

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale



Analisi dell'influenza delle caratteristiche dei clasti rocciosi sulla stabilità di versanti in bimrock

Relatori:

Prof.ssa Monica Barbero

Prof. Claudio Scavia

Ing. Maria Lia Napoli

Candidato:

Andrea Petruzzo

Luglio 2020

Indice

Indice delle Figure.....	
Indice delle Tabelle.....	
Introduzione.....	1
1. Caratteristiche generali dei Bimrocks.....	2
1.1. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi	4
1.2. Autosomiglianza e dimensione frattale	6
1.3. Indipendenza di scala delle distribuzioni dimensionali dei blocchi	8
1.4. Lunghezza caratteristica	10
1.5. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi	10
1.6. Relazione tra resistenza e VBP	12
2. Analisi di stabilità di versanti in bimrock.....	13
2.1. Analisi di stabilità all'equilibrio limite	14
2.2. Analisi di stabilità tramite metodi numerici	18
3. Realizzazione del modello per l'analisi di stabilità di versanti in bimrock	34
3.1. Geometria del versante	36
3.2. Generazione casuale dei blocchi.....	37
3.3. Preparazione del file geometrico per il modello.....	40
3.4. Modellazione numerica: ipotesi di base	41
3.5. Convergence Type: Absolute Energy.....	42
3.6. Definizione del dominio	45
3.7. Definizione della mesh.....	47
3.7.1. Definizione della mesh per il modello di sola matrice.....	49
3.7.2. Definizione della mesh per i modelli con blocchi.....	50

3.8. Applicazione delle condizioni al contorno	52
3.9. Proprietà dei materiali.....	55
3.10. Metodo SSR.....	57
4. Risultati dell'analisi di stabilità	58
4.1. Risultati ottenuti per il versante di sola matrice	58
4.2. Risultati ottenuti per i versanti con blocchi.....	60
4.2.1. Inclinazione pari a 0° e VBP 25%	63
4.2.2. Inclinazione pari a 0° e VBP 40%	66
4.2.3. Inclinazione pari a 0° e VBP 55%	69
4.2.4. Inclinazione pari a 0° e VBP 70%	72
4.2.5. Inclinazione casuale e VBP 25%	75
4.2.6. Inclinazione casuale e VBP 40%	78
4.2.7. Inclinazione casuale e VBP 55%	81
4.2.8. Inclinazione casuale e VBP 70%	84
4.3. Confronto tra i risultati ottenuti	88
5. Influenza dell'eccentricità e dell'inclinazione dei blocchi sulla stabilità di versante	93
Conclusioni	104
Bibliografia.....	106
Allegati	112
Allegato 1	112
Massime deformazioni di taglio	112
Allegato 2.....	173
Fattori di sicurezza	173

Indice delle Figure

Figura 1. Esempi di alcune formazioni identificabili come bimrocks. (Afifipour, 2014).....	2
Figura 2. Esempio di Franciscan mélange presente nella zona di Shelter Cove, Point Delgada, California settentrionale. (Medley, 2001).....	3
Figura 3. Diametro del blocco e massima dimensione osservabile. (Medley, 2001).....	4
Figura 4. Modelli fisici di mélanges con percentuali volumetriche e distribuzioni dimensionali dei blocchi note. (Medley, 2001).....	5
Figura 5. Curve di distribuzione dei blocchi tridimensionale e monodimensionale. (Medley, 2001).....	6
Figura 6. Andamento della legge di frequenza della distribuzione dei blocchi sul piano bi-logaritmico. (Medley, 1994).....	7
Figura 7. Leggi di distribuzione dimensionale dei blocchi normalizzate. (Medley, 2001).....	8
Figura 8. Percentuale lineare cumulata dei blocchi in funzione della lunghezza totale dei campioni espressa come multiplo della lunghezza del blocco di dimensioni maggiori. (Medley, 1997).....	11
Figura 9. Fattore di incertezza in funzione della lunghezza totale dei campioni espressa come multiplo della lunghezza del blocco di dimensioni maggiori. (Medley, 2001).....	12
Figura 10. Modello di pendio studiato da Irfan e Tang (1993). La percentuale volumetrica dei blocchi è pari al 20%, la linea tratteggiata rappresenta la superficie di scivolamento per il modello di sola matrice mentre la linea arancione rappresenta la superficie di scivolamento del modello con blocchi. (Medley e Sanz, 2004).....	14
Figura 11. Alcune possibili configurazioni di versanti in bimrock. (Medley e Sanz, 2004).....	15
Figura 12. Esempio di modello di versante in bimrock con percentuale areale dei blocchi pari al 50% e blocchi distribuiti in maniera casuale. La linea tratteggiata indica la superficie di rottura per il pendio di sola matrice; le curve in nero mostrano due possibili superfici di rottura per il versante in bimrock. (Medley e Sanz, 2003).....	16

Figura 13. Confronto tra i risultati ottenuti da Irfan e Tang (1993) e Medley e Sanz (2003), in termini di fattore di sicurezza normalizzato. (Medley e Sanz, 2004).....	17
Figura 14. Modelli di versante con differenti percentuali volumetriche dei blocchi. (Barbero et al., 2006)	19
Figura 15. Rapporto tra gli assi e inclinazioni dei blocchi. (Barbero et al., 2006)	19
Figura 16. Fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi. (Barbero et al., 2006)	20
Figura 17. Esempio di modello di pendio realizzato tramite Phase 2 (vers. 8). (Napoli et al., 2018)	22
Figura 18. Valori del fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi FEM. (Napoli et al., 2018)	23
Figura 19. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi FEM. (Napoli et al., 2018)	23
Figura 20. Valori del fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi LEM. (Napoli et al., 2018)	24
Figura 21. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi LEM. (Napoli et al., 2018)	24
Figura 22. Confronto tra i risultati ottenuti tramite FEM e LEM in termini di fattore di sicurezza e superficie di scivolamento per una delle dieci estrazioni per ogni percentuale volumetrica dei blocchi considerata. (Napoli et al., 2018)	26
Figura 23. Valori del fattore di sicurezza in funzione della VBP per i vari metodi di analisi utilizzati. (Napoli et al., 2018)	27
Figura 24. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della VBP per i vari metodi di analisi utilizzati. (Napoli et al., 2018)	27
Figura 25. Immagine del versante adiacente a quello analizzato (a sinistra) e immagine binaria associata (a destra). (Liu et al., 2018)	29
Figura 26. Sovrapposizione della griglia all'immagine binaria. (Liu et al., 2018)	29

Figura 27. Processo di individuazione dei blocchi (a sinistra) e di assegnazione delle dimensioni (a destra). (Liu et al., 2018).....	30
Figura 28. Modello del versante costituito da sola matrice. (Liu et al., 2018).....	31
Figura 29. Modello del versante con presenza di blocchi. (Liu et al., 2018).....	31
Figura 30. (a) Blocchi di grandi dimensioni posizionati in prossimità della superficie del pendio; (b) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte superiore della superficie di scivolamento del pendio; (c) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte centrale della superficie di scivolamento del pendio; (d) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte inferiore della superficie di scivolamento del pendio. (Liu et al., 2018).....	32
Figura 31. Risultati delle analisi numeriche sui modelli con posizione variabile dei blocchi di grandi dimensioni in termini di zone plastiche. (Liu et al., 2018).....	32
Figura 32. Schema geometrico del pendio. Le dimensioni sono espresse in metri.....	36
Figura 33. Distribuzione degli assi dei blocchi in termini probabilistici.....	38
Figura 34. Esempio di distribuzione dei blocchi all'interno del dominio con VBP pari a 25%, inclinazione 0° ed eccentricità 0.866.	39
Figura 35. Rappresentazione geometrica della posizione e dimensioni delle ellissi in Autocad. Il file corrisponde alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.....	40
Figura 36. Risposta non lineare di una molla ai carichi applicati. Il problema presenta un singolo grado di libertà. La figura mostra anche il processo iterativo agli elementi finiti per determinare il comportamento della molla soggetta a carichi applicati. (https://www.roscience.com/help/rs2/pdf_files/theory/Convergence_Criteria.pdf).....	44
Figura 37. Dimensioni in metri del dominio creato in RS ²	46
Figura 38. Parametri utilizzati per la generazione della mesh.	48
Figura 39. Tipologia di mesh utilizzata per il modello di sola matrice.	49
Figura 40. Modello di versante dopo l'importazione del file .dxf contenente la geometria dei blocchi. In particolare, il file corrisponde alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.....	51

Figura 41. Impostazioni utilizzate per la generazione della mesh nel modello con blocchi.	51
Figura 42. Tipologia di mesh utilizzata per il modello con blocchi.....	52
Figura 43. Applicazione delle condizioni al contorno per il modello con blocchi corrispondente alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.	54
Figura 44. Assegnazione dei materiali per il modello con blocchi corrispondente alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.....	56
Figura 45. Valori del fattore di sicurezza e delle massime deformazioni di taglio ottenuti per il modello costituito da sola matrice.....	59
Figura 46. Schema del criterio utilizzato per la denominazione dei modelli con blocchi	61
Figura 47. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_25_5 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	64
Figura 48. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_25_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	65
Figura 49. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della settima e dell'ottava estrazione.....	65
Figura 50. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_40_1 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	67
Figura 51. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_40_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	68
Figura 52. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della tredicesima e della quinta estrazione.....	68
Figura 53. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_55_4 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	70
Figura 54. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_55_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	71

Figura 55. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della tredicesima e della quinta estrazione	71
Figura 56. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_70_2 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	73
Figura 57. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_70_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	74
Figura 58. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della seconda e della dodicesima estrazione	74
Figura 59. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_25_10 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	76
Figura 60. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_25_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	77
Figura 61. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della nona e della tredicesima estrazione	77
Figura 62. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_40_3 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	79
Figura 63. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli R_40_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	80
Figura 64. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della sesta e della tredicesima estrazione	80
Figura 65. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_55_14 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	82
Figura 66. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_55_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	83
Figura 67. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della prima e della quinta estrazione	83
Figura 68. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_70_10 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)	85

Figura 69. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli R_70_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)	86
Figura 70. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della seconda e della sesta estrazione	86
Figura 71. Valori del fattore di sicurezza medio in base alla VBP. In rosso, i valori di SRF medio riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del fattore di sicurezza corrispondente alla VBP=0% è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice	88
Figura 72. Valori della deviazione standard in base alla VBP. In rosso, i valori della deviazione standard riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5.	90
Figura 73. Valori del volume potenzialmente instabile minimo (relativo alle superfici più prossime al versante per ogni set di estrazioni) in base alla VBP. In rosso, i valori di volume riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del volume potenzialmente instabile corrispondente alla VBP=0% è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice	91
Figura 74. Valori del volume potenzialmente instabile massimo (relativo alle superfici più profonde per ogni set di estrazioni) in base alla VBP. In rosso, i valori di volume riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del volume potenzialmente instabile corrispondente alla VBP=0% è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice	92
Figura 75. Esempi di versanti con VBP pari al 55%, eccentricità pari a 0,866 con blocchi inclinati di 0° (a), 30° (b), 60° (c) e 90° (d)	93
Figura 76. Esempi di versanti con VBP pari al 55%, eccentricità pari a 0,5 con blocchi inclinati di 0° (a), 30° (b), 60° (c), 90° (d) e random (e)	94
Figura 77. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP, per tutte le inclinazioni e le eccentricità dei blocchi analizzate	97
Figura 78. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 0° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso).....	98

Figura 79. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 30° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)..... 99

Figura 80. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 60° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)..... 100

Figura 81. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 90° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)..... 101

Figura 82. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con eccentricità pari a 0,5 102

Figura 83. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con eccentricità pari a 0,866 102

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Principali proprietà meccaniche dei materiali. (Barbero et al., 2006).....	19
Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dei materiali. (Napoli et al., 2018)	22
Tabella 3. Caratteristiche meccaniche dei materiali. (Liu et al., 2018)	30
Tabella 4. Proprietà dei materiali utilizzate per la modellazione numerica.	55
Tabella 5. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 25%.	63
Tabella 6. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 40%.	67
Tabella 7. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 55%.	70
Tabella 8. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 70%.	73
Tabella 9. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 25%.	76
Tabella 10. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 40%.	79
Tabella 11. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 55%.	82

Tabella 12. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 70%. 85

Tabella 13. Valori del fattore di sicurezza medio in funzione dell'inclinazione, dell'eccentricità e della percentuale volumetrica dei blocchi..... 95

Tabella 14. Valori del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al fattore di sicurezza del versante di sola matrice in funzione dell'inclinazione, dell'eccentricità e della percentuale volumetrica dei blocchi 96

Introduzione

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di esaminare la stabilità di versanti in bimrock tramite metodi di analisi numerica agli elementi finiti. Il termine bimrock è usato per definire delle formazioni geologiche eterogenee strutturalmente complesse, costituite da blocchi di roccia immersi in una matrice con caratteristiche meccaniche più scadenti. Sono stati creati oltre 120 modelli di pendii ideali con identica geometria e percentuali volumetriche dei blocchi pari a 25%, 40%, 55% e 70%, oltre al modello di pendio costituito da sola matrice. Sono state considerate delle inclusioni di forma ellittica, con inclinazione pari a 0° e eccentricità pari a 0,866, inclinazione casuale e eccentricità pari a 0,5. I blocchi sono stati generati in maniera casuale tramite un codice Matlab sulla base di una distribuzione dimensionale tipica del Franciscan mélange, utilizzata da Barbero et al., (2006) e Napoli et al., 2018. Il Franciscan mélange è una tipologia di formazione complessa diffusa prevalentemente nella parte settentrionale della California. Per ogni percentuale volumetrica considerata sono state eseguite 15 estrazioni, in maniera tale da conferire una validità statistica ai risultati delle analisi. Infine, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli di altri tesisti per indagare l'influenza dei parametri di eccentricità e inclinazione dei blocchi sulla stabilità dei versanti. In particolare, nel capitolo 1 sono state descritte le principali caratteristiche del materiale eterogeneo considerato, facendo riferimento soprattutto agli studi di Medley (1994, 1997, 2001), Lindquist (1994). Nel capitolo 2 si riportano i risultati ottenuti dall'analisi di versanti in bimrock da parte di vari autori, sia con metodi analitici che con metodi numerici. Nel capitolo 3, viene illustrato il procedimento utilizzato per la creazione dei modelli agli elementi finiti, dal punto di vista geometrico, delle ipotesi iniziali, della scelta di dominio, mesh e condizioni al contorno e dell'assegnazione delle proprietà meccaniche. Nel capitolo 4, sono stati riassunti i risultati ottenuti dalle analisi di stabilità, in funzione della VBP (volumetric block proportion) e dell'inclinazione dei blocchi. Infine, nel capitolo 5, sono stati studiati gli effetti di eccentricità e inclinazione delle inclusioni eseguendo dei confronti su 9 tipologie differenti di versanti.

1. Caratteristiche generali dei Bimrocks

Il termine "bimrock" è stato introdotto da Medley per descrivere un materiale composto da roccia e terreno, avente specifiche caratteristiche meccaniche. La definizione completa proposta dall'autore: *"una miscela di rocce, composte da blocchi geotecnicamente significativi all'interno di un materiale più fine e cementato"* (Medley, 1994) sottolinea la differenza, in termini di parametri di resistenza, tra la componente dei blocchi rocciosi e quella della matrice. In questo capitolo introduttivo vengono riassunte alcune delle principali proprietà dei bimrocks. In Figura 1 sono illustrate delle fotografie di formazioni complesse classificabili come bimrock.

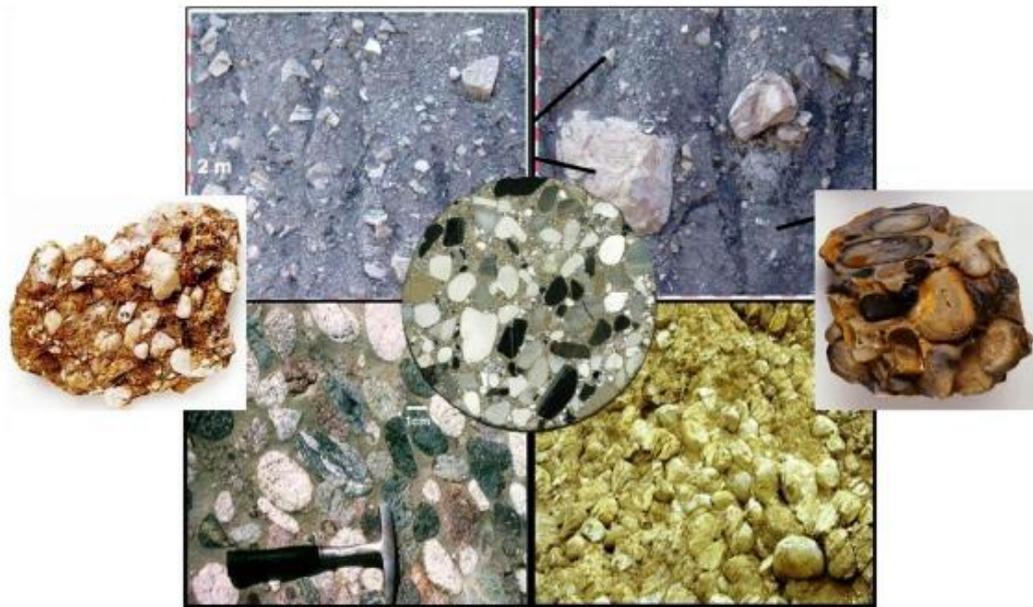


Figura 1. Esempi di alcune formazioni identificabili come bimrocks. (Afifipour, 2014)

Con il termine bimrock, infatti, si intendono diverse tipologie di formazioni complesse, come ad esempio: melangés e olistostromi, mélanges ofiolitici e ignimbriti vulcaniche (Medley, 1994; Medley e Wakabayashi, 2004). In generale, i mélanges possono essere considerati come dei materiali eterogenei costituiti da una matrice al cui interno sono presenti dei blocchi con caratteristiche meccaniche migliori.

Una tipologia di *mélange* su cui sono stati effettuati recenti studi di tipo geotecnico è quella del *Franciscan mélange*, diffuso prevalentemente nella parte settentrionale della California. La matrice del *Franciscan mélange* è composta prevalentemente da roccia scistosa, argillite, siltite, serpentinite o arenaria. I blocchi non sono distribuiti uniformemente ma sono presenti zone ricche di blocchi e zone povere di blocchi (Medley, 2001). In Figura 2 è rappresentata una tipica formazione bimrock del *Franciscan mélange*.



Figura 2. Esempio di Franciscan mélangé presente nella zona di Shelter Cove, Point Delgada, California settentrionale. (Medley, 2001)

Nonostante la loro natura eterogenea, i *mélanges* possono essere caratterizzati in maniera sistematica. Poiché la resistenza di un bimrock è correlata alla percentuale volumetrica dei blocchi (VBP), è necessario che questa venga definita insieme ad altre caratteristiche, come la dimensione ingegneristica caratteristica (L_c) e l'intervallo di dimensioni dei blocchi (Medley, 2001).

1.1. Distribuzione delle dimensioni dei blocchi

La misura dei blocchi può essere effettuata tramite rilievi superficiali o perforazioni, ma risulta molto improbabile che le dimensioni ottenute secondo queste procedure corrispondano al diametro massimo dei blocchi. Infatti, la corda misurata tramite perforazione e la dimensione massima osservabile per un blocco affiorante, definita come lunghezza d_{mod} , risultano nella maggior parte dei casi inferiori rispetto al vero diametro del blocco, come mostrato in Figura 3.

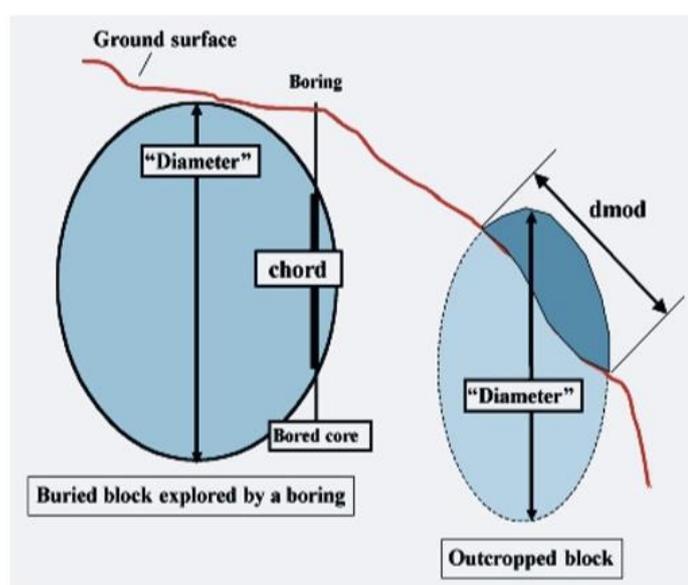


Figura 3. Diametro del blocco e massima dimensione osservabile. (Medley, 2001)

Di conseguenza, la distribuzione tridimensionale delle dimensioni dei blocchi non può essere stimata in maniera esatta tramite distribuzioni di corde monodimensionali ottenute dalle tipiche tecniche utilizzate per le perforazioni di sondaggio in campo geotecnico. Infatti, il grado con cui le distribuzioni tridimensionale e monodimensionale coincidono dipende da vari fattori tra i quali:

- orientazione dei blocchi rispetto alla direzione di perforazione;
- percentuale volumetrica dei blocchi;
- lunghezza totale di perforazione.

Per basse VBP, la possibilità che un foro di sondaggio intersechi un blocco è molto piccola e quella che intersechi il diametro massimo è ancora più bassa. Anche nel caso di percentuali volumetriche alte, se i blocchi sono orientati in maniera orizzontale, la distribuzione dimensionale ottenuta tramite le corde intercettate non potrà mai coincidere con quella reale, dal momento che le corde avranno dimensioni molto inferiori rispetto ai diametri massimi dei blocchi (Figura 4).

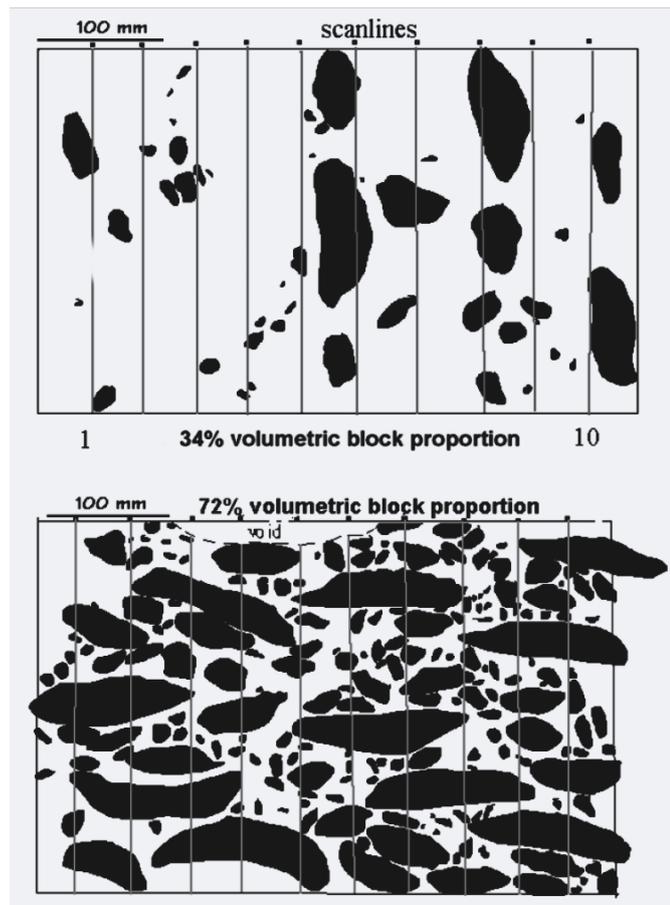


Figura 4. Modelli fisici di mélanges con percentuali volumetriche e distribuzioni dimensionali dei blocchi note. (Medley, 2001)

Per i motivi citati, la frequenza corrispondente ai blocchi di grandi dimensioni risulta sottostimata, mentre quella dei blocchi di piccole dimensioni sovrastimata, come mostrato in Figura 5.

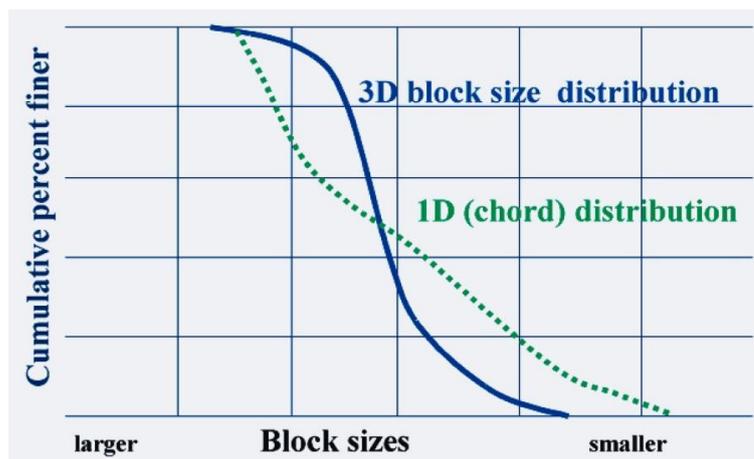


Figura 5. Curve di distribuzione dei blocchi tridimensionale e monodimensionale. (Medley, 2001)

La sottostima delle dimensioni dei blocchi da indagini geotecniche genera delle problematiche non trascurabili durante, ad esempio, lo scavo di un tunnel, che possono portare all'innalzamento dei costi dell'opera (Medley, 2001).

1.2. Autosomiglianza e dimensione frattale

Il concetto di autosomiglianza nell'ambito dei mélanges si applica, ad esempio, considerando un'immagine di un affioramento di mélange. Se, una porzione dell'immagine considerata presenta una distribuzione dei blocchi che appare simile a quella dell'area totale allora è possibile affermare che il mélange gode di proprietà di autosomiglianza (Medley, 1994). Inoltre, un sistema può essere definito autosimile se la dimensione frattale, D , è misurabile (Mandelbrot, 1983). La definizione della dimensione frattale è mostrata in Equazione (1).

$$D = \frac{\log N(r)}{\log(r)} \quad (1)$$

In cui:

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

Di conseguenza, la dimensione frattale corrisponde all'esponente in valore assoluto della legge di potenza. Convenzionalmente, i dati vengono rappresentati in scala bi-logaritmica e, quindi, la legge assume un'andamento lineare, come mostrato in Figura 6.

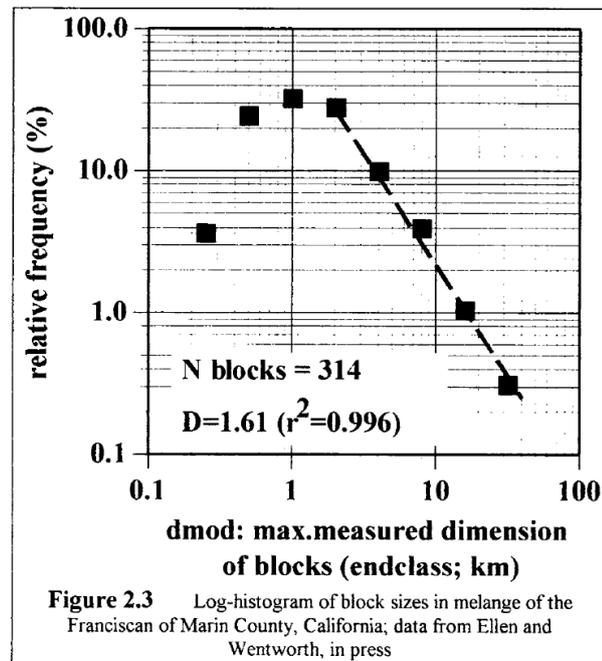


Figura 6. Andamento della legge di frequenza della distribuzione dei blocchi sul piano bi-logaritmico. (Medley, 1994)

Il fatto che le distribuzioni delle dimensioni dei blocchi possano essere rappresentate tramite diagrammi bi-logaritmici con tratti discendenti ben definiti e dimensioni frattali misurabili, suggerisce che il bimrock abbia proprietà di autosomiglianza, ma soltanto alla scala di osservazione. L'autosomiglianza è considerata un indicatore necessario ma non sufficiente per l'indipendenza di scala (Medley, 1994). L'indipendenza di scala richiede il confronto di diversi diagrammi a diverse scale di misurazione.

1.3. Indipendenza di scala delle distribuzioni dimensionali dei blocchi

In riferimento al Franciscan mélange, l'intervallo dimensionale dei blocchi è estremamente vasto. Esso varia dai millimetri della sabbia alle decine di chilometri degli ammassi montuosi, come illustrato in Figura 7, in cui sono rappresentate delle curve di distribuzione dimensionale dei blocchi normalizzate.

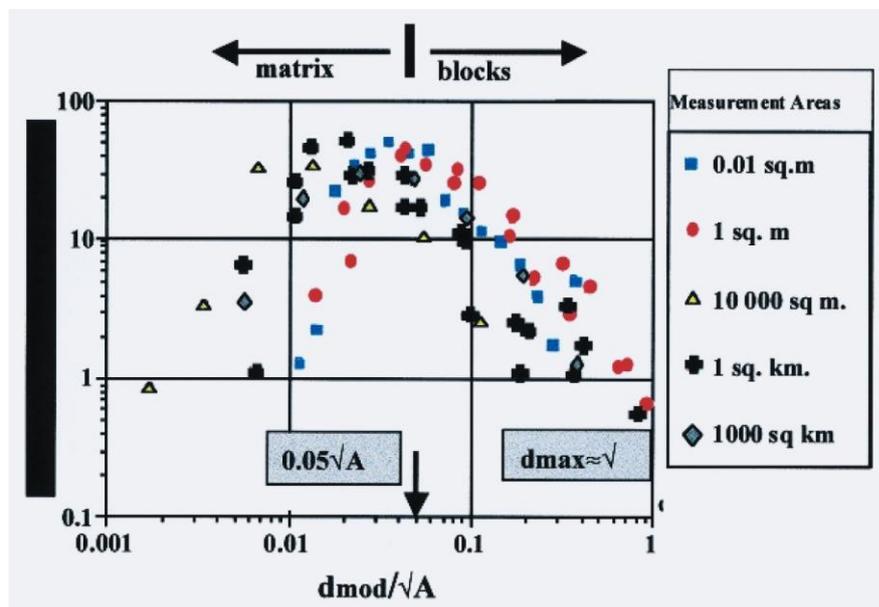


Figura 7. Leggi di distribuzione dimensionale dei blocchi normalizzate. (Medley, 2001)

Come è possibile notare, i blocchi sono stati misurati attraverso la loro massima dimensione osservabile, d_{mod} , normalizzata per la radice quadrata dell'area di osservazione, in modo tale da ottenere una grandezza adimensionale. La frequenza relativa dei blocchi è data dal rapporto tra il numero dei blocchi in ciascuna classe dimensionale e il numero totale dei blocchi all'interno dell'area di misurazione. Ciò consente di confrontare distribuzioni dimensionali che appartengono a scale di misurazione estremamente differenti. Risulta evidente che le curve rappresentate in Figura 7 abbiano una forma simile, indipendentemente dalla dimensione dell'area di misura. Ciò indica che le distribuzioni dimensionali dei blocchi godano della proprietà di indipendenza di scala (Medley, 2001).

I diagrammi presentano un picco in corrispondenza del valore $0.05 d_{mod}/\sqrt{A}$, definito come la soglia blocco/matrice a qualsiasi scala. I blocchi di dimensioni inferiori rispetto alla soglia tendono ad essere troppo piccoli per essere misurati e vengono quindi assegnati alla matrice. La dimensione massima indicata è approssimativamente pari a \sqrt{A} (in corrispondenza di $d_{mod}/\sqrt{A} = 1$) ma il 99% dei blocchi ha dimensioni inferiori a circa $0.75 d_{mod}/\sqrt{A}$, definita come la dimensione massima dei blocchi alla scala di interesse (d_{max}).

Poiché nei mélanges i blocchi sono sempre presenti, la distinzione tra blocchi e matrice dipende solo dalla scala di interesse. Infatti, blocchi considerati piccoli ad una determinata scala (ad esempio 1:1000), ad una scala maggiore (1:10000), vengono considerati parte della matrice. Analogamente, blocchi considerati grandi ad una determinata scala (ad esempio 1:10000) vengono considerati blocchi non significativi dal punto di vista geotecnico ad una scala più piccola (1:1000) perché risultano troppo grandi per essere considerati come blocchi individuali e, quindi, l'intera formazione geologica viene considerata come ammasso roccioso. Per questo motivo, nella pratica, risulta necessario stabilire una dimensione che descrive la geometria del problema.

1.4. Lunghezza caratteristica

Medley (2001) fornisce delle linee guida per fissare la lunghezza caratteristica, L_c , in un problema ingegneristico. Per prima cosa bisogna determinare l'area di interesse, A . Per un intero affioramento è possibile scegliere una lunghezza caratteristica pari a \sqrt{A} . Per uno scavo o una trincea si può utilizzare l'altezza di scavo. Alla scala dello scavo complessivo si misura l'intera area A e si sceglie \sqrt{A} . Per una frana è possibile scegliere la profondità della superficie di rottura. Per plinti di fondazione si può usare la larghezza del plinto. Se si stanno realizzando dei pali all'interno di un bimrock è possibile fissare la lunghezza caratteristica pari al diametro dei pali. Per i tunnel, alla scala della lunghezza complessiva del tunnel bisogna misurare l'area A e scegliere \sqrt{A} . Alla scala del fronte di scavo è possibile utilizzare il diametro del tunnel. Per fondazioni di dighe bisogna scegliere tra la larghezza della diga, l'altezza della diga, la radice dell'area d'impronta oppure la profondità di una zona di rottura a taglio.

1.5. Stima della percentuale volumetrica dei blocchi

La stima della percentuale volumetrica dei blocchi è fondamentale per poter determinare le proprietà meccaniche del bimrock. La VBP può essere stimata per approssimazione misurando la percentuale areale dei blocchi da immagini di affioramenti oppure tramite percentuale lineare attraverso delle scanlines o fori di sondaggio. La percentuale areale dei blocchi è definita come il rapporto tra la somma delle singole aree dei blocchi e l'area totale dell'ammasso roccioso. La percentuale lineare dei blocchi è il rapporto tra la lunghezza delle corde e la lunghezza totale di perforazione. L'ipotesi che la percentuale areale o lineare dei blocchi sia equivalente alla reale percentuale volumetrica dei blocchi è valida soltanto se sono stati fatti un numero sufficiente di sondaggi. La minima lunghezza totale dei fori di sondaggio deve essere di almeno dieci volte il diametro massimo dei blocchi (Medley 2001), requisito raramente soddisfatto nella pratica.

Medley (1997) ha studiato l'errore nella stima della VBP basandosi sull'assunzione che la percentuale volumetrica dei blocchi sia coincidente con la percentuale lineare, analizzando modelli fisici di mélange con distribuzione dimensionale e percentuale volumetrica dei blocchi note. L'esperimento è stato eseguito su modelli sottoposti a centinaia di perforazioni e dimostra che la percentuale lineare dei blocchi deve essere modificata tramite un fattore di incertezza al fine di ottenere una stima corretta della VBP (Medley, 2001). L'errore dipende sia dalla lunghezza totale delle misurazioni lineari che dalla percentuale lineare dei blocchi stessa, come mostrato in Figura 8.

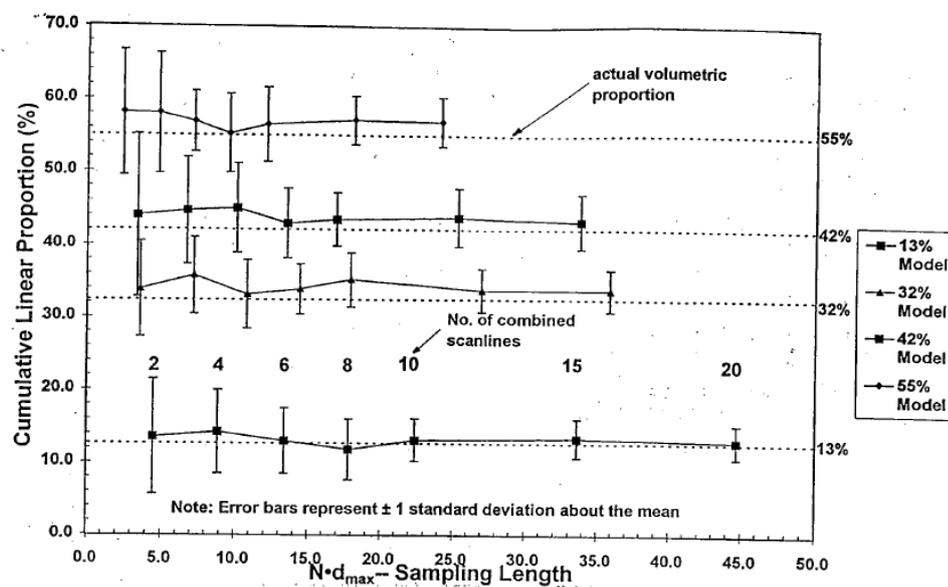


Figura 8. Percentuale lineare cumulata dei blocchi in funzione della lunghezza totale dei campioni espressa come multiplo della lunghezza del blocco di dimensioni maggiori. (Medley, 1997)

Al fine di assegnare i parametri di resistenza al bimrock, come suggerito da Medley (1997), risulta prudente e conservativo applicare il fattore di incertezza per difetto, riducendo la stima della percentuale volumetrica dei blocchi calcolata. Al contempo, però, a causa delle conseguenze economiche che può comportare una sottostima della VBP, risulta altresì prudente e conservativo aumentare la percentuale volumetrica stimata approssimando per eccesso. In Figura 9, è mostrato il fattore di incertezza.

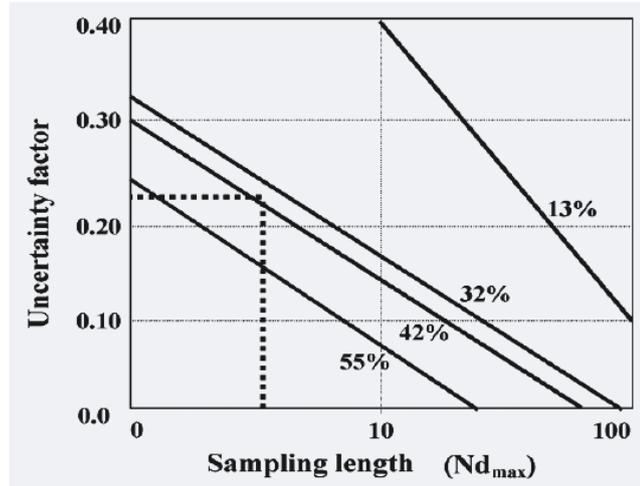


Figura 9. Fattore di incertezza in funzione della lunghezza totale dei campioni espressa come multiplo della lunghezza del blocco di dimensioni maggiori. (Medley, 2001)

1.6. Relazione tra resistenza e VBP

La resistenza complessiva del Franciscan mélange o di altri bimrock non dipende dalla resistenza dei blocchi. L'incremento di resistenza riscontrato da diversi autori (Lindquist, 1994; Irfan e Tang, 1993; Barbero et al., 2006; Napoli et al., 2018) è dovuto più al fatto che i blocchi rendano tortuosa la superficie di rottura che è costretta a svilupparsi attorno ad essi. Questa condizione, però, sussiste solo se è presente un contrasto meccanico tra blocchi e matrice, altrimenti, la superficie di rottura attraverserebbe i blocchi. Il contrasto di resistenza tra blocchi e matrice può essere espresso sia in termini di modulo di deformabilità che in termini di angolo di attrito, come mostrato nelle Equazioni (2) e (3).

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

$$\frac{\tan(\varphi)_{blocchi}}{\tan(\varphi)_{matrice}} \geq 2 \quad (3)$$

2. Analisi di stabilità di versanti in bimrock

Le difficoltà principali attinenti all'analisi di stabilità di pendii in bimrock non riguardano solo la complicata caratterizzazione geometrica e meccanica del materiale. Altri fattori fondamentali che influenzano considerevolmente la stabilità di un versante in bimrock risultano:

- percentuale volumetrica dei blocchi (VBP);
- distribuzione dimensionale dei blocchi;
- forma e orientazione dei blocchi.

All'aumentare della percentuale volumetrica si ha un incremento delle caratteristiche meccaniche del bimrock (Lindquist e Goodman, 1994), che può determinare un aumento dell'angolo di attrito fino a 20°. Ognuno di questi fattori, inoltre, può modificare lo sviluppo della superficie di scivolamento, incrementandone la tortuosità e, di conseguenza, incrementando il fattore di sicurezza del pendio. L'elevata differenza in termini di parametri di resistenza e deformabilità tra blocchi e matrice fa sì che le deformazioni di taglio si concentrino esclusivamente nella matrice, agitando i blocchi e rendendo il percorso della superficie di rottura più tortuoso rispetto a quello che si avrebbe in un mezzo omogeneo, aumentando la stabilità del versante. Risulta, quindi, evidente che trascurare la presenza dei blocchi sia una semplificazione tramite la quale si rischia di sottostimare in maniera considerevole le caratteristiche di resistenza di un pendio in bimrock. L'ipotesi di considerare il materiale omogeneo e di attribuire all'intero versante le proprietà meccaniche della sola matrice è molto diffusa nella pratica, poiché permette di utilizzare i metodi classici dell'equilibrio limite e di aggirare le difficoltà nella corretta valutazione della percentuale volumetrica e della distribuzione dimensionale dei blocchi.

Nel seguito si riassumono alcuni risultati presenti in letteratura, ottenuti da diversi autori che hanno indagato gli effetti della presenza delle inclusioni nei versanti in bimrock, sia mediante analisi di stabilità all'equilibrio limite (Irfan e Tang, 1993; Medley

e Sanz, 2004) sia mediante analisi numeriche (Barbero et al., 2007; Napoli et al, 2018; Liu et al., 2018).

2.1. Analisi di stabilità all'equilibrio limite

Irfan e Tang (1993) hanno eseguito delle analisi di stabilità su dei pendii teorici con presenza di inclusioni mediante formulazioni analitiche, in modo da indagare la resistenza a taglio di un deposito colluviale situato ad Hong Kong. In Figura 10 è rappresentato il modello di pendio analizzato. Esso ha un'altezza pari a 10 m ed un'inclinazione di circa 60°. All'interno del pendio sono stati inseriti dei blocchi di dimensioni uguali ed equamente distanziati, con una percentuale volumetrica compresa tra il 10% ed il 55%.

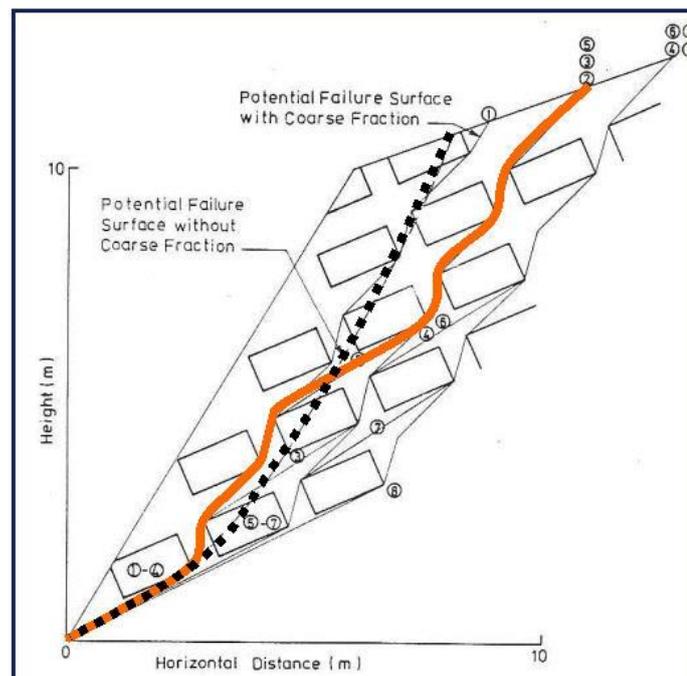


Figura 10. Modello di pendio studiato da Irfan e Tang (1993). La percentuale volumetrica dei blocchi è pari al 20%, la linea tratteggiata rappresenta la superficie di scivolamento per il modello di sola matrice mentre la linea arancione rappresenta la superficie di scivolamento del modello con blocchi. (Medley e Sanz, 2004)

Le conclusioni a cui arrivarono gli autori sono state che una percentuale volumetrica dei blocchi fino al 30% conferisce un incremento di resistenza relativamente basso, mentre per percentuali vicine al 55% si ha un incremento notevole della stabilità del

pendio. Inoltre, Irfan e Tang (1993) determinarono che, oltre alla VBP, la disposizione dei blocchi risulta un altro fattore molto importante per la stabilità. Infatti, i blocchi con le dimensioni maggiori orientate parallelamente alla superficie di scorrimento, hanno prodotto fattori di sicurezza normalizzati inferiori rispetto ai blocchi disposti in modo normale in relazione alla direzione di scorrimento complessiva. Il fattore di sicurezza normalizzato si definisce come il rapporto tra il fattore di sicurezza ottenuto dall'analisi in presenza di blocchi e quello ottenuto dal versante di sola matrice. Ciò è dovuto all'incremento della tortuosità della superficie di scivolamento che si sviluppa attorno ai blocchi.

A conferma di questa tesi, Medley e Sanz (2004) osservarono che quando i blocchi sono orientati con un angolo abbastanza simile rispetto a quello del versante, si ha un decremento della stabilità, come illustrato in Figura 11B, mentre per blocchi orientati con un angolo elevato rispetto a quello del pendio si osserva un incremento di resistenza (Figura 11C), dovuto all'aumento della tortuosità.

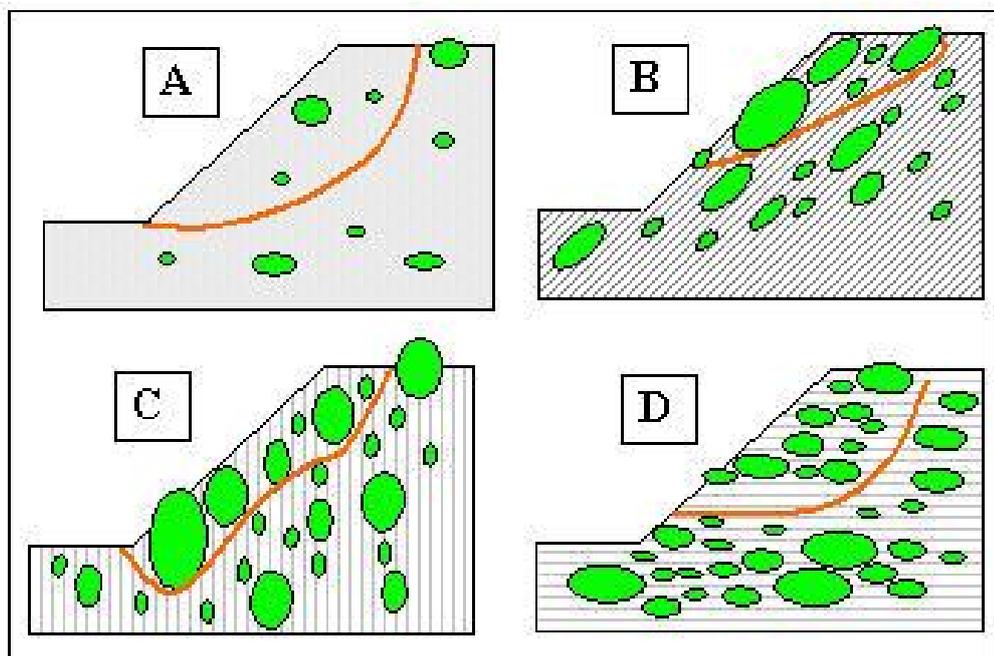


Figura 11. Alcune possibili configurazioni di versanti in bimrock. (Medley e Sanz, 2004)

In particolare, gli autori descrivono quattro possibili configurazioni di versanti in bimrock (Figura 11):

- A) bimrock con bassa percentuale volumetrica dei blocchi, la superficie di scivolamento non è ostacolata dalla presenza delle inclusioni;
- B) bimrock anisotropo, come il *mélange*, con blocchi e deformazioni di taglio con angolo di orientazione simile a quello del versante. La superficie di scivolamento è condizionata dalla disposizione dei blocchi;
- C) blocchi e deformazioni di taglio orientati verticalmente. La superficie di scivolamento risulta tortuosa e si ha un aumento della stabilità del versante;
- D) regioni di bimrock anisotropo con molti blocchi interrotte da zone con pochi blocchi in cui si sviluppa la superficie di rottura. La stabilità del versante è ridotta dalla presenza della pesante zona superiore, ricca di blocchi.

In Figura 12 è illustrato il modello di versante ideale sviluppato da Medley e Sanz (2003) per valutare l'incremento di stabilità dovuto alla presenza dei blocchi:

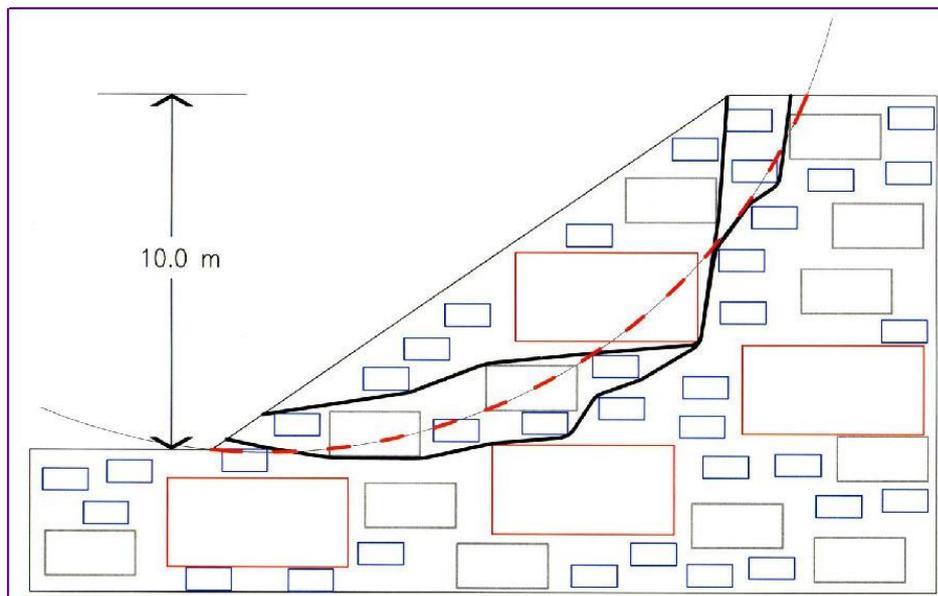


Figura 12. Esempio di modello di versante in bimrock con percentuale areale dei blocchi pari al 50% e blocchi distribuiti in maniera casuale. La linea tratteggiata indica la superficie di rottura per il pendio di sola matrice; le curve in nero mostrano due possibili superfici di rottura per il versante in bimrock. (Medley e Sanz, 2003)

Come mostrato in Figura 12, è stato utilizzato un modello con altezza pari a 10 m e inclinazione pari a 35°. Per modellare le inclusioni ellissoidiche tipiche del Franciscan *mélange*, sono stati utilizzati dei rettangoli orizzontali con rapporto tra i lati di 2:1,

inoltre, anche la distribuzione dimensionale dei blocchi è assimilabile a quella del Franciscan mélange (Medley e Lindquist, 1995). La percentuale volumetrica dei blocchi è stata posta equivalente a quella areale, anche se questa ipotesi non è generalmente valida per bimrock reali (Medley, 1997). Sono stati creati dei modelli con percentuale areale dei blocchi pari a 50%, 25% e 13%, oltre al modello di sola matrice. Il valore del fattore di sicurezza per il versante costituito da sola matrice è stato usato per normalizzare i risultati ottenuti per i modelli in bimrock.

Come è possibile notare in Figura 13, si ha una relazione tra il fattore di sicurezza normalizzato e la percentuale volumetrica dei blocchi (Medley e Sanz, 2004):

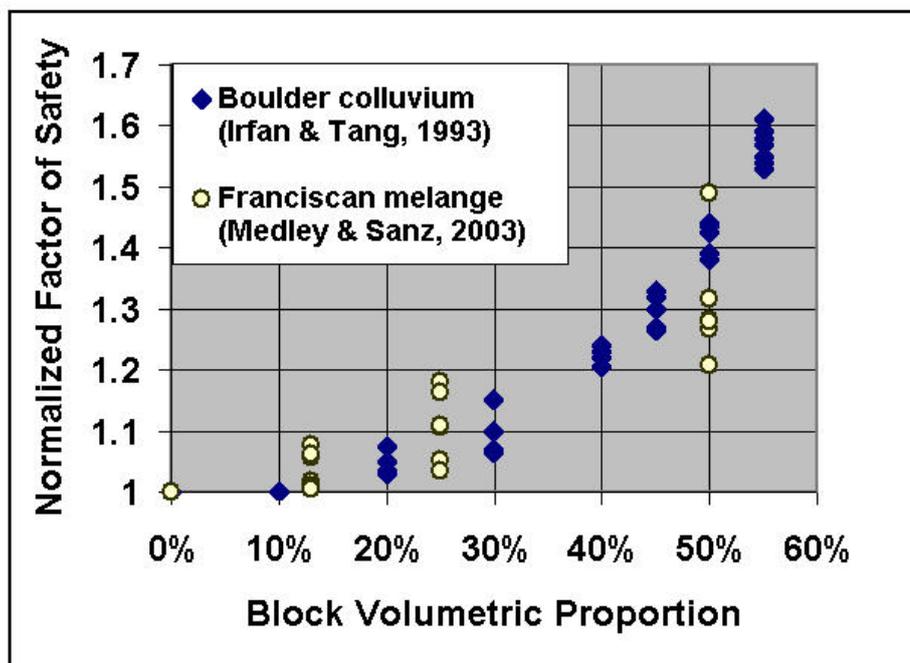


Figura 13. Confronto tra i risultati ottenuti da Irfan e Tang (1993) e Medley e Sanz (2003), in termini di fattore di sicurezza normalizzato. (Medley e Sanz, 2004)

A parità di tutte le altre variabili, il fattore di sicurezza dipende dall'incremento di tortuosità della superficie di rottura che si ha all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi (Medley e Sanz, 2004).

2.2. Analisi di stabilità tramite metodi numerici

Barbero et al. (2006) hanno studiato la stabilità di un versante in bimrock tramite analisi numeriche eseguite mediante il codice alle differenze finite FLAC (Itasca, 2000). L'oggetto dello studio è stato quello di indagare la variazione del fattore di sicurezza del pendio in funzione dei parametri che caratterizzano il bimrock. Le inclusioni, di forma ellittica, sono state inserite all'interno della matrice in maniera casuale, sia per quanto riguarda le dimensioni degli assi che le inclinazioni. Per fare ciò, è stato creato un codice che prevede i seguenti parametri di input:

- percentuale volumetrica dei blocchi (PV);
- l'esponente della distribuzione di frequenza delle dimensioni dei blocchi;
- le lunghezze degli assi delle inclusioni ellittiche;
- il rapporto tra gli assi (e);
- la direzione media;
- lo scarto del diametro massimo.

Il file di output generato dal codice contiene tutte le caratteristiche geometriche del pendio e dei blocchi e può essere importato all'interno del software di modellazione.

Le analisi sono state condotte su un versante ideale di geometria molto semplice, con percentuali volumetriche dei blocchi variabili (20%, 35% e 50%). Oltre alla PV, le variabili prese in considerazione sono state il rapporto tra i lati degli ellissi (0,25, 0,5 e 1,0) e le inclinazioni dei blocchi (0°, 45°, 90° e 135°).

In Figura 14, è mostrato il modello del versante analizzato con le diverse percentuali volumetriche.

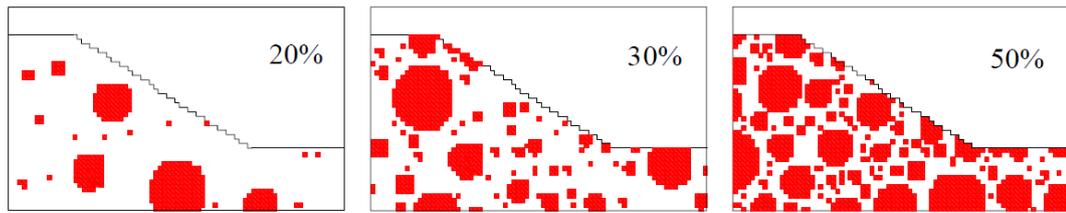


Figura 14. Modelli di versante con differenti percentuali volumetriche dei blocchi. (Barbero et al., 2006)

In Figura 15 sono rappresentate le principali caratteristiche geometriche dei blocchi, mentre in Tabella 1, si riportano le caratteristiche dei materiali.

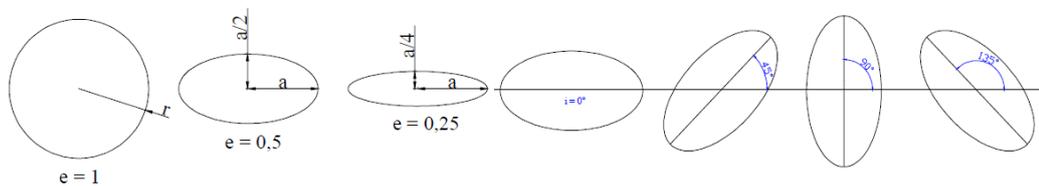


Figura 15. Rapporto tra gli assi e inclinazioni dei blocchi. (Barbero et al., 2006)

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

Tabella 1. Principali proprietà meccaniche dei materiali. (Barbero et al., 2006)

I risultati ottenuti, come è possibile notare dalla Figura 16, sono in accordo con le considerazioni fatte per le analisi all'equilibrio limite, ovvero:

- al crescere della percentuale volumetrica dei blocchi si ha un incremento del fattore di sicurezza; l'influenza dei blocchi sul fattore di sicurezza è maggiore per PV superiori al 20% mentre per valori al di sotto di questa soglia l'incremento di resistenza è trascurabile;

- la forma delle inclusioni influisce sull'aumento del fattore di sicurezza e, in particolare, l'incremento è maggiore per blocchi di forma più allungata e minore per blocchi di forma circolare; ciò è dovuto, probabilmente, al fatto che la superficie di scivolamento risulta più tortuosa per inclusioni di forma ellittica;
- la percentuale volumetrica dei blocchi condiziona anche lo sviluppo della superficie di scorrimento, infatti, per PV del 20% si hanno volumi mobilitati maggiori, simili a quello riscontrato nel versante costituito da sola matrice, mentre per PV superiori i volumi instabili diminuiscono;
- l'influenza dell'inclinazione dei blocchi sul fattore di sicurezza non è chiara.

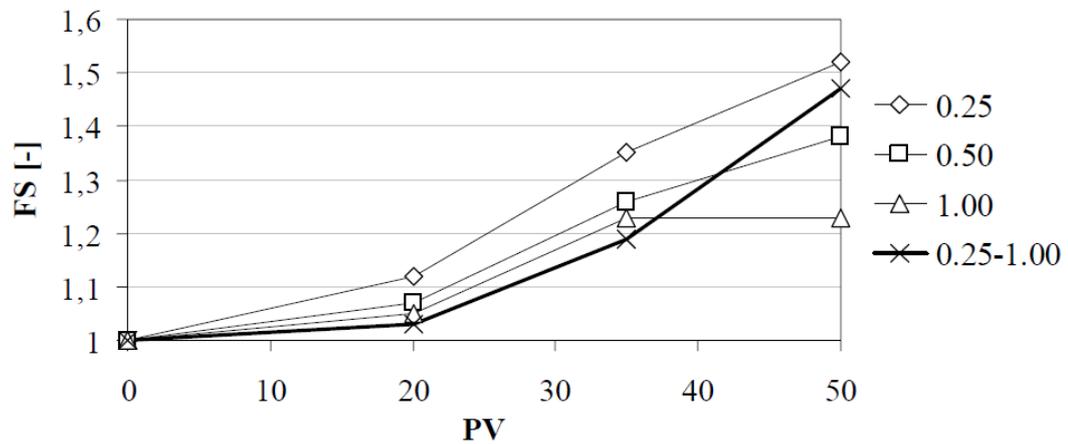


Figura 16. Fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi. (Barbero et al., 2006)

Oltre all'analisi eseguita tramite metodi numerici, l'innovazione proposta da Barbero et al. è stata quella di utilizzare un processo di estrazione dei blocchi basato su un approccio statistico, approfondito ulteriormente da Napoli et al. (2018).

Il lavoro svolto da Napoli et al. (2018) sulla stabilità di versanti in bimrock si basa sia su analisi all'equilibrio limite che su analisi numeriche agli elementi finiti. I modelli bidimensionali dei versanti presentano una geometria molto semplice:

- altezza pari a 50 m;
- inclinazione pari a 30°;
- differenti percentuali volumetriche dei blocchi (25%, 40%, 55% e 70%).

Le inclusioni sono state inserite all'interno della matrice in maniera casuale tramite un codice Matlab per tener conto della loro variabilità spaziale e dimensionale. Sono state eseguite dieci analisi numeriche per ogni percentuale volumetrica, considerando configurazioni diverse dei blocchi, in maniera da ottenere una valenza statistica dei risultati. I diametri delle inclusioni, di forma circolare, sono stati ricavati tramite la funzione di probabilità cumulata illustrata in Equazione (4).

$$F(d) = \frac{(a^{1+q} - d^{1+q})}{(a^{1+q} - b^{1+q})} \quad (4)$$

La funzione densità di probabilità risulta (Equazione (5)).

$$f(d) = -\frac{(1+q)}{(a^{1+q} - b^{1+q})} d^q \quad (5)$$

In cui i parametri sono definiti come:

- q è la dimensione frattale;
- a è il diametro minimo dei blocchi corrispondente al 5% dell'altezza del pendio;
- b è il diametro massimo, corrispondente al 75% dell'altezza del pendio;
- d è il diametro dei blocchi.

In Tabella 2, sono riportati i parametri dei materiali.

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

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dei materiali. (Napoli et al., 2018)

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb. I materiali sono stati ipotizzati eterogenei ed isotropi, con comportamento elasto-plastico perfetto.

In Figura 17, è mostrato un esempio di modello utilizzato per le analisi agli elementi finiti.

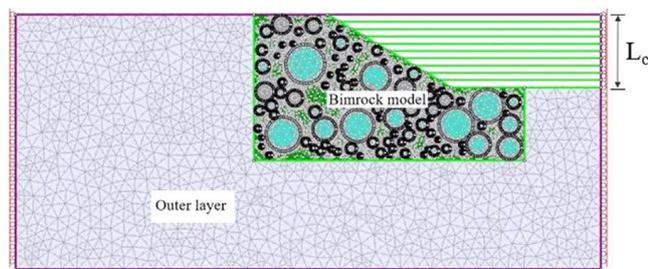


Figura 17. Esempio di modello di pendio realizzato tramite Phase 2 (vers. 8). (Napoli et al., 2018)

Come è possibile notare, è stata utilizzata una mesh più fitta in prossimità dei blocchi ed una meno fitta nella zona esterna al pendio. A quest'ultima, è stato assegnato un comportamento elastico con caratteristiche identiche a quelle della matrice, in maniera tale da evitare l'influenza delle condizioni al contorno. Inoltre, per evitare disturbi tensionali, è stato performato uno scavo in dieci stage successivi che definisce il profilo del versante.

I risultati delle analisi FEM in termini di fattore di sicurezza sono illustrati in Figura 18.

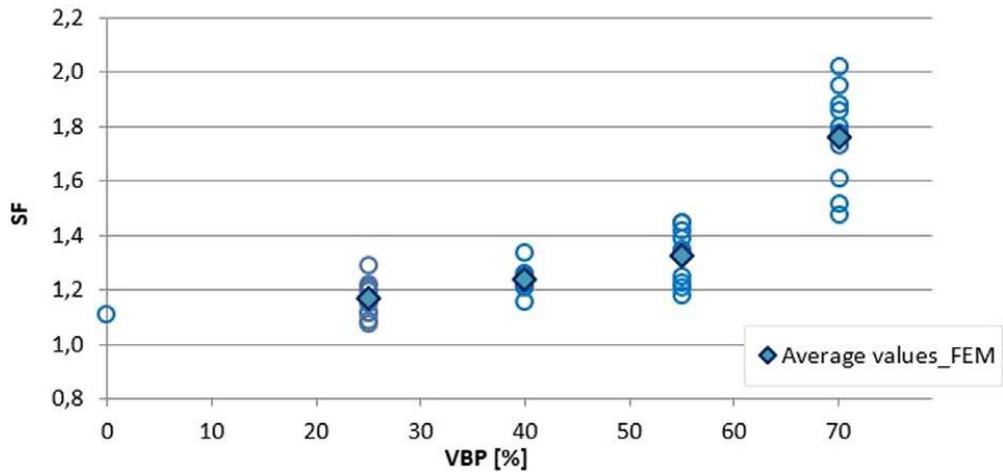


Figura 18. Valori del fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi FEM. (Napoli et al., 2018)

In Figura 19, sono mostrati i valori del volume potenzialmente instabile relativo all'analisi agli elementi finiti.

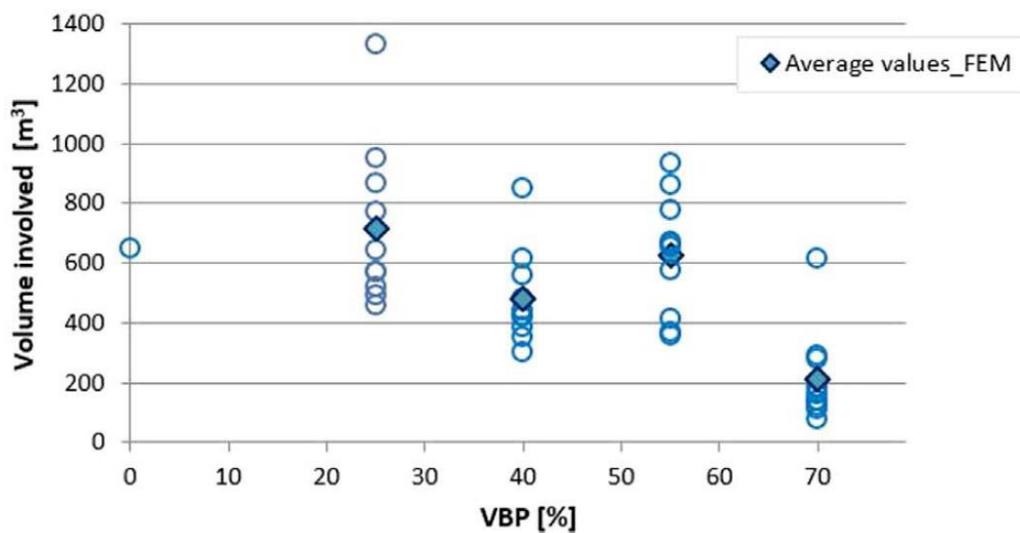


Figura 19. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi FEM. (Napoli et al., 2018)

I risultati delle analisi all'equilibrio limite sono illustrati in Figura 20 e in Figura 21.

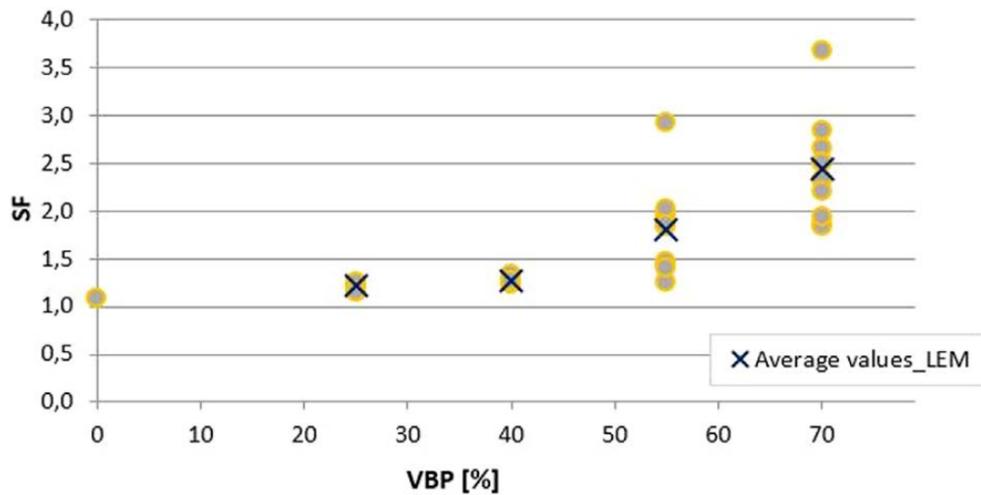


Figura 20. Valori del fattore di sicurezza in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi LEM. (Napoli et al., 2018)

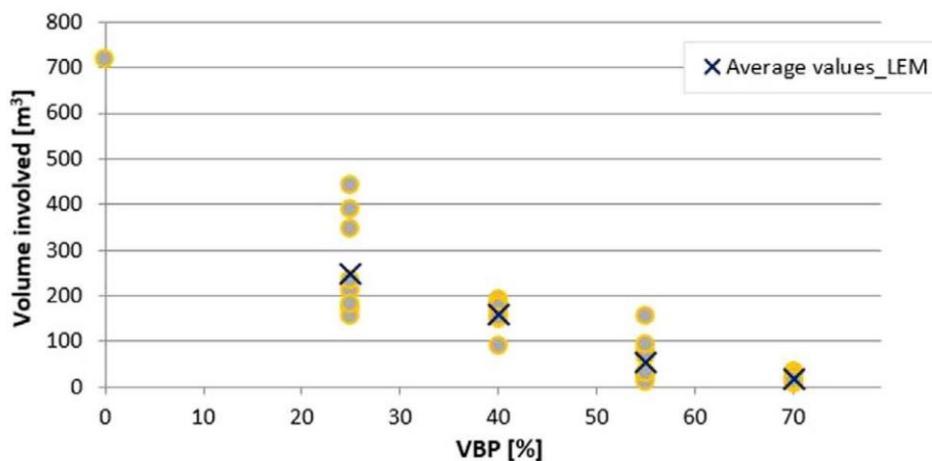


Figura 21. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi per le analisi LEM. (Napoli et al., 2018)

I risultati ottenuti evidenziano, innanzitutto, che il fattore di sicurezza corrispondente al pendio costituito da sola matrice risulta significativamente inferiore rispetto ai valori del fattore di sicurezza che si hanno per i versanti con presenza di blocchi. Trascurare la presenza delle inclusioni, quindi, porta ad una sottostima della resistenza del

pendio. Inoltre, la superficie di scivolamento individuata porta ad una stima scorretta del volume potenzialmente instabile.

Sia per le analisi agli elementi finiti che per quelle all'equilibrio limite si ha un incremento del fattore di sicurezza all'aumentare della VBP, in accordo con i risultati ottenuti dagli studi condotti da Irfan e Tang (1993), Medley e Sanz (2004) e Barbero et al. (2006). Inoltre, l'aumento del fattore di sicurezza per VBP pari al 25% risulta poco significativo, mentre per percentuali del 55% e 70% l'incremento di resistenza è notevole.

Le analisi effettuate tramite LEM evidenziano una marcata sovrastima del fattore di sicurezza ed una sottostima dei volumi potenzialmente instabili. Ciò è dovuto al fatto che i metodi di analisi all'equilibrio limite prevedono l'individuazione di una superficie di rottura circolare e quindi non realistica; questa, infatti, non può svilupparsi attorno ai blocchi in maniera tortuosa. Il contributo di resistenza dovuto ai blocchi (che presentano caratteristiche meccaniche notevolmente superiori a quelle della matrice) porta ad avere superfici di scivolamento molto poco profonde rispetto a quelle che ci si aspetterebbe e quindi a valori elevati del fattore di sicurezza e a bassi valori del volume potenzialmente instabile, come è possibile notare nelle immagini di confronto in Figura 22.

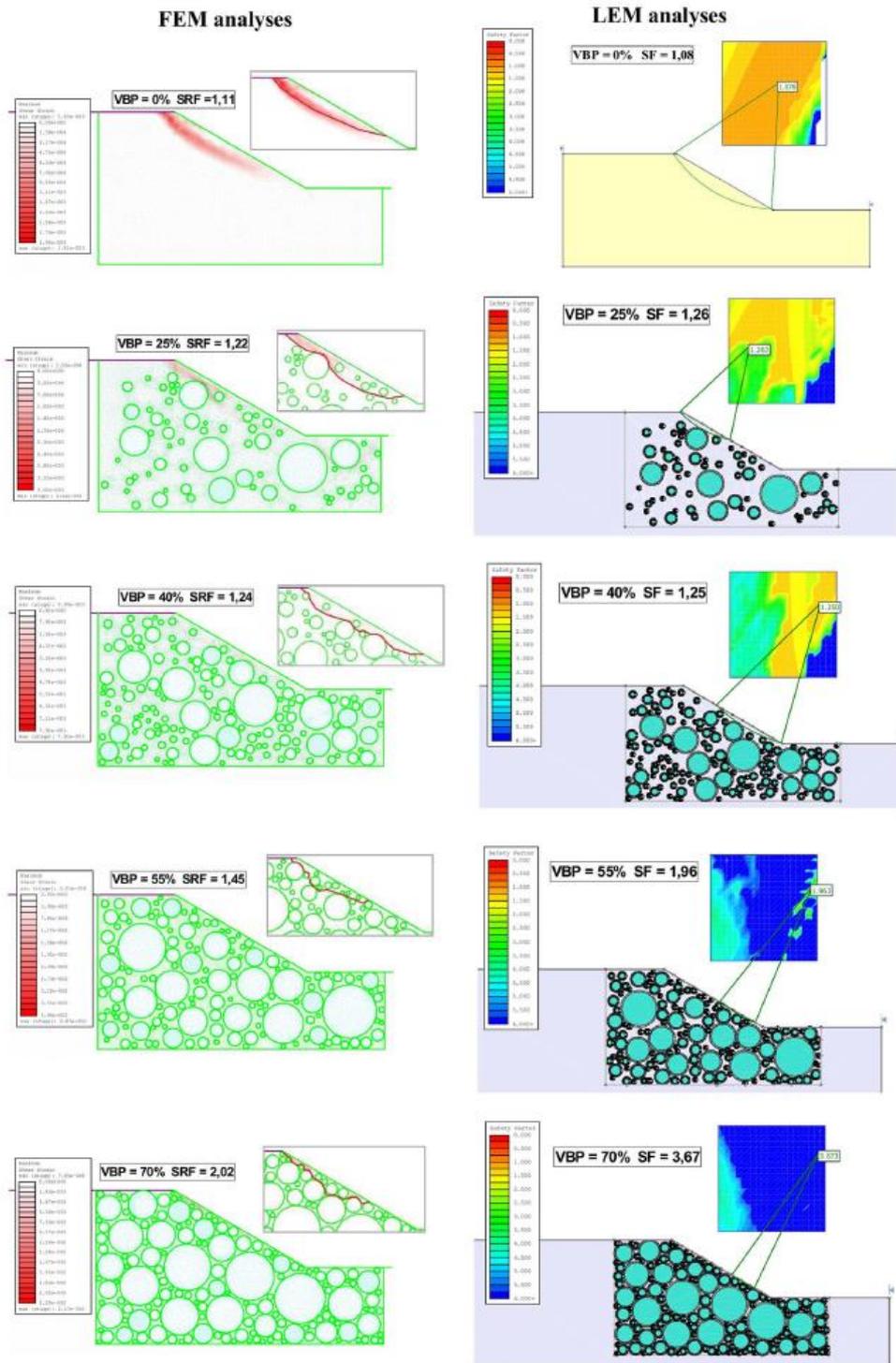


Figura 22. Confronto tra i risultati ottenuti tramite FEM e LEM in termini di fattore di sicurezza e superficie di scivolamento per una delle dieci estrazioni per ogni percentuale volumetrica dei blocchi considerata. (Napoli et al., 2018)

Oltre alle analisi FEM e LEM mediante approccio stocastico, Napoli et al. hanno eseguito delle ulteriori analisi utilizzando i metodi empirici di Lindquist (1994) e Kalender (2014), i quali prevedono la realizzazione di modelli omogenei con caratteristiche di resistenza incrementate rispetto a quelle della sola matrice, per tenere conto della presenza dei blocchi.

In Figura 23 e Figura 24, è possibile osservare un confronto tra i valori delle analisi stocastiche e quelli ottenuti tramite i metodi empirici.

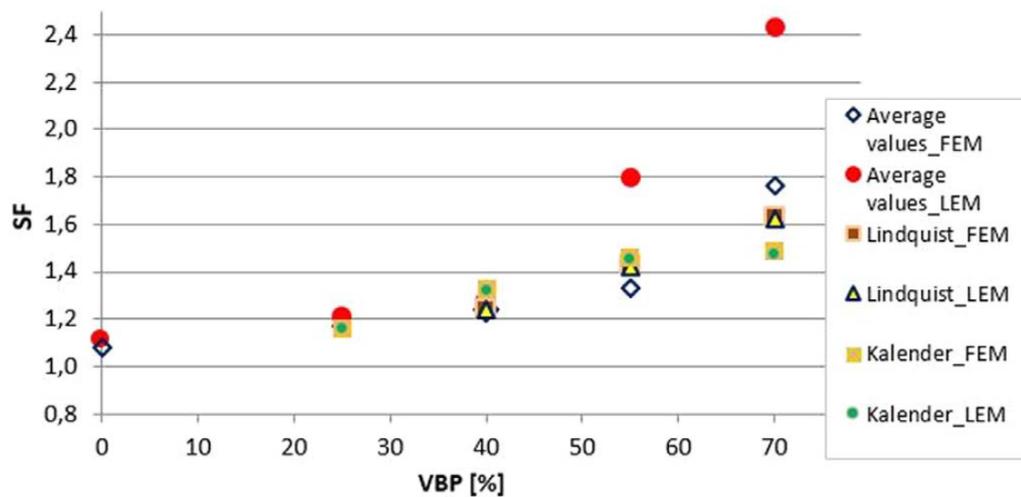


Figura 23. Valori del fattore di sicurezza in funzione della VBP per i vari metodi di analisi utilizzati. (Napoli et al., 2018)

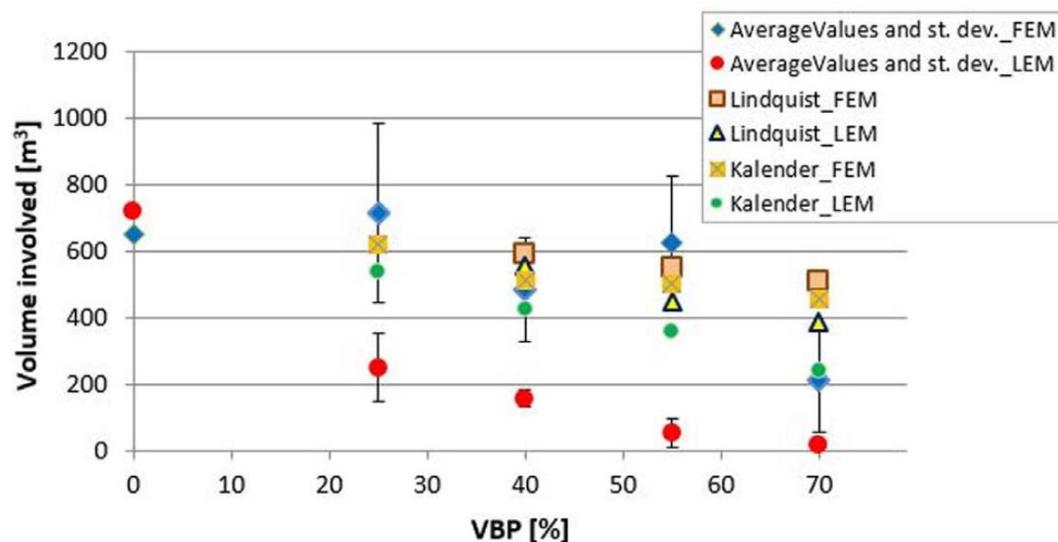


Figura 24. Valori del volume potenzialmente instabile in funzione della VBP per i vari metodi di analisi utilizzati. (Napoli et al., 2018)

Come è possibile notare, i valori ottenuti tramite approccio di Lindquist sono molto simili rispetto ai valori medi delle analisi stocastiche agli elementi finiti, mentre si hanno delle differenze statisticamente rilevanti per quanto riguarda il metodo empirico di Kalender. Inoltre, poiché gli approcci del continuo equivalente non permettono l'individuazione della corretta superficie di scivolamento, è evidente che l'approccio stocastico risulta essenziale per l'analisi di versanti eterogenei di questo tipo.

Il metodo utilizzato da Liu et al. (2018) si basa su quattro passaggi principali:

- individuazione della posizione reale e dei parametri dei blocchi;
- generazione casuale delle linee che circoscrivono i blocchi;
- analisi tramite metodo alle differenze finite del modello corrispondente;
- valutazione dei risultati dell'analisi di stabilità.

Per la definizione dei parametri strutturali del modello di versante è stato utilizzato un approccio basato sia su prove in situ a piccola scala che su un'analisi fotografica. In particolare, è stata scattata una fotografia di un versante, adiacente a quello analizzato, in cui si era verificata una frana e, mediante il software Adobe Photoshop, sono state identificate le inclusioni rocciose e la matrice, sulla base della differenza di colore RGB. In Figura 25, è illustrata l'immagine iniziale in scala di grigi e l'immagine binaria ricavata.

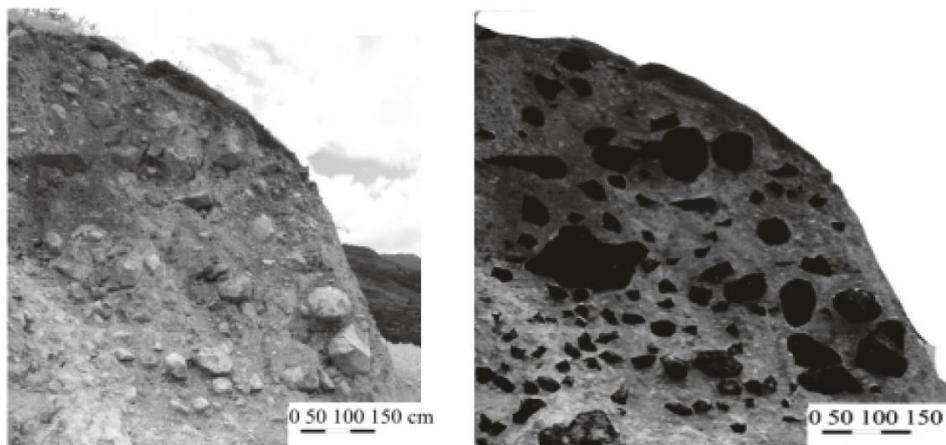


Figura 25. Immagine del versante adiacente a quello analizzato (a sinistra) e immagine binaria associata (a destra). (Liu et al., 2018)

Successivamente, a causa dell'alto contenuto dei blocchi, il processo di individuazione manuale sarebbe stato troppo complicato e poco efficiente. È stato quindi sviluppato un codice che identifica le inclusioni posizionando una griglia sull'immagine a cui appartengono punti di coordinate ben definite. A ciascun punto della griglia è stato associato il corrispondente valore RGB, come mostrato in Figura 26.

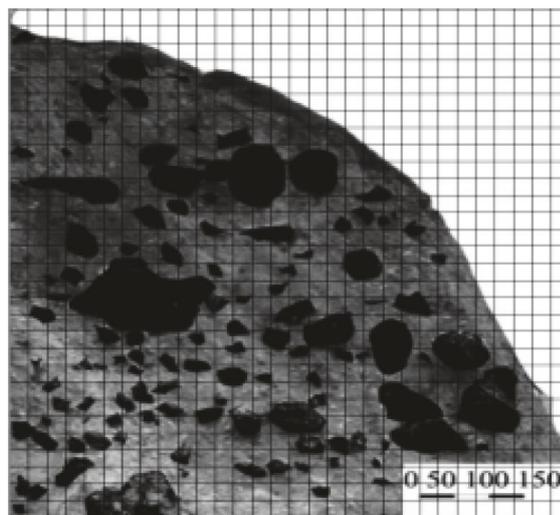


Figura 26. Sovrapposizione della griglia all'immagine binaria. (Liu et al., 2018)

Il codice, basandosi sui valori RGB, è in grado di individuare le inclusioni e assegnare ad esse il diametro massimo d_{max} , il diametro minimo d_{min} e il coefficiente di distorsione $\delta = d_{max} / d_{min}$, come mostrato in Figura 27.

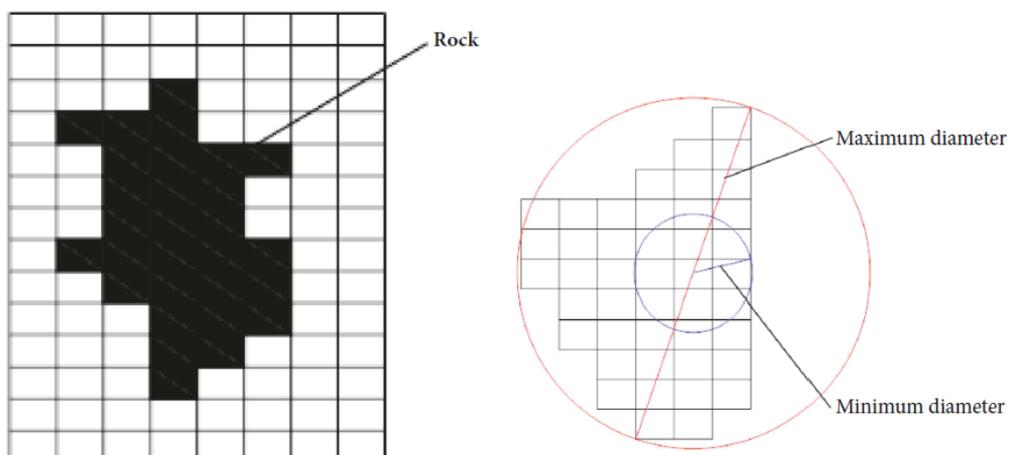


Figura 27. Processo di individuazione dei blocchi (a sinistra) e di assegnazione delle dimensioni (a destra). (Liu et al., 2018)

Sulla base dei dati ottenuti dall'analisi fotografica ed associando le dimensioni del modello del pendio, è stato possibile generare i blocchi approssimandoli a dei poligoni.

L'analisi di stabilità è stata effettuata tramite il software alle differenze finite Midas GTS, che permette di calcolare il fattore di sicurezza tramite il metodo SSR. In Tabella 3, sono illustrati i parametri dei materiali utilizzati per la modellazione.

	Matrice	Blocchi
Densità [kN/m ³]	1,80	2,41
Modulo di Young [kPa]	50	20000
Coefficiente di Poisson [-]	0,35	0,2
Coesione [kPa]	30	900
Angolo di attrito [°]	24	42

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche dei materiali. (Liu et al., 2018)

Per valutare l'influenza della presenza dei blocchi nel versante, è stata effettuata una prima analisi sul pendio omogeneo costituito da sola matrice, ottenendo un fattore di sicurezza pari a 1,01, come mostrato in Figura 28.

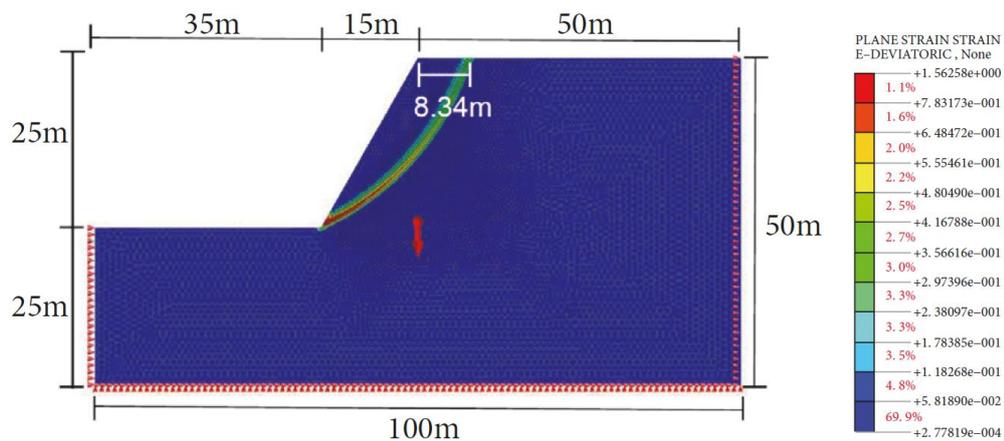


Figura 28. Modello del versante costituito da sola matrice. (Liu et al., 2018)

Come è possibile notare dalla Figura 29, una volta inseriti i blocchi all'interno del modello, la superficie di scivolamento risulta più tortuosa e, di conseguenza, il fattore di sicurezza più elevato (1,18).

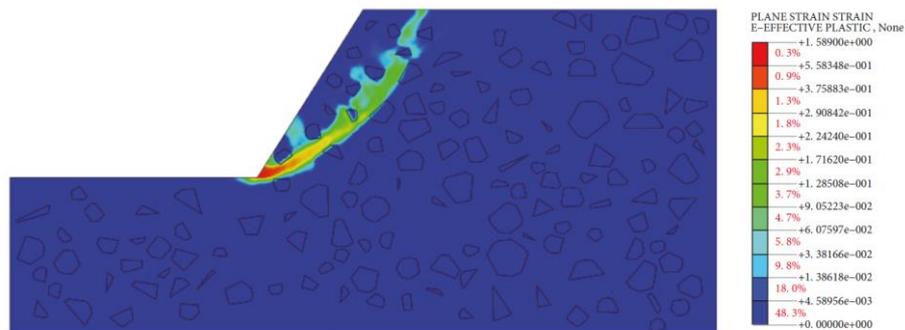


Figura 29. Modello del versante con presenza di blocchi. (Liu et al., 2018)

Inoltre, per valutare l'influenza della posizione dei blocchi di grandi dimensioni in prossimità della superficie di scivolamento, sono stati creati quattro modelli differenti, come mostrato in Figura 30.

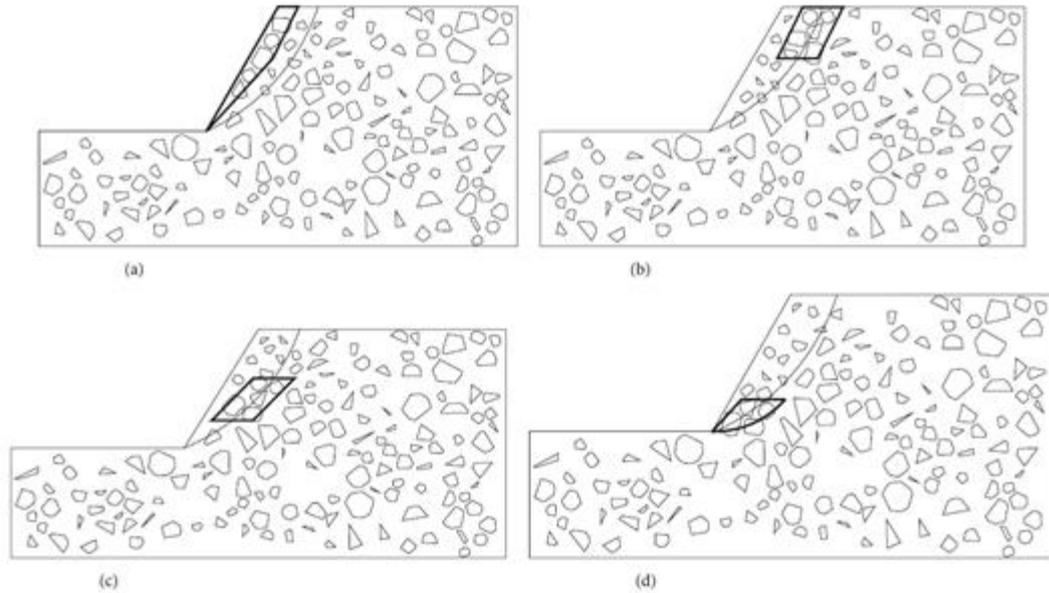


Figura 30. (a) Blocchi di grandi dimensioni posizionati in prossimità della superficie del pendio; (b) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte superiore della superficie di scivolamento del pendio; (c) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte centrale della superficie di scivolamento del pendio; (d) Blocchi di grandi dimensioni posizionati nella parte inferiore della superficie di scivolamento del pendio. (Liu et al., 2018)

I risultati delle analisi sono mostrati in Figura 31.

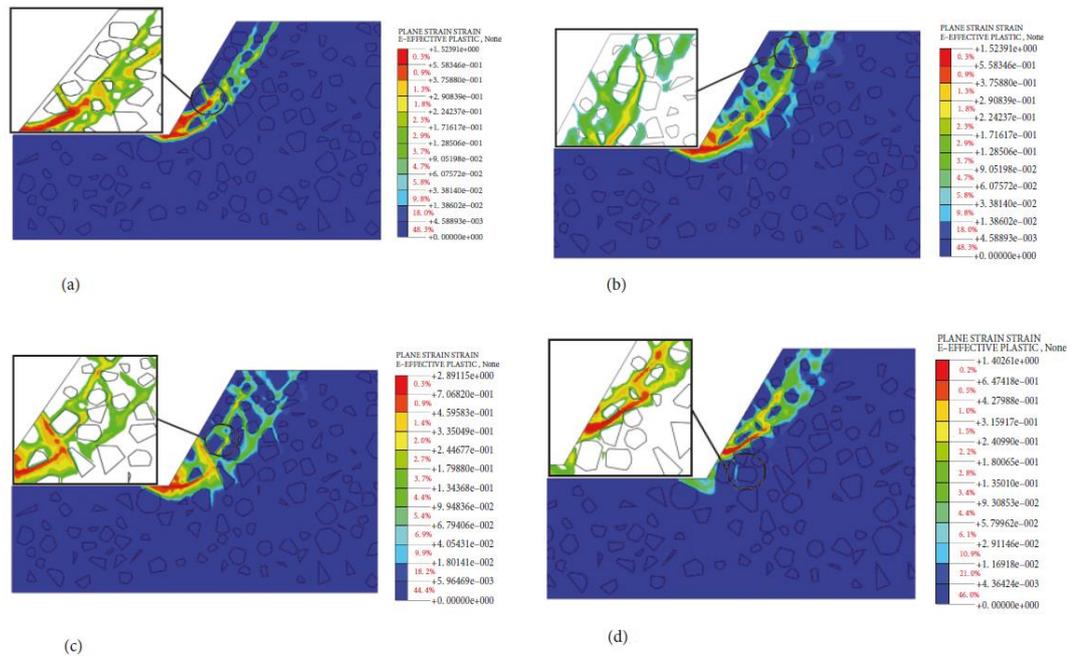


Figura 31. Risultati delle analisi numeriche sui modelli con posizione variabile dei blocchi di grandi dimensioni in termini di zone plastiche. (Liu et al., 2018)

Nel caso (a), l'incremento del fattore di sicurezza risulta trascurabile (1,188), mentre nei casi (b) e (c) il fattore di sicurezza risulta, rispettivamente, pari a 1,316 e 1,437, denotando un notevole incremento di stabilità rispetto al caso precedente. Tuttavia, l'aumento del fattore di sicurezza più marcato si ha in corrispondenza del modello con i blocchi di grandi dimensioni posizionati al piede (d), con un valore pari a 1,492.

Liu et al. hanno quindi evidenziato come la distribuzione dei blocchi abbia un ruolo fondamentale nello sviluppo della superficie di scivolamento del pendio e che quindi non può essere trascurata nell'analisi di stabilità.

3. Realizzazione del modello per l'analisi di stabilità di versanti in bimrock

Nel presente capitolo verrà descritta la procedura utilizzata per la generazione di modelli bidimensionali agli elementi finiti utilizzati per l'analisi di stabilità di un versante teorico in bimrock dotato di una geometria molto semplice.

L'approccio utilizzato è un approccio stocastico, il quale prevede la generazione di inclusioni di forma ellittica all'interno di una matrice tramite estrazione casuale, in accordo con i dati presenti in letteratura. In particolare, sono state effettuate 15 estrazioni per ogni percentuale volumetrica dei blocchi indagata (25%, 40%, 55% e 70%) e per due tipologie di inclinazione dei blocchi rispetto all'orizzontale (random e 0°). In totale, sono stati ottenuti 120 modelli bidimensionali, che verranno confrontati con il modello teorico di sola matrice. Il confronto è dettato dal fatto che, molto spesso, nella pratica, il contributo di resistenza dovuto alla presenza delle inclusioni viene trascurato per ragioni di semplicità, poiché la caratterizzazione del bimrock risulta molto complessa sia dal punto di vista geometrico che meccanico. Nella pratica, quindi, si preferisce assegnare al modello le proprietà meccaniche della sola matrice, nonostante numerose evidenze scientifiche dimostrino che la presenza dei blocchi, soprattutto per alte VBP, dia un incremento in termini di fattore di sicurezza del pendio (Medley e Sanz, 2004; Barbero et al., 2006; Napoli et al., 2018).

Nel seguito, vengono elencati i passaggi principali per la generazione del modello, approfonditi nei successivi paragrafi:

- geometria del versante e generazione delle inclusioni: dopo aver definito la geometria del pendio, le inclusioni vengono posizionate casualmente al suo interno attraverso l'utilizzo di un codice Matlab che restituisce in output un file di testo contenente le dimensioni e la disposizione dei blocchi;
- preparazione del file geometrico: il file di testo viene importato in Autocad dopo essere stato convertito in formato script. Esso viene modificato

attraverso delle semplici operazioni, necessarie affinché il file .dxf generato possa essere letto dal software usato per la modellazione numerica;

- modellazione numerica: dopo aver stabilito alcune ipotesi di base e importato il file geometrico nel programma agli elementi finiti RS2, si procede con la modellazione numerica definendo le dimensioni del dominio, la discretizzazione degli elementi, le condizioni al contorno sia in termini di carichi che di spostamenti e le proprietà dei materiali;
- metodo SSR (Shear Strength Reduction): insieme ai risultati in termini di tensioni, deformazioni e spostamenti, il software fornisce anche il fattore SRF (Shear Reduction Factor), ovvero l'equivalente del fattore di sicurezza.

3.1. Geometria del versante

Le analisi bidimensionali agli elementi finiti sono state condotte su un modello con una geometria molto semplice. Il pendio teorico preso in esame ha un'inclinazione pari a 45° e un'altezza di 50 m, corrispondente alla dimensione caratteristica L_c . Il dominio è stato ottenuto estendendo la lunghezza L_c attorno al tratto inclinato, in direzione orizzontale e verticale.

In Figura 32 è mostrata una schematizzazione della geometria del versante in oggetto.

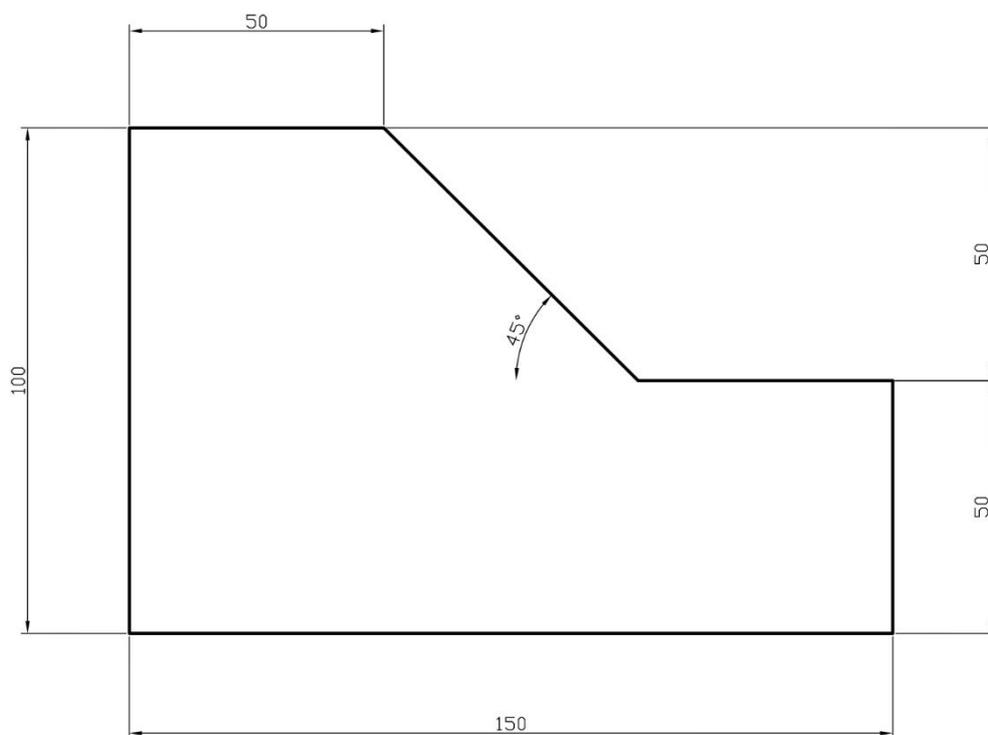


Figura 32. Schema geometrico del pendio. Le dimensioni sono espresse in metri.

La geometria del dominio viene implementata all'interno di un codice Matlab in maniera tale che i blocchi di forma ellittica siano distribuiti nel dominio senza sovrapposizioni e senza intersecarsi con i limiti del dominio stesso.

3.2. Generazione casuale dei blocchi

La posizione e la dimensione delle inclusioni all'interno del dominio vengono definite in maniera casuale, seguendo però una distribuzione dimensionale tipica del Franciscan Mélange, utilizzata precedentemente da Barbero et al. (2007, 2012) e Napoli et al. (2018), come mostrato in Equazione (6):

$$F(d) = \frac{(a^{1+q} - d^{1+q})}{(a^{1+q} - b^{1+q})} \quad (6)$$

In cui:

- q è la dimensione frattale, la quale, nel caso in esame, viene posta pari a 1.99 per basse percentuali volumetriche, mentre viene assunta pari a 1.75 per le percentuali volumetriche più alte. Questa scelta è stata dettata dal fatto che per alte VBP il numero di blocchi generati è tale da causare problemi nell'importazione di tali blocchi all'interno del modello bidimensionale agli elementi finiti. I valori suggeriti in letteratura riguardo al parametro q sono compresi tra 1 e 2;
- a rappresenta il valore minimo ammesso per la dimensione dei blocchi, corrispondente al 5% della dimensione caratteristica L_c ;
- b rappresenta il valore massimo ammesso per la dimensione dei blocchi, corrispondente al 75% della dimensione caratteristica L_c ;
- d è il valore corrispondente all'asse maggiore dei blocchi, compreso tra a e b .

La funzione densità di probabilità corrispondente è illustrata in Equazione (7):

$$f(d) = -\frac{(1+q)}{(a^{1+q} - b^{1+q})} d^q \quad (7)$$

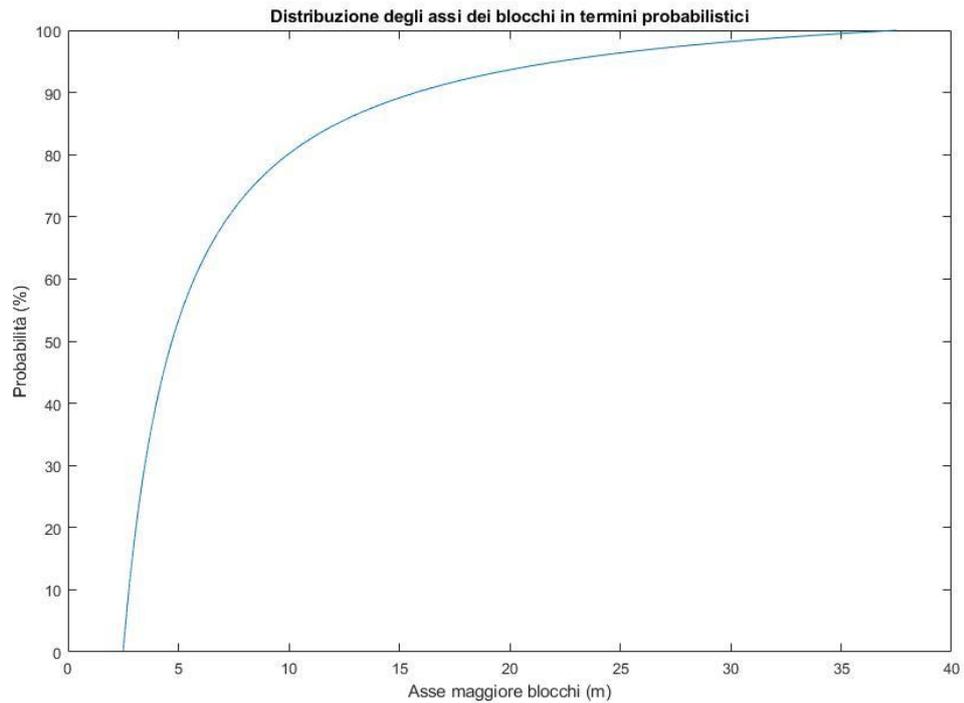


Figura 33. Distribuzione degli assi dei blocchi in termini probabilistici

Dalla Figura 33 è possibile notare come quasi il 60% dei blocchi abbia dimensione inferiore a 5 m, mentre solo il 10% supera i 15 m.

Una volta implementata nello script Matlab la distribuzione dimensionale dei blocchi all'interno del dominio, i valori di input richiesti sono:

- le dimensioni geometriche del dominio;
- l'eccentricità dei blocchi;
- l'angolo di inclinazione dei blocchi;
- la percentuale volumetrica dei blocchi (VBP).

Per quanto riguarda la percentuale volumetrica dei blocchi, si ipotizza che essa corrisponda alla percentuale areale, infatti, il codice definisce la VBP come rapporto tra l'area delle inclusioni ellittiche e l'area totale del dominio, con una tolleranza pari ad 1/40.

Il lavoro presentato in questo elaborato prevede un totale di 120 estrazioni di blocchi ellittici di cui:

- 60 con angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale di 0° ed eccentricità pari a 0.866;
- 60 con angolo di inclinazione casuale rispetto all'orizzontale ed eccentricità pari a 0.5.

Inoltre, ogni set di 60 estrazioni è stato suddiviso equamente in base alla percentuale volumetrica. Le VBP utilizzate sono: 25%, 40%, 55% e 70%. In Figura 34 è illustrato l'output grafico generato dal codice Matlab per una estrazione con VBP pari a 25%, di blocchi ellittici con inclinazione 0° ed eccentricità pari a 0.866.

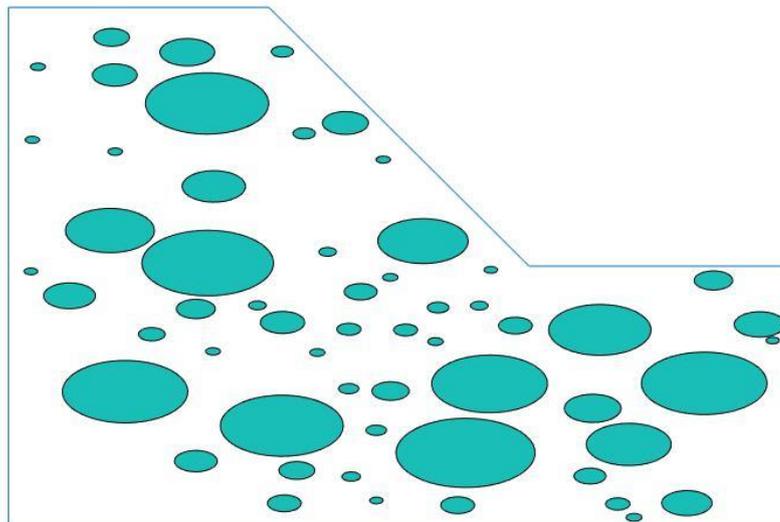


Figura 34. Esempio di distribuzione dei blocchi all'interno del dominio con VBP pari a 25%, inclinazione 0° ed eccentricità 0.866.

Come è possibile notare in Figura 34, le inclusioni non intersecano il dominio esterno né si hanno compenetrazioni tra blocchi. Ogni intersezione o compenetrazione tra le inclusioni comporterebbe una sottostima della VBP, per questo motivo è stata predisposta una distanza minima tra i blocchi e tra i blocchi e il contorno esterno del pendio pari a 10 cm.

Il file di output finale generato dal codice è un file in formato .txt contenente le coordinate cartesiane e le dimensioni delle ellissi. Una volta convertito il file .txt in file .scr, sarà possibile importarlo ed editarlo tramite il software Autocad.

3.3. Preparazione del file geometrico per il modello

Il file generato attraverso lo script Matlab non può essere utilizzato direttamente per creare il modello per l'analisi numerica ma deve prima subire dei passaggi intermedi. Innanzitutto, il file .scr contenente tutte le informazioni riguardo la posizione e le dimensioni delle inclusioni viene importato in Autocad attraverso la funzione "script", in un file con la geometria del pendio già predisposta. A questo punto, verranno visualizzate le ellissi all'interno del dominio come mostrato in Figura 35.

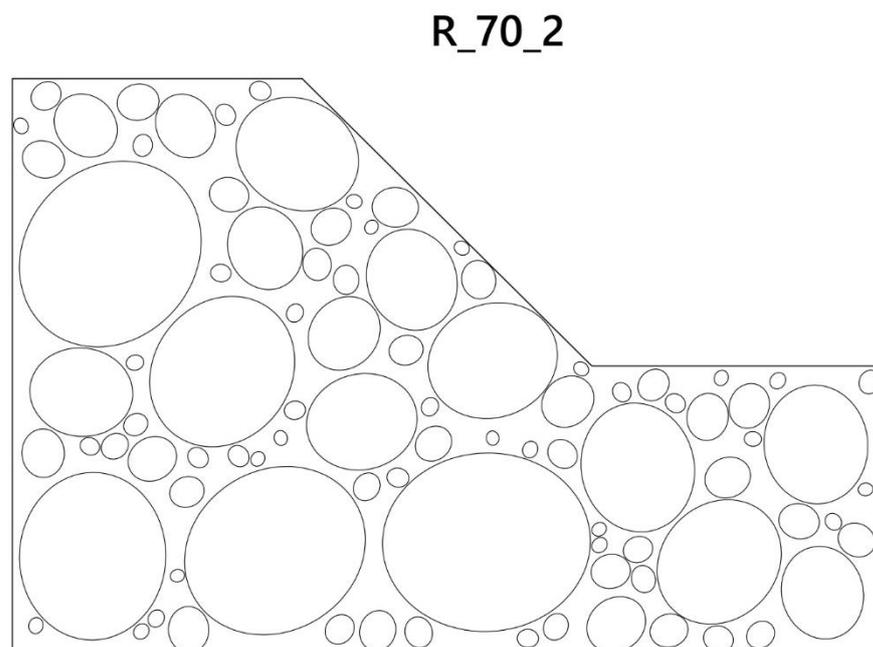


Figura 35. Rappresentazione geometrica della posizione e dimensioni delle ellissi in Autocad. Il file corrisponde alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.

Le ellissi saranno costituite da polilinee 3D e, affinché esse possano essere lette dal programma RS² (v. 10.0 Rocscience) utilizzato per la modellazione numerica, devono

essere convertite in polilinee semplici. Il primo passo è quello di salvare il file in formato R12/LT2, chiuderlo e riaprirlo. A questo punto, attraverso il comando "esplosi" e, successivamente, il comando "edita polilinea", è possibile convertire le polilinee tridimensionali in polilinee 2D. L'ultimo passaggio è quello di salvare nuovamente il file in formato .dxf.

3.4. Modellazione numerica: ipotesi di base

Come già anticipato nel paragrafo precedente, l'analisi numerica bidimensionale è eseguita mediante il software agli elementi finiti RS² della suite Rocscience. Prima di importare il file .dxf contenente le inclusioni all'interno del programma, si procede con l'assegnazione delle impostazioni iniziali. Nel menù *Analysis, Project settings, General*, sono presenti 2 opzioni, *Plane Strain* o *Axisymmetric*. Viene impostata la condizione di deformazioni piane, ovvero viene assunta l'ipotesi che il modello sia indefinitamente esteso nella direzione normale alla sezione piana di analisi. In un'analisi con ipotesi di deformazioni piane il software calcola:

- le tensioni principali maggiore e minore nel piano (Sigma 1 e Sigma 3);
- la tensione principale fuori dal piano (Sigma Z);
- spostamenti e deformazioni nel piano.

Per definizione, gli spostamenti e le deformazioni fuori dal piano sono nulle.

Nella scheda *Stages* viene impostato un numero pari a 11 in maniera tale da riprodurre la geometria del versante attraverso la simulazione di uno scavo progressivo che, nel caso di un pendio naturale, avviene effettivamente a seguito di processi di erosione dovuti all'azione di fenomeni naturali.

3.5. Convergence Type: Absolute Energy

Nella scheda Stress Analysis viene impostato come Convergence Type, Absolute Energy. Nonostante siano presenti tipi di convergenza migliorati dal punto di vista dell'affidabilità dei risultati, come ad esempio "Absolute Force and Energy", si è deciso di optare per questa tipologia di convergenza essenzialmente per congruenza rispetto ai risultati ottenuti con versioni precedenti del software, in maniera tale da rendere possibili dei confronti. In fase iniziale, infatti, sono state effettuate delle analisi con tipo di convergenza aggiornato all'ultima versione del software ma i risultati ottenuti mostravano una sottostima del fattore di sicurezza per basse percentuali volumetriche e una sovrastima per percentuali alte rispetto ai risultati ottenuti con le versioni precedenti del software, in cui il criterio di convergenza utilizzato era Absolute Energy. La differenza tra i due tipi di convergenza è spiegata nel seguito.

Per analisi agli elementi finiti statiche, l'equazione di equilibrio può essere scritta nella forma matriciale mostrata in Equazione (8):

$$K\Delta U = P - F \quad (8)$$

dove P rappresenta il vettore dei carichi applicati, F il vettore delle forze interne e ΔU il vettore degli spostamenti nodali. In analisi non lineari il carico P viene applicato tramite una serie di gradini di carico $P_{(1)}, P_{(2)}, P_{(3)}, \dots$

Per l' n -esimo gradino di carico, l'equazione (8) è spesso risolta attraverso iterazioni del tipo:

$$K\Delta U_{(i+1)} = P_{(n)} - F_{(i)} \quad i = 0,1,2, \dots \quad (9)$$

Il miglior metodo per spiegare il processo di risoluzione e la definizione di convergenza è mediante il caso semplice di una forza singola applicata ad una molla con comportamento non lineare. In questo caso, la relazione tra il carico applicato P e lo spostamento U è illustrata in Equazione (10):

$$KU = P - F \quad (10)$$

dove $K = K(U)$ è la rigidità non lineare della molla, funzione dello spostamento. Supponiamo di conoscere la soluzione (spostamento $U_{(n)}$) dopo l'applicazione del gradino di carico $P_{(n)}$ alla molla. L'obiettivo adesso è quello di determinare la risposta della molla (ovvero l'incremento di spostamento ΔU illustrato in Figura 36) con l'applicazione del gradino di carico $P_{(n+1)}$. Prima di applicare il nuovo gradino di carico, la forza resistente interna alla molla $F_{(0)}$ risulta essere in equilibrio con il carico esterno applicato $P_{(n)}$.

Per prima cosa, viene valutata la rigidità tangente $K_{(0)}$, all'origine della curva carico-spostamento. Questa rigidità verrà utilizzata in ogni iterazione, per ogni gradino di carico. Successivamente, verrà calcolato l'incremento di spostamento e la soluzione verrà aggiornata, come mostrato nelle equazioni (11),(12), e (13):

$$K_{(0)}\Delta U_{(1)} = P_{(n+1)} - F_{(0)} \quad (11)$$

$$\Delta U_{(1)} = K_{(0)}^{-1}(P_{(n+1)} - F_{(0)}) \quad (12)$$

$$U_{(n+1)} = U_{(n)} + \Delta U_{(1)} \quad (13)$$

Dallo stato di deformazione ottenuto, è possibile calcolare la forza interna alla molla, $F_{(1)}$. A questo punto, il "force error" o "load imbalance" $P_{(n+1)} - F_{(1)}$ è notevole. Dalla Figura 36 è evidente che l'obiettivo chiave delle iterazioni è quello di ridurre il "load imbalance" a zero, o, quantomeno, ad un valore molto piccolo.

Per la successiva iterazione, si parte da una nuova e più precisa stima dello spostamento, $U_{(n+1)}$, e si applica lo stesso gradino di carico $P_{(n+1)}$. Questa volta l'incremento di spostamento ottenuto, $\Delta U_{(2)}$, risulta minore rispetto all'incremento

$\Delta U_{(1)}$ dell'iterazione precedente. Seguendo la procedura descritta in precedenza, è possibile calcolare una nuova forza interna $F_{(2)}$ che è più vicina ad equilibrare il carico applicato.

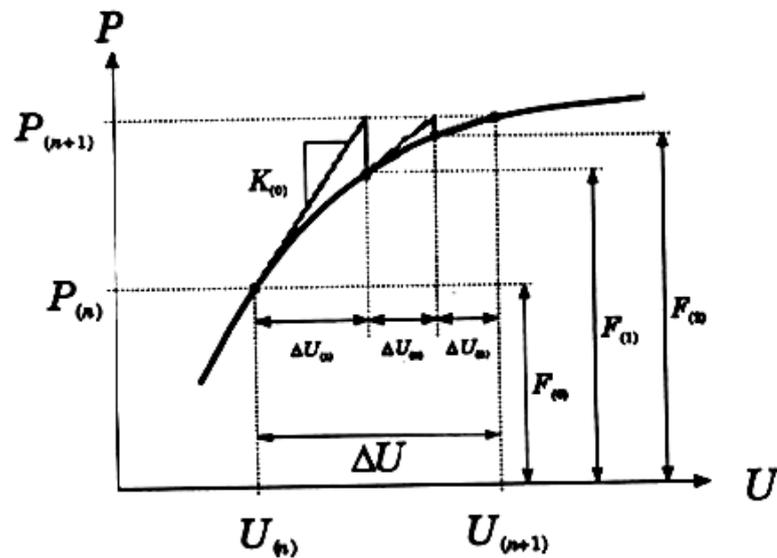


Figura 36. Risposta non lineare di una molla ai carichi applicati. Il problema presenta un singolo grado di libertà. La figura mostra anche il processo iterativo agli elementi finiti per determinare il comportamento della molla soggetta a carichi applicati. (https://www.rocscience.com/help/rs2/pdf_files/theory/Convergence_Criteria.pdf)

Di solito, continuando con le iterazioni, non solo il "load imbalance" $P_{(n+1)} - F_{(1)}$ diventa sempre più piccolo ma anche gli incrementi di spostamento $\Delta U_{(i)}$ tendono a zero e i valori di spostamento $U_{(n+1)}$ si avvicinano alla soluzione. Per non protrarre le iterazioni troppo a lungo, i calcoli vengono fermati quando i risultati sono "sufficientemente vicini" alla soluzione, secondo alcuni criteri specifici, alcuni dei quali sono illustrati nelle equazioni (14), (15) e (16):

- Absolute Energy

$$\left\| \frac{\Delta U_{(i)}^T (P_{(n)} - F_{(i)})}{\Delta U_{(0)}^T (P_{(n)} - F_{(0)})} \right\| < (\text{tolleranza di energia specificata}) \quad (14)$$

- Square Root Energy

$$\frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (p_{(n),j} - f_{(i),j}) \Delta u_{(i),j}}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (p_{(n),j} - f_{(0),j}) \Delta u_{(0),j}}^2}} < (\text{tolleranza di energia specificata}) \quad (15)$$

dove $p_{(n),j}$, $f_{(i),j}$, $f_{(0),j}$, $\Delta u_{(i),j}$ e $\Delta u_{(0),j}$ sono rispettivamente le componenti di $P_{(n)}$, $F_{(0)}$, $\Delta U_{(i)}$ e $\Delta U_{(0)}$.

Questo criterio implica semplicemente che, per un dato gradino di carico, le iterazioni cessano quando lo sbilancio energetico dello stato corrente diventa una piccola frazione dello sbilancio energetico iniziale (sbilancio energetico della prima iterazione). Se questa condizione non è soddisfatta durante un numero massimo di iterazioni specificato, si considera che il processo di soluzione non sia andato a convergenza.

- Absolute Force and Energy

Il programma controlla due condizioni allo stesso tempo, forza ed energia:

Absolute Force:

$$\left\| \frac{(P_{(n)} - F_{(i)})}{(P_{(n)})} \right\| < (\text{tolleranza specificata}) \quad (16)$$

Absolute Energy: stesso criterio descritto in precedenza.

Controllare sia il criterio di energia che quello di forza aiuta ad evitare false convergenze.

3.6. Definizione del dominio

La definizione dei contorni del dominio è un passaggio fondamentale nella creazione di un modello agli elementi finiti. La scelta della definizione del dominio deve essere fatta partendo dalle dimensioni ingegneristiche del problema in esame. Nel caso della stabilità di un pendio, la dimensione caratteristica risulta essere l'altezza del versante. Il dominio deve essere grande abbastanza da far sì che le condizioni al contorno non

influenzino i risultati della computazione. In teoria, questa condizione si verifica solo quando i contorni del dominio sono posti ad una distanza infinita dal centro del problema, nella pratica, ovviamente, si scelgono distanze finite, di solito moltiplicando per un fattore la dimensione caratteristica del problema.

In Figura 37 è illustrato il modello del pendio in esame. L'area in verde rappresenta la geometria del versante ottenuta secondo il procedimento descritto nel paragrafo 3.1 mentre l'intero dominio è delimitato dalle linee viola definite "External Boundaries" in RS²:

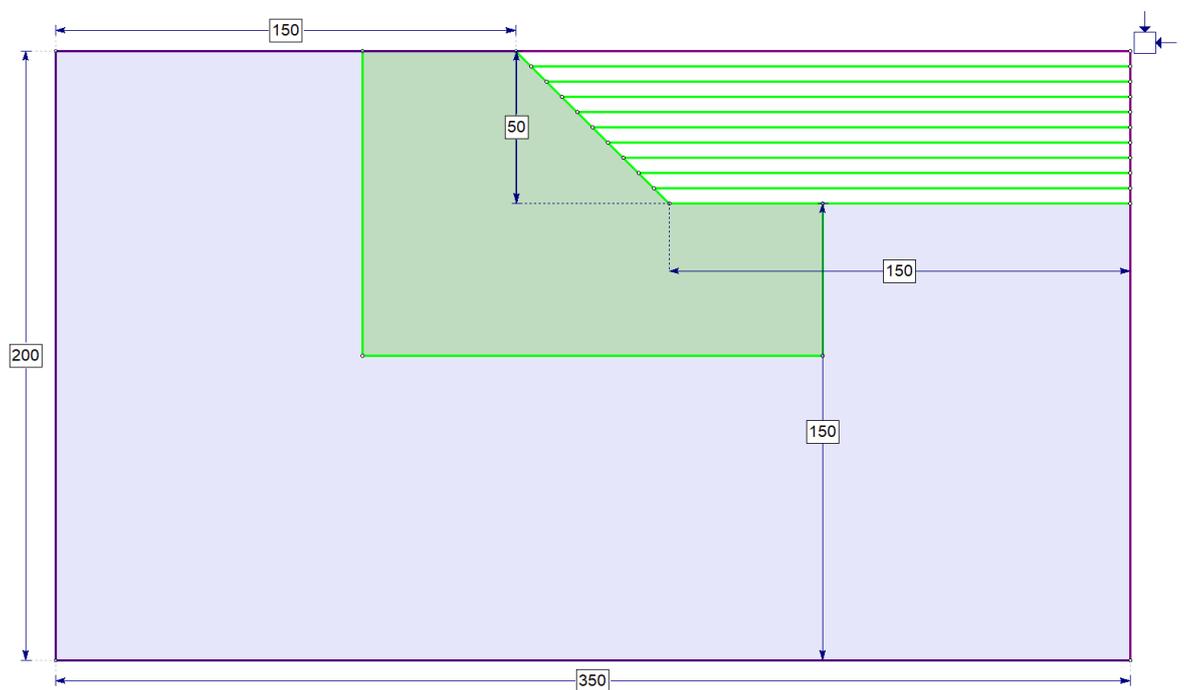


Figura 37. Dimensioni in metri del dominio creato in RS².

Come è possibile notare dalla Figura 37, i bordi del dominio sono stati posti ad una distanza pari a tre volte l'altezza del pendio. In particolare, il bordo inferiore è stato posto ad una distanza pari a 150 m dal piede del pendio mentre il bordo superiore coincide con la cresta del pendio. Anche i bordi sinistro e destro del dominio distano 150 m rispettivamente dal punto sommitale e dal piede del pendio.

3.7. Definizione della mesh

La discretizzazione è una fase fondamentale nel processo di creazione di un modello agli elementi finiti. La scelta della mesh, infatti, influenza in maniera molto importante sia i risultati dell'analisi che il tempo computazionale. Per avere dei risultati precisi in termini di tensioni, deformazioni e spostamenti su tutto il modello bisognerebbe impostare una mesh molto fitta, questo, però, comporterebbe dei tempi computazionali esagerati e non necessari. Al contrario, l'utilizzo di una mesh troppo grossolana consentirebbe di ridurre in maniera sostanziale il tempo necessario per l'analisi, a scapito, però, della precisione dei risultati.

Risulta evidente, quindi, come sia necessario trovare un giusto equilibrio tra questi due aspetti. Le regole usate solitamente per ottenere una mesh di buona qualità e che permetta tempi di computazione ragionevoli prevedono di impostare una mesh più densa dove siano previsti i maggiori gradienti tensionali, incrementando le dimensioni degli elementi via via che ci si allontana dalla zona di interesse. Inoltre, è buona regola che non vi siano brusche transizioni da zone con mesh più fitta a zone con mesh più grossolana.

Il generatore automatico di mesh incorporato in RS² permette di creare mesh ad elementi finiti triangolari o quadrilateri. La procedura di generazione della mesh prevede 2 fasi principali:

- Discretizzazione

È il processo preliminare alla creazione della mesh. Consiste nella suddivisione dei bordi del dominio in vari segmenti, ognuno dei quali verrà delimitato da due nodi.

- Mesh

In questa fase viene generata la mesh, essa dipende dalle opzioni di discretizzazione, dal tipo di elementi scelto e dai parametri selezionati nella finestra di dialogo.

In particolare, i parametri scelti per la generazione della mesh sono illustrati in Figura 38.

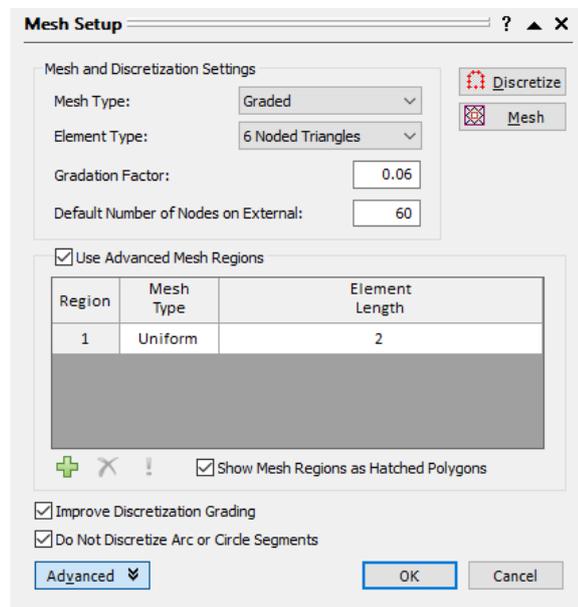


Figura 38. Parametri utilizzati per la generazione della mesh.

Come è possibile notare, è stato scelto un tipo di mesh graduale con elementi triangolari a sei nodi. Inoltre, per evitare l'insorgere di problemi dovuti ad elementi triangolari troppo allungati che comporterebbero una cattiva qualità della mesh, soprattutto nelle zone in cui vengono inserite le inclusioni, sono state utilizzate le cosiddette "Advanced Mesh Regions". Esse consentono di creare una mesh densa e uniforme in zone particolarmente critiche mantenendo una mesh graduale all'esterno di tali regioni. Ciò permette di sfruttare i vantaggi in termini di precisione ed affidabilità dei risultati di una mesh molto densa (nelle zone in cui risulta necessario) senza incrementare di molto il numero totale degli elementi e quindi il tempo computazionale.

In questo elaborato sono state previste due impostazioni generali per quanto riguarda la creazione della mesh, una riguarda il modello di pendio costituito da sola matrice, l'altra i modelli costituiti da matrice e blocchi.

3.7.1. Definizione della mesh per il modello di sola matrice

Per poter valutare l'effetto della presenza delle inclusioni sulla stabilità del versante risulta essenziale la creazione di un modello di sola matrice. Infatti, il valore del fattore di sicurezza ottenuto da questo modello verrà confrontato con i valori ottenuti dall'analisi dei modelli con le inclusioni. Inoltre, questo valore verrà utilizzato per normalizzare i fattori di sicurezza dei singoli modelli con blocchi in maniera da permettere dei confronti con analisi svolte in precedenti lavori di tesi e che prevedono delle impostazioni della mesh differenti da quelle utilizzate in questo elaborato. La "mesh dependency", infatti, risulta essere un fattore molto importante nella valutazione dei risultati ottenuti e, a parità di tutti gli altri fattori come proprietà geometriche, dimensioni del dominio, condizioni al contorno, proprietà dei materiali, codice di calcolo, criterio di convergenza ecc..., la discretizzazione è un fattore determinante per il risultato finale.

Come già anticipato nel paragrafo precedente, per il modello costituito da sola matrice è stata utilizzata l'opzione delle "Advanced Mesh Regions" presente nella finestra di dialogo del generatore automatico di mesh.

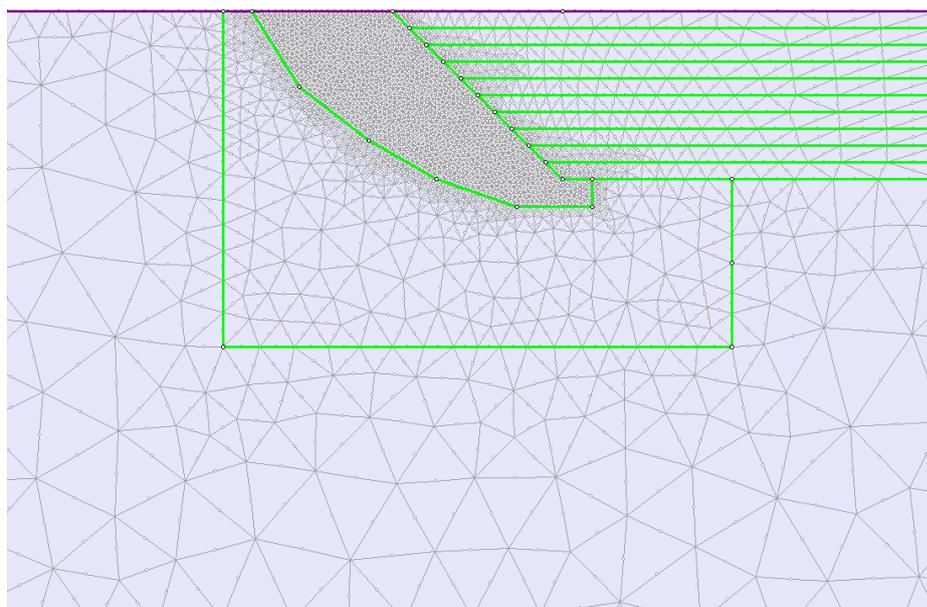


Figura 39. Tipologia di mesh utilizzata per il modello di sola matrice.

Come è possibile osservare in Figura 39, per la discretizzazione del modello di sola matrice è stata utilizzata una mesh molto fitta nella zona in cui era prevista la formazione della superficie di scivolamento, sfruttando dei "*material boundaries*" per delimitare tale zona. La mesh utilizzata è una mesh uniforme con dimensione degli elementi costante e pari a 2 m. Al di fuori di quest'area, la dimensione degli elementi è maggiore e cresce in maniera graduale, in quanto, non essendoci gradienti di tensione elevati, non risulta necessaria una mesh molto fitta. È possibile notare, inoltre, che la transizione tra la zona con mesh uniforme e la zona con mesh graduale risulta essere progressiva e non improvvisa, garantendo che gli elementi triangolari abbiano una forma regolare e, dunque, una buona qualità generale della mesh.

3.7.2. Definizione della mesh per i modelli con blocchi

Prima della definizione della mesh, bisogna importare il file della geometria del pendio contenente le inclusioni descritto nel paragrafo 3.3. Una volta importato il file in RS² e, una volta assegnati ai contorni dei blocchi la natura di "*material boundaries*", verrà avviata una procedura automatica chiamata "*Geometry Cleanup*". Questa procedura fonde i nodi degli elementi che risultano essere vicini tra loro, oltre un valore di soglia definito dall'utente, in un unico nodo. Ciò consente di avere un numero inferiore di nodi totali e consente l'eliminazione di nodi superflui all'interno del modello, garantendo molteplici vantaggi in termini di minor numero di elementi e di qualità della mesh in generale. In Figura 40, è illustrato il modello dopo la procedura di "*Geometry Cleanup*":

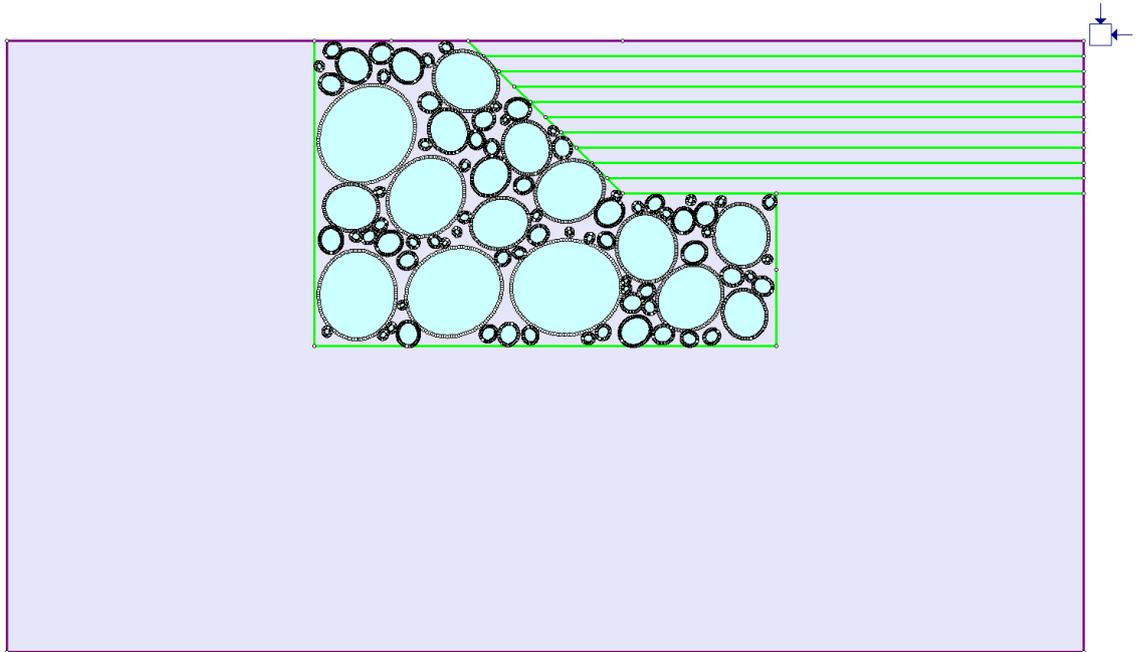


Figura 40. Modello di versante dopo l'importazione del file .dxf contenente la geometria dei blocchi. In particolare, il file corrisponde alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.

Anche in questo caso è stata utilizzata la funzione "Advanced Mesh Regions", selezionando come zona con mesh uniforme l'area definita dalla geometria del pendio, evidenziata con tratteggio verde in Figura 41:

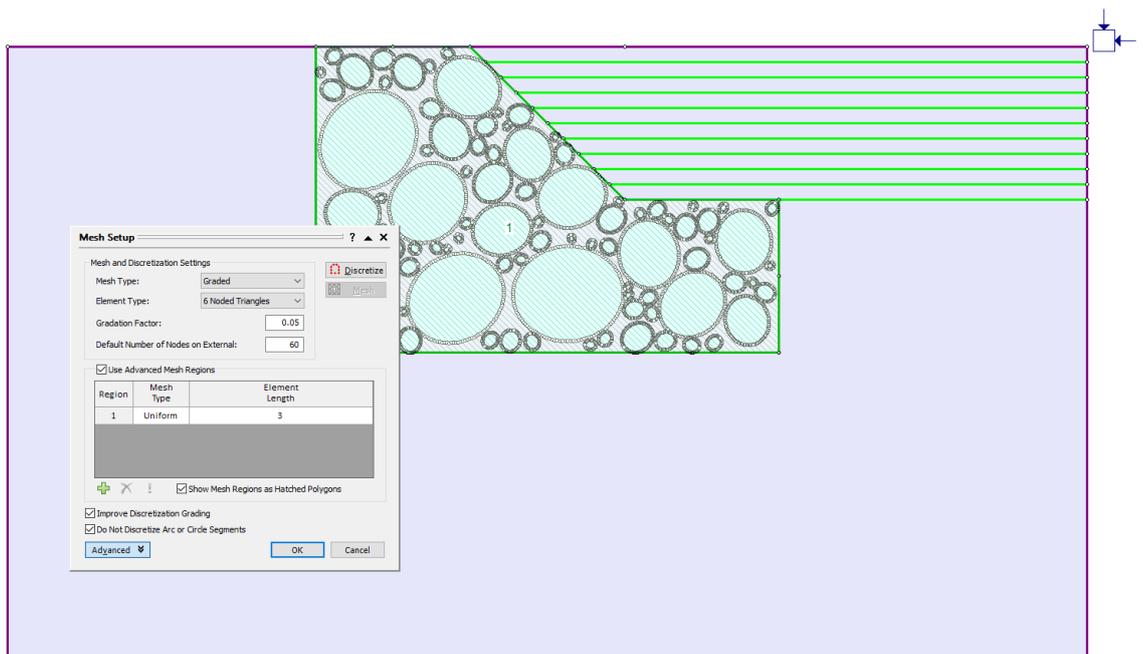


Figura 41. Impostazioni utilizzate per la generazione della mesh nel modello con blocchi.

La dimensione degli elementi all'interno della zona a mesh uniforme, questa volta, è pari a 3 metri mentre per la zona al di fuori è stata scelta una mesh graduale (Figura 42), come nel caso precedente.

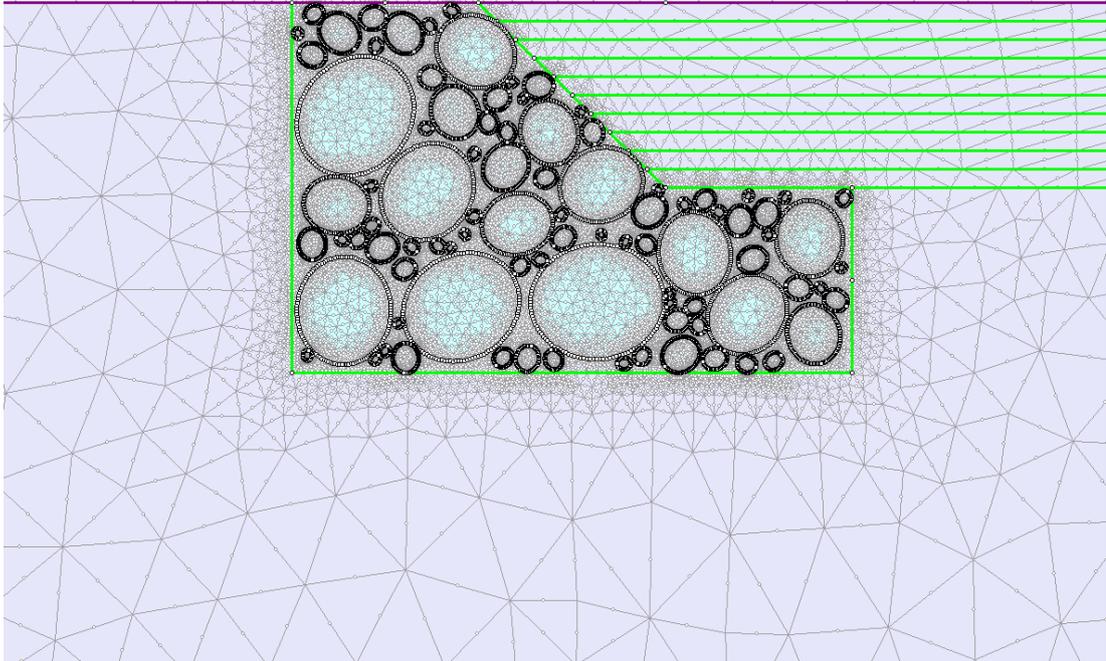


Figura 42. Tipologia di mesh utilizzata per il modello con blocchi.

3.8. Applicazione delle condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state definite in termini di carichi e spostamenti. Sia per il modello di sola matrice che per i modelli con blocchi sono state applicate le medesime condizioni al contorno.

Il software permette di definire le condizioni tensionali in-situ tramite il comando "Field stress", è possibile scegliere tra due opzioni:

- Constant;
- Gravity.

La prima opzione è utilizzata quando il campo tensionale non varia con la posizione o la profondità e trova la sua applicazione, ad esempio, nei problemi di tunnel profondi.

Nel caso di pendii o, in generale, di modelli in cui la superficie del terreno è ben definita e vicina allo scavo, si utilizza la seconda opzione. Essa, infatti, prevede un campo tensionale che varia linearmente con la profondità.

Nella finestra di dialogo viene selezionata l'opzione "*Use actual ground surface*", consigliabile quando il profilo superficiale abbia un'elevazione variabile, come nel caso di un pendio. Attivando questa opzione il programma individua automaticamente la superficie del terreno e le tensioni verticali verranno calcolate in base al peso specifico definito per i materiali e alla profondità. Le tensioni orizzontali, invece, verranno calcolate moltiplicando il valore delle tensioni verticali per il valore di "*Horizontal/Vertical Stress Ratio*", definito dall'utente e, in questo caso, posto pari a 1, sia "*in plane*" che "*out of plane*".

Le condizioni al contorno in termini di spostamento possono essere applicate ai singoli vertici oppure a interi bordi. Il software permette di utilizzare varie opzioni per la definizione delle condizioni al contorno, quelle utilizzate sono essenzialmente quattro:

- Restrain XY: permette di fissare un determinato nodo o un bordo sia in direzione verticale che in direzione orizzontale (corrisponde ad un vincolo di cerniera);
- Restrain X: il nodo o il bordo è fisso nella direzione orizzontale ma il movimento è consentito nella direzione verticale (corrisponde ad un carrello con asse orizzontale);
- Restrain Y: il nodo o il bordo è fisso nella direzione verticale ma il movimento è consentito nella direzione orizzontale (corrisponde ad un carrello con asse verticale);

- Free: il movimento del nodo o del bordo è permesso sia in direzione orizzontale che in direzione verticale.

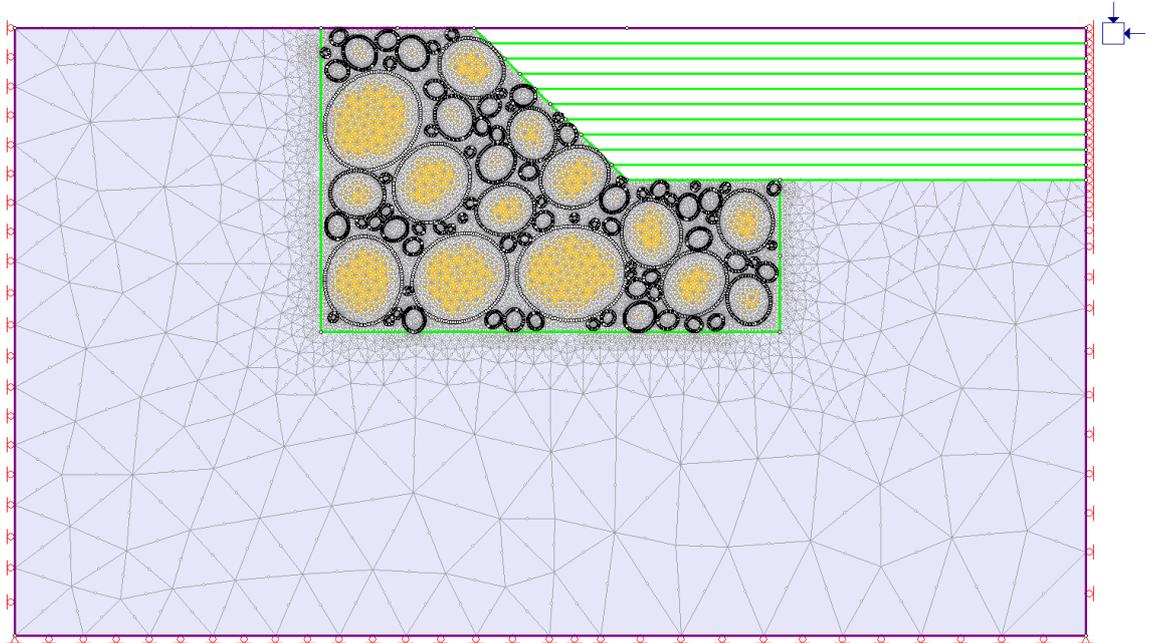


Figura 43. Applicazione delle condizioni al contorno per il modello con blocchi corrispondente alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.

Come è possibile notare in Figura 43, i bordi laterali sono stati fissati in direzione orizzontale, condizione di vincolo che corrisponde all'applicazione di carrelli con asse verticale. Al contrario, il bordo inferiore è stato fissato in direzione verticale mediante carrelli con asse orizzontale. Per quanto riguarda il bordo superiore e quello che delinea il profilo del versante, non è stato applicato nessun vincolo che ne impedisca i movimenti.

Il completamento delle condizioni al contorno è stato svolto mediante l'applicazione di cerniere agli angoli inferiori del modello, mentre gli angoli superiori sono stati vincolati semplicemente tramite dei carrelli ad asse orizzontale, in maniera analoga ai bordi laterali. Questa scelta è dettata dal fatto che, a causa delle condizioni di carico applicate, gli elementi finiti che costituiscono il modello subiranno un assestamento. In particolare, i punti superiori del modello subiranno una traslazione verso il basso che deve essere permessa dalle condizioni di vincolo.

3.9. Proprietà dei materiali

I materiali definiti per la modellazione sono essenzialmente due:

- Matrice;
- Blocchi.

Le caratteristiche di tali materiali sono state desunte da Li et al. (2004) mediante prove di laboratorio eseguite su bimrock proveniente dalla zona della Diga delle Tre Gole in Cina.

I parametri utilizzati sono riassunti in Tabella 4:

Parametro	Matrice	Blocchi
E [MPa]	37,5	5124
ν [-]	0,25	0,22
γ [kg/m ³]	2200	2700
c [kPa]	30	600
φ [°]	24	40
σ_t [MPa]	0,02	0,5
σ_c [kPa]	92,4	2573,4

Tabella 4. Proprietà dei materiali utilizzate per la modellazione numerica.

Come già anticipato nel paragrafo 3.4, è stato impostato un numero di stages pari a 11, in maniera tale da simulare un processo di scavo del pendio in 10 passi. Questa procedura permette di ottenere uno stato tensionale nel versante il più possibile aderente alla realtà e, in più, permette di evitare problematiche relative alla

modellazione come, ad esempio, l'espansione innaturale degli elementi finiti più prossimi alla superficie. Per fare ciò, il primo stage viene impostato come stage di riferimento, assegnando sia ai blocchi che alla matrice un comportamento elastico-lineare. Dal secondo stage in poi, sia ai blocchi che alla matrice verrà assegnato un comportamento elastico, perfettamente plastico. L'area esterna al pendio avrà, in tutti gli stages, un comportamento elastico-lineare.

In Figura 44 è illustrato lo schema utilizzato per l'assegnazione delle proprietà dei materiali nello stage finale, in particolare:

- all'area verde, rappresentante la geometria del pendio, sono state assegnate le proprietà della matrice con comportamento elasto-plastico perfetto
- alle aree arancioni sono state assegnate le caratteristiche dei blocchi, anch'essi con comportamento elasto-plastico perfetto
- all'area che rappresenta il dominio, di colore viola chiaro, sono state assegnate le proprietà della matrice con comportamento elastico-lineare

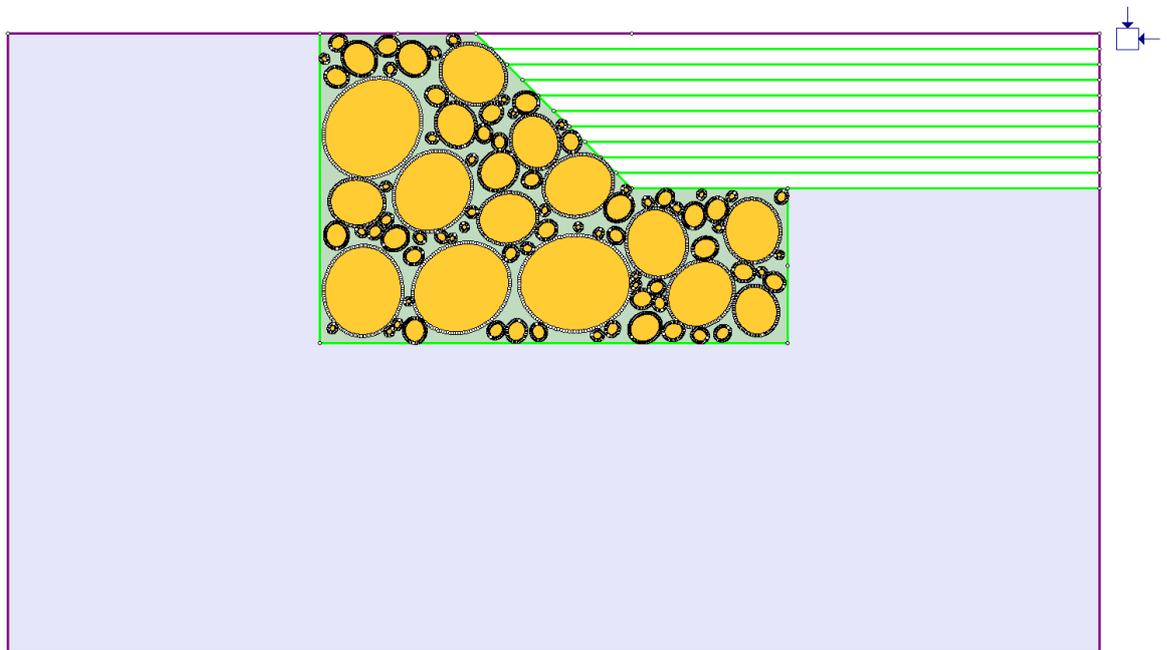


Figura 44. Assegnazione dei materiali per il modello con blocchi corrispondente alla seconda estrazione con VBP pari a 70%, inclinazione random dei blocchi e eccentricità 0.5.

Per ognuno dei materiali è stato scelto il criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (17)$$

Inoltre, per i materiali con comportamento elastico, perfettamente plastico, nella scheda "strength" presente nella finestra di dialogo relativa alla definizione dei materiali, viene selezionata l'opzione "Apply SSR (Shear Strength Reduction)", spiegata più dettagliatamente nel paragrafo seguente.

3.10. Metodo SSR

Il metodo SSR (shear strength reduction) consiste nel valutare la stabilità di un pendio calcolando il fattore di sicurezza mediante la riduzione dei parametri di resistenza al taglio. I passi eseguiti dal software per condurre un'analisi con il metodo SSR sono essenzialmente tre:

- i parametri di resistenza al taglio vengono ridotti di un certo fattore e viene inizializzata l'analisi tensionale, come mostrato nelle equazioni (18), (19) e (20);

$$\frac{\tau}{F} = \frac{c^*}{F} + \frac{\tan \varphi^*}{F} \quad (18)$$

dove:

$$c^* = \frac{c'}{F} \quad (19)$$

$$\varphi^* = \arctan\left(\frac{\tan \varphi'}{F}\right) \quad (20)$$

- questo processo viene ripetuto per differenti valori del fattore SRF (strength reduction factor) finché il modello risulta instabile, ovvero l'analisi non converge;
- alla fine del processo viene determinato il valore critico di SRF che corrisponde al fattore di sicurezza del pendio.

4. Risultati dell'analisi di stabilità

In questo capitolo si riassumono i risultati ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli bidimensionali agli elementi finiti descritti nel capitolo precedente. In primo luogo, si riportano i valori relativi al versante costituito da sola matrice, sia in termini di fattore di sicurezza che in termini di volume potenzialmente instabile. I valori ottenuti serviranno da riferimento per poter fare delle valutazioni riguardo l'incremento di resistenza e la variabilità dei risultati per i modelli con presenza di blocchi. Successivamente, si riportano i risultati relativi ai versanti in bimrock, suddivisi in set da 15 estrazioni in base all'inclinazione e l'eccentricità dei blocchi ed in base alla percentuale volumetrica. Infine, i risultati ottenuti vengono riassunti in grafici in maniera tale da poter trarre delle considerazioni.

4.1. Risultati ottenuti per il versante di sola matrice

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, per poter valutare l'incremento di resistenza dovuto alla presenza delle inclusioni è necessario indagare i risultati ottenuti su un pendio ideale costituito da sola matrice. Il valore del fattore di sicurezza derivante dall'analisi di questo modello verrà utilizzato per confrontarlo con i valori relativi ai modelli in bimrock, valutandone quindi l'incremento in base alla percentuale volumetrica delle inclusioni e alla loro disposizione. Inoltre, esso sarà utilizzato per normalizzare i valori del fattore di sicurezza medio ottenuti per ciascuna percentuale volumetrica indagata. In questo modo, sarà possibile eseguire dei confronti con i risultati relativi ad analisi condotte precedentemente su modelli realizzati con il medesimo procedimento illustrato in questo elaborato ma con diverse inclinazioni dei blocchi rispetto all'orizzontale e con diverse eccentricità.

Tramite il valore del fattore di sicurezza è possibile la valutazione della stabilità di un versante ma, poiché abbiamo a che fare con un materiale eterogeneo, esso risulta significativamente influenzato dalla disposizione, dalla forma e dalla percentuale volumetrica dei blocchi. Per poter indagare l'effetto che questi hanno sulla stabilità,

risulta fondamentale valutare anche lo sviluppo della superficie di scivolamento. Il primo passo è, quindi, quello di determinare la superficie di scivolamento per il modello costituito da sola matrice, in modo da poter confrontarne la forma e lo sviluppo con i modelli in cui si ha la presenza dei blocchi.

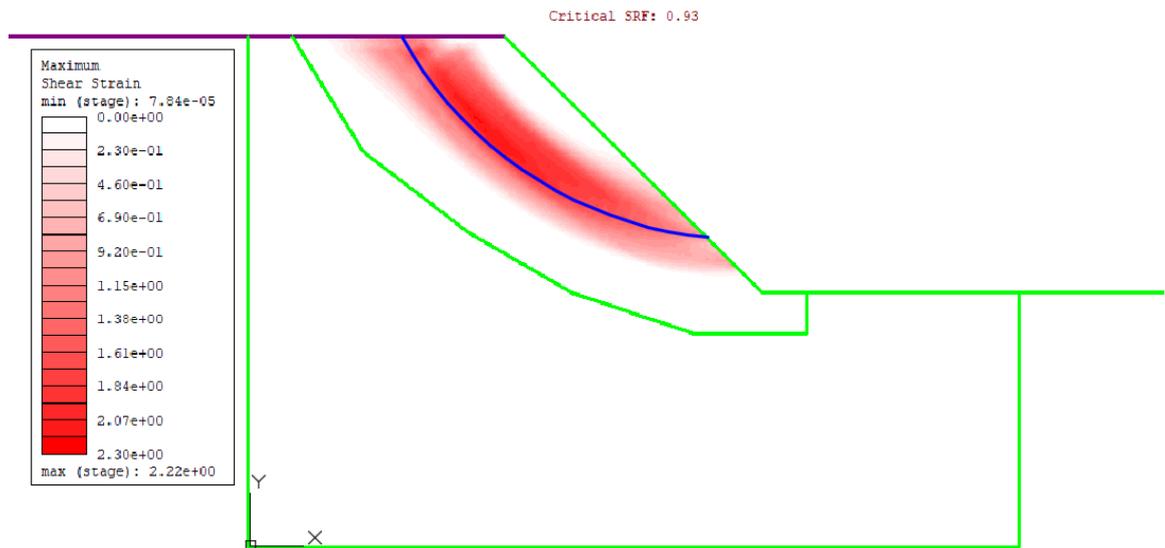


Figura 45. Valori del fattore di sicurezza e delle massime deformazioni di taglio ottenuti per il modello costituito da sola matrice

In Figura 45 sono rappresentati i risultati ottenuti in termini di SRF e di massime deformazioni di taglio per il modello di sola matrice. Il valore del fattore di sicurezza ottenuto per questo modello risulta pari a 0,93. Inoltre, in rosso sono evidenziate le massime deformazioni di taglio, tramite le quali è possibile determinare la superficie di scorrimento (evidenziata in blu), attraverso l'involuppo dei valori massimi. Le linee di colore viola e verde sono le linee rispettivamente dei contorni esterni e dei materiali definiti in RS².

Come è possibile notare, la superficie di scivolamento presenta la forma di un arco di circonferenza, risultato del tutto prevedibile per un pendio omogeneo di questo tipo. Infatti, il materiale di cui è composta la matrice è prevalentemente argilloso (Li et al., 2004) e non presenta nessuna superficie di debolezza data da una particolare condizione stratigrafica o dalla presenza di strati di materiale con caratteristiche

meccaniche inferiori. Di conseguenza, il meccanismo di scivolamento risulta di tipo rotazionale. La superficie di rottura presenta un'estensione pari a circa 74,43 m ed il volume potenzialmente mobilitato risulta pari a circa 829,3 m³/m. Entrambe le misurazioni di estensione della superficie di scivolamento e di volume potenzialmente instabile sono state ottenute tramite gli strumenti di misurazione previsti dal software Autocad, a seguito dell'importazione dell'immagine dei risultati ottenuti dall'analisi numerica e dopo averla riportata alle dimensioni corrette tramite un riferimento di scala. Il valore del volume potenzialmente instabile è riferito ad un metro di profondità del versante.

4.2. Risultati ottenuti per i versanti con blocchi

Come già anticipato nel capitolo 3, i modelli con presenza di inclusioni sono stati creati tramite una procedura stocastica che prevede la realizzazione di 15 estrazioni casuali di coordinate e dimensioni dei blocchi per ogni percentuale volumetrica indagata e per ciascun angolo di orientazione ed eccentricità scelti.

In particolare, in questo elaborato, sono state analizzate quattro percentuali volumetriche differenti, ovvero 25%, 40%, 55% e 70% mentre, per quanto riguarda l'inclinazione e l'eccentricità, sono stati scelti blocchi inclinati di 0° con eccentricità pari a 0,866 e con inclinazione casuale ed eccentricità pari a 0,5. Visto il numero considerevole di modelli realizzati, si è scelto di valutare un criterio di denominazione che avesse come discriminanti le seguenti caratteristiche:

- angolo di inclinazione ed eccentricità
- percentuale volumetrica dei blocchi (VBP)
- numero di estrazione

In Figura 46 è illustrata una schematizzazione del criterio di denominazione:

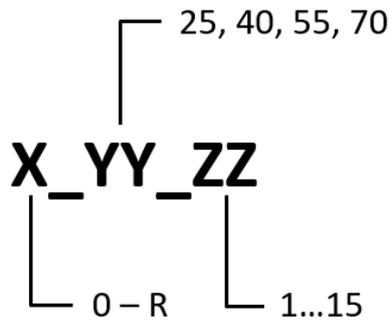


Figura 46. Schema del criterio utilizzato per la denominazione dei modelli con blocchi

in cui con X si indica il valore di inclinazione dei blocchi e della loro eccentricità, in particolare, con 0 si indicano i modelli aventi blocchi con inclinazione 0° ed eccentricità pari a 0,866 mentre con R si indicano quelli aventi blocchi con inclinazione random ed eccentricità pari a 0,5. Con il valore YY viene indicata la percentuale volumetrica dei blocchi mentre con ZZ il numero di estrazione. Ad esempio, la denominazione R_70_2 indica il modello con inclinazione casuale dei blocchi ed eccentricità 0,5, VBP pari al 70% e seconda estrazione.

Di seguito, vengono riportati i risultati delle analisi. I modelli sono stati raggruppati in primo luogo in base all'inclinazione dei blocchi ed in secondo luogo per VBP. I valori del fattore di sicurezza sono stati inseriti all'interno di tabelle in cui si riportano anche i principali indicatori statistici. Infine, oltre ai valori del fattore di sicurezza, sono presentati gli andamenti delle massime deformazioni di taglio e delle superfici di scivolamento. Quest'ultime, in alcuni casi, risultavano di difficile individuazione, in quanto, lo sviluppo delle massime deformazioni di taglio non consentiva una netta individuazione delle stesse. La scelta è stata quella, in questi casi, di delineare le superfici di scivolamento tramite una procedura del tutto arbitraria, cercando, il più possibile, di individuare le superfici più plausibili o, quanto meno, quelle meno improbabili dal punto di vista fisico. Inoltre, per indagare l'influenza della disposizione dei blocchi sullo sviluppo della superficie di scivolamento, tutte le superfici dei modelli con blocchi sono state confrontate con la superficie del modello di sola matrice, scegliendo, per ogni gruppo di 15 estrazioni, le due superfici che si discostavano maggiormente in termini di volume potenzialmente instabile. Per ogni gruppo sono

state individuate, quindi, la superficie di scivolamento più "superficiale" e quella più "profonda", misurandone il volume potenzialmente instabile in maniera tale da poterlo confrontare con quello del modello di sola matrice.

4.2.1. **Inclinazione pari a 0° e VBP 25%**

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e percentuale volumetrica pari al 25%.

Modello	SRF
0_25_1	1,01
0_25_2	0,90
0_25_3	0,96
0_25_4	0,87
0_25_5	0,93
0_25_6	0,89
0_25_7	0,88
0_25_8	0,86
0_25_9	0,93
0_25_10	0,99
0_25_11	0,96
0_25_12	0,95
0_25_13	0,92
0_25_14	0,96
0_25_15	0,92
Media	0,93
Dev. St.	0,044

Tabella 5. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 25%.

Come è possibile notare dalla Tabella 5, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 0,93, valore identico a quello ottenuto per il versante costituito da sola matrice. Inoltre, il valore della deviazione standard corrispondente risulta molto piccolo, nell'ordine del 5%. Ciò implica che tale percentuale volumetrica non comporta nessun incremento in termini di resistenza rispetto alla sola matrice.

Una tale percentuale volumetrica dei blocchi non riesce ad ostacolare lo sviluppo della superficie di rottura; come illustrato in Figura 47, essa risulta molto simile a quella del modello di sola matrice:

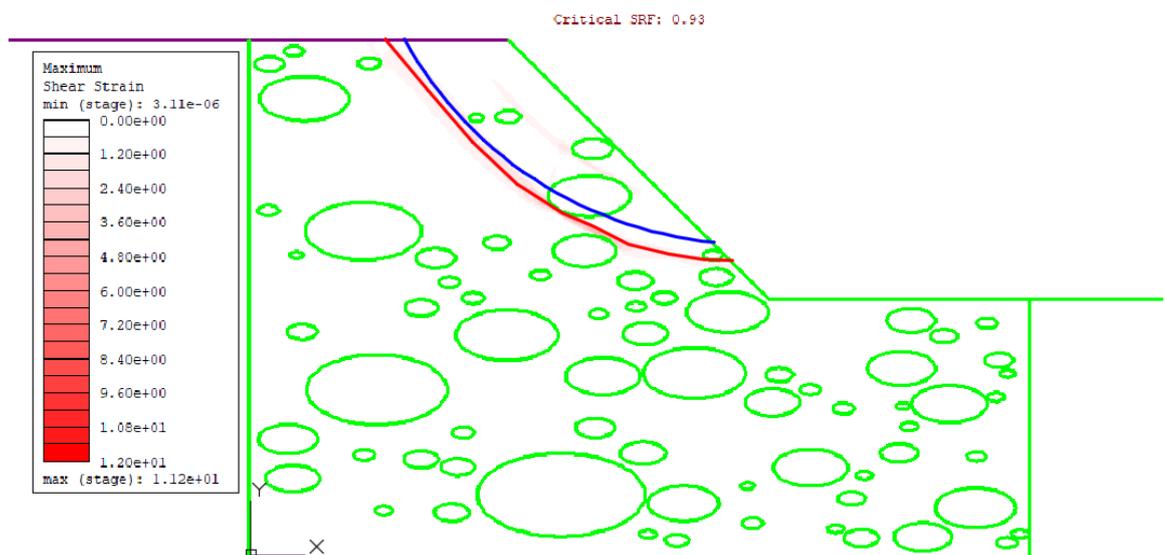


Figura 47. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_25_5 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come è possibile notare, la superficie di scivolamento del modello in questione è ostacolata solo in minima parte da un blocco di medie dimensioni che ne devia leggermente l'andamento rispetto alla superficie del modello di sola matrice.

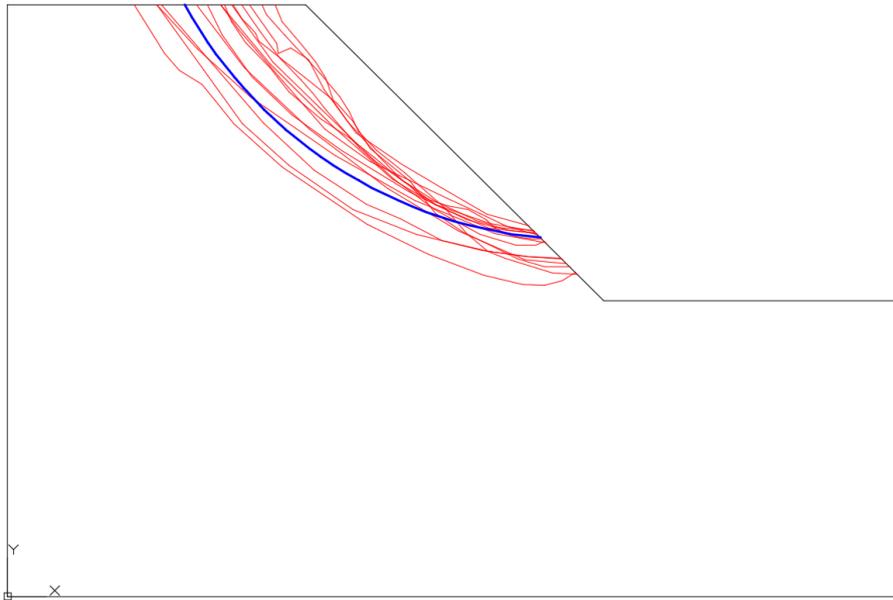


Figura 48. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_25_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In linea di massima, come illustrato in Figura 48, tutte le superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità abbastanza simili a quelle della superficie del modello di sola matrice, con una dispersione in termini di posizione e volume potenzialmente instabile abbastanza ridotta.

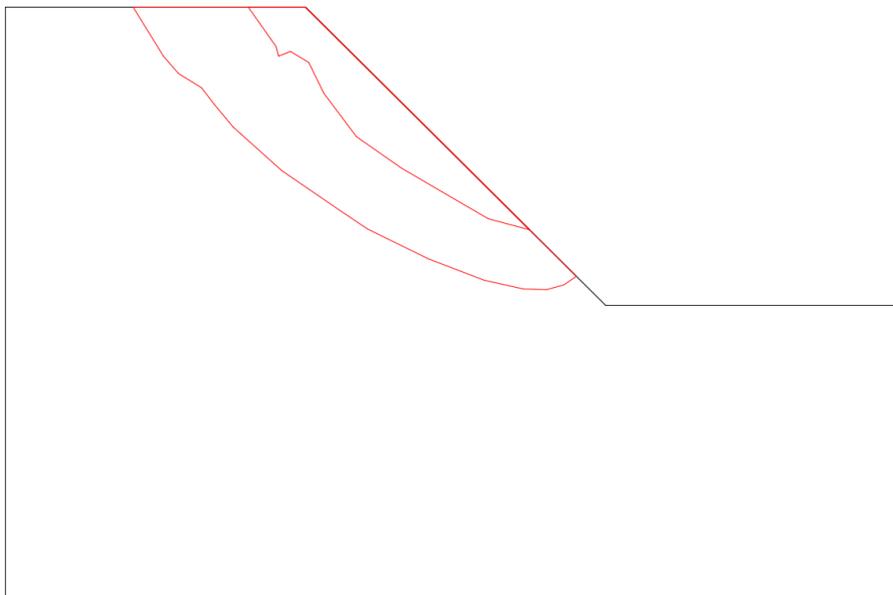


Figura 49. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della settima e dell'ottava estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 374,17 m³/m, pari a circa il 45% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1347,5 m³/m, circa il 162%.

4.2.2. Inclinazione pari a 0° e VBP 40%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e percentuale volumetrica pari al 40%.

Modello	SRF
0_40_1	1,05
0_40_2	0,96
0_40_3	0,97
0_40_4	0,95
0_40_5	0,95
0_40_6	0,90
0_40_7	0,98
0_40_8	0,99
0_40_9	1,00
0_40_10	1,04
0_40_11	0,92
0_40_12	0,96
0_40_13	0,97
0_40_14	0,95
0_40_15	0,96
Media	0,97
Dev. St.	0,039

Tabella 6. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 40%.

Come è possibile notare dalla Tabella 6, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 0,97, valore leggermente superiore rispetto a quello ottenuto per il versante costituito da sola matrice, si ha quindi un incremento di resistenza dovuto alla presenza dei blocchi. Il valore della deviazione standard corrispondente risulta molto piccolo, nell'ordine del 4%.

Nel caso del modello 0_40_1, ad esempio, la superficie di scivolamento si discosta molto da quella teorica a causa della presenza di blocchi di medie e grandi dimensioni che ne ostacolano lo sviluppo (Figura 50).

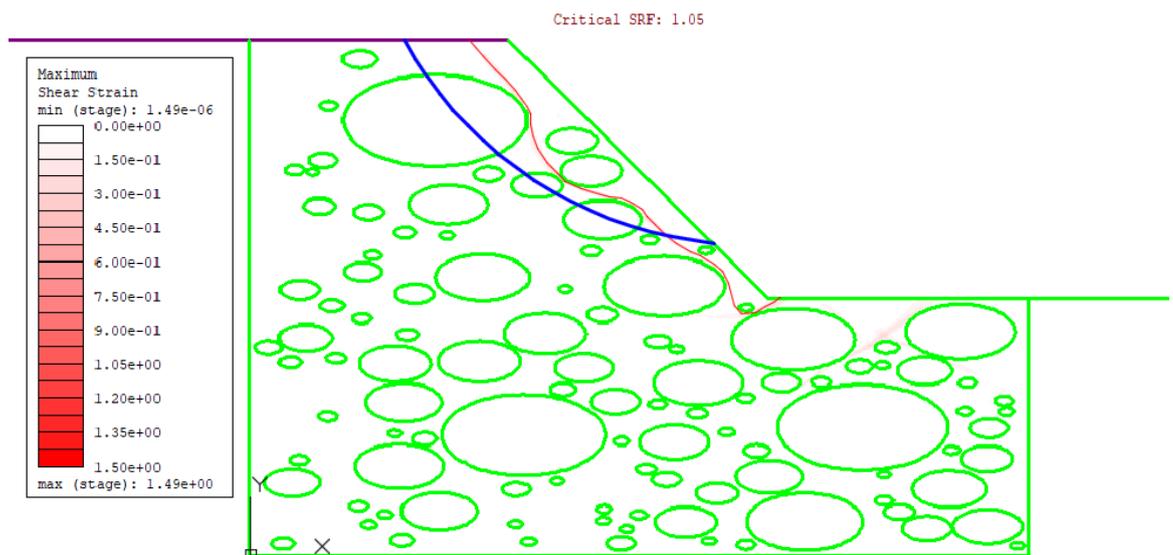


Figura 50. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_40_1 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Di conseguenza il fattore di sicurezza del modello risulta maggiore rispetto a quello del versante costituito da sola matrice.

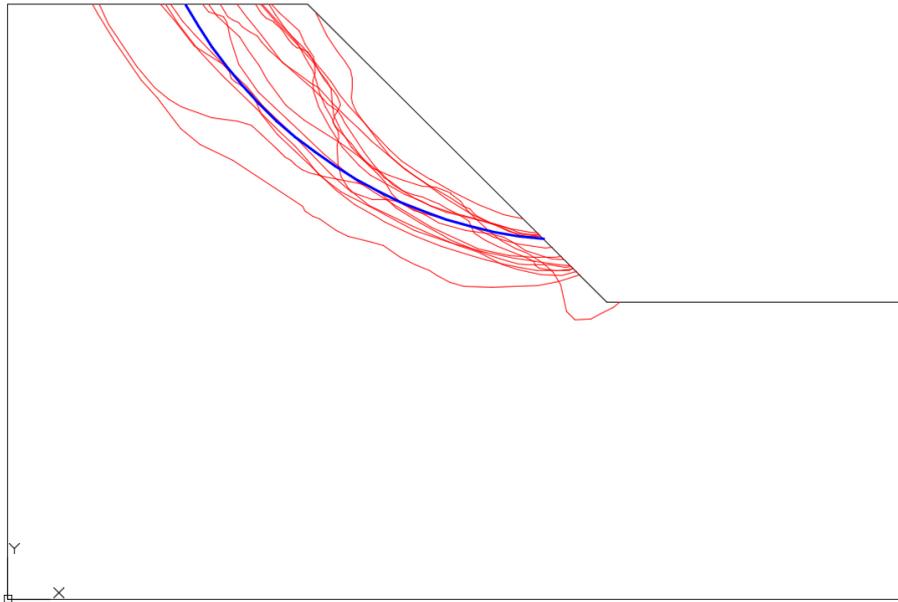


Figura 51. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_40_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In questo caso, come illustrato in Figura 51, alcune superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità abbastanza simili a quelle della superficie del modello di sola matrice mentre altre hanno una forma molto diversa e risultano più tortuose.

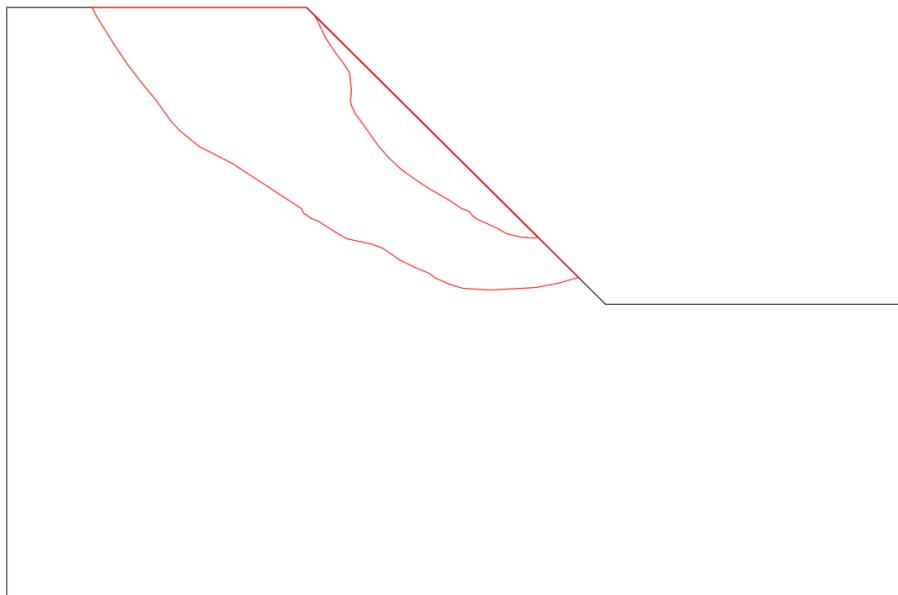


Figura 52. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della tredicesima e della quinta estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 266,03 m³/m, pari a circa il 32% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1705,2 m³/m, circa il 206%, si evidenzia, quindi, una forbice di valori più ampia rispetto al caso precedente.

4.2.3. Inclinazione pari a 0° e VBP 55%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e percentuale volumetrica pari al 55%.

Modello	SRF
0_55_1	1,02
0_55_2	1,00
0_55_3	1,01
0_55_4	1,16
0_55_5	1,00
0_55_6	1,00
0_55_7	1,03
0_55_8	1,00
0_55_9	1,00
0_55_10	1,01
0_55_11	1,01
0_55_12	1,13
0_55_13	0,89
0_55_14	0,97
0_55_15	0,99
Media	1,01
Dev. St.	0,062

Tabella 7. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 55%.

Come è possibile notare dalla Tabella 7, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 1,01. l'incremento di resistenza dovuto alla presenza dei blocchi risulta maggiore rispetto ai casi precedenti. Anche il valore della deviazione standard, però, cresce leggermente, risultando pari a circa il 6%, denotando una maggiore variabilità nei risultati.

Nel caso del modello 0_55_4, ad esempio, lo scostamento della superficie di scivolamento rispetto a quella teorica risulta evidente, a causa della presenza di blocchi che ne ostacolano lo sviluppo (Figura 53).

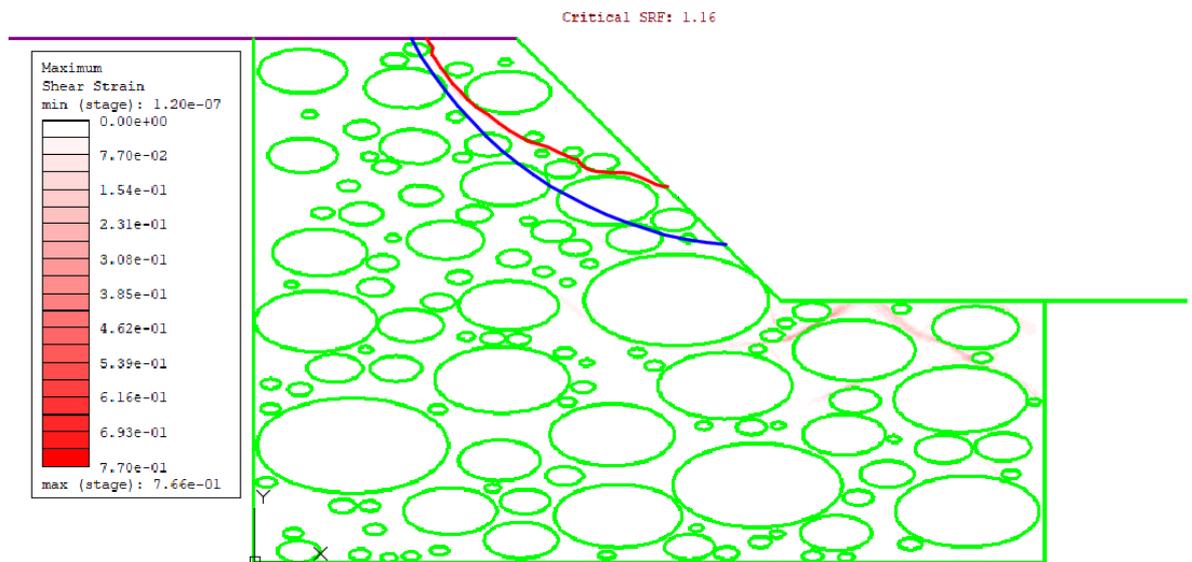


Figura 53. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_55_4 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Di conseguenza il fattore di sicurezza del modello risulta notevolmente maggiore rispetto a quello del versante costituito da sola matrice.

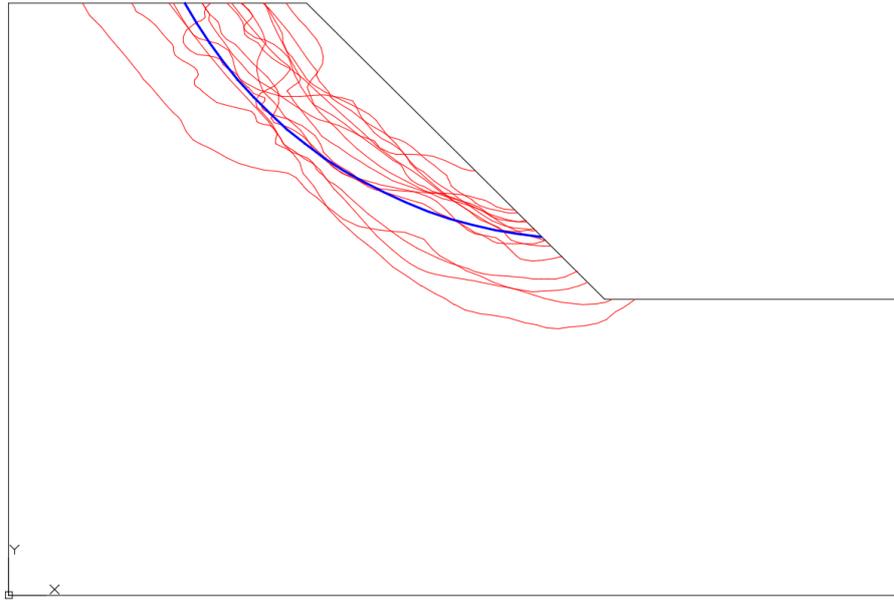


Figura 54. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_55_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In questo caso, come illustrato in Figura 54, quasi tutte le superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità molto diverse da quelle della superficie del modello di sola matrice, risultando più tortuose.

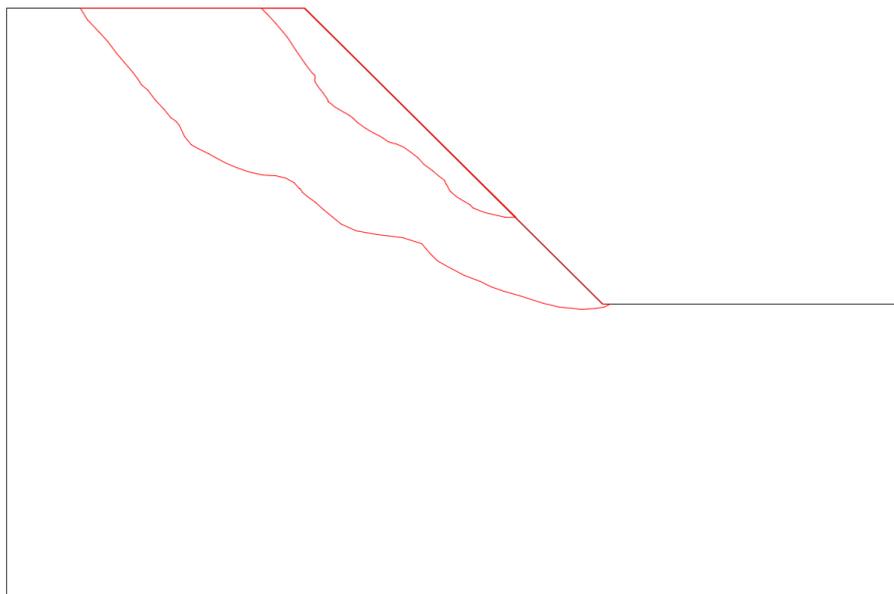


Figura 55. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della tredicesima e della quinta estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 291,31 m³/m, pari a circa il 35% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1652,6 m³/m, circa il 199%, valori abbastanza simili rispetto a quelli del caso precedente.

4.2.4. Inclinazione pari a 0° e VBP 70%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e percentuale volumetrica pari al 70%.

Modello	SRF
0_70_1	1,32
0_70_2	1,50
0_70_3	1,38
0_70_4	1,34
0_70_5	1,38
0_70_6	1,09
0_70_7	1,26
0_70_8	1,15
0_70_9	1,06
0_70_10	1,40
0_70_11	1,00
0_70_12	1,48
0_70_13	1,26
0_70_14	1,13
0_70_15	1,24
Media	1,27
Dev. St.	0,15

Tabella 8. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione pari a 0°, eccentricità 0,866 e VBP pari al 70%.

Come è possibile notare dalla Tabella 8, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 1,27, risultato che evidenzia un notevole incremento di resistenza rispetto sia al caso di versante costituito da sola matrice che rispetto ai casi con minore VBP. La variabilità dei risultati è, però, anch'essa molto maggiore, con valori del SRF che vanno da 1,00 a 1,50 ed una deviazione standard pari a 0,15.

Nel caso del modello 0_70_2, ad esempio, lo scostamento della superficie di scivolamento rispetto a quella teorica risulta evidente, a causa della presenza di blocchi che ne ostacolano lo sviluppo (Figura 56).

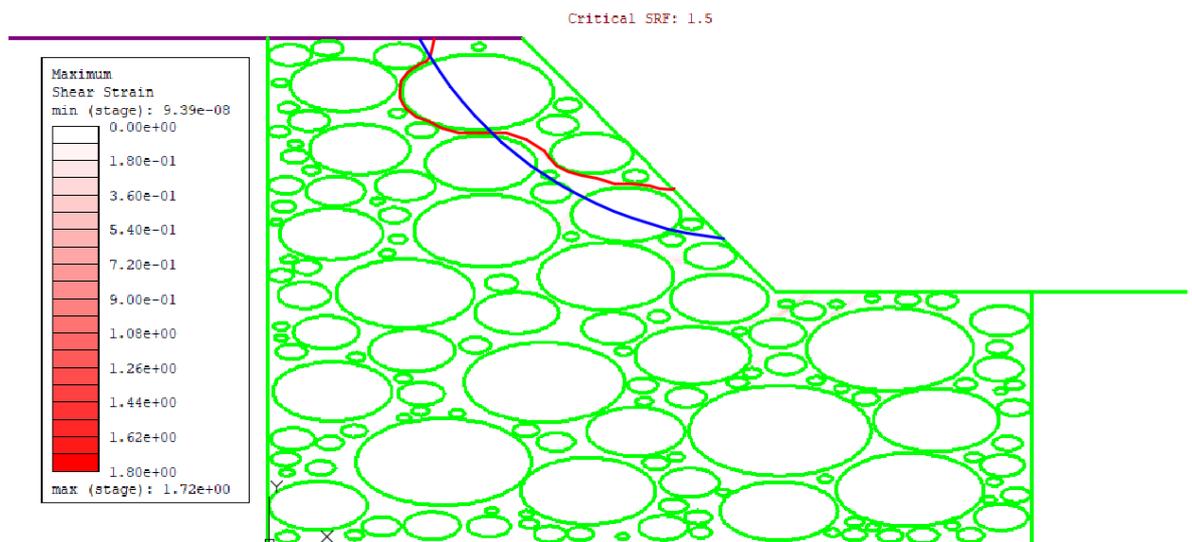


Figura 56. Andamento della superficie di scivolamento per il modello 0_70_2 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Di conseguenza il fattore di sicurezza del modello risulta notevolmente maggiore rispetto a quello del versante costituito da sola matrice.



Figura 57. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_70_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In questo caso, come illustrato in Figura 57, ed in maniera ancora più evidente rispetto al caso precedente, tutte le superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità molto diverse da quelle della superficie del modello di sola matrice, risultando evidentemente più tortuose a causa della disposizione dei blocchi.

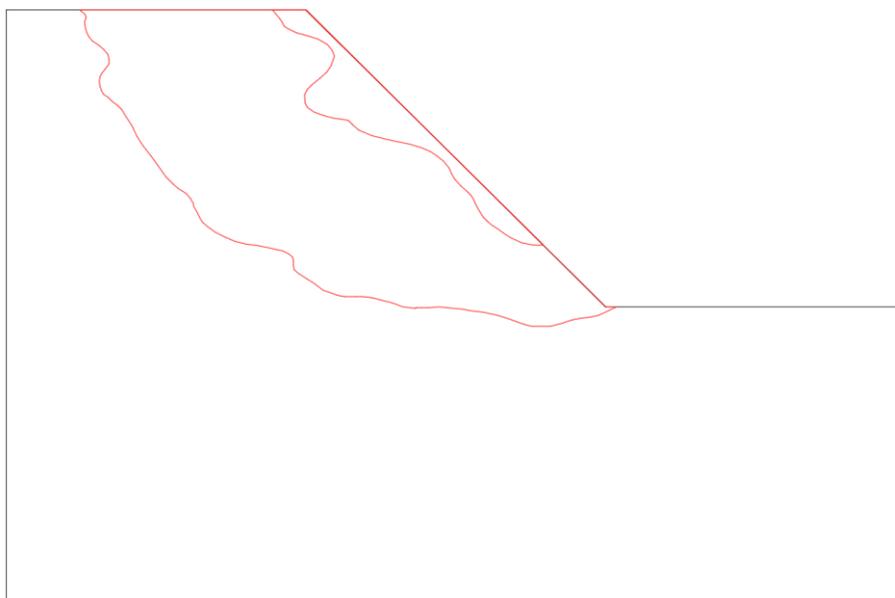


Figura 58. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della seconda e della dodicesima estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 260,32 m³/m, pari a circa il 31% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 2372,1 m³/m, circa il 286%, valori che denotano, anche in questo caso, un'altissima variabilità.

4.2.5. Inclinazione casuale e VBP 25%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e percentuale volumetrica pari al 25%.

Modello	SRF
R_25_1	0,95
R_25_2	0,97
R_25_3	0,94
R_25_4	0,89
R_25_5	0,84
R_25_6	0,85
R_25_7	0,94
R_25_8	1,00
R_25_9	0,97
R_25_10	0,95
R_25_11	0,93
R_25_12	1,02
R_25_13	0,88
R_25_14	0,92
R_25_15	0,93
Media	0,93
Dev. St.	0,051

Tabella 9. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 25%.

Come è possibile notare dalla Tabella 9, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 0,93, valore identico a quello ottenuto per il versante costituito da sola matrice e identico al valore medio ottenuto per i modelli con stessa VBP ma inclinazione pari a 0°. Anche il valore della deviazione standard corrispondente è molto simile, nell'ordine del 5%. Di conseguenza, le considerazioni fatte in precedenza restano valide, ovvero che una percentuale volumetrica così bassa non comporta nessun incremento in termini di resistenza rispetto alla sola matrice.

Anche in questo caso, una tale percentuale volumetrica dei blocchi non riesce ad ostacolare lo sviluppo della superficie di rottura; come illustrato in Figura 59, essa risulta quasi identica a quella del modello di sola matrice:

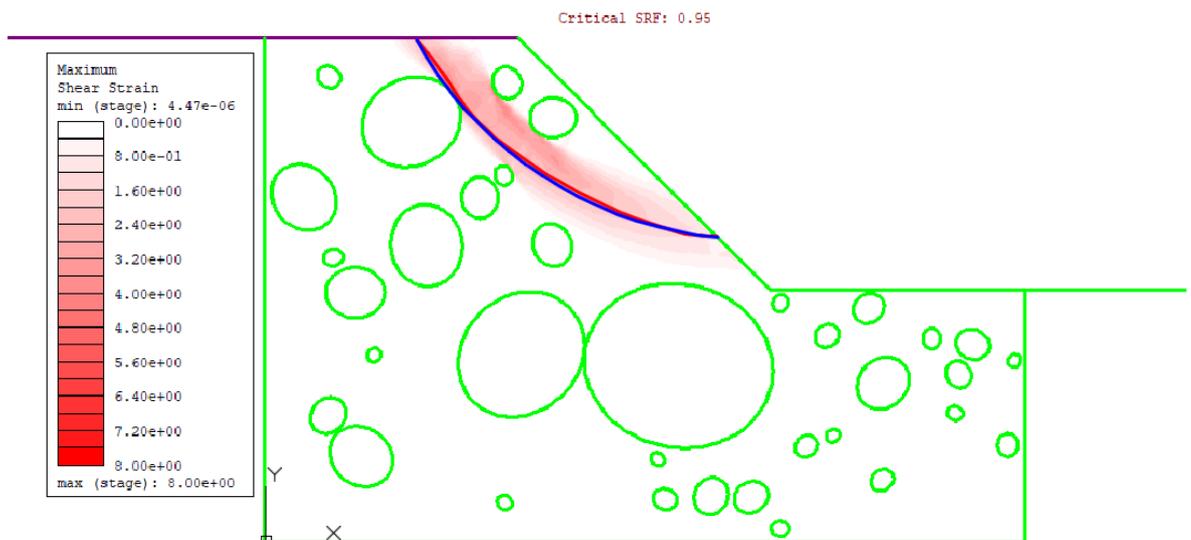


Figura 59. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_25_10 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come è possibile notare, la superficie di scivolamento del modello in questione non è minimamente ostacolata dalla presenza dei blocchi.

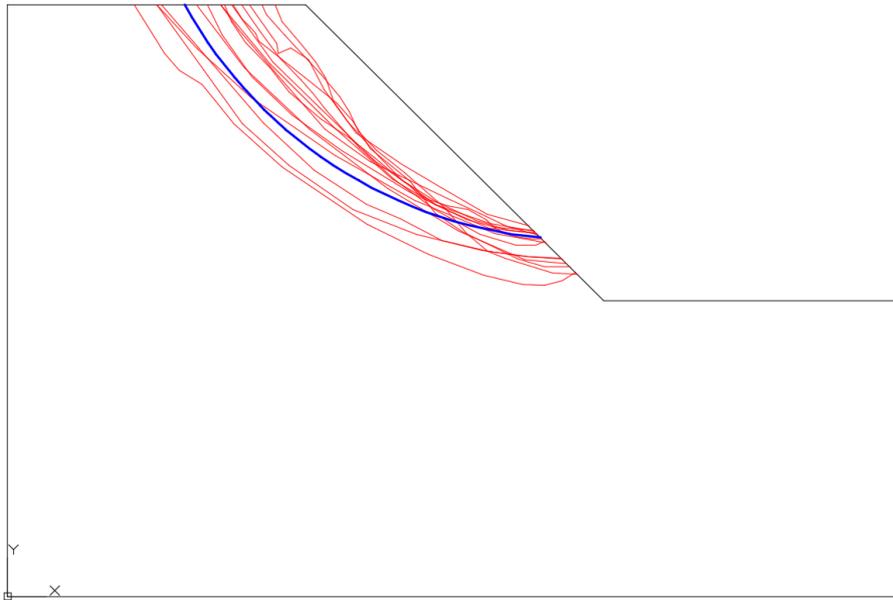


Figura 60. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_25_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In linea generale, come illustrato in Figura 60, tutte le superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità abbastanza simili a quelle della superficie del modello di sola matrice, con una dispersione in termini di posizione e volume potenzialmente instabile abbastanza ridotta, analogamente al caso di inclinazione dei blocchi pari a 0° e stessa VBP.

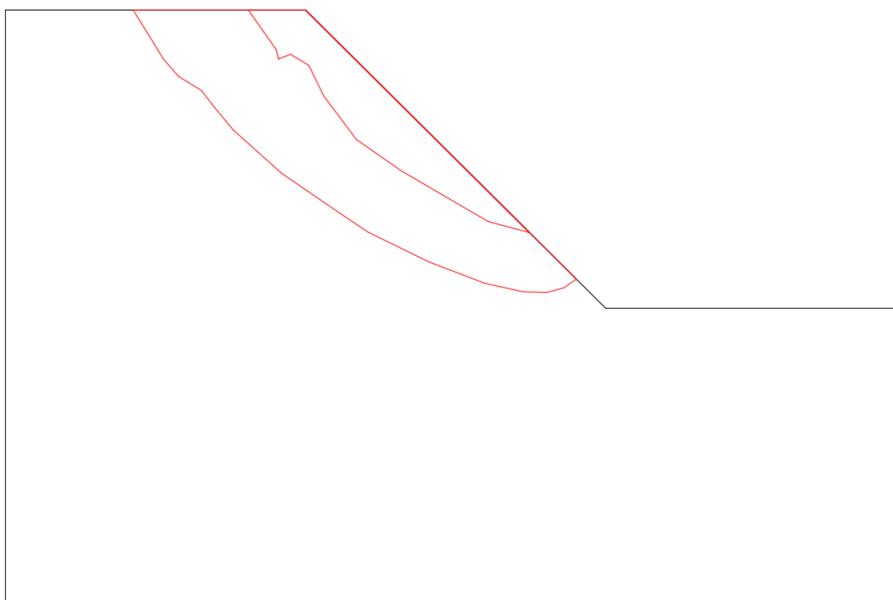


Figura 61. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della nona e della tredicesima estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 365,9 m³/m, pari a circa il 44% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1206 m³/m, circa il 145%.

4.2.6. Inclinazione casuale e VBP 40%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e percentuale volumetrica pari al 40%.

Modello	SRF
R_40_1	0,94
R_40_2	0,88
R_40_3	0,94
R_40_4	0,82
R_40_5	1,03
R_40_6	0,90
R_40_7	1,02
R_40_8	0,90
R_40_9	0,90
R_40_10	1,00
R_40_11	0,96
R_40_12	0,96
R_40_13	0,99
R_40_14	0,88
R_40_15	0,89
Media	0,93
Dev. St.	0,060

Tabella 10. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 40%.

Come è possibile notare dalla Tabella 10, non si ha nessun incremento di resistenza in quanto il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 0,93, valore identico a quello ottenuto per il versante costituito da sola matrice, diversamente dal caso con stessa VBP ma inclinazione pari a 0° in cui si assiste ad un leggero incremento di resistenza. Il valore della deviazione standard corrispondente è abbastanza basso, circa il 6%. Il risultato ottenuto è in controtendenza rispetto ai dati presenti in letteratura, in cui, per queste percentuali volumetriche si ha sempre un incremento in termini di fattore di sicurezza.

Anche se le superfici di scivolamento risultano abbastanza differenti rispetto a quella del versante di sola matrice, come illustrato in Figura 62 per il modello R_40_3, non si verifica nessun effetto di incremento di resistenza:

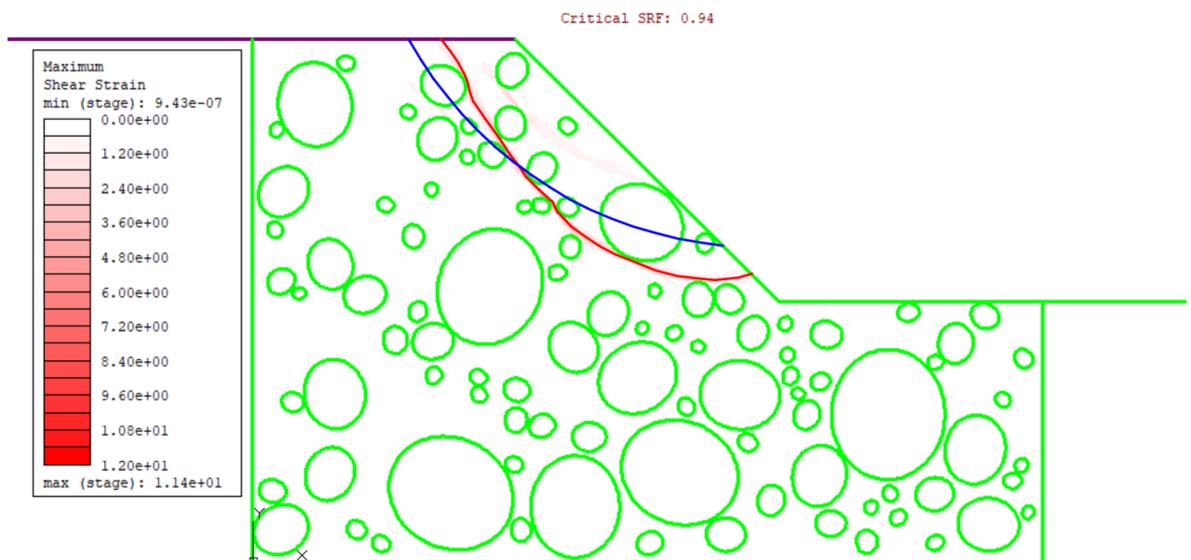


Figura 62. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_40_3 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come è possibile notare, la superficie di scivolamento del modello in questione risulta abbastanza ostacolata dalla presenza dei blocchi ma ciò non comporta un aumento significativo del valore del SRF.

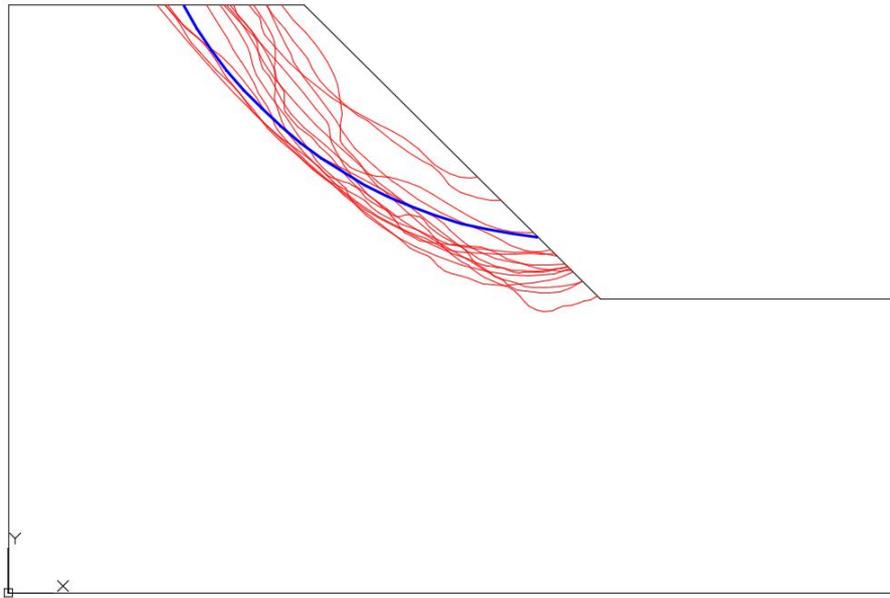


Figura 63. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli R_40_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come illustrato in Figura 63, le superfici di scivolamento presentano una forma abbastanza differente rispetto a quella della superficie del modello di sola matrice, anche se la dispersione in termini di posizione e volume potenzialmente instabile non risulta eccessiva, analogamente al caso di inclinazione pari a 0° e stessa VBP.

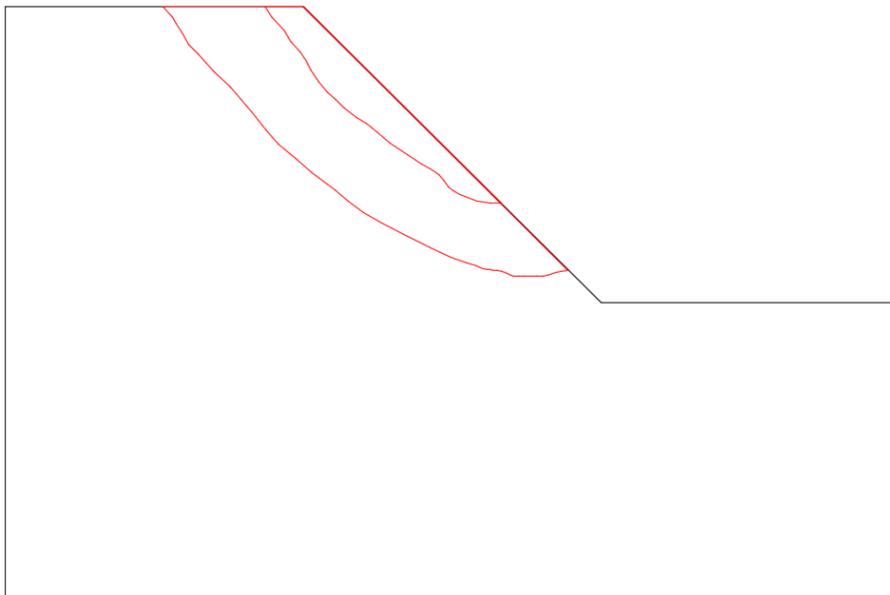


Figura 64. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della sesta e della tredicesima estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 263,1 m³/m, pari a circa il 32% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1098,3 m³/m, circa il 132%.

4.2.7. Inclinazione casuale e VBP 55%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e percentuale volumetrica pari al 55%.

Modello	SRF
R_55_1	1,11
R_55_2	1,08
R_55_3	0,97
R_55_4	0,93
R_55_5	0,95
R_55_6	0,97
R_55_7	0,91
R_55_8	1,00
R_55_9	0,99
R_55_10	1,01
R_55_11	0,96
R_55_12	1,12
R_55_13	0,90
R_55_14	1,00
R_55_15	1,13
Media	1,00
Dev. St.	0,075

Tabella 11. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 55%.

Come è possibile notare dalla Tabella 11, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 1,00. Si ha, quindi, un incremento di resistenza dovuto alla presenza dei blocchi rispetto ai casi con VBP minore. Inoltre, esso risulta quasi identico a quello riscontrato nei modelli con stessa percentuale volumetrica ma inclinazione pari a 0°. Anche in questo caso, il valore della deviazione standard cresce risultando pari a circa il 7%, denotando una maggiore variabilità nei risultati.

Le superfici di scivolamento, in questo caso, risultano abbastanza raccolte intorno alla superficie del versante di sola matrice, come illustrato in Figura 65 per il modello R_55_14, anche se più tortuose:

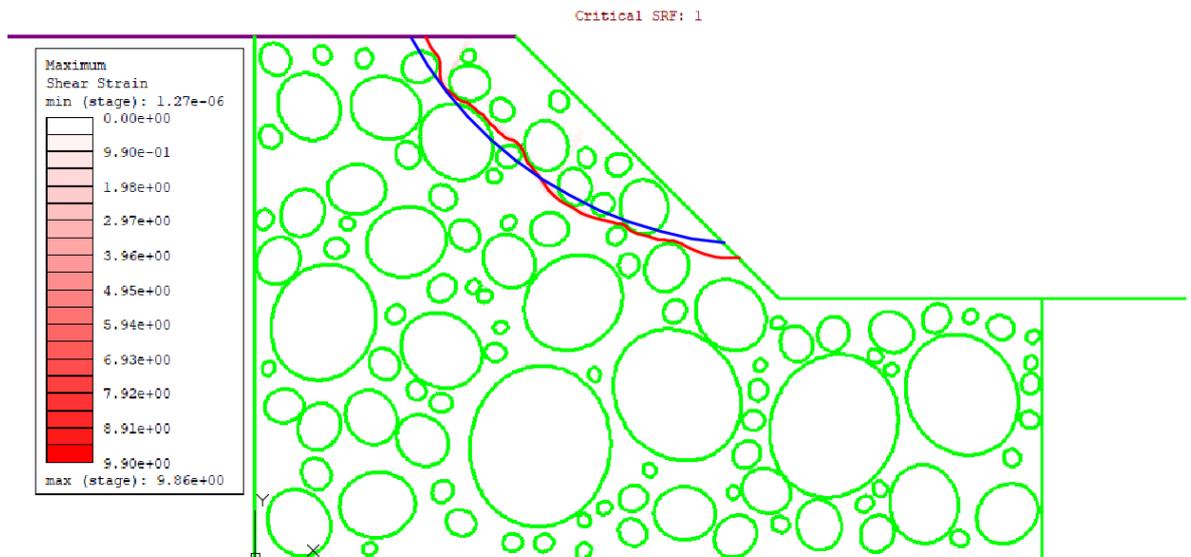


Figura 65. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_55_14 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come è possibile notare, l'incremento nella tortuosità della superficie di scivolamento, probabilmente, induce un aumento di resistenza del pendio, a giudicare dal valore di SRF ottenuto.

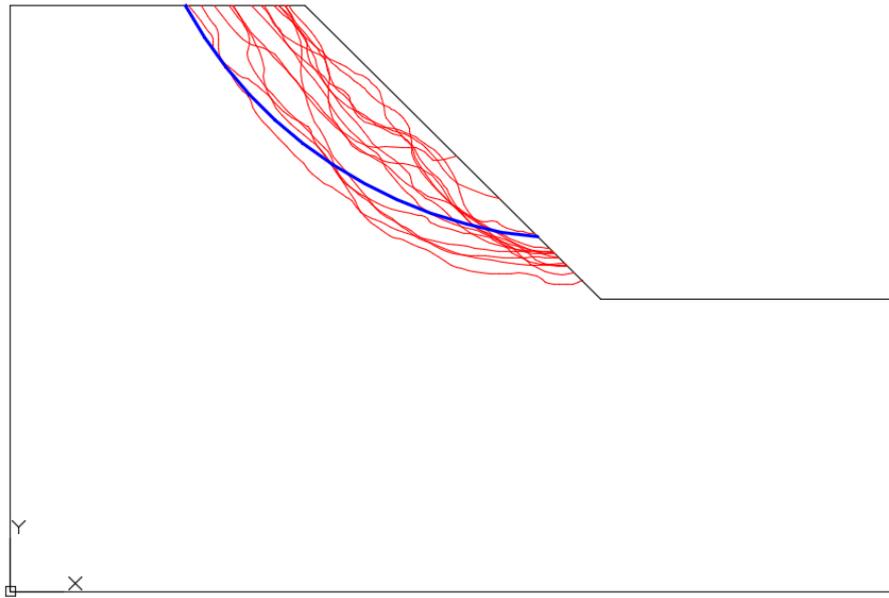


Figura 66. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli 0_55_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Come già anticipato e come illustrato in Figura 66, le superfici di scivolamento presentano una forma molto tortuosa rispetto a quella della superficie del modello di sola matrice, anche se la dispersione in termini di posizione e volume potenzialmente instabile non risulta eccessiva.

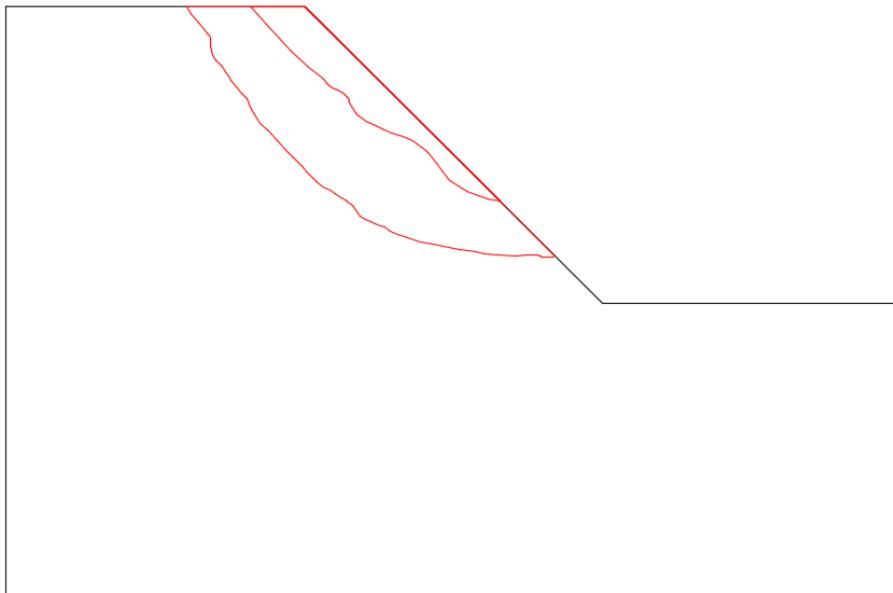


Figura 67. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della prima e della quinta estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta 241,1 m³/m, pari a circa il 29% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta 1017,3 m³/m, circa il 123%.

4.2.8. Inclinazione casuale e VBP 70%

Di seguito, sono riportati i risultati delle analisi dei versanti con blocchi aventi inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e percentuale volumetrica pari al 70%.

Modello	SRF
R_70_1	1,45
R_70_2	1,56
R_70_3	1,36
R_70_4	1,20
R_70_5	1,27
R_70_6	1,25
R_70_7	1,18
R_70_8	1,47
R_70_9	1,05
R_70_10	1,43
R_70_11	1,11
R_70_12	1,17
R_70_13	1,19
R_70_14	1,08
R_70_15	1,48
Media	1,28
Dev. St.	0,163

Tabella 12. Risultati del fattore di sicurezza, fattore di sicurezza medio e deviazione standard ottenuti dalle analisi numeriche sui modelli di versante con presenza di blocchi con inclinazione casuale, eccentricità 0,5 e VBP pari al 70%.

Come è possibile notare dalla Tabella 12, il valore del fattore di sicurezza medio in questo caso è pari a 1,28, risultato molto simile a quello trovato per i modelli con stessa VBP ma inclinazione pari a 0° , le considerazioni rimangono, quindi, invariate: si ha un notevole incremento di resistenza rispetto sia al caso di versante costituito da sola matrice che rispetto ai casi con minore VBP anche se la variabilità dei risultati è molto maggiore, con valori del SRF che vanno da 1,00 a 1,56 ed una deviazione standard pari a 0,16.

Nel caso del modello R_70_10, ad esempio, lo scostamento della superficie di scivolamento rispetto a quella teorica risulta evidente, a causa della presenza di blocchi che ne ostacolano lo sviluppo (Figura 68).

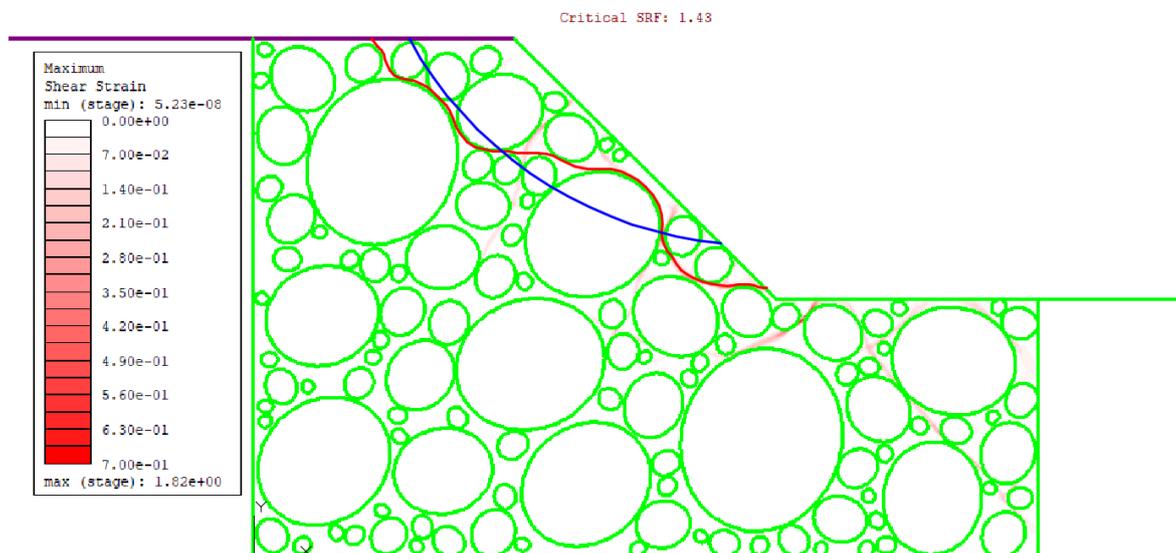


Figura 68. Andamento della superficie di scivolamento per il modello R_70_10 (linea rossa), confrontata con quella del modello di sola matrice (linea blu)

Di conseguenza il fattore di sicurezza del modello risulta notevolmente maggiore rispetto a quello del versante costituito da sola matrice.

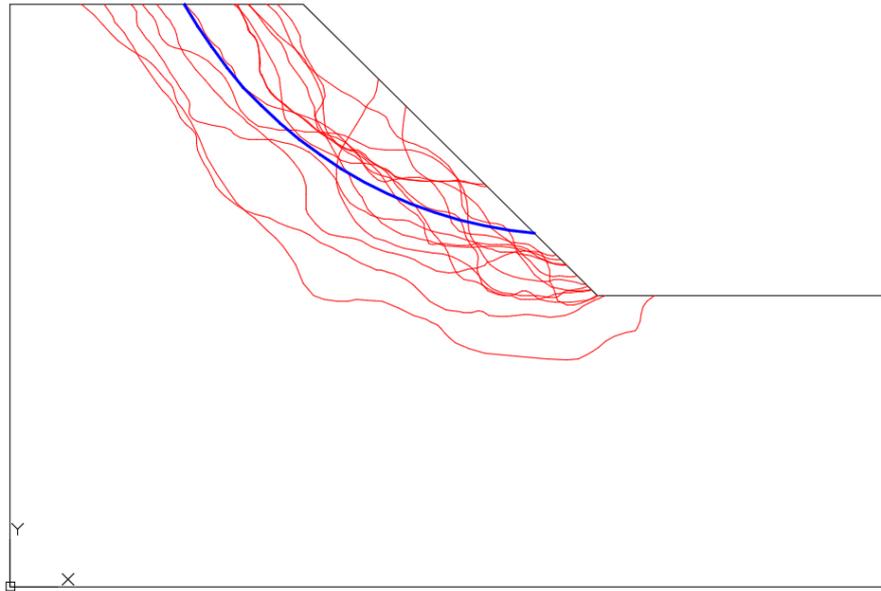


Figura 69. Andamento di tutte le superfici di scivolamento per i modelli R_70_ZZ (linee rosse), confrontate con quella del modello di sola matrice (linea blu)

In questo caso, come illustrato in Figura 69, tutte le superfici di scivolamento presentano una forma ed una profondità molto diverse da quelle della superficie del modello di sola matrice, risultando evidentemente più tortuose a causa della disposizione dei blocchi.

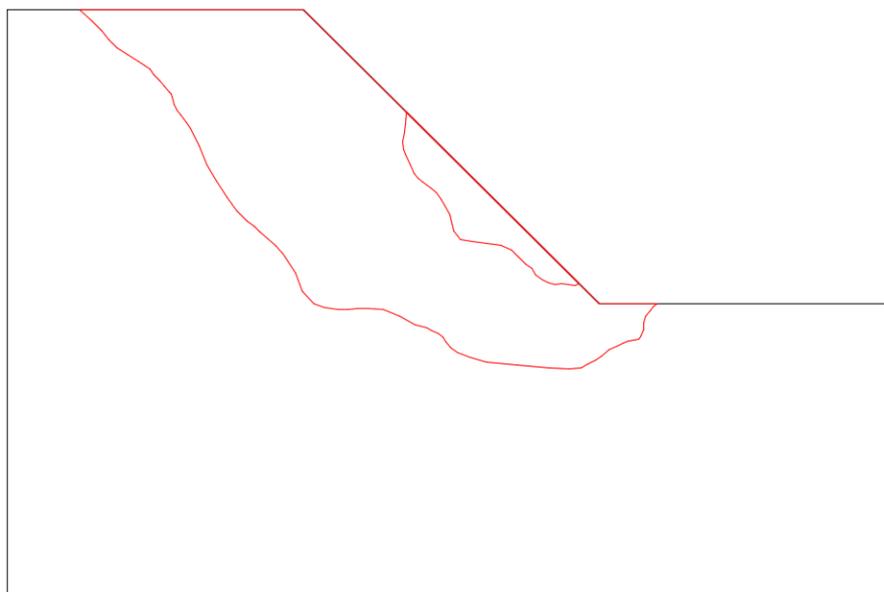


Figura 70. Minimo e massimo volume potenzialmente instabile corrispondenti, rispettivamente, alle superfici di scivolamento della seconda e della sesta estrazione

Il valore del minimo volume potenzialmente instabile risulta $216,4 \text{ m}^3/\text{m}$, pari a circa il 26% di quello del modello di sola matrice mentre il valore massimo risulta $2442,3 \text{ m}^3/\text{m}$, circa il 294%, rispettivamente il minimo e il massimo ottenuti rispetto a qualsiasi altro modello e che denotano un'altissima variabilità.

4.3. Confronto tra i risultati ottenuti

In questo paragrafo sono stati riassunti i risultati delle analisi numeriche effettuate, in maniera tale da poter essere confrontati. In particolare, le grandezze prese in considerazione sono state:

- il fattore di sicurezza medio (SRF medio) per singolo gruppo di 15 estrazioni;
- la deviazione standard per singolo gruppo di 15 estrazioni;
- il volume potenzialmente instabile minimo per singolo gruppo di 15 estrazioni;
- il volume potenzialmente instabile massimo per singolo gruppo di 15 estrazioni.

In Figura 71 è mostrato l'andamento del fattore di sicurezza in base alla percentuale volumetrica dei blocchi, sia per i modelli con inclinazione pari a 0° ed eccentricità 0,866 che per quelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5.

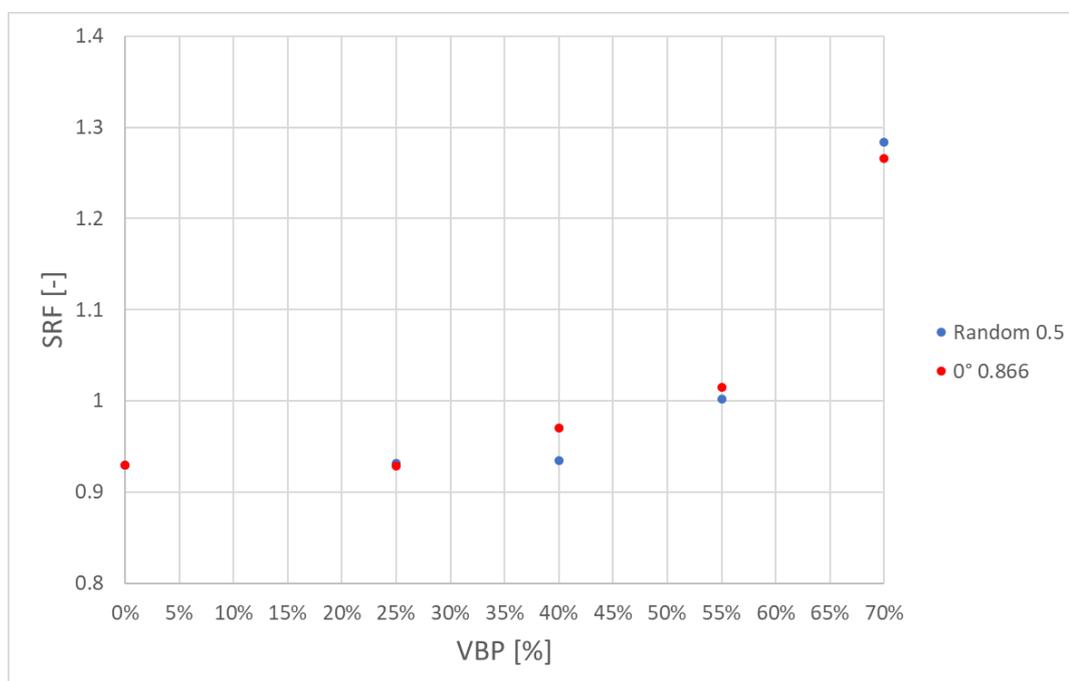


Figura 71. Valori del fattore di sicurezza medio in base alla VBP. In rosso, i valori di SRF medio riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del fattore di sicurezza corrispondente alla VBP=0% è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice

Come anticipato nei paragrafi precedenti, il valore del fattore di sicurezza medio nei modelli con percentuale volumetrica dei blocchi pari al 25% è identico a quello del versante di sola matrice. Per VBP pari al 40% si ha un incremento di resistenza solo per i versanti con blocchi inclinati di 0°, mentre il valore di SRF medio ottenuto per i versanti con inclinazione random non subisce nessuna variazione rispetto al valore di SRF del versante di sola matrice. Ciò, probabilmente, è dovuto al fatto che per percentuali volumetriche non troppo elevate, i blocchi orizzontali e più allungati costituiscono un ostacolo maggiore alla propagazione della superficie di scivolamento. Questo risultato è in controtendenza rispetto ai risultati presenti in letteratura, in quanto, per tali percentuali volumetriche, è atteso un incremento di resistenza (Irfan e Tang, 1993; Napoli et al., 2018). Per quanto riguarda i risultati ottenuti per VBP pari al 55%, i valori ottenuti risultano molto simili tra loro e, in entrambi i casi, si ha un incremento del fattore di sicurezza a causa della presenza dei blocchi. I valori più elevati in termini di SRF sono, ovviamente, quelli corrispondenti alla VBP pari al 70%, in cui si ha un netto incremento di resistenza rispetto alle percentuali minori.

In Figura 72, è rappresentata la deviazione standard al variare della percentuale volumetrica dei blocchi. Si può notare come essa abbia un andamento crescente, simile a quello ottenuto per i valori del fattore di sicurezza. Di conseguenza, è possibile affermare che anche la variabilità nei risultati aumenta all'aumentare della VBP.

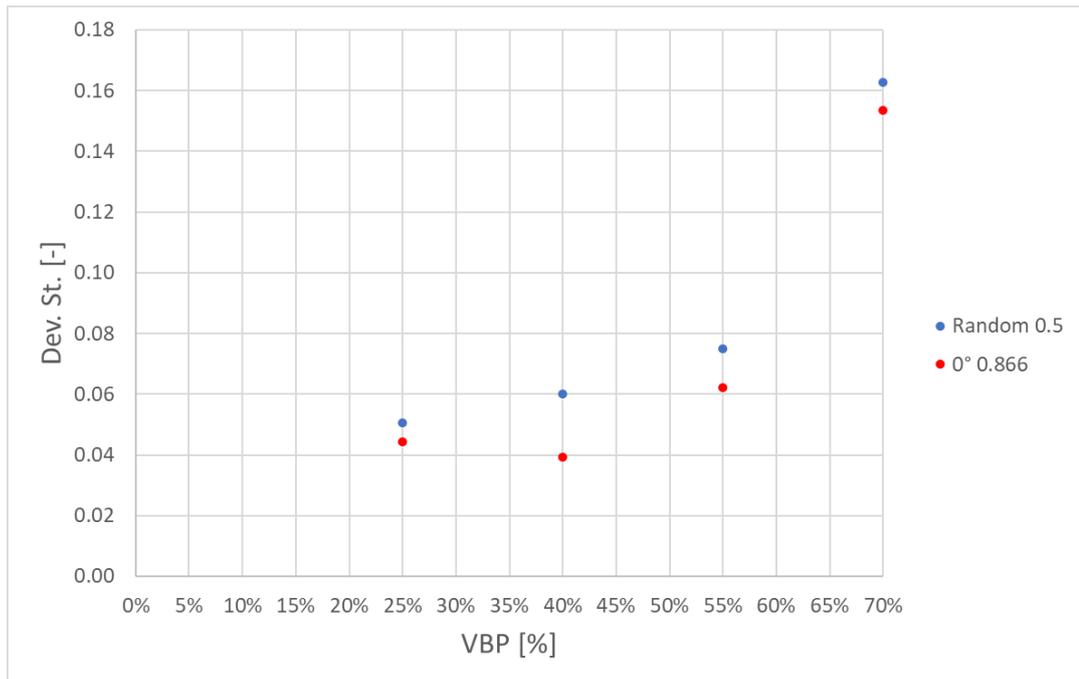


Figura 72. Valori della deviazione standard in base alla VBP. In rosso, i valori della deviazione standard riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5.

Inoltre, la deviazione standard per i modelli con blocchi inclinati in modo casuale e con eccentricità pari a 0,5 risulta sempre maggiore rispetto ai modelli con inclinazione dei blocchi 0° ed eccentricità 0,866, per qualsiasi valore di VBP.

In Figura 73 e Figura 74, sono mostrati gli andamenti dei volumi potenzialmente instabili minimo e massimo, in maniera tale da cercare di rappresentare la variabilità della superficie di scivolamento in termini di sviluppo e profondità, al crescere della percentuale volumetrica dei blocchi.

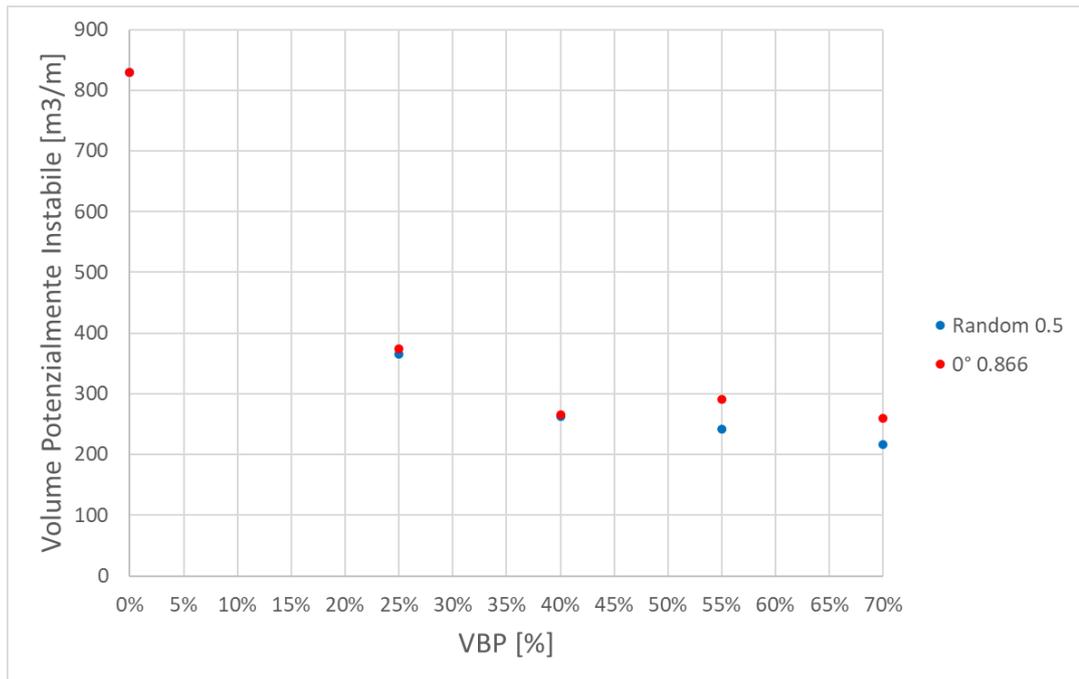


Figura 73. Valori del volume potenzialmente instabile minimo (relativo alle superfici più prossime al versante per ogni set di estrazioni) in base alla VBP. In rosso, i valori di volume riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del volume potenzialmente instabile corrispondente alla $VBP=0\%$ è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice

Come è possibile notare, i volumi potenzialmente instabili relativi alle superfici più prossime al versante si riducono all'aumentare della percentuale volumetrica, inoltre, risultano tutti notevolmente inferiori rispetto al volume potenzialmente mobilitato nel caso di versante costituito da sola matrice.

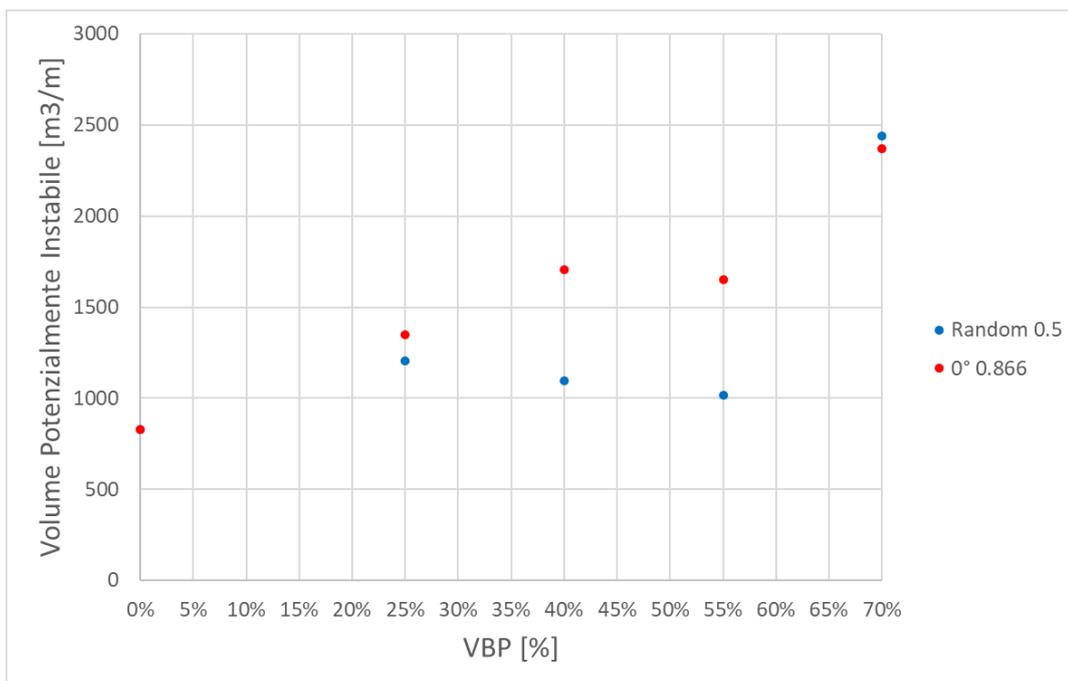


Figura 74. Valori del volume potenzialmente instabile massimo (relativo alle superfici più profonde per ogni set di estrazioni) in base alla VBP. In rosso, i valori di volume riferiti ai modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° ed eccentricità 0,866; in blu quelli dei modelli con inclinazione casuale ed eccentricità 0,5. Il valore del volume potenzialmente instabile corrispondente alla VBP=0% è riferito a quello ottenuto per il versante di sola matrice

Contemporaneamente, i volumi relativi alle superfici più profonde tendono ad aumentare con la VBP, risultando relativamente più grandi rispetto a quello del versante di sola matrice. Entrambi i risultati ottenuti potrebbero indicare una variabilità in termini di posizione della superficie di scivolamento che cresce all'aumentare della percentuale volumetrica dei blocchi. Infatti, i valori di volume potenzialmente instabile minimo e massimo per ciascun set di estrazioni tendono a divergere sempre di più via via che la VBP aumenta.

5. Influenza dell'eccentricità e dell'inclinazione dei blocchi sulla stabilità di versante

In questo capitolo si riportano i risultati in termini di fattore di sicurezza medio ottenuti da vari testisti, uniti a quelli già presentati in questo elaborato, allo scopo di effettuare dei confronti per indagare la possibile influenza dei parametri di inclinazione e eccentricità dei blocchi sull'incremento di resistenza dei versanti. Sono state analizzate inclinazioni dei blocchi rispetto all'orizzontale rispettivamente di 0° , 30° , 60° e 90° , con valori di eccentricità di 0,5 e 0,866. Il caso di blocchi con inclinazione casuale è stato analizzato soltanto per un'eccentricità pari a 0,5. In totale, sono state esaminate nove combinazioni differenti di inclinazione e eccentricità dei blocchi, per ogni VBP analizzata. In Figura 75 e Figura 76 sono illustrate le varie combinazioni utilizzate per modelli con VBP pari al 55%.

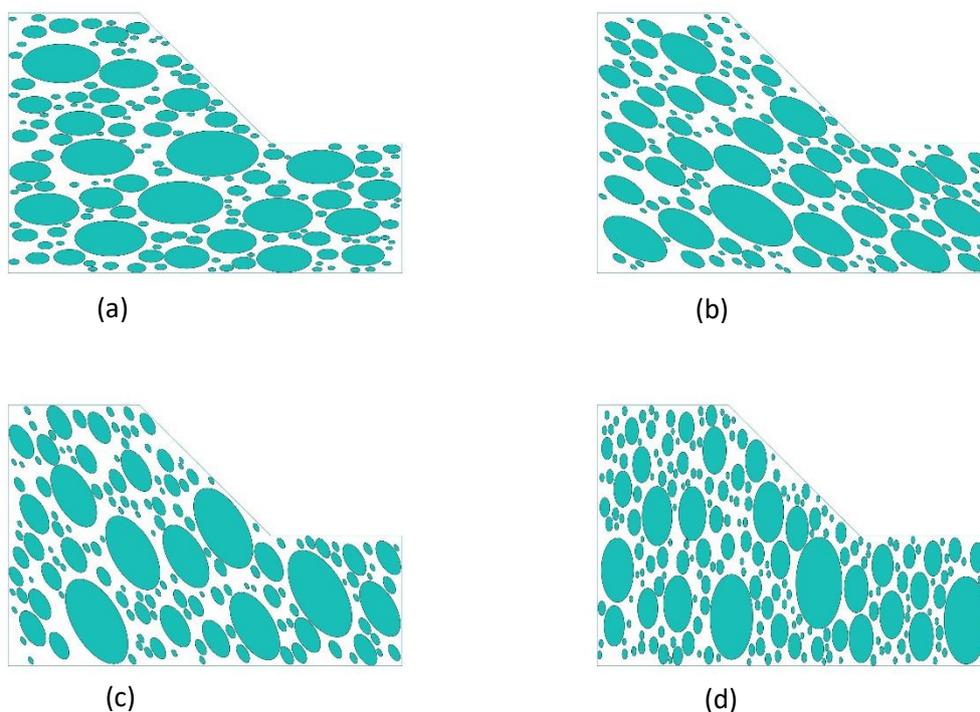


Figura 75. Esempi di versanti con VBP pari al 55%, eccentricità pari a 0,866 con blocchi inclinati di 0° (a), 30° (b), 60° (c) e 90° (d)

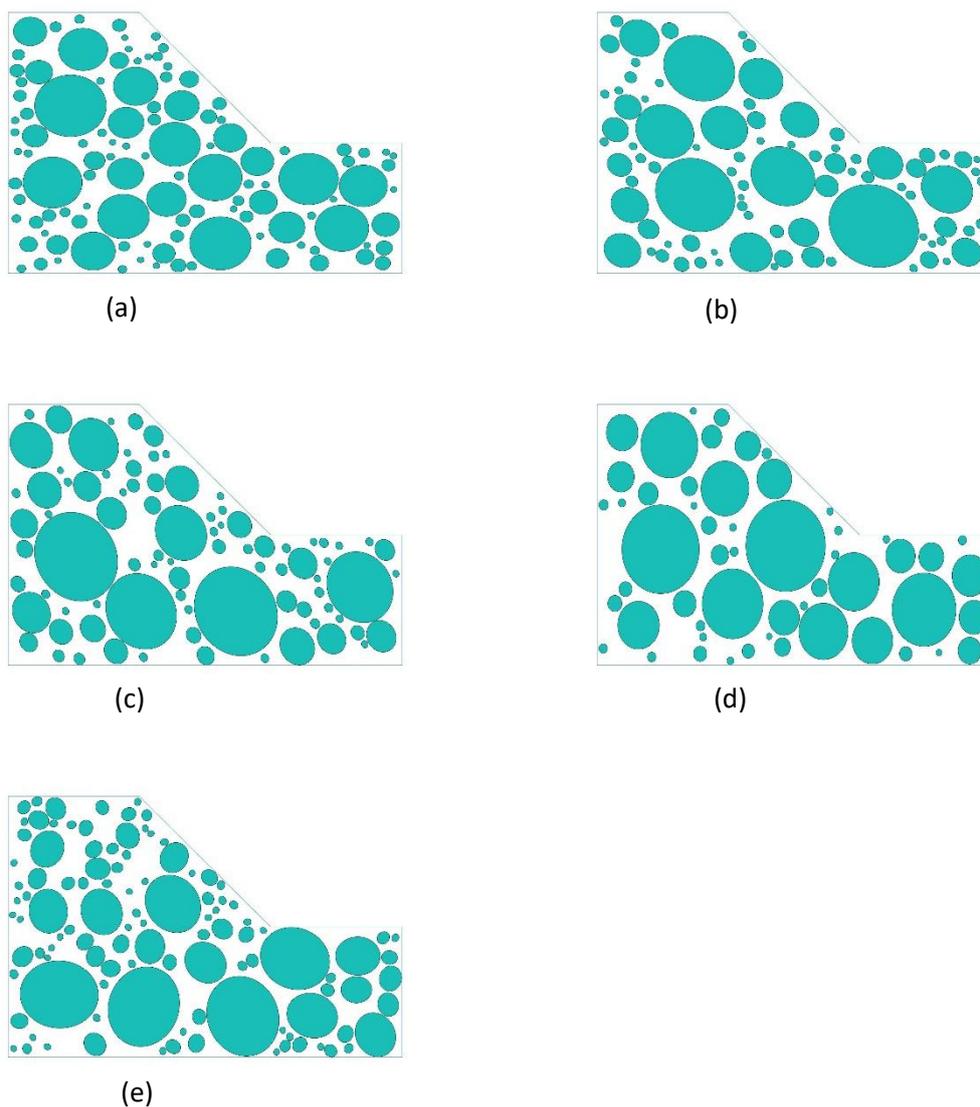


Figura 76. Esempi di versanti con VBP pari al 55%, eccentricità pari a 0,5 con blocchi inclinati di 0° (a), 30° (b), 60° (c), 90° (d) e random (e)

In Tabella 13 sono riportati i valori medi del fattore di sicurezza ottenuti, in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi, ordinati rispetto all'eccentricità e all'inclinazione. Come è possibile notare, i fattori di sicurezza corrispondenti ai modelli omogenei di sola matrice risultano leggermente diversi tra loro. Ciò, probabilmente, è dovuto alle differenti impostazioni utilizzate per la creazione della mesh, avendo mantenuto costanti le caratteristiche geometriche, dei materiali, le condizioni al contorno e le condizioni iniziali dei modelli. Per sopperire a questo inconveniente, i confronti sui modelli con presenza di inclusioni sono stati effettuati utilizzando i valori del fattore di sicurezza medio normalizzato rispetto al corrispondente fattore di

sicurezza ottenuto per il modello costituito da sola matrice. I valori dei fattori di sicurezza normalizzati sono riportati in Tabella 14.

i [°]	e [-]	VBP				
		0%	25%	40%	55%	70%
0°	0,5	0,92	0,93	0,97	1,12	1,18
30°	0,5	0,92	0,93	0,94	1,00	1,18
60°	0,5	0,94	1,03	1,00	1,05	1,16
90°	0,5	0,94	1,01	1,03	1,05	1,23
Rand.	0,5	0,93	0,93	0,93	1,00	1,28
0°	0,866	0,93	0,93	0,97	1,01	1,27
30°	0,866	0,93	0,99	1,00	1,04	1,08
60°	0,866	0,93	0,97	0,96	1,00	1,21
90°	0,866	0,94	0,96	0,95	0,99	1,18

Tabella 13. Valori del fattore di sicurezza medio in funzione dell'inclinazione, dell'eccentricità e della percentuale volumetrica dei blocchi

		VBP				
i [°]	e [-]	0%	25%	40%	55%	70%
0°	0,5	1,00	1,01	1,06	1,22	1,28
30°	0,5	1,00	1,01	1,03	1,09	1,28
60°	0,5	1,00	1,10	1,07	1,12	1,23
90°	0,5	1,00	1,07	1,09	1,12	1,31
Rand.	0,5	1,00	1,00	1,00	1,08	1,38
0°	0,866	1,00	1,00	1,04	1,09	1,36
30°	0,866	1,00	1,06	1,07	1,12	1,17
60°	0,866	1,00	1,05	1,04	1,07	1,30
90°	0,866	1,00	1,02	1,01	1,06	1,26

Tabella 14. Valori del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al fattore di sicurezza del versante di sola matrice in funzione dell'inclinazione, dell'eccentricità e della percentuale volumetrica dei blocchi

In Figura 77 sono mostrati gli andamenti del fattore di sicurezza normalizzato, in funzione della percentuale volumetrica dei blocchi. Come è possibile notare, indipendentemente dai valori di eccentricità e di inclinazione dei blocchi, si ha un incremento del fattore di sicurezza all'aumentare della VBP. L'incremento maggiore si riscontra per i modelli con blocchi inclinati in maniera casuale ed eccentricità pari a 0,5, nonostante, per gli stessi modelli, non si registri alcun incremento di resistenza in corrispondenza di percentuali volumetriche del 25% e 40%. Tutti gli altri valori presentano una marcata variabilità che aumenta con la VBP.

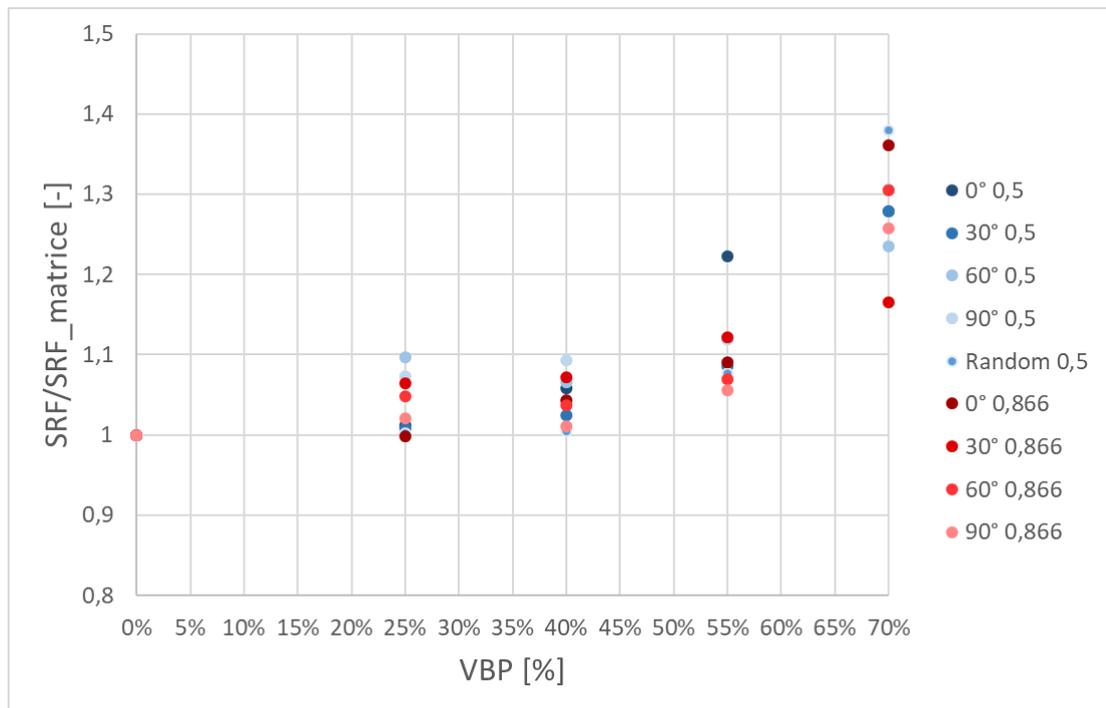


Figura 77. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP, per tutte le inclinazioni e le eccentricità dei blocchi analizzate

In Figura 78 sono mostrati i valori medi del fattore di sicurezza normalizzato in funzione della VBP, per i modelli con inclinazione dei blocchi pari a 0° , con eccentricità pari a 0,5 e 0,866. Come è possibile notare, per VBP del 25% e del 40% i valori sono molto simili, mentre per VBP del 55% si ha un incremento di resistenza maggiore nel caso dei modelli con eccentricità dei blocchi pari a 0,5. Il trend si inverte per percentuali volumetriche del 70%.

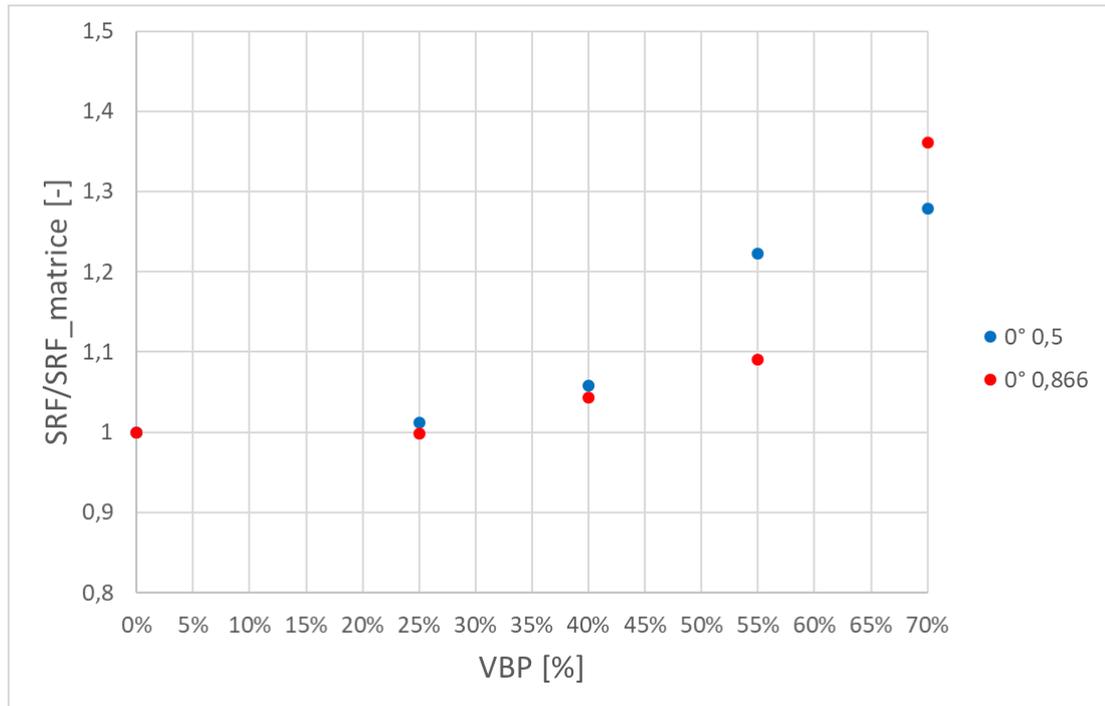


Figura 78. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 0° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)

Anche nel caso di inclinazione dei blocchi pari a 30° i valori del fattore di sicurezza normalizzato risultano abbastanza simili tra loro (Figura 79), con incrementi leggermente più elevati per eccentricità pari a 0,866 fino a VBP del 55%, al contrario del caso precedente. Analogamente al caso dei modelli con blocchi orizzontali, per percentuali volumetriche pari al 70% si ha un fattore di sicurezza normalizzato più alto per eccentricità dei blocchi pari a 0,5.

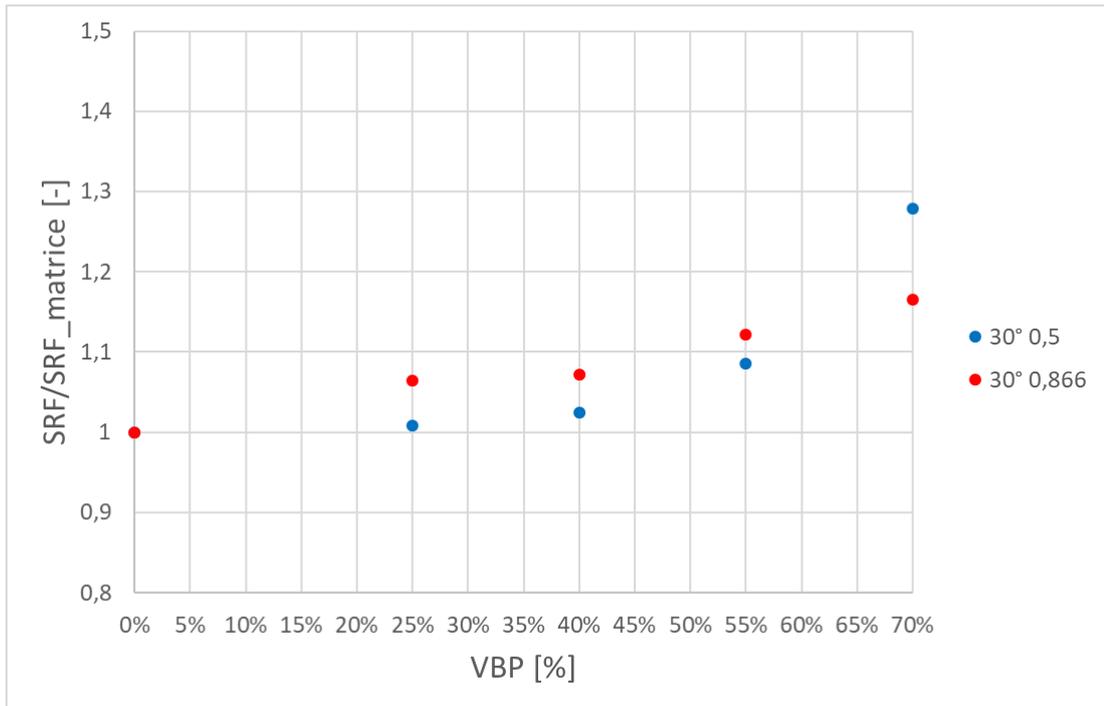


Figura 79. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 30° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)

Anche nel caso di blocchi inclinati di 60° , come nel caso di blocchi orizzontali, si hanno dei valori del fattore di sicurezza maggiori per eccentricità pari 0,5 fino al 55% di VBP, come mostrato in Figura 80. L'incremento di resistenza corrispondente ad una VBP del 70%, anche in questo caso, risulta maggiore per eccentricità pari a 0,866.

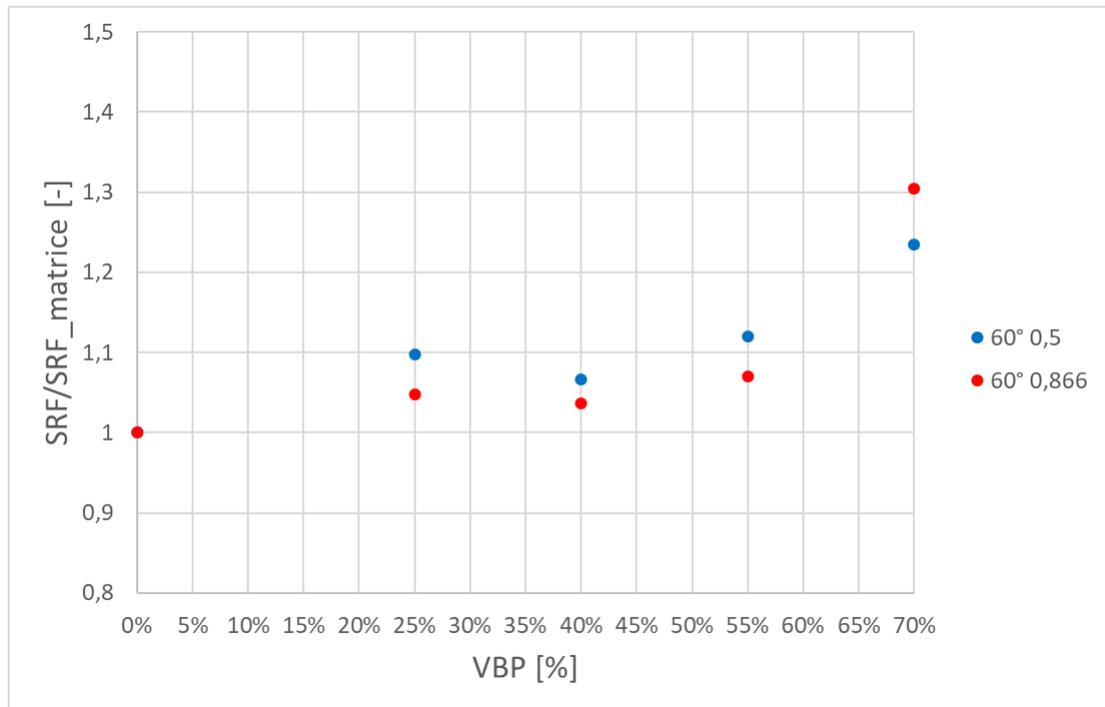


Figura 80. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 60° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)

Come mostrato in Figura 81, nel caso di blocchi con inclinazione verticale, il valore del fattore di sicurezza normalizzato risulta più elevato per eccentricità pari a 0,5, per tutte le percentuali volumetriche considerate.

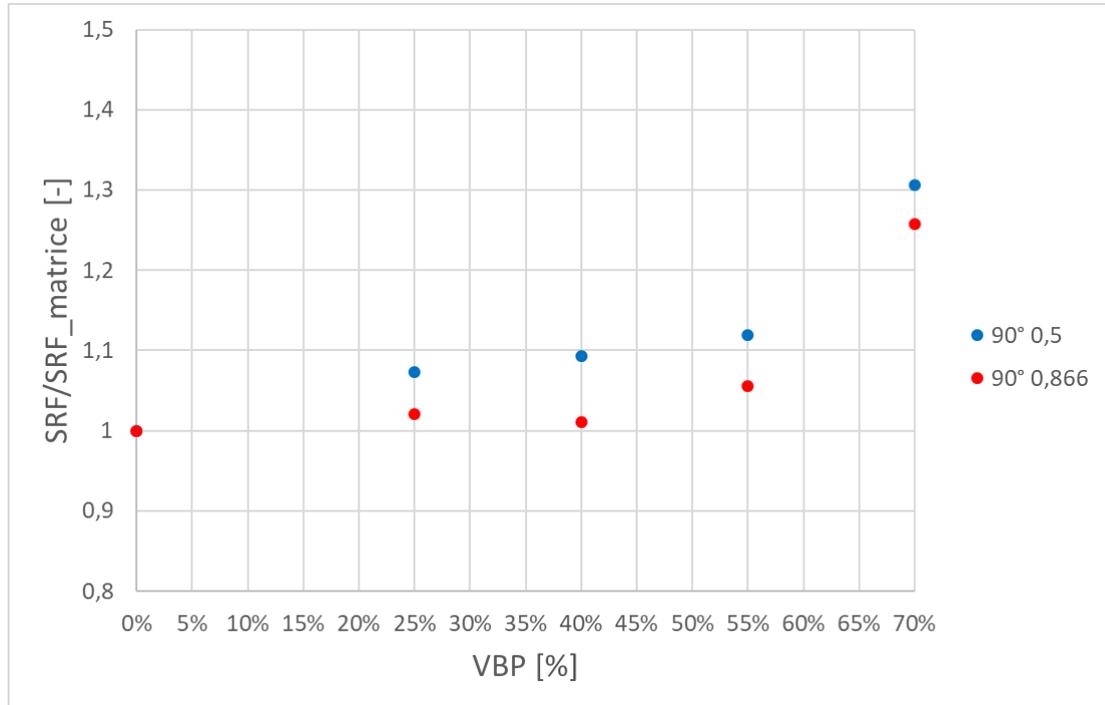


Figura 81. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con inclinazione pari a 90° ed eccentricità pari a, rispettivamente, 0,5 (in blu) e 0,866 (in rosso)

In Figura 82 sono mostrati i valori del fattore di sicurezza normalizzato per i modelli con presenza di blocchi con eccentricità pari a 0,5, per ciascuna inclinazione indagata. Lo stesso grafico è riportato in Figura 83 per eccentricità dei blocchi pari a 0,866.

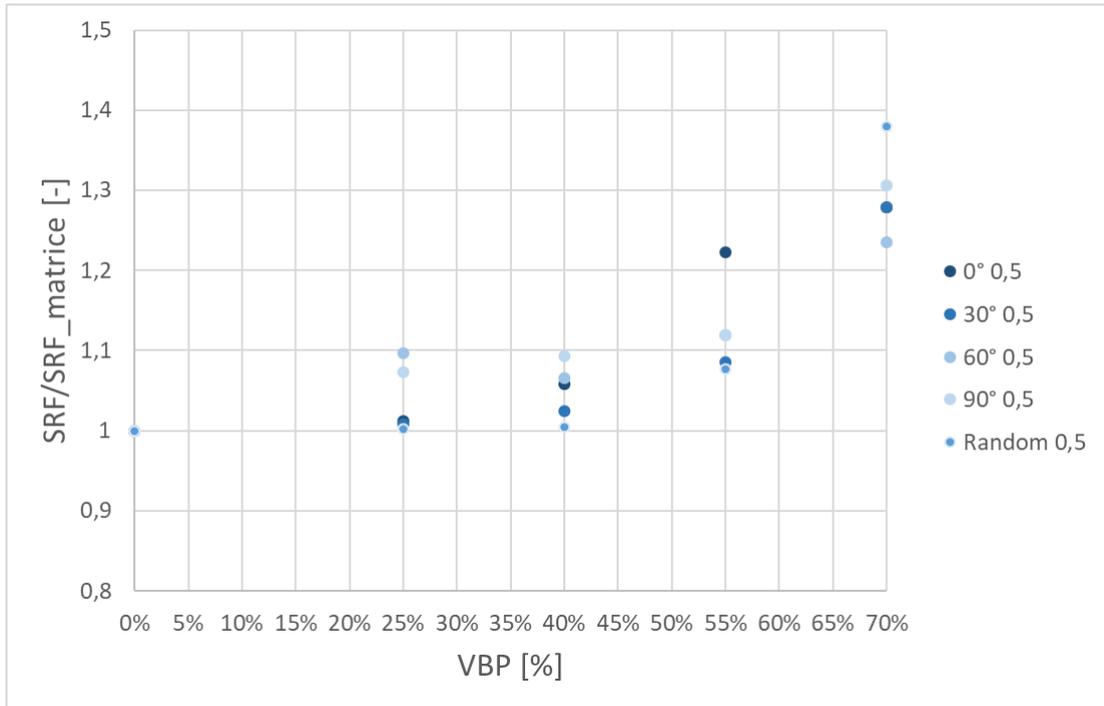


Figura 82. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con eccentricità pari a 0,5

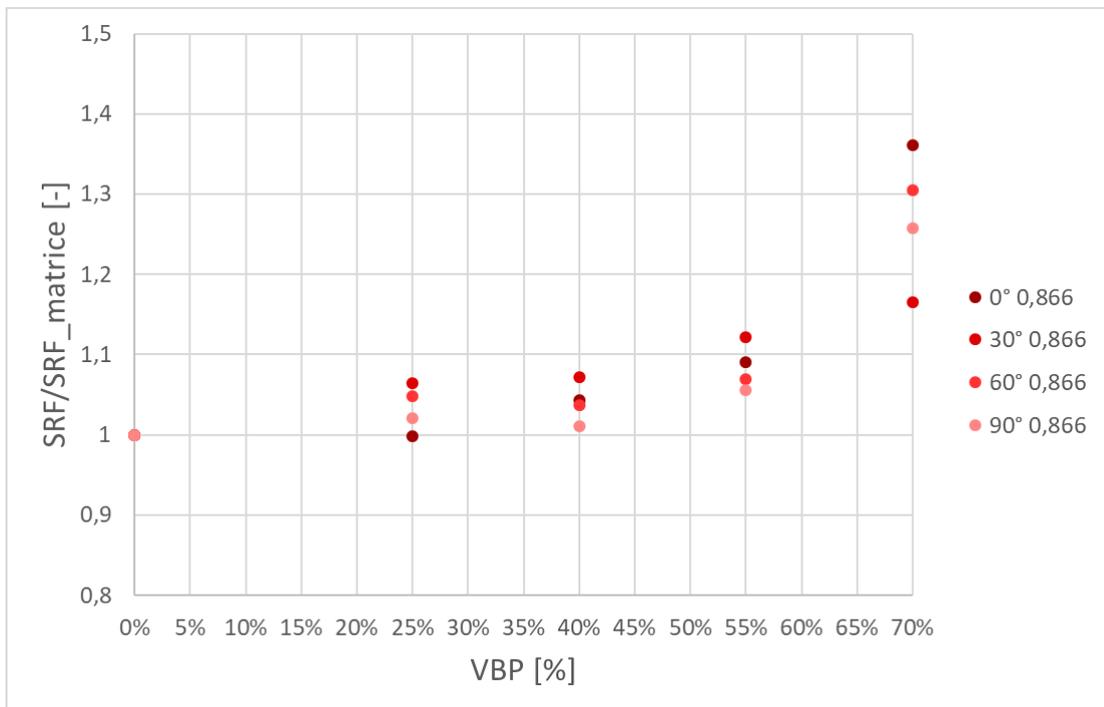


Figura 83. Valori medi del fattore di sicurezza normalizzato rispetto al valore del fattore di sicurezza del modello di sola matrice, in funzione della VBP. I valori sono riferiti ai modelli con eccentricità pari a 0,866

In conclusione, i parametri di inclinazione e eccentricità dei blocchi non sembrano avere una significativa influenza sulla stabilità di versante. Gli andamenti del fattore di sicurezza medio normalizzato sono abbastanza simili e le variazioni riscontrate sono, con ogni probabilità, frutto della disposizione dei blocchi, dettata dalla casualità delle estrazioni. Il modo in cui le inclusioni vengono distribuite all'interno della geometria del pendio, infatti, sembra essere un fattore determinante per l'incremento di resistenza, come anticipato nel capitolo precedente. A parità di percentuale volumetrica, per i modelli che presentano blocchi di grandi dimensioni disposti in maniera tale da ostacolare le deformazioni di taglio e, quindi, lo sviluppo della superficie di scivolamento, si riscontrano i valori più elevati del fattore di sicurezza. Dalle analisi condotte è possibile affermare, come già ampiamente dimostrato in letteratura (Irfan e Tang, 1993; Medley e Sanz, 2004; Barbero et al., 2006; Napoli et al., 2018), che la percentuale volumetrica dei blocchi e la tortuosità della superficie di scivolamento sono i fattori che influenzano maggiormente la stabilità dei versanti in bimrock.

Conclusioni

In questo elaborato, dopo aver descritto le principali caratteristiche del bimrock, sono stati riassunti i principali studi riguardanti le analisi di stabilità di versanti costituiti da questo materiale presenti in letteratura. In seguito, è stato descritto il procedimento utilizzato per la creazione di modelli di versante in bimrock bidimensionali agli elementi finiti. Per la generazione dei blocchi è stato utilizzato un approccio stocastico, in maniera tale da considerare la variabilità in termini spaziali e dimensionali delle inclusioni. A questo scopo, è stato utilizzato un codice Matlab che genera i blocchi di forma ellittica con dimensioni e disposizione casuale, seguendo delle precise regole statistiche. Le analisi FEM sono state eseguite su due tipologie di modelli, differenti per inclinazione e eccentricità. La prima tipologia è costituita da blocchi disposti orizzontalmente e eccentricità pari a 0,866, mentre la seconda è costituita da blocchi con inclinazione casuale e eccentricità pari a 0,5. Per ognuna di queste tipologie di modelli sono state analizzate percentuali volumetriche dei blocchi (VBP) pari a 25%, 40%, 55% e 70%, eseguendo 15 estrazioni per ciascuna percentuale volumetrica. Complessivamente, sono stati considerati 120 modelli, eseguendo analisi di stabilità di versante con metodo SSR, mediante il programma agli elementi finiti Rocscience RS². I risultati ottenuti, in termini di fattore di sicurezza e massime deformazioni di taglio, hanno permesso di effettuare delle considerazioni riguardo l'incremento di resistenza apportato dalla presenza dei blocchi. In particolare, sia per i modelli con blocchi orizzontali e eccentricità pari a 0,866 che per quelli con blocchi con inclinazione random e eccentricità pari a 0,5, sono stati ottenuti risultati abbastanza simili. Infatti, in entrambi i casi, per percentuali volumetriche del 25% non è stato riscontrato alcun incremento del fattore di sicurezza. Per VBP pari al 40%, un incremento di resistenza minimo è stato osservato solo per i versanti con blocchi disposti orizzontalmente, mentre per percentuali del 55% l'incremento è stato significativo per entrambe le tipologie di versanti. Il massimo aumento del fattore di sicurezza è stato riscontrato per percentuali volumetriche del 70%, ottenendo un incremento del fattore di sicurezza, rispetto a quello del versante di sola matrice, di circa il 37%.

Successivamente, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli di altri testisti che hanno condotto delle analisi di stabilità di versanti in bimrock seguendo un procedimento analogo ma con blocchi ellittici differenti in termini di inclinazione e eccentricità. Sono state prese in considerazione altre 7 tipologie di versante, con blocchi di inclinazione e eccentricità rispettivamente pari a: 0° e 0,5, 30° e 0,5, 60° e 0,5, 90° e 0,5, 30° e 0,866, 60° e 0,866, 90° e 0,866. Sono stati confrontati i valori dei fattori di sicurezza medi normalizzati rispetto al fattore di sicurezza dei versanti di sola matrice, in funzione della VBP. Lo scopo è stato quello di indagare l'effetto delle variabili di inclinazione e eccentricità delle inclusioni sul fattore di sicurezza dei versanti. Sebbene siano state riscontrate alcune differenze in termini di resistenza tra le varie tipologie di modelli confrontati, queste sembrano imputabili più alla variabilità dei risultati dovuta alla disposizione random dei blocchi che ad una effettiva influenza delle variabili considerate. In definitiva, il fattore principale che influenza l'incremento di resistenza di versanti in bimrock risulta essere la percentuale di blocchi presenti all'interno della matrice. Analisi future potrebbero essere svolte tenendo in considerazione altri fattori determinanti nell'ambito della stabilità dei versanti, come l'effetto di pressioni interstiziali dovute alla presenza di una falda freatica.

Bibliografia

Afifipour, M., Moarefvand, P., 2013 *Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

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

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

Amadore, F., 2018 *Analisi di stabilità di un versante in bimrock*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino.

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

Barbero, M., Bonini, M., Borri-Brunetto, M., 2007 *Numerical modelling of the mechanical behaviour of bimrock*. Proceedings of the 11th ISRM Int. Congress. Taylor & Francis Ltd., 2007.

Barton, N., Choubey, V., 1977 *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics Vol.10.

Buemi, C., 2019 *Studio delle formazioni complesse a blocco in matrice* Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino.

Cabiddu, G., 2018 *Influenza dell'anisotropia di matrice nell'analisi di stabilità di pendio in bimrock*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino.

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

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

Festa, A., Dilek, Y., Pini, G.A., Codegone, G., Ortaga, K., 2012 *Mechanisms and processes of stratal disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: Redefining and classifying mélanges*. Tectonophysics 568–569 (2012) 7–24.

Festa, A., Pini, G.A., Ogata, K., and Dilek, Y., 2019 *Diagnostic features and fieldcriteria in recognition of tectonic, sedimentary and diapric mélanges in orogenicbelts and exhumed subduction-accretion complexes*. Godwana Research 74 (2019), 7-30.

Giordano, E., 2018 *Analisi di stabilità di un versante in bimrock*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino.

Giordano, S., 2018 *Influenza dell'orientazione dei clasti sulla stabilità di un versante in bimrock*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino.

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.

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

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

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

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

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

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.

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

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

Medley, E., 2004 *Observation on tortuous failure surfaces in bimrocks*. Felsbau Vol.22 (2004), No. 5.

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).

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

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

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

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

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

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

RS2 Theory documentations provided by the developers of the software.
https://www.roscience.com/help/rs2/#t=getting_started%2FRS2_Applications_Overview.htm (2020)

Sonmez, H., Gokceoglu, C., Tuncay, E., Medley, E., Nefeslioglu, H.A., 2004° *Relationships Between Volumetric Block Proportions and Overall UCS of a Volcanic Bimrock*. Felsbau Rock and Soil Engineering- Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 22(5).

Sonmez, H., Tuncay, E., Gokceoglu, C., 2004b *Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. 41.

Sonmez, H., Altinsoy, H., Gokgeoglu, C., Medley, E., 2006a *Considerations in Developing an Empirical Strength Criterion for Bimrocks*. Proceedings 4th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 2006), November 6-10, Singapore.

Sonmez, H., Gokceoglu, C., Medley, E., Tuncay, E., Nefeslioglu, H.A., 2006b *Estimating the Uniaxial Compressive Strength of a Volcanic Bimrock*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.

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.

Sonmez, H., Ercanoglu, M., Kalender, A., Dagdelenler, G., Tunusluoglu, C., 2016 *Predicting uniaxial compressive strength and deformation modulus of volcanic bimrock considering engineering dimension*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.

Turcotte, D.L., 1986 *Fractals and Fragmentation*. Journal of Geophysical Research 91 (B2), 1921-1926.

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

Van Velsor, J.E., Walkinshaw, J.L. 1992 *Accelerated Movement of Large Coastal Landslide Following October 17, 1989, Loma Prieta Earthquake in California*. In: Transportation Research Record 1343.

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.

Wang, P., Song, C., Jin, Y., Makse H. A., 2010 *Jamming II: Edwards' statistical mechanics of random packings of hard spheres*. Levich Institute and Physics Department, City College of New York, New York, NY 10031, US.

Xu, W., Hu, R., Tan, R., 2007 *Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge area, China*. Géotechnique. 3.

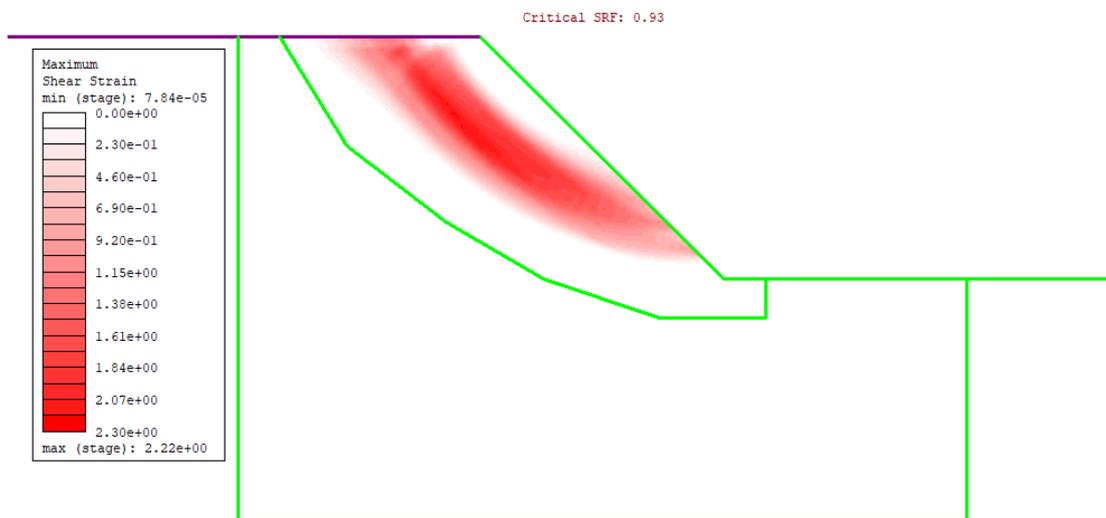
Xu, W., Yueb, Z., Hu, R., 2008 *Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil–rock mixture using digital image processing based finite element method.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci.

Allegati

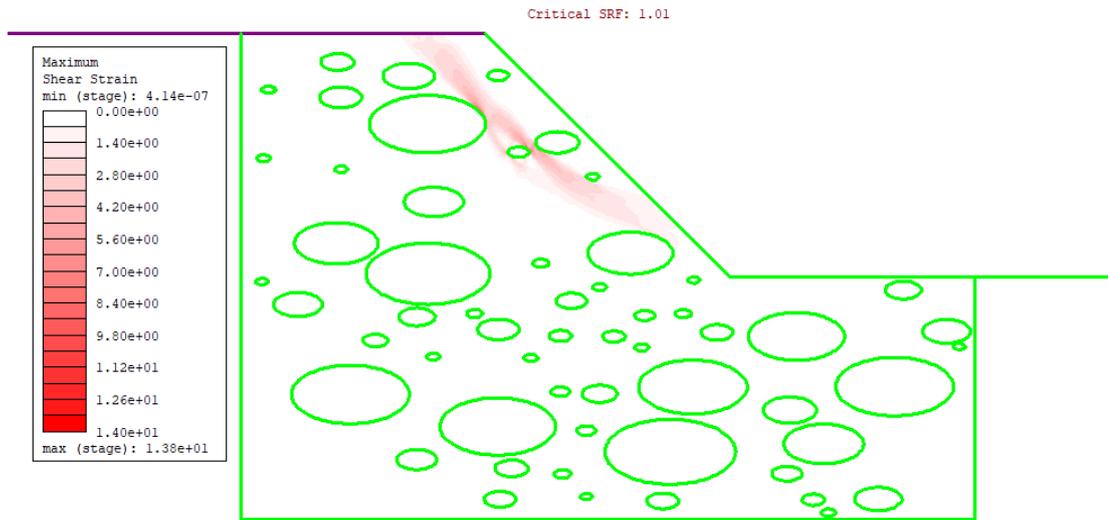
Allegato 1

Massime deformazioni di taglio

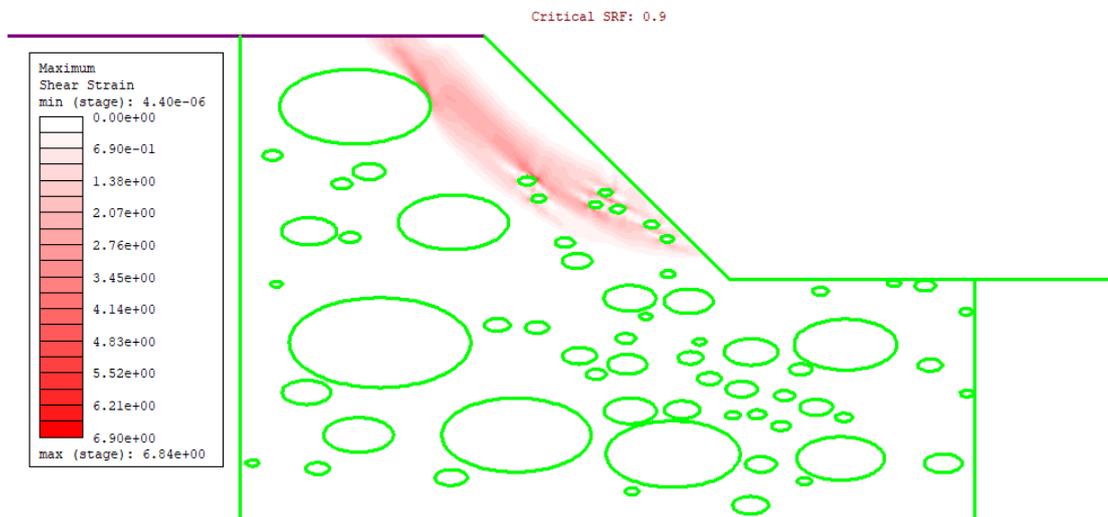
Matrice



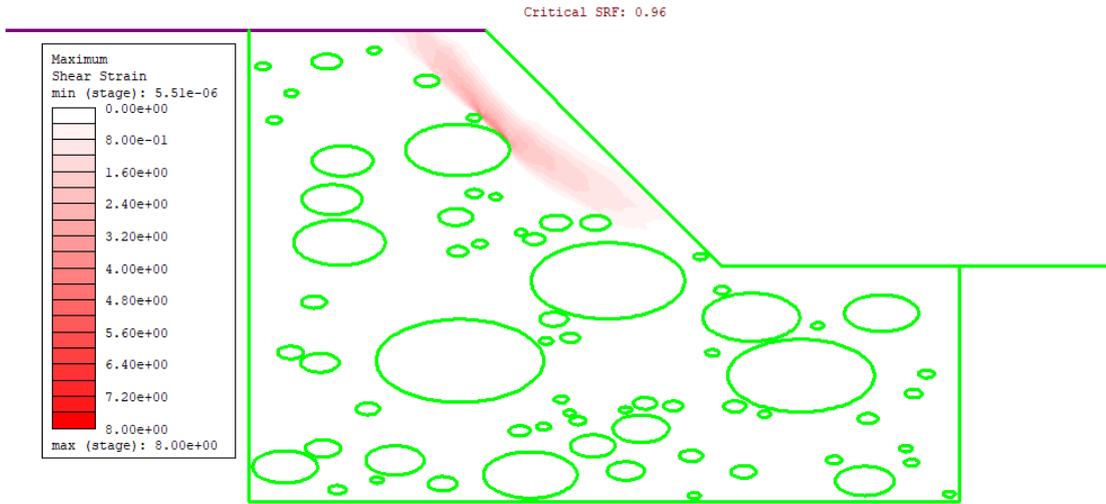
0_25_1



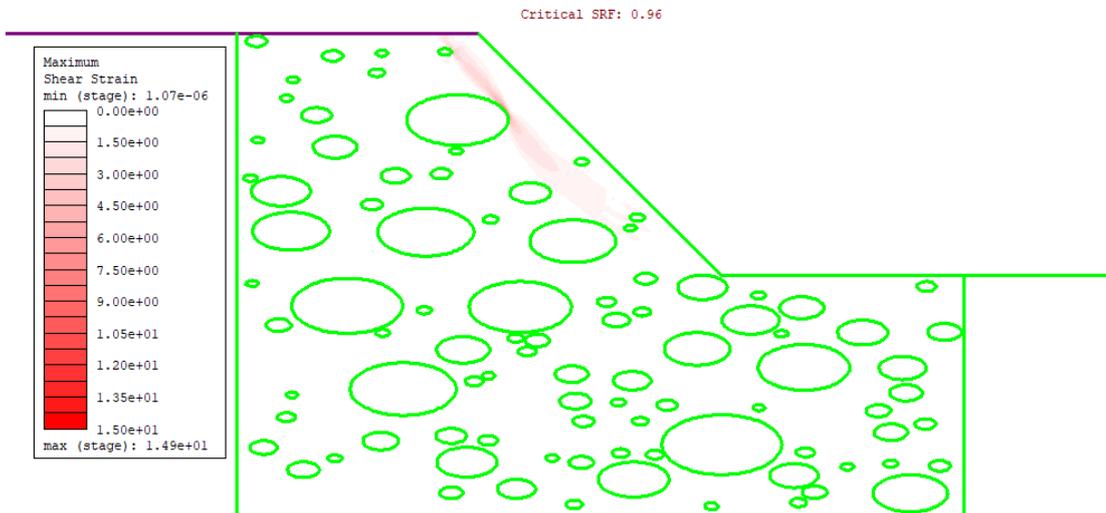
0_25_2



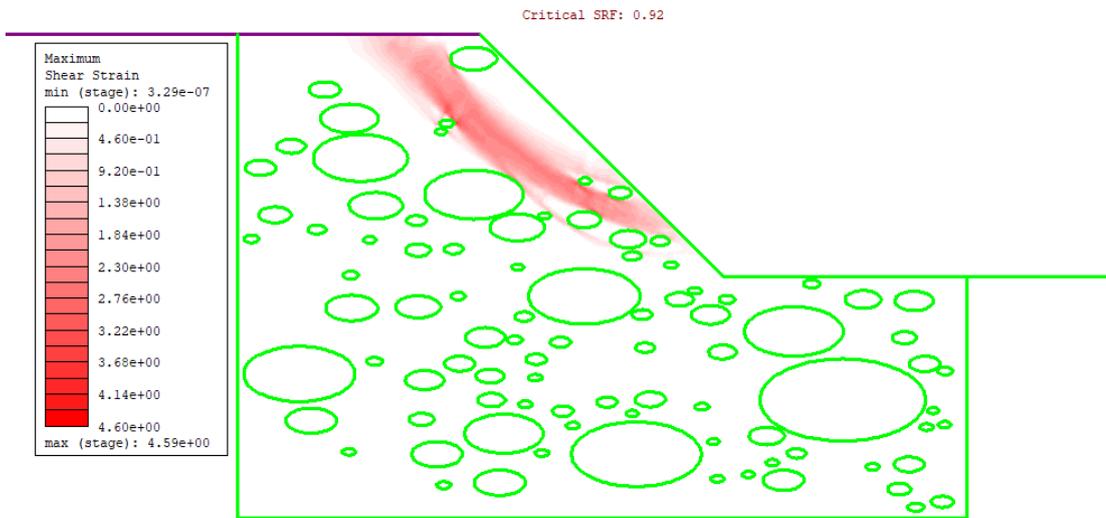
0_25_3



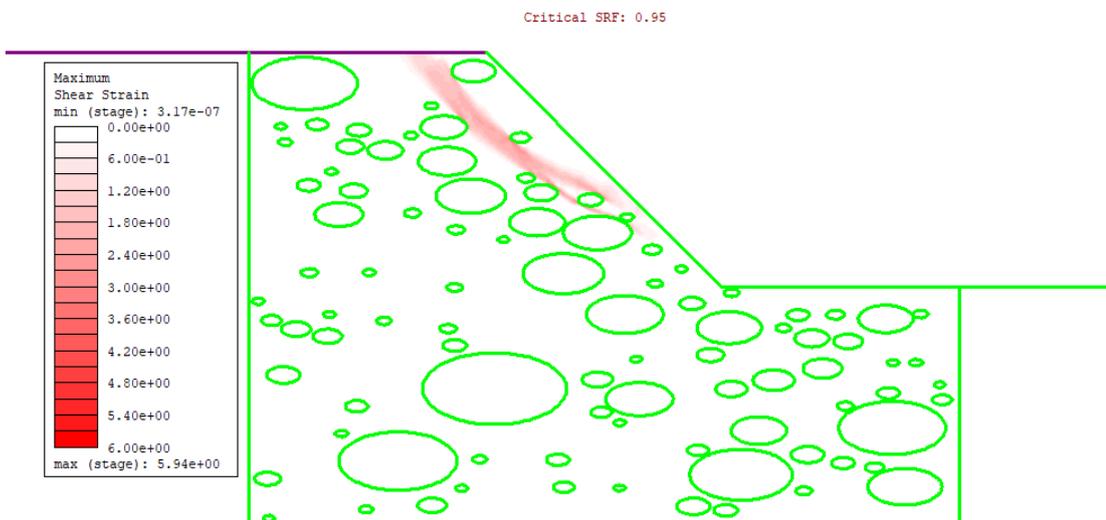
0_25_4



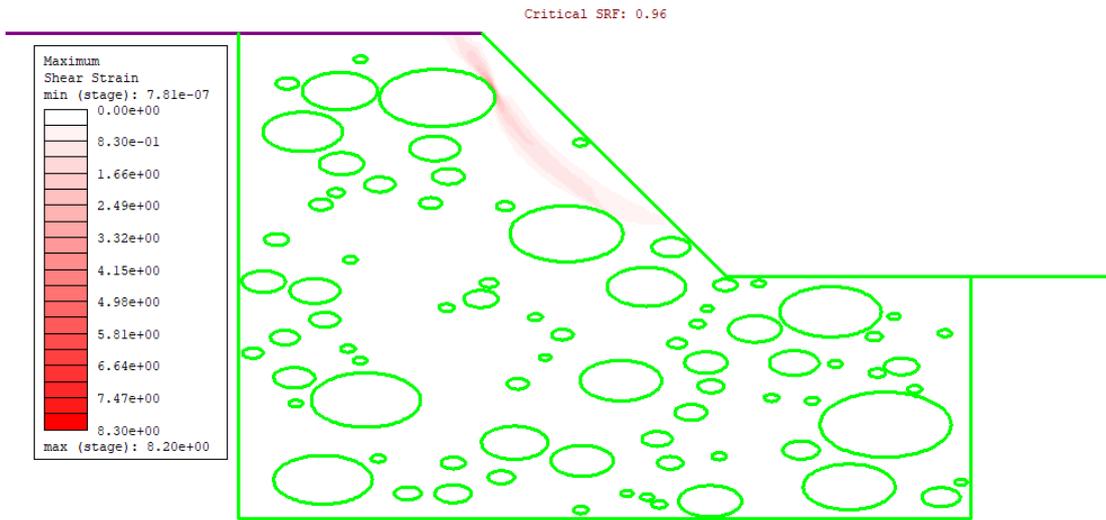
0_25_5



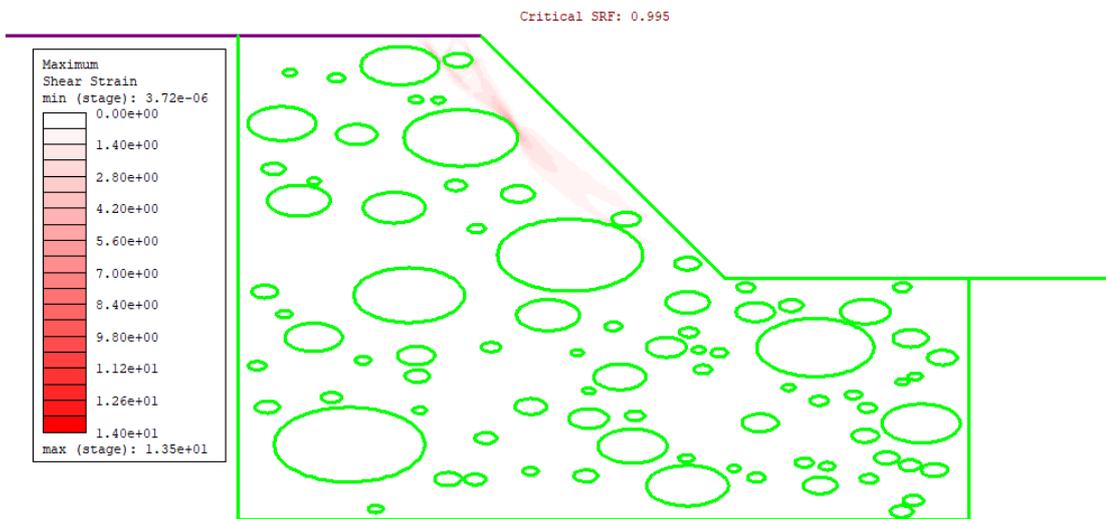
0_25_6



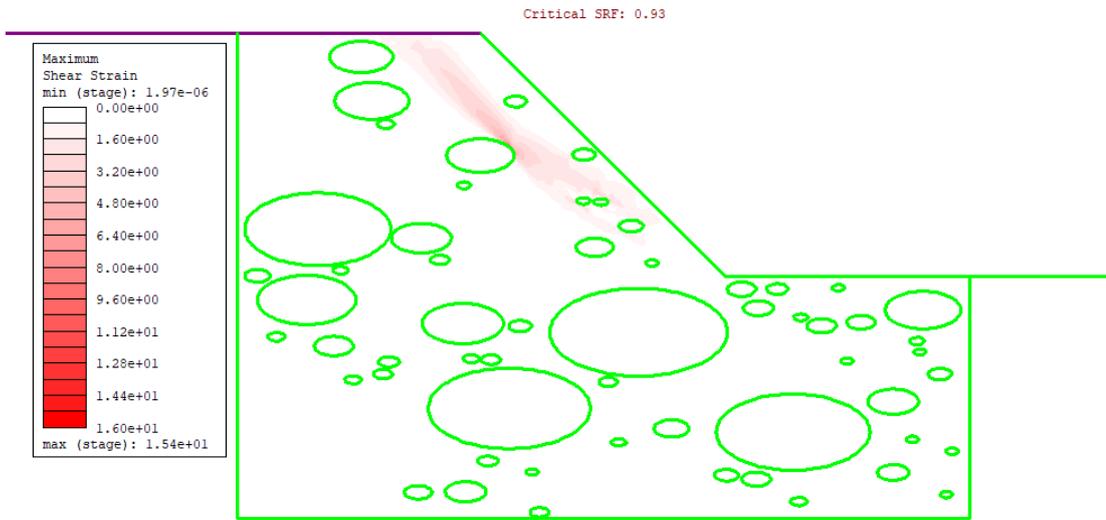
0_25_7



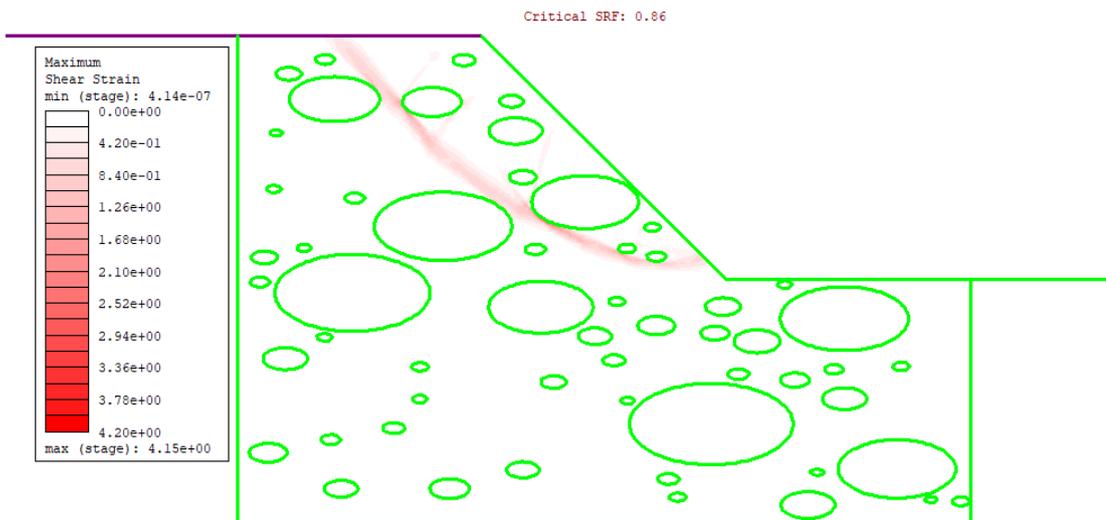
0_25_8



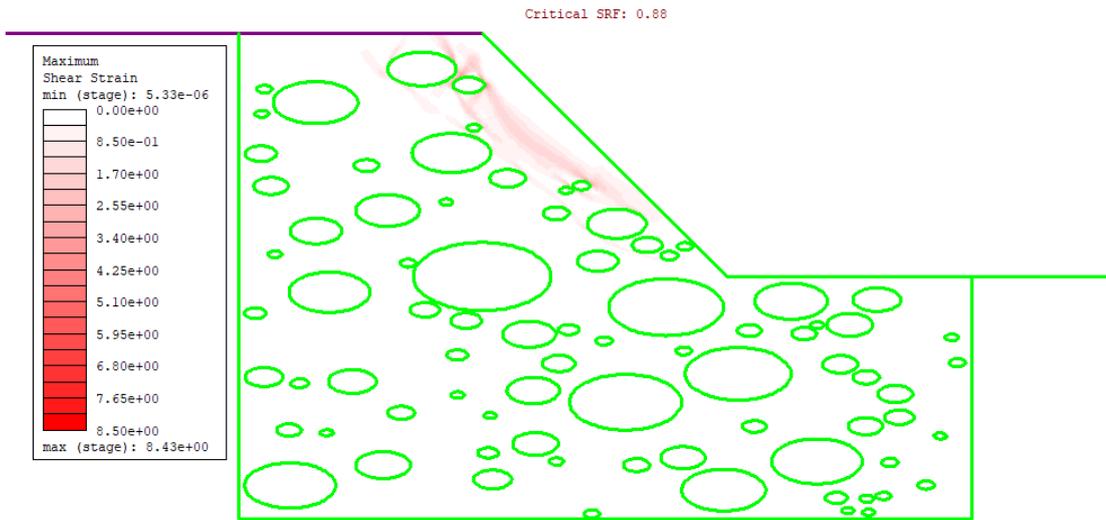
0_25_9



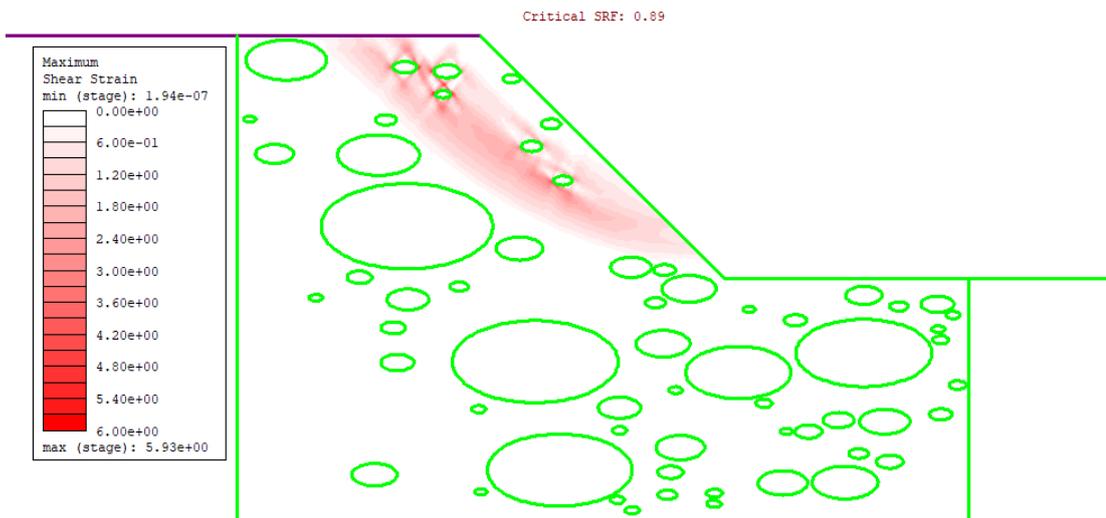
0_25_10



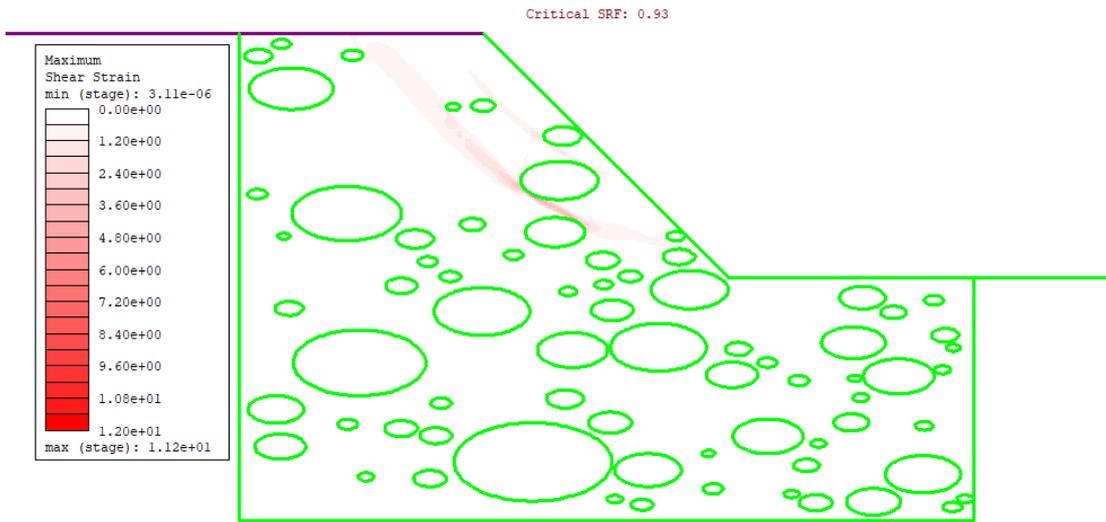
0_25_11



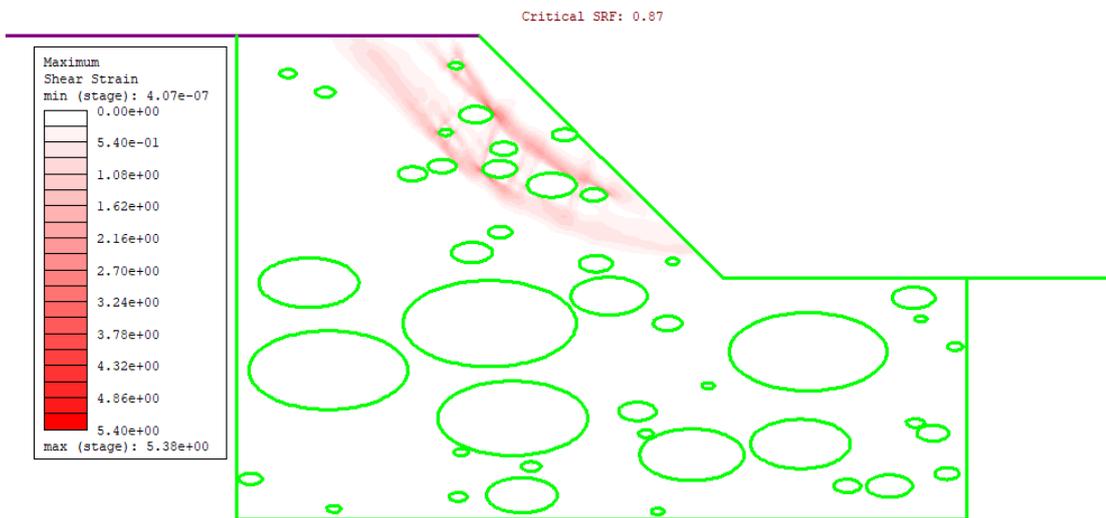
0_25_12



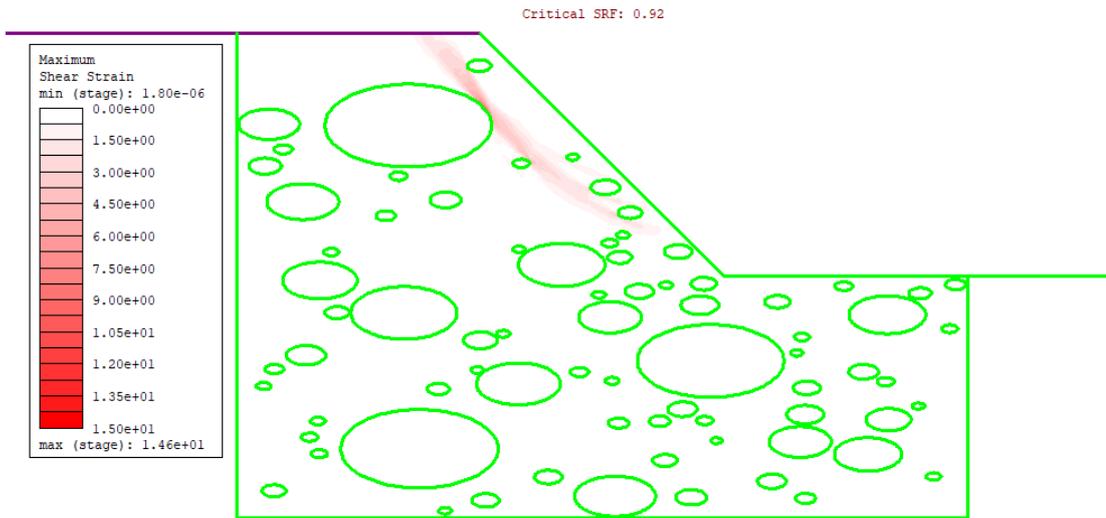
0_25_13



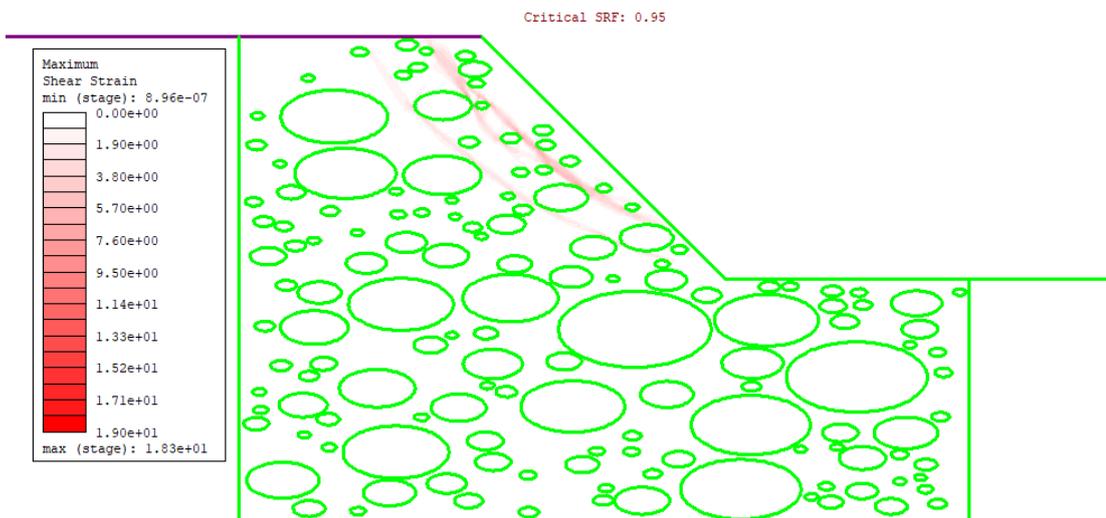
0_25_14



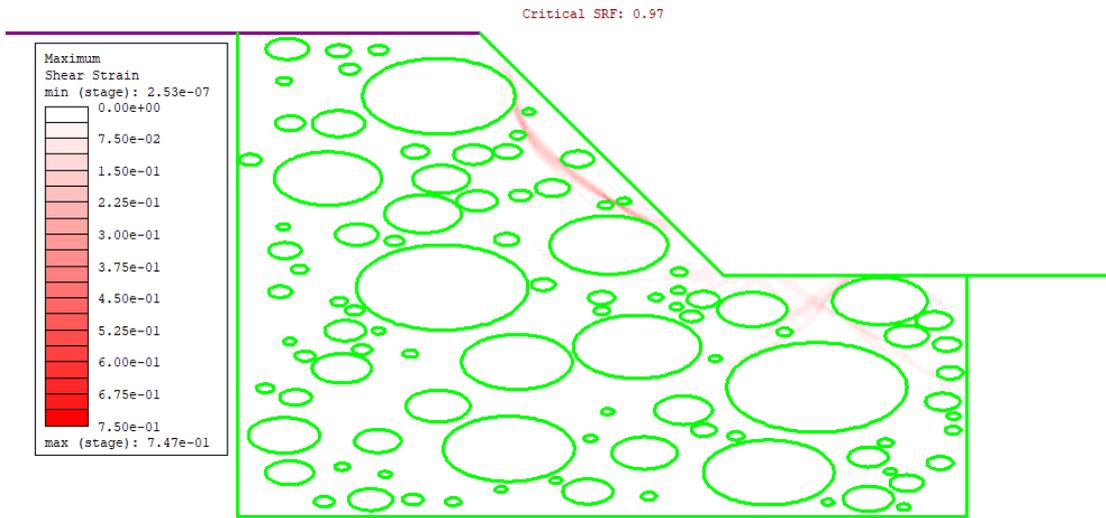
0_25_15



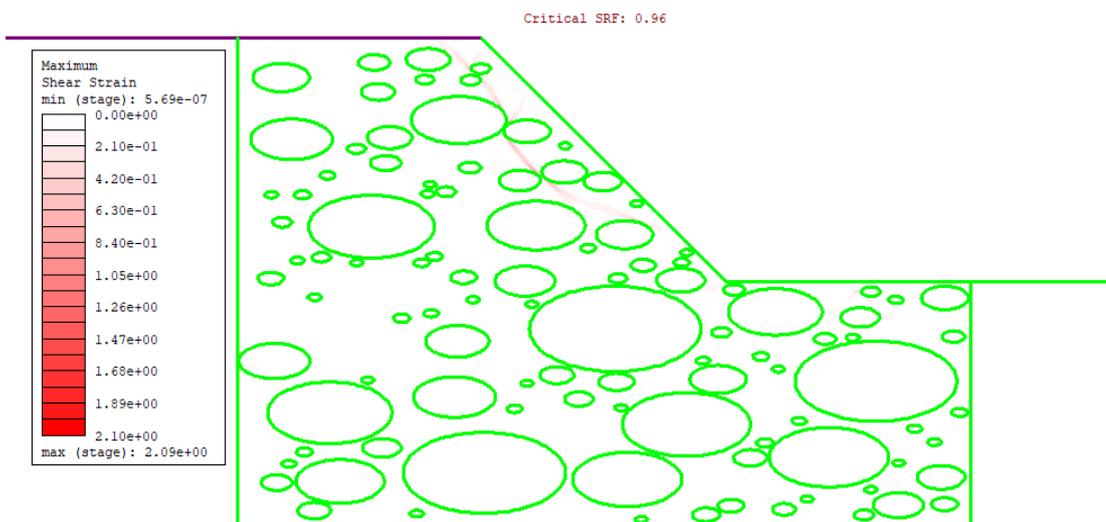
0_40_1



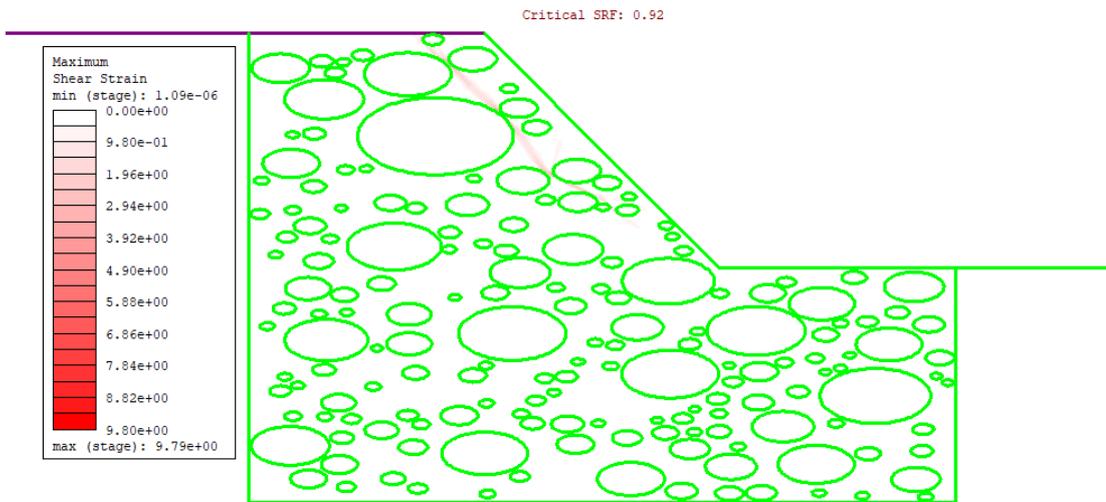
0_40_2



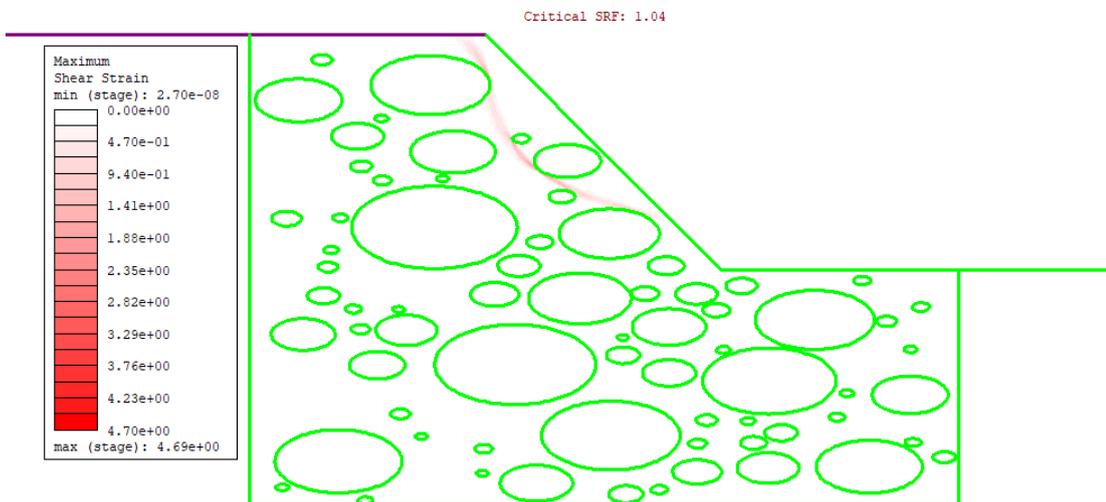
0_40_3



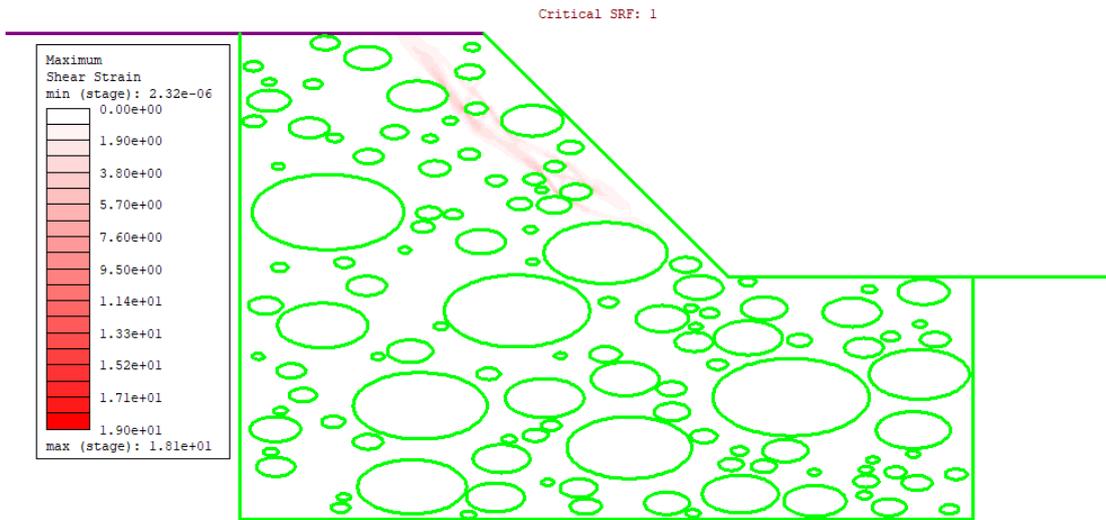
0_40_4



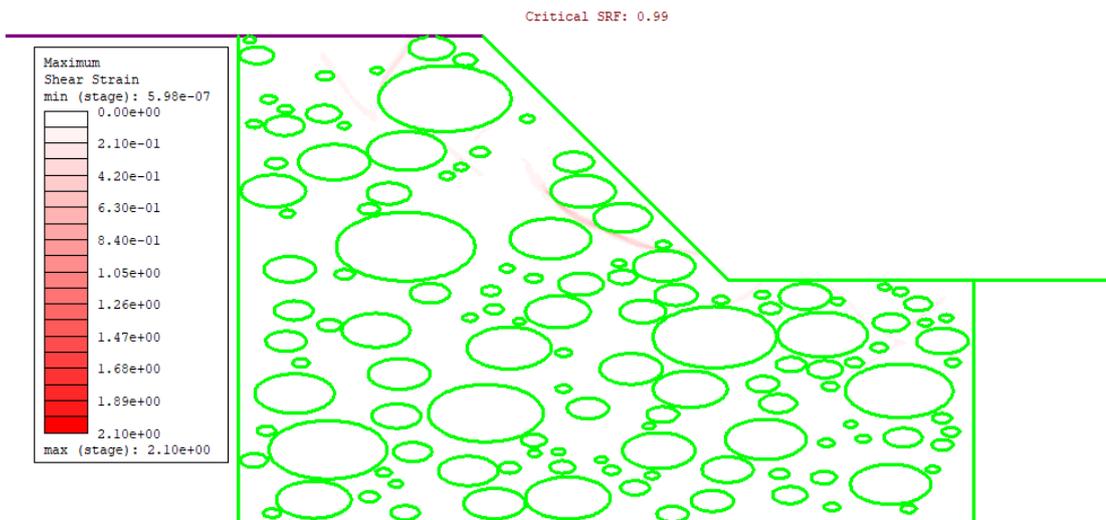
0_40_5



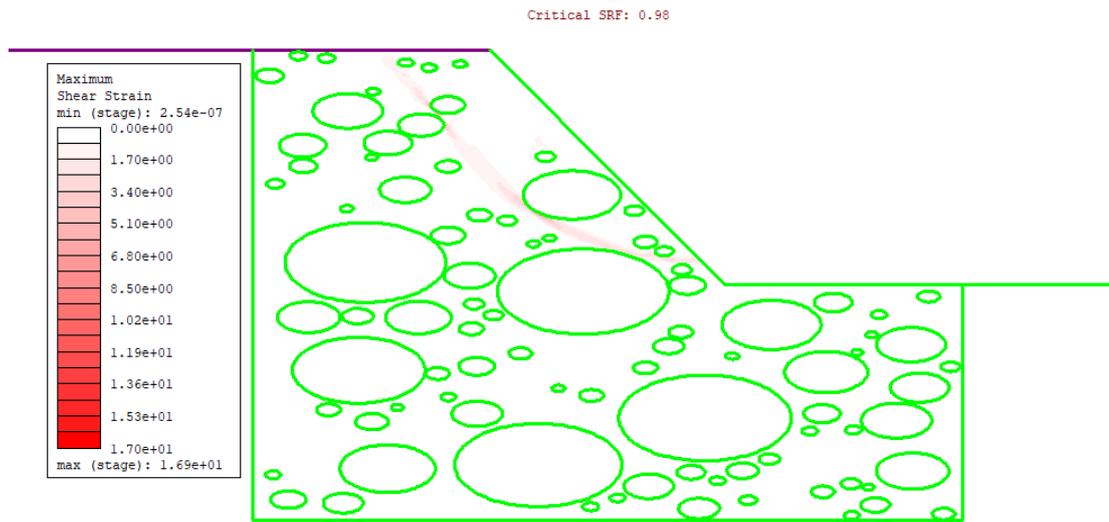
0_40_6



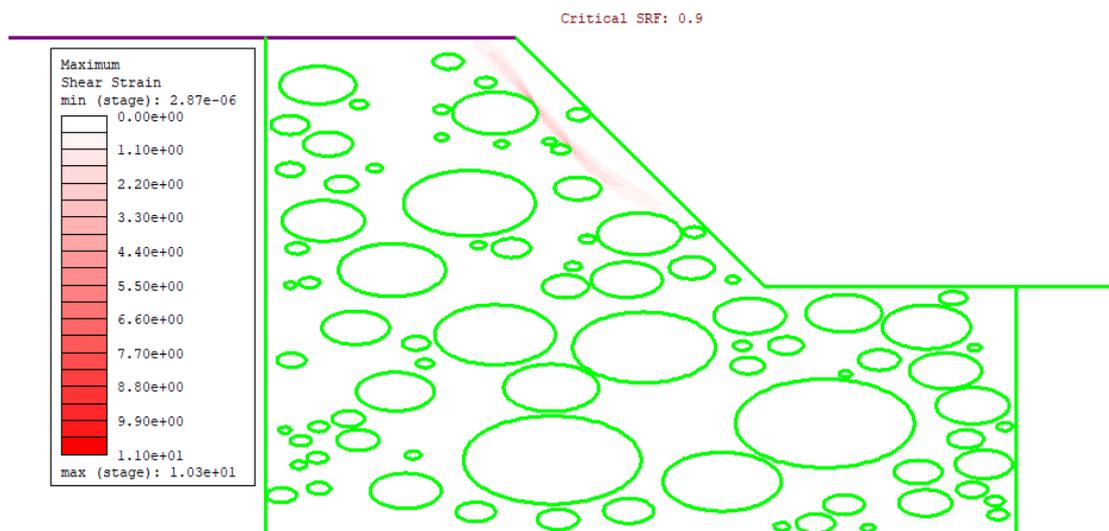
0_40_7



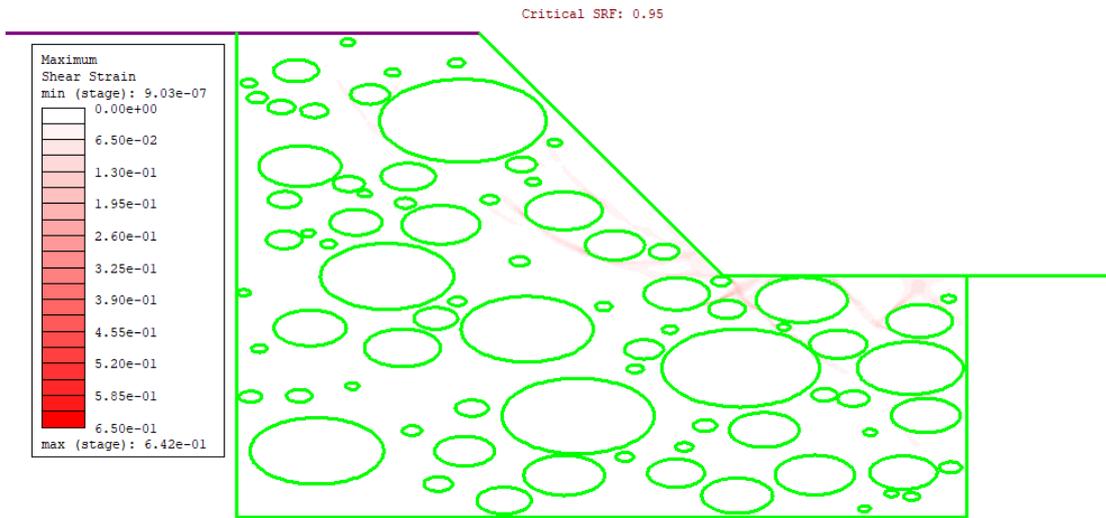
0_40_8



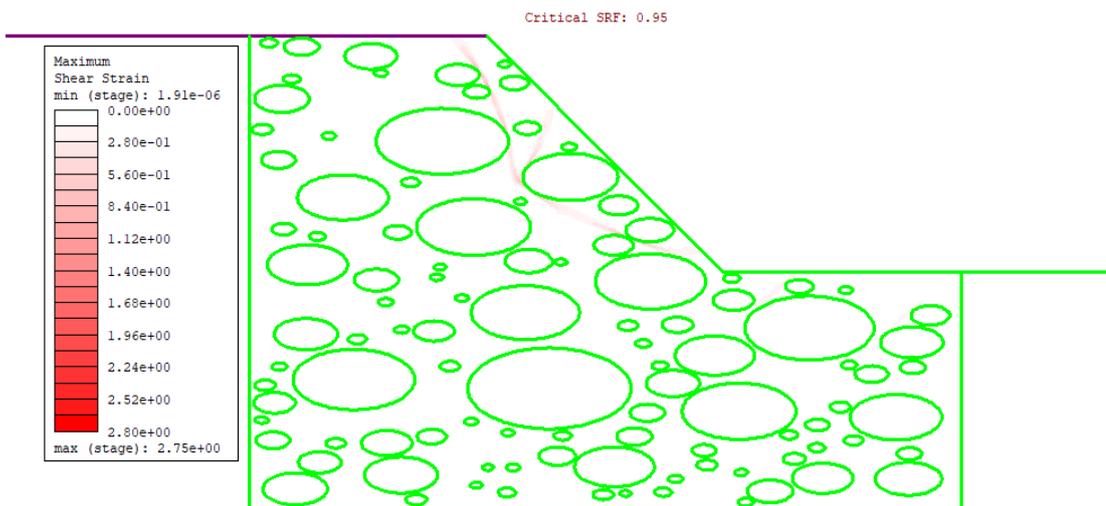
0_40_9



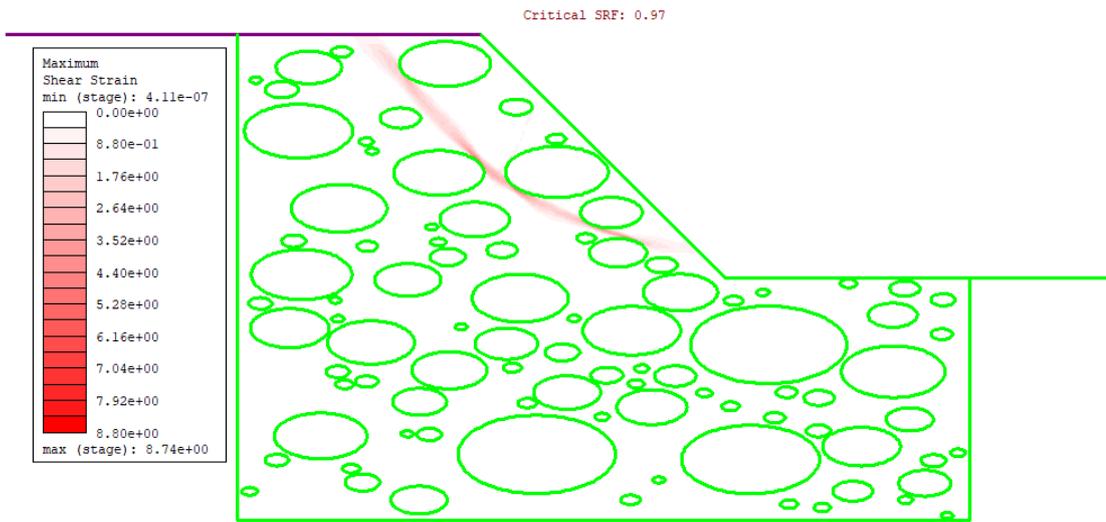
0_40_10



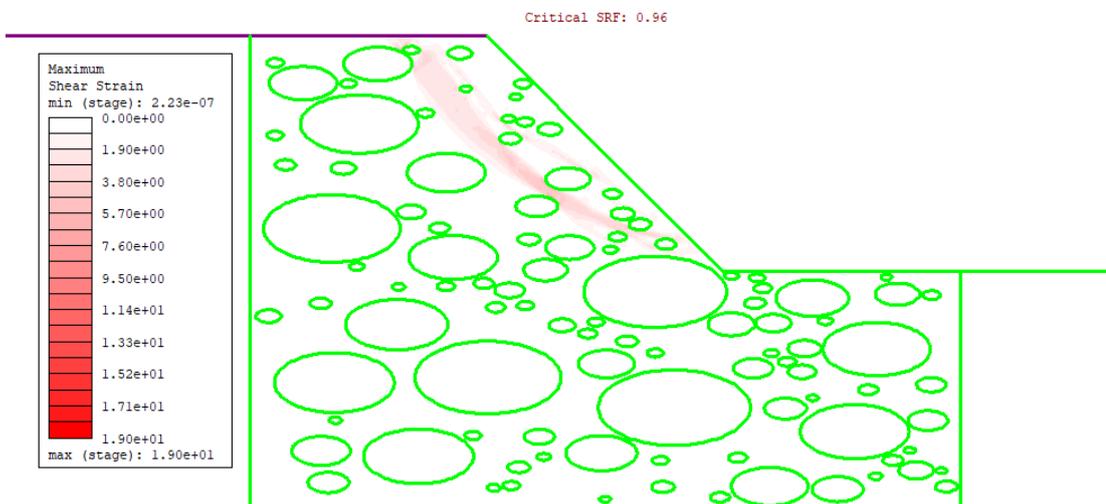
0_40_11



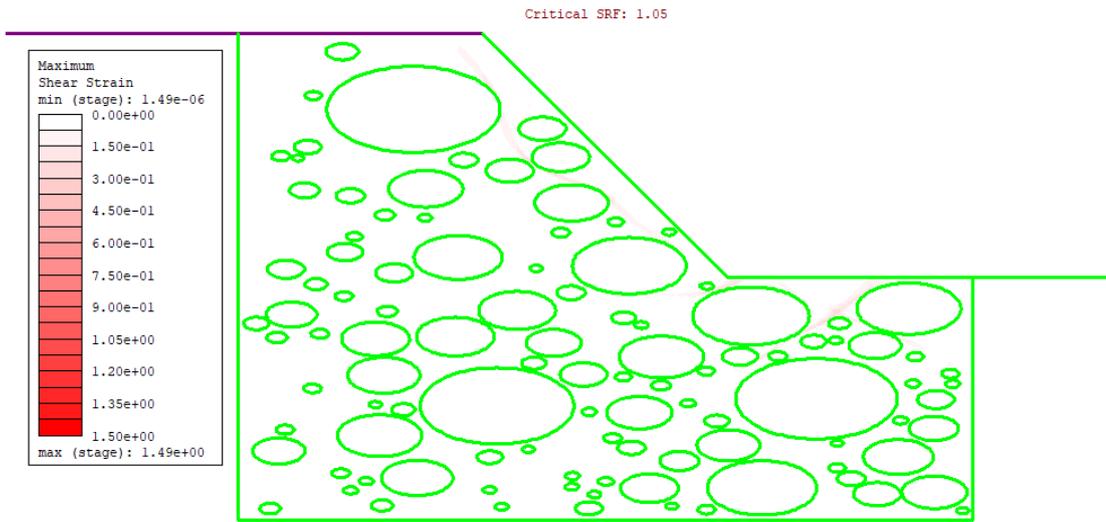
0_40_12



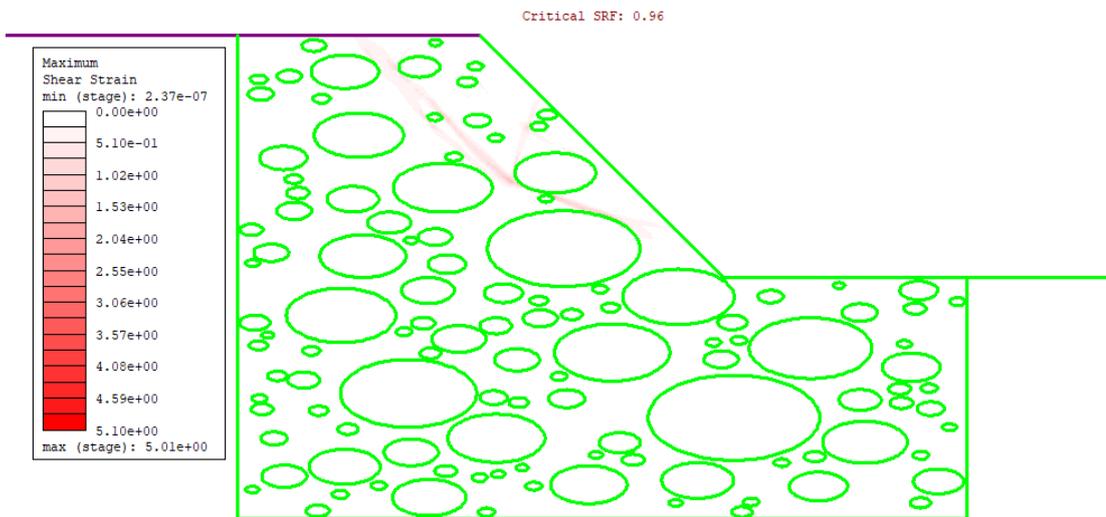
0_40_13



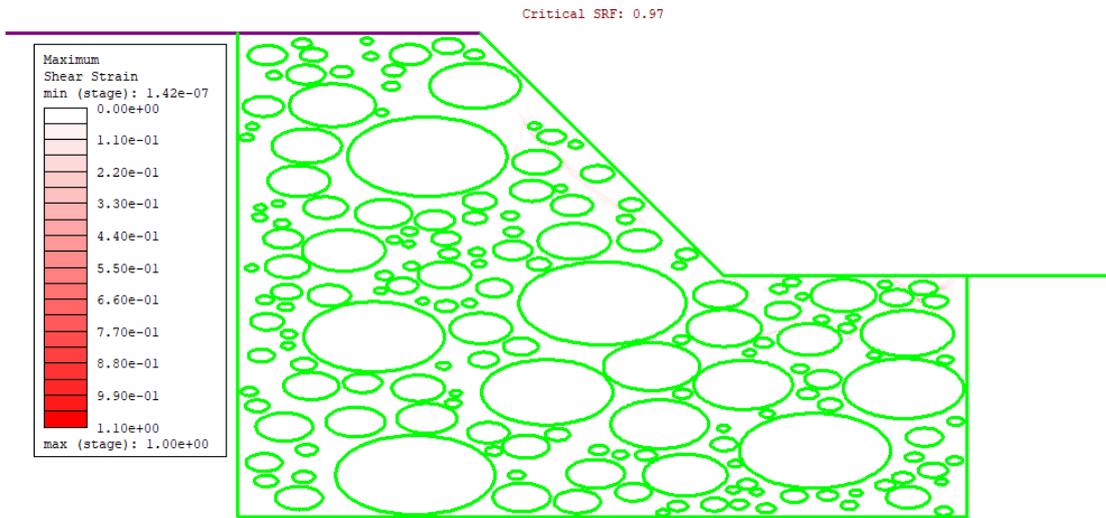
0_40_14



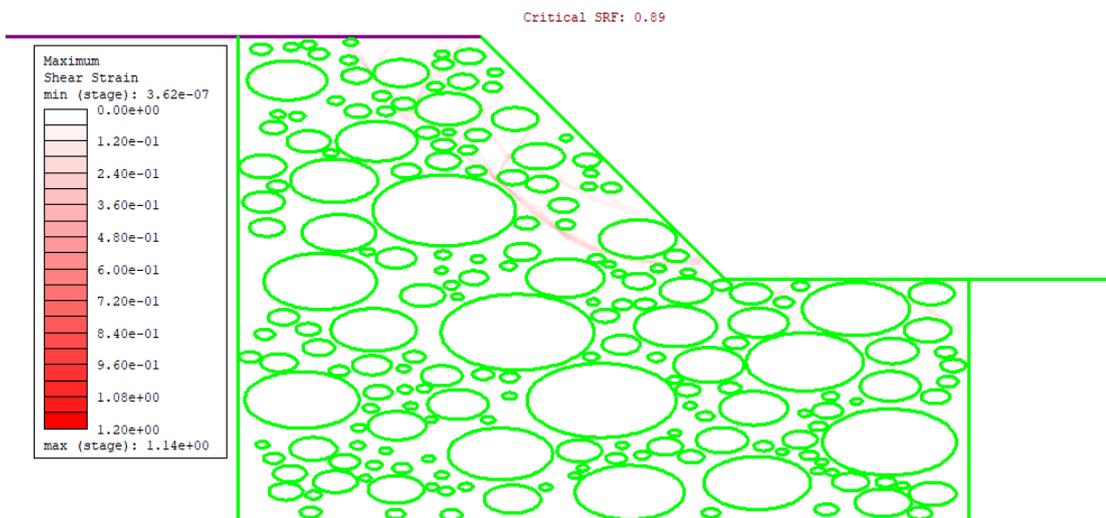
0_40_15



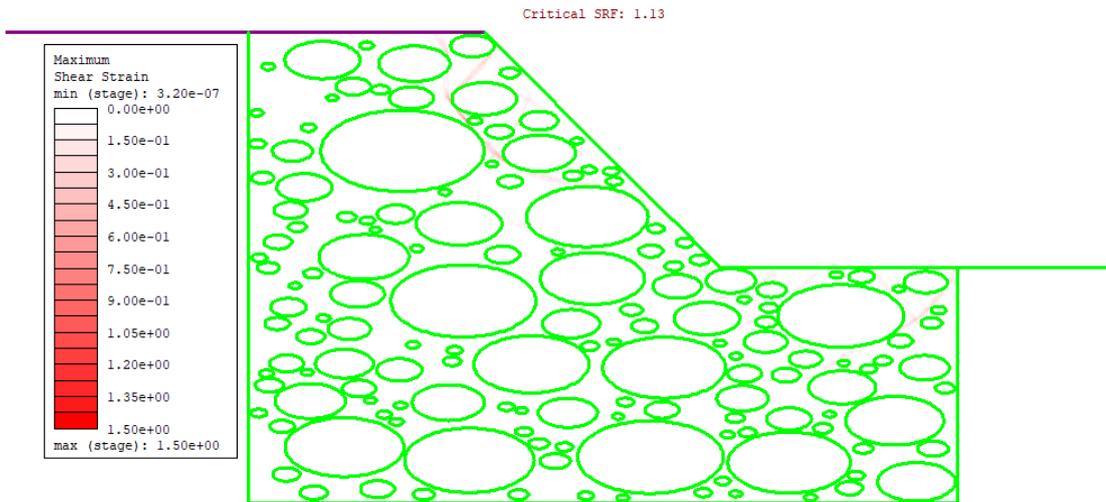
0_55_1



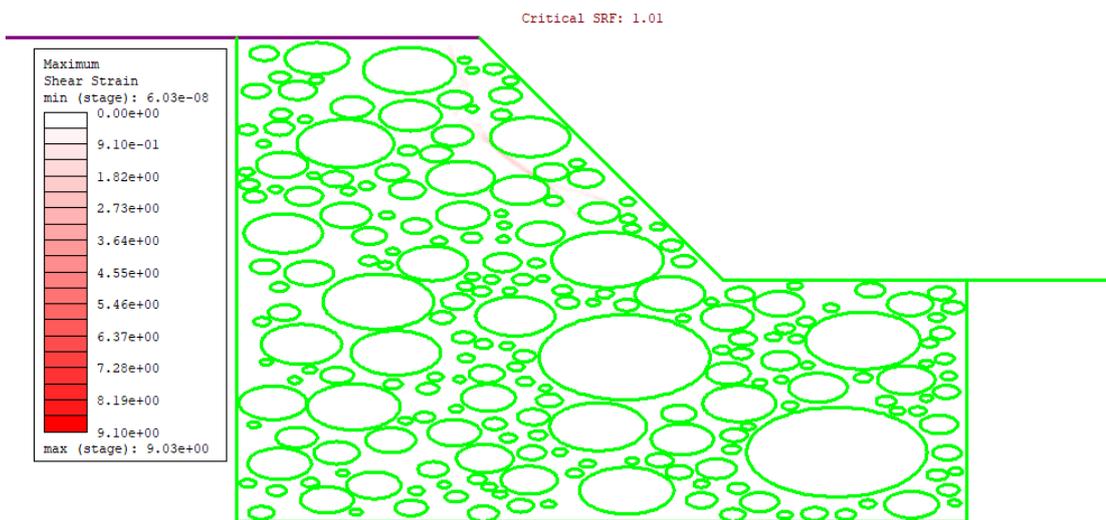
0_55_2



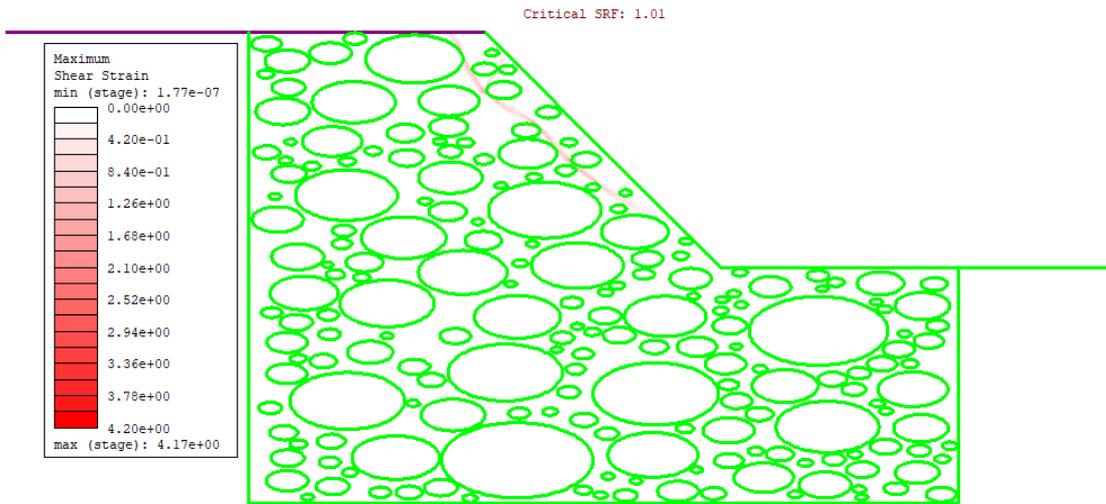
0_55_3



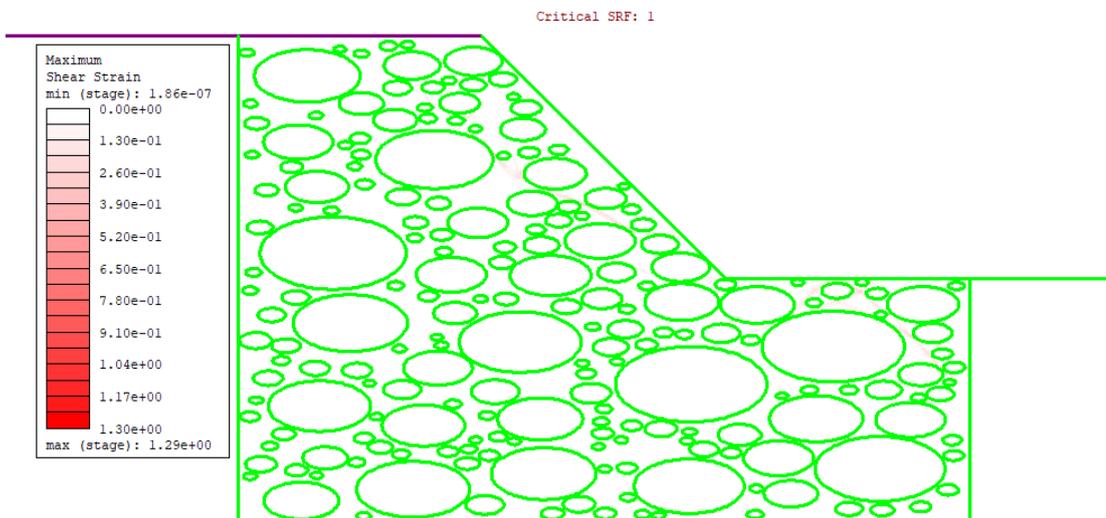
0_55_4



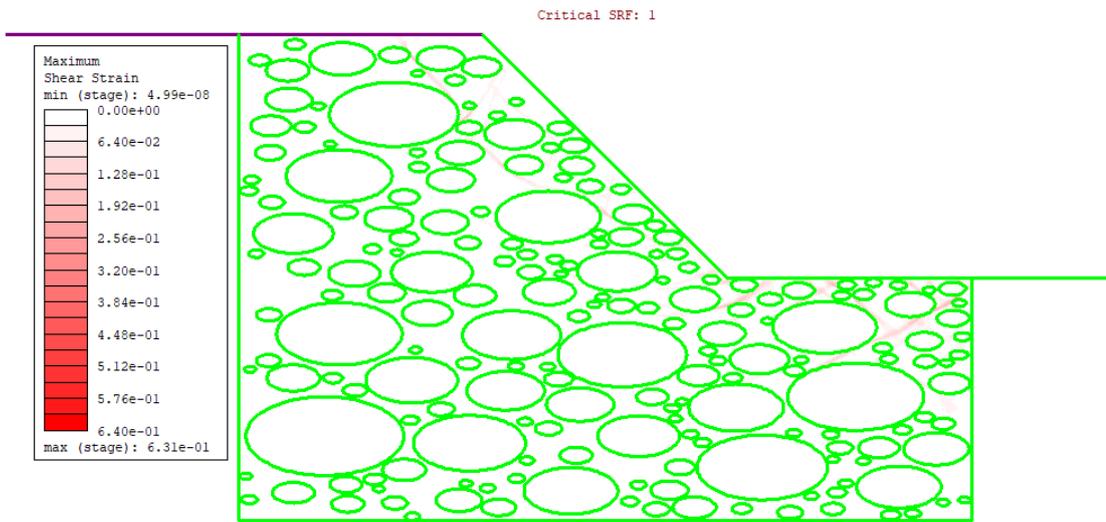
0_55_5



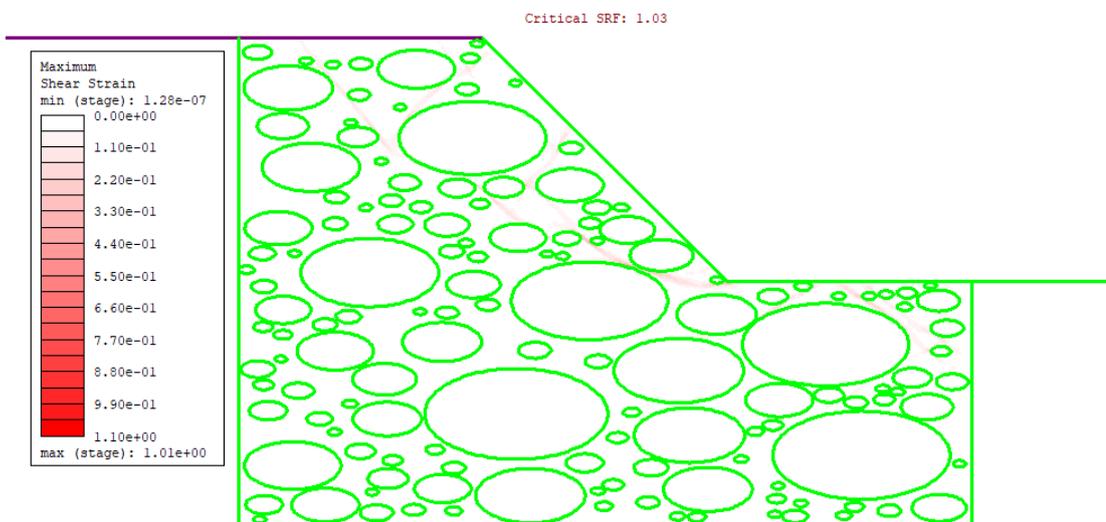
0_55_6



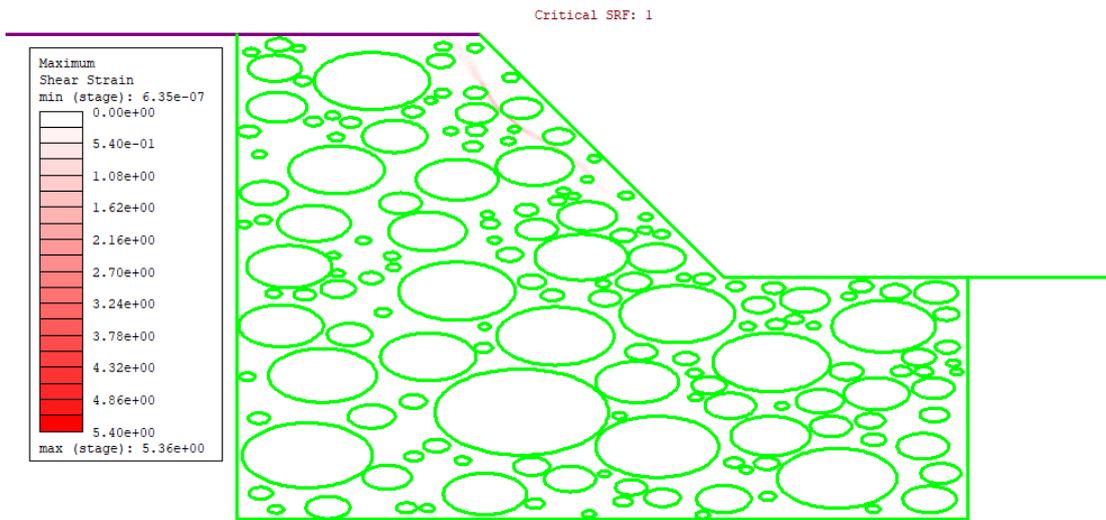
0_55_7



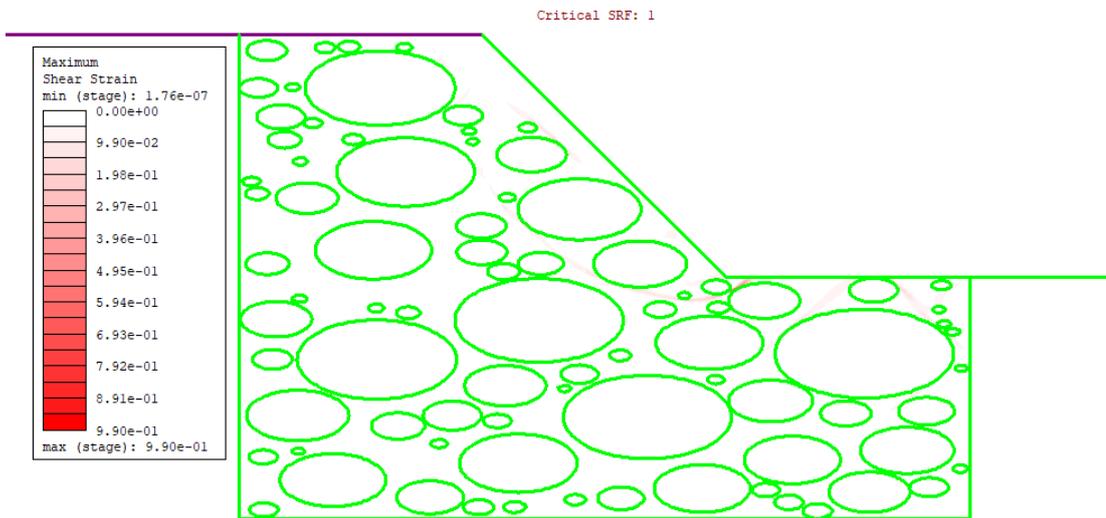
0_55_8



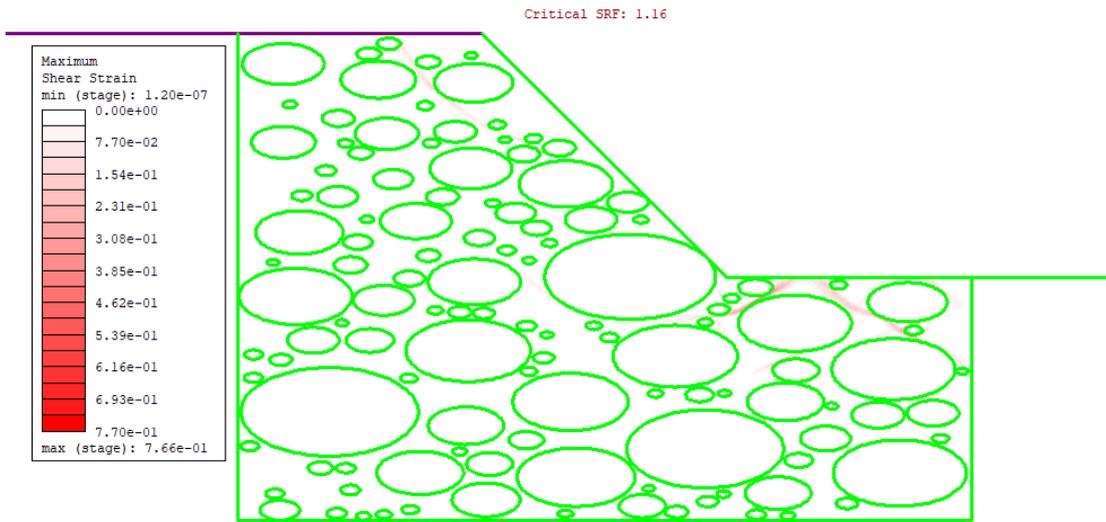
0_55_9



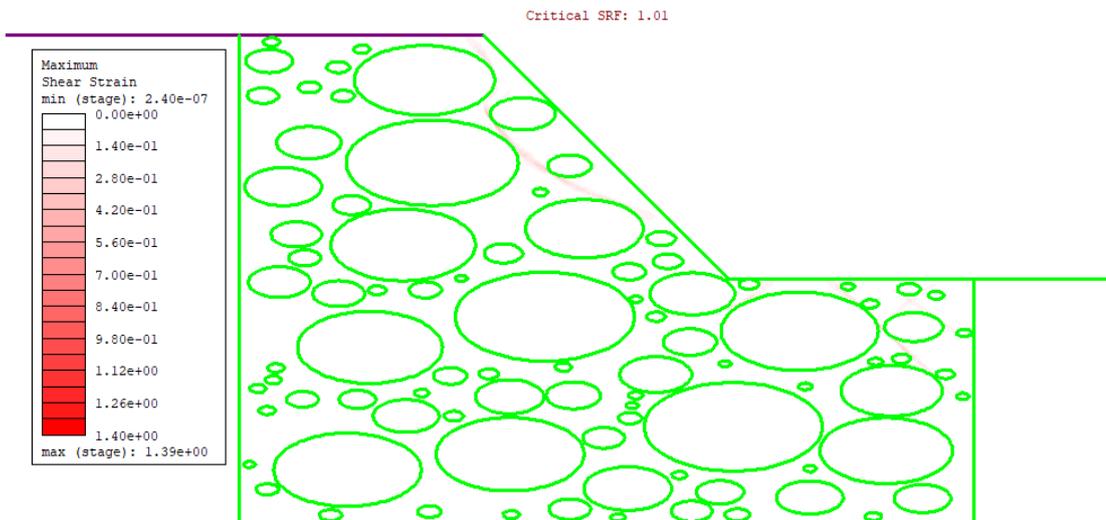
0_55_10



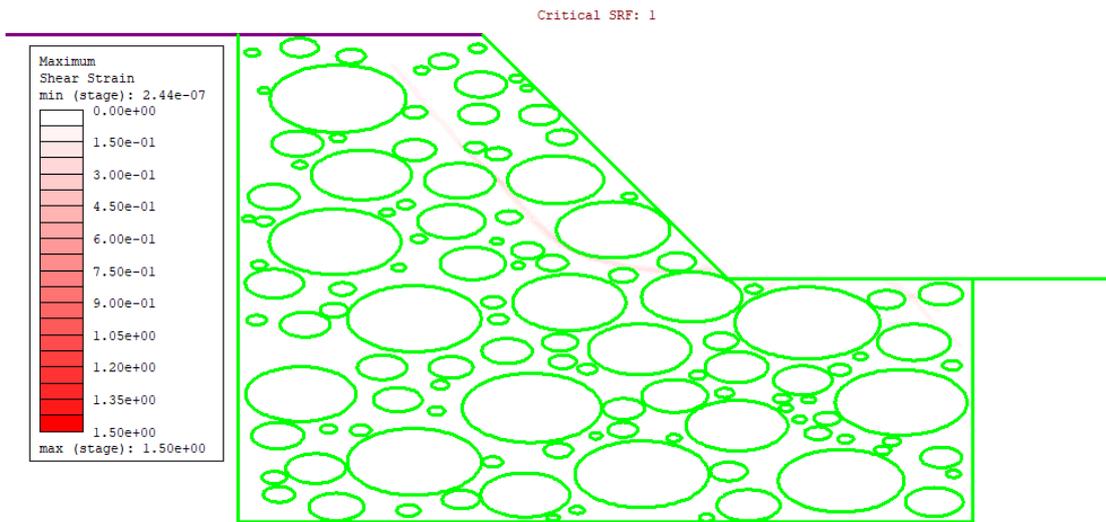
0_55_11



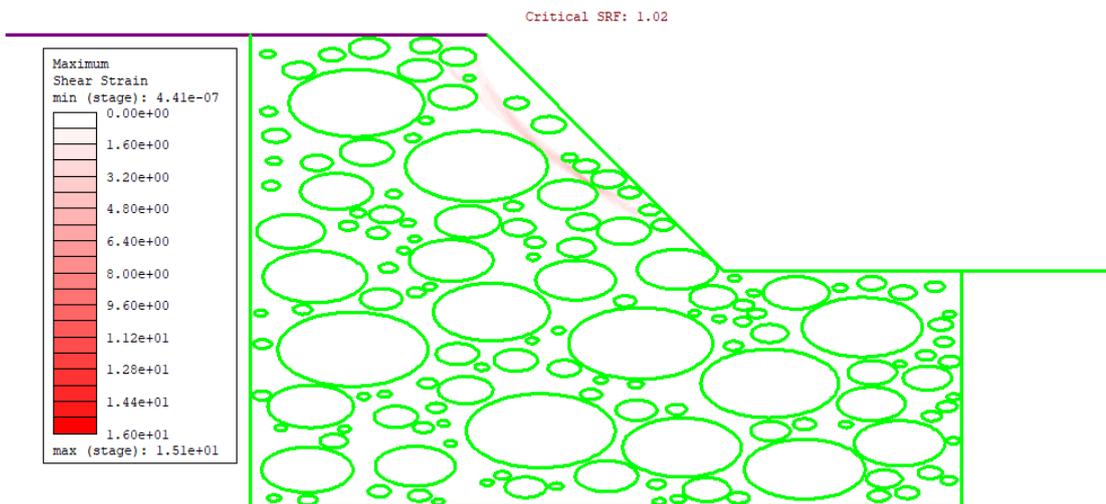
0_55_12



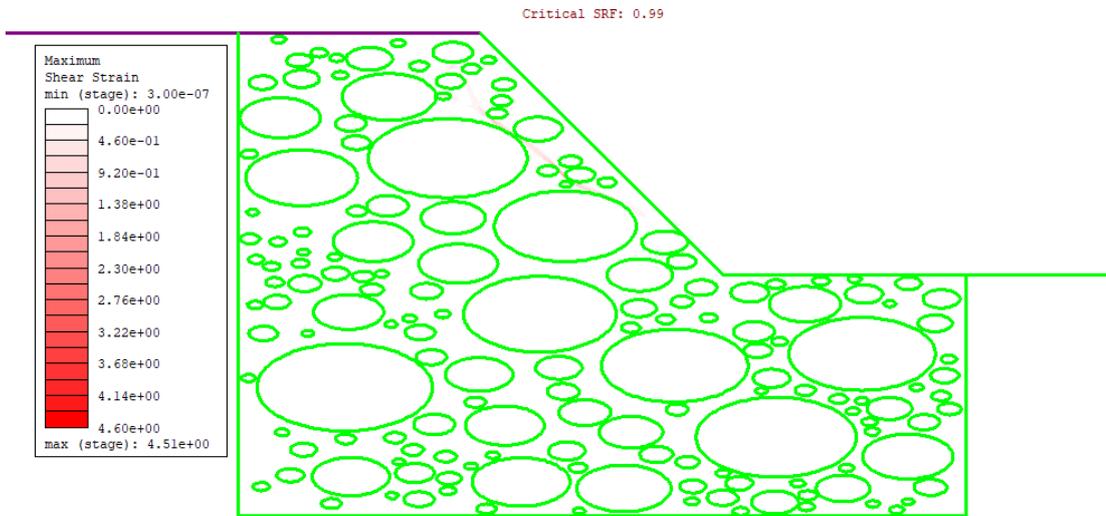
0_55_13



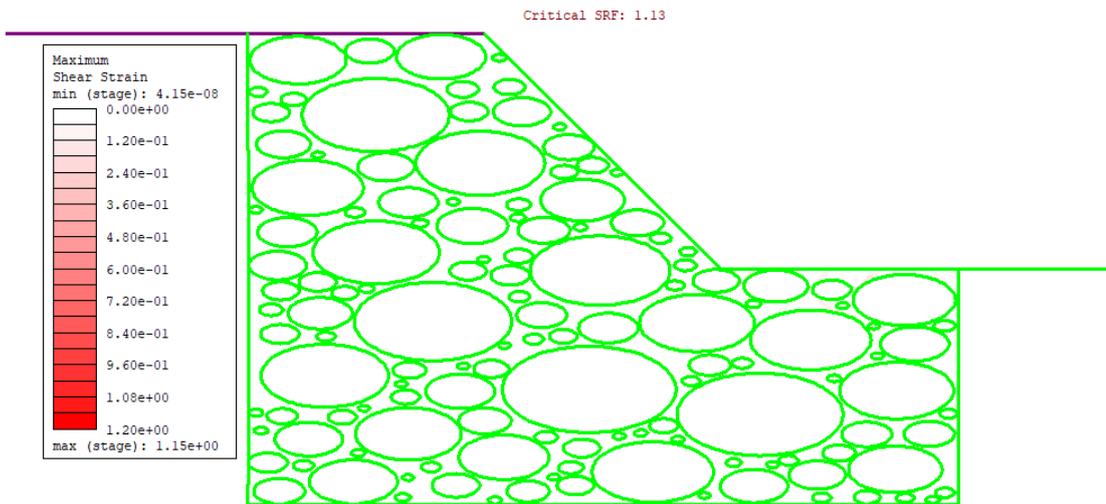
0_55_14



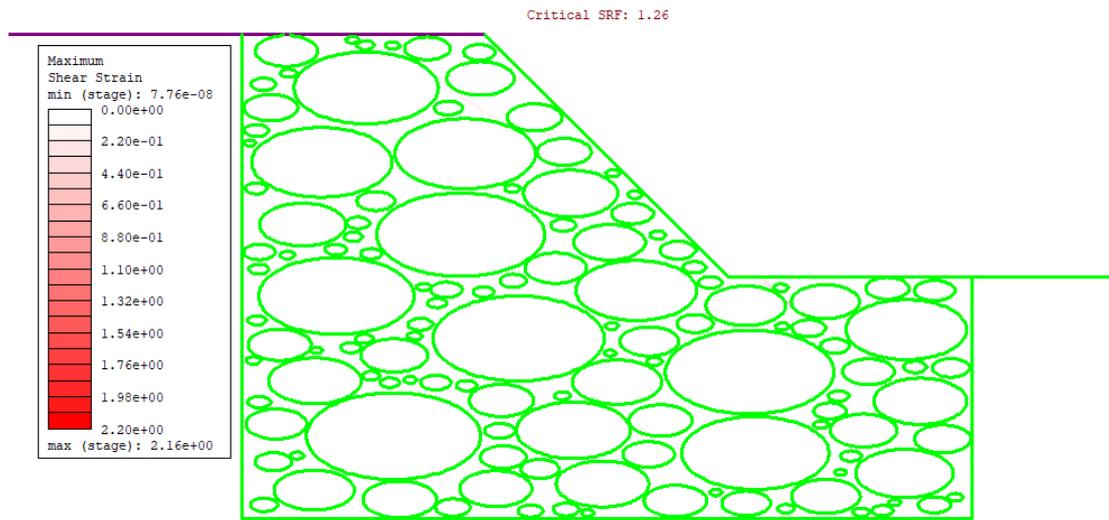
0_55_15



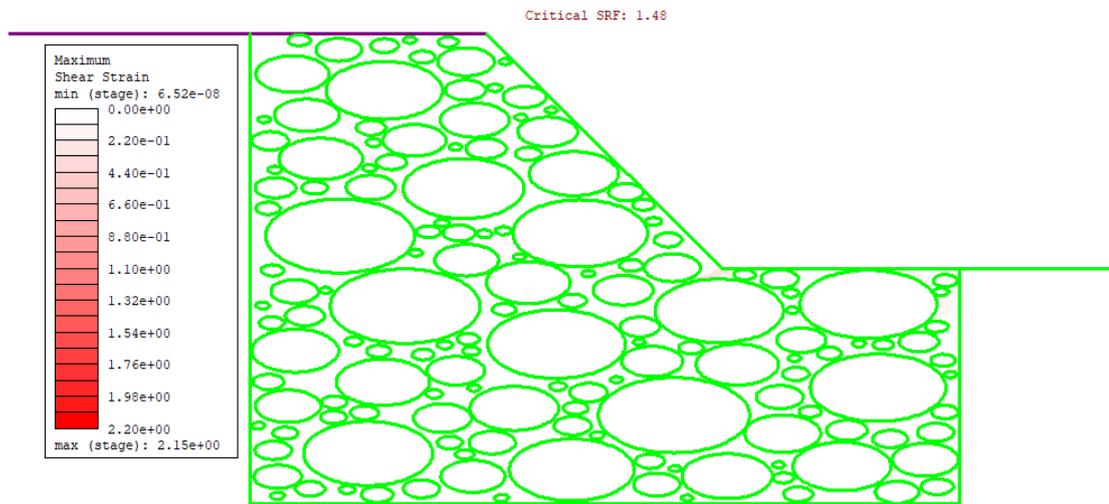
0_70_1



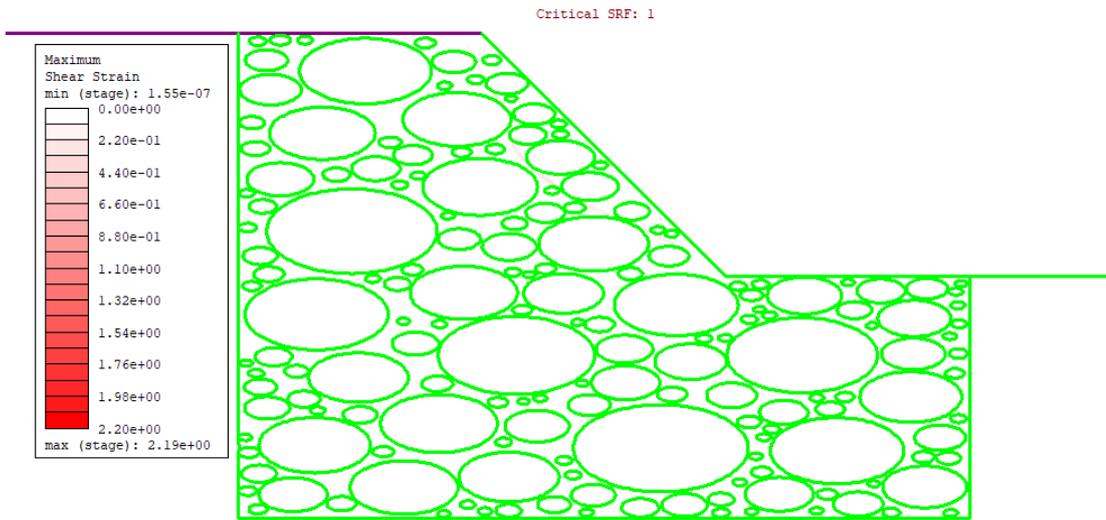
0_70_2



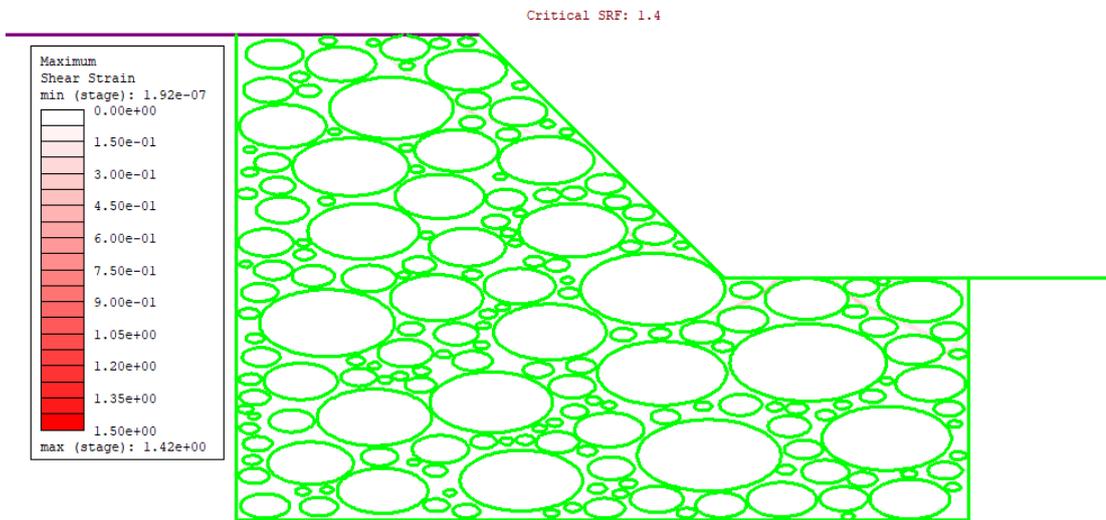
0_70_3



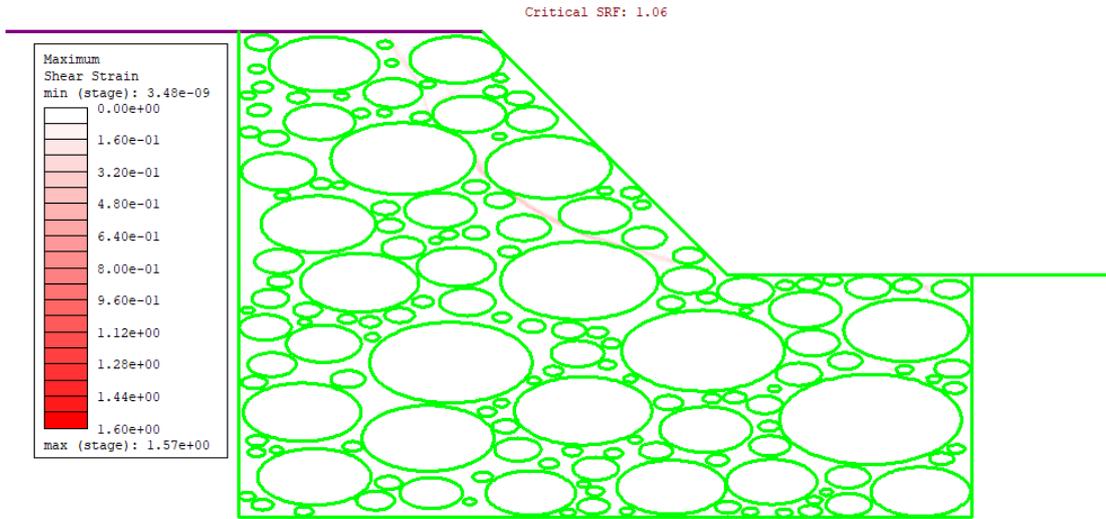
0_70_4



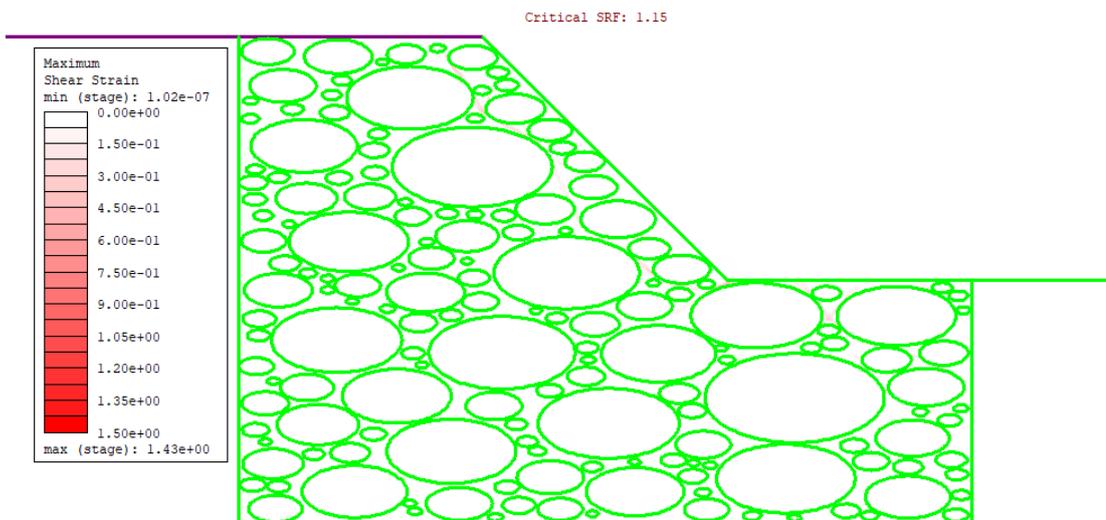
0_70_5



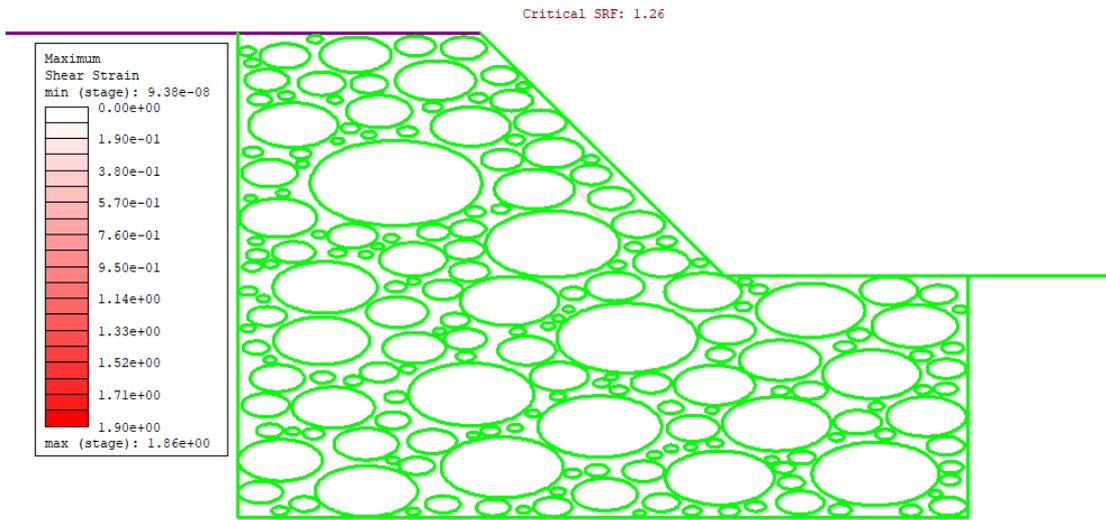
0_70_6



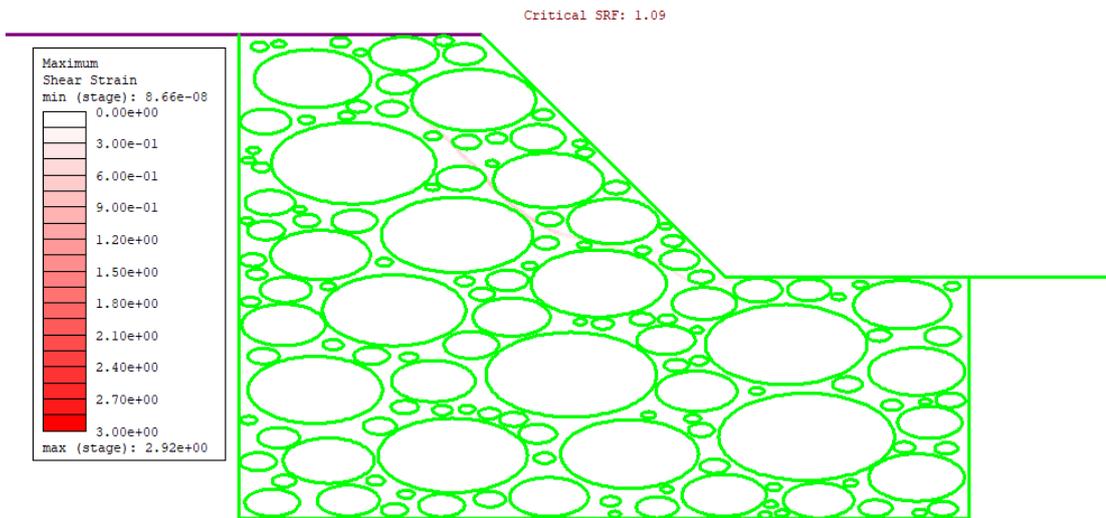
0_70_7



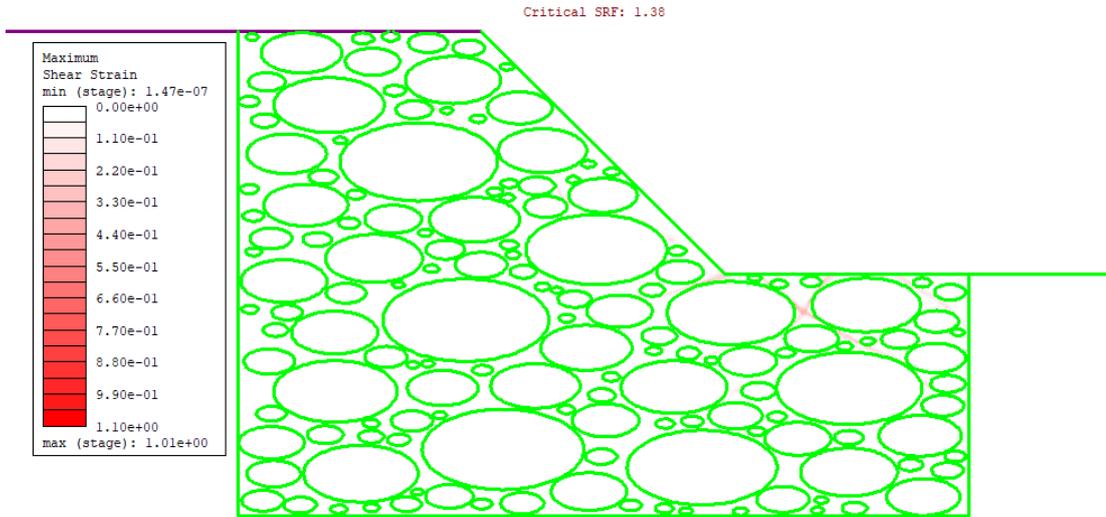
0_70_8



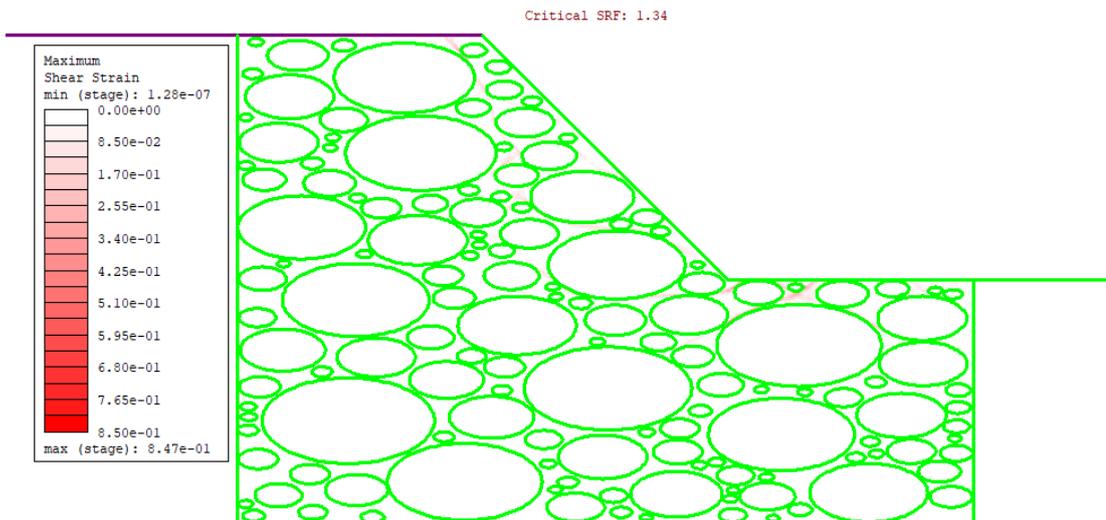
0_70_9



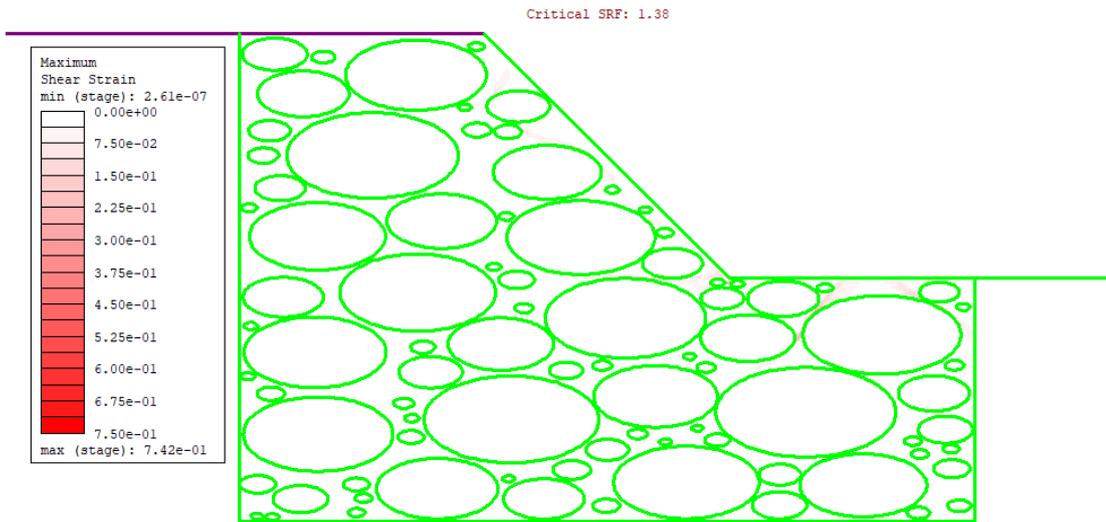
0_70_10



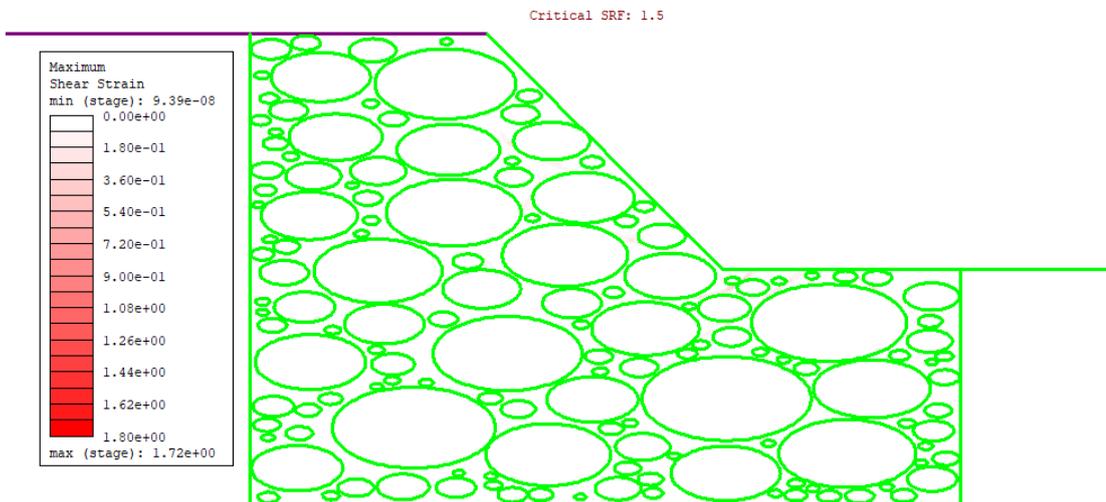
0_70_11



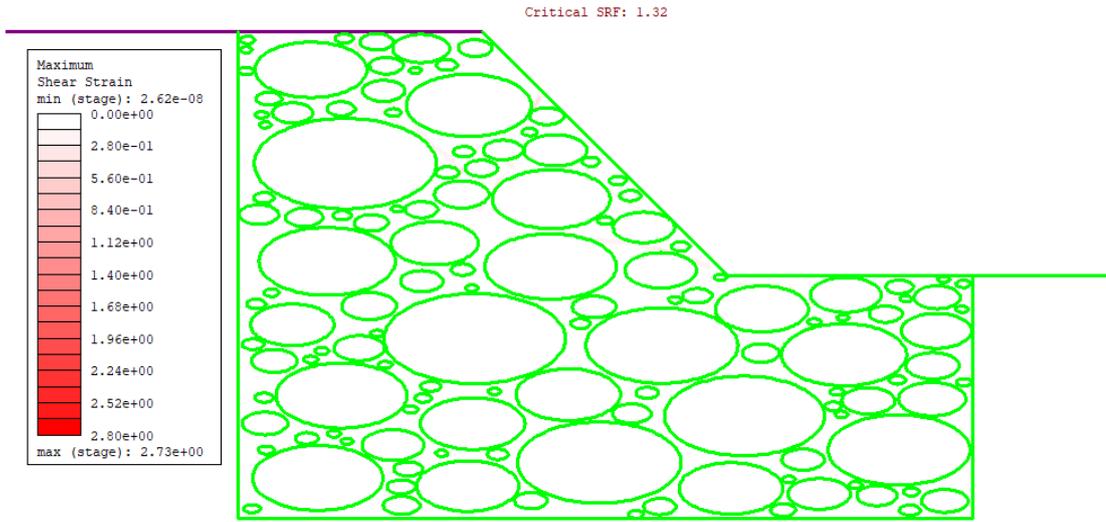
0_70_12



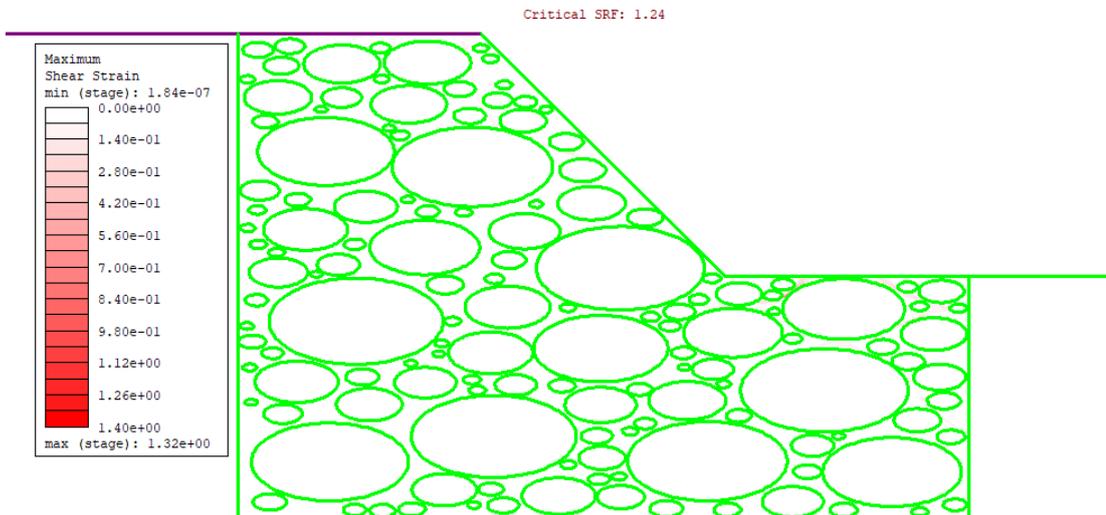
0_70_13



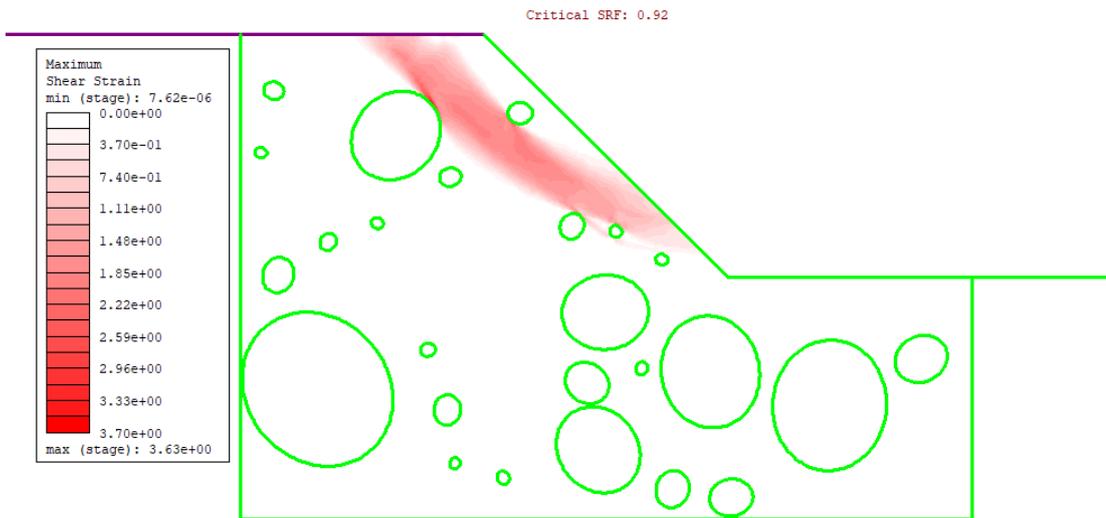
0_70_14



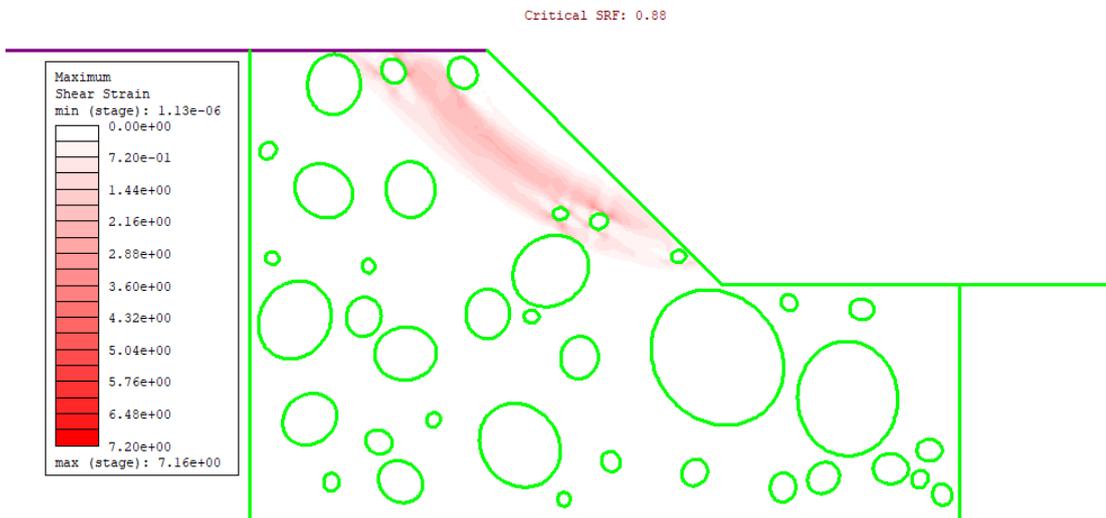
0_70_15



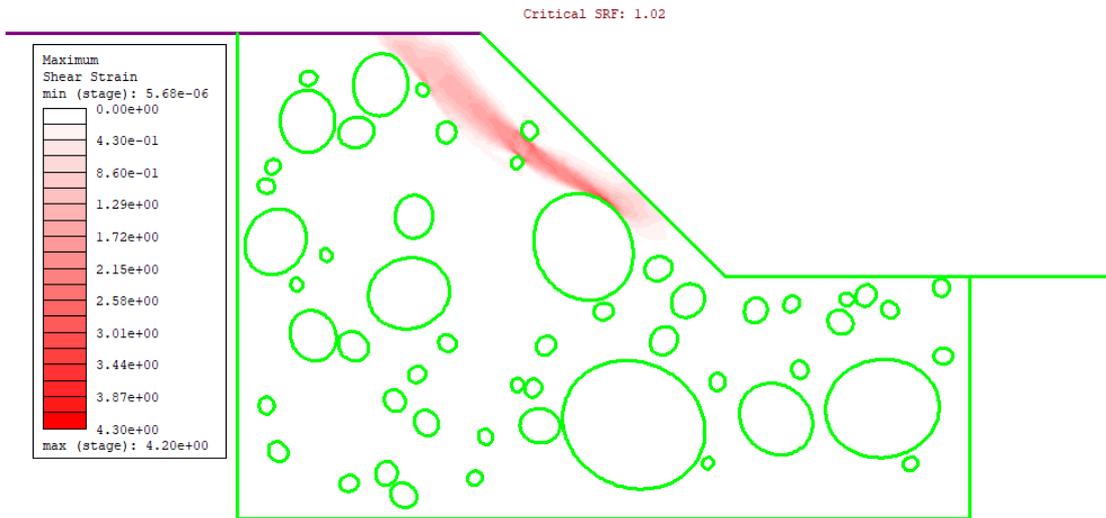
R_25_1



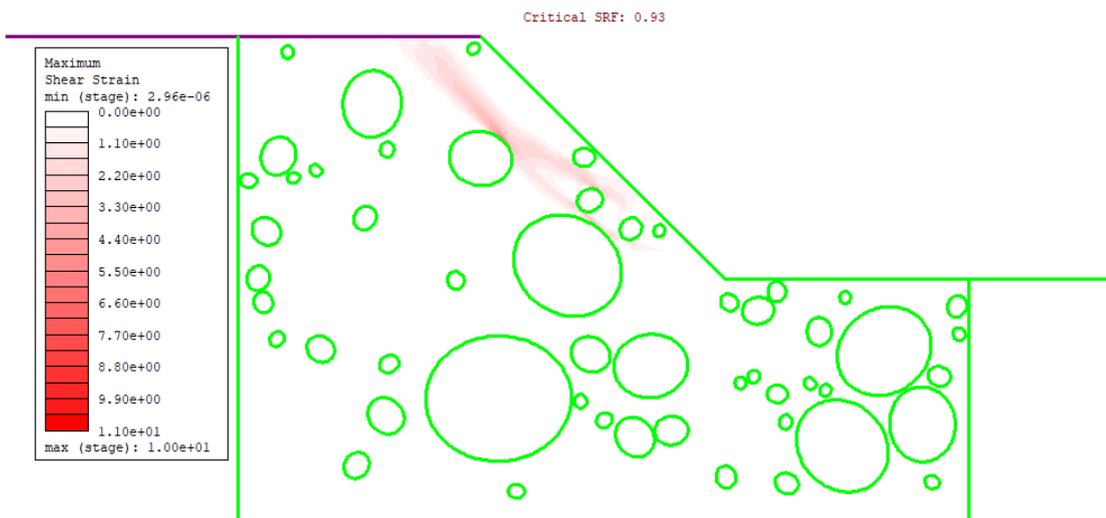
R_25_2



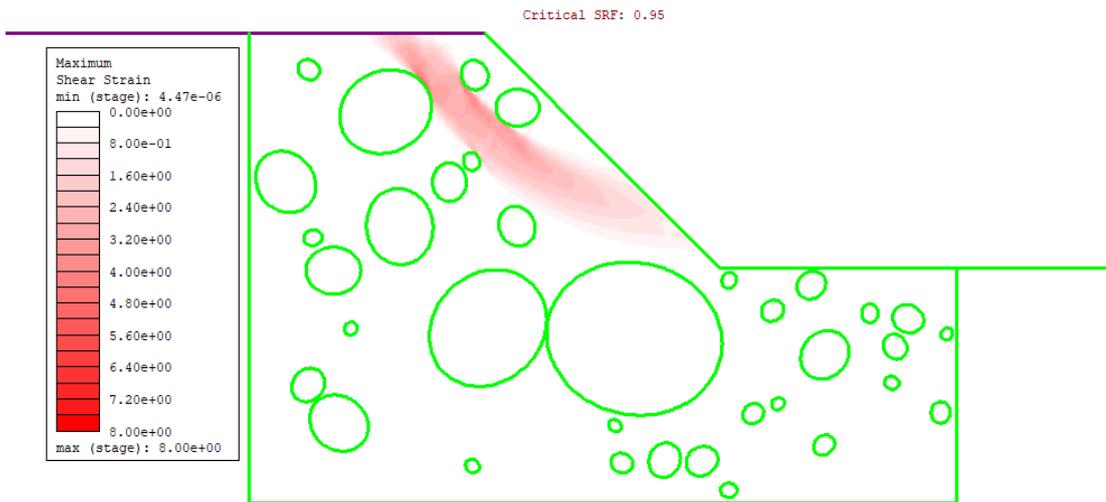
R_25_3



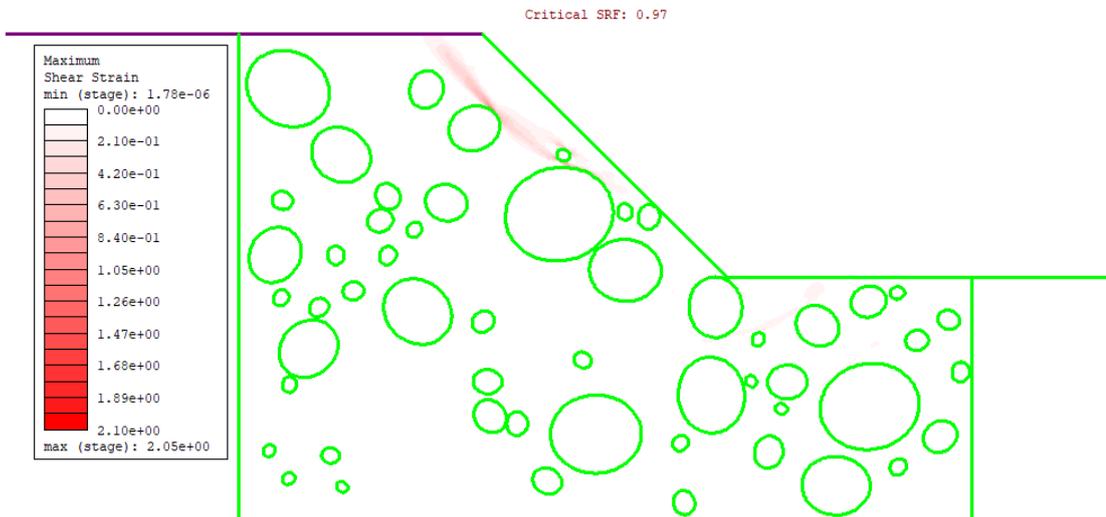
R_25_4



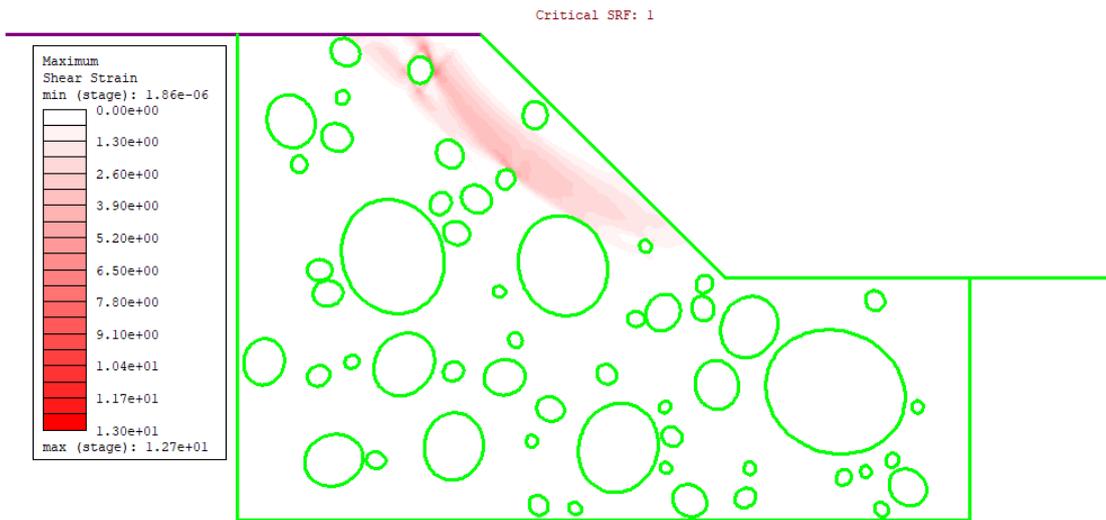
R_25_5



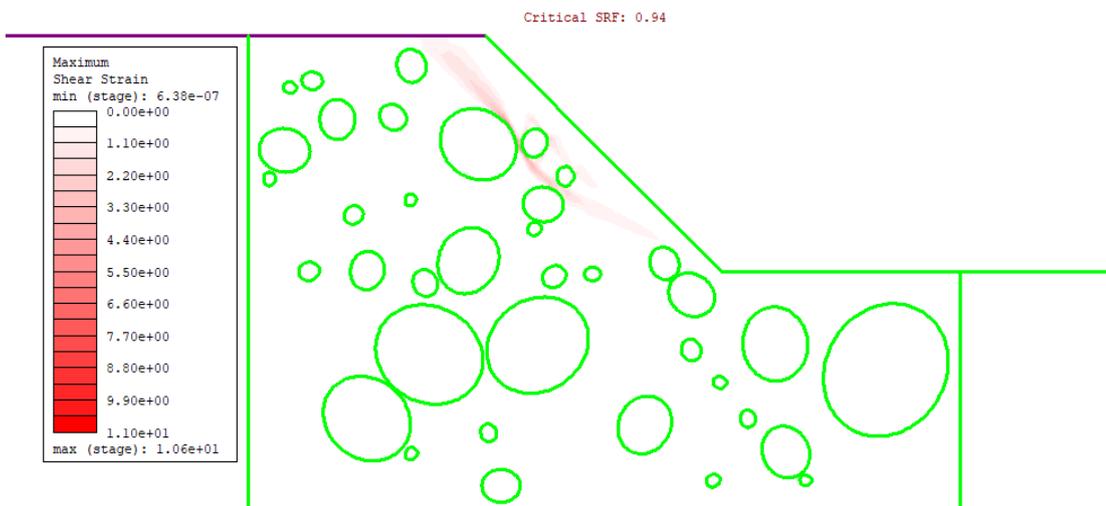
R_25_6



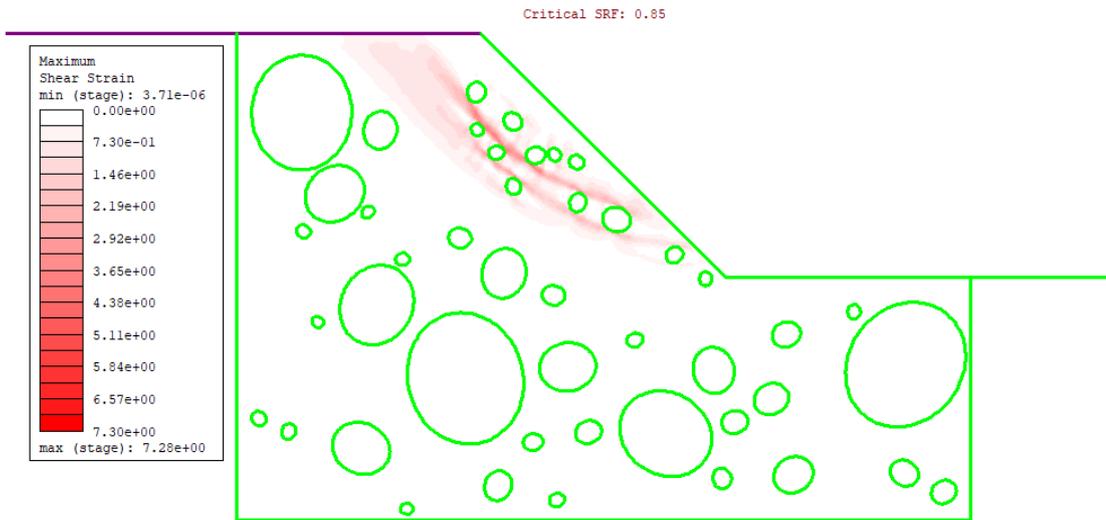
R_25_7



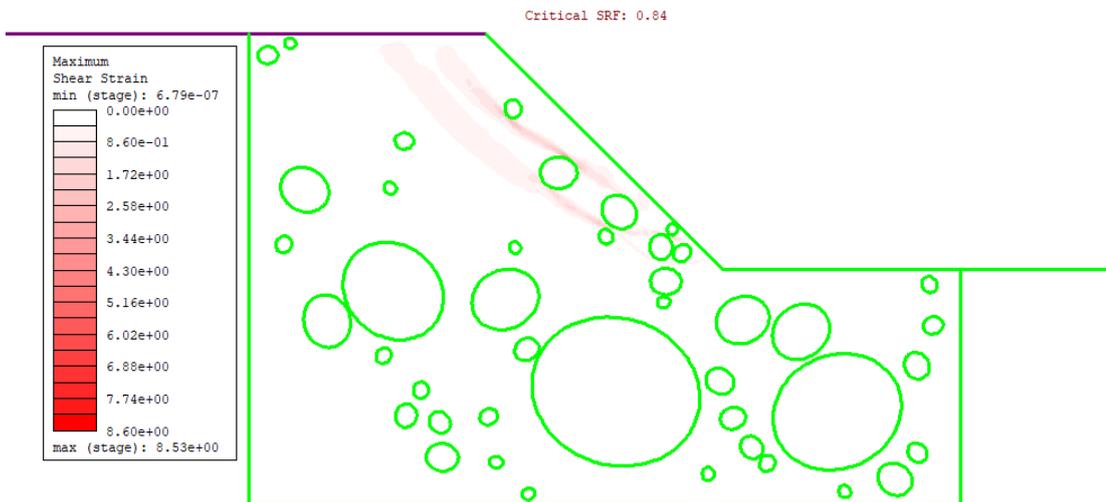
R_25_8



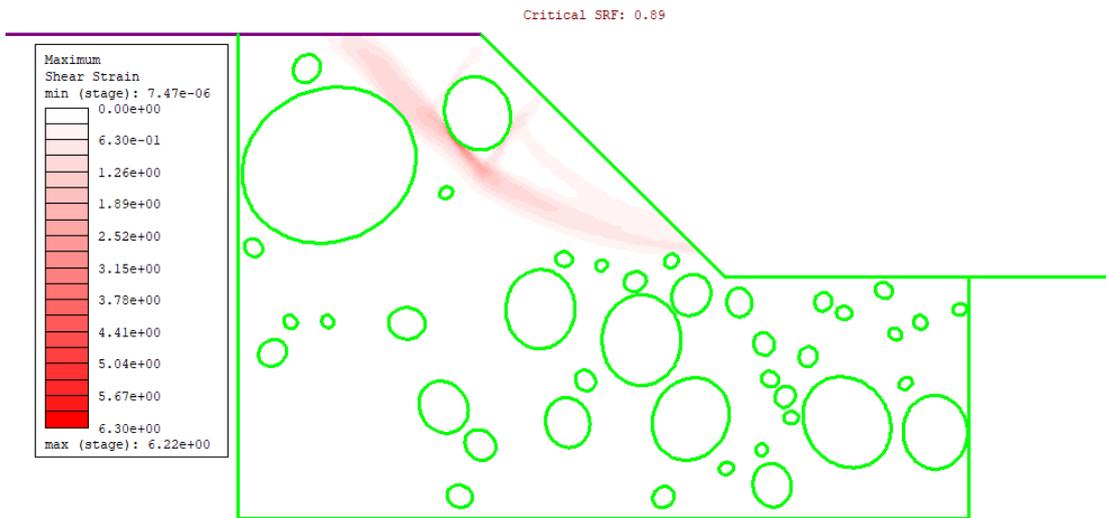
R_25_9



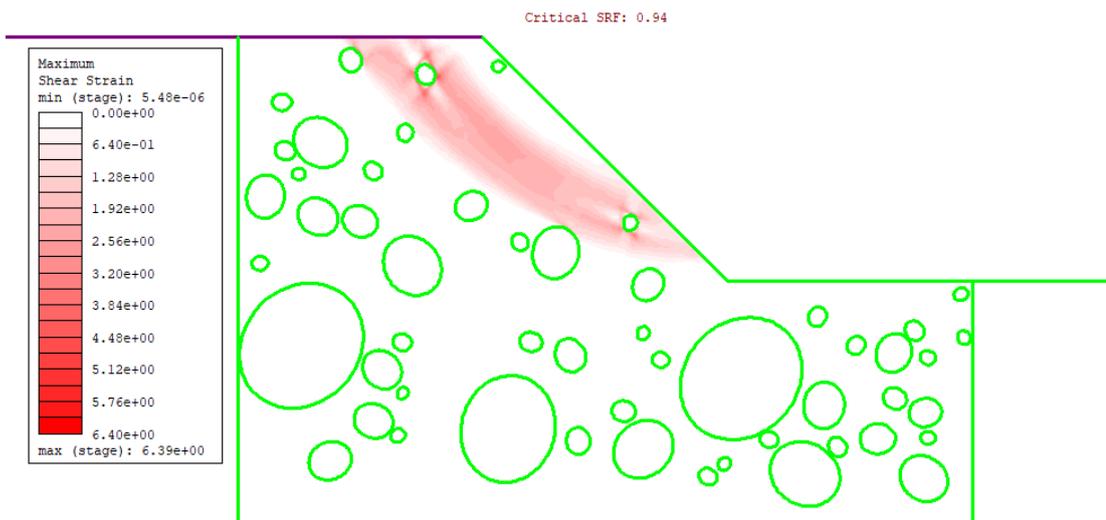
R_25_10



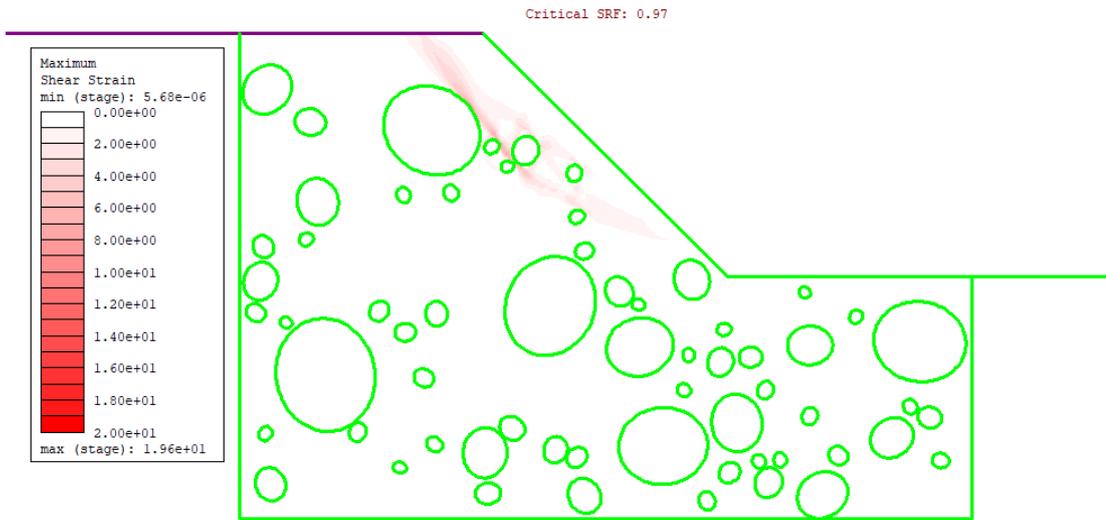
R_25_11



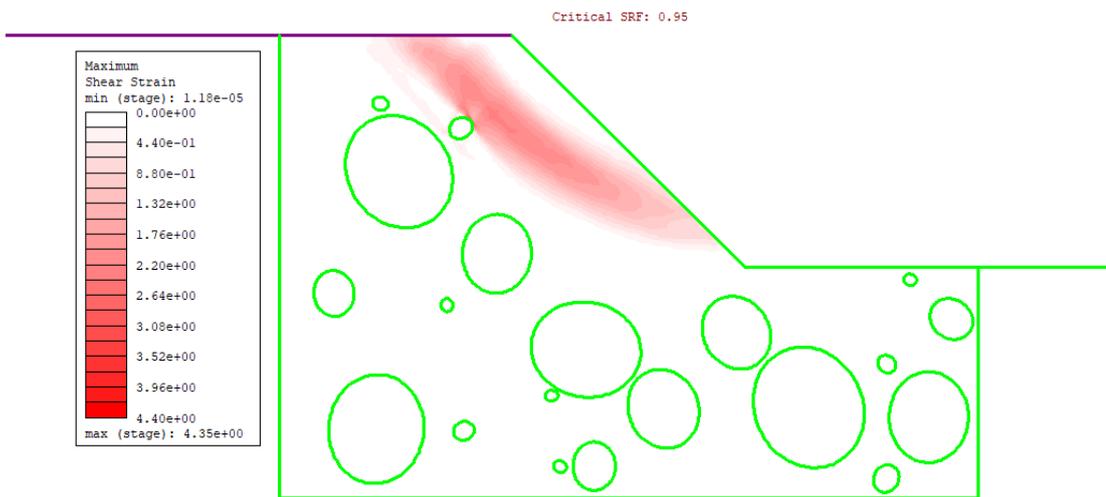
R_25_12



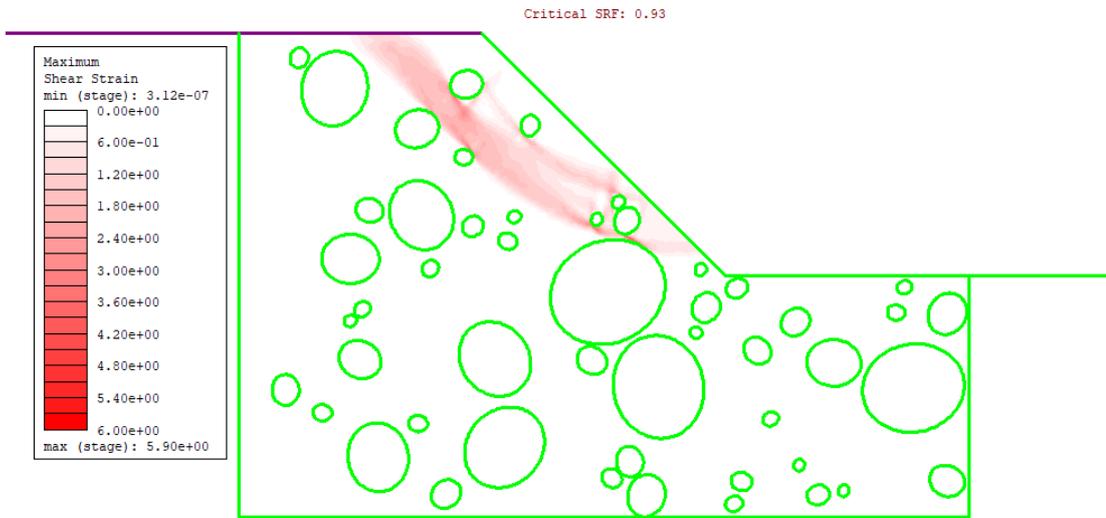
R_25_13



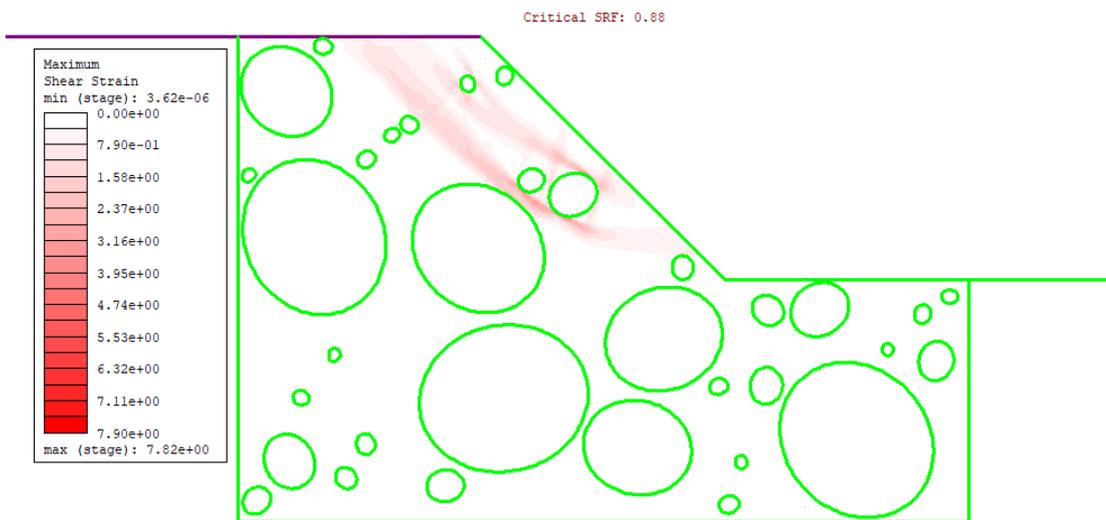
R_25_14



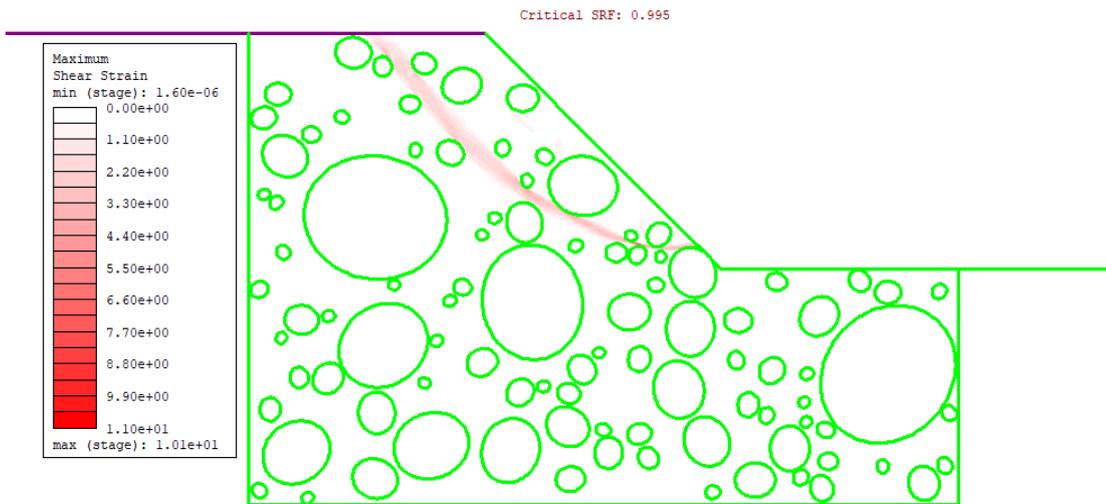
R_25_15



R_40_1



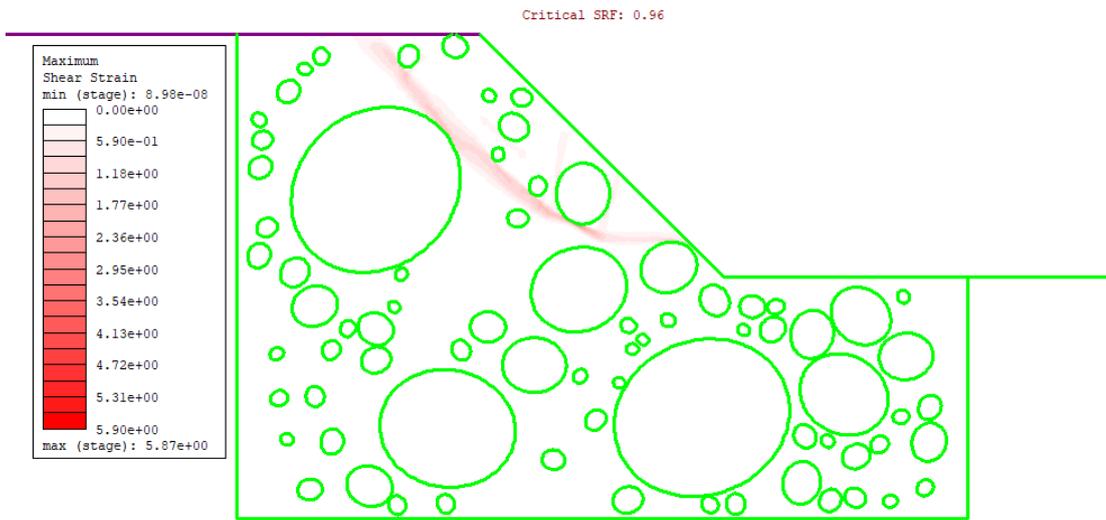
R_40_2



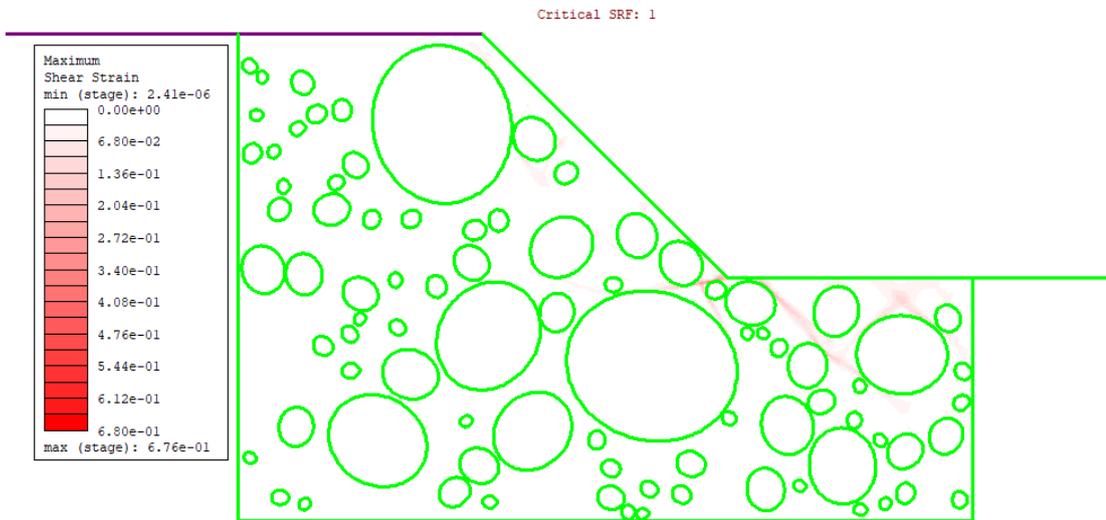
R_40_3



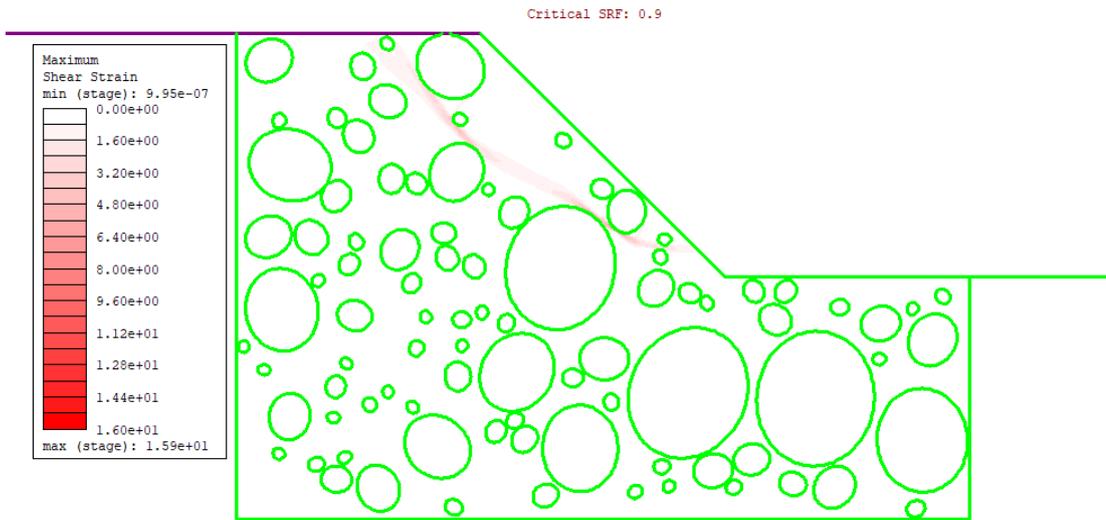
R_40_4



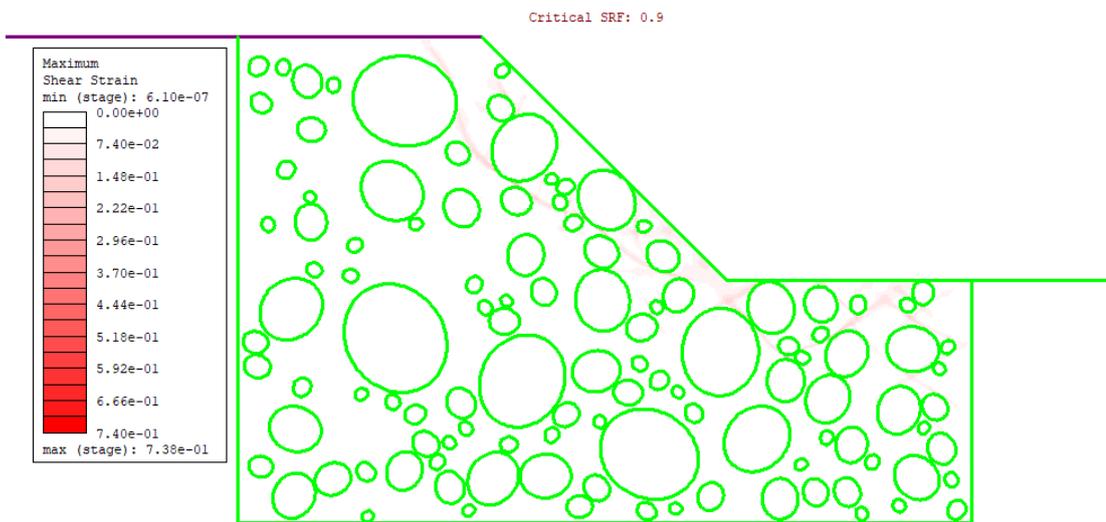
R_40_5



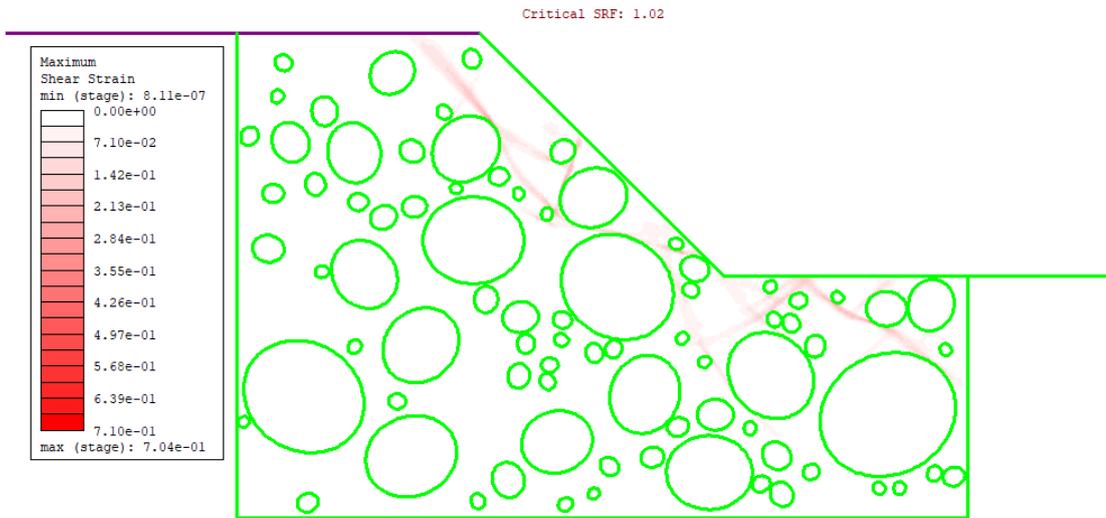
R_40_6



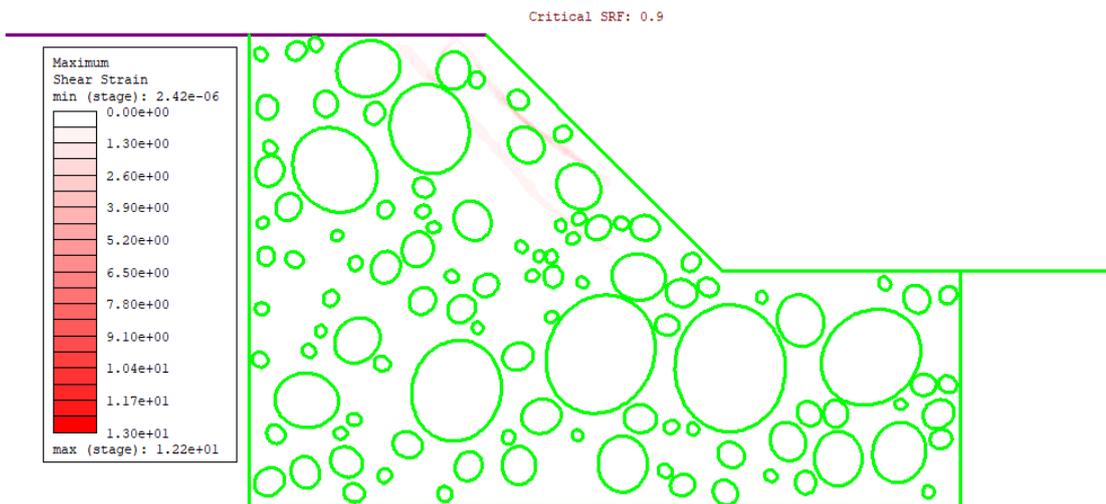
R_40_7



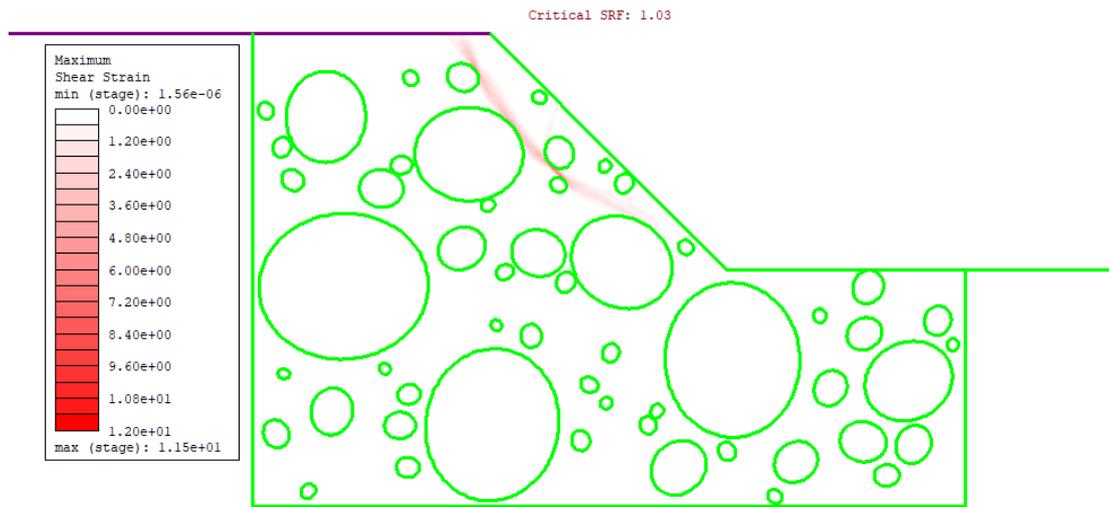
R_40_8



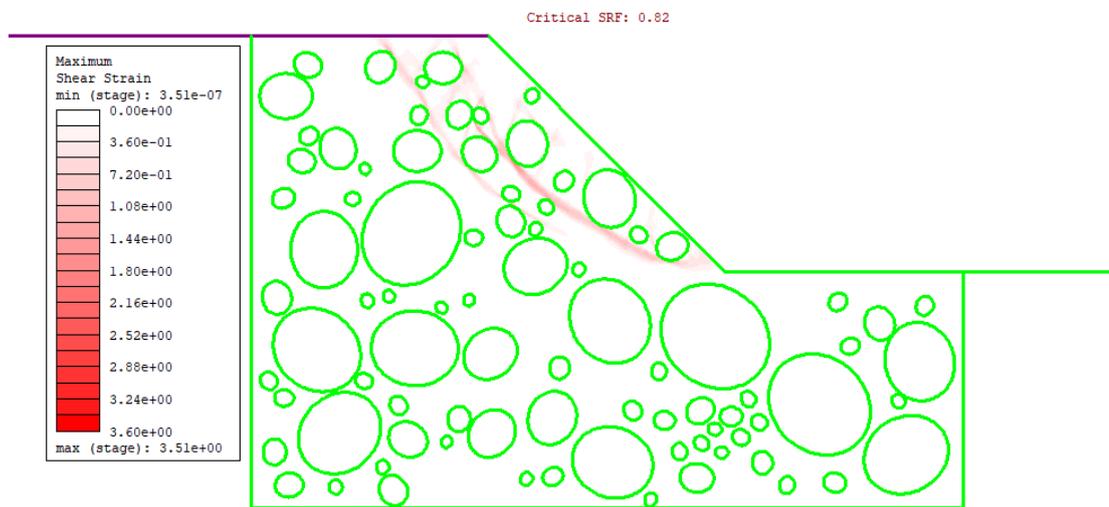
R_40_9



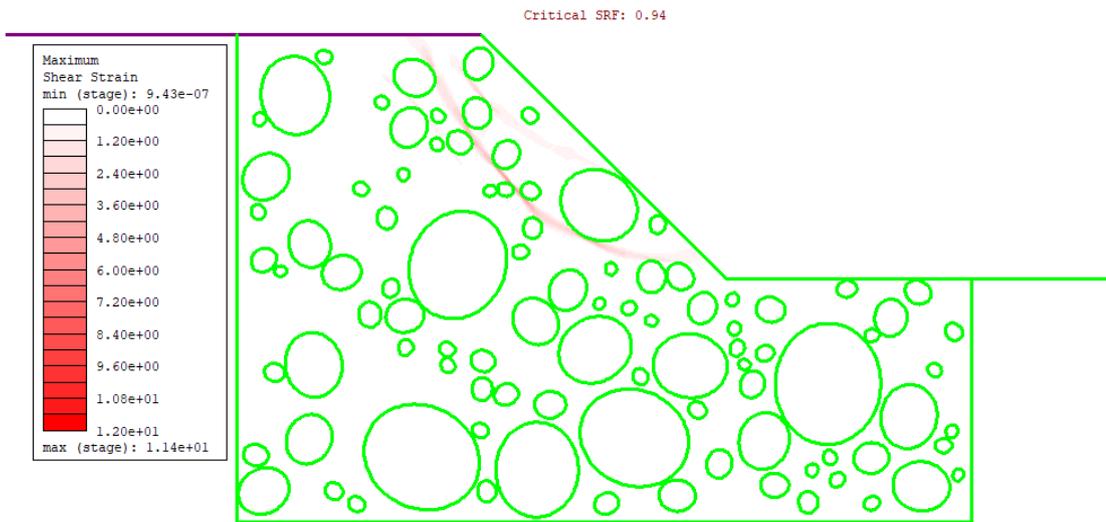
R_40_10



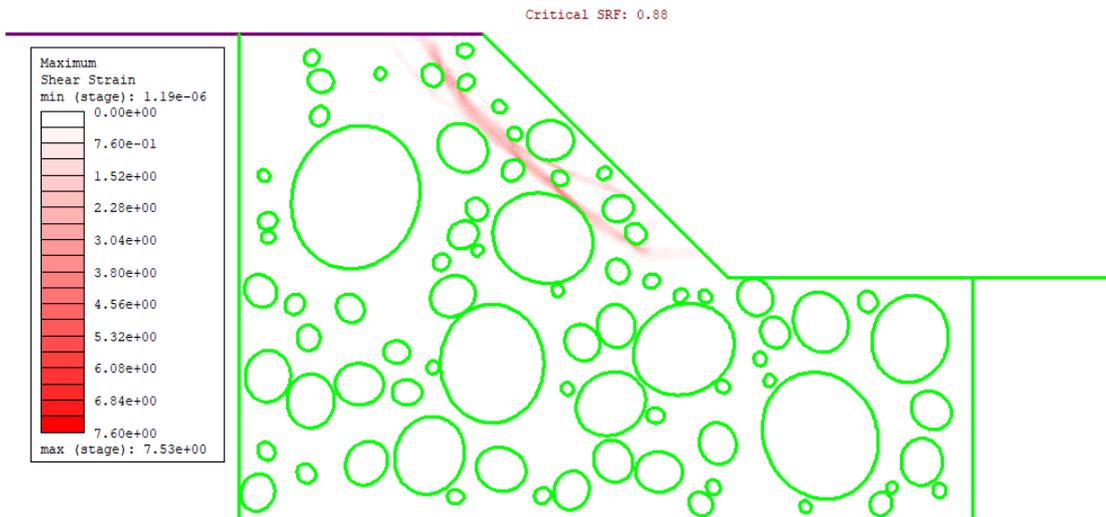
R_40_11



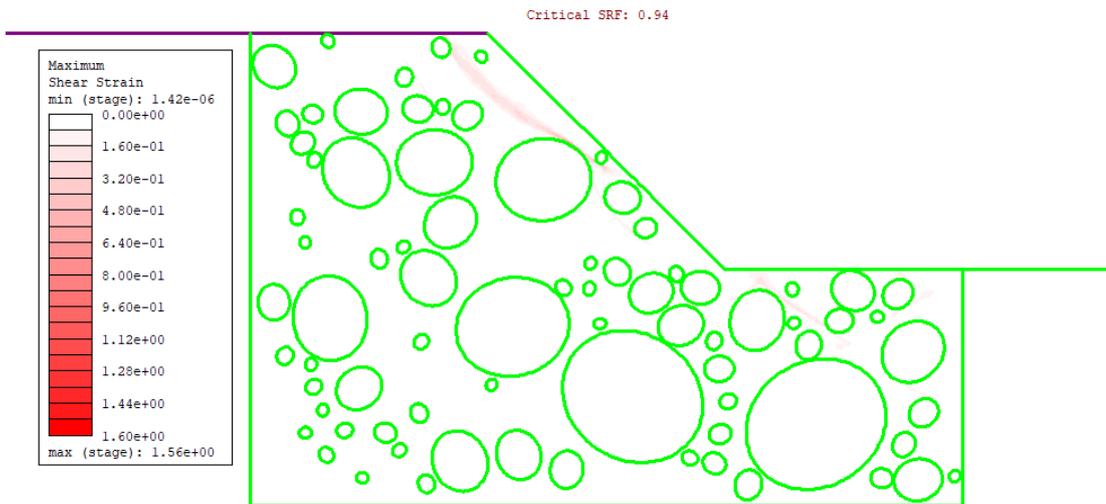
R_40_12



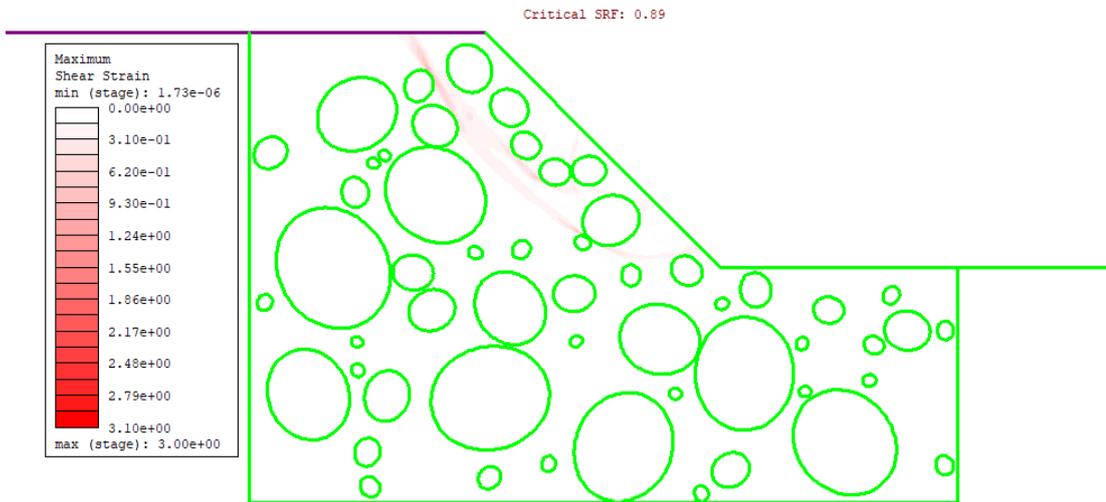
R_40_13



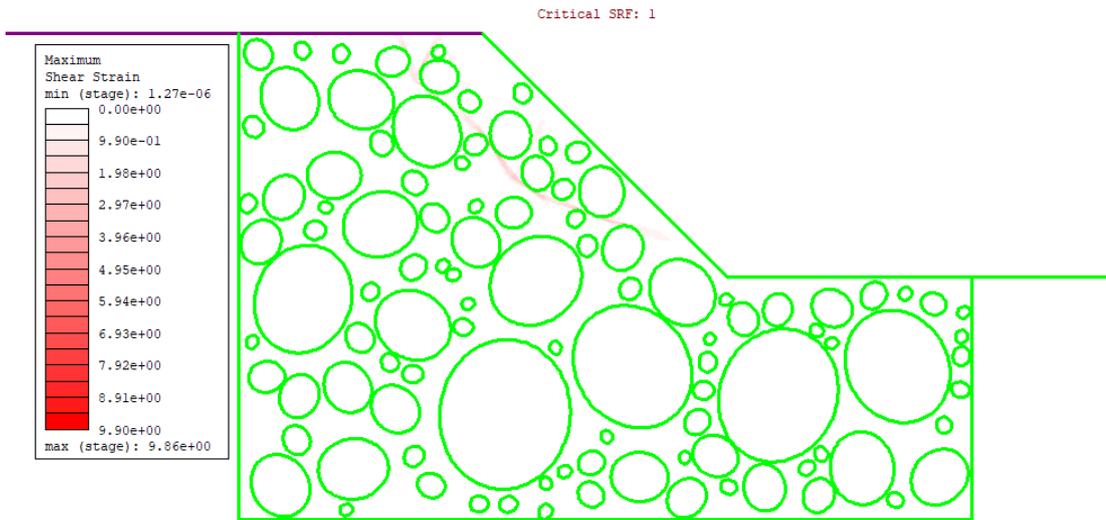
R_40_14



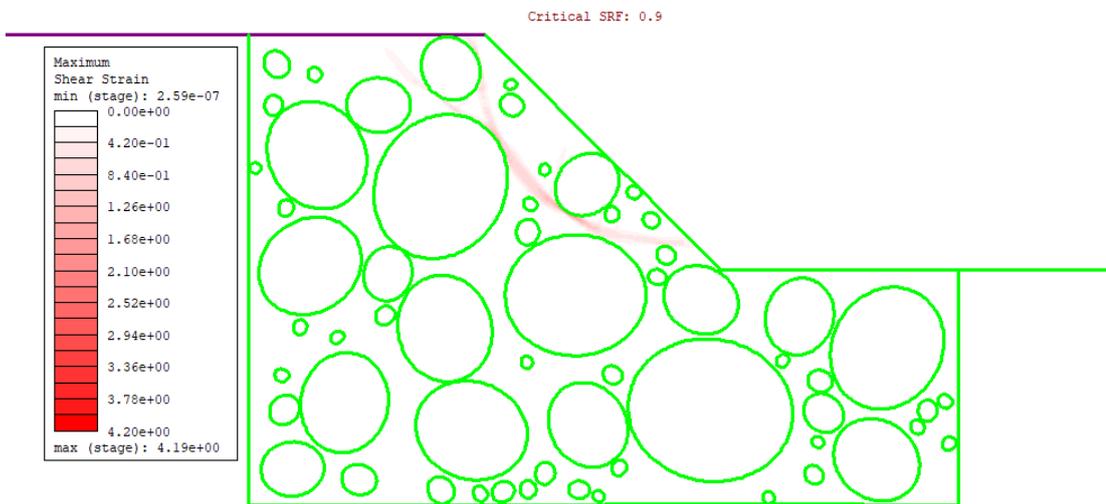
R_40_15



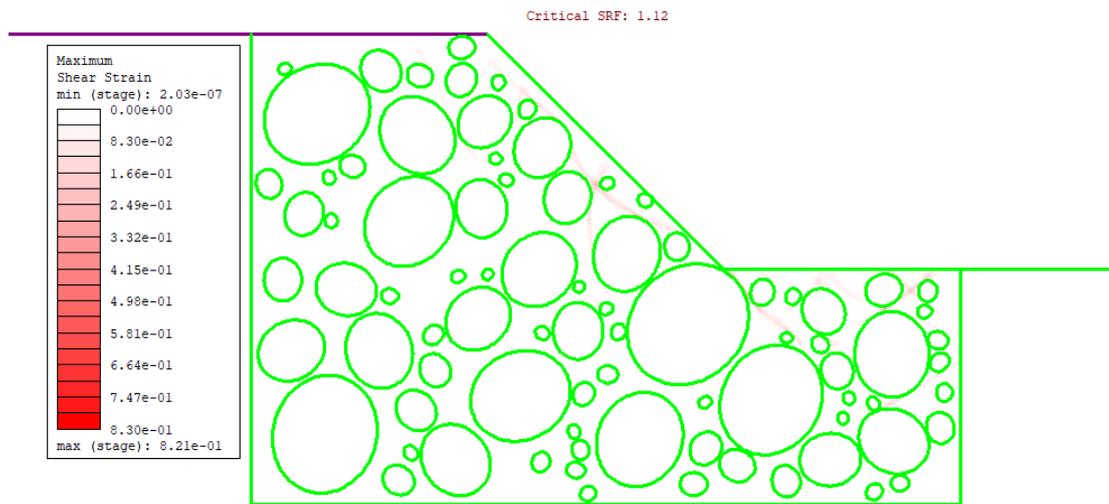
R_55_1



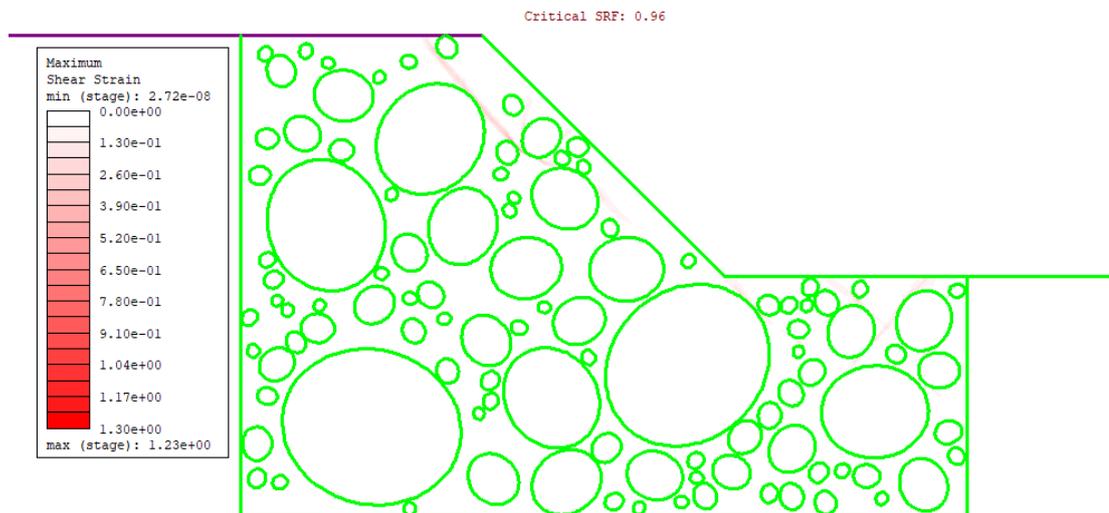
R_55_2



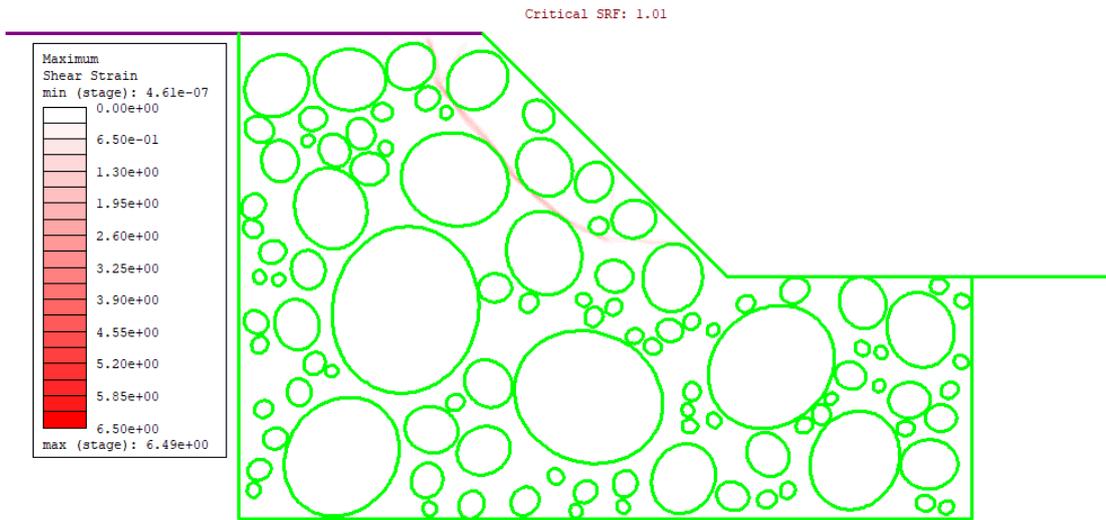
R_55_3



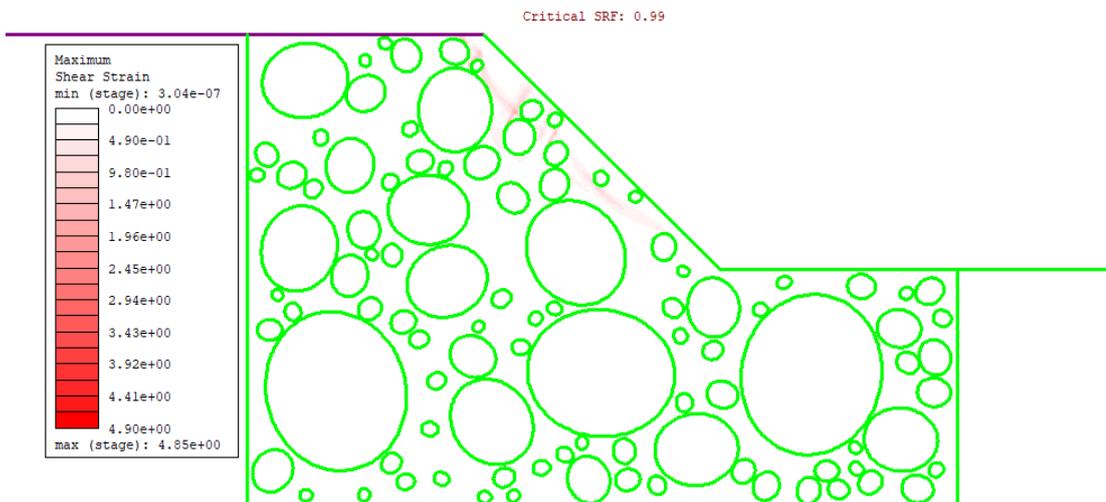
R_55_4



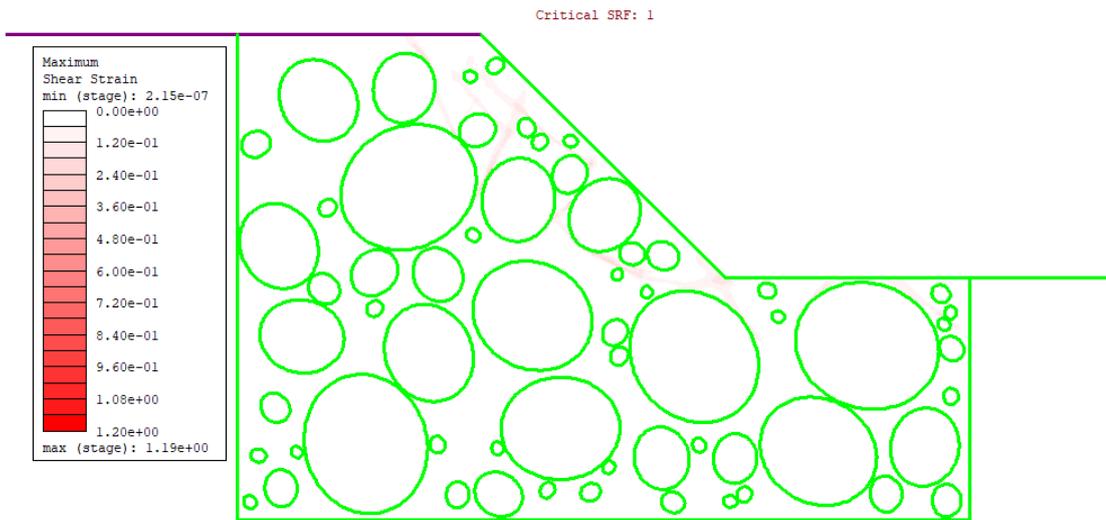
R_55_5



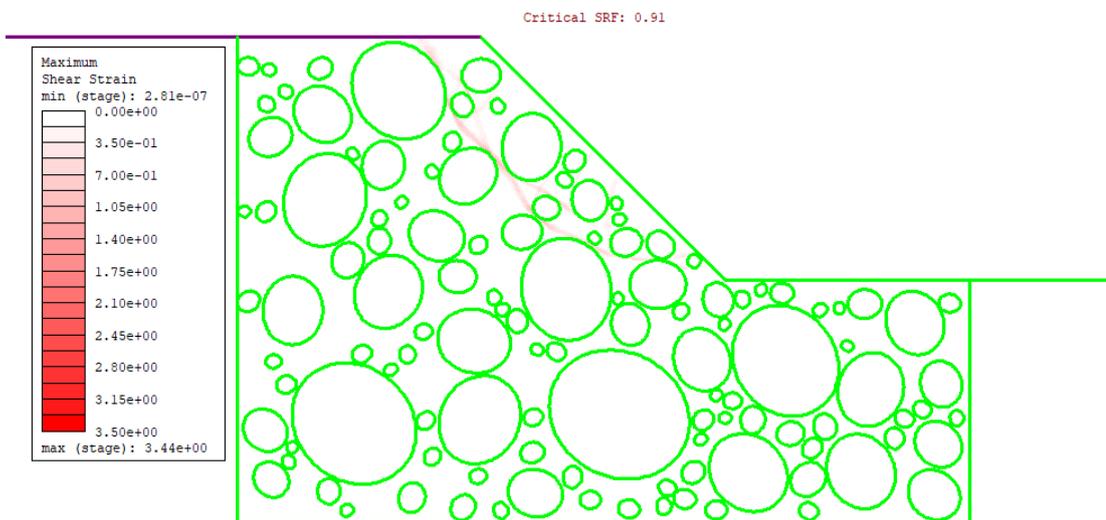
R_55_6



R_55_7



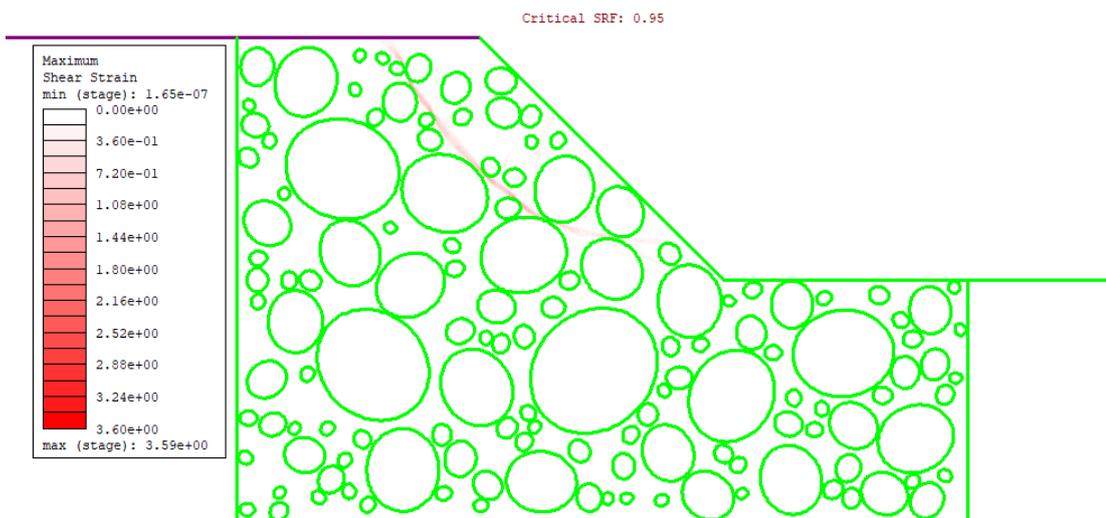
R_55_8



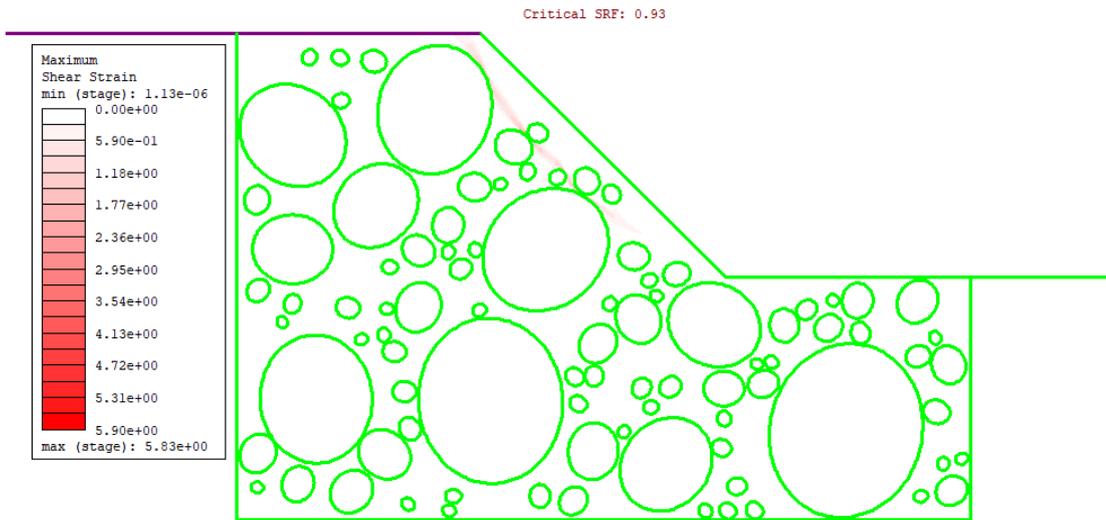
R_55_9



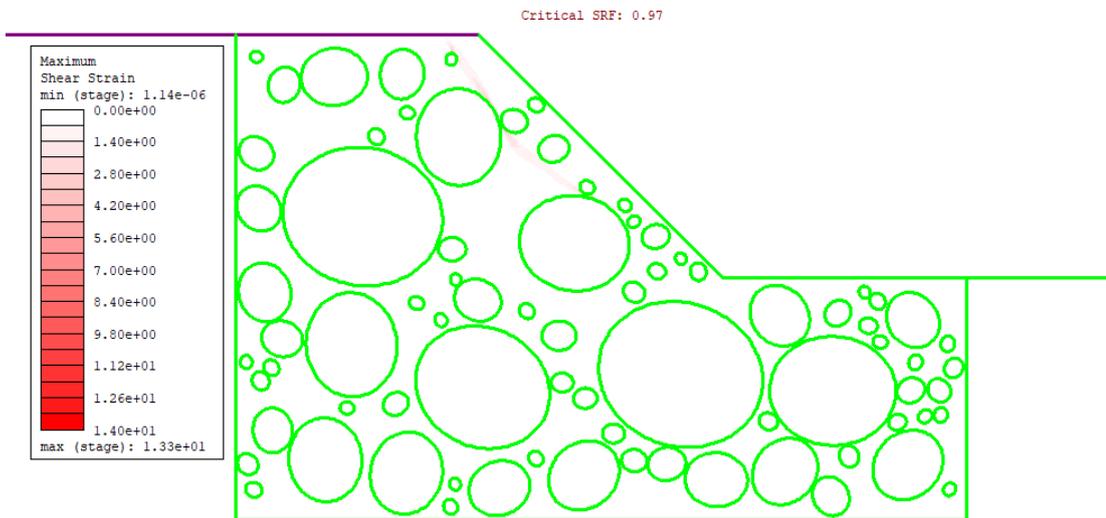
R_55_10



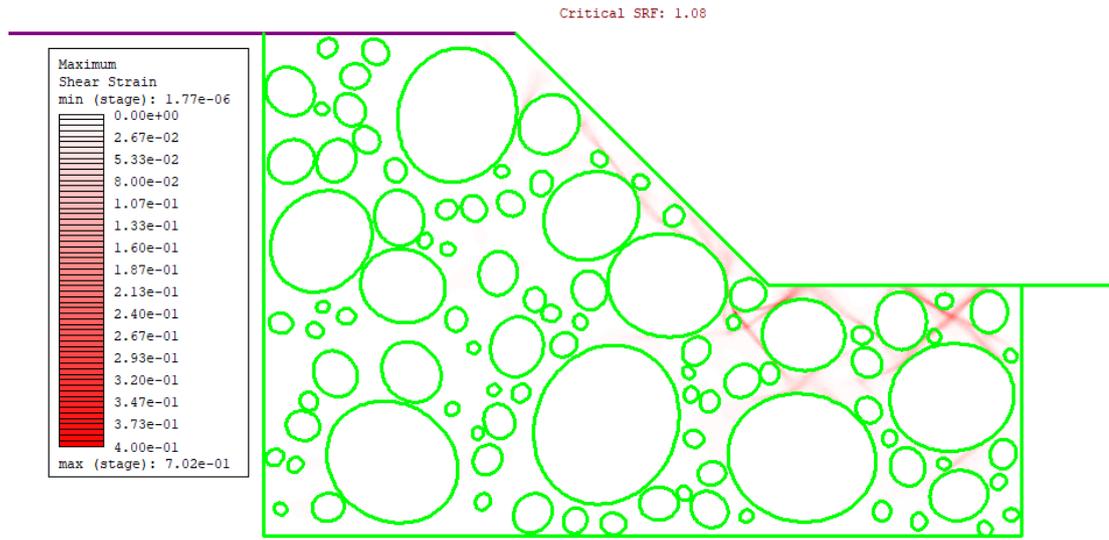
R_55_11



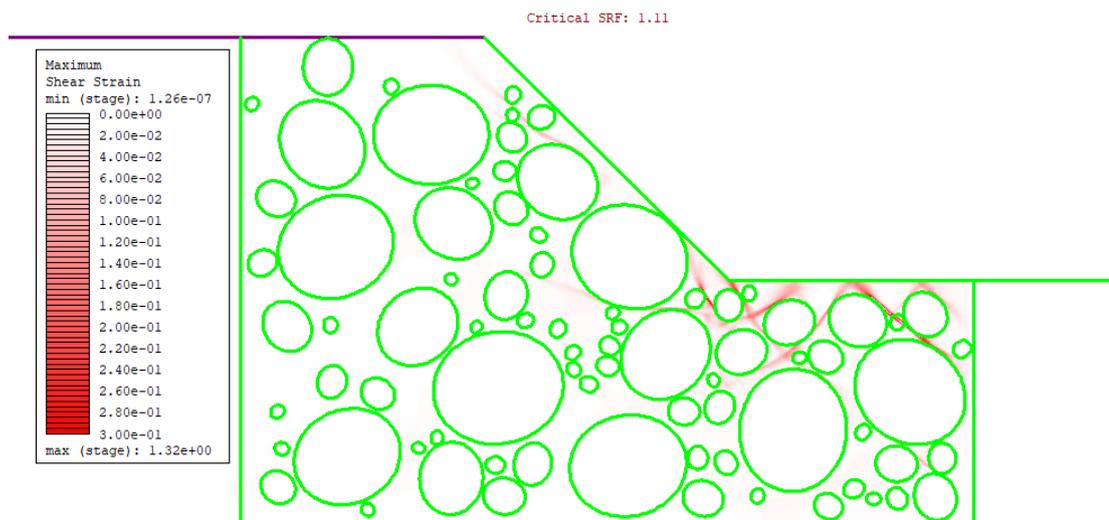
R_55_12



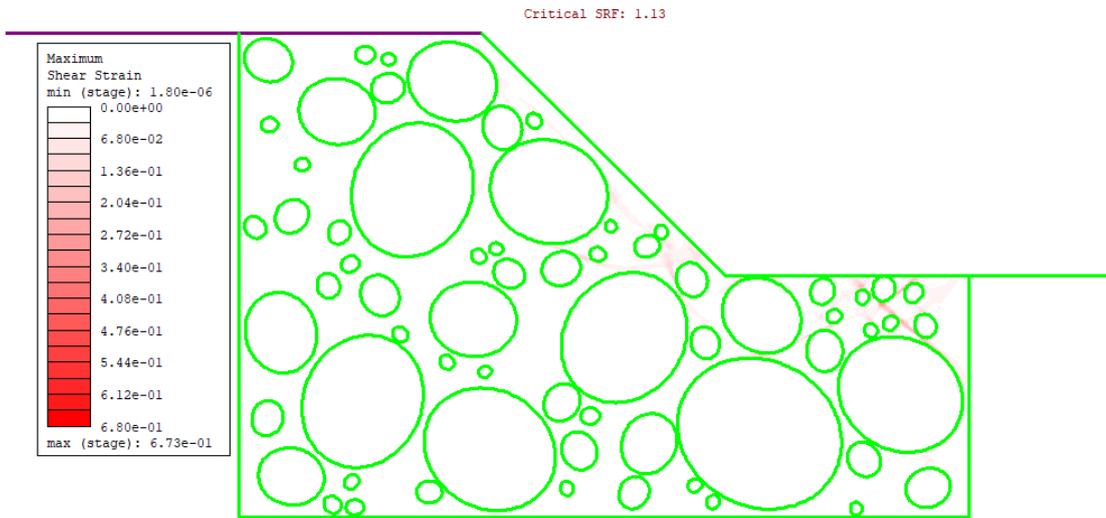
R_55_13



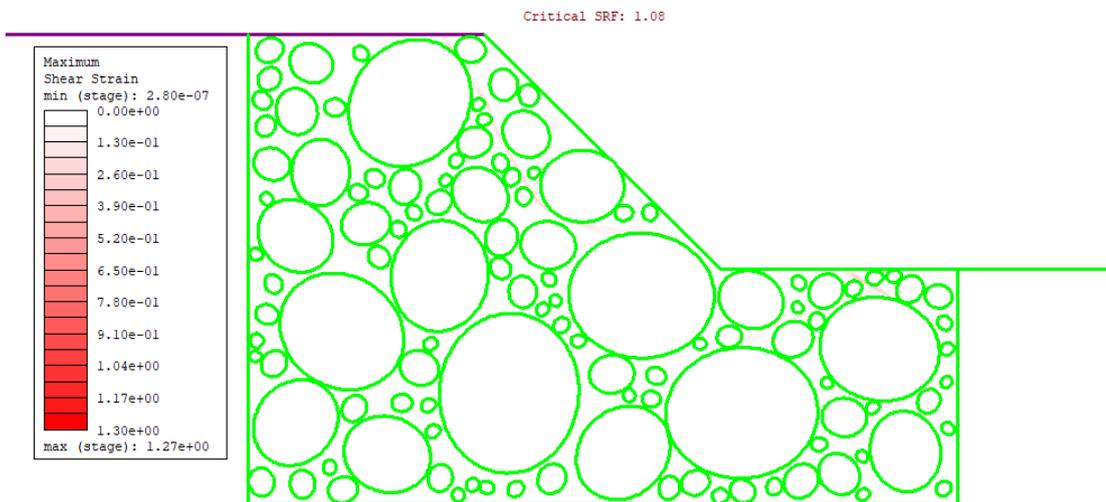
R_55_14



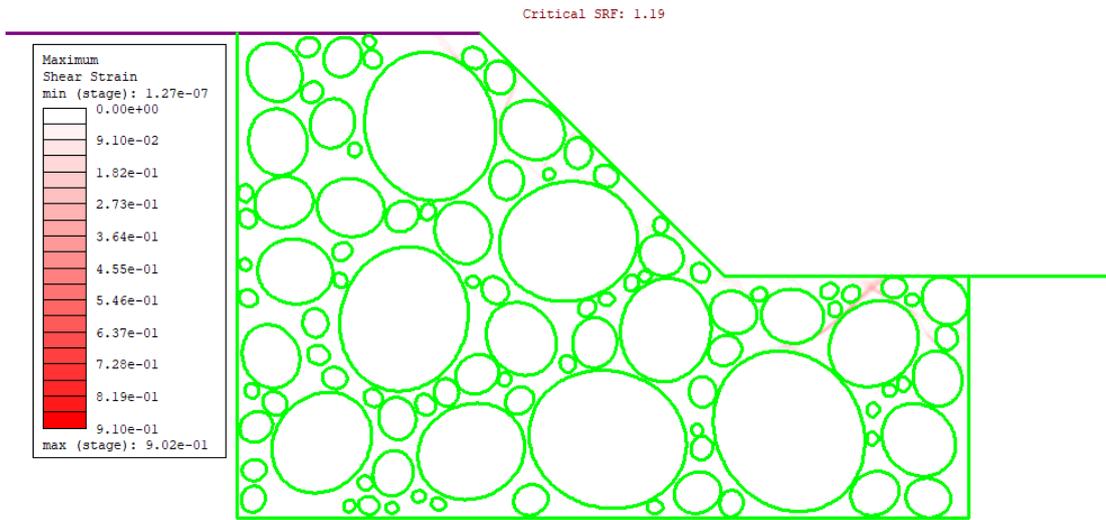
R_55_15



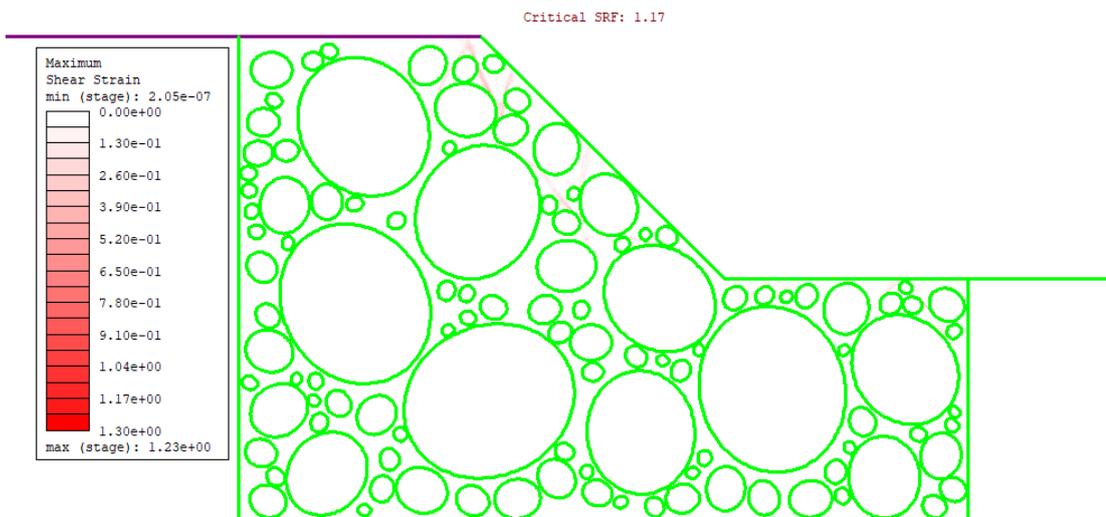
R_70_1



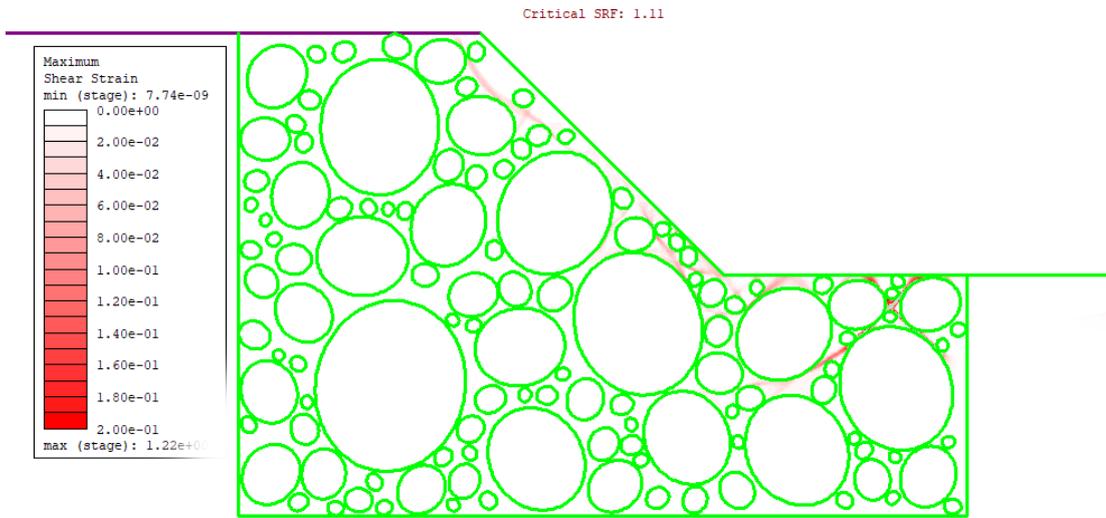
R_70_2



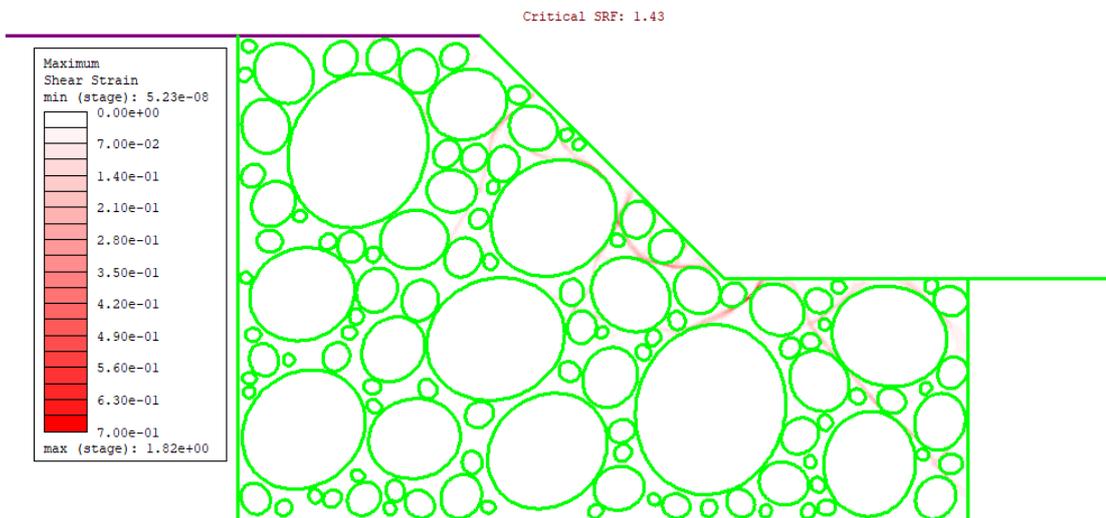
R_70_3



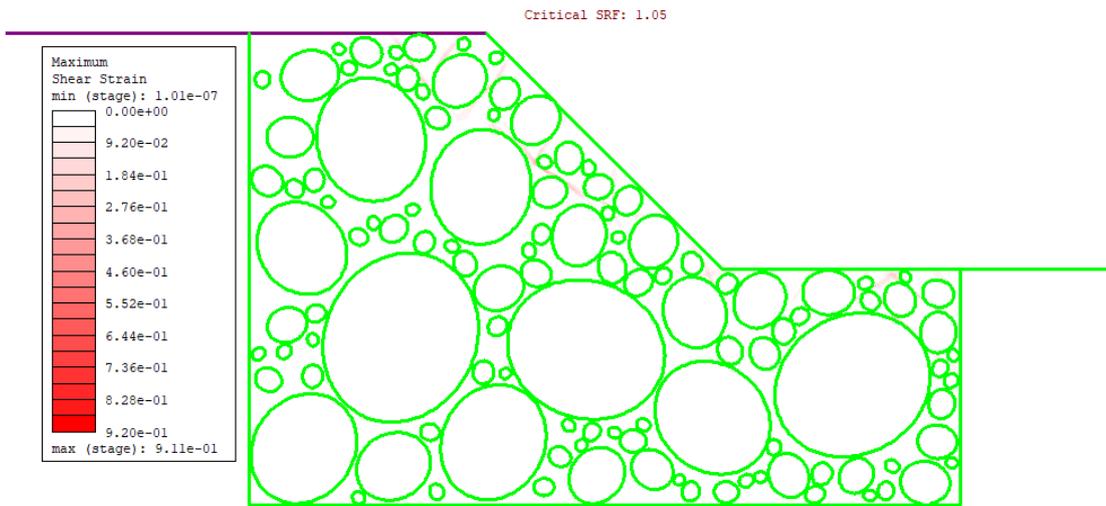
R_70_4



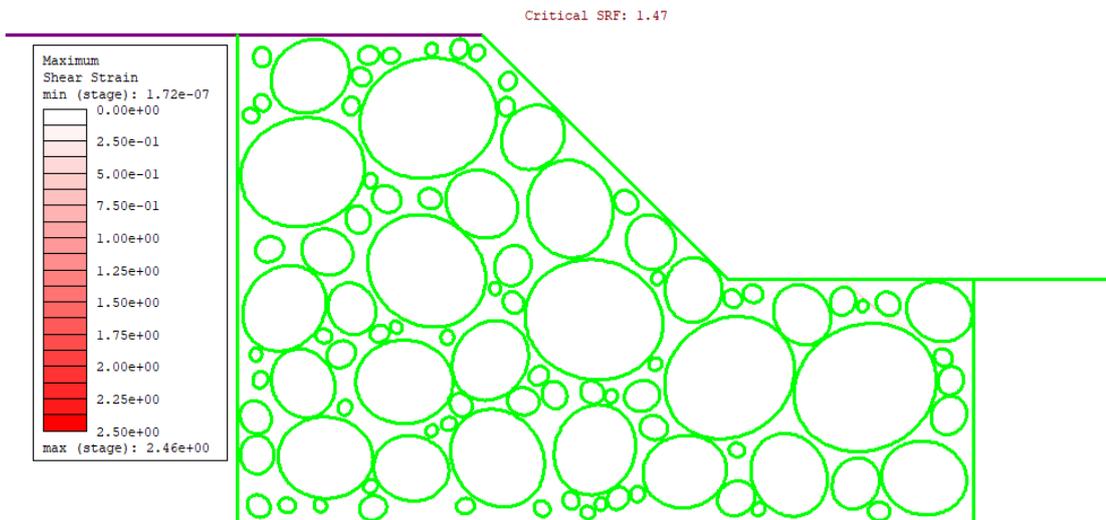
R_70_5



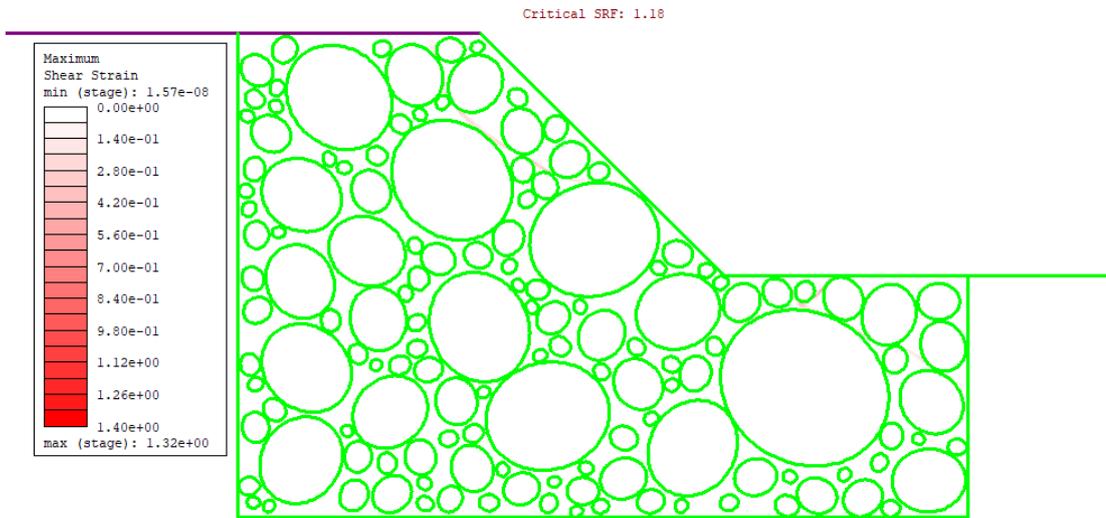
R_70_6



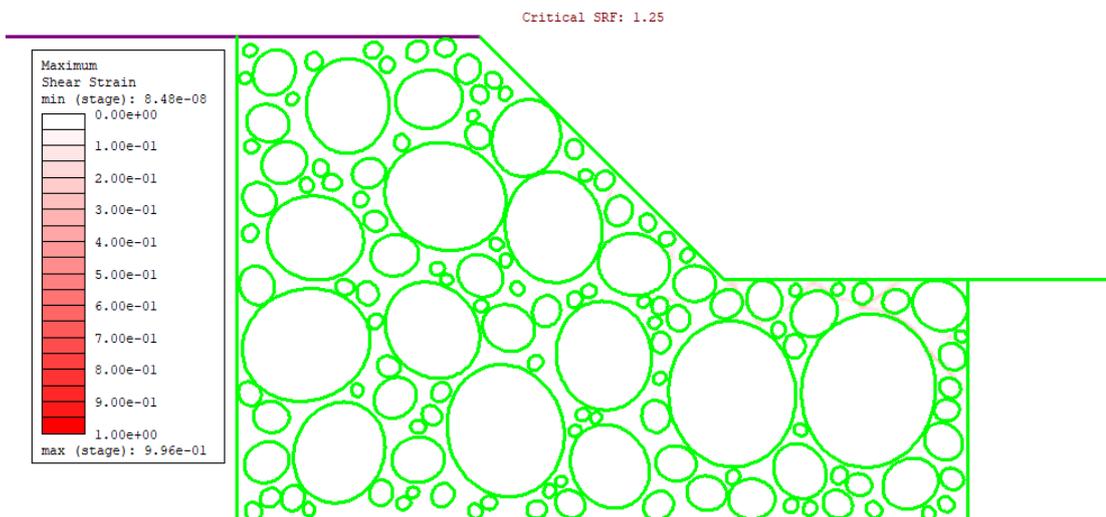
R_70_7



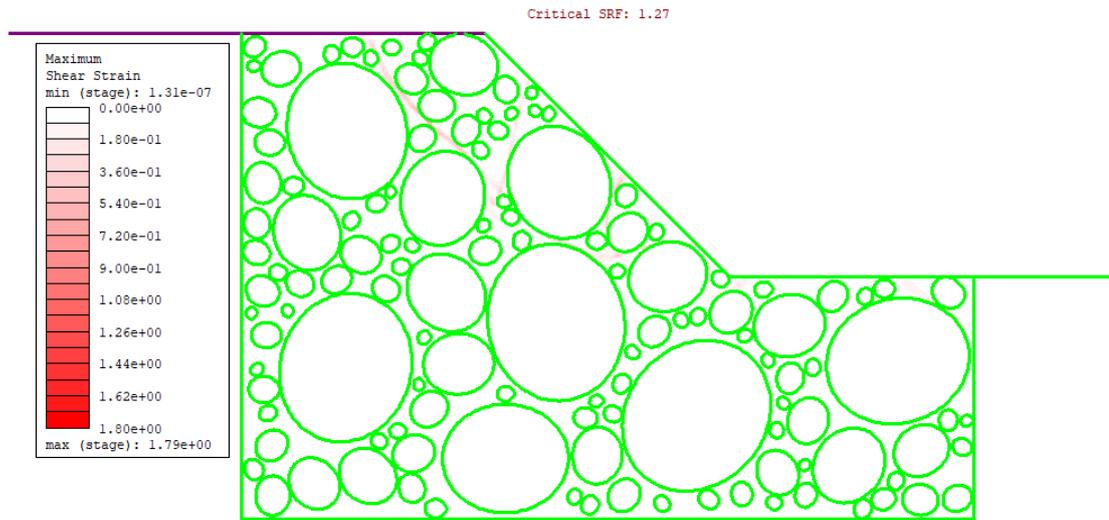
R_70_8



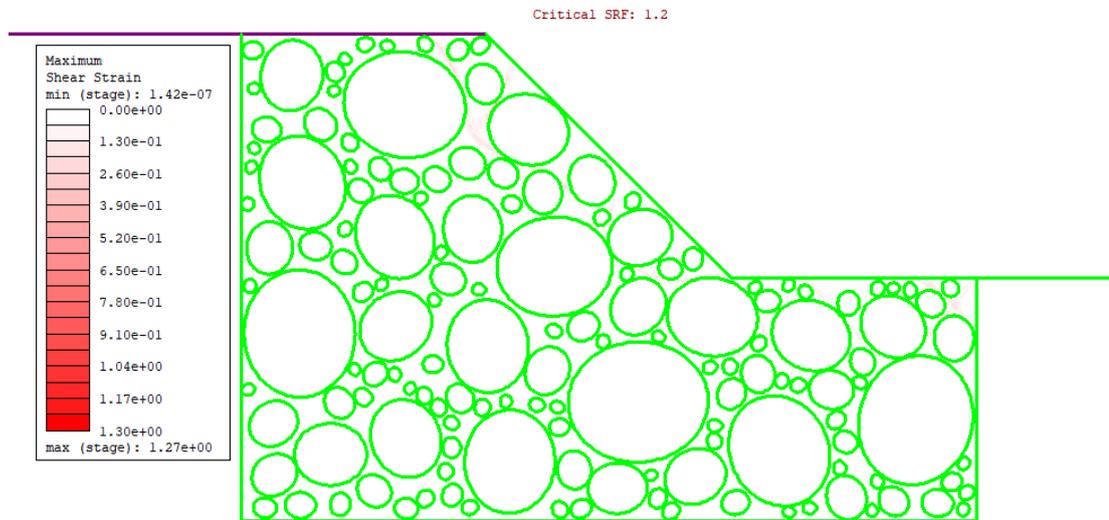
R_70_9



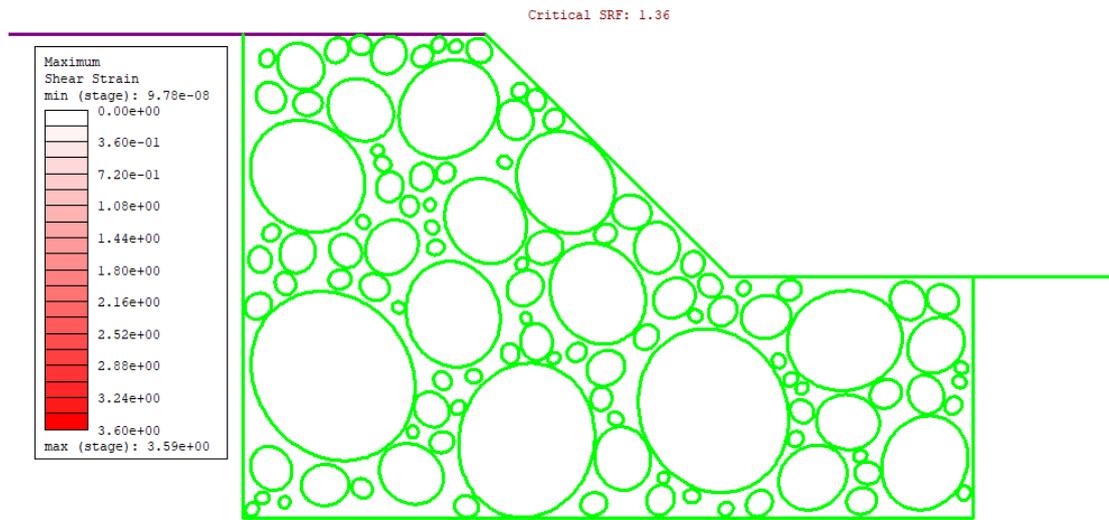
R_70_10



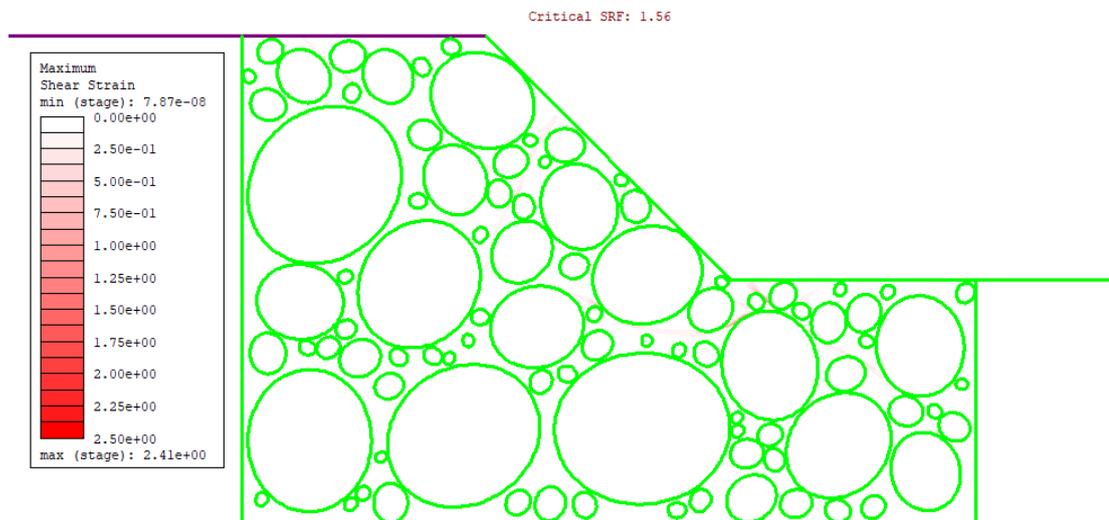
R_70_11



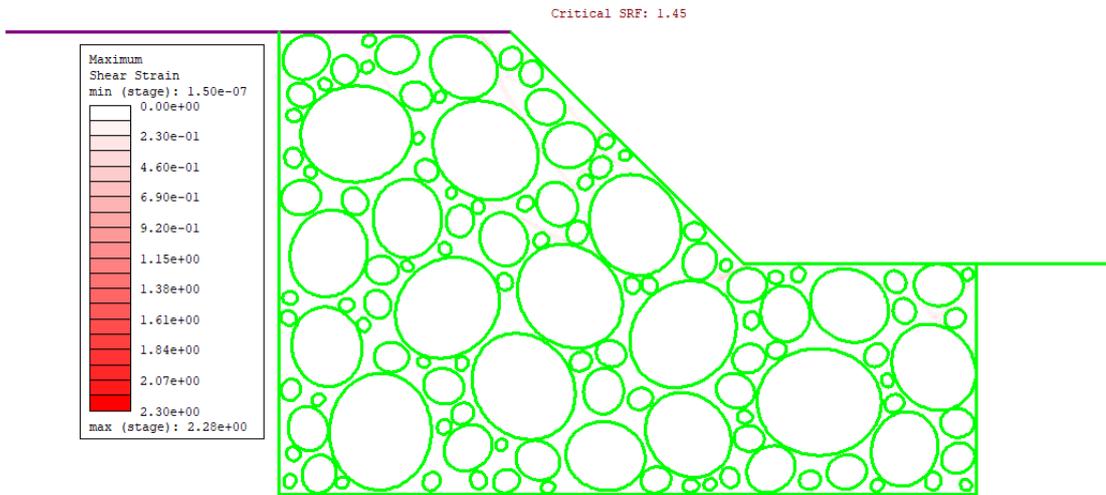
R_70_12



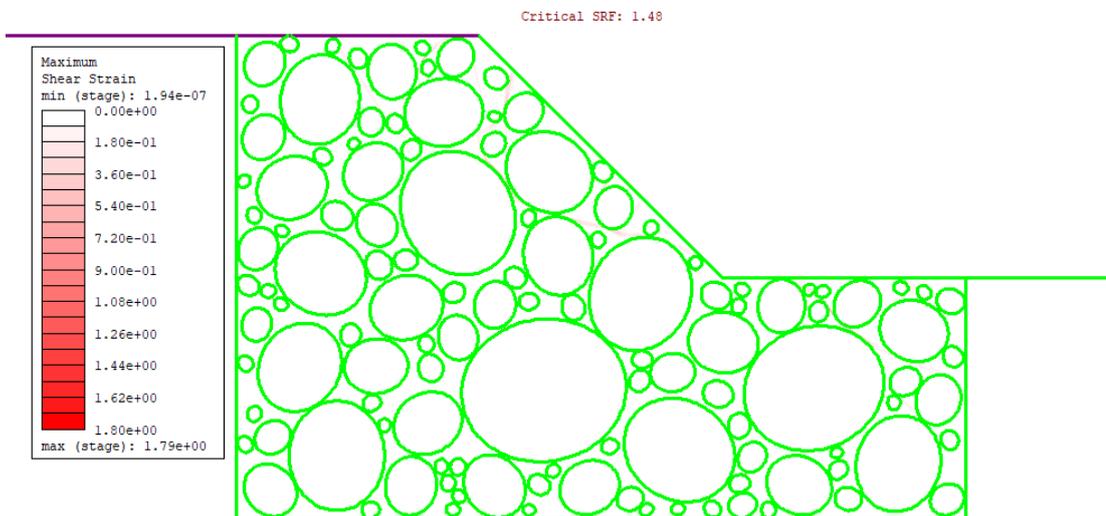
R_70_13



R_70_14



R_70_15



Allegato 2

Fattori di sicurezza

$i = 0^\circ$; $e = 0,866$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	1,01	1,05	1,02	1,32
2	0,90	0,96	1,00	1,50
3	0,96	0,97	1,01	1,38
4	0,87	0,95	1,16	1,34
5	0,93	0,95	1,00	1,38
6	0,89	0,90	1,00	1,09
7	0,88	0,98	1,03	1,26
8	0,86	0,99	1,00	1,15
9	0,93	1,00	1,00	1,06
10	1,00	1,04	1,01	1,40
11	0,96	0,92	1,01	1,00
12	0,95	0,96	1,13	1,48
13	0,92	0,97	0,89	1,26
14	0,96	0,95	0,97	1,13
15	0,92	0,96	0,99	1,24
Media	0,93	0,97	1,01	1,27
Mediana	0,93	0,96	1,00	1,26
Dev. St.	0,04	0,04	0,06	0,15

$i = 30^\circ$; $e = 0,866$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	1,09	0,91	0,94	1,07
2	1,06	1,05	1,17	1,03
3	1,05	0,87	1,02	1,07
4	1,06	0,88	0,94	1,08
5	0,86	0,98	1,04	1,15
6	1,06	1,18	1,09	1,04
7	0,98	0,92	1,08	1,05
8	1,05	1,04	0,91	0,98
9	0,94	1,07	1,01	1,13
10	0,92	1,00	0,91	1,22
11	0,88	0,91	1,10	1,13
12	0,89	0,98	1,30	1,06
13	1,03	1,11	1,00	1,08
14	1,05	1,23	1,09	1,23
15	0,93	0,94	1,04	0,94
Media	0,99	1,00	1,04	1,08
Mediana	1,03	0,98	1,04	1,07
Dev. St.	0,08	0,11	0,10	0,08

$i = 60^\circ$; $e = 0,866$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	0,94	0,92	0,97	1,33
2	1,16	0,96	1,00	1,16
3	0,89	0,91	0,95	1,36
4	0,91	0,93	1,01	1,37
5	1,08	0,96	0,99	1,13
6	0,95	0,90	0,98	1,17
7	1,22	1,01	0,92	1,25
8	0,98	1,00	0,92	1,10
9	0,92	1,00	0,95	1,24
10	0,95	1,02	0,95	1,19
11	0,95	0,95	1,05	1,08
12	0,94	0,99	1,06	1,10
13	0,90	0,92	1,06	1,22
14	0,91	0,97	1,04	1,20
15	0,92	1,02	1,08	1,30
Media	0,97	0,96	1,00	1,21
Mediana	0,94	0,96	0,99	1,20
Dev. St.	0,10	0,04	0,05	0,09

$i = 90^\circ$; $e = 0,866$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	1,00	0,93	0,90	1,16
2	1,01	1,00	0,93	1,04
3	1,01	0,98	1,03	1,07
4	0,96	0,92	0,97	1,22
5	0,95	0,88	1,00	1,04
6	0,97	0,95	1,02	1,37
7	1,07	0,87	1,18	1,24
8	0,88	0,95	1,05	1,09
9	0,90	1,00	0,91	1,15
10	0,97	0,92	0,90	1,26
11	0,87	1,01	0,92	1,09
12	0,92	0,93	1,00	1,30
13	1,04	0,92	0,98	1,17
14	0,95	1,05	1,03	1,23
15	0,89	0,95	1,07	1,31
Media	0,96	0,95	0,99	1,18
Mediana	0,96	0,95	1,00	1,17
Dev. St.	0,06	0,05	0,08	0,10

$i = 0^\circ$; $e = 0,5$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	0,93	0,93	1,22	1,20
2	0,88	0,89	1,14	1,66
3	0,86	0,97	0,93	1,38
4	0,89	1,02	1,09	1,39
5	1,00	0,97	1,02	1,41
6	0,93	0,93	1,52	1,47
7	0,91	1,16	1,29	1,42
8	0,88	1,00	1,17	1,67
9	1,00	0,97	1,08	1,17
10	0,95	0,90	1,04	1,75
11	1,06	0,91	1,15	1,28
12	0,82	1,02	1,15	1,71
13	0,91	0,94	1,02	1,36
14	1,00	1,01	1,00	1,23
15	0,96	0,98	1,05	1,55
Media	0,93	0,97	1,12	1,44
Mediana	0,93	0,97	1,09	1,41
Dev. St.	0,06	0,07	0,14	0,19

$i = 30^\circ$; $e = 0,5$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	0,93	1,01	1,00	1,10
2	0,92	0,95	1,03	1,38
3	0,93	0,85	0,94	1,07
4	0,94	1,00	0,98	1,18
5	0,94	0,94	0,99	1,20
6	0,98	0,87	1,00	1,22
7	0,91	0,94	0,98	1,01
8	0,88	0,92	0,98	1,23
9	0,97	0,95	0,92	1,07
10	0,92	0,98	1,00	1,44
11	0,97	1,04	0,97	1,11
12	0,93	0,95	1,10	1,29
13	0,88	0,92	1,03	1,29
14	0,90	0,92	1,03	1,02
15	0,91	0,91	1,04	1,03
Media	0,93	0,94	1,00	1,18
Mediana	0,93	0,94	1,00	1,18
Dev. St.	0,03	0,05	0,04	0,13

$i = 60^\circ$; $e = 0,5$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	1,19	1,17	1,00	1,19
2	1,04	0,97	1,06	1,46
3	1,20	0,91	1,04	1,38
4	0,92	0,97	1,00	1,22
5	0,88	1,01	1,15	1,18
6	1,04	1,22	1,10	1,05
7	1,20	0,96	0,97	1,07
8	0,97	0,98	1,14	1,08
9	0,88	1,08	1,15	1,18
10	1,05	1,04	1,00	1,11
11	0,96	0,88	1,00	1,19
12	1,07	0,92	0,98	1,18
13	0,98	0,98	0,94	1,01
14	0,98	1,04	1,14	1,24
15	1,11	0,90	1,12	0,87
Media	1,03	1,00	1,05	1,16
Mediana	1,04	0,98	1,04	1,18
Dev. St.	0,11	0,10	0,07	0,14

$i = 90^\circ$; $e = 0,5$

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	0,96	1,06	1,01	1,43
2	0,96	1,00	1,03	1,38
3	1,13	1,04	1,21	0,95
4	0,96	1,03	1,15	1,12
5	1,00	1,10	1,06	1,23
6	1,07	1,06	1,01	1,17
7	1,07	1,00	1,09	1,14
8	0,97	1,04	1,06	1,50
9	0,99	1,03	1,01	0,88
10	1,00	1,10	1,07	1,32
11	1,03	0,92	0,87	1,37
12	0,88	0,94	1,11	1,34
13	1,17	1,05	1,11	1,03
14	1,01	1,05	0,97	1,43
15	0,94	1,00	1,02	1,13
Media	1,01	1,03	1,05	1,23
Mediana	1,00	1,04	1,06	1,23
Dev. St.	0,08	0,05	0,08	0,19

i = Random ; e = 0,5

Estrazione	VBP			
	25%	40%	55%	70%
1	0,95	0,94	1,11	1,45
2	0,97	0,88	1,08	1,56
3	0,94	0,94	0,97	1,36
4	0,89	0,82	0,93	1,20
5	0,84	1,03	0,95	1,27
6	0,85	0,90	0,97	1,25
7	0,94	1,02	0,91	1,18
8	1,00	0,90	1,00	1,47
9	0,97	0,90	0,99	1,05
10	0,95	1,00	1,01	1,43
11	0,93	0,96	0,96	1,11
12	1,02	0,96	1,12	1,17
13	0,88	1,00	0,90	1,19
14	0,92	0,88	1,00	1,08
15	0,93	0,89	1,13	1,48
Media	0,93	0,93	1,00	1,28
Mediana	0,94	0,94	0,99	1,25
Dev. St.	0,05	0,06	0,08	0,16