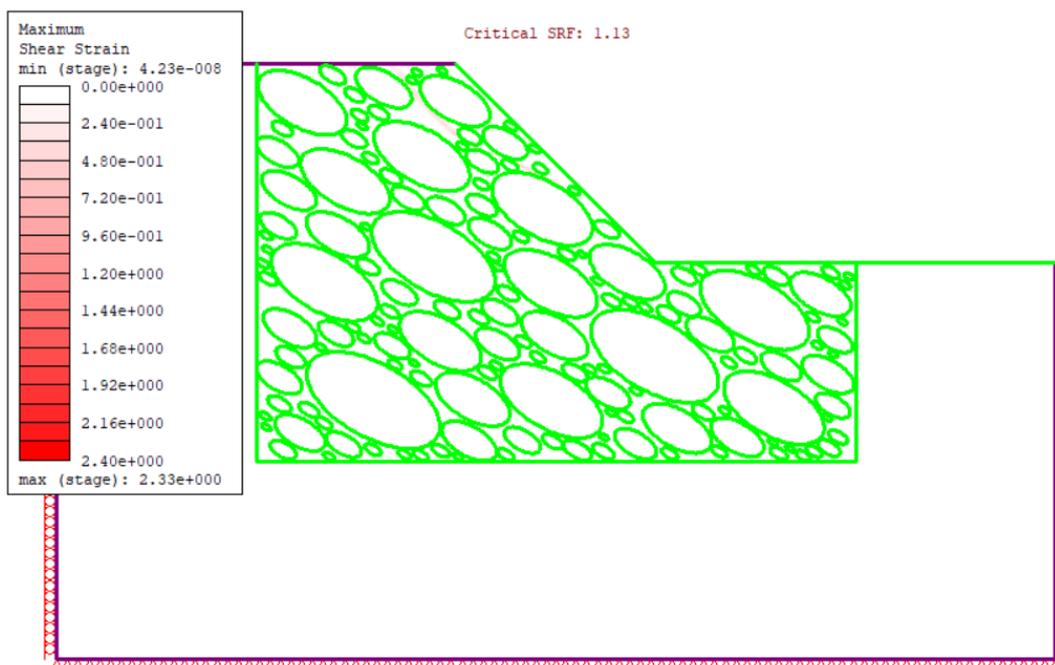
Allegato 3.111: Massime deformazioni di taglio estrazione 6 VBP=70%



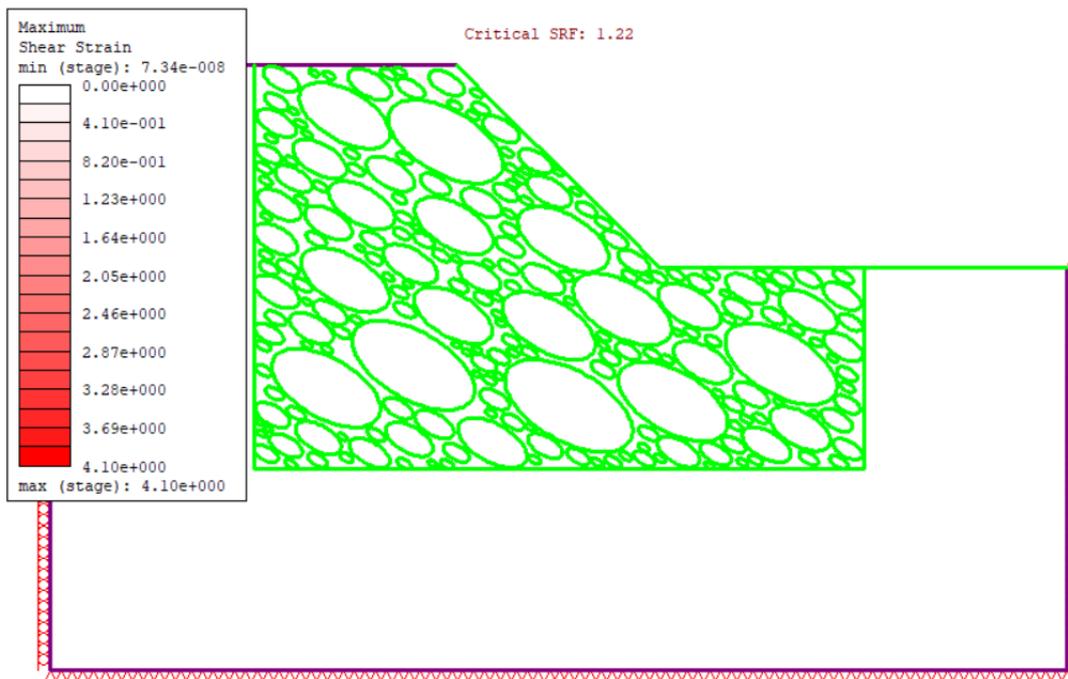
Allegato 3.112: Massime deformazioni di taglio estrazione 7 VBP=70%



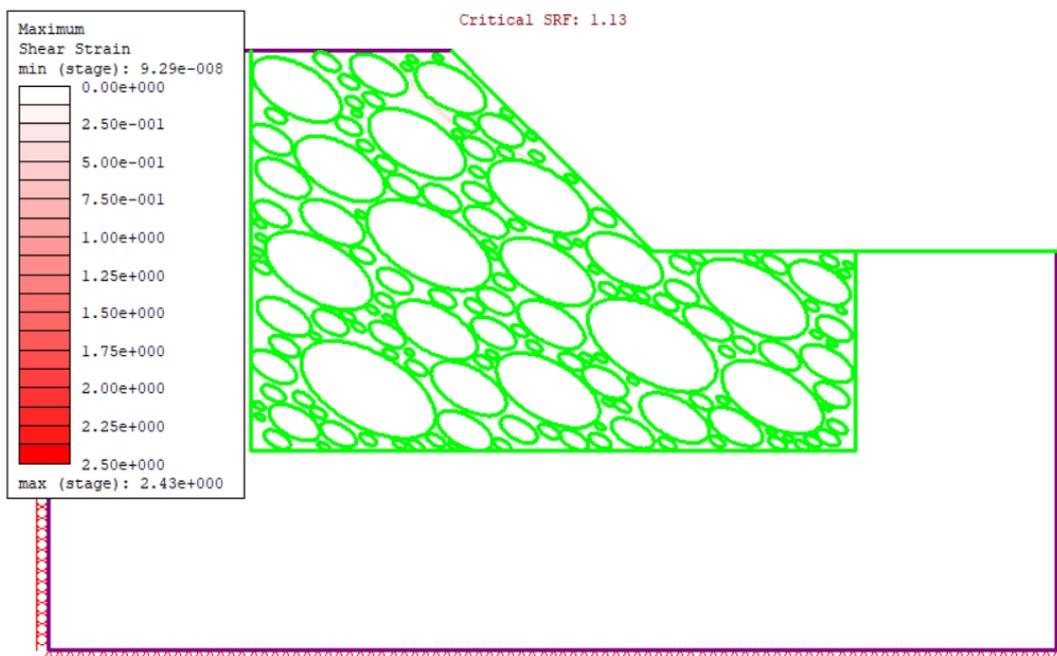
Allegato 3.113: Massime deformazioni di taglio estrazione 8 VBP=70%



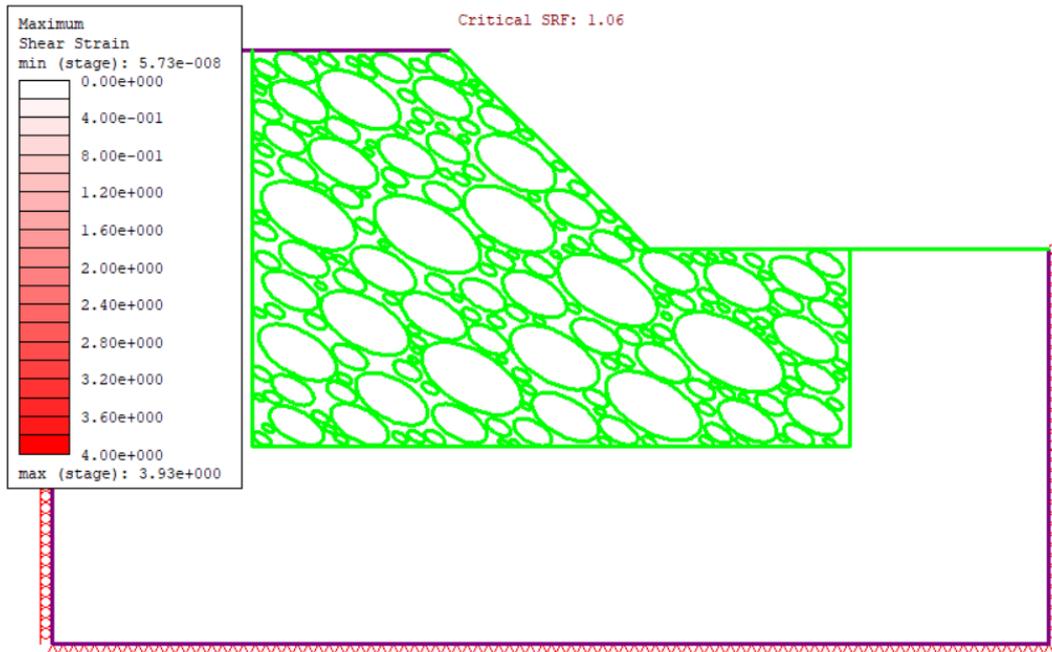
Allegato 3.114: Massime deformazioni di taglio estrazione 9 VBP=70%



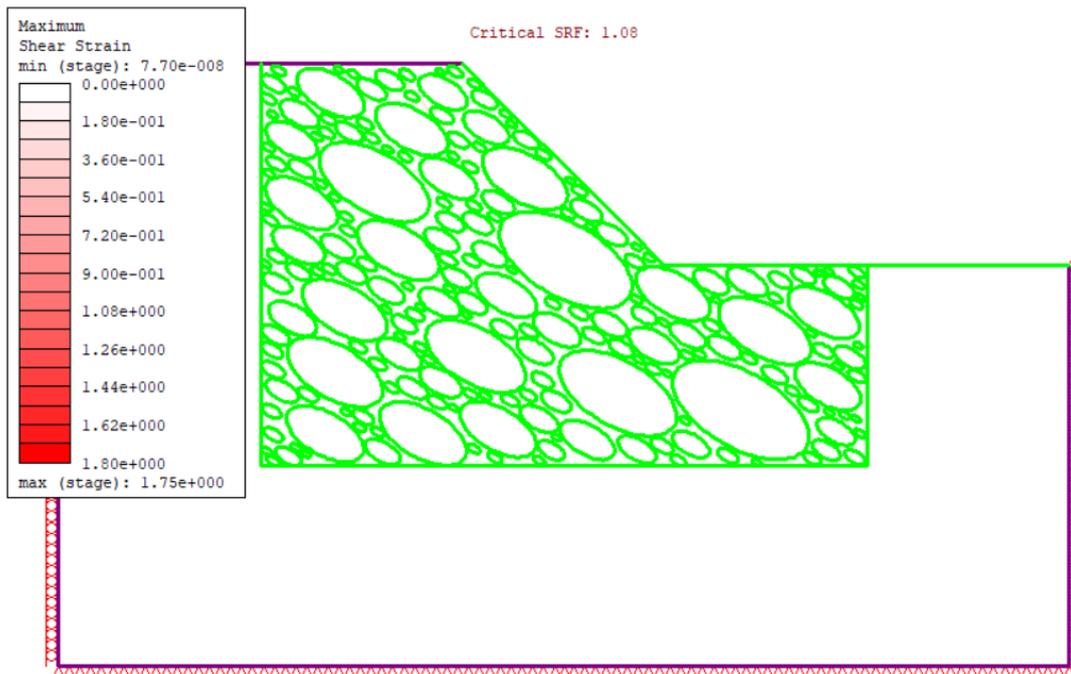
Allegato 3.115: Massime deformazioni di taglio estrazione 10 VBP=70%



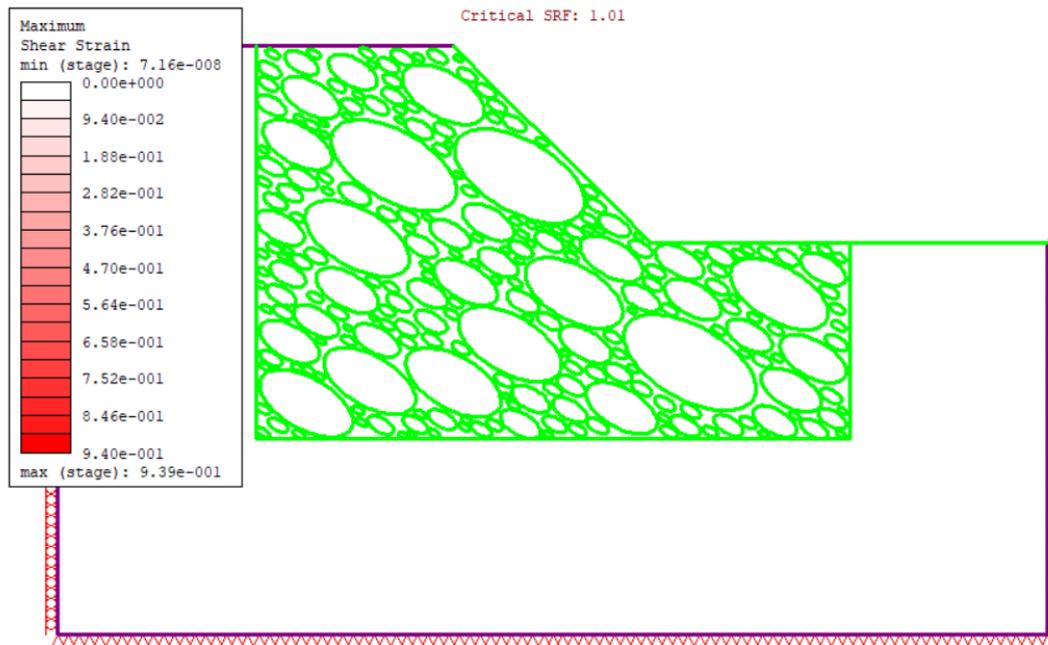
Allegato 3.116: Massime deformazioni di taglio estrazione 11 VBP=70%



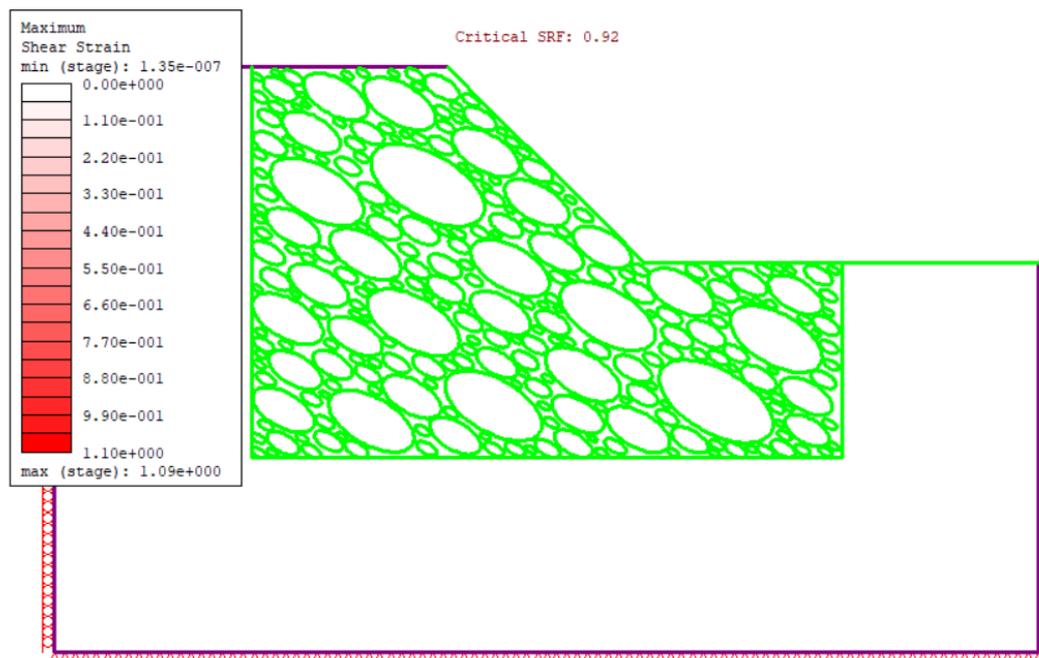
*Allegato 3.117: Massime deformazioni di taglio estrazione 12 VBP=70%*



*Allegato 3.118: Massime deformazioni di taglio estrazione 13 VBP=70%*



*Allegato 3.119: Massime deformazioni di taglio estrazione 14 VBP=70%*



*Allegato 3.120: Massime deformazioni di taglio estrazione 15 VBP=70%*

