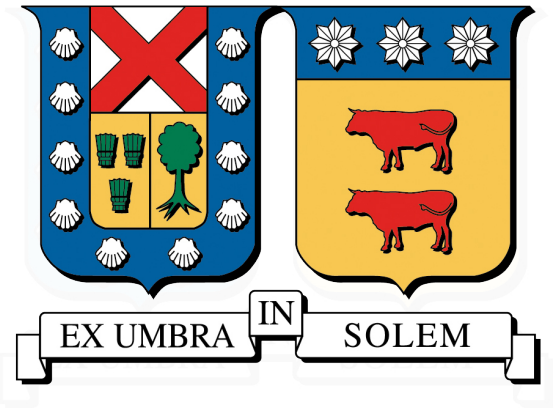
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



SIMULACIÓN DE ENSAYES TRIAXIALES A TRAVÉS DE MODELACIÓN CON ELEMENTOS DISCRETOS

PABLO FELIPE RAMOS SCHIAFFINO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA	:	SR. GABRIEL PALMA P.
PROFESOR CORREFERENTE	:	SR. CARLOS WAHR D.

DICIEMBRE 2016

Agradecimientos

En primer lugar quería agradecer a mi familia Pablo, Victoria, Javiera y Olga, por siempre confiar en mí y entregarme todas la condiciones para formarme, sin ustedes no podria haber hecho nada de esto.

También quisiera agradecer a las persona que me han asistido en el trabajo:
A Don CARLOS WAHR: por haber confiado en mi y por su apoyo en este desafío.
A Don GABRIEL PALMA: por su paciencia y buena voluntad.
A MATIAS SILVA: por su afabilidad y disposición a ayudar.

También quisiera agradecer a todas las personas que me acompañaron en este camino:

A mis 3 amigos que me acompañaron en cada grupo de trabajo Christian, Gonzalo y Victor. Yo sé que estas amistades añejadas en estudio con el tiempo solo se pueden fortalecer.

A T.BANA Danilo, Francisco, Roberto, Sebastian, Henrique y Sergio. Por las incontables tertulias en café y miel.

A mis amigos Carlos, Paulo, Eduardo, Carolina, Constanza, Javiera y Roberta. Que me dejaron un pedacito de su corazon en el camino.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio se enmarca en un proyecto del Laboratorio Nacional de Vialidad para encontrar formas alternativas para la estimación de la densidad máxima del suelo. Una de las alternativas que se está barajando es la utilización del método de elementos discretos para estos fines, pero, al ser un método nuevo y de alta complejidad, el estudio será una primera aproximación a la modelación de ensayos triaxiales con elementos discretos, utilizando la capacidad computacional limitada a un computador de escritorio. Para el estudio, se utilizó Yade como el software de elementos discretos, la ley de interacción de la las partículas es Newton y la cantidad de elementos por simulación va desde 2000 hasta los 75000 elementos. En estas simulaciones se estudia la relevancia de los distintos parámetros como ángulo de fricción, forma de partículas, la generación de elementos, entre otros. En una segunda etapa, se modela ensayes triaxiales de tres distintos materiales: rodamientos de acero, micro esferas de vidrio y arena monotamaño. Los materiales antes mencionados van aumentando en irregularidad y en complejidad del mecanismo de interacción. Estas simulaciones serán comparadas con valores reales obtenidos de ensayes triaxiales, pudiéndose detectar cuando el modelo se ajusta, qué puntos fuertes y débiles tiene, qué suposiciones son aceptables y qué mejoras serían necesarias incorporar para lograr mejores resultados.

Palabras Clave. DEM, Ensayes Triaxiales.

ABSTRACT

This study is part of a project from the Laboratorio Nacional de Vialidad aiming to find alternative ways to estimate the maximum density of a soil. One of the alternatives being considered for this purpose is the use of a method called Discrete Elements, which is fairly new and complex. This study aims to be a first approach into the modelling of triaxial test using discrete elements, with the limited capacity of a personal desktop computer. For this study, Yade was used as a Dicrete Element Software and the Newton law of interaction of particles was used. The number of elements goes from 2000 up to 7500 per simulation. In this simulations, a study of the impact and relevance of the different parameters is performed, such as friction angle, particle shape, element generation, among others. In a second stage, three different materials are modeled simulating a triaxial test: steel bearing balls, glass micro spheres, and monosized sand particles. The irregularity and complexity of the interaction mechanism increases with each material in that order. This simulations are to be compared with values obtained from actual triaxial tests, identifying when the model is in line with the real life test, what are the strong and weak points of the model, and what assumptions are acceptable and the improvements necessary in order to achieve better results.

Keywords. Triaxial test, DEM.

Índice de Contenidos

1. Introdución **1**
1.1. Antecedentes Generales . . . 1
1.2. Objetivos del Estudio . . . 2
1.3. Alcances del Estudio . . . 2
1.4. Estructura del Estudio . . . 3

2. DEM **4**
2.1. Historia . . . 4
2.2. Yade . . . 6
2.2.1. Funcionamiento de Yade . . . 6
2.2.1.1. Detección de Colisiones . . . 7
2.2.1.2. Creación de la Interacción de las Partículas . . . 8
2.2.1.3. Integrales de Movimiento . . . 10
2.2.1.4. Estabilidad Numérica, Tiempo críticos . . . 11

3. Fase Experimental **13**
3.1. Ensayos Triaxiales . . . 13
3.1.1. Parámetros de interés para ensaye triaxial . . . 15
3.1.1.1. Tamaño de la muestra . . . 15
3.1.1.2. Presión de Confinamiento . . . 15
3.1.1.3. Carga Axial . . . 15
3.1.1.4. Presión de poros . . . 16
3.1.1.5. Consideración de los Cambios de Volumen . . . 16
3.1.2. Equipos Utilizados . . . 16
3.1.2.1. Panel Controlador de Presiones . . . 16
3.1.2.2. Panel Controlador de Presiones . . . 17
3.1.2.3. Cámara Triaxial . . . 18
3.1.2.4. Anillo de Carga . . . 19
3.1.2.5. Deformímetro . . . 20
3.2. Representación . . . 21
3.2.1. Criterio de Falla de Coulomb . . . 21
3.2.2. Círculos de Mohr-Coulomb de Estado Último . . . 23
3.2.3. Diagrama de Trayectorias de Esfuerzos . . . 26
3.3. Descripción de Materiales Utilizados . . . 29
3.3.1. Rodamientos de Acero . . . 31

3.3.2. Micro Esferas de Vidrio . . . 32
3.3.3. Granito Meteorizado . . . 33
3.4. Resultados de Ensayes Triaxiales . . . 33
3.4.1. Correcciones . . . 34
3.4.2. Rodamientos de Acero . . . 34
3.4.3. Micro Esferas de Vidrio . . . 37
3.4.4. Granito Meteorizado . . . 40

4. Modelo Computacional **44**
4.1. Modelo . . . 44
4.1.1. Esferas . . . 44
4.1.2. Paredes . . . 45
4.2. Simplificaciones adoptadas . . . 46
4.2.1. Módulo de elasticidad de las partículas . . . 46
4.2.2. Tamaño y Geometría de la Simulación . . . 47
4.2.3. Geometría de las Partículas . . . 49
4.3. Descripción del Código . . . 51
4.3.1. Ingreso de datos . . . 51
4.3.2. Generación de elementos . . . 52
4.3.2.1. Esferas . . . 52
4.3.2.2. Paredes . . . 53
4.3.3. Confinamiento Inicial . . . 53
4.3.4. Método de la bisección . . . 54
4.3.5. Esfuerzo Desviador . . . 54
4.4. Sensibilización . . . 55
4.4.1. Sensibilización Utilizando Esferas . . . 55
4.4.1.1. Influencia del Ángulo de Fricción en Fase de Fabricación 55
4.4.1.2. Influencia del Ángulo de fricción en ensaye . . . 58
4.4.1.3. Influencia del Confinamiento . . . 61
4.4.1.4. Influencia del Numero de Partículas . . . 63
4.4.1.5. Influencia del Coeficiente de Poisson . . . 66

5. Comparación de Simulaciones con Resultados Experimentales **68**
5.1. Simulación Rodamientos de Acero . . . 74
5.2. Simulación con Microesferas de Vidrio . . . 79
5.3. Simulaciones Granito Meteorizado . . . 83
5.3.1. Clumps Diédricos . . . 84
5.3.2. Clumps Tetraédricos . . . 88
5.3.3. Clumps Octaédricos . . . 91

6. Conclusiones **97**

Bibliografía **100**

A. Simulaciones con Rodamientos **102**
A.1. Simulaciones con Rodamientos a 2[psi] de confinamiento 102
A.2. Simulaciones de Rodamientos con 4[psi] de confinamiento 103
A.3. Simulaciones de Rodamientos con 10[psi] de confinamiento 103

B. Simulaciones Microesferas de Vidrio **114**
B.1. Simulaciones con Microesferas de Vidrio 114
B.1.1. Simulaciones con Microesferas de Vidrio 5[psi] 114
B.1.2. Simulaciones con Microesferas de Vidrio 10[psi] 120
B.1.3. Simulaciones con Microesferas de Vidrio 20[psi] 125

C. Simulaciones de Granito Meteorizado con Clumps **131**
C.1. Simulaciones con Clumps Diédricos 132
C.1.1. Simulaciones con Clumps Diédricos 5[psi] 132
C.1.2. Simulaciones con Clumps Diédricos 10[psi] 135
C.1.3. Simulaciones con Clumps Diédricos 20[psi] 139
C.2. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 142
C.2.1. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 5[psi] 142
C.2.2. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 10[psi] 146
C.2.3. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 20[psi] 149
C.3. Simulaciones con Clumps Octaédricos 153
C.3.1. Simulaciones con Clumps Octaédricos 5[psi] 153
C.3.2. Simulaciones con Clumps Octaédricos 10[psi] 156
C.3.3. Simulaciones con Clumps Octaédricos 20[psi] 160

D. Recursos Computacionales **164**
D.1. Computador 164
D.2. Software 164

Índice de Figuras

2.1. Disco de material foto elástico sometido a carga axial, Paikowsky y Tien (2002) . . . 5
2.2. Estudio de esfuerzos en cavidades, Paikowsky y Tien (2002) . . . 5
2.3. Esquema de cajas para detectar posibles interacciones, Šmilauer et al. (2015) 7
2.4. Esquema de calculo de la rigidez normal a la interacción, Šmilauer et al. (2015) . . . 8

3.1. Esquema cámara triaxial, Lambe y Whitman (1972) . . . 14
3.2. Prensa Triaxial, Laboratorio Nacional de Vialidad . . . 17
3.3. Panel Triaxial, Laboratorio Nacional de Vialidad . . . 18
3.4. Cámaras Triaxiales, diámentro $\phi = 200[mm]$ . . . 19
3.5. Anillo de Carga . . . 20
3.6. Deformímetro . . . 21
3.7. Representación gráfica de los círculos de Mohr con criterios de falla de Coulomb para suelo granular. . . . 22
3.8. Notación parámetros círculo de Mohr . . . 24
3.9. Elemento de suelo sometido a esfuerzos principales . . . 24
3.10. Esquema parámetros pq . . . 26
3.11. Representación estados es esfuerzos s-t . . . 29
3.12. Foto de rodamientos de acero utilizados en los ensayes triaxiales . . . 31
3.13. Foto de microesferas de vidrio utilizadas en los ensayes triaxiales . . . 32
3.14. Foto de granito meteorizado utilizado en los ensayes triaxiales . . . 33
3.15. Registro directo, rodamientos de acero . . . 35
3.16. Registro corregido, rodamientos de acero . . . 35
3.17. Registro unitario, rodamientos de acero . . . 36
3.18. Círculos de Mohr, rodamientos de acero . . . 36
3.19. Diagrama s-t, rodamientos de acero . . . 37
3.20. Registro directo, micro esferas de vidrio . . . 38
3.21. Registro corregido, micro esferas de vidrio . . . 38
3.22. Registro unitario, micro esferas de vidrio . . . 39
3.23. Círculos de Mohr, micro esferas de vidrio . . . 39
3.24. Diagrama s-t, micro esferas de vidrio . . . 40
3.25. Registro directo, granito meteorizado . . . 41
3.26. Registro corregido, granito meteorizado . . . 41
3.27. Registro unitario, granito meteorizado . . . 42

3.28. Círculos de Mohr, granito meteorizado 43
3.29. Diagrama s-t, granito meteorizado 43

4.1. Fotografía obtenida con microscopio electrónico de barrido, para un suelo que pasa la malla $n°$ 40, Romero-Cervantes y Pérez-Rea (2016) 45
4.2. Malla cilíndrica, para elementos finitos 48
4.3. Prisma con múltiples paredes 48
4.4. Paralelepípedo con 6 muros 48
4.5. Esquema comparativo entre la situación real y la simulada 49
4.6. Esquema de formas de granos 49
4.7. Clump diédrico 50
4.8. Clump tetraédrico 50
4.9. Clump Octaédrico 50
4.10. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 20° 56
4.11. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 30° 56
4.12. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 50° 57
4.13. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 20° . 57
4.14. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 30° . 58
4.15. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 50° . 58
4.16. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 10° 59
4.17. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 30° 59
4.18. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 50° 60
4.19. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante la fabricación 10° 60
4.20. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante la fabricación 30° 61
4.21. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación 62
4.22. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación 62
4.23. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación 63
4.24. Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación 63
4.25. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación 64
4.26. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación 64
4.27. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación 65

4.28. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación 65
4.29. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación 66
4.30. Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación 66

5.1. Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 2[psi], con buen ajuste 74
5.2. Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 4[psi], con buen ajuste 75
5.3. Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 10[psi], con buen ajuste 75
5.4. Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de 2[psi] 77
5.5. Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de 4[psi] 78
5.6. Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de 10[psi] 78
5.7. Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 5[psi], con buen ajuste 80
5.8. Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 10[psi], con buen ajuste 80
5.9. Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 20[psi], con buen ajuste 81
5.10. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 5[psi] 81
5.11. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 10[psi] 82
5.12. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 20[psi] 82
5.13. Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 5[psi], Curvas de mejor ajuste 85
5.14. Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 10[psi], Curvas de mejor ajuste 85
5.15. Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 20[psi], Curvas de mejor ajuste 86
5.16. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 5[psi] 86
5.17. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 10[psi] 87
5.18. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 20[psi] 87
5.19. Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 5[psi], Curvas de mejor ajuste 88
5.20. Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 10[psi], Curvas de mejor ajuste 89
5.21. Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 20[psi], Curvas de mejor ajuste 89

5.22. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tretaédricos, confinamiento de 5[*psi*] 90
5.23. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tetraédricos, confinamiento de 10[*psi*] 90
5.24. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tetraédricos, confinamiento de 20[*psi*] 91
5.25. Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 5[*psi*], Curvas de mejor ajuste 92
5.26. Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 10[*psi*], Curvas de mejor ajuste 92
5.27. Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 20[*psi*], Curvas de mejor ajuste 93
5.28. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 5[*psi*] 93
5.29. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 10[*psi*] 94
5.30. Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 20[*psi*] 94

A.1. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 25° ensaye 102
A.2. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 103
A.3. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 104
A.21. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye 104
A.4. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 105
A.22. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 105
A.5. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 106
A.6. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 106
A.7. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye 107
A.8. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 107
A.9. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 108
A.10. Registro directo, rodamientos de acero 108
A.11. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 108

A.12. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye . . . 109
A.13. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye . . . 109
A.14. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye . . . 110
A.15. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye . . . 110
A.16. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye . . . 111
A.17. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye . . . 111
A.18. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye . . . 112
A.19. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye . . . 112
A.20. Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye . . . 113

B.1. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye . . . 114
B.2. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 33° ensaye . . . 115
B.3. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye . . . 115
B.4. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye . . . 116
B.5. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye . . . 116
B.6. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye . . . 117
B.7. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye . . . 117
B.8. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye . . . 118
B.9. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye . . . 118
B.10. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 57° ensaye . . . 119
B.11. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye . . . 119
B.12. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye . . . 120
B.13. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 33° ensaye . . . 120

B.14. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye 121
B.15. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye 121
B.16. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye 122
B.17. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 122
B.18. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye 123
B.19. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye 123
B.20. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye 124
B.21. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 57° ensaye 124
B.22. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 125
B.23. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 125
B.24. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 33° ensaye 126
B.25. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye 126
B.26. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye 127
B.27. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye 127
B.28. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 128
B.29. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye 128
B.30. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye 129
B.31. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye 129
B.32. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 57° ensaye 130
B.33. Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 130

C.1. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 132
C.2. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 132

C.3. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 133
C.4. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 133
C.5. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 134
C.6. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 134
C.7. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 135
C.8. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 135
C.9. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 136
C.10. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 136
C.11. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 137
C.12. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 137
C.13. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 138
C.14. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 138
C.15. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 139
C.16. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 139
C.17. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 140
C.18. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 140
C.19. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 141
C.20. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 141
C.21. Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 142
C.22. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 142
C.23. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 143
C.24. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 143

C.25. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 144
C.26. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 144
C.27. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 145
C.28. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 145
C.29. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 146
C.30. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 146
C.31. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 147
C.32. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 147
C.33. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 148
C.34. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 148
C.35. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 149
C.36. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 149
C.37. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 150
C.38. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 150
C.39. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 151
C.40. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 151
C.41. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 152
C.42. Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 152
C.43. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 153
C.44. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 153
C.45. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 154
C.46. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 154

C.47. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 155
C.48. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 155
C.49. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 156
C.50. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 156
C.51. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 157
C.52. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 157
C.53. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 158
C.54. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 158
C.55. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 159
C.56. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 159
C.57. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye 160
C.58. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye 160
C.59. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye 161
C.60. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye 161
C.61. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye 162
C.62. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye 162
C.63. Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye 163

1 | Introdución

1.1. Antecedentes Generales

Esta investigación se enmarca en un proyecto del Laboratorio Nacional de Vialidad para la estimación de la densidad máxima de suelo con métodos alternativos. En la actualidad el ensayo Proctor modificado no se puede considerar como un método adecuado para la obtención de densidad máxima de materiales granulares gruesos. Esto se debe a que los valores de densidad obtenidos del Proctor Modificado son menores a las que se pueden lograr con equipos modernos y para materiales granulares con baja concentración de finos, que son comúnmente utilizados en la estructuras de pavimentos como base o sub-base.

Debido al interés permanente del Laboratorio Nacional de Vialidad por incorporar mejoras a los métodos de diseño y calculo de pavimentos se están barajando distintas opciones para encontrar la densidad máxima del suelo. Una de ellas es la utilización de Elementos Discretos para modelar el comportamiento del suelo. Esta técnica consiste en la simulación computacional de las interacciones entre granos de suelo. Este tipo de modelación es bastante nueva y altamente demandante en recursos computacionales.

En los últimos 30 años se ha generado un aumento importante de la disponibilidad y capacidad de cómputo. Esto lleva a proyectar que existirá factibilidad de utilizar modelos cada vez mas refinados y demandantes de recursos computacionales. Es bajo esta premisa que el Laboratorio Nacional de Vialidad desea adquirir el dominio de esta técnica para incorporar sistemas como estos para la predicción de comportamiento del suelo.

Este estudio es de carácter exploratorio, para detectar el potencial, fortalezas, debilidades y necesidades de recursos en la utilización de DEM para modelar los suelos.

1.2. Objetivos del Estudio

- Realización de ensayes triaxiales (drenados) de materiales monotamaño para utilizarlos como punto de comparación con las simulaciones DEM.

- Generar modelos de ensayes triaxiales utilizando DEM, con elementos esféricos monotamaño y estructuras complejas denominadas clumps.

- Analizar modelos triaxiales DEM y estudiar la sensibilidad del modelo a los parámetros más relevantes.

- Comparar los resultados experimentales con las simulaciones DEM.

1.3. Alcances del Estudio

En este estudio se pretende verificar si las modelaciones DEM, utilizando computadores de escritorio, son capaces de acercarse de manera razonable al comportamiento del suelo cuando es sometido a cargas, detectando parámetros relevantes en las simulaciones, determinado cómo influyen en el comportamiento del modelo y la sensibilidad que estos presentan. Debido a lo limitado de la capacidad computacional, se deberán realizar simplificaciones del problema real, concluyendo que tan plausibles son y cuales son las limitantes de estas.

1.4. Estructura del Estudio

Capítulo 1: Introducción, antecedentes generales y alcance del estudio.

Capítulo 2: Historia de la Modelación de Elementos Discretos DEM, sus antecedentes, los principios básicos que la rigen. También se expone acerca de Yade, que es el software DEM utilizado en las modelaciones.

Capítulo 3: Descripción de parámetros utilizados en la realización de los ensayos triaxiales, materiales y sus propiedades. También se presentan los resultado experimentales obtenidos y la correcciones utilizadas.

Capítulo 4: Descripción del modelo computacional utilizado, las simplificaciones adoptadas y variación de parámetros principales para determinar el impacto te tienen estos sobre el modelo.

Capítulo 5: Comparación entre los ensayos experimentales y las simulaciones, detectando similitudes y diferencia en el comportamiento.

Capítulo 6: Conclusiones obtenidas del estudio.

Anexo A: Barrido de simulaciones con rodamientos de Acero.

Anexo B: Barrido de simulaciones con micro esferas de vidrio.

Anexo C: Barrido de simulaciones con granito meteorizado usando configuraciones diédricas, tetraédricas y octaédricas.

2 | DEM

El Métodos de Elementos Discretos (Different Elements Method) es una modelo numérico desarrollado por Cundall y Strack (1979) capaz de describir el comportamiento mecánico de conjuntos de esferas. El método se basa en la utilización de un programa numérico que monitorea el contacto entre partículas y el movimiento de éstas. El movimiento de las partículas esta controlado por una serie de leyes de movimiento e interacción que se explicarán más adelante.

2.1. Historia

Los inicios de DEM se remontan a los estudios realizados por De Josselin de Jong y Verruijt (1969) para determinar las magnitud y dirección de las fuerzas de contacto entre granos utilizando materiales fotoelásticos. Los materiales fotoelasticos al estar sometidos a fuerzas, se deforman y cambian los patrones lumínicos que generan cuando la luz polarizada pasa por ellos, pudiéndose determinara el estado tensional del material. En la figura 2.1 se muestra un disco de material fotoelastico sometida a carga axial, en esta foto se puede apreciar como se generan patrones lumínicos los cuales son un representación de las deformaciones internas del material. En la figura 2.2 se muestra un experimento realizado por Paikowsky y Tien (2002), que sirve de ejemplo de la manera de enfrentar estudios con materiales fotoelasticos, en este estudio se analizan los tensores de discos cuando son sometidos a distintas condiciones de borde.

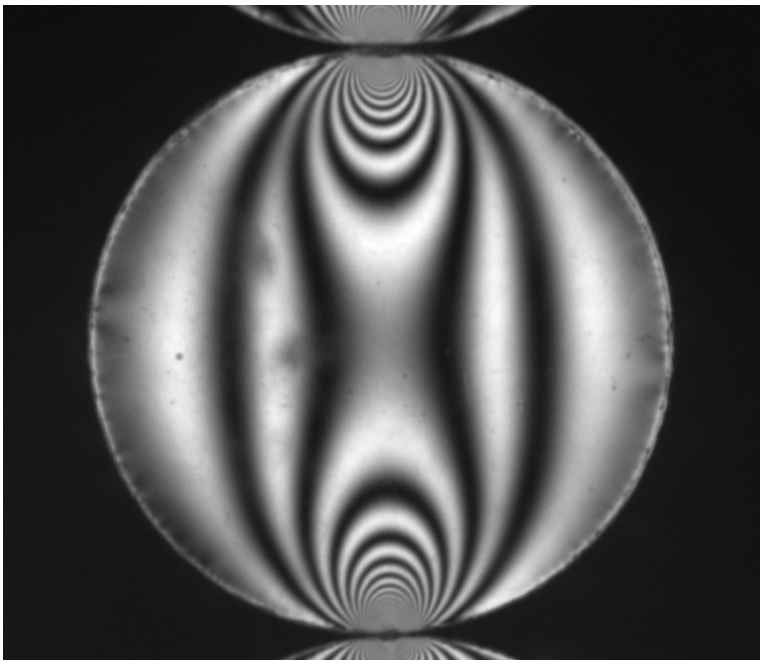


Figura 2.1: Disco de material foto elástico sometido a carga axial, Paikowsky y Tien (2002)

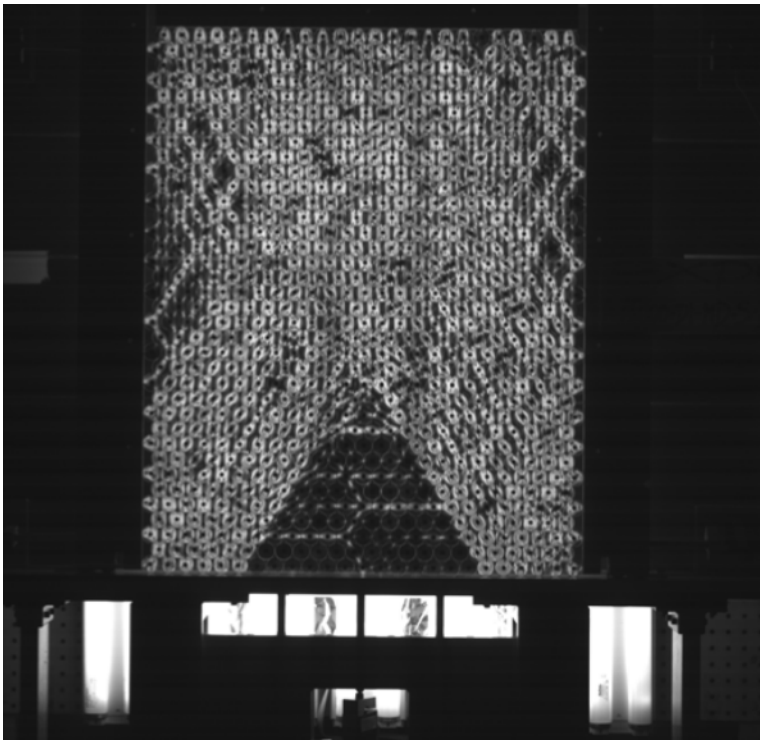


Figura 2.2: Estudio de esfuerzos en cavidades, Paikowsky y Tien (2002)

Cundall y Strack (1979) presentan Ball, Este es primer modelo DEM, pretendía representar el comportamiento de los materiales granulares desde la interacción de grano

con grano. Esta era una tarea nada de sencilla, debido que es necesario tener disponible una gran capacidad de calculo y almacenamiento, para rastrear cinemáticamente, detectar interacciones y determinar el nuevo estado de cada una de las partículas. Se debe considerar que los materiales granulares pueden tener un gran numero de elementos, en la actualidad es difícil poder enfrentar este tipo de problemas debido a la limitada capacidad computacionales disponibles. Para la validación de este modelo se utilizaron los resultados de los experimento realizados por De Josselin de Jong y Verruijt (1969) que ya fueron descritos anteriormente. Uno de los problemas que presenta este modelo son los altos tiempo de simulación, para poder solucionar en parte este problema se agregó artificialmente un amortiguamiento que fuerza el sistema a la convergencia.

2.2. Yade

Yade es un programa libre, de código abierto de elementos discretos. Se inició el desarrollo de este programas en 2004 con el estudiante de doctorado Olivier Galizzi. Al poco tiempo Olivier Galizzi tuvo que abandonar el proyecto el cual fue retomado por Janek Kozicki. Este programa ha sido utilizado por Bruno Chareyre, Wenjie Shiu entre otros en investigaciones relacionadas con la modelación con elementos discretos.

2.2.1. Funcionamiento de Yade

Yade está escrito en C y organizado en módulos que se invocan mediante script que se desarrolla en Python. Este programa cuenta con una serie de etapas secuenciales:

- La primera es detectar la colisión entre partículas.
- La segunda es crear las nuevas interacciones y determinar las propiedades de las partículas que están interactuando, como por ejemplo la nueva matriz de rigidez.
- La tercera etapa consiste en evaluar la deformación, el esfuerzo de cada partícula y por último la aplicación de las fuerzas de las interacciones a las partículas.

A continuación, se explicarán más detalladamente las etapas más importantes del proceso.

2.2.1.1. Detección de Colisiones

La detección de colisiones de forma exacta es relativamente costosa en términos computacionales. Es por esta razón que el proceso de detección de colisiones se divide en 2 etapas. La primera detecta las potenciales interacciones, esto se realiza encerrando cada partícula en una caja y se revisa si existe superposición de espacio entre cajas, así se reduce a un grupo de posibles casos de interacción. Un esquema de la detección de las posibles interacciones se presentan en la figura 2.3. La segunda etapa, consiste en tomar estas posibles interacciones determinadas en la etapa anterior y revisarlas con un método exacto el cual es más costoso. Este consiste en la superposición tridimensional de los radios determinado si existe contacto entre los elementos. Si existe superposición, se calcula la deformación relativa entre los cuerpos, esto permitirá más adelante determinar la fuerza de repulsión elástica determinada por la ley de Hooke.

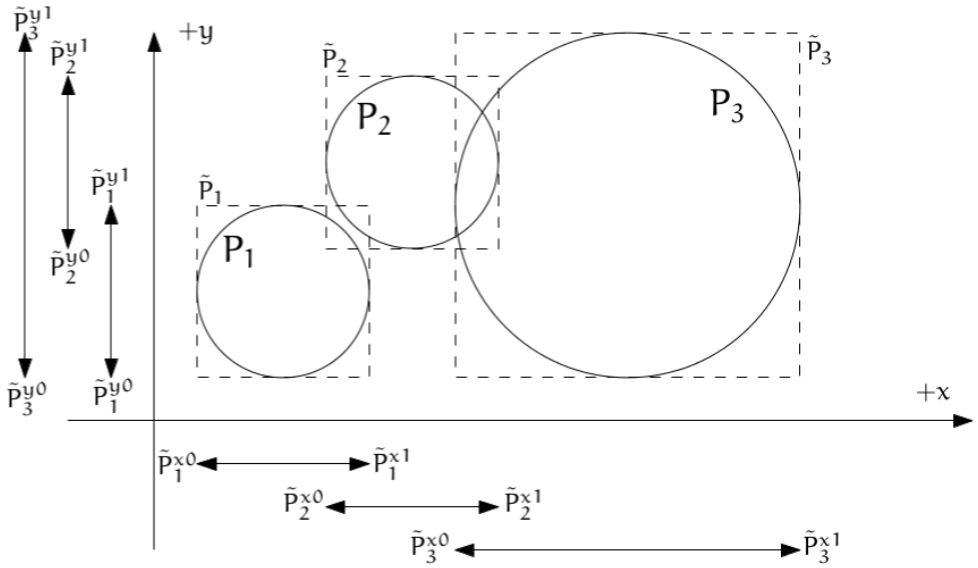


Figura 2.3: Esquema de cajas para detectar posibles interacciones, Šmilauer et al. (2015)

2.2.1.2. Creación de la Interacción de las Partículas

De la detección de las colisiones exactas, se procede a asignar propiedades a éstas, considerando el tipo de partícula que interactúan y los materiales que poseen. Con estos datos se calcula la rigidez normal y la rigidez tangencial que está en razón de la rigidez normal.

Para el calculo de la rigidez normal se utiliza la ley de Hooke, donde la rigidez de la interacción es la rigidez equivalente de dos resortes en serie, donde el largo de los resortes es igual al radio de las esfera como se puede ver en el esquema de la figura 2.4 y la ecuación 2.1.La rigidez que aportada cada elemento es proporcional al modulo de elasticidad y al tamaño del cuerpo, para este estudio se considerara dos veces el radio como se indica en las formulas 2.3.Con la rigidez de cada elemento se obtiene la rigidez equivalente en serie como se muestra en la ecuación 2.4.Con esta última se puede obtener la fuerza de la interacción con la ecuación 2.5.

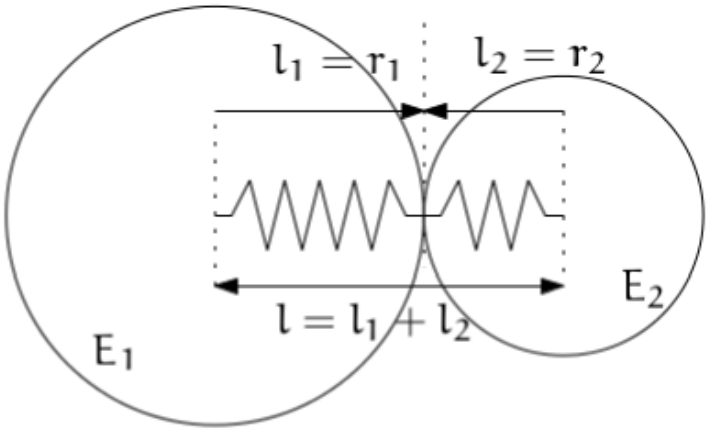


Figura 2.4: Esquema de calculo de la rigidez normal a la interacción, Šmilauer et al. (2015)

$$l_{eq} = l_1 + l_2 = r_1 + r_2 \tag{2.1}$$

l_{eq} Largo resorte equivalente

l_1 Largo resorte esfera 1

l_2 Largo resorte esfera 2

r_1 Radio esfera 1

r_2 Radio esfera 2

$$k_i = E_i l_i \tag{2.2}$$

$$l_i = 2r_i \tag{2.3}$$

k_i rigidez del iésimo elemento

E_i módulo de elasticidad del iésimo elemento

l_i largo del iésimo elemento

r_i radio del iésimo elemento

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} = \frac{E_1 l_1 E_2 l_2}{E_1 l_1 + E_2 l_2} \tag{2.4}$$

k_{eq} rigidez equivalente

k_1 rigidez del elemento 1

k_2 rigidez del elemento 2

E_1 módulo de elasticidad elemento 1

E_2 módulo de elasticidad elemento 2

l_1 largo del elemento 1

l_2 largo del elemento 2

$$F = F_1 = F_2 = k_{eq}\Delta l \tag{2.5}$$

F	fuerza
F_1	fuerza del elemento 1
F_2	fuerza del elemento 2
k_{eq}	rigidez equivalente
Δl	deformación

2.2.1.3. Integrales de Movimiento

Con la información de las interacciones, rigidez del sistema y fuerzas actuantes sobre cada partícula, se calcula la nueva posición de cada elemento en un tiempo $t + \Delta t$, para esto se utilizan la ecuaciones de Newton de forma numérica con diferencias finitas de segundo orden. La ecuaciones utilizadas en el método de diferencias finitas de segundo orden se presentan en 2.6 y 2.7 . Se debe utilizar un delta tiempo suficientemente pequeño, para que se produzcan pequeños cambios y que las nuevas interacciones se produzcan de forma gradual. Es clave utilizar un delta tiempo inteligente, suficientemente pequeño para lograr que el método converja, pero que no retrase de forma excesiva los tiempos de simulación. En el siguiente apartado se expondrán la determinación del Δt apropiado en mayor profundidad.

$$\ddot{U}_t = \frac{F}{m} \tag{2.6}$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \Delta t\left(\frac{U_t - U_{t-\Delta t}}{\Delta t} + \ddot{U}_t \Delta t\right) \tag{2.7}$$

F	fueza
m	masa
$\ddot{U}_t$	aceleración tiempo t
$U_{t+\Delta t}$	posición tiempo t más delta t
U_t	posición tiempo t
$U_{t-\Delta t}$	posición tiempo t menos delta t
Δt	paso de tiempo

2.2.1.4. Estabilidad Numérica, Tiempo críticos

Para asegurar la convergencia numérico, se aplican dos criterios el primero relacionado con la frecuencia natural de masas unidas por resortes y el segundo relacionado con la velocidad de propagación de una onda por un cuerpo. De estos dos criterios se derivan la formulación 2.8 y 2.9 las cuales están detalladas en Šmilauer y Chareyre (2010).

De las ecuaciones 2.8 y 2.9 se puede apreciar que a medida que aumentamos la rigidez de los cuerpos existe una disminución importante en el paso de tiempo necesario para que el modelo no diverja. Este factor fue limitante a momento de simular y obligó a disminuir de forma artificial el modulo de elasticidad de las partículas para lograr tiempos razonables de calculo.

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{w_{max}} = 2\sqrt{\frac{m}{K}} \tag{2.8}$$

$$\Delta t_{cr} = l_{min}\sqrt{\frac{\rho}{E}} \tag{2.9}$$

Δt_{cr}	paso de tiempo crítico
w_{max}	frecuencia máxima angular
m	masa
K	rigidez
l_{min}	largo mínimo (radio)
ρ	densidad
E	modulo de elasticidad

3 | Fase Experimental

3.1. Ensayos Triaxiales

Se seleccionó el comportamiento triaxial de un suelo para poner a prueba la tecnica de simulación con Elementos Discretos.

La mayoría de las obras civiles están conectadas de alguna forma con el suelo, por lo tanto para el proceso de diseño es importante poder evaluar la capacidad de soporte de este bajo diversas condiciones de cargas. Una de las dificultades que presenta el estudio de suelos es determinar las tensiones que se presenta, debido a estas no solo dependen de la magnitud de la solicitación sino que también de como se distribuye. Es por esta razón en este estudio se decidió utilizar los conceptos de esfuerzo y deformación que describen el estado tensional del suelo y permite desprenderse de la configuración de las cargas.

Para determina la relación entre esfuerzos y deformaciones que presenta un suelo se utiliza el ensaye triaxial, ésta es una prueba de laboratorio en la cual se simula las condiciones de carga y se determina su respuesta. El la figura 3.1 se presenta un esquema de la cámara triaxial, el equipo donde se realiza el ensaye. Posteriormente se explicará con más detalle las partes y los parámetros controlados. También esta prueba permite obtener correlaciones para poder estimar la resistencia del material bajo distintas condiciones de carga. En la actualidad es considerada como la prueba más común y versátil para obtener la relación esfuerzo-deformación del suelo.

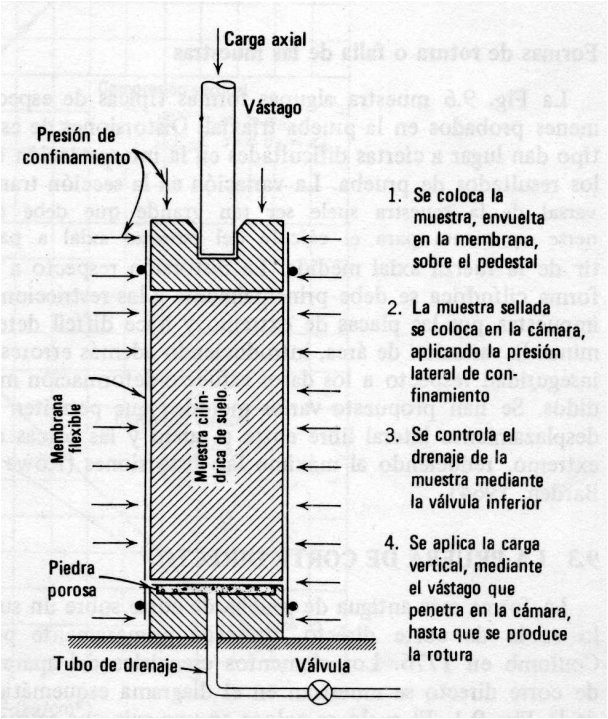


Figura 3.1: Esquema cámara triaxial, Lambe y Whitman (1972)

La prueba triaxial consiste en someter una probeta cilíndrica de suelo envuelta en una membrana impermeable, a presión de confinamiento σ_c en todas sus caras y a continuación a un aumento del esfuerzo axial $\Delta\sigma_a$ hasta alcanzar la ruptura de la muestra de suelo. Como no existen esfuerzos tangenciales en la cara de la muestra, el esfuerzo axial $\sigma_c + \Delta\sigma_a$ y la presión de confinamiento σ_c son los esfuerzos principales mayor y menor σ_1 y σ_3 respectivamente. Un parámetro que es usualmente utilizado en este ensaye es el esfuerzo desviador σ_d el cual se define como la diferencia entre los esfuerzos principales.

$$\sigma_d = \Delta\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{3.1}$$

σ_d esfuerzo desviador

$\Delta\sigma_a$ aumento del esfuerzo axial

σ_1 esfuerzo principal mayor

σ_3 esfuerzo principal menor

3.1.1. Parámetros de interés para ensaye triaxial

A continuación se presentan los criterios y la elección de parámetros para la realización de los ensayes triaxiales.

3.1.1.1. Tamaño de la muestra

El tamaño de la probeta utilizada para las pruebas de este trabajo es de 35[mm] de diámetro y 70[mm] de alto. Se decidió utilizar este tamaño debido a dos factores. El primero es la utilización del menor número de partículas de suelo para disminuir los costos computacionales de las simulaciones. El segundo factor es que las muestras de suelo poseían partículas o granos de tamaño pequeño donde el diámetro de las partículas es menor a $\frac{1}{7}$ del diámetro de la probeta. Este criterio es convencionalmente utilizado para asegurar que los resultados del ensayo triaxial no estén influenciados por las propiedades microscópicas del material, logrando obtener resultados que son representativos del comportamiento global del suelo.

3.1.1.2. Presión de Confinamiento

Cada muestra de suelo se probó con tres presiones de confinamiento diferentes . Por lo general se utilizó 5[psi], 10[psi] y 20[psi]. Uno de los criterios utilizados para determinar la presión del ensaye, es evitar el rompimiento de la membrana impermeable. Otro criterio, que esté dentro del rango de trabajo del equipo que es desde 0[psi] hasta 100[psi].

3.1.1.3. Carga Axial

La carga axial es la que provoca el esfuerzo de corte dentro de la probeta de suelo. Es generado por el movimiento a velocidad constante del vástago de carga. En el caso particular de estos ensayes el movimientos del vástago esta controlado por un motor eléctrico. Más detalles de los dispositivos utilizados se entregarán en el apartado de equipos.

3.1.1.4. Presión de poros

A medida que transcurre el ensaye el volumen de la probeta varía generándose un cambio en la presión de poros del suelo. Es por esta razón que se disponen de un sistema de drenaje, formado por una piedra porosa más un conducto unido al exterior de la cámara y conectable a un sistema de control de presión de poros, a la atmósfera o a una válvula cerrada para imponer distintos modos de ensaye. Todos los ensayos fueron realizados se hicieron con materiales secos.

3.1.1.5. Consideración de los Cambios de Volumen

Debido al desplazamiento del vástago se generan grandes deformaciones en la probeta, las cuales se deben considerar para el cálculo de los esfuerzos. Poder medir la variación del diámetro de la probeta a medida que transcurre el ensaye es bastante complicado. Es por esta razón que se utiliza una formulación que permite corregir el esfuerzo obtenido considerando la deformación. A continuación se presenta la expresión utilizada.

$$\sigma_{corr} = \sigma(1 - \varepsilon) \tag{3.2}$$

σ_{corr} esfuerzo desviador corregido

σ esfuerzo sin corregir

ε deformación vertical de la muestra

3.1.2. Equipos Utilizados

Para la realización de los ensayos se contó con los siguientes equipos de propiedad del Laboratorio Nacional de Vialidad:

3.1.2.1. Panel Controlador de Presiones

Consiste en una marco de dos columnas con una viga transversal, ésta es móvil y es la que impone el movimiento del vástago en la cámara. El movimiento de la viga es generado

por una motor eléctrico el cual, por medio de una caja de engranajes, fija la velocidad de desplazamiento. Este equipo es el encargado de generar el esfuerzo desviador. En la figura 3.2 se presentan el equipo utilizado.



Figura 3.2: Prensa Triaxial, Laboratorio Nacional de Vialidad

3.1.2.2. Panel Controlador de Presiones

Consiste en una serie de sensores, válvulas, reguladores y buretas que permiten regular y mantener la presión constante dentro de la cámara y en los poros de la muestra de suelo. Este equipo se encarga de la presión de confinamiento. En la figuras 3.3 se puede apreciar el equipo utilizado en los ensayes.



Figura 3.3: Panel Triaxial, Laboratorio Nacional de Vialidad

3.1.2.3. Cámara Triaxial

Consiste en una estructura rígida de acrílico con insertos metálicos la cuál envuelve la muestra permitiendo generar condiciones de confinamiento diversas a las ambientales. En la parte superior se encuentra el vástago que transmite la deformación impuesta por la viga de carga en la parte exterior de la cámara al interior, generando esfuerzos en la muestra de suelo. En la parte inferior de la cámara posee insertos metálicos con conductos que permiten conectar la presión de la zona interior con la zona exterior o viceversa. Estos conductos están conectados a través de válvulas y mangueras al panel triaxial. En la figura 3.4 se presenta las cámaras triaxiales.



Figura 3.4: Cámaras Triaxiales, diámentro $\phi = 200[mm]$

3.1.2.4. Anillo de Carga

Es un anillo metálico que ha sido calibrado de tal manera de conocer la relación deformación-fuerza. En el centro del anillo posee un deformímetro que permite conocer la deformación del anillo. A través de la deformación y la relación deformación-fuerza se puede obtener la fuerza axial que está soportando la muestra de suelo. En la figura 3.5 se muestra una imagen del anillo de carga con el deformímetro preparado para medir la carga.



Figura 3.5: Anillo de Carga

3.1.2.5. Deformímetro

Se instala un deformímetro entre el vástago y cámara. Este instrumento entrega lecturas del desplazamiento del vástago, que es igual a la deformación axial que impuesta en la muestra de suelo. En la imagen 3.6 se puede apreciar un deformímetro o comparador a dial similar al utilizado.



Figura 3.6: Deformímetro

3.2. Representación

Existen distintas formas de presentar los resultados de los ensayes triaxiales, las más destacadas son los diagramas de Círculos de Mohr-Coulomb y trayectoria de esfuerzos. Para el estudio realizado se utilizan ambas.

3.2.1. Criterio de Falla de Coulomb

En 1776, Coulomb, tras observaciones realizadas a muros de contención planteó que la máxima resistencia al corte τ_f en el plano de falla está controlada por la siguiente expresión.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \tag{3.3}$$

τ_f	resistencia al corte
c	cohesión del suelo
σ	tensión normal al plano de falla
ϕ	ángulo de fricción del suelo

En un principio este criterio no generó diseños satisfactorios debido a que se utilizaba esta formula sin considerar los esfuerzos efectivos en el suelo, por consiguiente, una sobre estimación de la resistencia real.

Una forma usual de evaluar la capacidad de soporte del suelo derivada del planteamiento de Coulomb es comparar el criterio de falla de Coulomb con los círculos de Mohr del estado tensión del suelo. Si los círculos sobrepasan la recta se puede decir que el suelo no resiste, en cambio, sí el circulo queda dentro del área bajo la recta, se dice que el suelo es capaz de resistir. En la figura 3.7 se presenta una esquema donde se aprecia los estados tensionales del suelo. Se recomienda Budhu (2008) y Villalobos (2015) para profundizar más en estos temas.

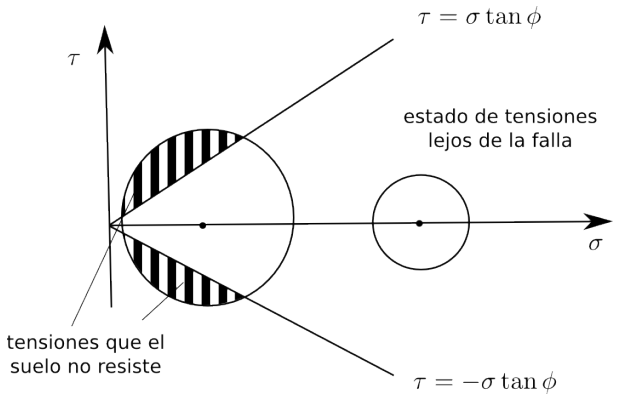


Figura 3.7: Representación gráfica de los círculos de Mohr con criterios de falla de Coulomb para suelo granular.

3.2.2. Círculos de Mohr-Coulomb de Estado Último

Consiste en la representación gráfica en dos dimensiones del estado de esfuerzo último de la muestra de suelo. En el eje de las ordenadas se encuentra el esfuerzo tangencial o de corte τ_f, y en las abscisas se encuentra los esfuerzos axiales σ. Esta representación permite obtener fácilmente el estado de esfuerzo en distintas direcciones.

En el ensaye triaxial los esfuerzos principales quedan determinados por la presión de confinamiento y por el esfuerzo axial. Por lo que es usual utilizar las siguientes formulaciones para dibujar los círculos, en el esquema.

$$radio = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{3.4}$$

$$coordenada\ del\ centro = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tag{3.5}$$

σ_1 esfuerzo principal mayor

σ_3 esfuerzo principal menor

Una vez dibujados los círculos de estado último, para los distintos confinamientos, se procede a trazar un recta tangente a los círculos, ésta se denomina la envolvente de falla. La envolvente de falla es el criterio de falla de Coulomb, por lo tanto proporciona información de la cohesión y el ángulo de fricción interno de la muestra.

Para obtener los datos característicos del suelo, se ajusta la envolvente de falla a los círculos de máxima resistencia. Donde la pendiente es el ángulo de fricción interno ϕ, el intercepto con el eje de las ordenadas, la cohesión c. Uno de los problemas que presenta este método es la dificultad para trazar una recta que sea tangente a los círculos.

En la figura 3.8 se muestra un esquema con la notación utilizada en los círculos de Mohr.

En la figura 3.9 se muestra un elemento de suelo sometido a esfuerzos principales σ_1 y σ_3. Estos esquemas se utilizaran de referencia, para las siguientes formulas. Es importante recordar que los valores de σ_1 y σ_3 son de estado último.

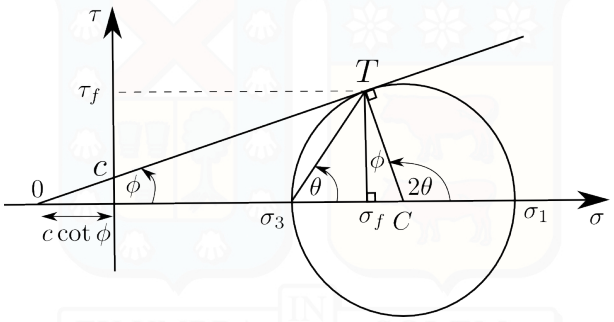


Figura 3.8: Notación parámetros círculo de Mohr

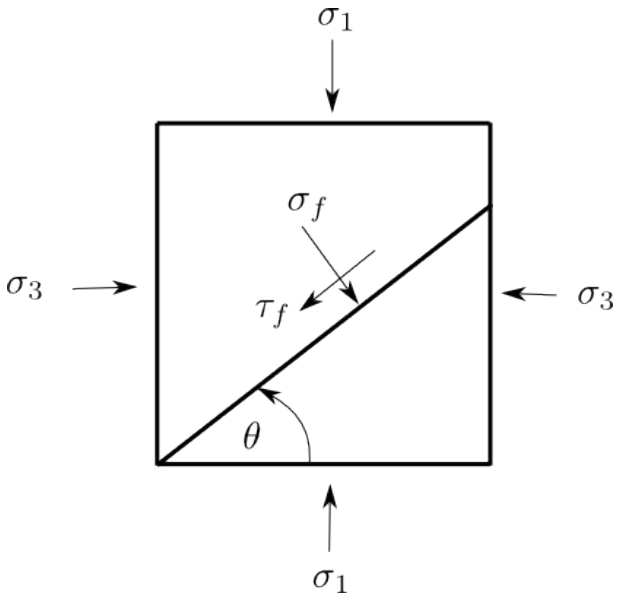


Figura 3.9: Elemento de suelo sometido a esfuerzos principales

El esfuerzo de corte máximo τ_f, es proporcional a la carga aplicada y depende de los esfuerzos principales σ_1, σ_3 y el ángulo del plano de falla de θ. Se puede calcular con la siguiente expresión que se obtiene aplicando trigonometría a los triángulos de la figura 3.8.

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta \tag{3.6}$$

τ_f corte máximo

σ_1 esfuerzo principal mayor

σ_3 esfuerzo principal menor

θ ángulo del plano de falla

Se puede obtener el ángulo del plano de falla con el triangulo mayor de la figura 3.8 donde la suma de los ángulos interiores ϕ y 90° debe ser igual al ángulo opuesto exterior 2θ. A continuación se muestra la relación que se obtiene.

$$\theta = 45° + \frac{\phi}{2} \tag{3.7}$$

θ ángulo del plano de falla

ϕ ángulo de fricción interna

Para obtener la fricción interna ϕ se puede usar la función trigonométrica del seno, donde el cateto opuesto sería el radio del circulo y la hipotenusa se forma por el tramo que corta la envolvente de falla en la parte negativa del eje de las abscisas, más la distancia desde el origen al centro de la circunferencia. A continuación se presenta la formula obtenida.

$$\sin\phi = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)}{c\cot\phi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \tag{3.8}$$

σ_1 esfuerzo principal mayor

σ_3 esfuerzo principal menor

c cohesión del suelo

ϕ ángulo de fricción interna

3.2.3. Diagrama de Trayectorias de Esfuerzos

Los parámetros de esfuerzos compuestos como el esfuerzo medio y desviador, han sido ampliamente utilizados en la mecánica de suelos. Un problema que presentan estos parámetros es que no tienen una única interpretación, si no que dependen de las convenciones que se utilicen. Lo anterior trae grandes problemas debido a que no es una propiedad absoluta, si no una interpretación o representación del estado de esfuerzo. A grandes rasgos existen dos convenciones, la primera popularizada por Massachusetts Institute of Technology, donde para el esfuerzo medio y desviador se utiliza s y t para denominarlos. La otra convención, popularizada por Cambridge University, donde se utiliza q y p para denominar el esfuerzo medio y desviador respectivamente. Para profundizar sobre los parámetros de esfuerzo compuesto se recomienda la lectura Parry (2004).

La convención popularizada por Cambridge University consiste en la representación bidimensional de un estado de esfuerzos tridimensional, donde su principal característica es que la representación del estado tensional de forma independiente de la dirección del análisis. Esto se logra utilizando los invariantes del tensor de esfuerzos. En la figura 3.10 podemos observar q, p y la notación utilizada.

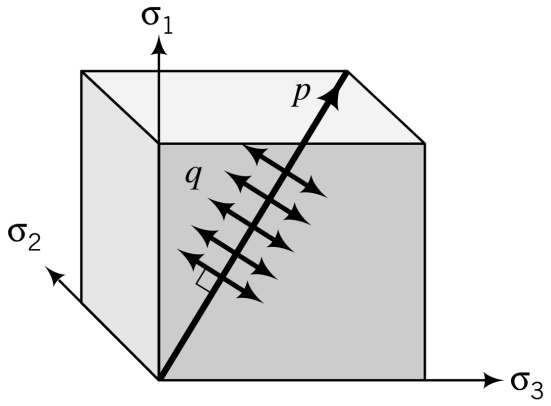


Figura 3.10: Esquema parámetros pq

El esfuerzo medio, es el promedio de los esfuerzos ortogonales en las tres dimensiones,

está relacionado con el primer invariantes de esfuerzo. A continuación se presenta la expresión matemática 3.9 que los evalúa.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{3.9}$$

p	esfuerzo medio
σ_1	esfuerzo eje 1
σ_2	esfuerzo eje 2
σ_3	esfuerzo eje 3

El esfuerzo desviador está relacionado con el segundo invariante de la parte desviadora del tensor de esfuerzos, que es proporcional a los esfuerzos de Von Mises. Ésta es una magnitud física que representa a la energía de distorsión. A continuación se presenta la expresión matemática 3.10 que lo cuantifica.

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{3.10}$$

q	esfuerzo desviador
σ_1	esfuerzo eje 1
σ_2	esfuerzo eje 2
σ_3	esfuerzo eje 3

La forma anterior solo funciona en direcciones principales. En el ensaye triaxial no se inducen esfuerzos de corte en las caras por lo que no existe problema en usarla. Para casos más generales se debe utilizar la expresión 3.11. Para mayor información de los invariantes en las tensores de esfuerzo se recomienda Bauchau y Craig (2009)

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6\tau_{xy} + 6\tau_{yz} + 6\tau_{xz}} \tag{3.11}$$

q esfuerzo desviador

σ_1 esfuerzo eje 1

σ_2 esfuerzo eje 2

σ_3 esfuerzo eje 3

τ_{xy} corte xy

τ_{yz} corte yz

τ_{xz} corte xz

La convención popularizada por Massachusetts Institute of Technology consiste en la representación bidimensional del estado de esfuerzo. Donde el eje de la ordenadas representa la tensión de corte t y el eje de las abscisas representa la tensión media s. A continuación se presentan las expresiones matemáticas que calculan t y s.En la figura 3.11 se presenta un esquema del estado tensional utilizando la convención recién expuesta.

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma 3}{2} \tag{3.12}$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma 3}{2} \tag{3.13}$$

s tensión media

t tensión de corte

σ_1 esfuerzo principal mayor

σ_3 esfuerzo principal menor

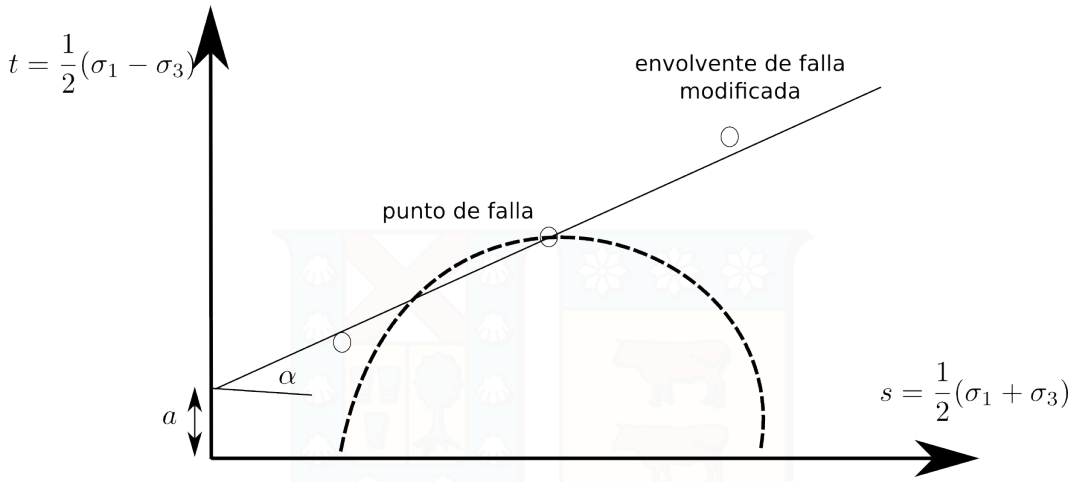


Figura 3.11: Representación estados es esfuerzos s-t

Una característica interesante de esta representación del estado tensional es que permite obtener fácilmente los parámetros de ángulo de fricción interna y cohesión, ambas son de interés en esta investigación. Es por esta razón que se adopta esta convención para la presentación de los resultados de los ensayos triaxiales. Apoyándose en la figura 3.11 se obtiene las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión c.

$$\phi = \arcsin(\tan\alpha) \tag{3.14}$$

$$c = \frac{a}{\cos\phi} \tag{3.15}$$

ϕ	ángulo de fricción interna
c	cohesión del suelo
α	pendiente de la envolvente de falla modificada
a	intercepto de la envolvente de falla modificada con eje t

3.3. Descripción de Materiales Utilizados

La elección de los materiales se realizó con el objetivo de disminuir los costos computacionales de las simulaciones DEM. Por esta razón se utilizaron materiales monotamaño

o con una granulometría acotada a un rango pequeño. A continuación se presentan tablas con las propiedades principales de los materiales considerados, en los siguientes acápite se detallara como se obtuvieron estos datos.

Rodamientos de Acero	
densidad	$7850[\frac{kg}{m^3}]$
coeficiente de Poisson	0,3
módulo de elasticidad	$200000[Mpa]$
diámetro representativo	$4750[\eta m]$
ángulo de fricción	$20°$
coheción	$980[Pa]$

Micro Esferas de Vidrio	
densidad	$2490[\frac{kg}{m^3}]$
coeficiente de Poisson	0,22
módulo de elasticidad	$71900[Mpa]$
diámetro representativo	$(600-850)[\eta m]$
ángulo de fricción	$45°$
coheción	$0[Pa]$

Granito Meteorizado	
densidad	$2600[\frac{kg}{m^3}]$
coeficiente de Poisson	0,3
módulo de elasticidad	–
diámetro representativo	$(450-2000)[\eta m]$
ángulo de fricción	$42°$
coheción	$0[Pa]$

3.3.1. Rodamientos de Acero

Los rodamientos de acero presentan una gran homogeneidad en las propiedades entre una esfera y la otra, esta homogeneidad se debe a los altos estándares de calidad del fabricación. Al tratar de simular este material los costos computacionales disminuyen debido a que no hay que generar algún tipo de variación de las propiedades y su similitud geométrica con los elementos de la simulación. Otro punto a favor de este material, es que la propiedades son bien conocidas y están tabuladas. En su contra, esta homogeneidad y perfección se escapa bastante del objetivo que es simular suelos, que por supuesto, carecen de esta perfección.

El Acero posee una densidad de 7850[$\frac{kg}{m^3}$] con un coeficiente de Poisson de 0,30 y un módulo de elasticidad de 200000[MPa]. En las simulaciones computacionales se considera otro valor, el cual será justificado en el capitulo de simulaciones . El diámetro de los rodamientos es de 4,75[mm]. Es importante mencionar que previo a la manipulación, los rodamiento estos fueron lavados para poder quitar cualquier resto de lubricante que estos pudieran tener. En la figura 3.12 se presenta una fotografía del material.



Figura 3.12: Foto de rodamientos de acero utilizados en los ensayes triaxiales

3.3.2. Micro Esferas de Vidrio

Las micro esferas de vidrio es un material utilizado para generar un reflejo brillante en la pinturas para pavimentos. Estas micro esferas fueron lavadas, seleccionadas y tamizadas para lograr una granulometría monotamaño y un material libre de impurezas. Este material pretende ser un punto intermedio entre los rodamientos de acero y los suelos monotamaño debido a que las micro esferas de vidrio Están formadas por arena de sílice SiO_2 que es un material que esta presente en gran cantidad en la corteza terrestre. Otro punto interesante es que el proceso de fabricación no permite generar un único tamaño como es en el caso de los rodamiento, generándose un variabilidad que también esta presente en los suelos.

El vidrio posee una densidad de 2490$[\frac{kg}{m^3}]$ con un coeficiente de Poisson de 0,22 y un módulo de elasticidad de 71900$[MPa]$. En las simulaciones computacionales se considera otro valor, el cual serás justificado en el capitulo de simulaciones. El diámetro de las esferas está entre $(600 - 850[\mu m])$. El ángulo de fricción entre vidrio es 41° para el caso estático y 21°, para el dinámico. En la figura 3.13 se una imagen del las micro esferas de vidrio.



Figura 3.13: Foto de microesferas de vidrio utilizadas en los ensayes triaxiales

3.3.3. Granito Meteorizado

El granito meteorizado es arena extraída de la playa Reñaca. Posterior a la extracción fue secada en horno y tamizada para extraer impurezas y obtener una granulometría mono tamaño. Con este tipo de materiales se pretende comprobar si la modelación DEM es capaz de aproximarse a su comportamiento, utilizando esferas o si es necesario de incorporar otros tipo de geometría.

Este material posee una densidad de 2600$[\frac{kg}{m^3}]$ y un módulo de Poisson de 0,3 supuesto. En el proceso de tamizado se logró que el tamaño de las partículas se encuentra entre $(0{,}425 - 2{,}00)[mm]$ de diámetro. En la figura 3.14 se presenta una imagen del granito meteorizado seleccionado.



Figura 3.14: Foto de granito meteorizado utilizado en los ensayes triaxiales

3.4. Resultados de Ensayes Triaxiales

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayes triaxiales a los materiales anteriormente expuestos.

3.4.1. Correcciones

Los resultado obtenidos directamente del equipo triaxial se debieron corregir según lo indicado en la equación 3.2. Se realizaron correcciones de dos tipos, una relacionada con la variación del diámetro de la muestra de suelo, y la otra relacionada con detalles de funcionamiento del equipo.

La prensa triaxial, para un ciertos valor de carga, hizo que el desplazamiento de la viga se detuviera por unos instantes produciéndose una leve descompresión debido a un reacomodo del mecanismo. Una vez reacomodado el sistema de engranes, el ensayo continuaba sin inconvenientes. Esta detención provocó que en el registro se generen unas hendiduras. Para corregir este problema se decidió sacar los datos defectuosos y empalmar los grupos de datos preocupándose de generar una curva continua. Se determinó utilizar este criterio de corrección debido a que los materiales de la las muestra son granulares y su respuesta no se ve influenciada por la velocidad de carga, no es así para los materiales cohesivos. Más adelante se podrá observar en las gráficas en más detalle la correcciones realizadas.

3.4.2. Rodamientos de Acero

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensaye triaxial realizados a los rodamientos de acero. El confinamiento adoptado para las pruebas fue de 2[PSI], 4[PSI] y 10[PSI]. En la figura 3.15 se presentan los resultados obtenidos directamente de la prensa triaxial, en la figura 3.16 se comparan los datos de esfuerzos con y sin corrección y en la figura 3.17 se presenta una normalización de los valores de esfuerzo para comparar si existe variación de la forma de la curva a medida que se varía el confinamiento.

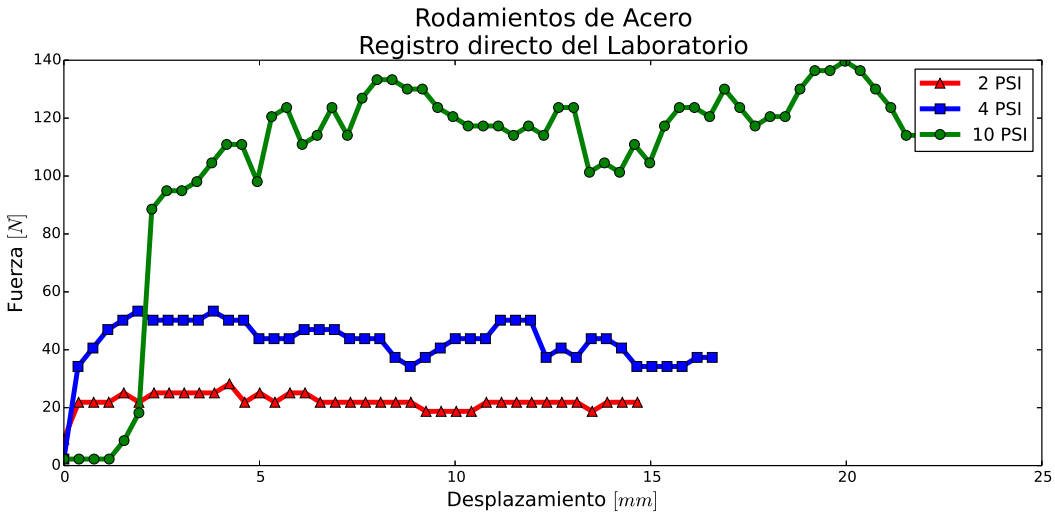


Figura 3.15: Registro directo, rodamientos de acero

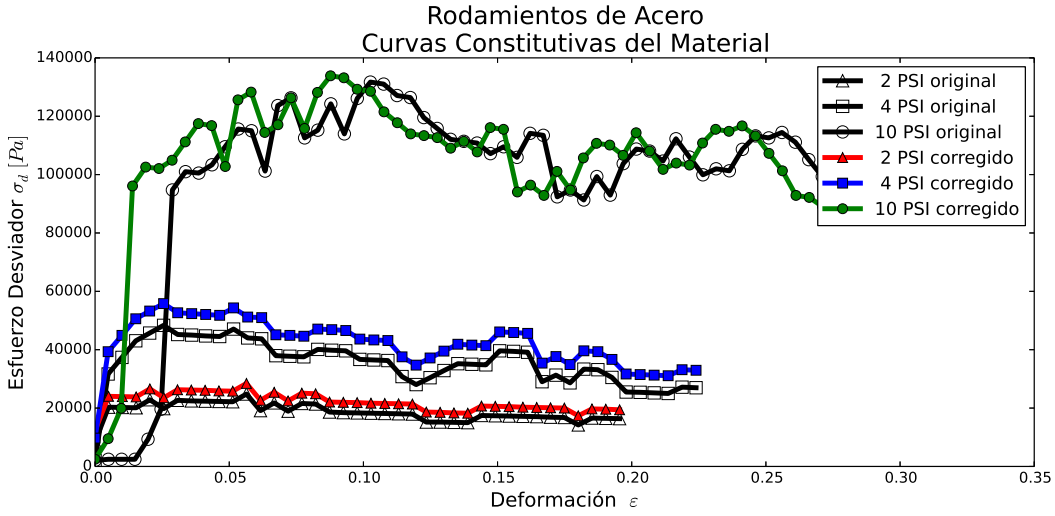


Figura 3.16: Registro corregido, rodamientos de acero

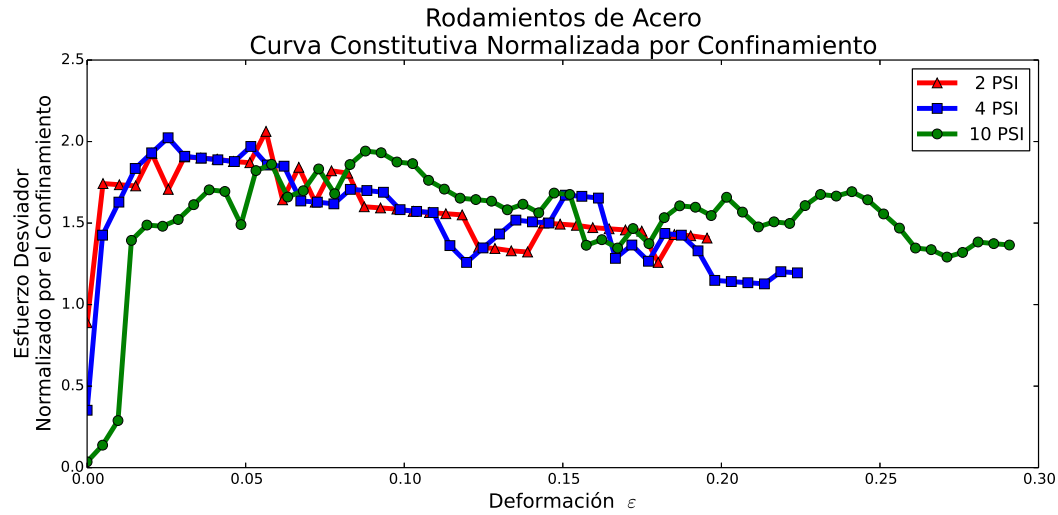


Figura 3.17: Registro unitario, rodamientos de acero

A grandes rasgos de la figura 3.17 se puede observar que las curvas para los distintos confinamientos, siguen la misma tendencia y tienen un comportamiento similar, verificandose sólo un cambio de escala.

Para la obtención del ángulo de fricción interna, se utiliza la representación de los círculos de Mohr y diagrama de trayectoria de esfuerzos s-t que se presentan en la figura 3.18 y figura 3.19 , respectivamente.

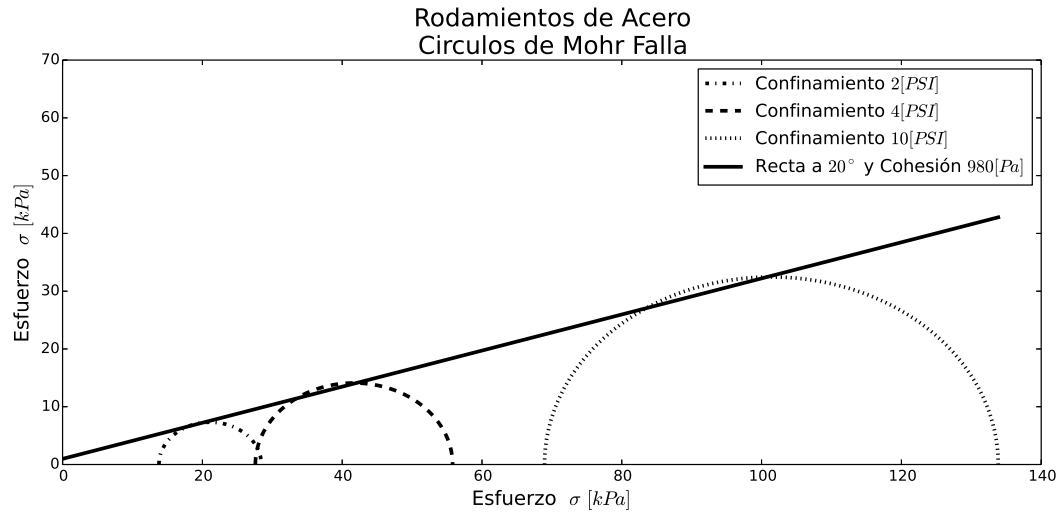


Figura 3.18: Círculos de Mohr, rodamientos de acero

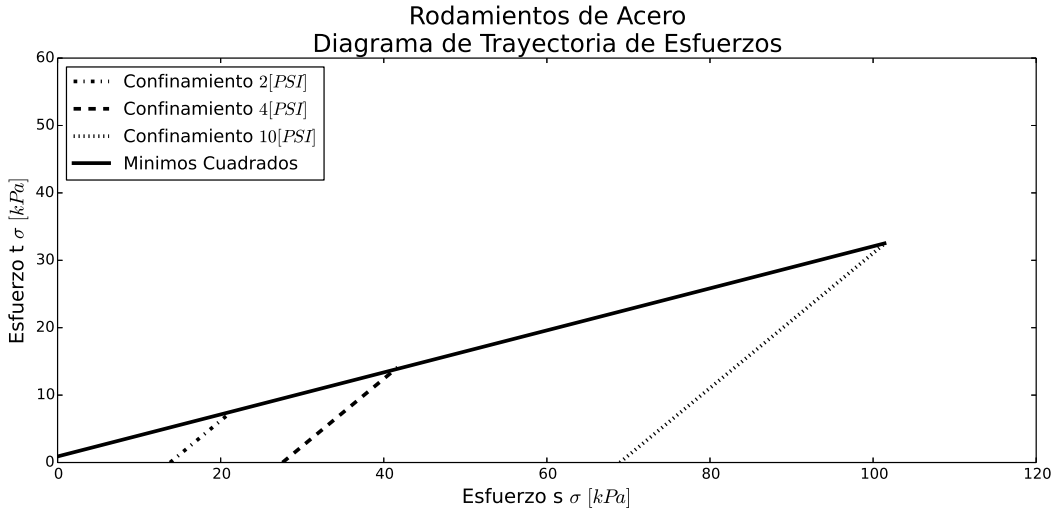


Figura 3.19: Diagrama s-t, rodamientos de acero

De las figuras 3.18 y 3.19, se obtuvo que el ángulo de fricción es de 20°.

3.4.3. Micro Esferas de Vidrio

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensaye traiaxial realizados a las micro esferas de vidrio. El confinamiento adoptado para las pruebas fue de 5[PSI], 10[PSI] y 20[PSI]. En la figura 3.20 se presentan los resultados obtenidos directamente de de la prensa triaxial, en la figura 3.21 se comparan los datos de esfuerzos con y sin corrección y en la figura 3.22 se presenta una normalización de los valores de esfuerzo, para comparar si existe variación de la forma de la curva.

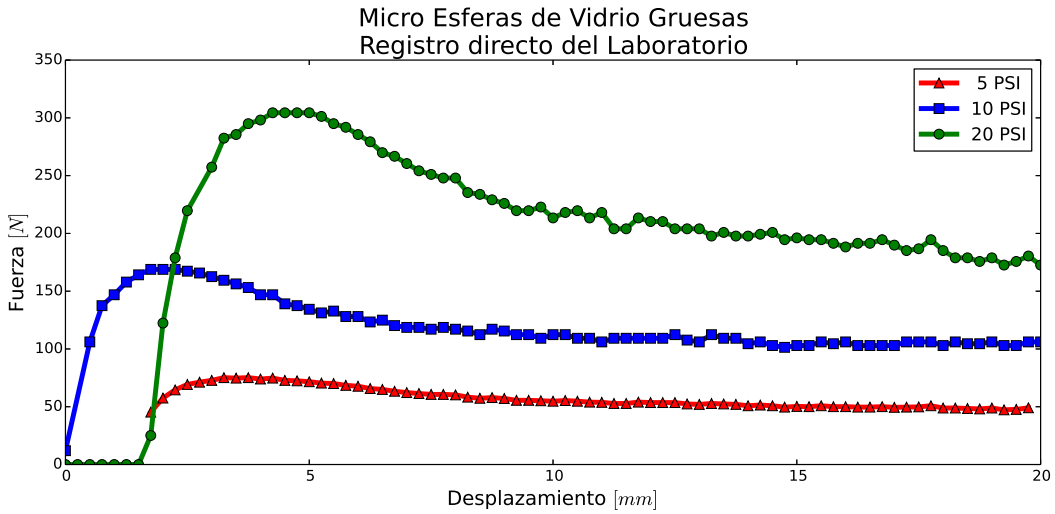


Figura 3.20: Registro directo, micro esferas de vidrio

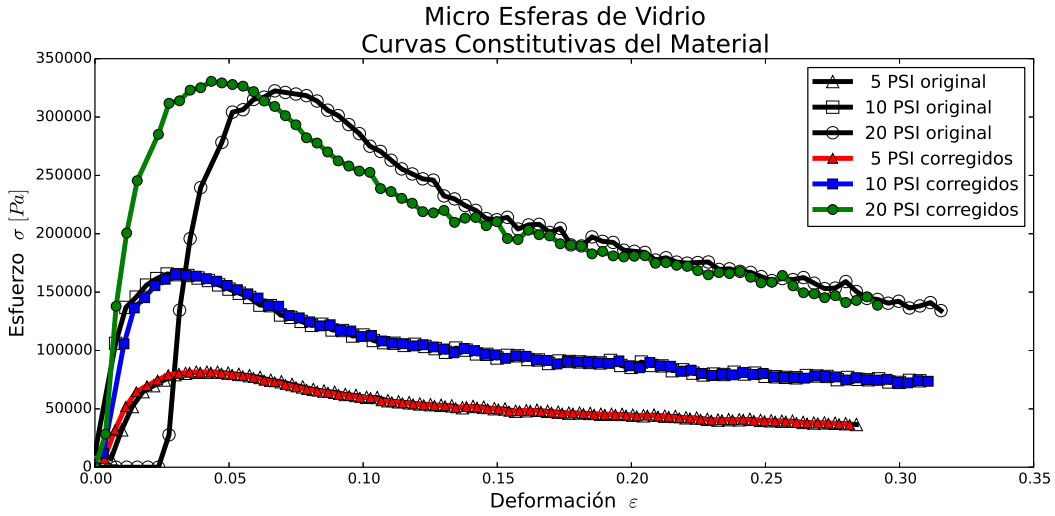


Figura 3.21: Registro corregido, micro esferas de vidrio

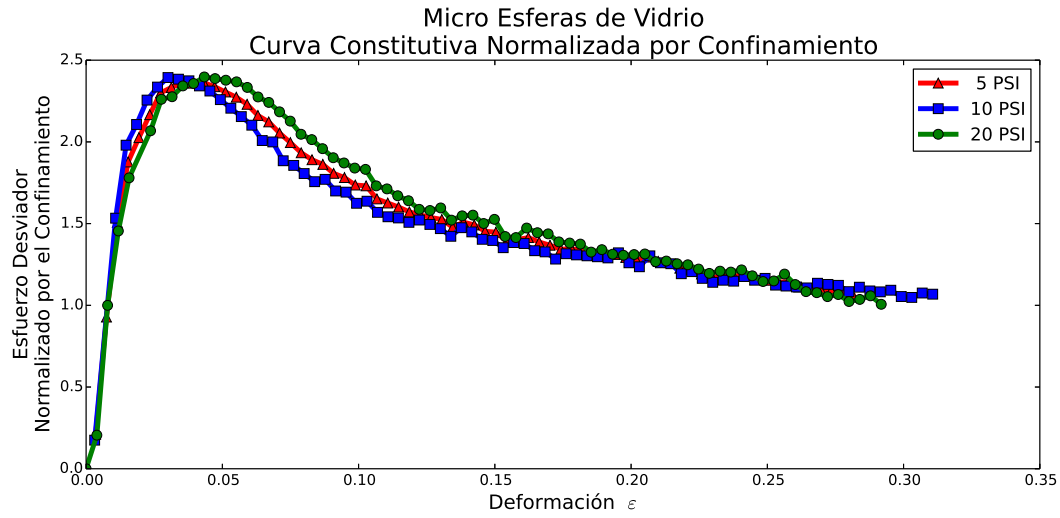


Figura 3.22: Registro unitario, micro esferas de vidrio

Para la obtención del ángulo de fricción interno, se utiliza la reparcelación de los círculos de Mohr y diagrama de trayectoria de esfuerzos s-t que se presentan en la figura 3.23 y figura 3.24 , respectivamente.

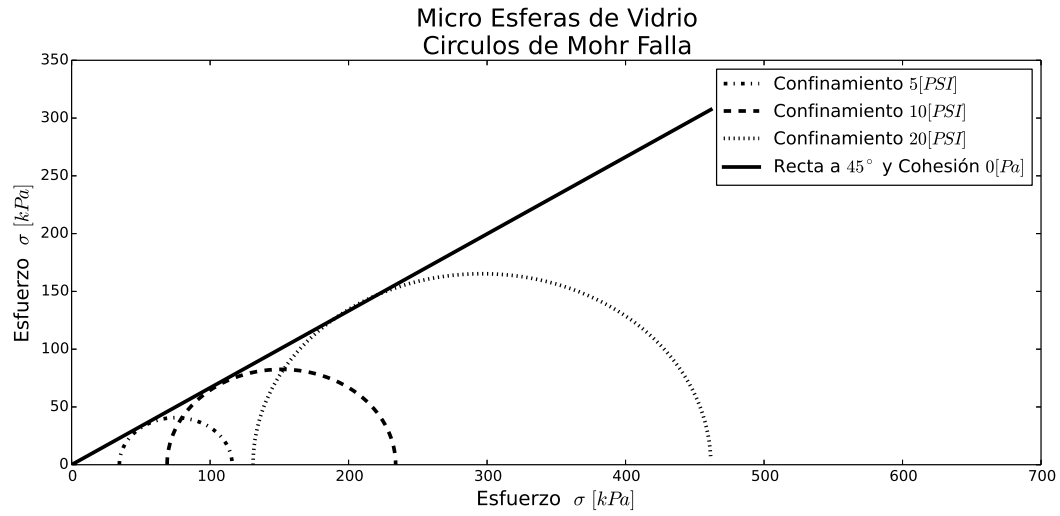


Figura 3.23: Círculos de Mohr, micro esferas de vidrio

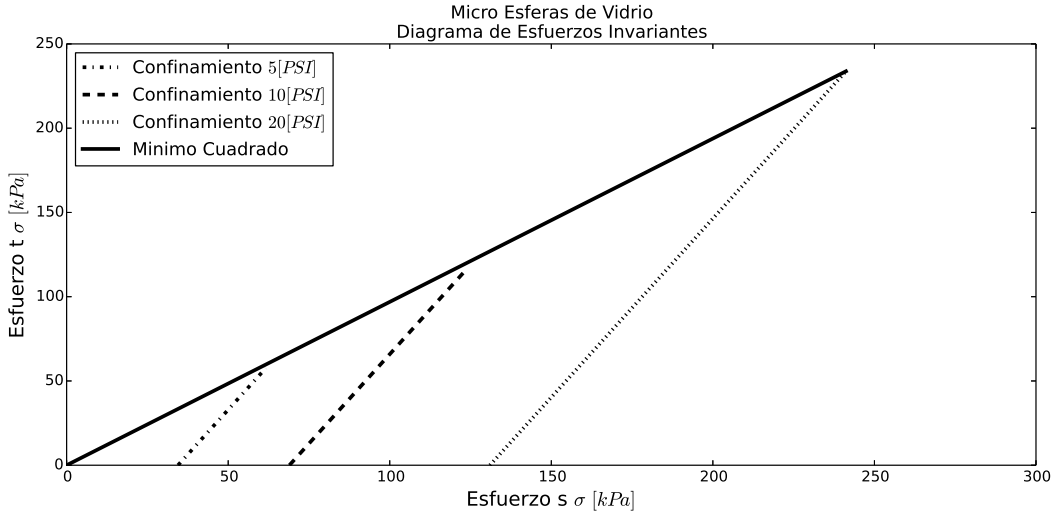


Figura 3.24: Diagrama s-t, micro esferas de vidrio

De las figuras 3.23 y 3.24, se obtuvo que el ángulo de fricción es de 45°

3.4.4. Granito Meteorizado

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensaye triaxial realizados a arena de la playa de Reñaca. El confinamiento adoptado para las pruebas fue de 5[PSI], 10[PSI] y 20[PSI]. En la figura 3.25 se presentan los resultados obtenidos directamente de la prensa triaxial. En la figura 3.26 se comparan los datos de esfuerzos con y sin corrección y en la figura 3.27 se presenta una normalización de los valores de esfuerzo, para comparar si existe variación de la forma de la curva.

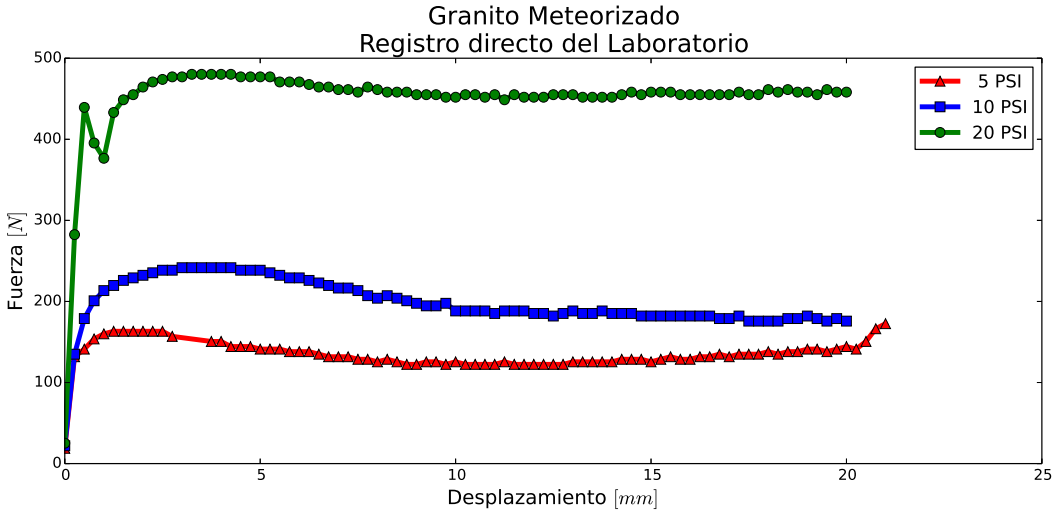


Figura 3.25: Registro directo, granito meteorizado

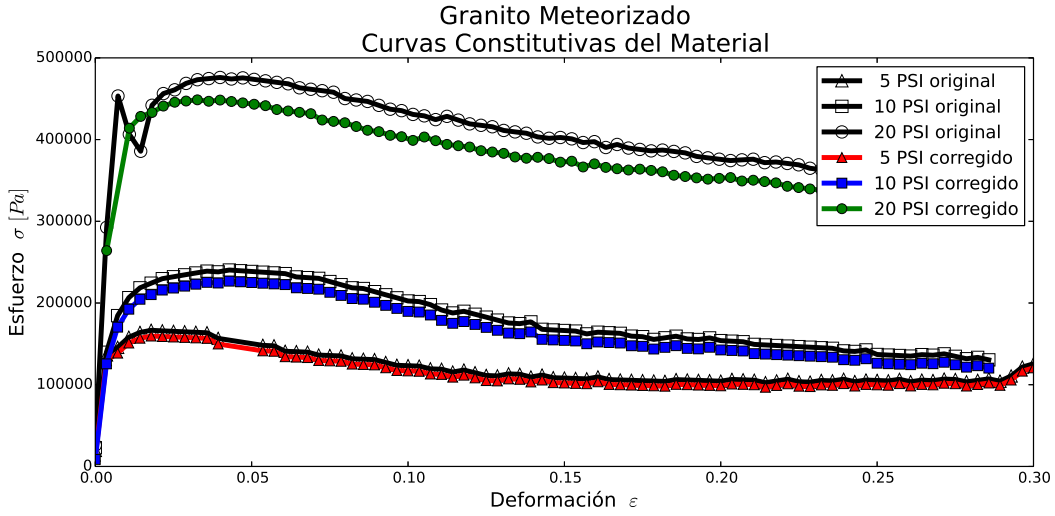


Figura 3.26: Registro corregido, granito meteorizado

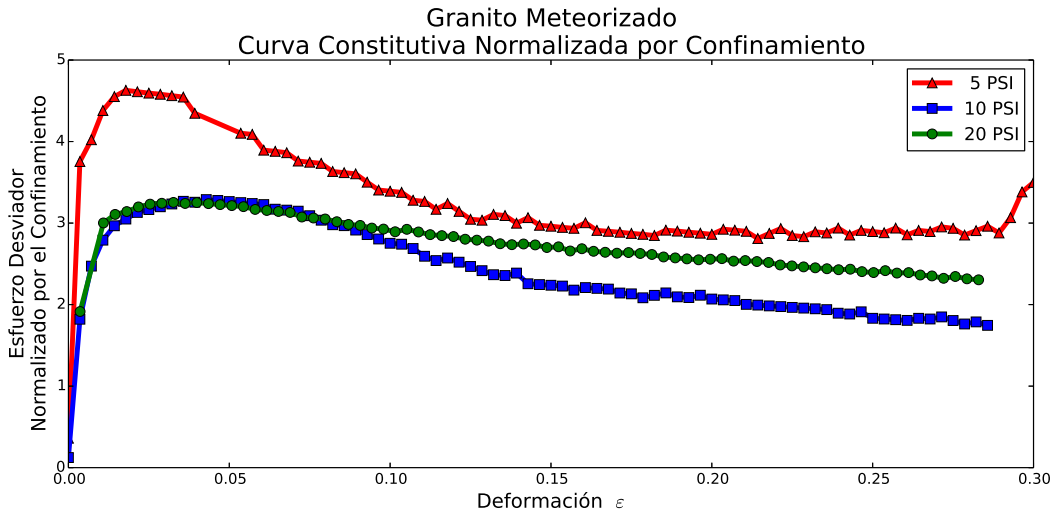


Figura 3.27: Registro unitario, granito meteorizado

A grandes rasgos de la figura 3.27 se puede observar que las curvas para los distintos confinamientos, siguen la misma tendencia pero que para bajos confinamiento existe un aumento porcentual, de la resistencia, lo que se puede interpretar como una seudo cohesión, a pesar que el material es granular. Este comportamiento es normal y se debe a una curvatura en la envolvente de falla cerca del orígen, que en muchos casos prácticos se despecia adoptando un valor nulo para la cohesión.

Para la obtención del ángulo de fricción interno, se utiliza la representación de los círculos de Mohr y diagrama de trayectoria de esfuerzos s-t que se presentan en la figura 3.28 y figura 3.29 , respectivamente.

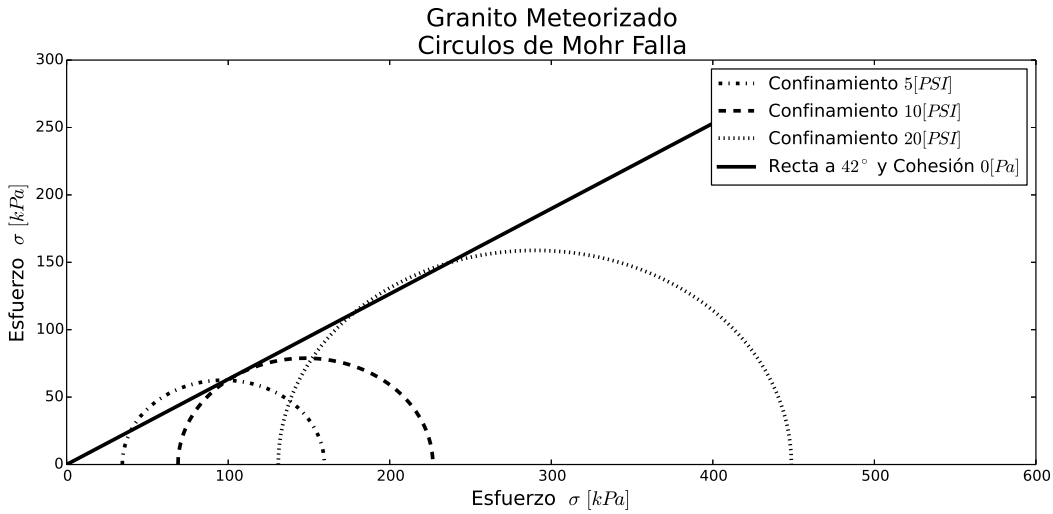


Figura 3.28: Círculos de Mohr, granito meteorizado

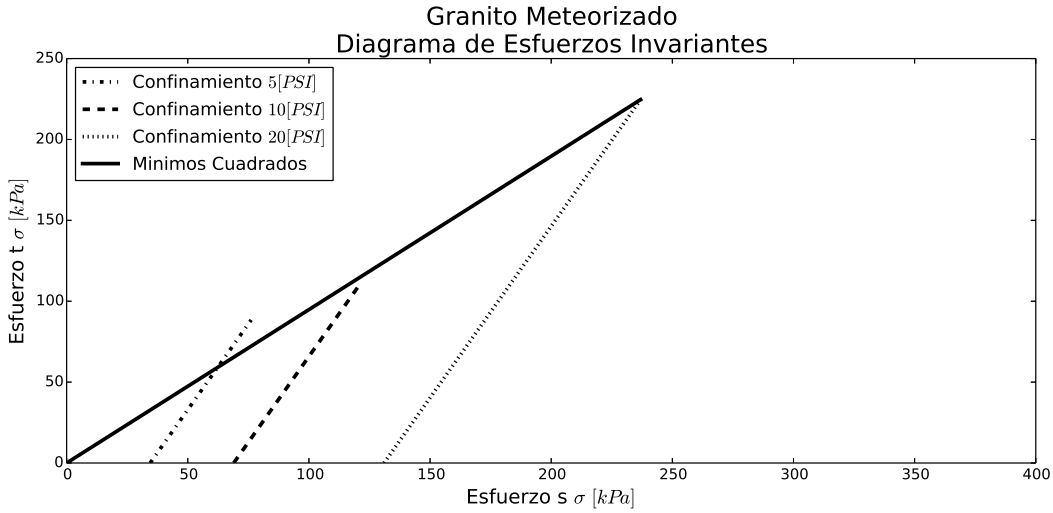


Figura 3.29: Diagrama s-t, granito meteorizado

De las figuras 3.28 y 3.29, se obtuvo que el ángulo de fricción es de 42°.

4 | Modelo Computacional

En el presente capítulo se describirá el código utilizado en las simulaciones computacionales de los ensayes triaxiales, también se explicarán las simplificaciones adoptadas y sus efectos. Por último se presentara análisis de sensibilidad de distintos parámetros para poder comprender cómo estos influyen en los resultados de las simulaciones.

4.1. Modelo

El modelo utilizado en las simulaciones considera dos tipo de elementos: las esferas y las paredes. Las primeras son los elementos que van a simular los granos del suelo. Las paredes van a simular las condiciones de borde del ensayo triaxial que sería la membrana que envuelve al suelo y las tapas rígidas que deforman la muestra.

4.1.1. Esferas

Las esferas son los elementos que representan los granos del suelo. Las esferas pueden trabajar de forma individual o agrupadas. Si se observa la forma de una partícula de suelo como las que aparecen en la figura 4.1 se advierte que es bastante diferente a una forma esférica perfecta. Es por esta razón que al utilizar esferas unidas formando partículas se genera mayor angularidad y asimetría que podrían generar una mejor similitud entre modelo y realidad.

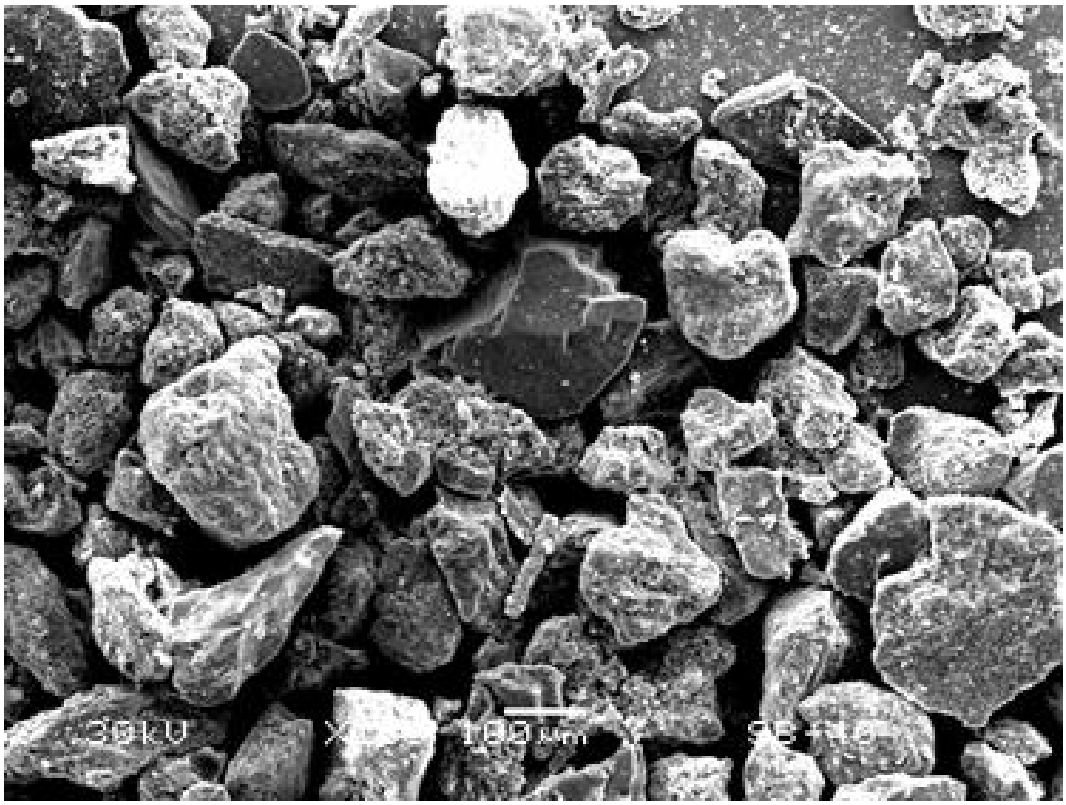


Figura 4.1: Fotografía obtenida con microscopio electrónico de barrido, para un suelo que pasa la malla $n°$ 40, Romero-Cervantes y Pérez-Rea (2016)

4.1.2. Paredes

El modelo virtual que pretende simular el ensaye triaxial está formado por 6 paredes infinitamente rígidas que forman un paralelepípedo. El desplazamiento de las paredes no presenta ningún tipo de inercia, pero está determinado por las condiciones de borde. La primera condición de borde, es la de confinamiento fijo, esta consiste en determinar la posición de la pared tal que se produzca un esfuerzo promedio en ella que sea similar al valor del esfuerzo impuesto en el confinamiento. Como es un método numérico, la aceptabilidad de igualdad de valores considera un porcentaje de error, por lo general se considera del orden de uno por mil. La segunda condición de borde esta relacionada con la velocidad de deformación, donde las paredes superior e inferior se desplazan manteniendo constante la velocidad de deformación. Se descarto utilizar condiciones de borde periódicas en las simulaciones, debido a que se producía inestabilidad en el sofware YADE, generando resultado incongruentes.

4.2. Simplificaciones adoptadas

A continuación se describen y explican las simplificaciones utilizadas en la modelación computacional. Es importante mencionarlas debido a que son una desviación con respecto a la realidad. Probablemente en estudios posteriores se podrá mejorar estas aproximaciones para poder generar un modelo más robusto.

4.2.1. Módulo de elasticidad de las partículas

El módulo de elasticidad es determinante en el tiempo que se demoran las simulaciones. Esto se debe a que el delta tiempo en cada iteración debe ser los suficientemente pequeño para que el modelo no diverja. La convergencia del método está determinada porque el paso de tiempo sea lo suficientemente pequeño para que no se generen repentinamente fuerzas muy grandes las cuales provoquen grandes aceleraciones en las partículas creando así un desbalance de fuerzas, que es la diferencia entre la sumatoria de las fuerzas internas con la sumatoria de la fuerzas externas. Entonces si las partículas poseen un modulo grande, los delta deben ser muy pequeños. Un alto modulo provoca que una pequeña deformación en la partícula genere grandes cambios de fuerza, entonces se debe buscar el paso suficientemente pequeño para que el movimiento de una partícula provoque una deformación que genere fuerza de contacto que gradualmente aumenten y generen un movimiento suave.

Debido a lo anterior se decidió utilizar un módulo de partículas que es de $5 * 10^6[pa]$ siendo que en la realidad el modulo de una partícula de suelo es de un valor cercano a $8{,}5 * 10^{10}[pa]$ de acerdo a CANOBA y FRAGA (2004), una diferencia de cuatro ordenes de magnitud. Las simulaciones con el modulo de Young de $5 * 10^6[pa]$ se demoraban alrededor uno o dos días, pero si se hubiese utilizado un modulo más cercano al real las simulaciones se demorarían más de un año, lo que se escapa del alcance de esta memoria. Probablemente en un futuro cuando se incremente las capacidades computacionales disponibles se podrán

utilizar módulos mayores logrando mejores aproximaciones.

4.2.2. Tamaño y Geometría de la Simulación

La cantidad de elementos en las simulaciones es un factor que influye en los tiempos de simulación debido a que a mayor cantidad de elementos, mayor es la cantidad de cálculos que se deben realizar por iteración. Pero por otro lado, entre menos elementos tiene la simulación el efecto de la propiedades microscópicas es más importante, perdiéndose representatividad del comportamiento del conjunto.

En las simulaciones realizadas se trató de encontrar un equilibrio entre tiempo y representatividad. En términos generales se utilizaron alrededor de 10000 elementos, esto permite obtener tiempos aceptables de simulaciones, no mayores a 3 días y las curvas de respuesta son suaves, donde las propiedades macroscópicas predominan frente a las microscópicas. Cuando se inicia la modelación se utilizaron pocos elementos, generándose grandes saltos en el registro de las propiedades, por lo tanto este tipo de modelo era extremadamente sensible a la posición individual de cada esfera y no se podía diferencias fenómenos puntuales, de la respuesta global. Al aumentar el numero de partículas manteniendo las mismas propiedades se obtubieron curvas más suaves donde los resultados no variaban significativamente cuando se variaba la distribución inicial de la partículas en la fase de generación. Esto permitió encontrar un tamaño adecuado que no sea muy grande para mantener acotado el gasto computacional y no tan pequeño para que la respuesta del modelo pueda mostrar la propiedades de conjunto y no las propiedades microscópicas.

Otra propiedad que se consideró en las simulaciones fue mantener la relación alto-ancho del experimento. Es por esta razón que se utilizo la razón $2:1$. Dadas las condiciones de tamaño antes expuestas en las simulaciones no se pudo recrear la escala natural del ensaye, pero se respeto la relación alto ancho.

Con respecto a la geometría del ensaye triaxial, se tiene una forma cilíndrica donde la

cara superior e inferior son planas e infinitamente rígidas y el contorno es una membrana flexible. Para simular esta forma en el computador se barajaron tres posibilidades. La primera fue generar una malla de elementos finitos que simulara la membrana imponiendo fuerzas de contacto normales a las partículas, en la figura 4.2 aparece un esquema de la malla de elementos finitos. La segunda fue generar muchas paredes rígidas formando estructuras prismática similar a un cilindro, en la figura 4.3 aparece una ejemplo de geometría prismática. La tercera fue utilizar un paralelepípedo, como en la figura 4.4. La primera forma fue descartada debido a su complejidad. La segunda era posible pero generaba problemas en la determinación del estado de esfuerzo del material y en la determinación de propiedades como la porosidad. Finalmente, la tercera forma a pesar que no es similar en su geometría, pero sí es más sencillo evaluar los estados de deformación, esfuerzos y porosidad. Se han realizado investigaciones como las que aparecen en los siguientes publicaciones Chareyre et al. (2002) , Scholtès et al. (2009) y Tong et al. (2012) que utilizan esta aproximación, debido a que el ensaye triaxial pretende determinar el estado tensional y deformación que por lo general se ha considerado en un cubo diferencial. Por lo tanto la geometría del modelo no es tan parecida al ensaye triaxial pero sí al estado tensional que el ensaye triaxial pretende representar, de hecho es idéntico al cubo de Mohr, como se muestra en la figura 4.5.

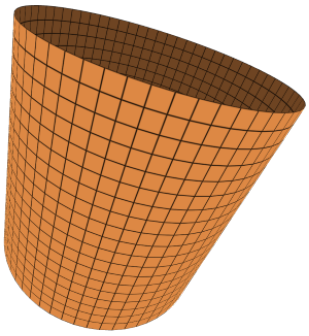


Figura 4.2: Malla cilíndrica, para elementos finitos

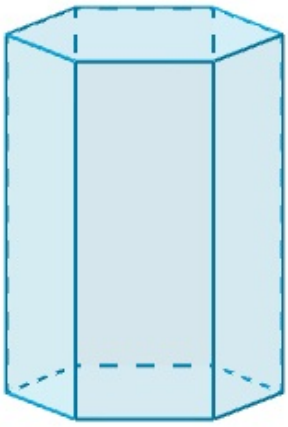


Figura 4.3: Prisma con múltiples paredes

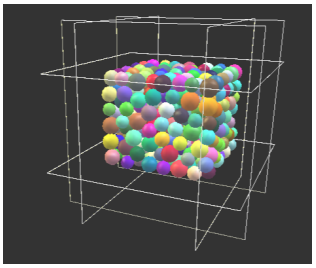


Figura 4.4: Paralelepípedo con 6 muros

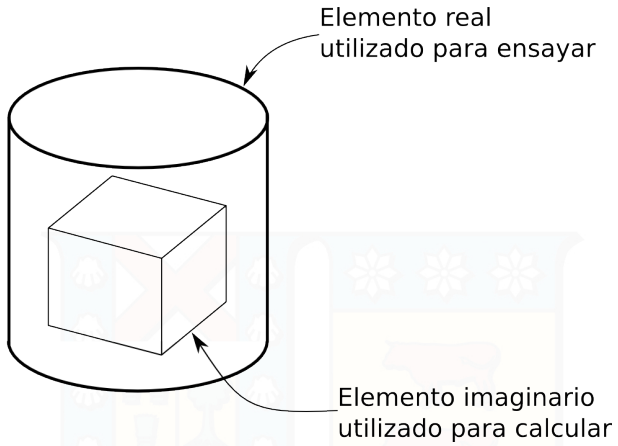


Figura 4.5: Esquema comparativo entre la situación real y la simulada

4.2.3. Geometría de las Partículas

Las partículas de suelo poseen una geometría irregular, más bien amorfa, prácticamente no hay dos granos que sean exactamente iguales, por lo tanto sus propiedades físicas varían uno a uno, en la figura 4.6 se presentan un esquema referencial de las formas de los granos de suelo. Por esta razón en el suelo no existe una partícula que sea totalmente representativa, pero si se seleccionan bien los granos de suelo éstos se pueden parecer mucho en propiedades. Es por esta razón y pensando en este tipo de casos, que se realizaron las simulaciones con un único tipo de partícula, sin considerar alguna variabilidad en las propiedades.

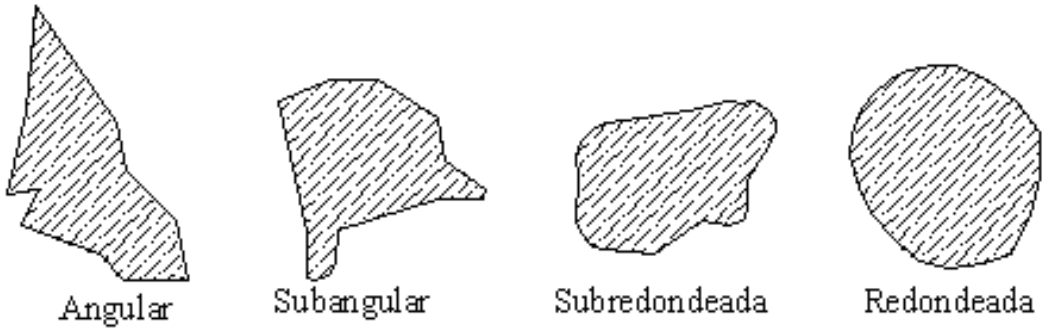


Figura 4.6: Esquema de formas de granos

Al utilizar esferas no se está considerando la trabazón entre granos debido las irregularidades y los efectos inerciales, sólo debido al contacto directo y al roce entre superficies. Es

importante destacar que el modelo utiliza la esfera como unidad básica de partícula, pero entrega la opción de generar uniones de esferas para generar nuevas geometrías, este tipo de partículas se denomina clump, representa de mejor forma la irregularidad de los granos de suelo y permite un sin fin de combinaciones. En la investigación se utilizan geometrías regulares, diédricas, tetraédricas y octaédricas,como las que se muestran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9. Es importante mencionar que para lograr un mejor rendimiento no se utilizó la interfaz gráfica, las imágenes anteriores se obtuvieron de simulaciones anexas, pero los elementos utilizados, son los mismos.

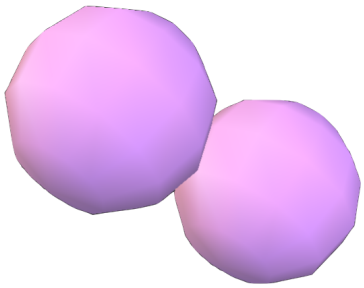


Figura 4.7: Clump diédrico

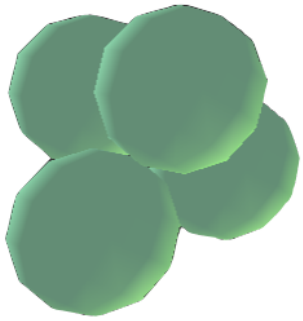


Figura 4.8: Clump tetraédrico

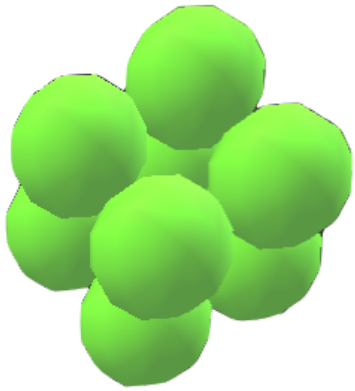


Figura 4.9: Clump Octaédrico

Una de las propiedades interesantes de los clumps es que en la interacción de partículas no solo actúan fuerzas normales y de roce, sino que también se generan unas seudo fuerzas por la trabazón y la irregularidades de su superficie, lo que representa de mejor forma la mecánica de un grano de suelo. Los clumps pueden poseer inercias distintas en sus ejes y excentricidades lo que provoca que los movimientos de las partículas sean más complejos, pudiéndose asemejar de mejor forma a la mecánica del problema.

Al utilizar clumps, el diámetro representativo de partícula ya no es un parámetro claro. Es por esta razón que se utilizó como valor representativo, el diámetro de la esfera equivalente que posee el volumen del total de esferas en el clumps. A continuación se presentan las formulas utilizadas para determinar el valor del diámetro representativo.

$$Volumen\ esfera = \frac{\pi D^3}{6} \tag{4.1}$$

$$\frac{\pi D^3_{representativo}}{6} = \sum_{i=1}^{n_{esferas}} \frac{\pi D_i^3}{6} \tag{4.2}$$

D Diámetro de grano representar

D_i Diámetro de la enésima esfera perteneciente al clumps

Ahora si los elementos esféricos dentro del clump son todos iguales la ecuación anterior se puede simplificar a la siguiente.

$$D_{representativo} = \sqrt[3]{n_{esferas} D^3} \tag{4.3}$$

4.3. Descripción del Código

Para poder simular ensayes triaxiales utilizando el método de elementos discretos, se utilizó como base, un código desarrollado por Bruno Chareyre, el cual ha servido de base para las publicaciones Chareyre et al. (2002) , Scholtès et al. (2009) y Tong et al. (2012).

Se decidió utilizar este modelo debido a que cuenta con investigaciones previas, que avalan de cierta forma su funcionamiento.

A grandes rasgos en la simulación se puede reconocer 5 etapas que son: ingreso de datos, generación de elementos, confinamiento inicial, bisección y esfuerzo desviador.

4.3.1. Ingreso de datos

En esta etapa se ingresan los datos de las propiedades de los elementos y de los parámetros de las simulaciones. Para evitar una doble repetición de los parámetros y

propiedades estas se explicaran con más detalle en los próximos apartados. Es importante destacar que para poder iniciar una simulación se debe ingresar previamente estos datos.

4.3.2. Generación de elementos

En esta etapa se generan los dos elementos, las esferas y las paredes.

4.3.2.1. Esferas

Las esferas son los elementos de la simulación que representan los granos de suelo. Las esferas pueden trabajar de forma individual o unidas formando unidades mayores denominadas clumps. Los clumps al ser esferas unidas poseen las propiedades de cada esfera que las forma.

Las esferas tienen propiedades físicas como masa, inercia rotacional en los 3 ejes, radio y ángulo de fricción entre partículas. Estos valores se pueden establecer directamente o ser calculados con las propiedades del material que le es asignado.

Una vez designadas las propiedades básicas de las esferas se puede definir si su granulometría va ser monotamaño o ajustada a una curva granulométrica. Para la distribución de las esferas existe la posibilidad de elegir individualmente su posición o utilizar un algoritmo aleatorio que distribuye las esferas dentro de un paralelepípedo, en la simulaciones realizadas se utilizó el algoritmo aleatorio, pero se seteó la semilla para tener siempre la misma distribución de partículas al inicio, lo que asegura una regularidad en el comportamiento.

Con las propiedades básicas de las esferas se pueden optar a generar estructuras de clumps, como ya fue mencionado en el apartado anterior, los clumps son unión de esferas. Para poder generar computacionalmente los clumps se debe ingresar las esferas con sus propiedades físicas, (material, radio) y su posición relativa dentro del clumps. Una vez determinado el clumps individual, se procede con un método aleatorio a distribuir las partículas dentro del paralelepípedo, este algoritmo también se preocupa que la dirección

de las partículas no sea la misma.

4.3.2.2. Paredes

La paredes son los elementos que imponen las condiciones de borde para generar las deformaciones y esfuerzos internos y evitar que las partículas se escapen de la simulación. En términos generales estas paredes se consideran rígidas debido a que el módulo de elasticidad que se les impone es alto. Éstas tienen la capacidad de moverse sólo en dirección normal al plano, el giro en torno a cualquier eje esta restringido. Por lo tanto, para imponer la condición de membrana flexible se setea el movimiento de las paredes tal que provoque una fuerza equivalente al confinamiento. Para el caso de la deformación vertical se impone que el movimiento de la pared sea tal que provoque una velocidad de deformación constante. Estas condiciones de borde se pueden cambiar durante la simulación. La variación de las condiciones de borde se utiliza cuando se desea pasar de la fase de compactación a la de ensaye. Para disminuir efectos de borde no deseados entre la interacción esfera-pared, en las interacciones esfera-pared solo actúan las fuerzas normales y no hay roce entre pared-esfera.

4.3.3. Confinamiento Inicial

En esta etapa los elementos que ya fueron generados comienzan a interactuar, a reconocer los contactos y fuerza de gravedad. Yade, para forzar los contactos y llegar a un estado de equilibrio sin perder la proporción inicial para el calculo de esfuerzos y deformaciones, fija las paredes y comienza a expandir el radio de las esferas hasta que se cumplen dos parámetros: equilibrio de movimiento, en donde las partículas se encuentren en reposo y sin velocidad y equilibrio de fuerzas, tal que la sumatoria de fuerzas sobre las paredes provocada por las partículas sea equivalente al confinamiento. Una vez que se cumplen estos dos parámetros se puede decir que la muestra virtual esta compactada y lista para iniciar el ensaye triaxial. La porosidad a la que llega la muestra de suelo no se puede determinar de forma previa, pero sí se puede controlar el valor aumentando o disminuyendo el ángulo de fricción en la fase de confinamiento, es por eso que se utiliza dos ángulos

de fricción uno para el ensaye y otro para la fabricación. Un problema que presenta esta etapa es la incapacidad de controlar la granulometría real del ensaye debido a que ésta varía cuando aumentan los radios, por esta causa se generó una algoritmo que controla el tamaño inicial de las esferas, para obtener la granulometría deseada.

4.3.4. Método de la bisección

Este método regula el tamaño inicial de la partícula para que después de la fase de Confinamiento Inicial tenga la granulometría deseada. Para este método se utilizó una desviación del 5 % como rango de aceptabilidad. El método consiste en tomar un rango que provoque una granulometría inferior y superior a la deseada, esto asegura que dentro de estos margenes existe solución. Se prueba con el valor del medio, se genera las fase de confinamiento inicial y al final de ésta se comprueba si el valor obtenido está dento del rango de aceptabilidad, si es así se queda con la solución, si no se determina el nuevo rango de posibles soluciones y se vuelve a intentar hasta que se logra la granulometría deseada. Para tener un registro de la granulometría definitiva que se utilizará en las simulaciones, se guardan en un archivo de texto todos los diámetros de las partículas.

4.3.5. Esfuerzo Desviador

La etapa del esfuerzo desviador es la simulación propiamente tal del ensaye triaxial. En esta fase se pretende recrear el confinamiento, el esfuerzo desviador y la deformación del suelo. Para esto se deben cambiar las condiciones de desplazamiento de las paredes. Las paredes superior e inferior se desplazan de manera que la velocidad de deformación de la muestra se mantenga constante. Las paredes laterales se mueven de manera que la fuerza sobre éstas sea equivalente al confinamiento. A medida que se desarrolla esta fase se registran los datos de deformación, esfuerzo, posición de las paredes, desbalance de fuerza, equilibrio interno, porosidad, tiempo transcurrido en la simulación y el real y número de iteraciones. Esta base de datos es la utilizada para comparar respuesta simulada con respuesta real.

4.4. Sensibilización

En el presente apartado se pretende presentar cómo influyen ciertos parámetros en el modelo, para poder tener una mayor comprensión de la respuesta de éste.

4.4.1. Sensibilización Utilizando Esferas

Para las simulaciones con esferas se consideró como parámetro una prueba con alrededor de 4000 elementos, con un confinamiento de 100000[*pa*], un radio de 2,3812[*mm*] y con la semilla de generación seteada en 1, lo que se traduce, que se utilizaran la misma distribución inicial de las partículas, a así no introducen elementos de variabilidad. A esta simulación base, se fueron variando los parámetros para poder conocer como influían en la respuesta del modelo.

4.4.1.1. Influencia del Ángulo de Fricción en Fase de Fabricación

En las figuras 4.10, 4.11, 4.12 se presenta como varía la respuesta esfuerzo-deformación para distintos distintos ángulo de fricción en la fabricación, para tres condiciones de ángulo de fricción en el ensaye.

De las gráficas se puede apreciar que a medida que se aumenta el ángulo de fricción en la fase de fabricación se produce un aumento de la resistencia máxima, pero la resistencia residual, después de la falla del material, es similar e independiente del proceso de fabricación. De lo anterior se puede afirmar que para este modelo, el esfuerzo residual es independiente del estado inicial de las partículas en cambio el esfuerzo máximo si depende del estado inicial de la partículas.

En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se presenta como varía la porosidad para los tres estados antes mencionados. Es importante mencionar que la función encargada en calcular la porosidad es bastante inestable y los datos obtenidos deben ser analizados con cuidado. De

los gráficos de porosidad se puede observar que a medida que se disminuye el ángulo de fricción en la fabricación disminuye la porosidad logrando un estado de trabazón interna mayor. Esto causa que las simulaciones con menor porosidad inicial logren resistencias más elevadas que los con porosidad mayor. Por lo tanto el ángulo de fricción en la fabricación determina la porosidad inicial de la muestra y su máxima resistencia.

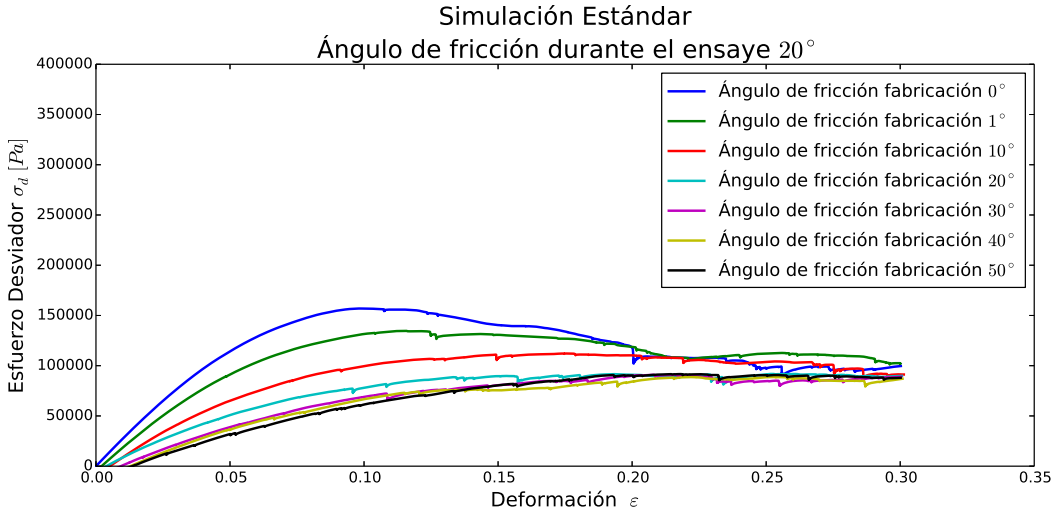


Figura 4.10: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 20°

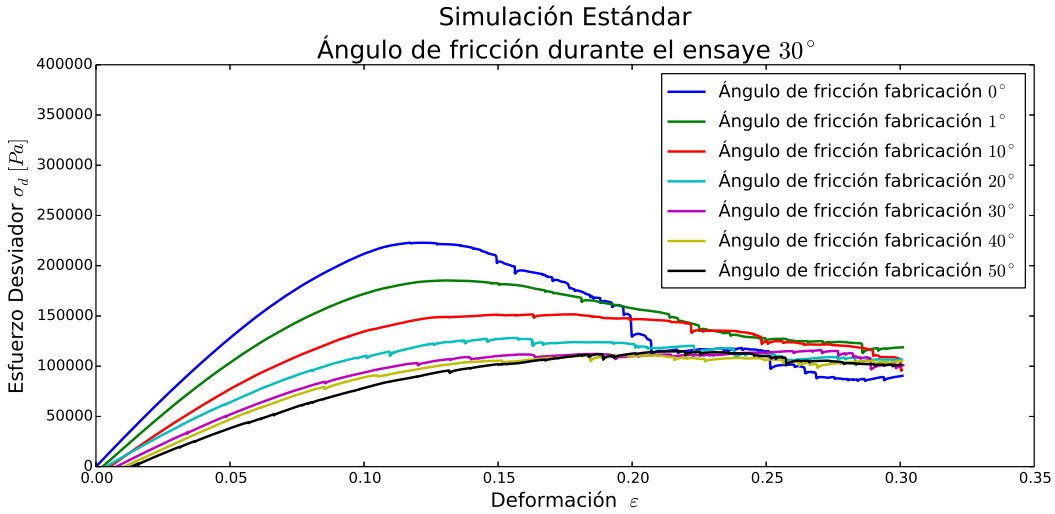


Figura 4.11: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 30°

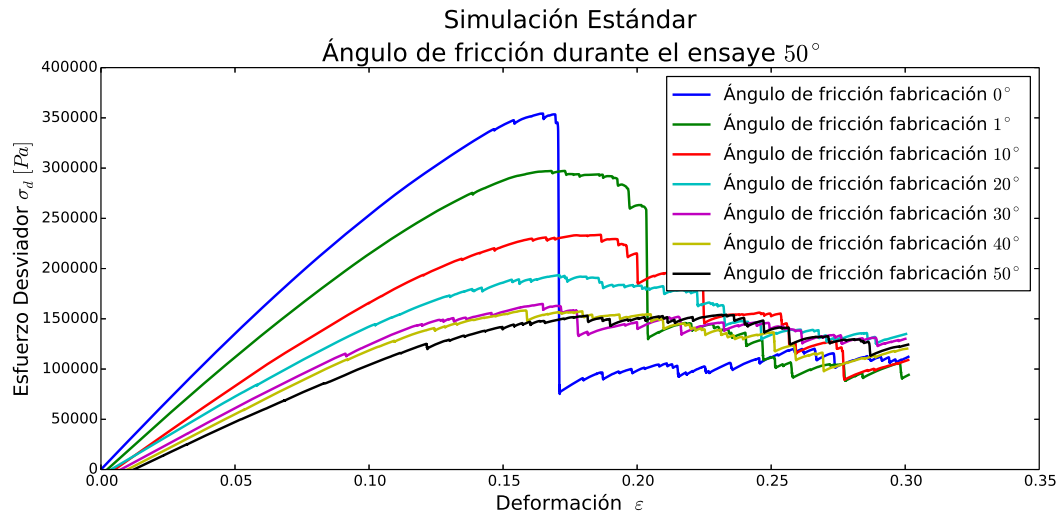


Figura 4.12: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante el ensaye 50°

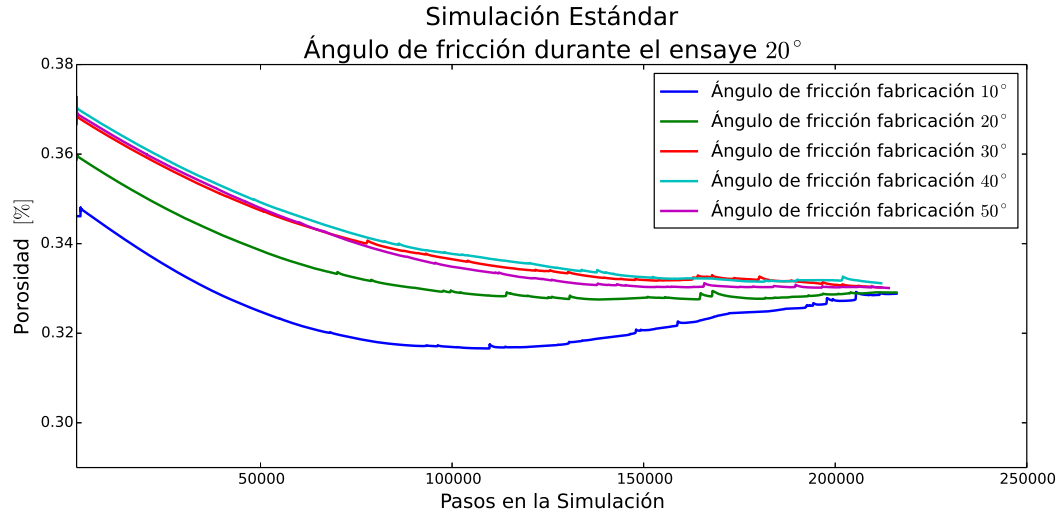


Figura 4.13: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 20°

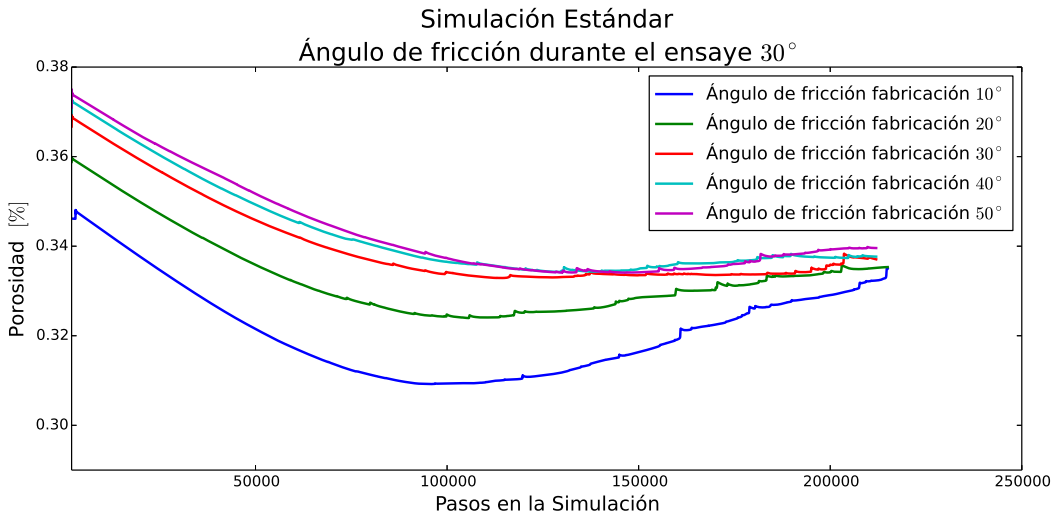


Figura 4.14: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 30°

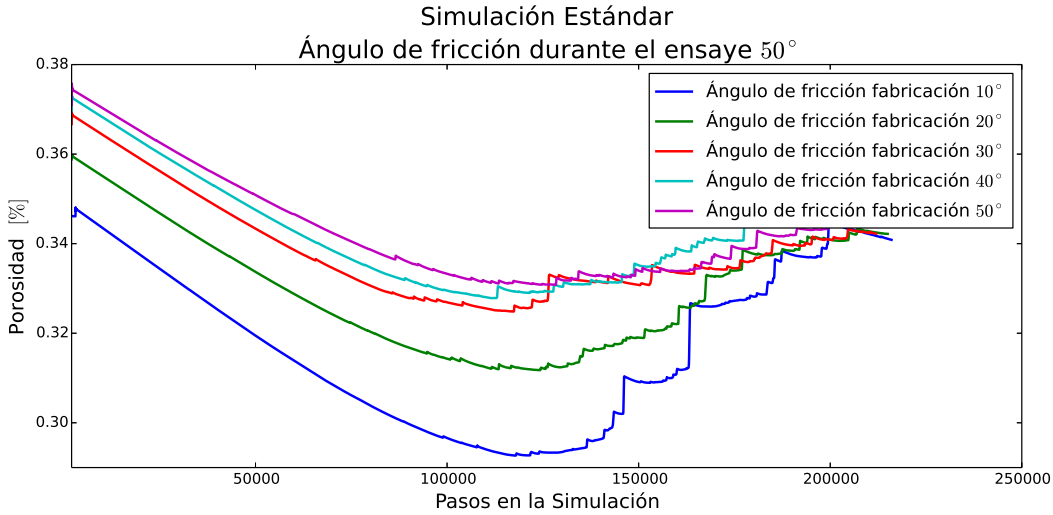


Figura 4.15: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante el ensaye 50°

4.4.1.2. Influencia del Ángulo de fricción en ensaye

En las figuras 4.16, 4.17, 4.18 se presenta como varía la respuesta esfuerzo-deformación para distintos ángulo de fricción en el ensaye, para tres condiciones de ángulo de fricción en la fabricación.

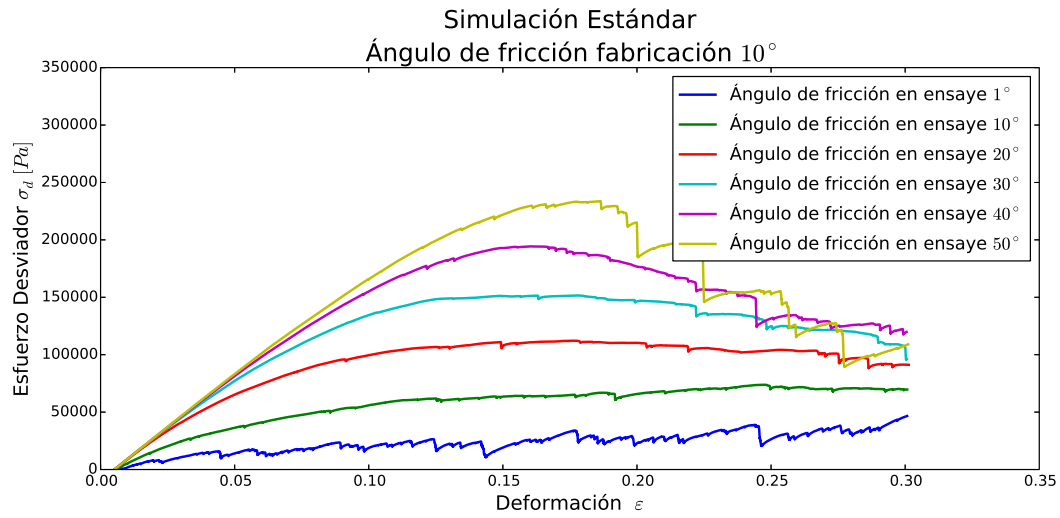


Figura 4.16: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 10°

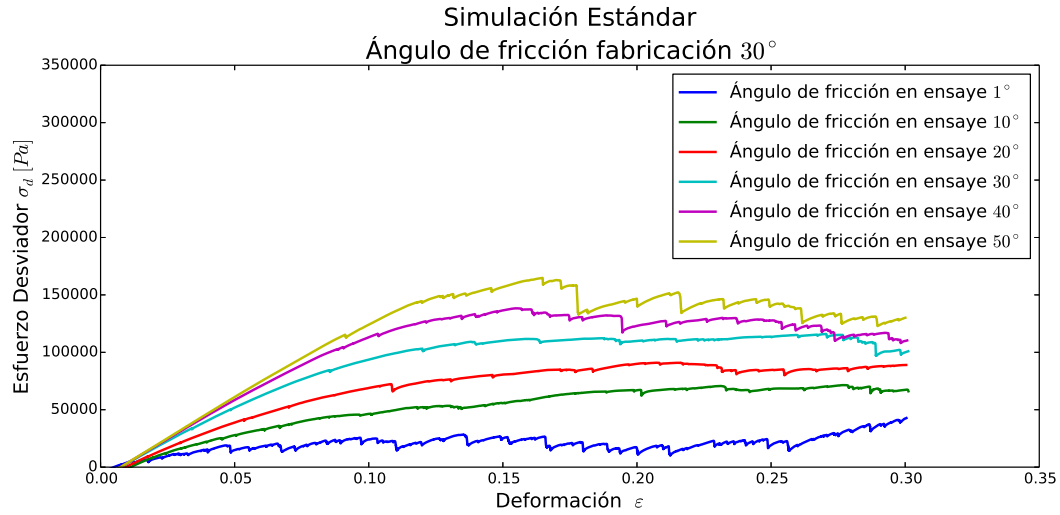


Figura 4.17: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 30°

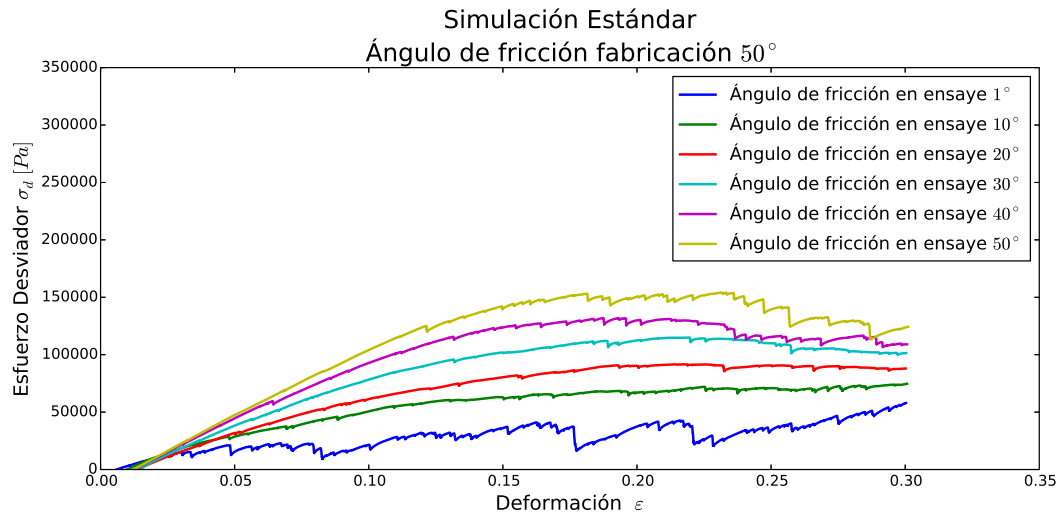


Figura 4.18: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción durante la fabricación 50°

De las gráficas se puede apreciar que para una misma condición inicial de fabricación, a mayor ángulo de fricción mayor será la resistencia máxima que presenta la muestra. Por lo tanto la resistencia máxima de una muestra en el modelo depende por lo menos de dos factores: el ángulo de fricción en el proceso de fabricación y en el ensaye. Lo anterior significa que se puede llegar a esfuerzos máximos similares variando estos dos parámetros, por lo tanto el problema de modelación no asegura unicidad de solución.

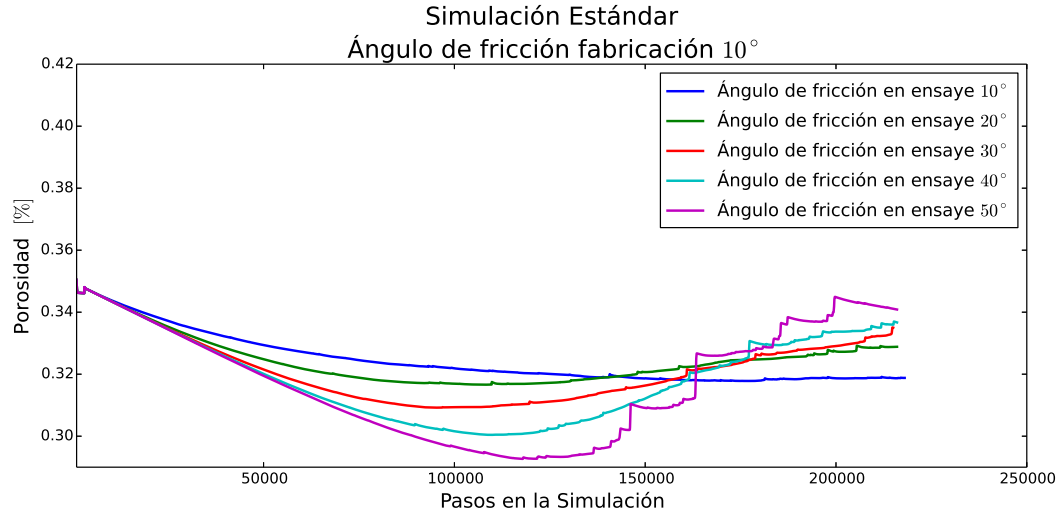


Figura 4.19: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante la fabricación 10°

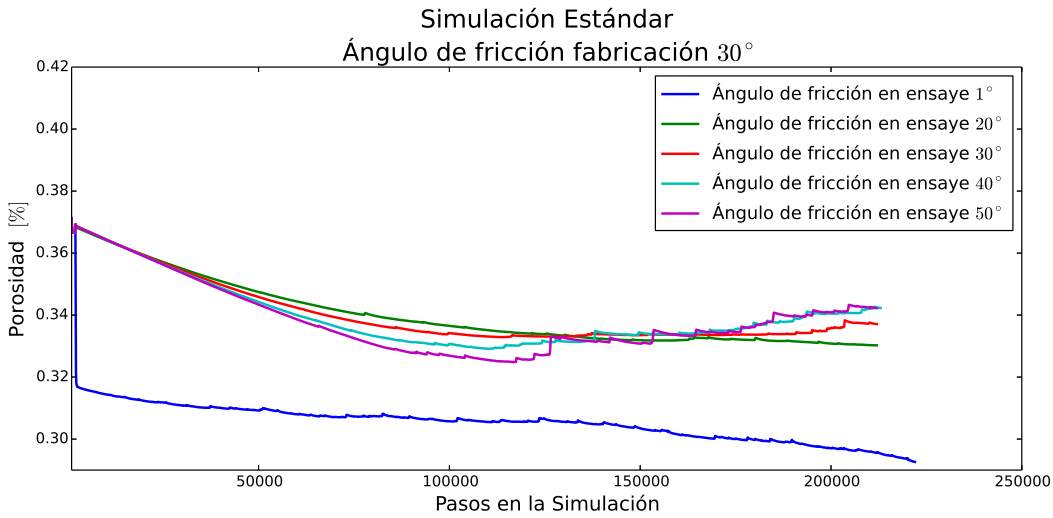


Figura 4.20: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción durante la fabricación 30°

En las figuras 4.19 y 4.20 se presenta como varía la porosidad para dos de la simulaciones mencionadas. En estos gráfico se puede apreciar que para todas las simulaciones el valor inicial es similar, pero el grado de compactación máximo que se puede lograr depende del ángulo de fricción en el ensaye. Las simulaciones con mayor ángulo de fricción en el ensaye logran compactaciones menores esto se debe a que dificulta la compactación. Como ya fue mencionado la función que calcula la porosidad es inestable, un ejemplo de esto es puede ver en la figura 4.20, donde para una ángulo de fricción en el ensaye de 1° se obtiene un comportamiento fuera de lo normal, pero una ángulo de fricción de 1° no es representativo de ningún material usado comúnmente en la vialidad.

4.4.1.3. Influencia del Confinamiento

En las figuras 4.21 y 4.22 se presenta como varía la respuesta esfuerzo-deformación para distintos distintos confinamientos. Como era de esperar, a medida que aumenta el confinamiento aumenta el esfuerzo máximo que soporta la muestra. También para ambos casos a medidas que aumentaba el confinamiento el esfuerzo máximo se generaba a una deformación mayor. Este comportamiento coincide con la realidad de materiales granulares.

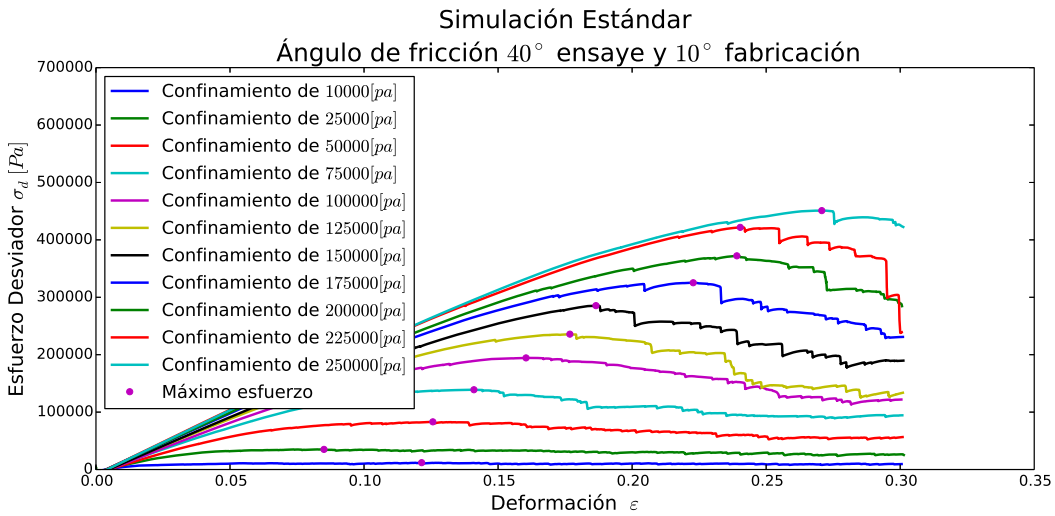


Figura 4.21: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación

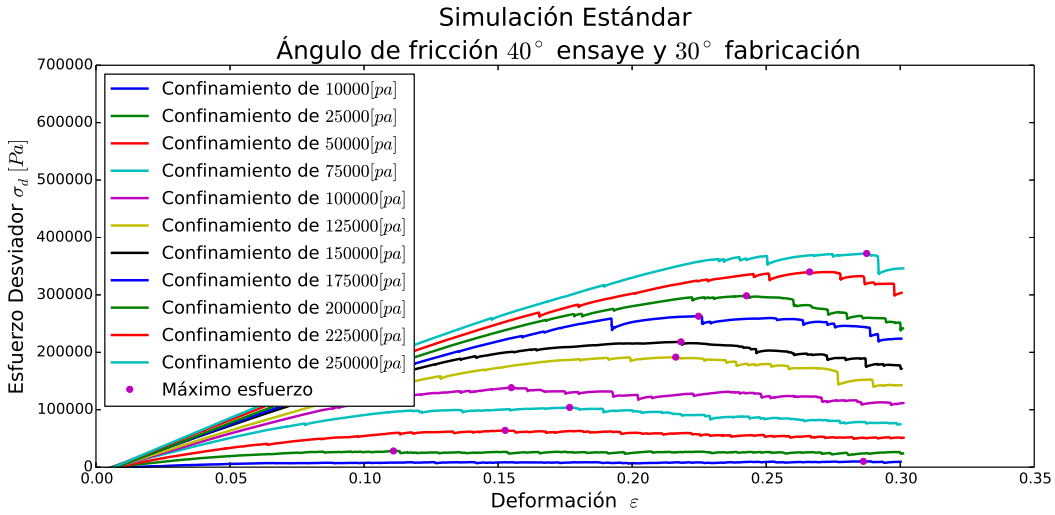


Figura 4.22: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación

En las figuras 4.23 y 4.24 se presenta como varía la porosidad. Como es de esperar a medida que se realiza un proceso de fabricación con mayor confinamiento las partículas quedan más unidas, generándose una porosidad inicial menor. Este efecto se ve amplificado debido al bajo modulo de elasticidad utilizado en las simulaciones. Lo anterior provoca porosidades que son imposibles en la realidad. Un problema que presenta la función encargada de obtener la porosidad, es que no es capaz de considerar de buena forma la

deformación de las partículas en los cálculos, es por esta razón que se obtienen valores errados.

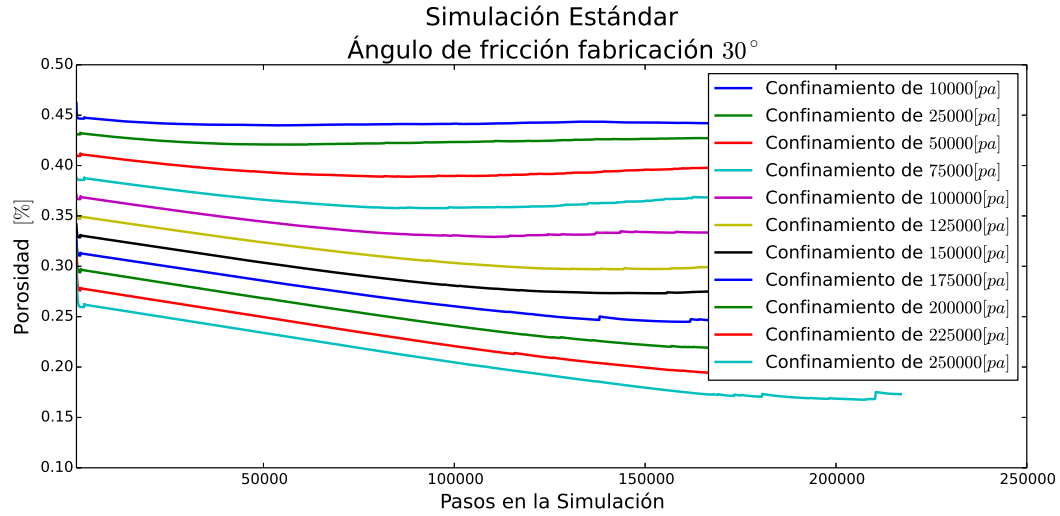


Figura 4.23: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación

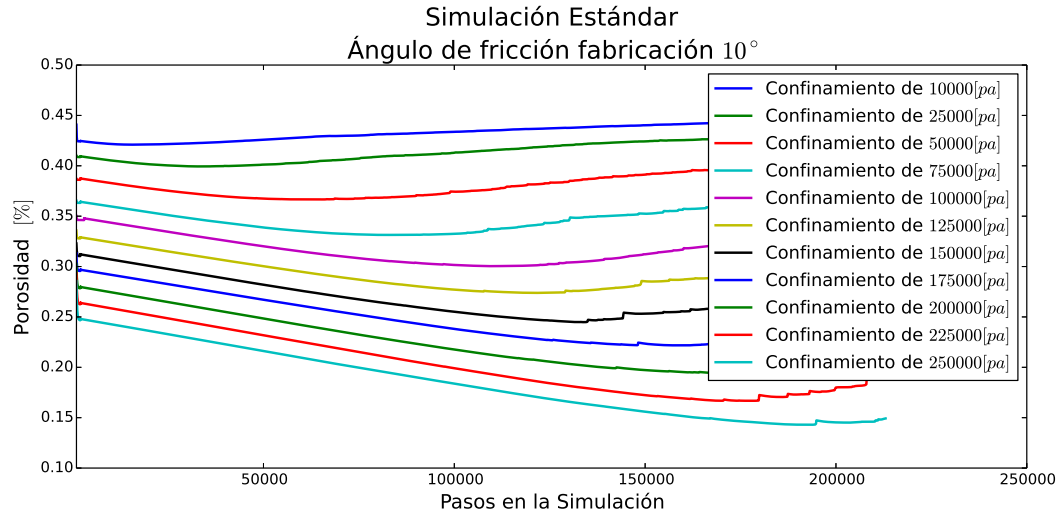


Figura 4.24: Simulación Estándar porosidad, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación

4.4.1.4. Influencia del Numero de Partículas

En las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.27, se presenta como varía la respuesta esfuerzo-deformación para distintas cantidades de elementos por simulación. Las gráficas se separaron en dos rangos, uno de 200 a 2000 y el otro de 4000 a 22000.

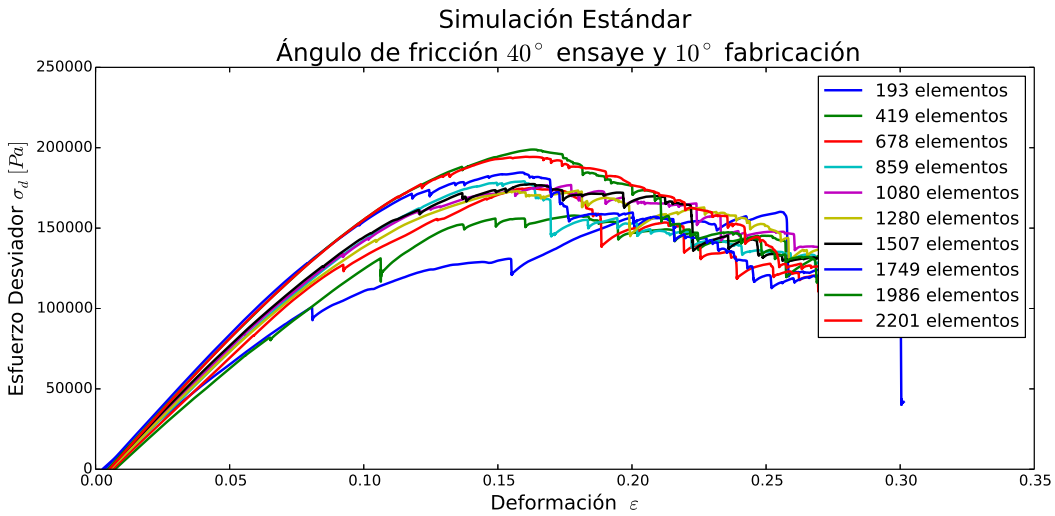


Figura 4.25: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación

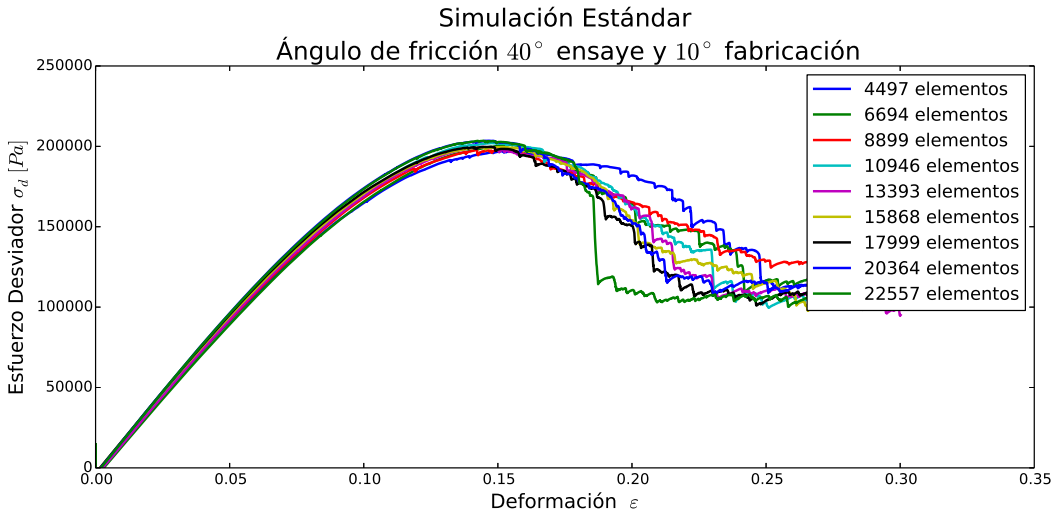


Figura 4.26: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación

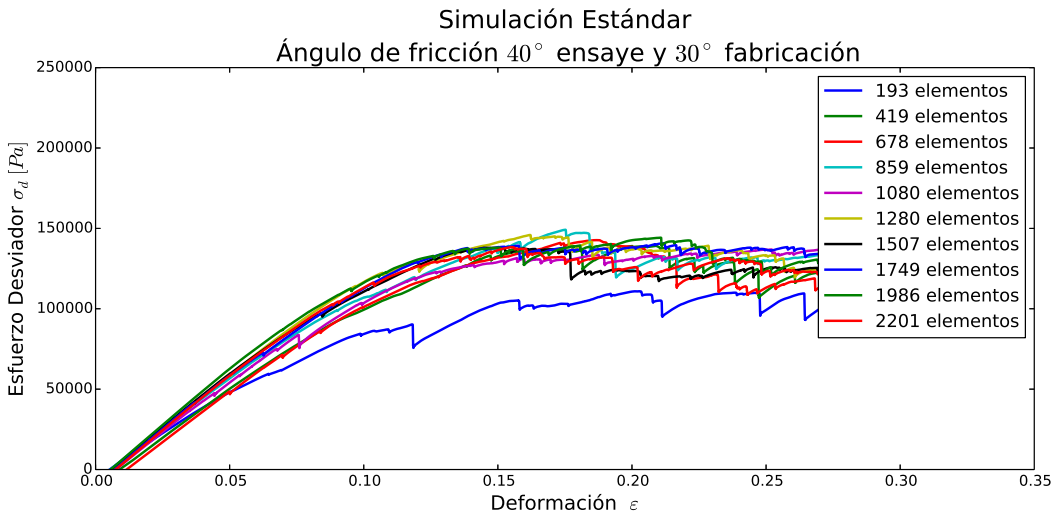


Figura 4.27: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación

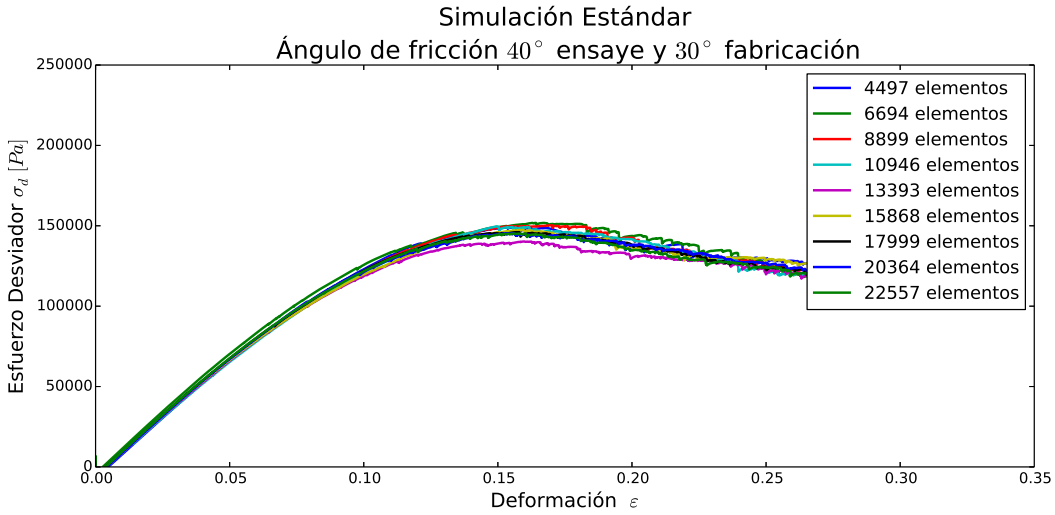


Figura 4.28: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación

De los gráficos antes mencionados se puede observar que los gráficos con más de 4000 partículas las respuesta es prácticamente la misma, en cambio los gráficos con menos elemento la respuesta era bastante ruidosa. Esto se debe a que en las simulaciones con pocos elementos los efectos microscópicos toman relevancia obteniéndose un resultado alejado de lo esperado. Por otro lado utilizar simulaciones con muchos elementos genera tiempos prolongados de simulación por lo que idealmente hay que compatibilizar estas dos variables, tiempo de simulación y representatividad. Para las simulaciones anteriores

utilizar 4000 elementos sería una número adecuado. Es importante hacer notar que la cantidad de elementos adecuada va a depender de la simulaciones que se este realizando.

4.4.1.5. Influencia del Coeficiente de Poisson

En las figuras 4.29 y 4.30se presenta como varía la respuesta esfuerzo-deformación para distintos distintos coeficientes de Poisson del material de las partículas.

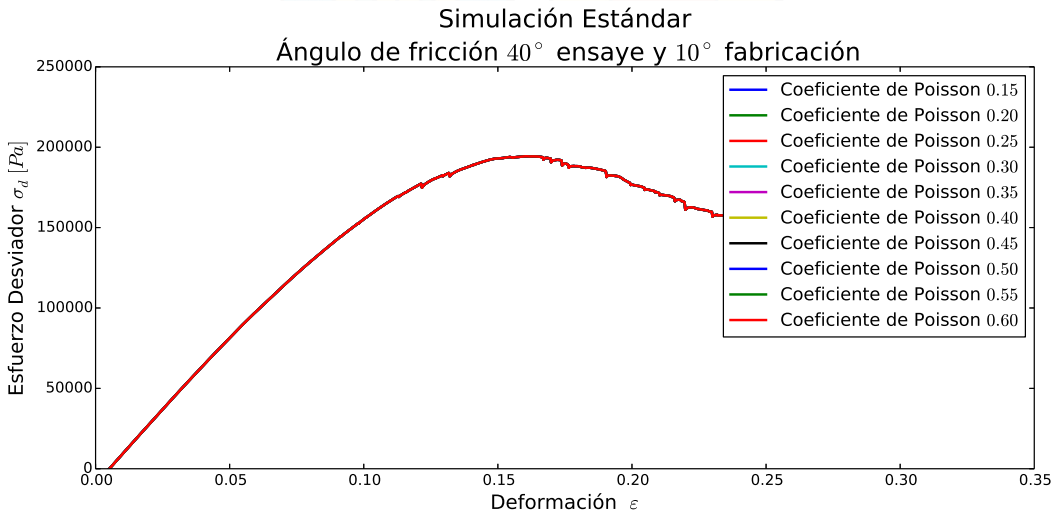


Figura 4.29: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 10° en la fabricación

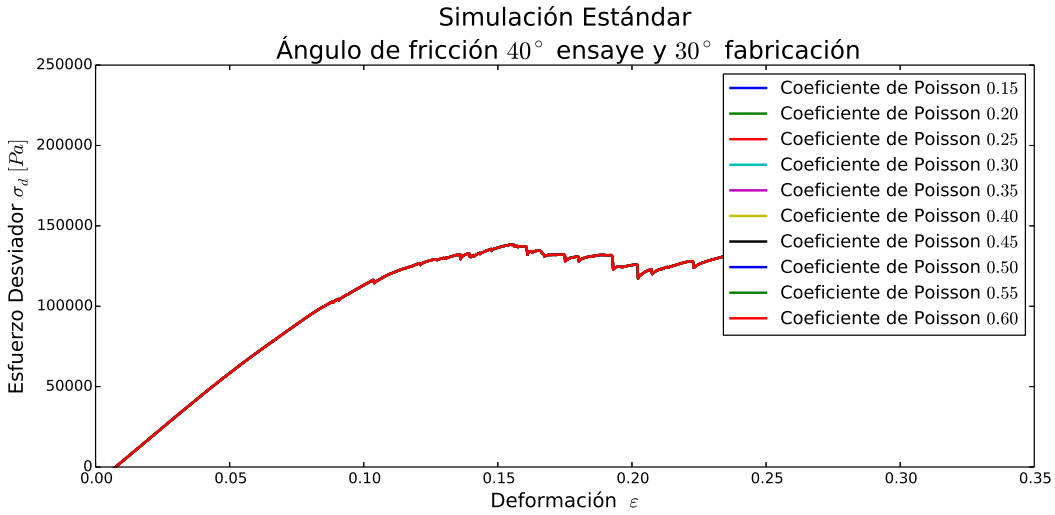


Figura 4.30: Simulación Estándar esfuerzo-deformación, ángulo de fricción 40° durante el ensayo y 30° en la fabricación

Como se puede apreciar de los gráficos antes mencionados, el modelo no es sensible al coeficiente de poisson, por lo que cualquier valor adoptado entre el rango de 0.15 a 0.5 no genera cambios importantes en las respuesta. Nótese que el programa puede trabajar con coeficientes de Poisson mayores a 0,5, correspondientes a materiales dilatantes.

5 | Comparación de Simulaciones con Resultados Experimentales

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas comparándolas con las curvas experimentales obtenidas. A continuación se presenta una serie de tablas, que muestran los parámetros utilizado en las simulaciones.

Simulaciones Rodamientos de Acero					
Confinamiento [PSI]	Número de Elementos	Ángulo de Fricción en Fabricación	Ángulo de Fricción en Ensaye	Semilla	Porosidad Inicial
2	2244	0 1 3 6 9	25 30 40 45 50 55	1	(0.386 - 0.422)
4	2244	0 1 3 6	30 40 45 50 55 60	1	(0.370 - 0.397)
10	2244	0 1 3 6 9 12 15 18 20 25 30 35	30 40 45 50 55 60	1	(0.326 - 0.391)

Simulaciones Microesferas de Vidrio					
Confinamiento [PSI]	Número de Elementos	Ángulo de Fricción en Fabricación	Ángulo de Fricción en Ensaye	Semilla	Porosidad Inicial
5	5229	0 3.75 7.5 11.25 15	30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60	1	(0.354 - 0.410)
10	5229	0 3.75 7.5 11.25 15	30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60	1	(0.323 - 0.380)
20	5229	0 3.75 7.5 11.25 15	30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60	1	(0.271 - 0.327)

Simulaciones Simulaciones Granito Meteorizado Clumps Diédrico					
Confinamiento [PSI]	Número de Elementos	Ángulo de Fricción en Fabricación	Ángulo de Fricción en Ensaye	Semilla	Porosidad Inicial
5	10000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.281 - 0.377)
10	10000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.262 - 0.349)
20	10000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.228 - 0.309)

Simulaciones Microesferas de Vidrio Simulaciones Simulaciones Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico					
Confinamiento [PSI]	Número de Elementos	Ángulo de Fricción en Fabricación	Ángulo de Fricción en Ensaye	Semilla	Porosidad Inicial
5	12000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.281 - 0.377)
10	12000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.253 - 0.349)
20	12000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.219 - 0.312)

Simulaciones Simulaciones Granito Meteorizado Clumps Octaédrico					
Confinamiento [PSI]	Número de Elementos	Ángulo de Fricción en Fabricación	Ángulo de Fricción en Ensaye	Semilla	Porosidad Inicial
5	22000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.275 - 0.372)
10	22000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.258 - 0.359)
20	22000	0 1 3 10 20	30 33 37.5 40 45 50 60	1	(0.227 - 0.323)

5.1. Simulación Rodamientos de Acero

En este apartados se presentan una serie de figuras con los resultados obtenido de las simulaciones computacionales comparando con los datos obtenidos de forma experimental en el LNV.

En el Anexo A se presenta una barrido con la sensibilización de distintos parámetros como es el ángulo de fricción en la generación y en el transcurso del ensaye. Para estas simulaciones se utilizó las esferas como forma de partícula en la simulación debido que los rodamientos son esferas prácticamente perfectas. En las simulaciones se utilizaron al rededor de 2500 partículas.

De los gráficos del Anexo A se pudo observar que existen parámetros que permiten que las curvas simuladas se ajusten de mejor manera a la experimental. En las figuras 5.1, 5.2, y 5.3 se presentan las curvas con un mejor ajuste.

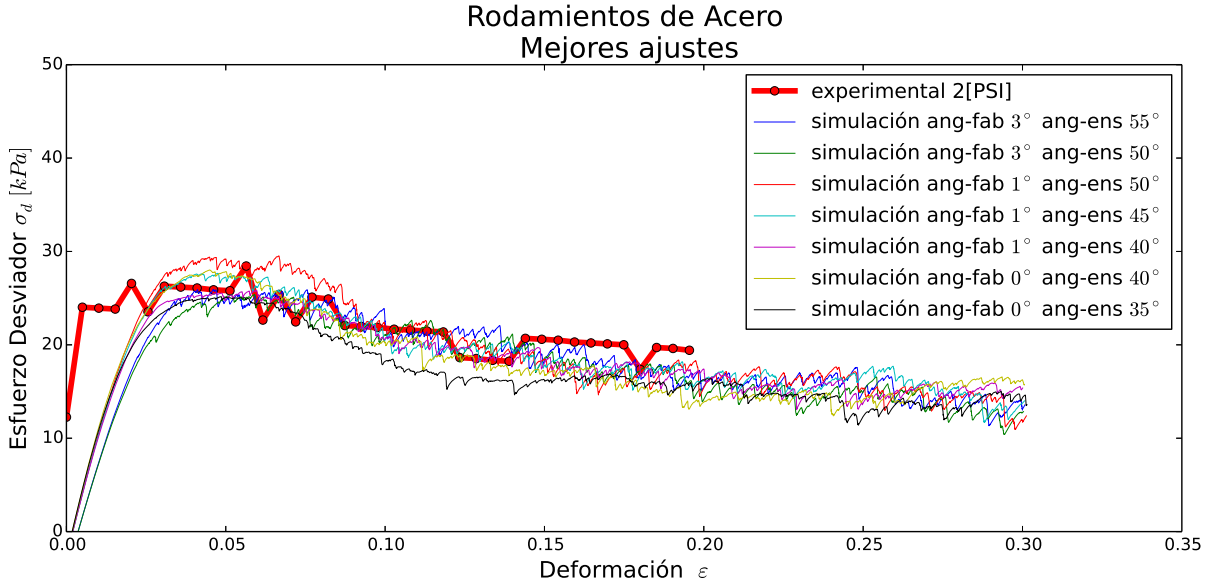


Figura 5.1: Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 2[psi], con buen ajuste

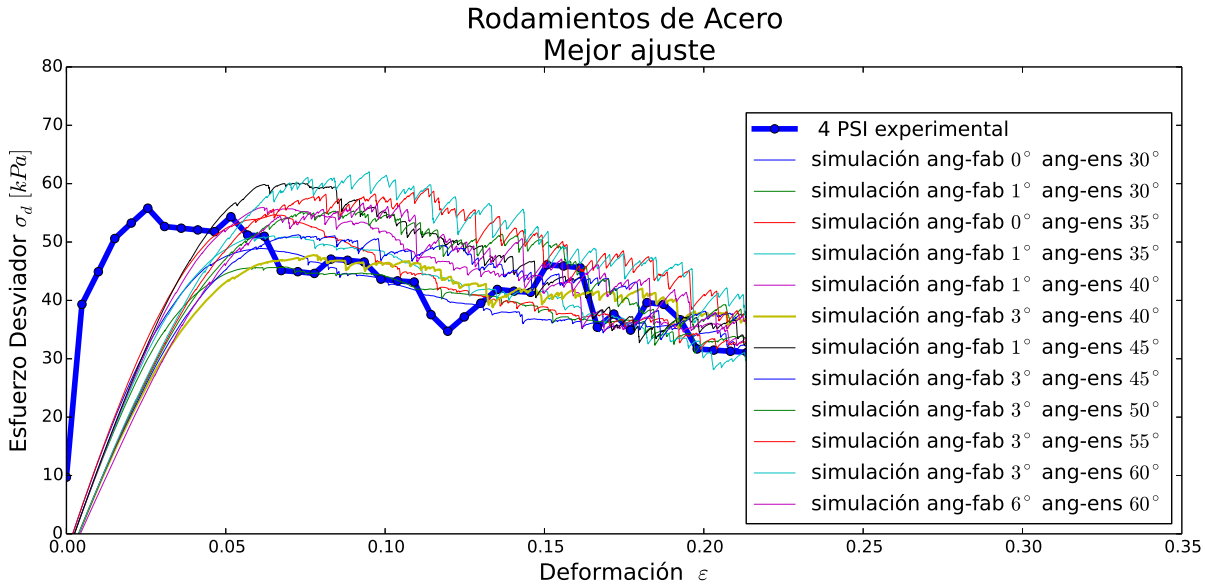


Figura 5.2: Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 4[psi], con buen ajuste

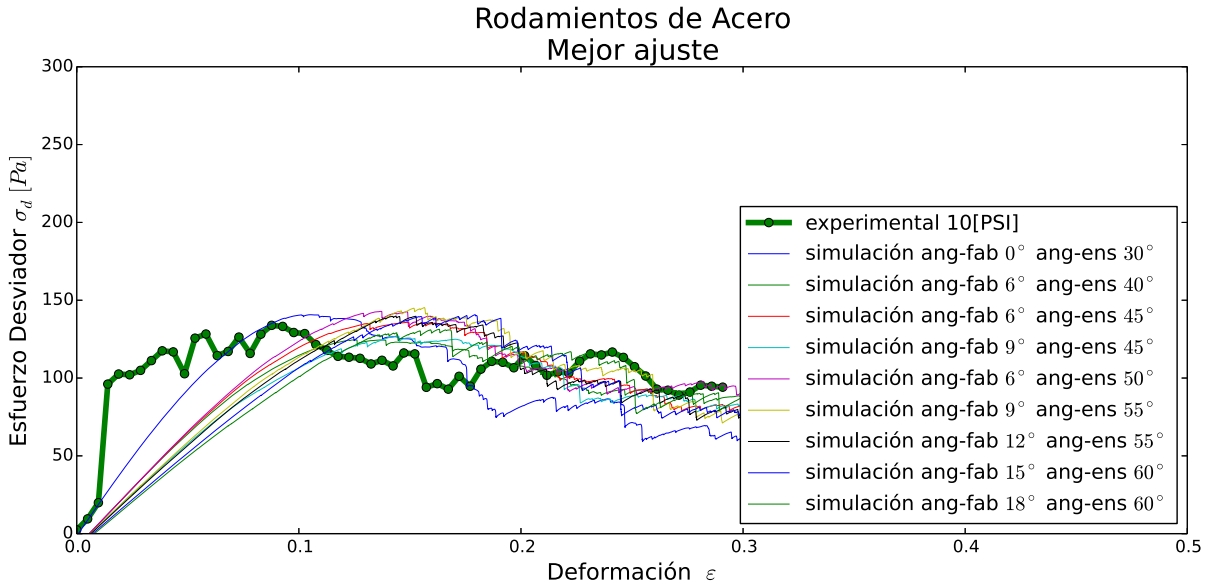


Figura 5.3: Simulación Rodamientos de Acero confinamiento de 10[psi], con buen ajuste

El criterio para evaluar que tanto se asemeja la curva simulada a la experimental, se consideraron los siguientes parámetros: forma de la curva, máxima resistencia antes de la falla, deformación de falla, módulo inicial de carga y resistencia residual.

De las curvas con mejor ajuste se observa que pueden estimar de manera aceptable

el valor de la resistencia máxima y residual, que se da cuando la muestra ya falló. Pero las simulaciones anteriores no logran estimar de buena forma lo que sería el módulo de elasticidad. Esto se puede atribuir a disminución del módulo de elasticidad de las partículas con el fin de generar simulaciones que se demoren un tiempo razonable, sin diverger. Posiblemente, si se pudiera simular con un módulo de partículas más cercano a la realidad, la curva lograría captar de mejor forma el módulo de la muestra. También es importante mencionar que si se llega a aumentar el módulo de las partículas, se debe aumentar el número de partículas en la simulación para poder controlar los efectos macroscópicos. Al aumentar el número de partículas, aumentan los costos computacionales y por consiguiente el tiempo de simulación.

Se puede observar del barrido de simulaciones que el valor de la resistencia residual es prácticamente el mismo, independiente de la compactación inicial o la resistencia máxima, lo que puede llevar a plantear esta técnica puede emular el comportamiento de materiales granulares en estado crítico.

También del barrido de simulaciones se puede plantear, que el estado inicial sí es relevante en la resistencia máxima. Por lo tanto la capacidad de soporte máximo del suelo está directamente influenciada por el grado de compactación. Por otro lado, cuando el suelo falla la capacidad de soporte es independiente del estado de compactación inicial y es una valor más o menos constante.

Es importante hacer notar que el ángulo de fricción interno obtenido por los círculos de Mohr, no es el mismo valor que el ángulo de fricción interno usado en las simulaciones, que corresponde al ángulo de fricción entre superficies usada.

Para poder entender de mejor manera cómo se comporta la porosidad inicial y el ángulo de fricción interno en relación con el ajuste, a medida que se varía el confinamiento en las simulaciones, se utiliza un gráfico bivariado donde en el eje de las ordenadas se encuentra el ángulo de fricción interna durante la simulación y en el eje de las abscisas se encuentra la

porosidad inicial. En estos gráficos los puntos marcados en color rojo son las simulaciones que presentan un ajuste aceptable y los puntos en azul son las simulaciones que no se ajustaron. Con estos datos se realizó una interpolación lineal generándose una superficie cromática donde la zona de color amarillo existe una mayor probabilidad de lograr un mejor ajuste, en cambio en la zona azul es poco probable lograr un ajuste adecuado. En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan las superficies cromáticas para los confinamientos de 2[PSI], 4[PSI] y 10[PSI].

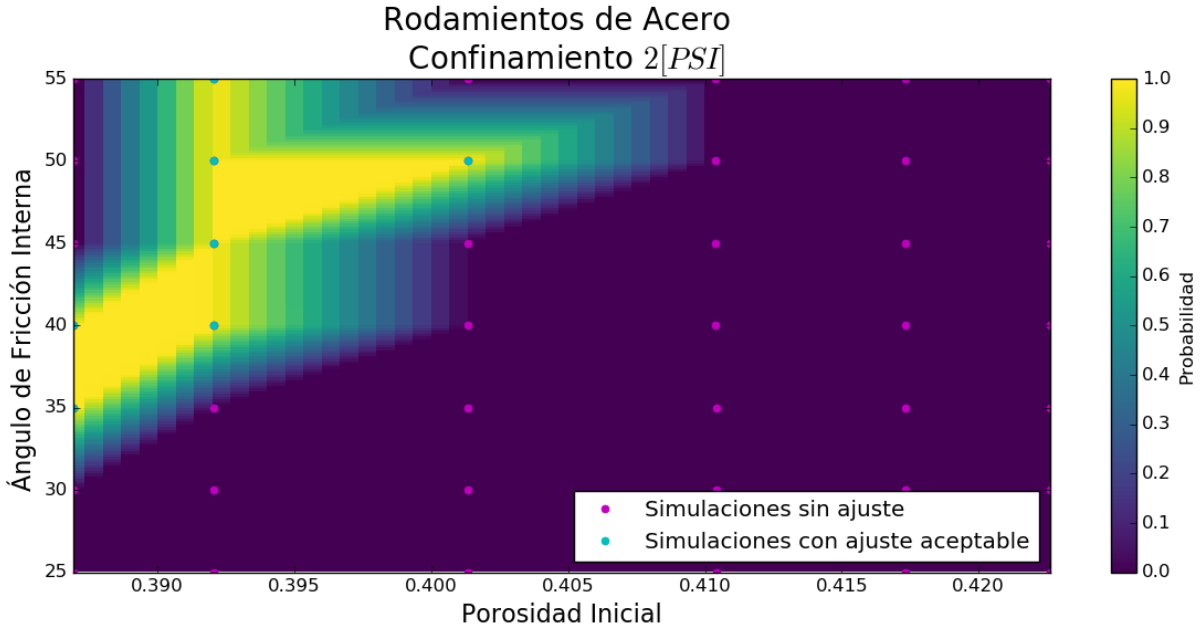


Figura 5.4: Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de 2[psi]

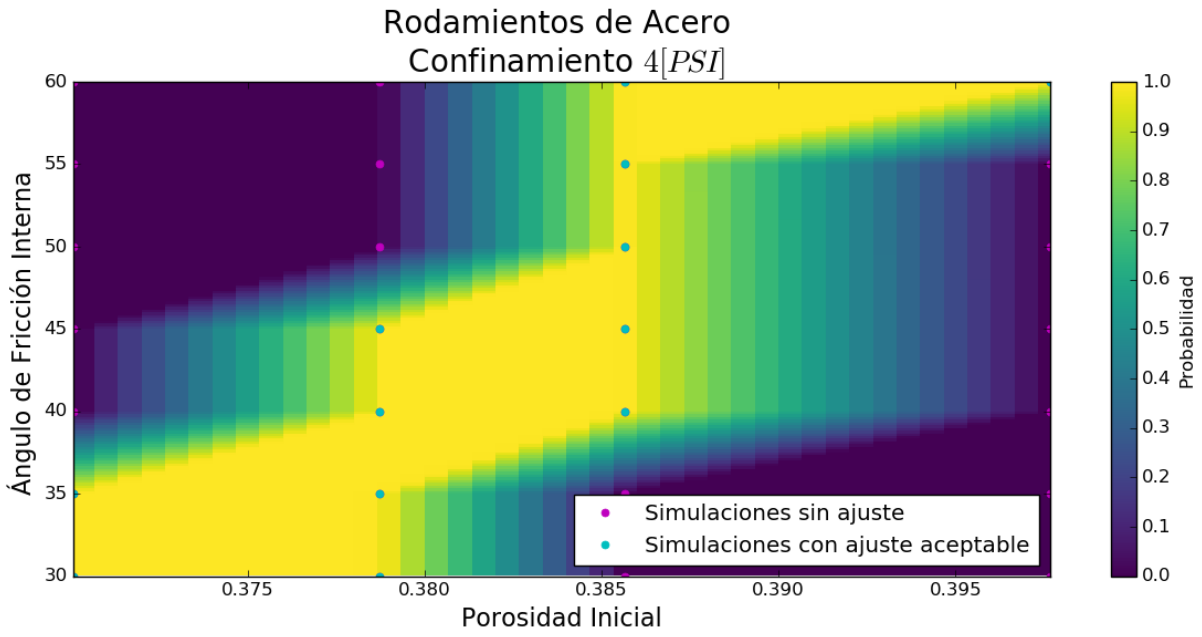


Figura 5.5: Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de $4[psi]$

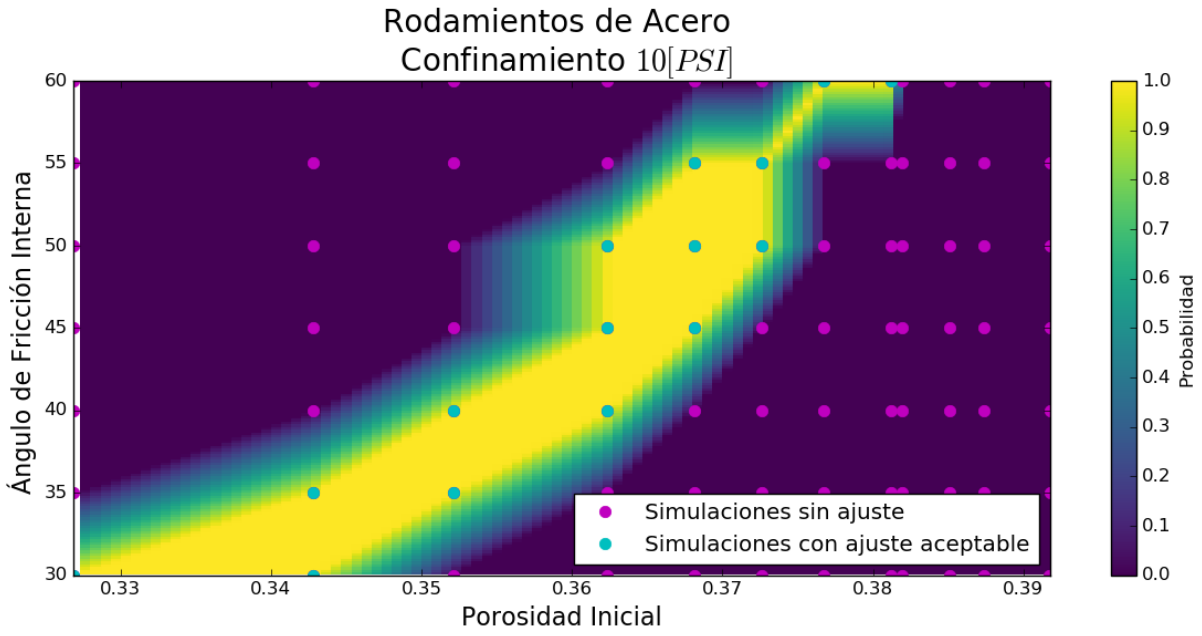


Figura 5.6: Gráfico de ajuste bivariados ángulo de fricción y porosidad inicial para Rodamientos con confinamiento de $10[psi]$

Se puede observar de los gráficos bivariados de ajuste 5.4, 5.5 y 5.6 que a medida que se aumenta el confinamiento, la porosidad disminuye. Este fenómeno se puede atribuir a

dos factores: el primero atribuible al proceso de fabricación, ya que en el al aumentar el confinamiento se utiliza mayor energía logrando una compactación mayor, el segundo se debe a un error en la estimación de la porosidad, esto sucede debido a que se utilizó una módulo de elasticidad pequeño, lo que significa que las esferas se pueden deformar, pero la función que calcula la porosidad no es capaz de contabilizar la disminución del volumen debido a esta deformación.

Es importante mencionar que generalmente el problema de la simulación de ensayes triaxiales es un problema matemáticamente insensible al punto de partida, esto significa que se puede llegar a una solución única sin tener los parámetros iniciales correctos debido a que no existe unicidad de solución. En otros palabras se pueden lograr resultados similares aumentando el ángulo de fricción y disminuyendo la porosidad inicial o viceversa.

5.2. Simulación con Microesferas de Vidrio

En este apartado se presenta una serie de figuras con los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales comparando con las obtenidas de forma experimental en el LNV.

En en anexo B se presenta un barrido con la sensibilización de distintos parámetros como es el ángulo de fricción en la generación y en el transcurso del ensaye. Para estos ensayes se utilizó las esferas como forma de partícula en la simulación debido a que las microesferas poseen una forma aproximadamente esférica, es importante destacar que las microesferas no poseen un radio único sino que poseen cierta variabilidad en el tamaño que fue acotada en el proceso de limpieza y tamizado, pero en las simulaciones computacionales se utilizó un tamaño único. En las simulaciones se utilizaron alrededor de 6000 partículas.

A continuación se presentan las gráficas que lograron ajustarse de mejor manera a los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio.

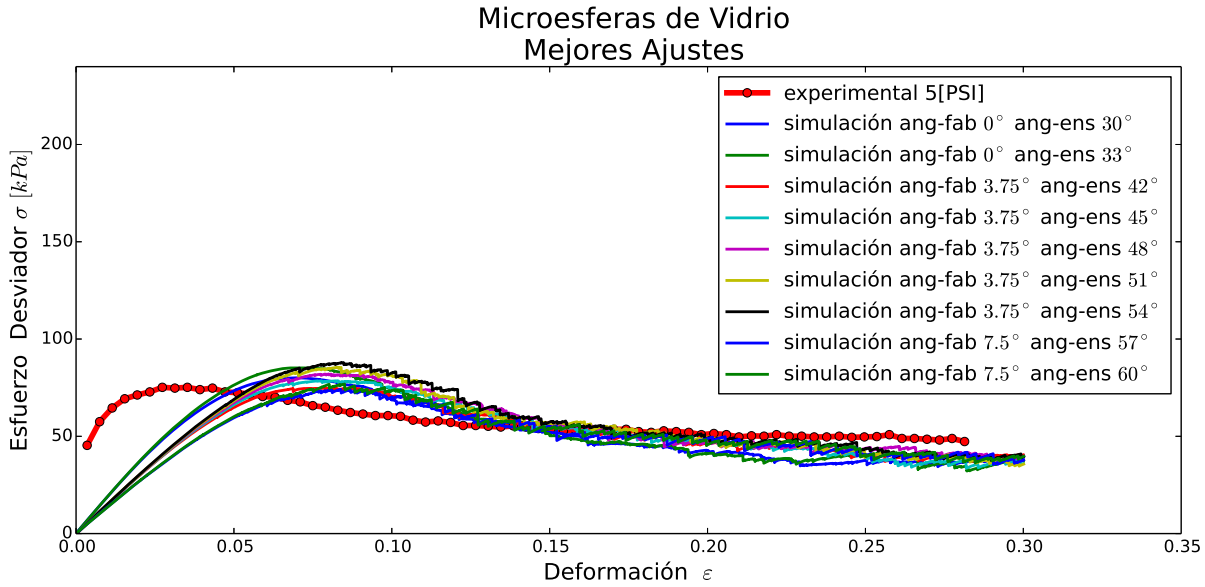


Figura 5.7: Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], con buen ajuste

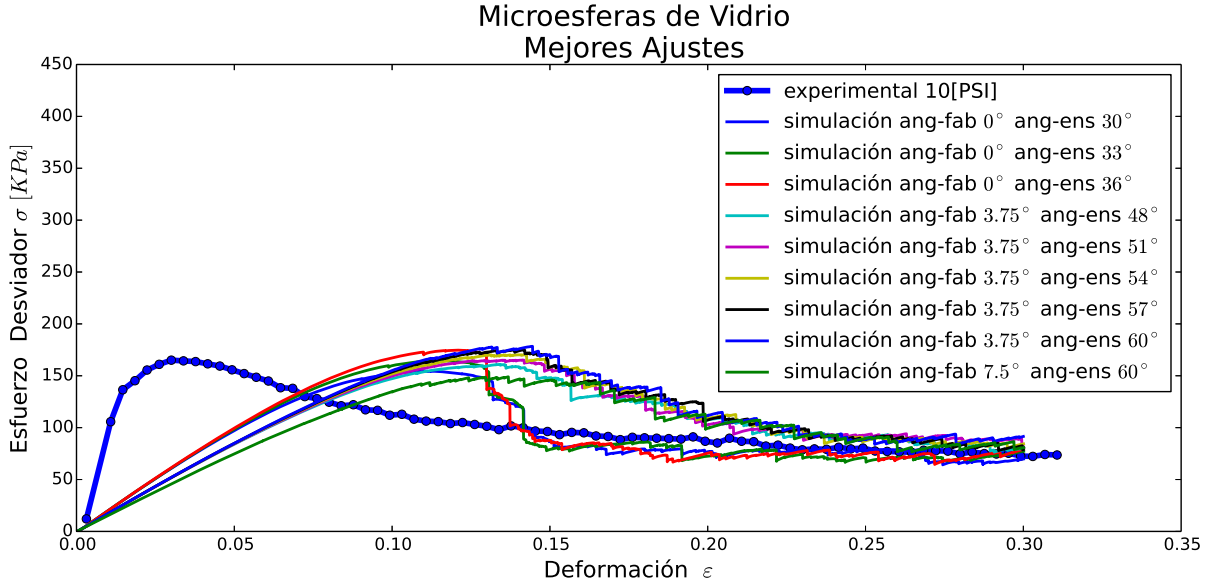


Figura 5.8: Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], con buen ajuste

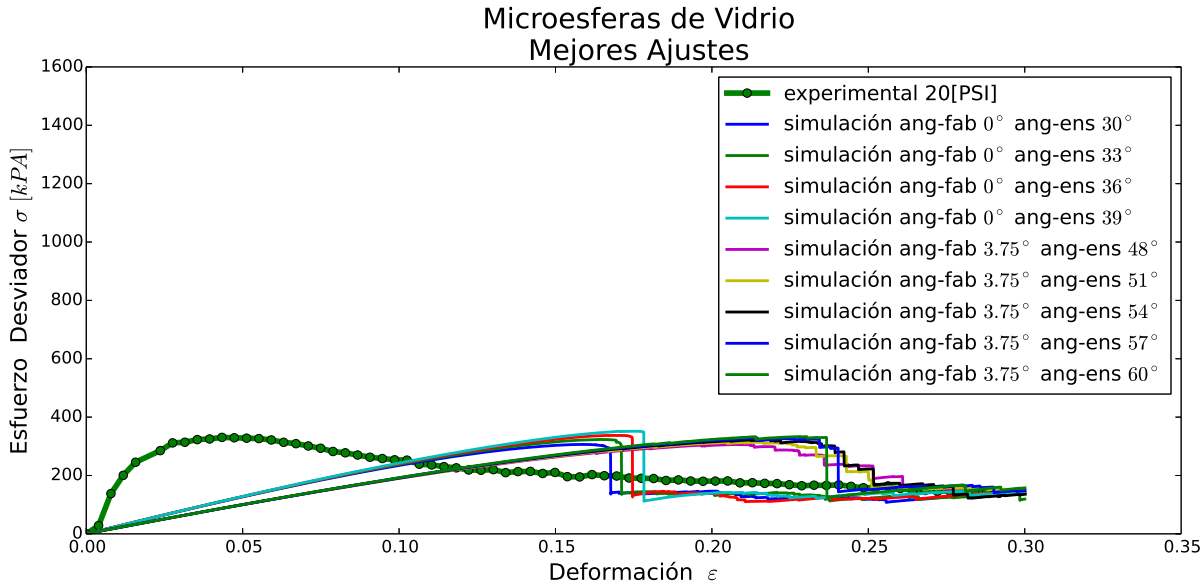


Figura 5.9: Simulación Micro Esferas de Vidrio confinamiento de 20[psi], con buen ajuste

A continuación se presenta gráficos bivariados donde el eje de las ordenadas se encuentra en ángulo de fricción durante el ensayo y en eje de las abscisas se encuentra la porosidad inicial. En estos gráficos los puntos marcados en color azul son las simulaciones que que presentan un ajuste aceptable y los puntos en rojo son las simulaciones que no se ajustaron.

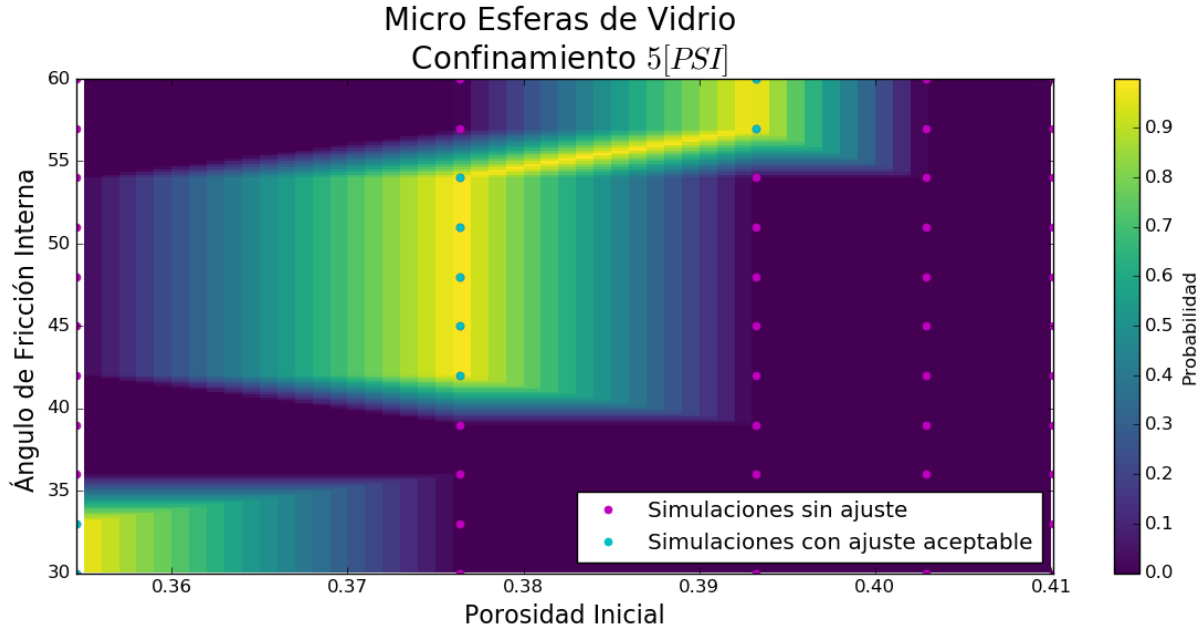


Figura 5.10: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 5[psi]

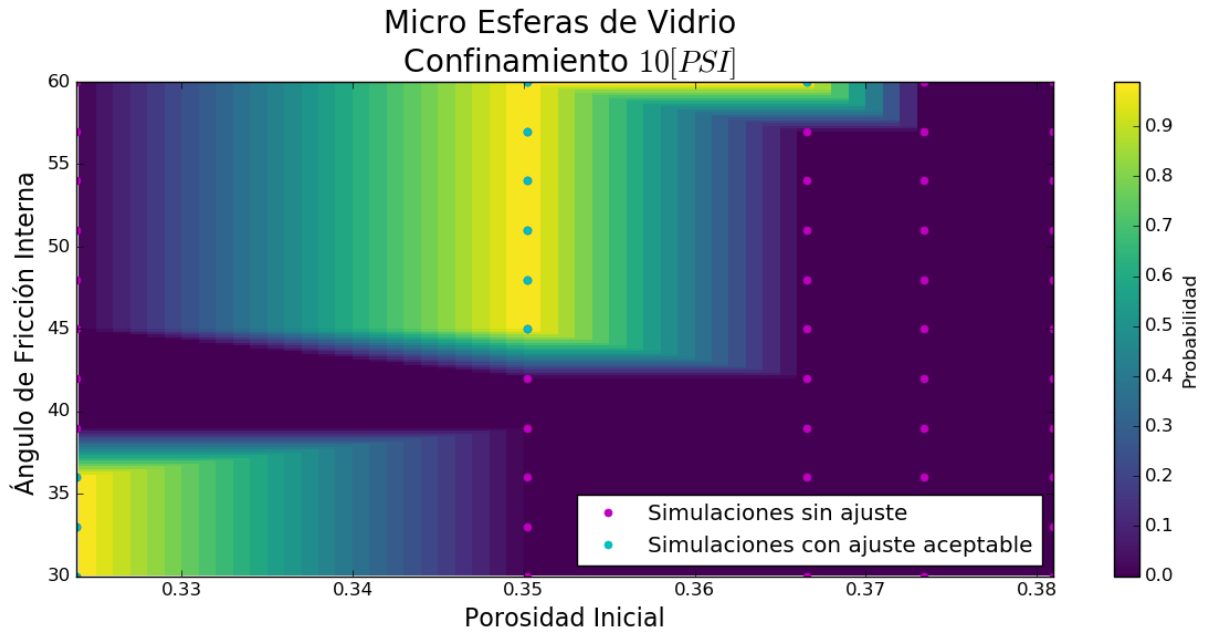


Figura 5.11: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 10[psi]

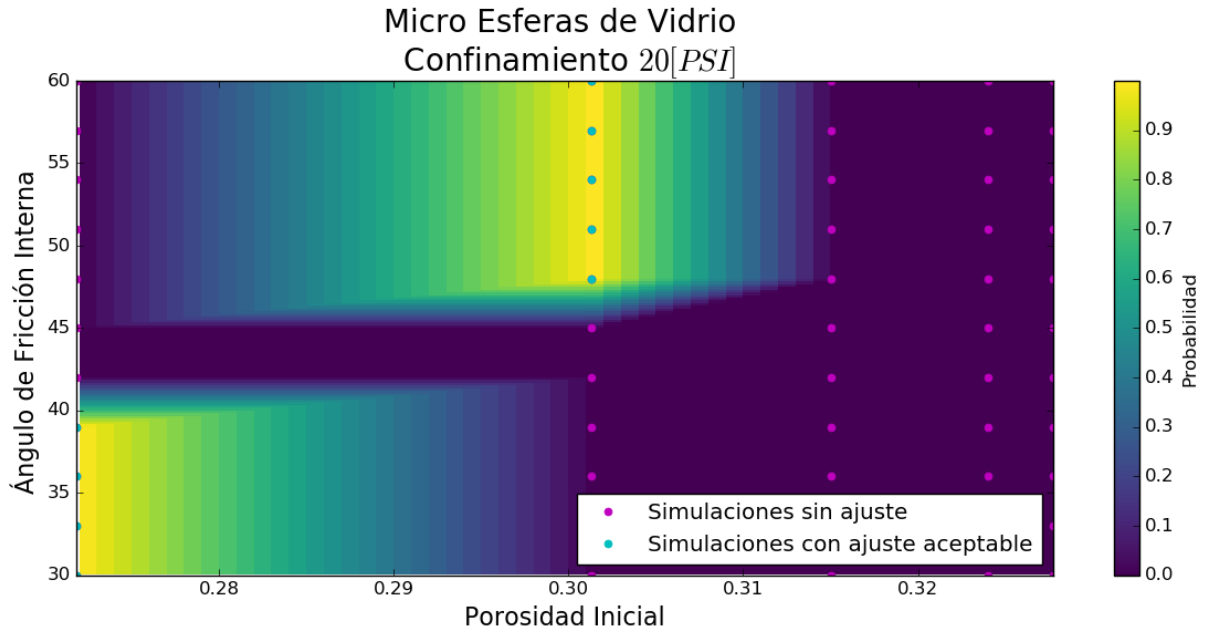


Figura 5.12: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad inicial para Micro Esferas de Vidrio con confinamiento de 20[psi]

Como se puede observar de las simulaciones presentadas, el modelo puede lograr reproducir de manera razonable la resistencia máxima y residual del suelo, pero no logra

asemejarse de buena manera cuando el suelo se esta cargando, esto es atribuible principalmente a la reducción del modulo de elasticidad en el modelo computacional para lograr tiempos menores de simulación. A medida que se aumenta el confinamiento la resistencia máxima tiende a desplazarse hacia deformaciones mayores, reproduciedo lo que ocurre en la realidad.

La buena respuesta de las simulaciones a la resistencia máxima y residual se le atribuyen a dos factores. El primero la similitud geométrica de las partículas de las simulaciones, esferas, con los elementos ensayados. El segundo es la granulometría acotada utilizada, donde la aproximación de utilizar un único tamaño de partícula en la simulación era razonable.

De los gráficos en el anexo B se puedo observar que al igual que el caso anterior de los Rodamiento de Acero, la resistencia residual es independiente de la compactación inicial.

De los gráficos bivariados 5.10, 5.11 y 5.12 existe una tendencia que indica, que a medida que aumenta la compactación inicial puede disminuir el ángulo de fricción durante el ensaye para lograr resistencia similares. Este comportamiento también se puede observar en suelos reales.

5.3. Simulaciones Granito Meteorizado

En este apartados se presentan una serie de figuras con los resultados obtenido de las simulaciones computacionales comparando con los datos obtenidos de forma experimental en el LNV.

En un principio se trató de simular el comportamiento del granito meteorizado utilizando esferas individuales pero los resultados obtenidos fueron bastante alejados de la realidad, es por esta razón que se decidió utilizar clumps. Estos clumps al poseer formas mas irregulares logran asemejar de mejor forma las interacciones que se dan entre granos

de suelo.

Al realizar simulaciones utilizando esferas individuales la resistencia residual era bastante inferior a las obtenida en los ensayes, esto se debe a que el mecanismo de falla no solo este determinado por los efectos fricciónales directos entre puntos de contacto, sino que exista un fenómeno de rodamiento del material que acelera la falla. Los cuerpos circulares o esféricos son los que oponen la menor resistencia al giro, por lo que el fenómeno de rodamientos se debe ver amplificado.

Debido a los problemas que presentaba las simulaciones con esferas individuales, se decidió utilizar 3 geometrías distintas: diédricas, tetraédricas y octaédricas. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada geometría, es importante destacar que se utilizó el criterio de radio equivalente expuesto en la sección 4.2.3

5.3.1. Clumps Diédricos

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se presentan las curvas con mejor ajuste para las simulaciones con dos esferas unidas, para confinamiento de 5[psi],10[psi] y 20[psi]. El barrido completo de simulaciones se puede encontrar en Anexo C.

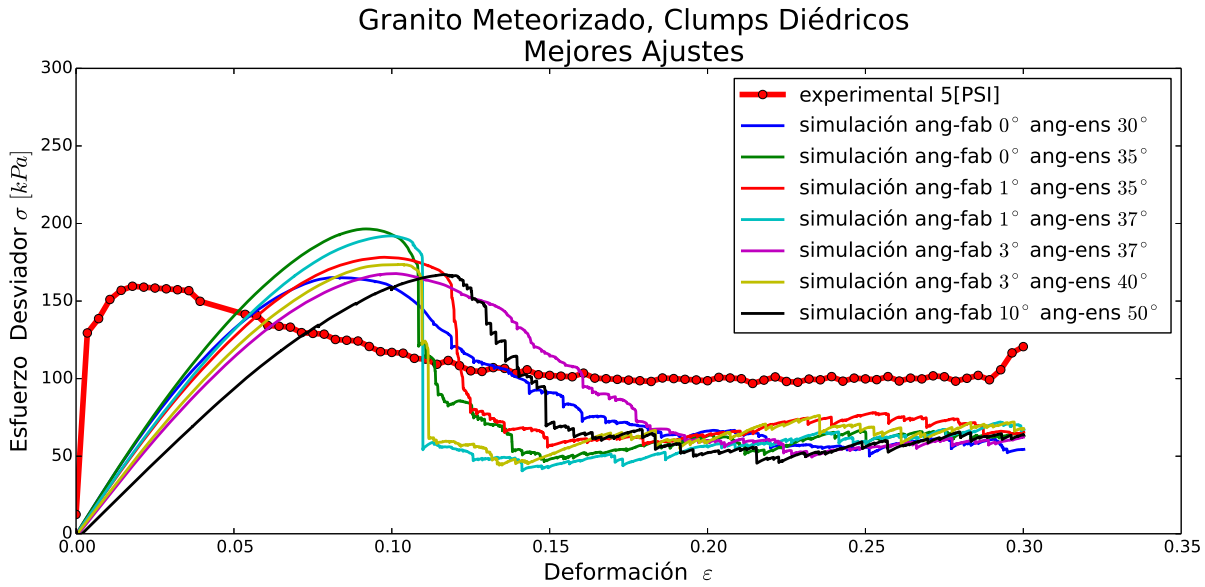


Figura 5.13: Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 5[*psi*], Curvas de mejor ajuste

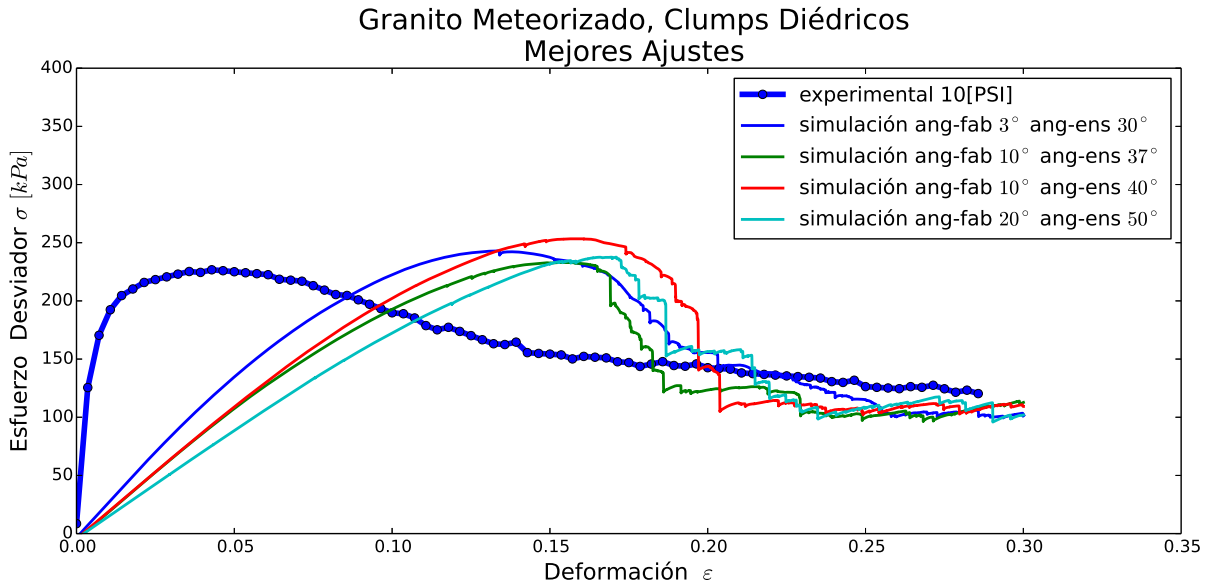


Figura 5.14: Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 10[*psi*], Curvas de mejor ajuste

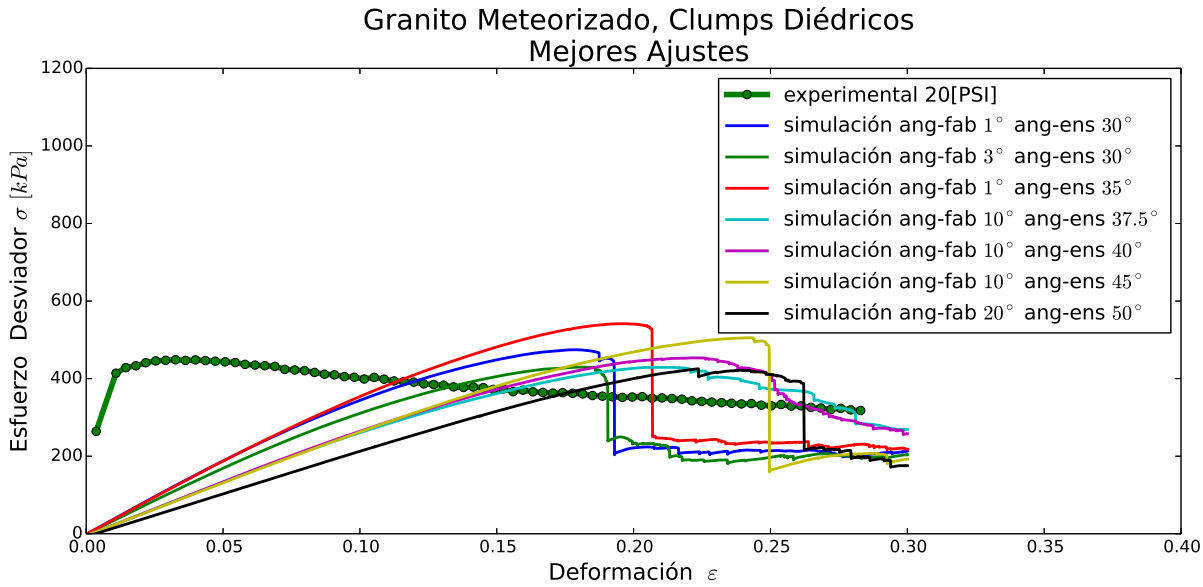


Figura 5.15: Simulación con Clumps Diédricos confinamiento de 20[psi], Curvas de mejor ajuste

En las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se presentan de forma bidimensional las simulaciones que lograron ajustarse y las que no.

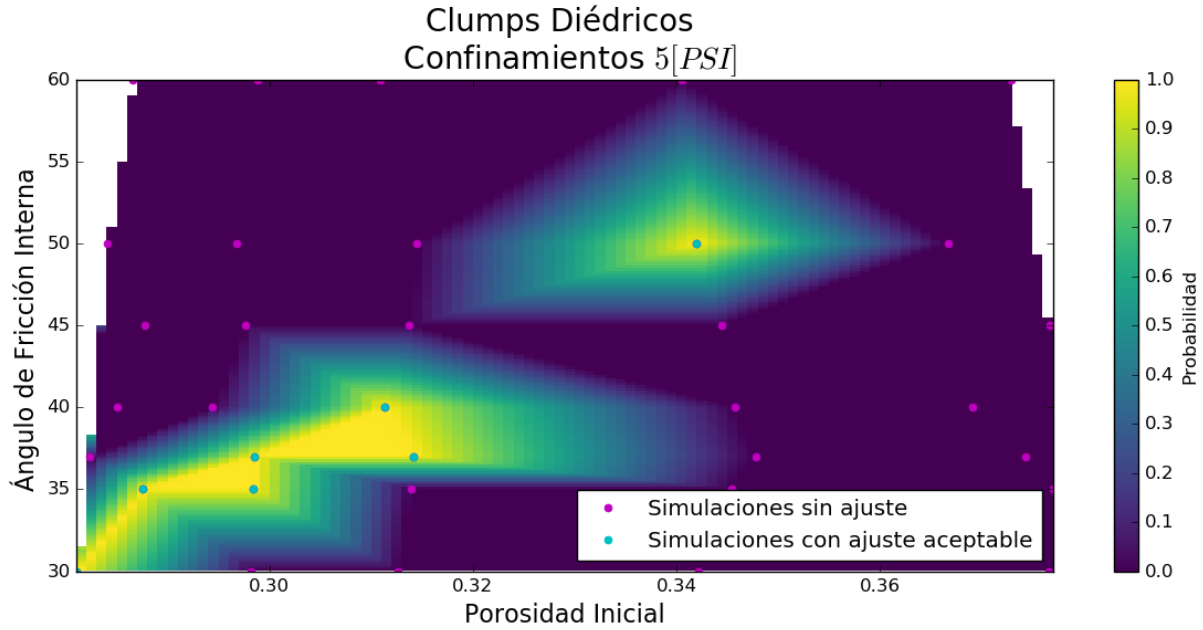


Figura 5.16: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 5[psi]

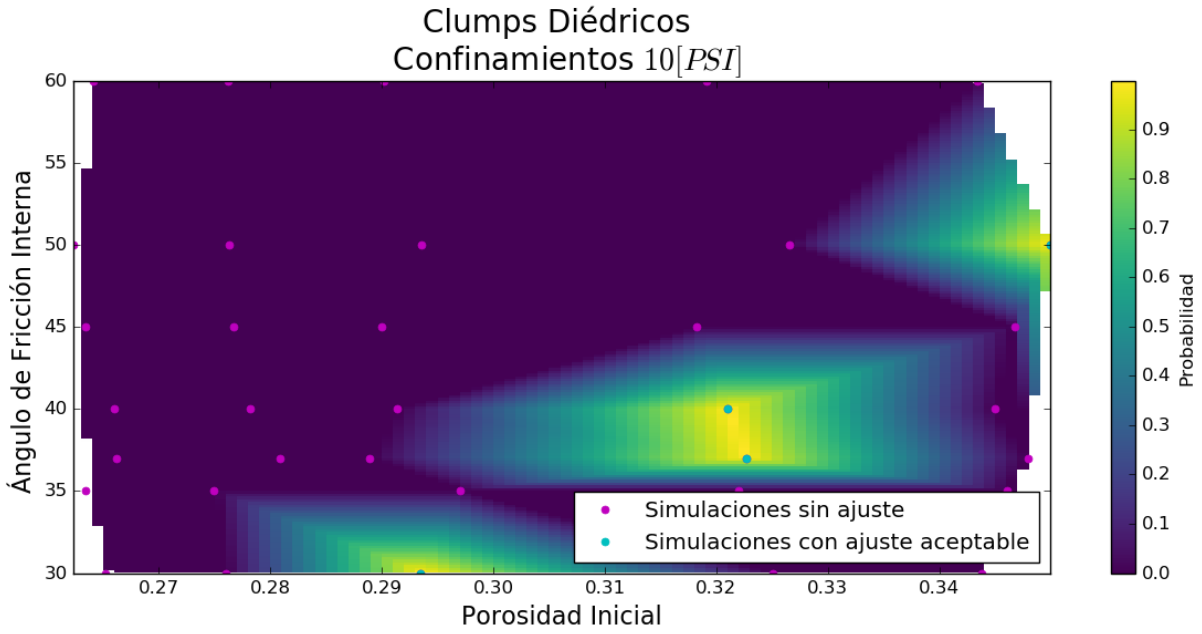


Figura 5.17: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 10[psi]

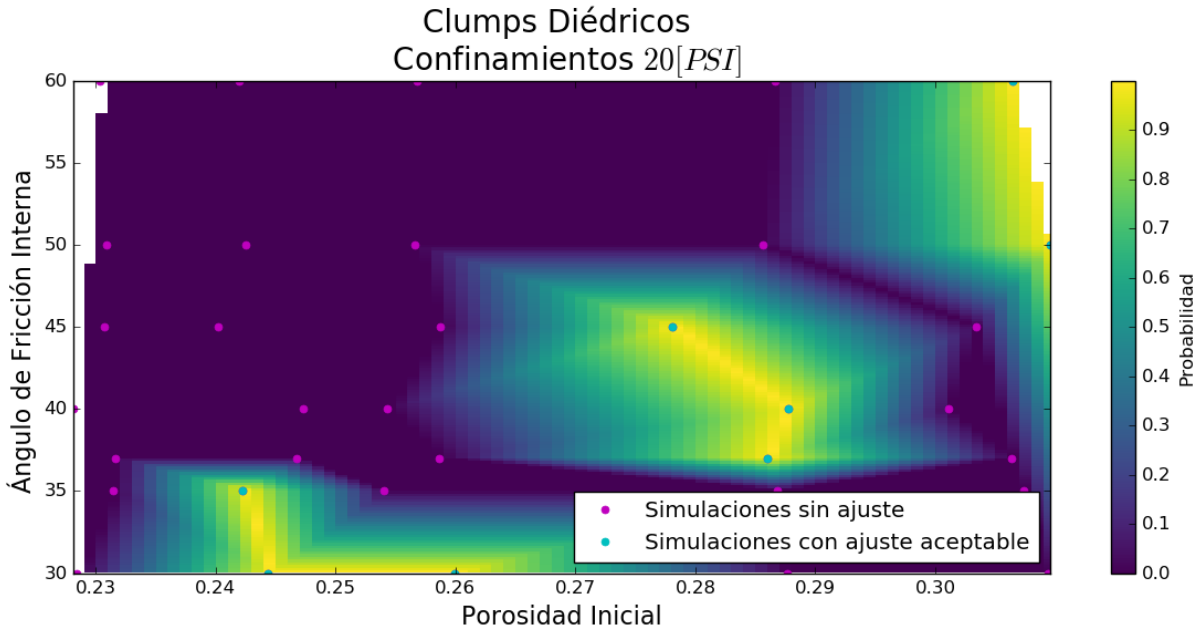


Figura 5.18: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Diédricos, confinamiento de 20[psi]

5.3.2. Clumps Tetraédricos

En las figuras 5.19, 5.20 y 5.21 se presentan las curvas con mejor ajuste para las simulaciones con dos esferas unidas, para confinamiento de 5[psi],10[psi] y 20[psi]. El barrido completo de simulaciones se puede encontrar en Anexo C.

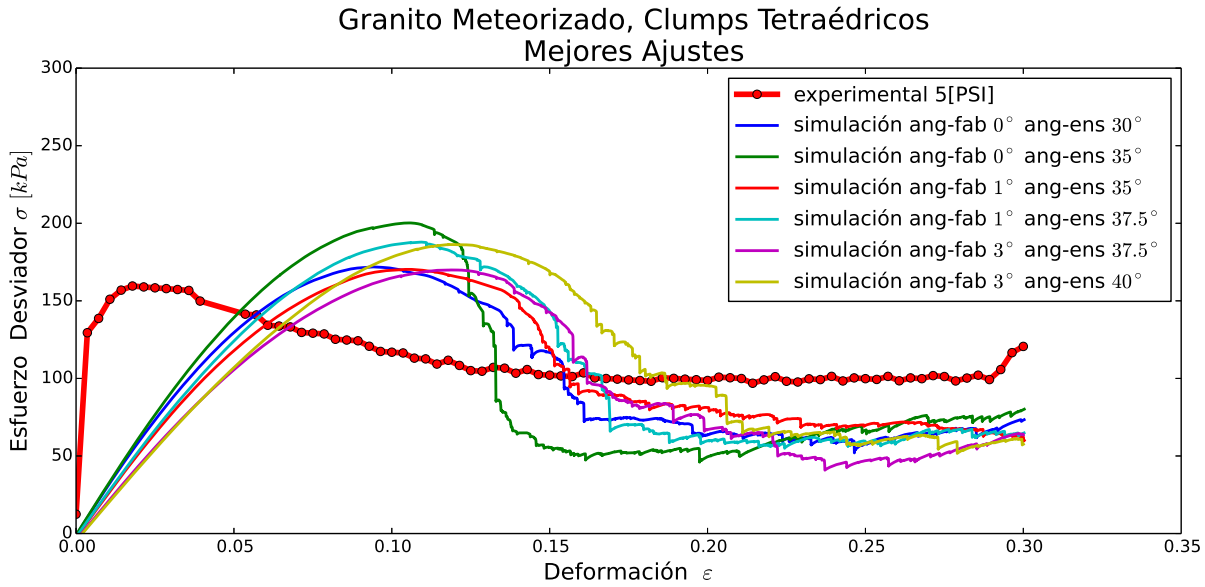


Figura 5.19: Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 5[psi], Curvas de mejor ajuste

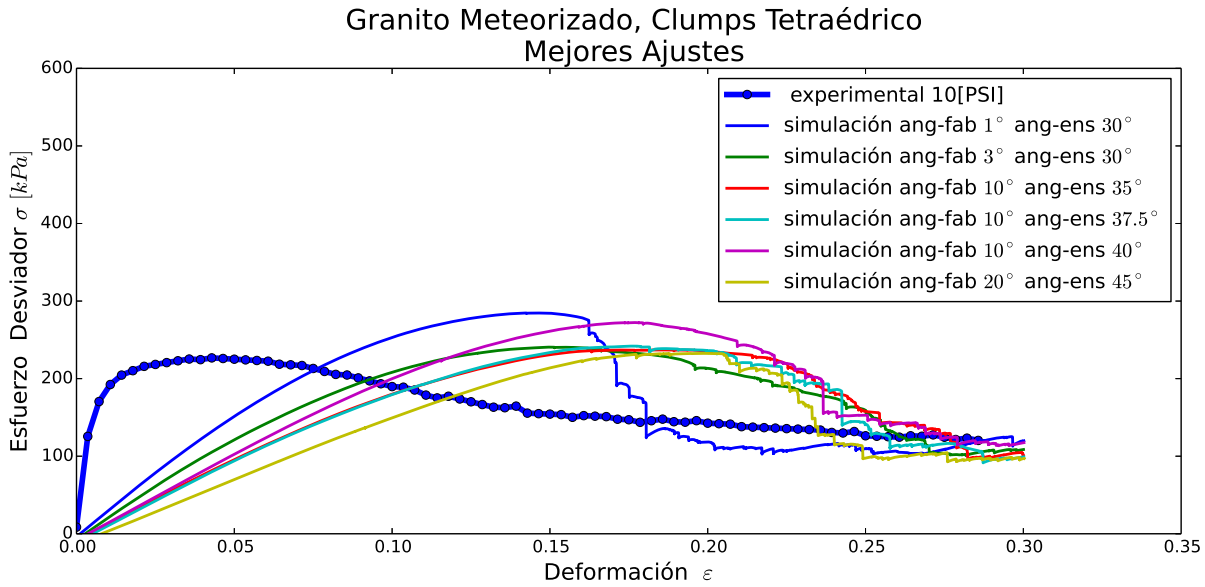


Figura 5.20: Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 10[*psi*], Curvas de mejor ajuste

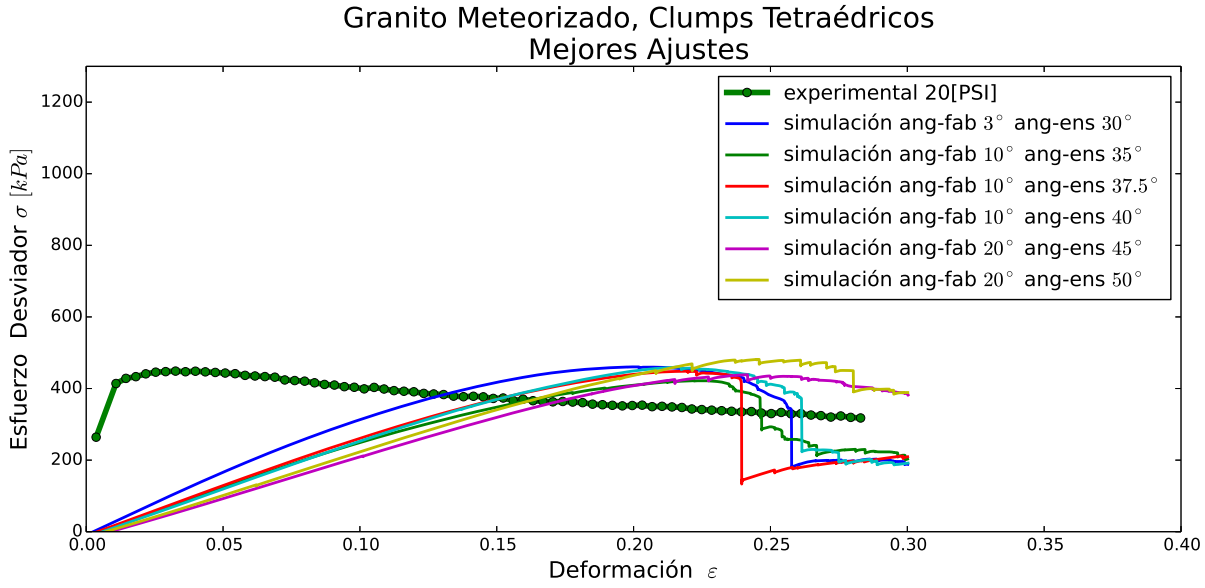


Figura 5.21: Simulación con Clumps Tetraédricos confinamiento de 20[*psi*], Curvas de mejor ajuste

En las figuras 5.22, 5.23 y 5.24 se presentan de forma bidimensional las simulaciones que lograron ajustarse y las que no.

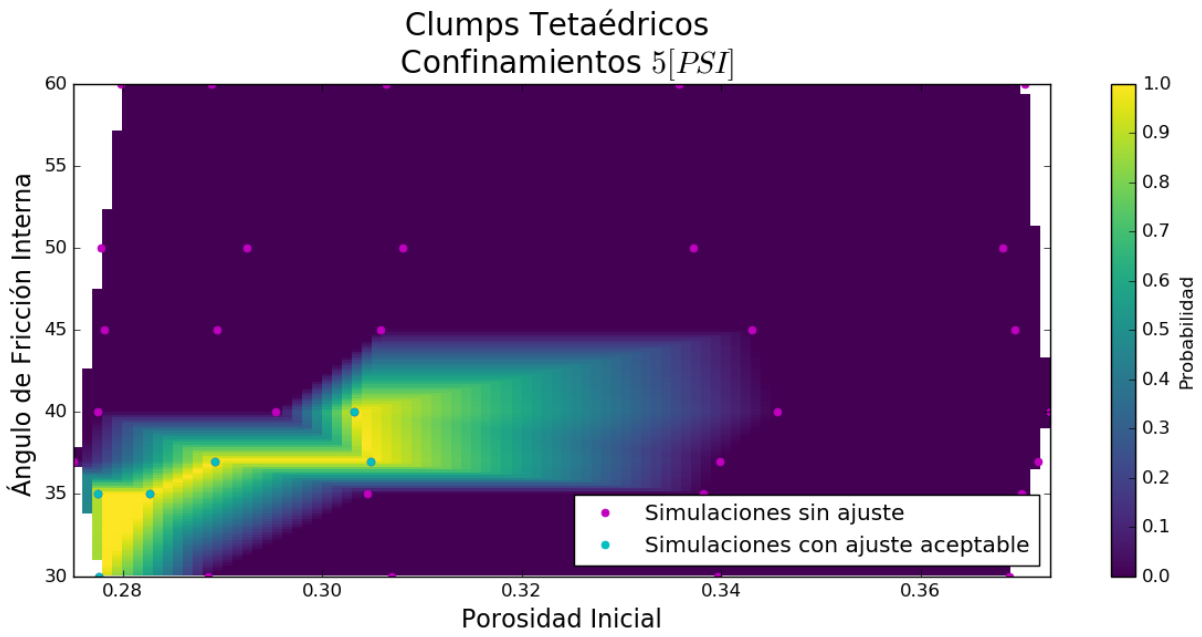


Figura 5.22: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tretaédricos, confinamiento de 5[psi]

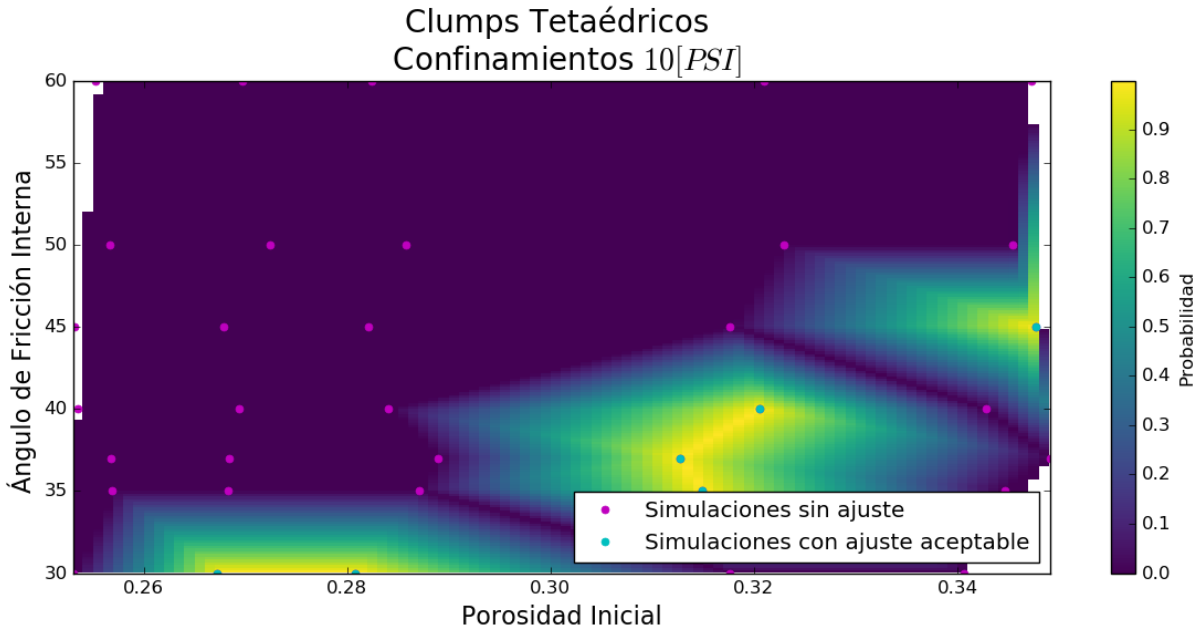


Figura 5.23: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tetraédricos, confinamiento de 10[psi]

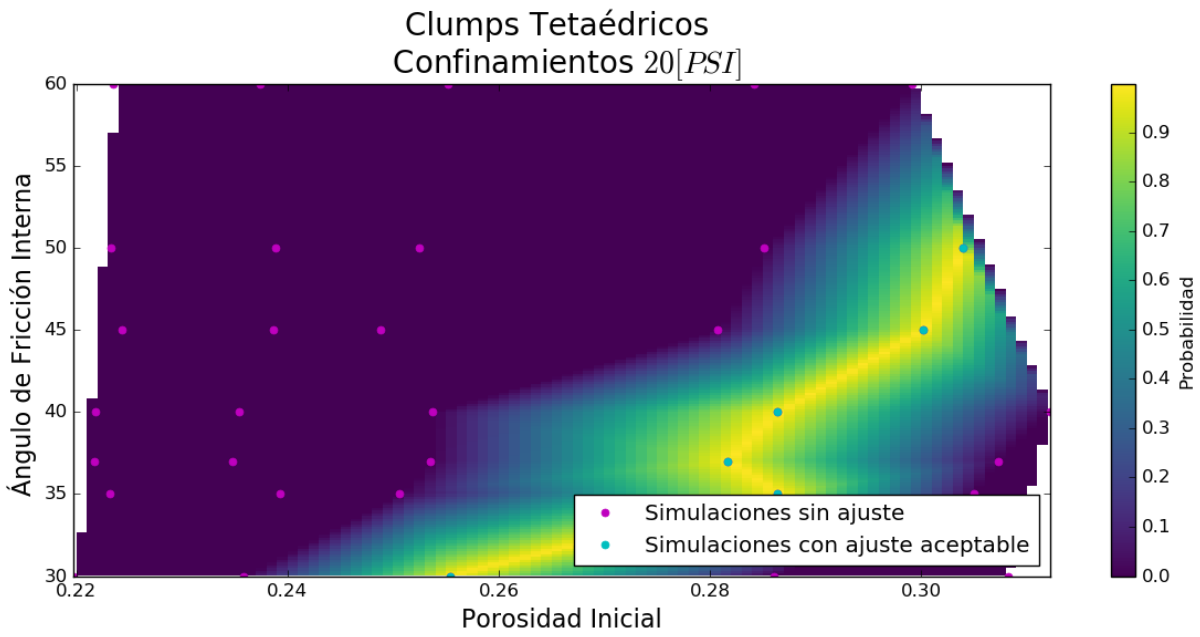


Figura 5.24: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Tetraédricos, confinamiento de 20[psi]

5.3.3. Clumps Octaédricos

En las figuras 5.25, 5.26 y 5.27 se presentan las curvas con mejor ajuste para las simulaciones con dos esferas unidas, para confinamiento de 5[psi],10[psi] y 20[psi]. El barrido completo de simulaciones se puede encontrar en Anexo C.

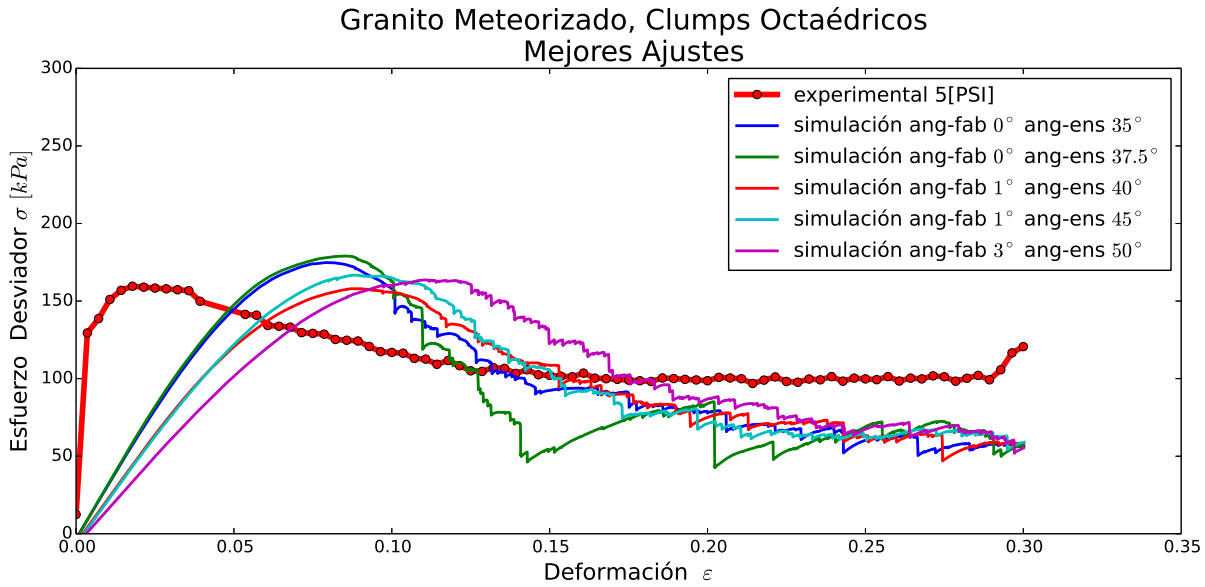


Figura 5.25: Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 5[*psi*], Curvas de mejor ajuste

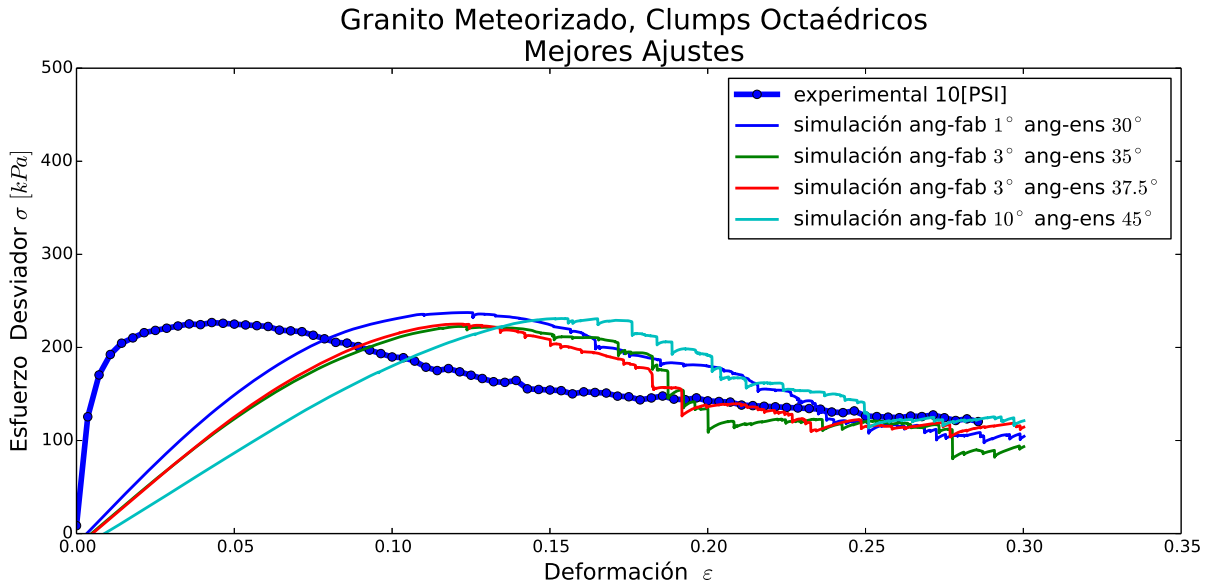


Figura 5.26: Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 10[*psi*], Curvas de mejor ajuste

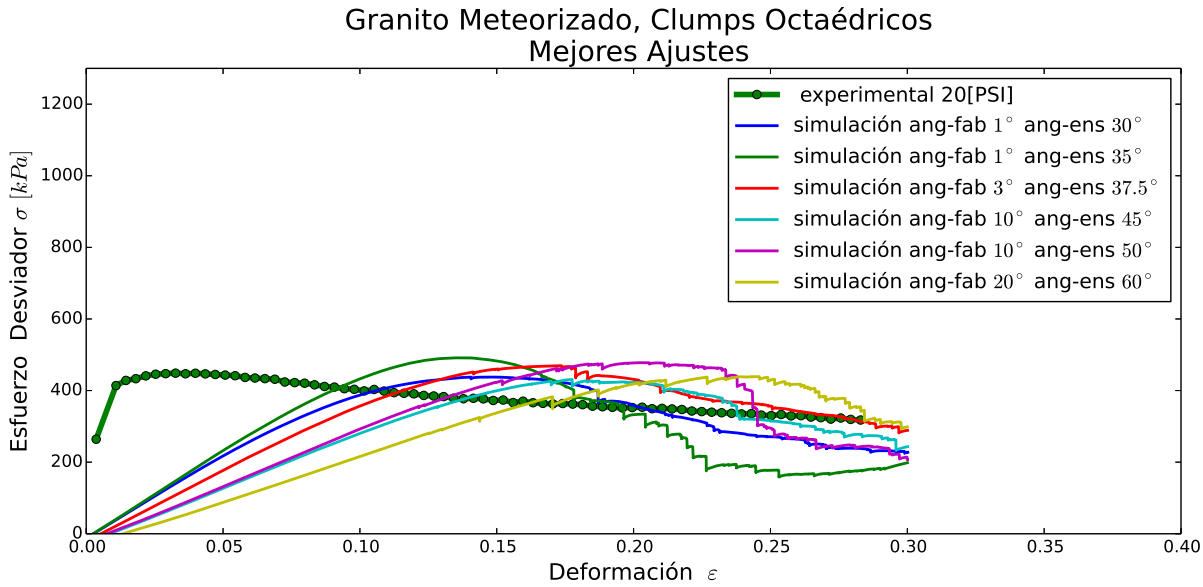


Figura 5.27: Simulación con Clumps Octaédricos confinamiento de 20[psi], Curvas de mejor ajuste

En las figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se presentan de forma bidimensional las simulaciones que lograron ajustarse y las que no.

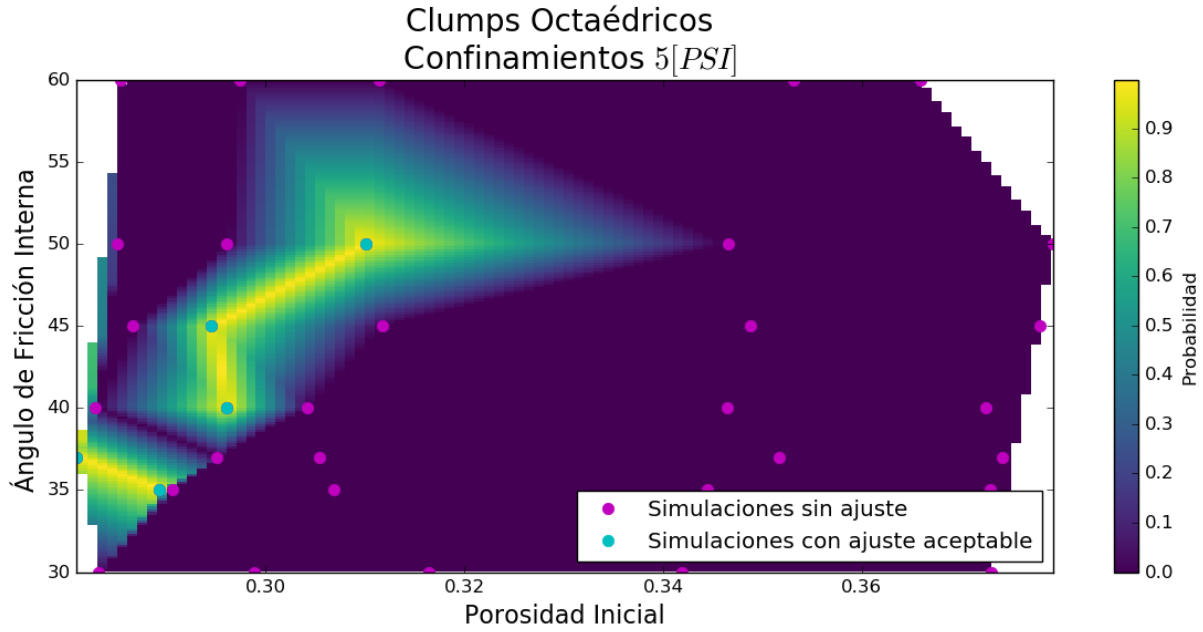


Figura 5.28: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 5[psi]

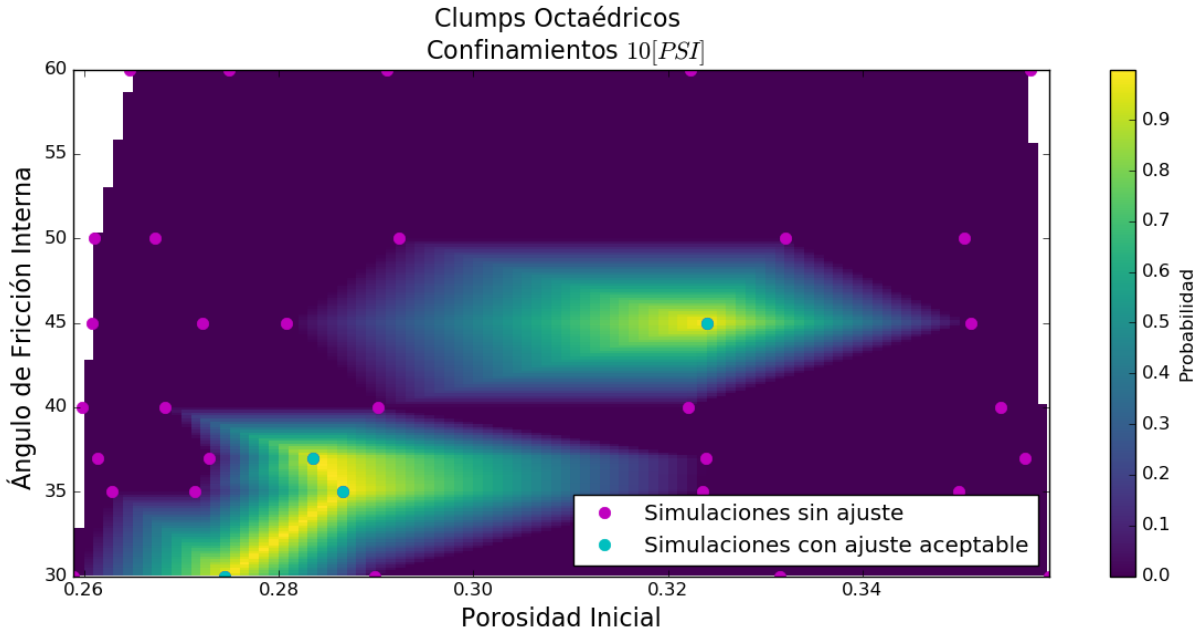


Figura 5.29: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 10[psi]

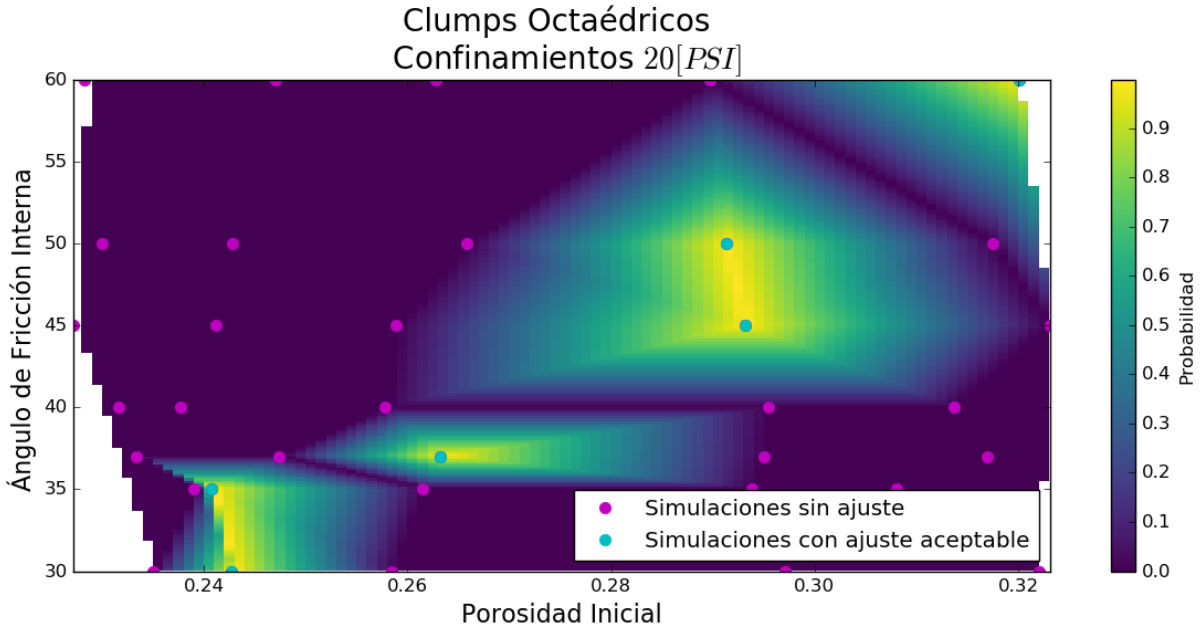


Figura 5.30: Gráfico de ajuste bivariado ángulo de fricción y porosidad para Clumps Octaédricos, confinamiento de 20[psi]

Para las simulaciones de suelos reales se debió flexibilizar bastante el criterio de aceptabilidad debido a que los resultados no se lograron ajustar de buena manera a la realidad. Un

parámetro que se escapa bastante entre lo observado y la simulación es la respuesta inicial del suelo, esto queda claramente de manifiesto en la parte inicial de la curva esfuerzo-deformación donde los resultado observados en el laboratorio entregan pendientes bastante más empinadas que en los obtenidos por simulaciones. Lo anterior puede ser atribuido a la excesiva disminución del modulo de elasticidad para obtener simulaciones que no sobrepasaran las 100[hr] de simulación. Si se pudiese trabajar con módulos de elasticidad de las partículas mayor, podría generarse una respuesta de esfuerzo-deformación con un modulo inicial mayor.

Otro parámetro que es interesante de analizar es la resistencia residual del material una vez que se produjo la falla. De lo obtenido del barrido de simulaciones, este parámetro es independiente del estado inicial de compactación e incluso se puede observar que el ángulo de fricción de las partículas tampoco puede generar grandes variaciones en la resistencia residual. Lo anterior lleva a plantear que la resistencia residual está relacionada con el mecanismos de falla del suelo donde predomina la interacción y el comportamiento entre partículas que las propiedades individuales de los granos.

Cuando se observa en detalle la falla del suelo, se puede apreciar que existe una rotación de las partículas que es un mecanismo menos resistente que el roce directo entre superficies de falla. Por lo tanto si el mecanismo de rotación de partículas es dominante en la resistencia residual podría permitir plantear que una granulomería rica en tamaños diversos será capaz de generar una mayor resistencia que una granulometría mal graduada. Las hipótesis planteadas anteriormente no se pudo investigar en mayor detalle debido a que escapan del alcance de esta memoria, pero figura dentro de las hipótesis básicas de la mecánica de suelos en cuanto a la predicción por suelos bien graduados.

El planteamiento anterior permite explicar porque las simulaciones con esferas no fueron capaces de asemejarse absolutamente al granito meteorizado. También en las simulaciones se puede observar una tendencia a que la resistencia residual es un poco menor a la medida, esto se puede explicar debido a que en las simulaciones se utilizaron elemento mo-

notamaño que generar mecanismo menos resistentes que una granulometría bien graduada.

6 | Conclusiones

En términos generales el modelo de elementos discretos poseen un gran potencial en lo que se refiere a simulaciones cada vez más cercanas al comportamiento real del suelo. Lo anterior se debe a que ese método pretende asemejarse a las interacciones de grano con grano y no de ajustar un curva que se asemeje al comportamiento que este posee a gran escala. Este tipo de modelos pretenden describir de buena forma el comportamiento a gran escala desde los fenómenos microscópicos de interacción entre partículas. Pero esta necesidad de determinar las interacciones a escala micro implica un alta demanda de calculo y de almacenamiento computacional lo que se traduce en modelos que requieren el uso intensivo del computador. Para simulaciones que requieran de gran fidelidad no se puede realizar con microcomputadores domésticos, requieren de computadores mayores e incluso clusters para su ejecución. Este es el caso de requerirse estimaciones de módulos estáticos, dinámicos o resilientes.

Como los recursos computacionales para el desarrollo de esta investigación eran limitados, se debieron realizar simplificaciones para lograr tiempos razonables de cómputo, alrededor de 70[hr] por simulación. La simplificación más importante es la disminución del módulo de elasticidad de las partículas, el cual es extremadamente sensible a la duración de las simulaciones, debido a que este influye directamente en el delta paso de tiempo del método, si se utiliza un valor mayor de paso de tiempo el método diverge.

Cuando se analizan los datos obtenido de la simulaciones se puede apreciar que existe similitud entre el comportamiento real del suelo y el simulado. La mayor semejanza se logro en las simulaciones de los rodamientos de acero, esto se debe a que las interacciones

en el modelo poseen la misma geometría que en la realidad esferas. Cuando se intento simular suelos, utilizando esferas en el modelo DEM se obtuvieron resultados que no se ajustaban a la realidad, es por esta razón que se utilizaron geometrías más complejas de granos, como geometrías diédricas, teraédricas y octaédricas, con estas geometrías se obtuvieron mejores resultados. Esto lleva a plantear que la forma de los granos de suelo es relevante en la capacidad de soporte del suelo.

Una de la propiedades que logra describir de buena forma el modelo, es la resistencia residual del suelo, esta es la capacidad de soporte que tiene una vez que este fallo. En las simulaciones se puedo observar que la resistencia residual es independiente de las condiciones de carga inicial, pero si depende de la geometría de las partículas, donde geometrías menos redondeadas producen una trabazón adicional al roce producido por el contacto de dos materiales, esto se atribuye a la trabazón entre partículas debido a su irregularidad y la excentricidad de su centro de masa que provoca inercias mayores, que disminuye la tendencia a rotar de los granos de suelo.

Las simulaciones realizadas, no logran describir de buena forma el módulo de elasticidad esperado. Lo anterior es atribuido a la disminución del módulo de elasticidad de las partículas. También esta simplificación provoca inconsistencias en la medición de la porosidad, especialmente cuando se utilizan clumps.

Según los resultados de este estudio exploratorio, se estima que el problema de obtención de la densidad máxima de un suelo granular puede ser resuelto con el uso de YADE y un microcomputador con tecnología actual.

Sería interesante poder realizar simulaciones con módulos de elasticidad de partículas mayores, probablemente se obtendrían curvas esfuerzo-deformación más cercanas a la realidad, pero para esto se debe contar con una capacidad computacional importante. Otra rama de investigación interesarte es el estudio de comportamiento de suelos con granulometría bien graduada, no mono tamaño, probablemente se puedan lograr resisten-

cia mayores a las obtenidas debido a que este tipo de suelo suele lograr densidades mayores.

Bibliografía

Bauchau, Olivier A y Craig, James I (2009). *Structural analysis: with applications to aerospace structures*, volume 163. Springer Science & Business Media. 3.2.3

Budhu, Muni (2008). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS, (With CD)*. John Wiley & Sons. 3.2.1

CANOBA, Carlos A y FRAGA, Héctor R (2004). Propiedades elásticas de las rocas. *Departamento de Ciencias Geológicas, Escuela de Agrimensura, Facultad de Ciencias exactas, Universidad Nacional de Rosario*. 4.2.1

Chareyre, B; Briançon, L; y Villard, P (2002). Theoretical versus experimental modeling of the anchorage capacity of geotextiles in trenches. *Geosynthetics International*, 9(2), 97–123. 4.2.2, 4.3

Cundall, Peter A y Strack, Otto DL (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47–65. 2, 2.1

De Josselin de Jong, G y Verruijt, A (1969). Etude photo-elastique d'un. 2.1, 2.1

Lambe, T William y Whitman, Robert V (1972). *Mecánica de suelos.* Technical report. (document), 3.1

Paikowsky, Samuel G y Tien, Hsienjen S (2002). Experimental examination of the arching mechanism on the micro level. *Geotechnical Special Publication*, (pp. 222–228). (document), 2.1, 2.1, 2.2

Parry, Richard HG (2004). *Mohr circles, stress paths and geotechnics*. CRC Press. 3.2.3

Romero-Cervantes, JC y Pérez-Rea, ML (2016). Análisis de la pérdida de resistencia por remoldeo de suelos arenosos de la zona estuarina de nayarit analysis of shear strength loss by remoulding of sandy soils in estuarine area of nayarit. *Revista Naturaleza y Tecnología*, 2(2). (document), 4.1

Scholtès, L; Chareyre, B; Nicot, F; y Darve, F (2009). Micromechanics of granular materials with capillary effects. *International journal of engineering science*, 47(1), 64–75. 4.2.2, 4.3

Šmilauer, Václav y Chareyre, Bruno (2010). Yade dem formulation. *Yade Documentation*, 393. 2.2.1.4

Tong, A-T; Catalano, E; y Chareyre, B (2012). Pore-scale flow simulations: model predictions compared with experiments on bi-dispersed granular assemblies. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, 67(5), 743–752. 4.2.2, 4.3

Villalobos, Felipe (2015). *MECANICA DE SUELOS*. SOCHIGE. 3.2.1

Šmilauer et al., V. (2015). Dem formulation. In *Yade Documentation 2nd ed*. The Yade Project. http://yade-dem.org/doc/. (document), 2.3, 2.4

A | Simulaciones con Rodamientos

A.1. Simulaciones con Rodamientos a $2[psi]$ de confinamiento

En las figuras A.1,A.2, A.3, A.4, A.5, A.6 y A.7 se presentan el barrido de simulaciones para un confinamientos de $2[psi]$. Es importante mencionar que a medida que se cambia, el confinamiento el grado de compactación inicial también cambia, por lo tanto la porosidad. Este parámetro se controla variando en ángulo de fricción en la fase de generación.

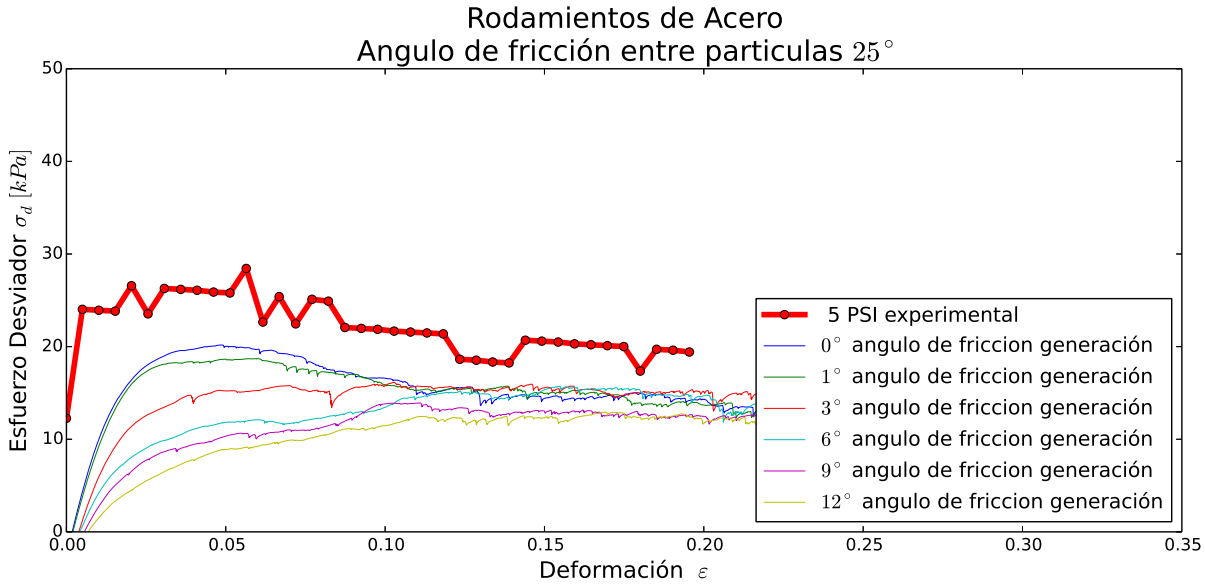


Figura A.1: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de $2[psi]$, ángulo de fricción 25° ensaye

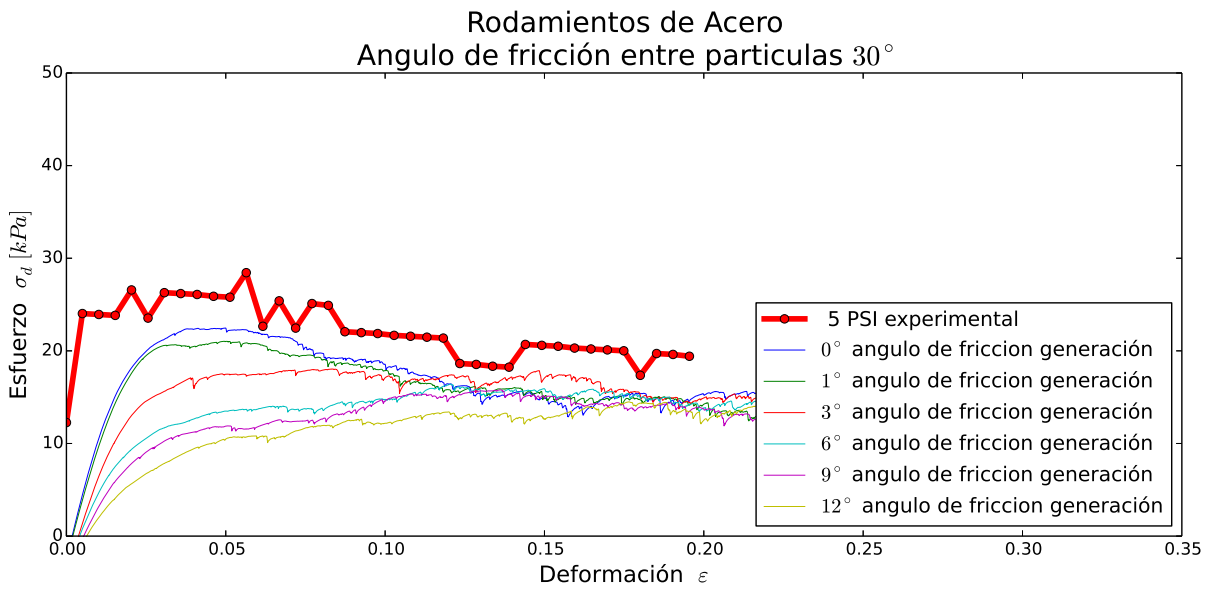


Figura A.2: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye

A.2. Simulaciones de Rodamientos con 4[*psi*] de confinamiento

En las figuras A.8,A.10, A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15 se presentan el barrido de simulaciones para un confinamientos de 4[*psi*].

A.3. Simulaciones de Rodamientos con 10[*psi*] de confinamiento

En las figuras A.16,A.17, A.18, A.19, A.20, A.21 y A.22 se presentan el barrido de simulaciones para un confinamientos de 10[*psi*].

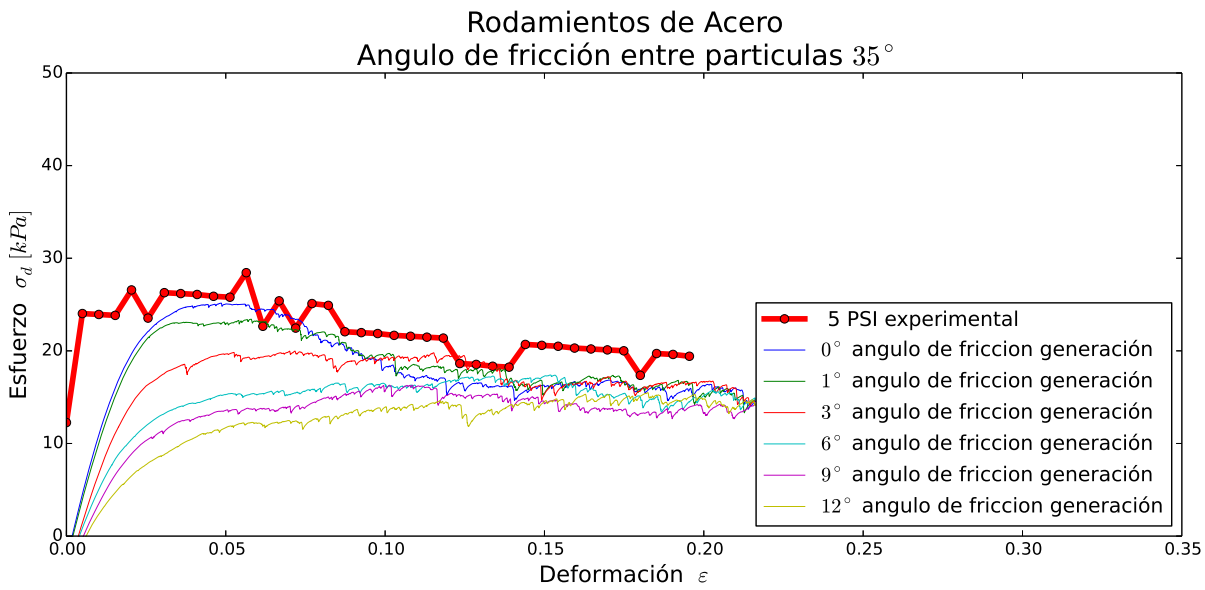


Figura A.3: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

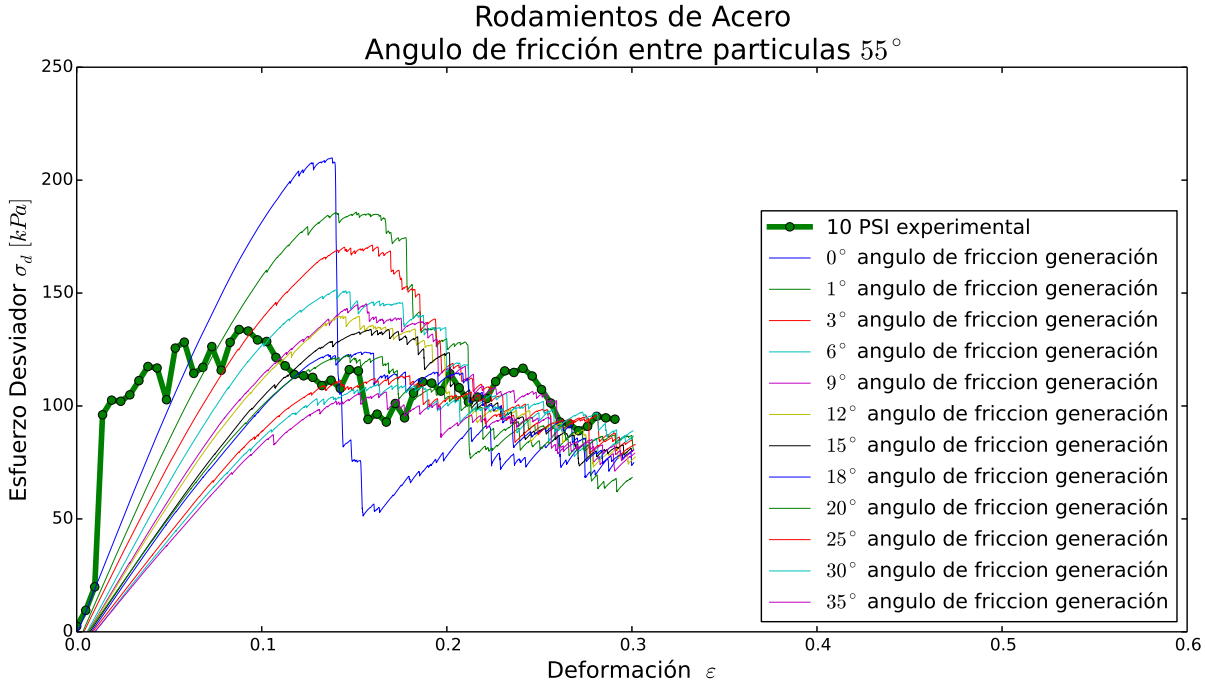


Figura A.21: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye

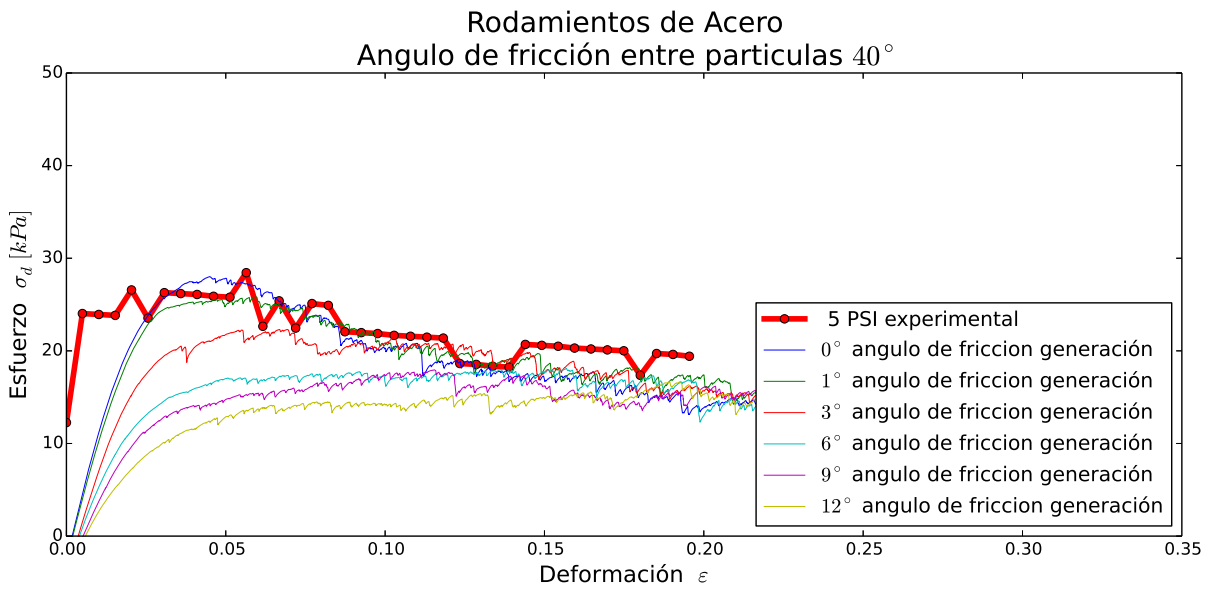


Figura A.4: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

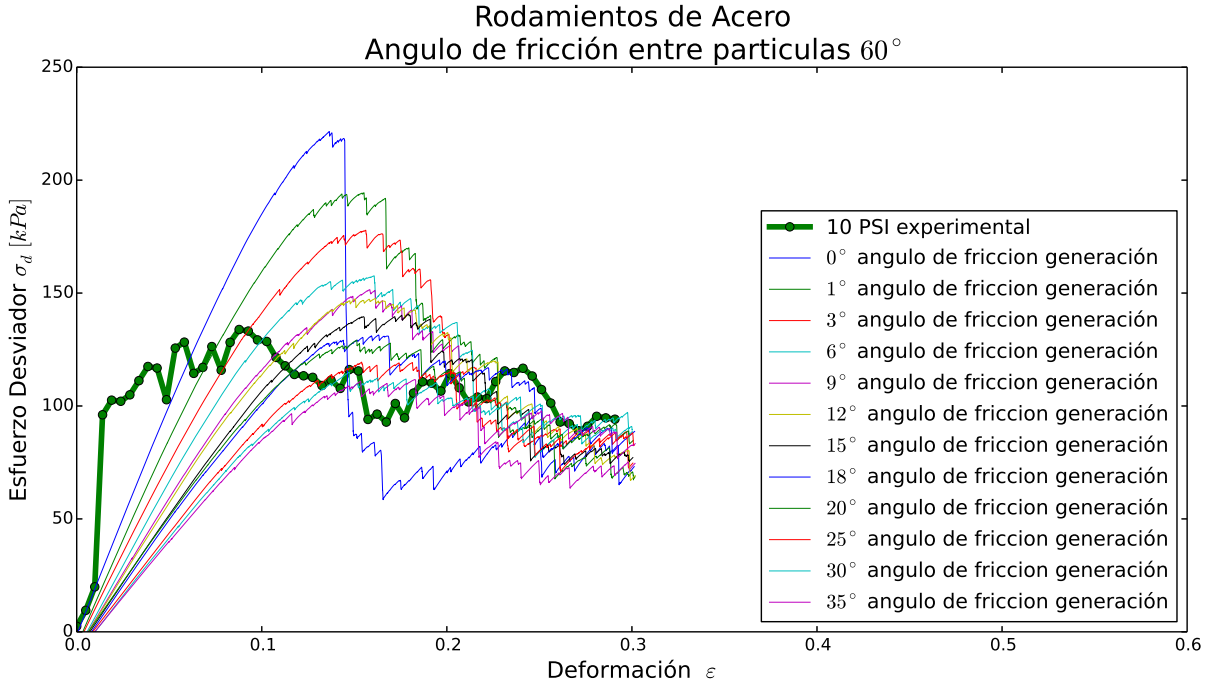


Figura A.22: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

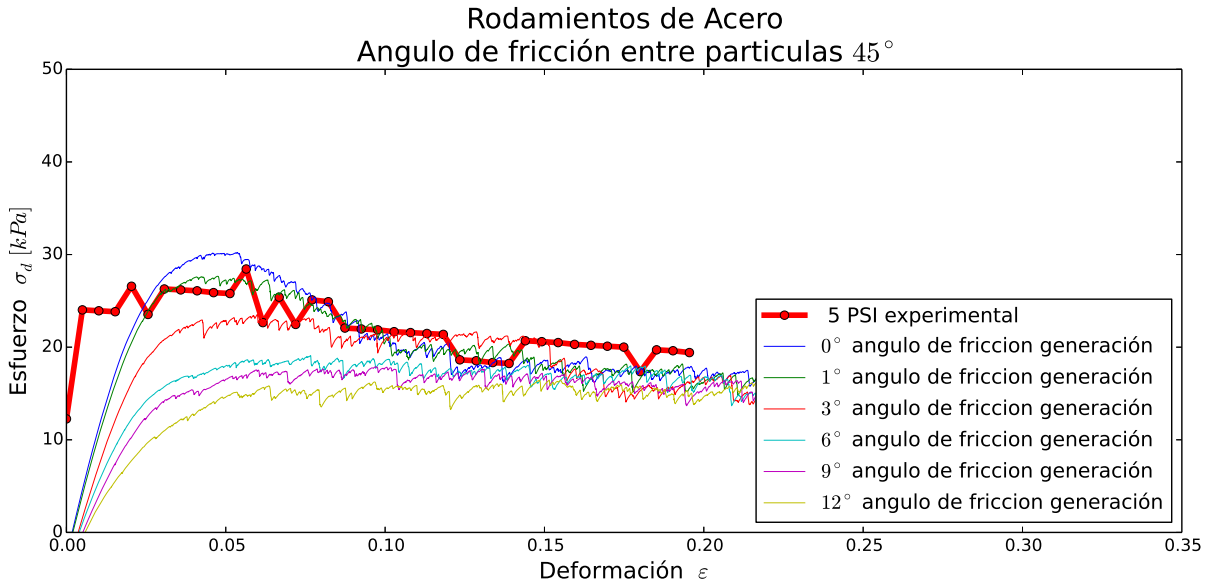


Figura A.5: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

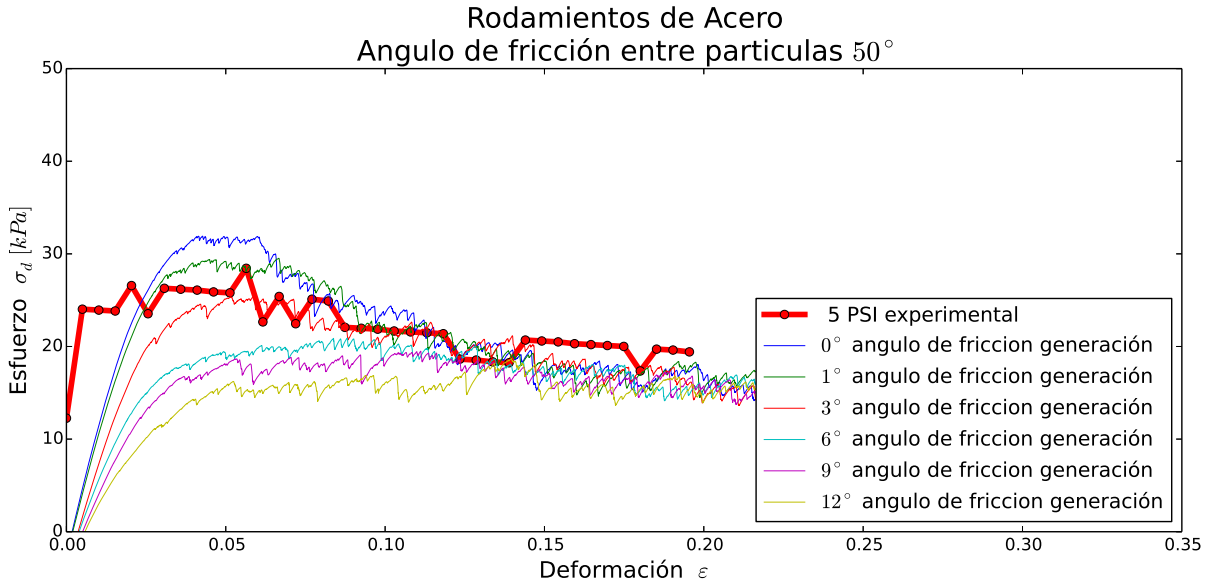


Figura A.6: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

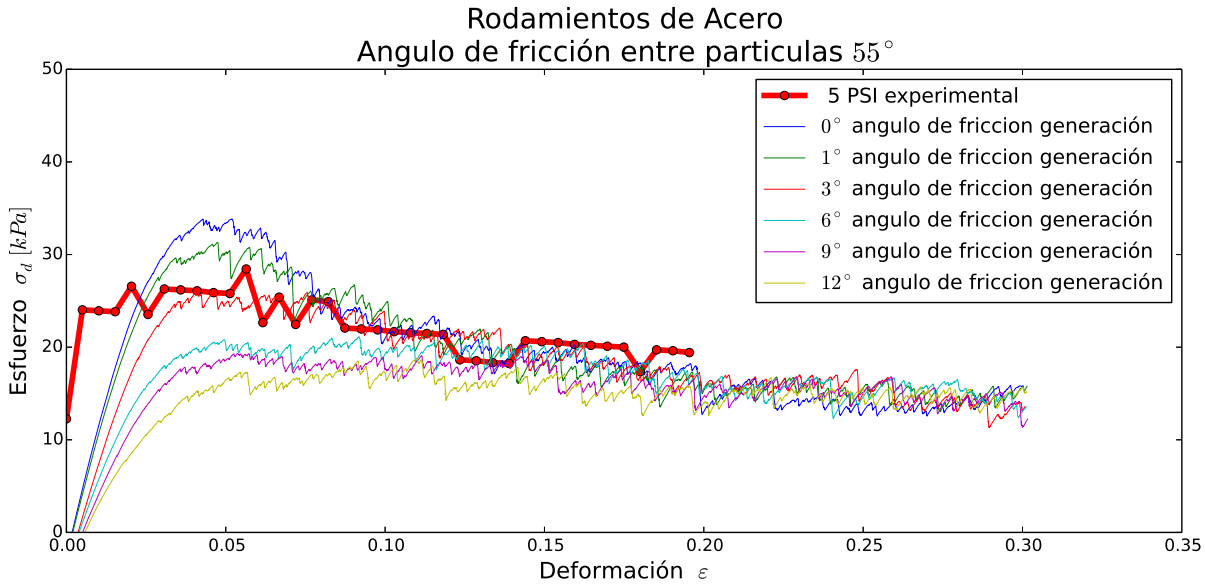


Figura A.7: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 2[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye

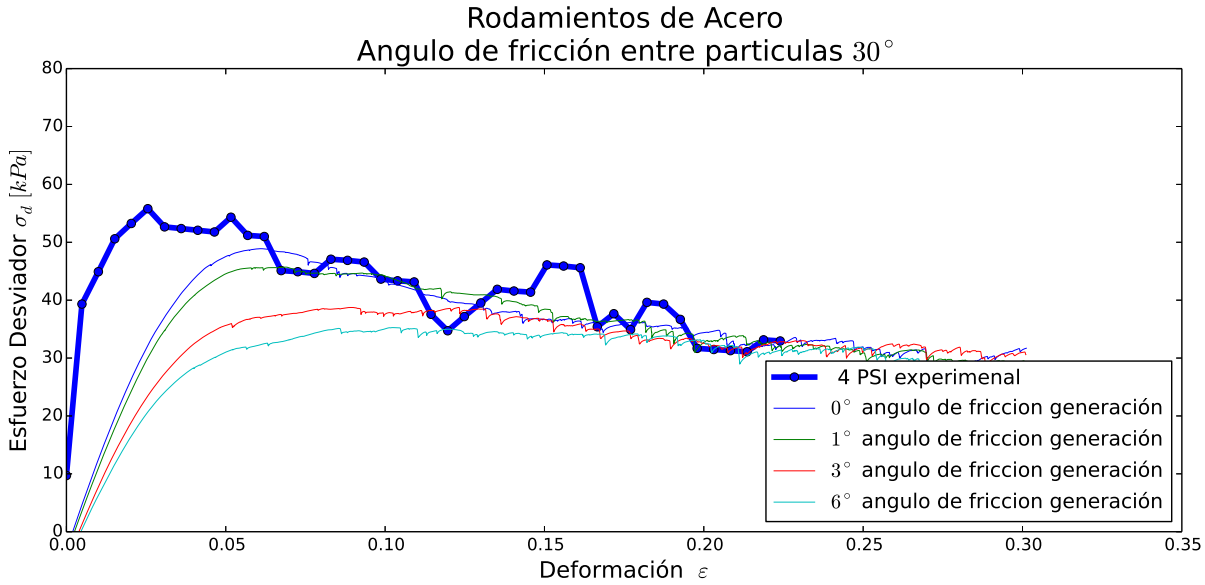


Figura A.8: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye

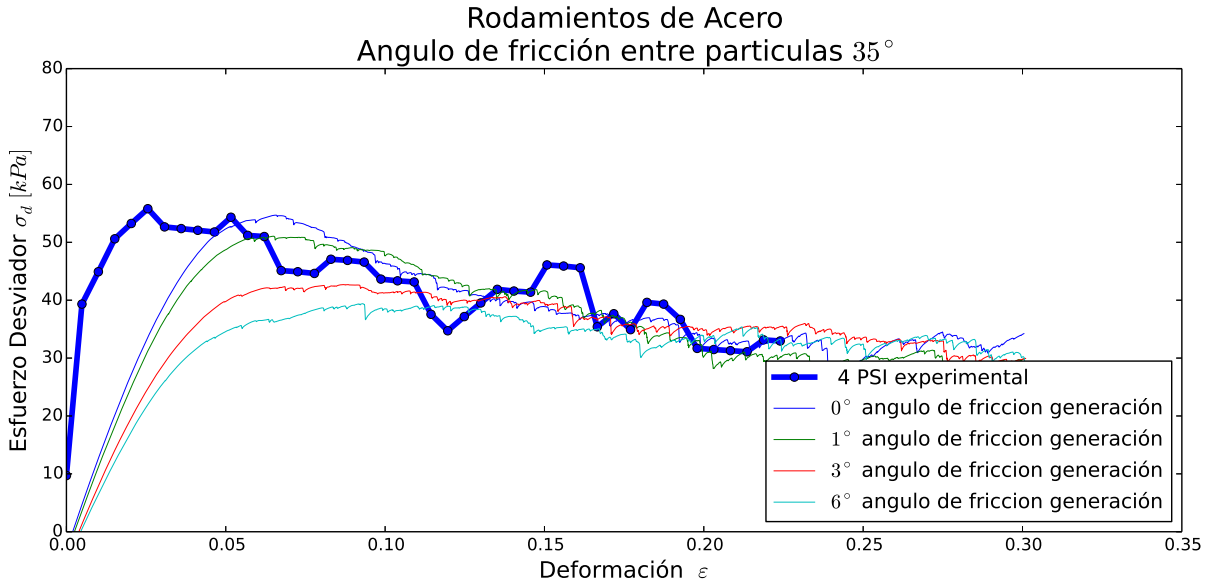


Figura A.9: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

Figura A.10: Registro directo, rodamientos de acero

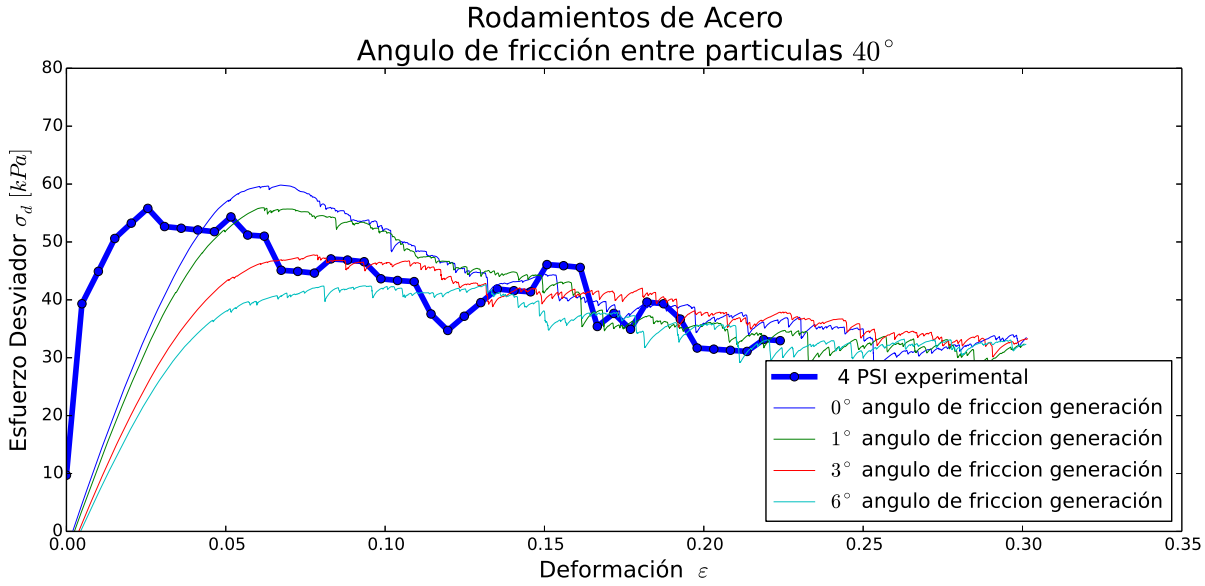


Figura A.11: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

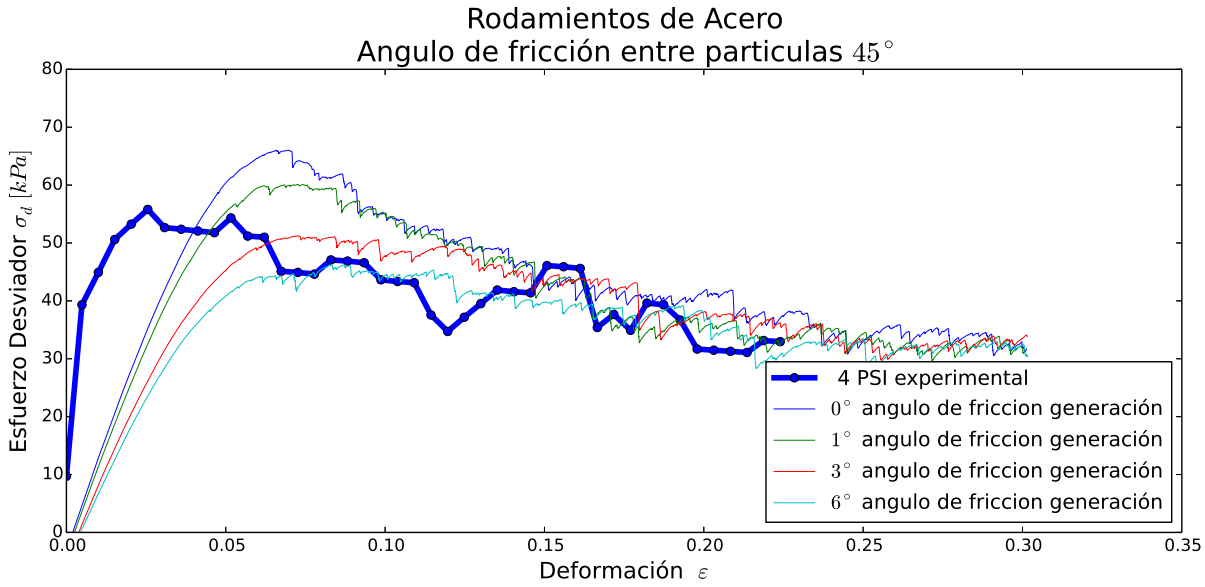


Figura A.12: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

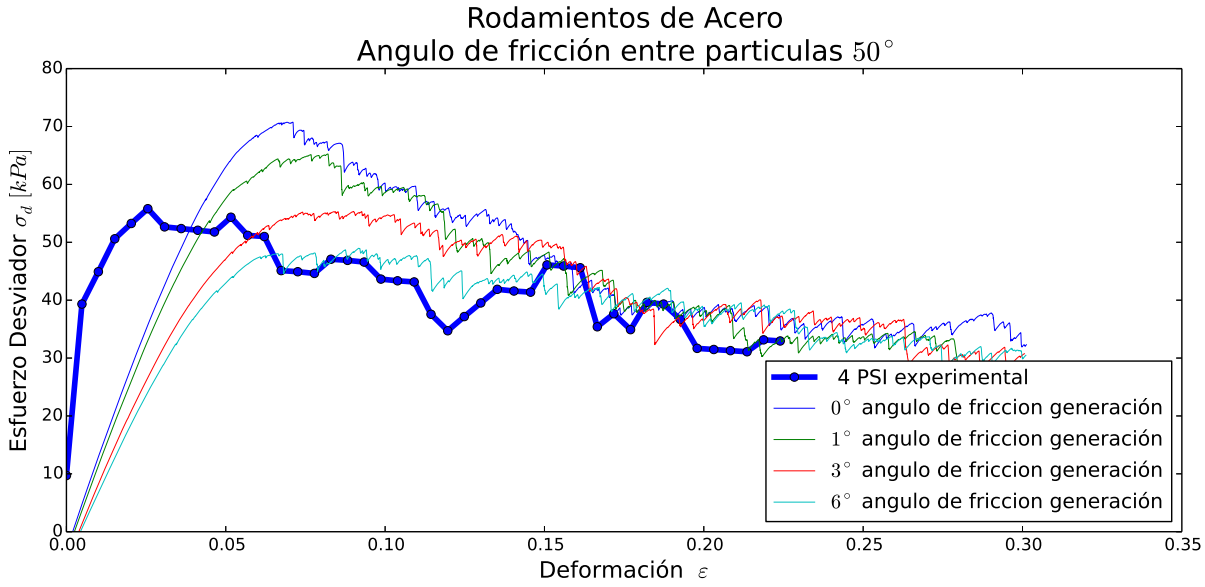


Figura A.13: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

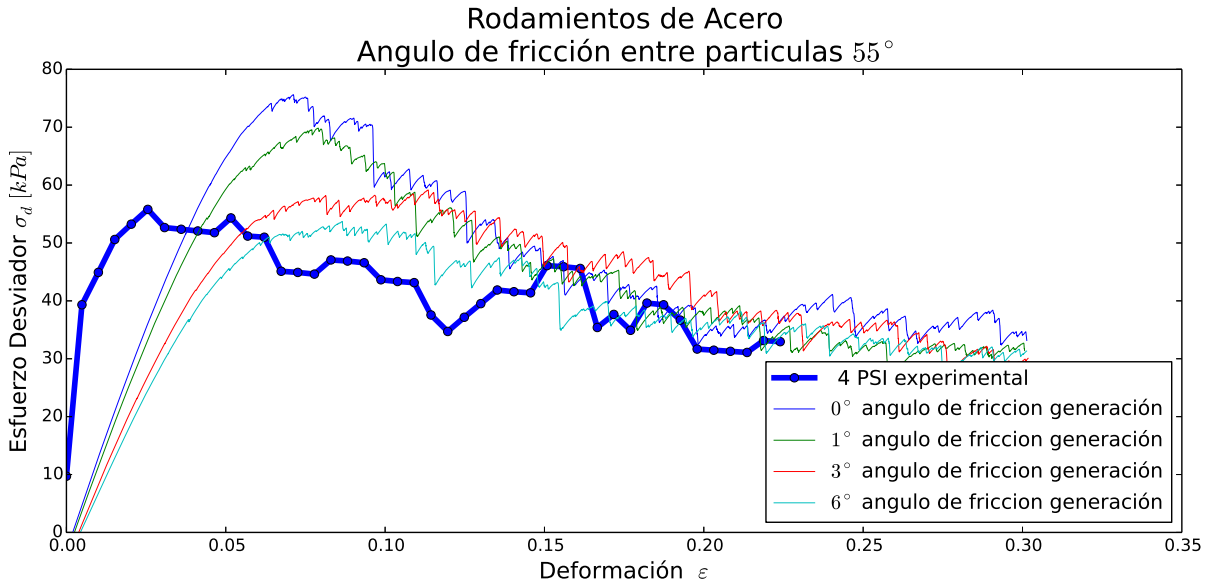


Figura A.14: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 55° ensaye

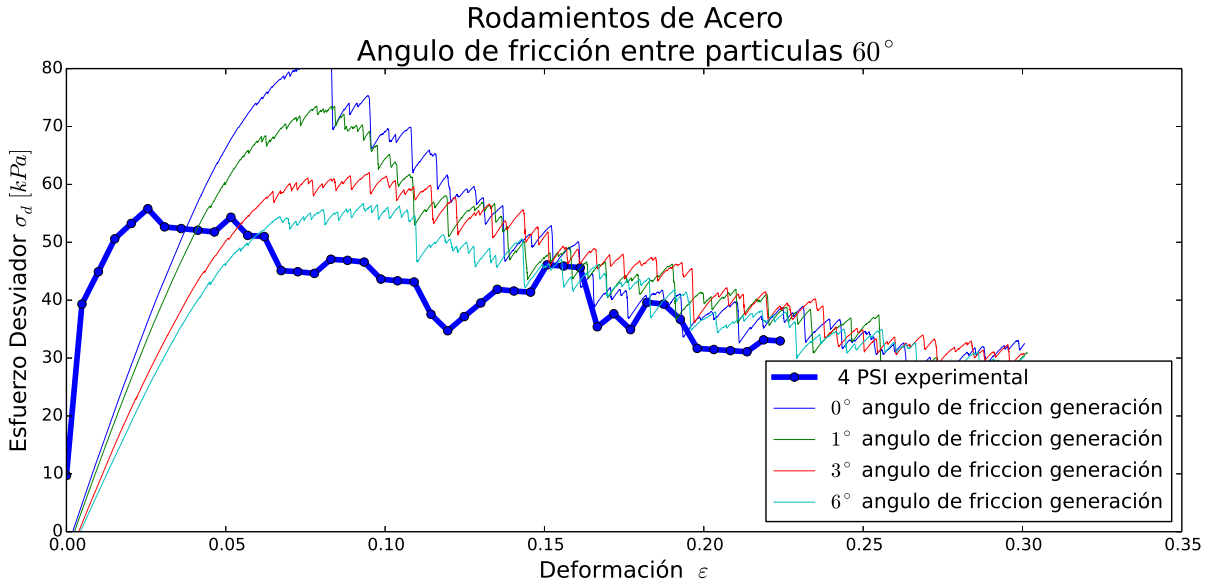


Figura A.15: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 4[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

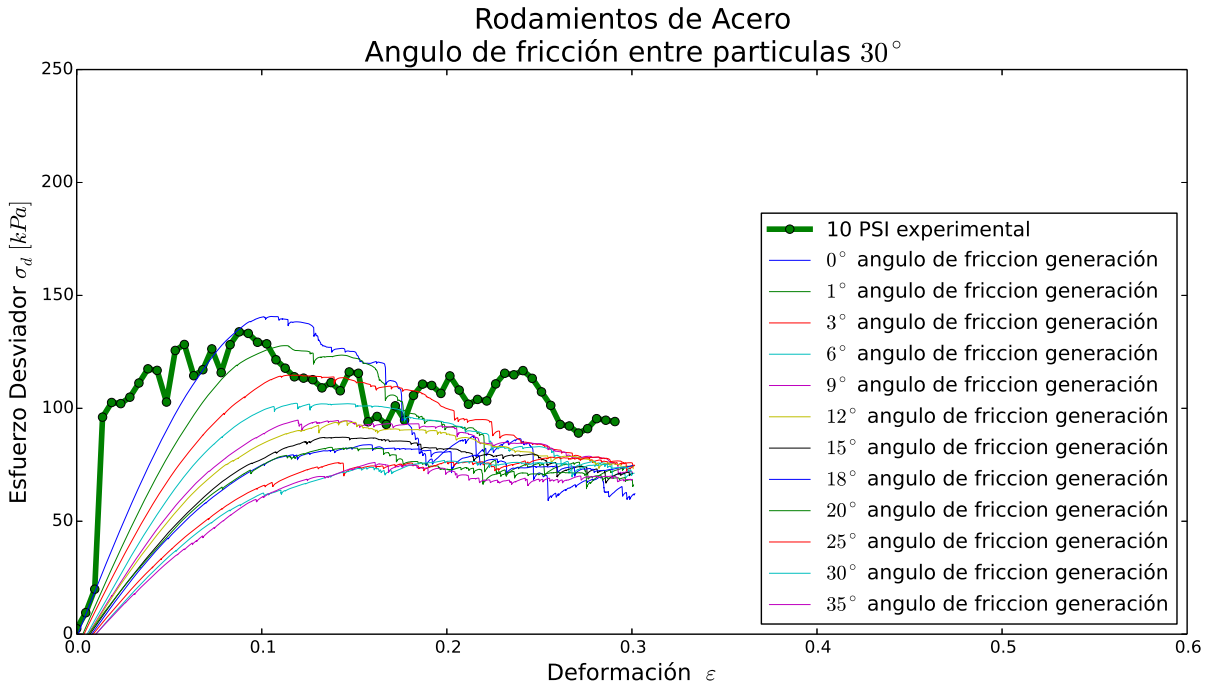


Figura A.16: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye

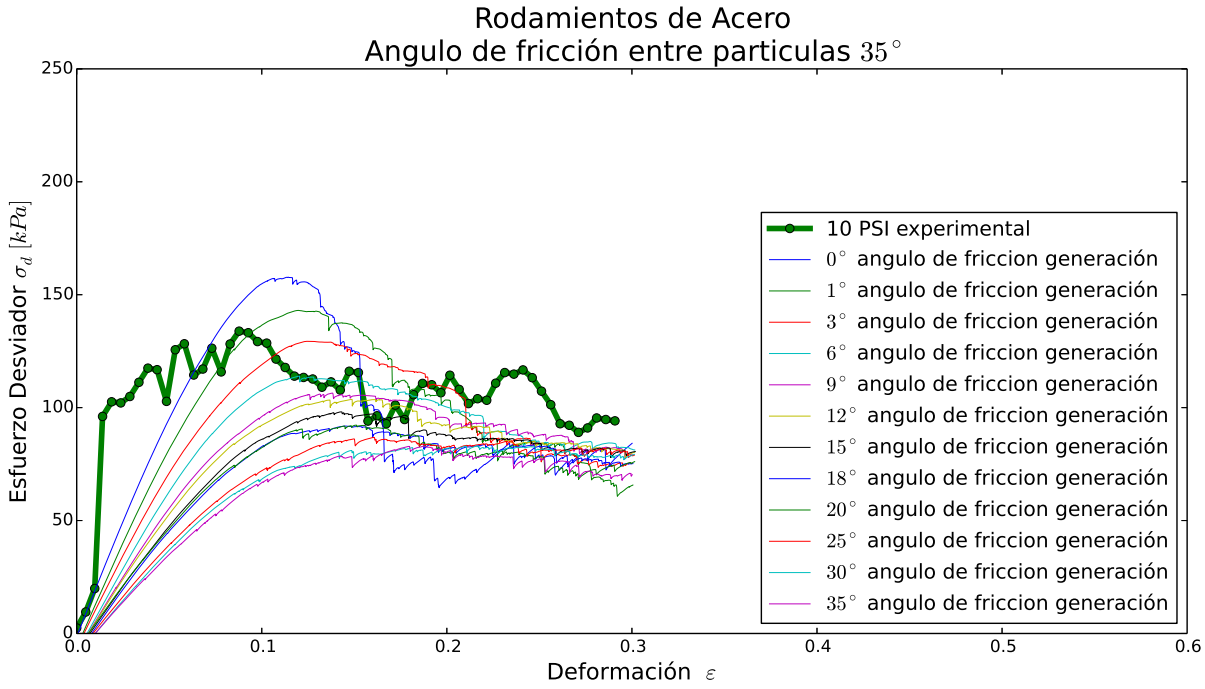


Figura A.17: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

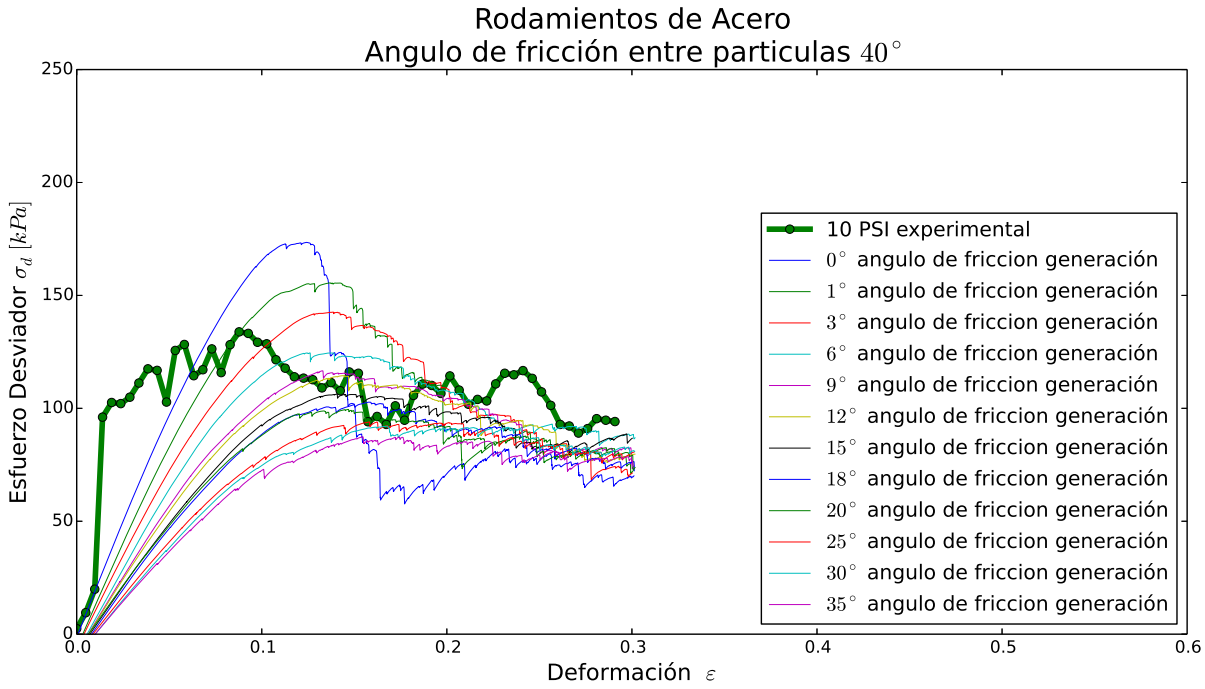


Figura A.18: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

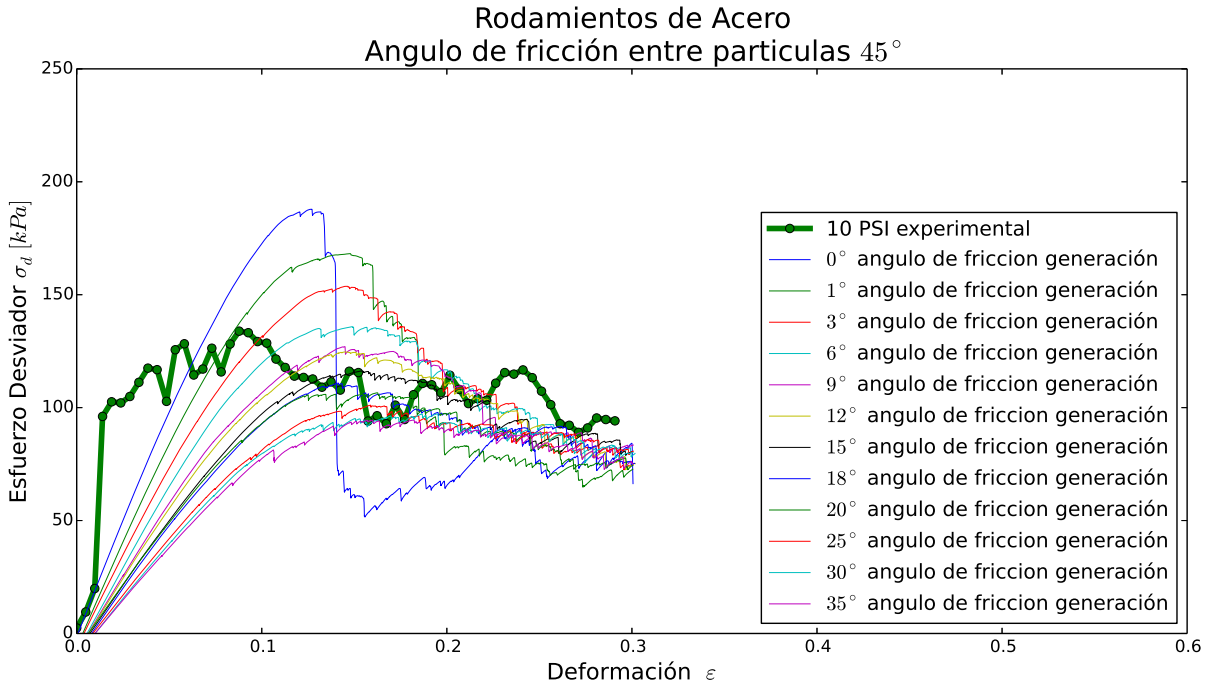


Figura A.19: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

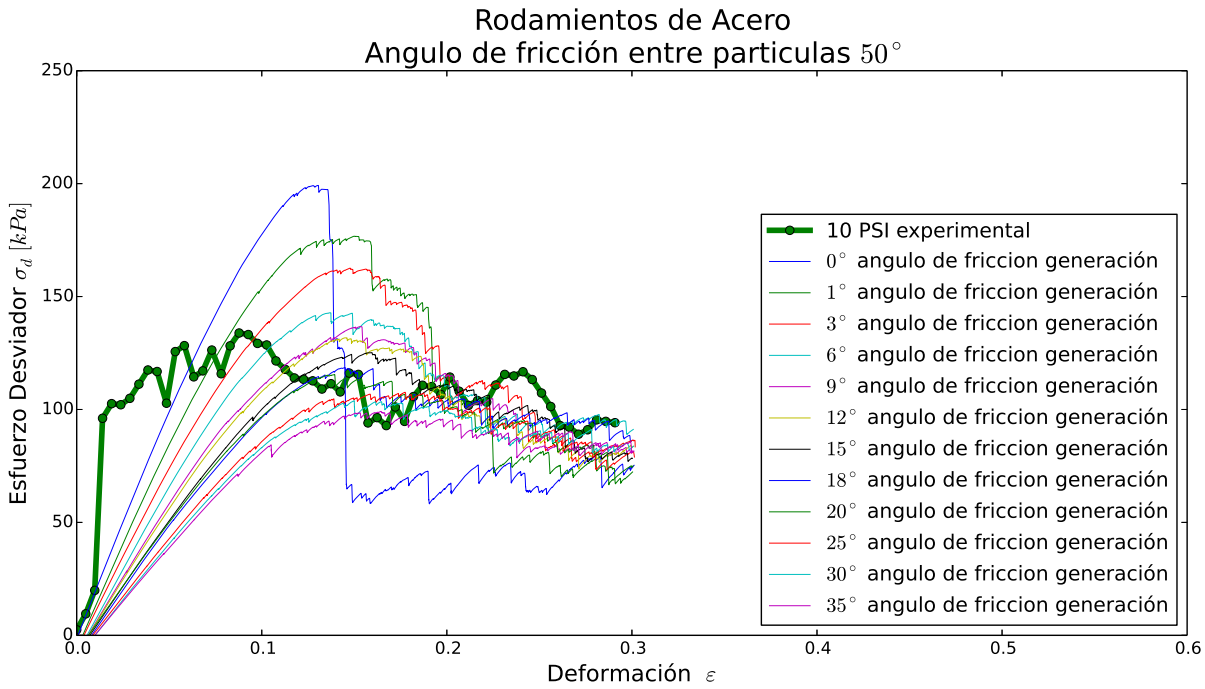


Figura A.20: Simulación con Rodamientos de Acero confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

B | Simulaciones Microesferas de Vidrio

En este capitulo se presentan Un barrido de la simulaciones realizadas para simular microesferas de vidrio.

B.1. Simulaciones con Microesferas de Vidrio

B.1.1. Simulaciones con Microesferas de Vidrio $5[psi]$

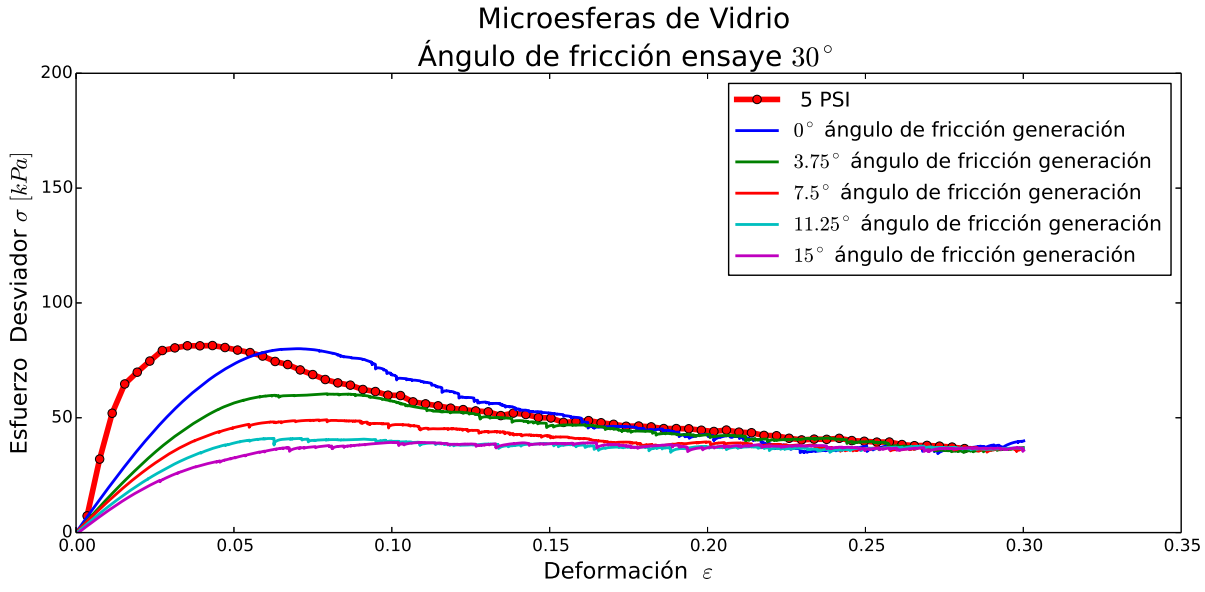


Figura B.1: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de $5[psi]$, ángulo de fricción 30° ensaye

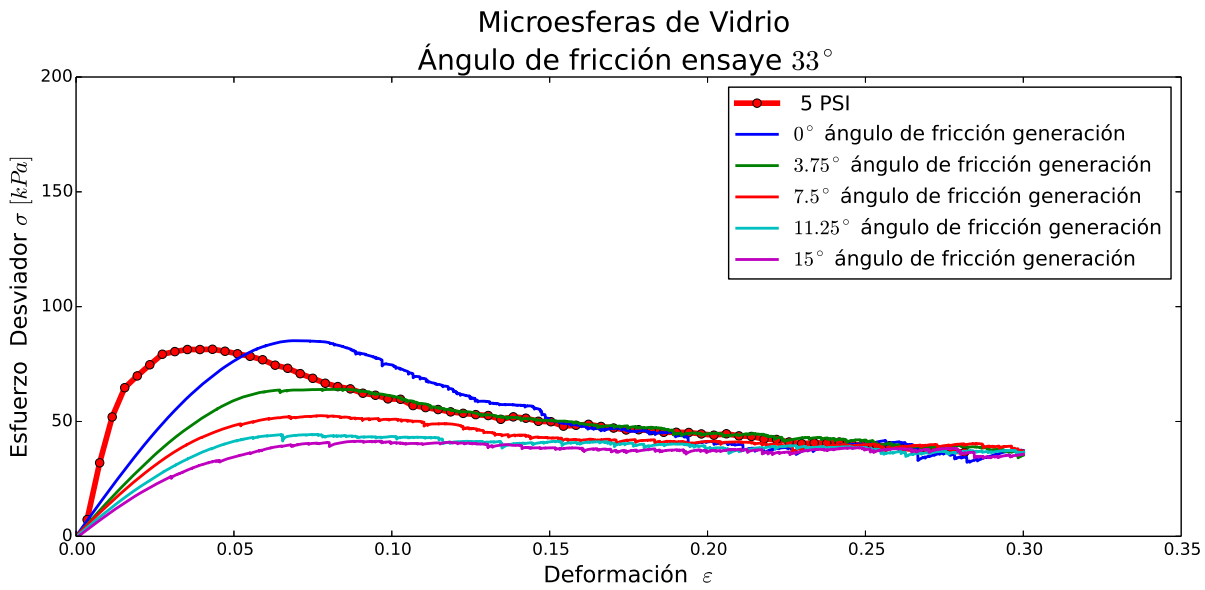


Figura B.2: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 33° ensaye

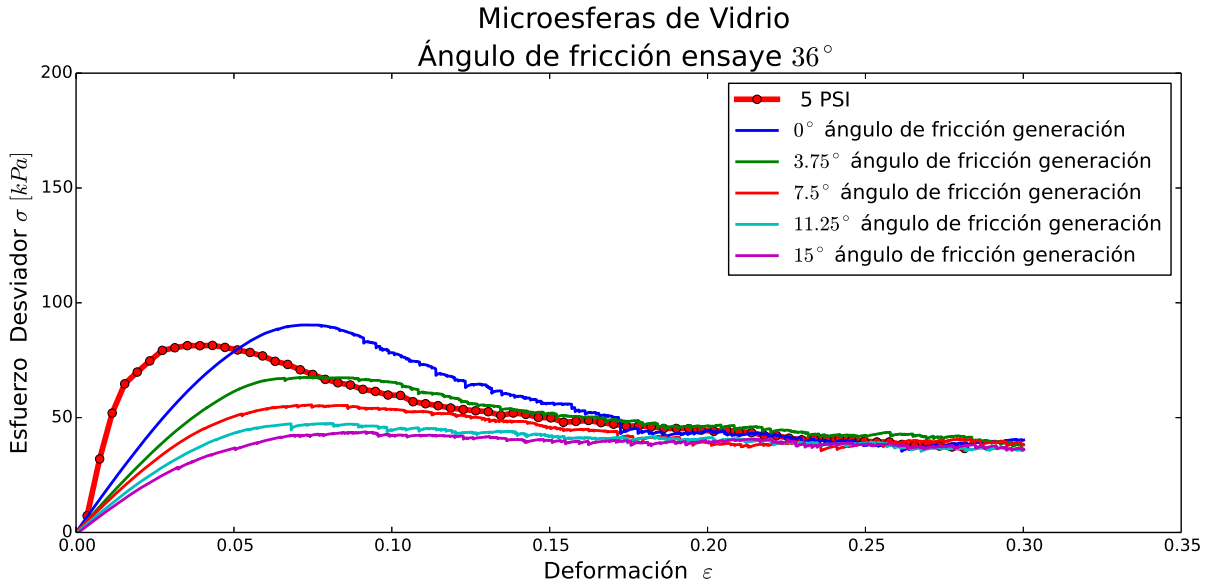


Figura B.3: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye

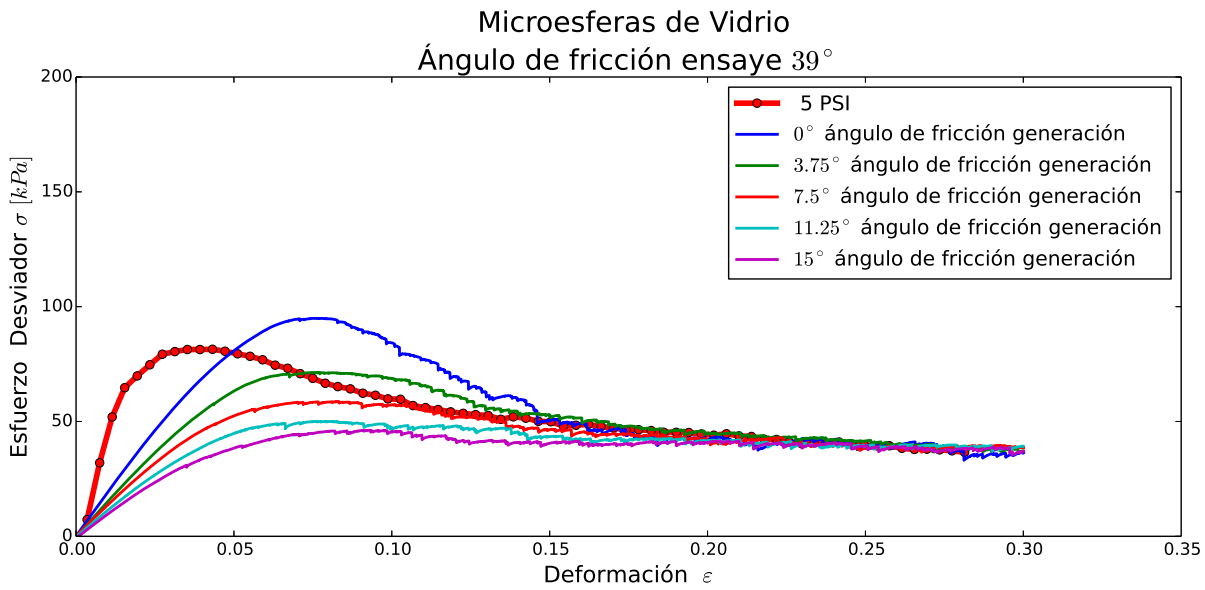


Figura B.4: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye

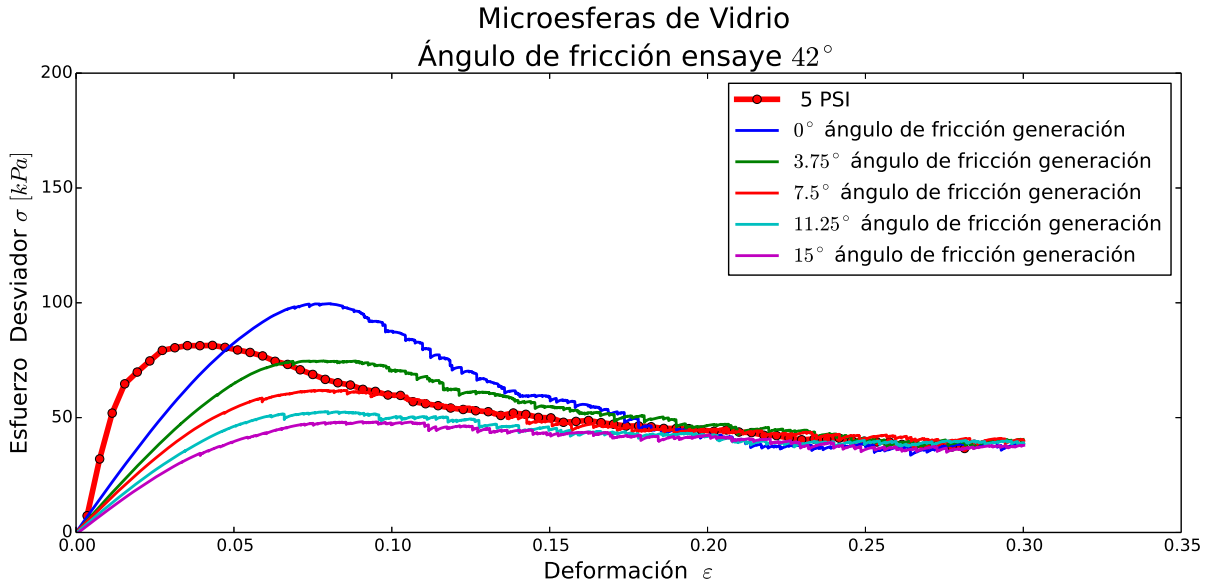


Figura B.5: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye

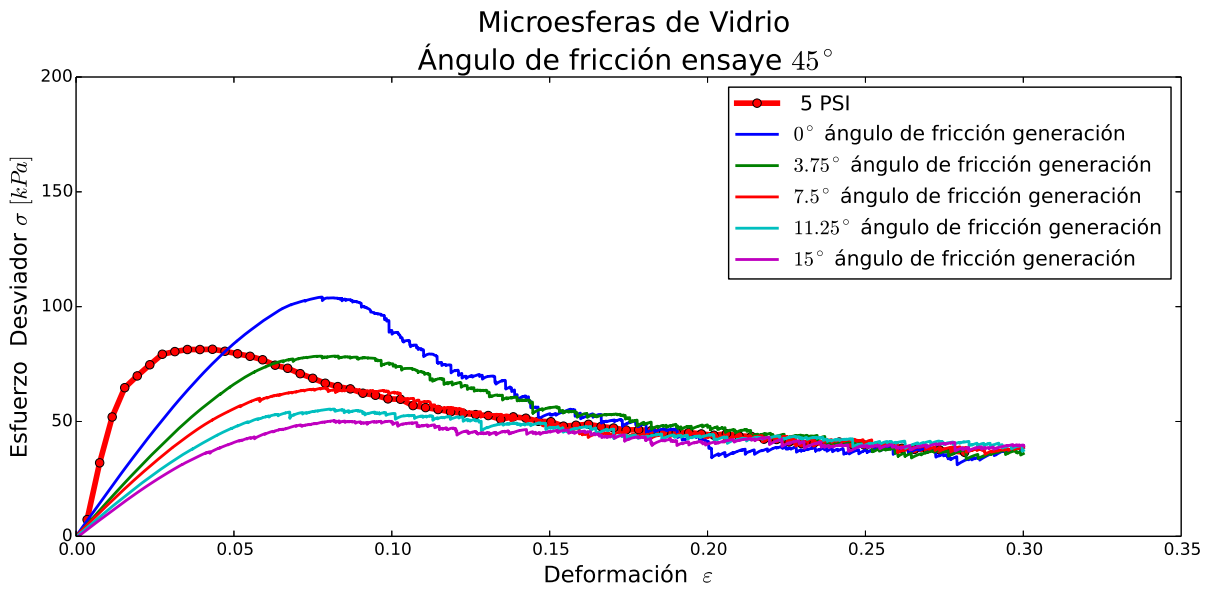


Figura B.6: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

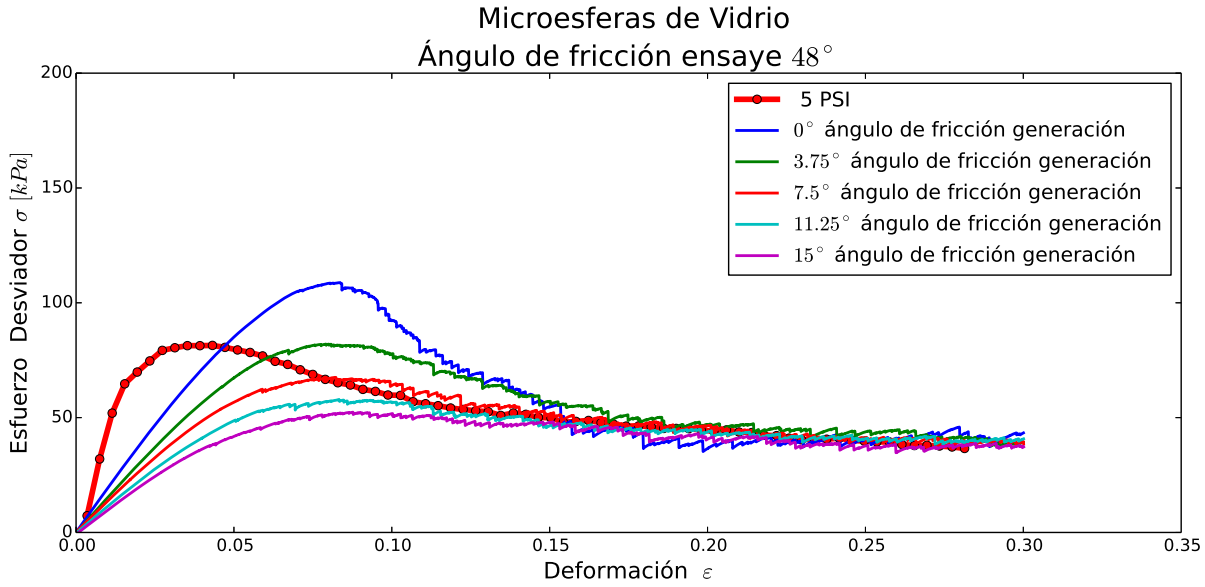


Figura B.7: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye

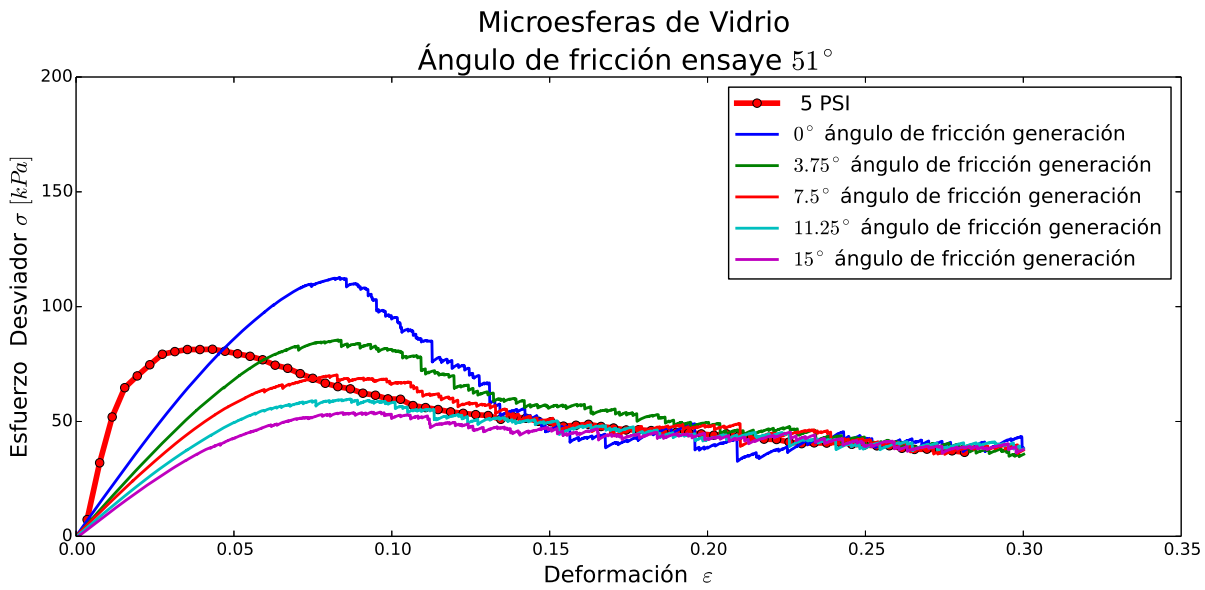


Figura B.8: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye

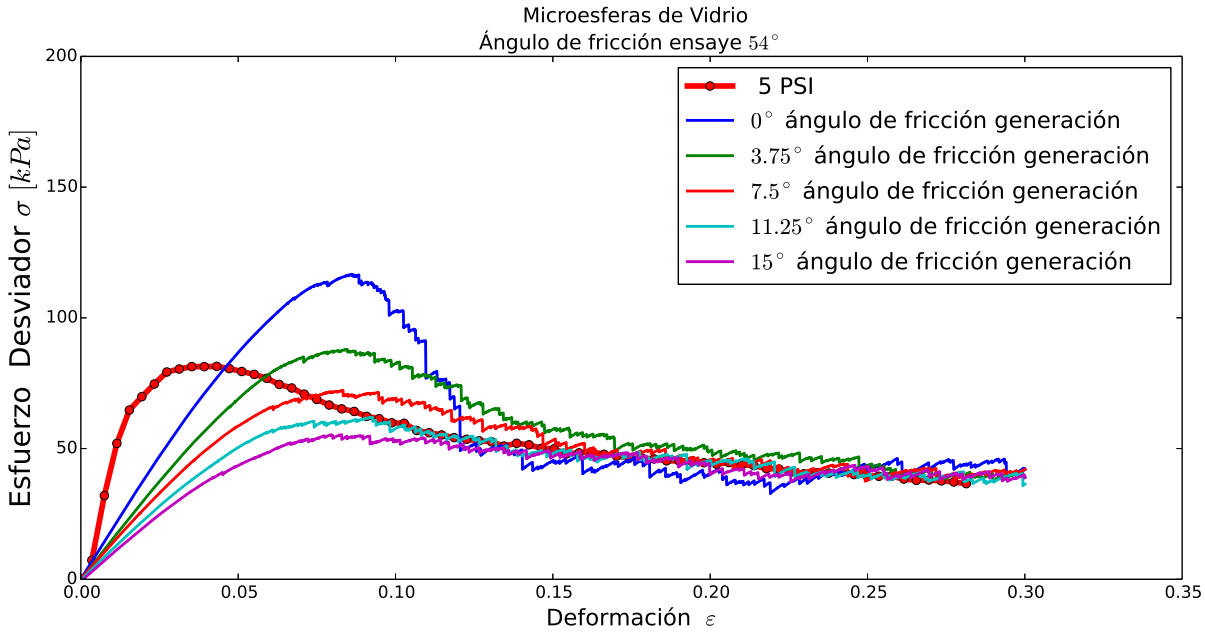


Figura B.9: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye

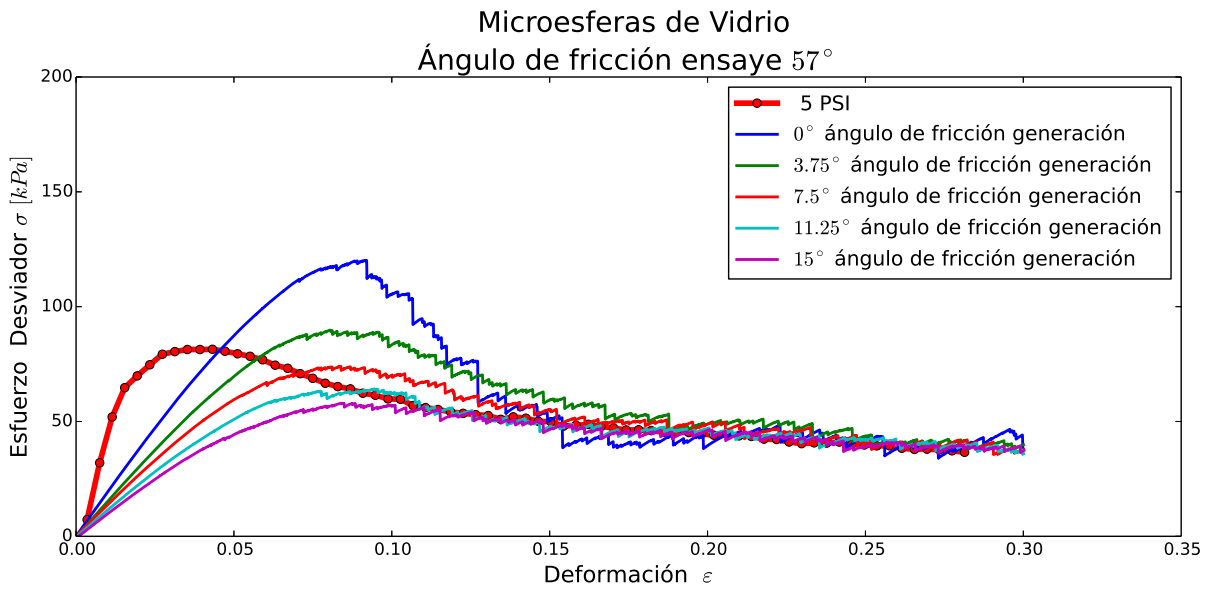


Figura B.10: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 57° ensaye

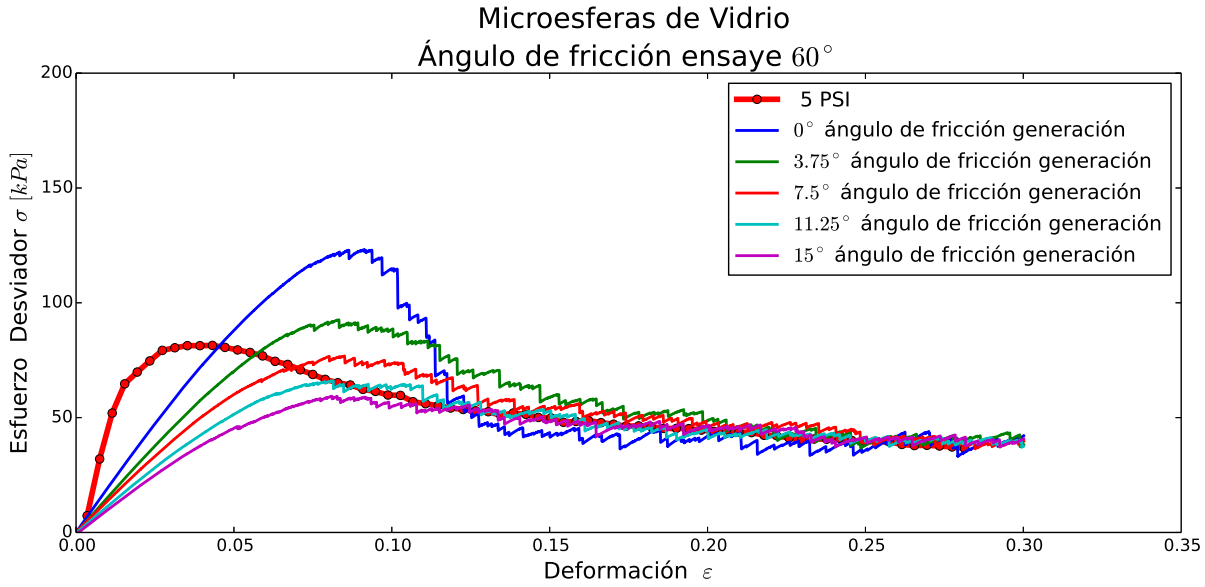


Figura B.11: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

B.1.2. Simulaciones con Microesferas de Vidrio $10[psi]$

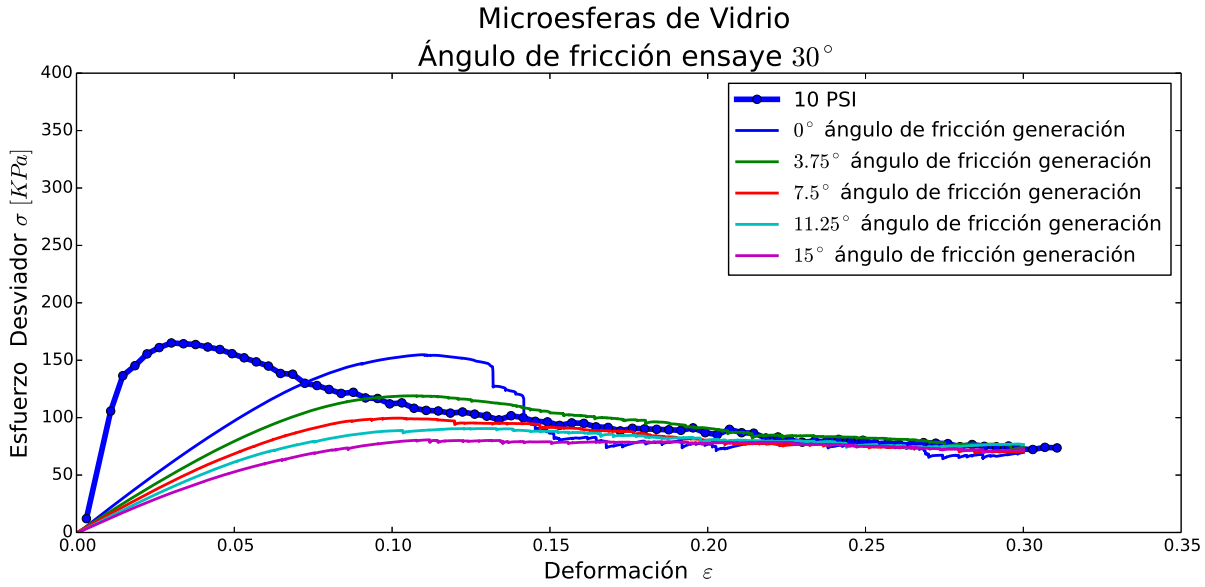


Figura B.12: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de $10[psi]$, ángulo de fricción 30° ensaye

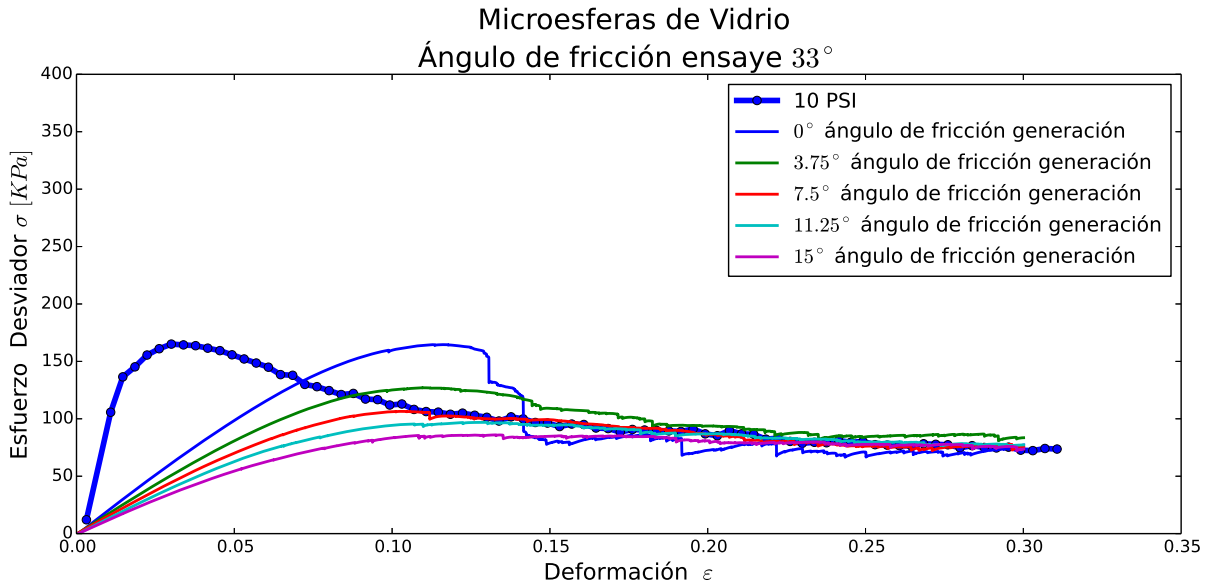


Figura B.13: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de $10[psi]$, ángulo de fricción 33° ensaye

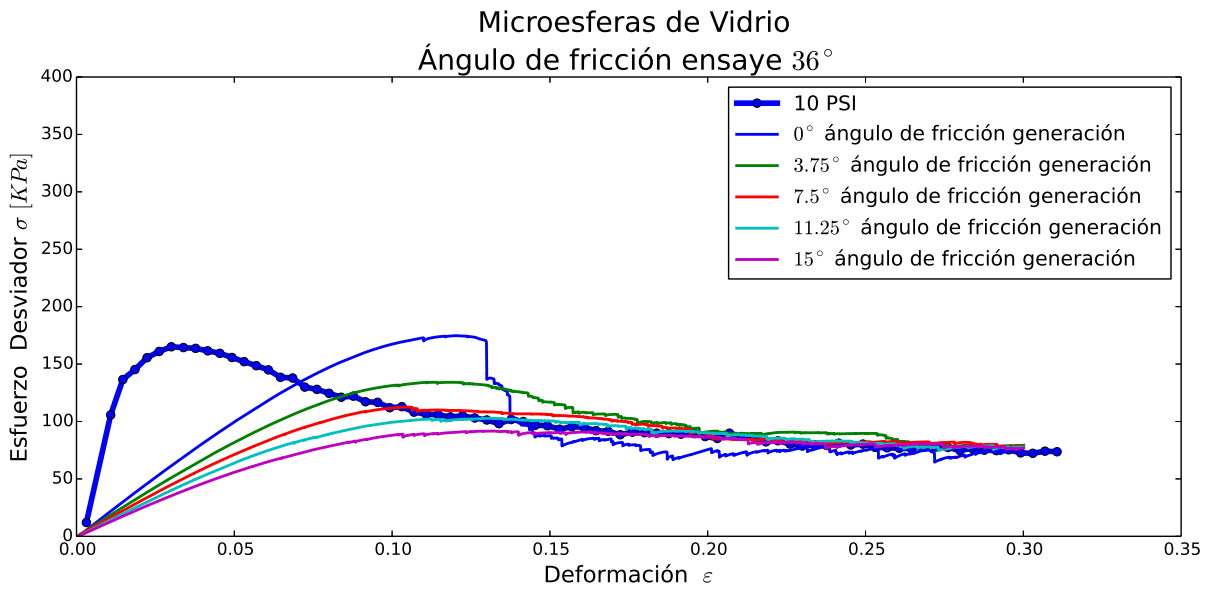


Figura B.14: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye

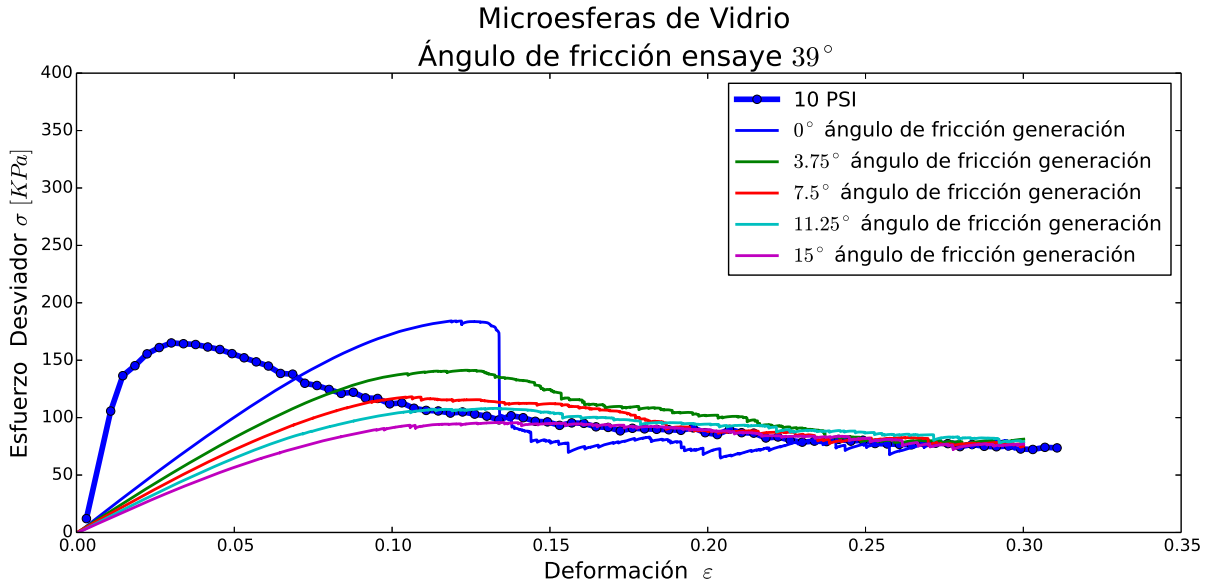


Figura B.15: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye

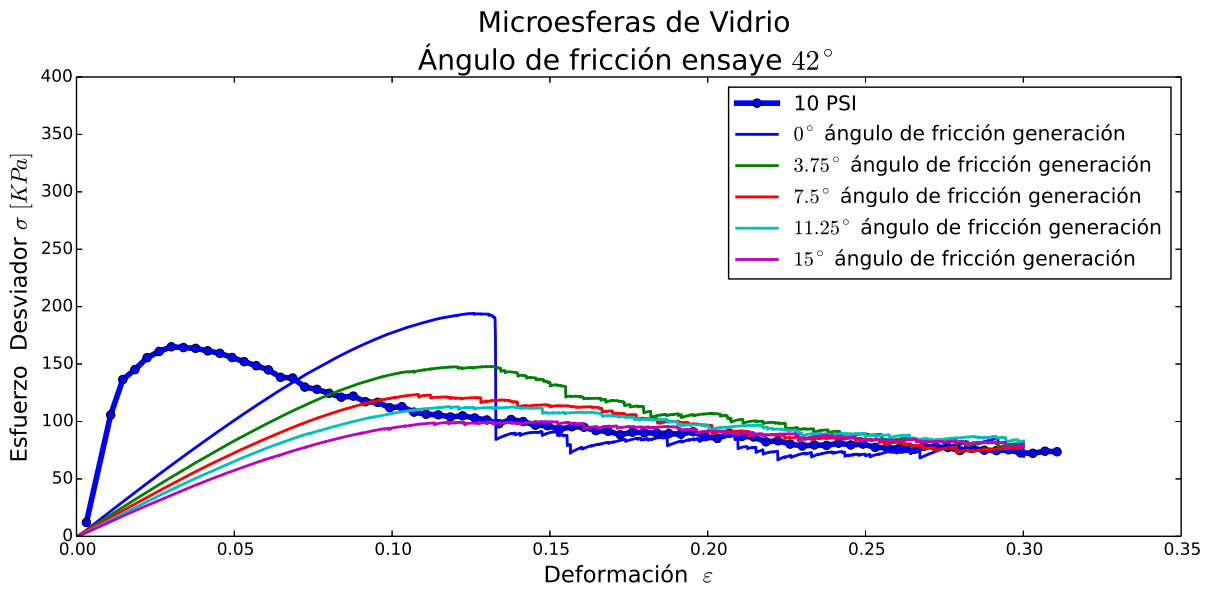


Figura B.16: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye

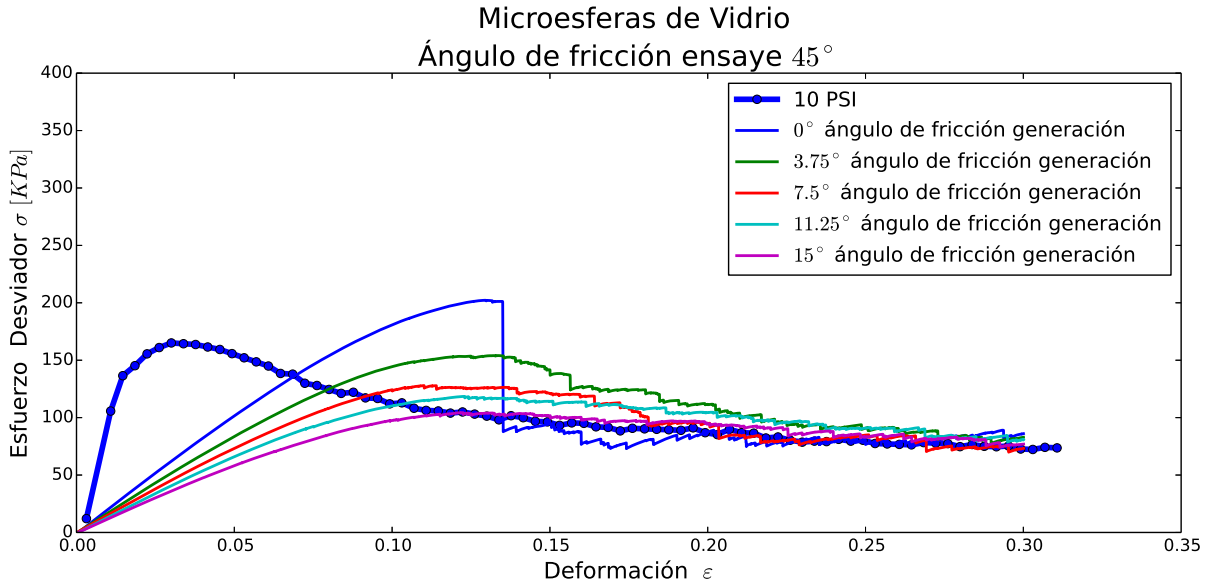


Figura B.17: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

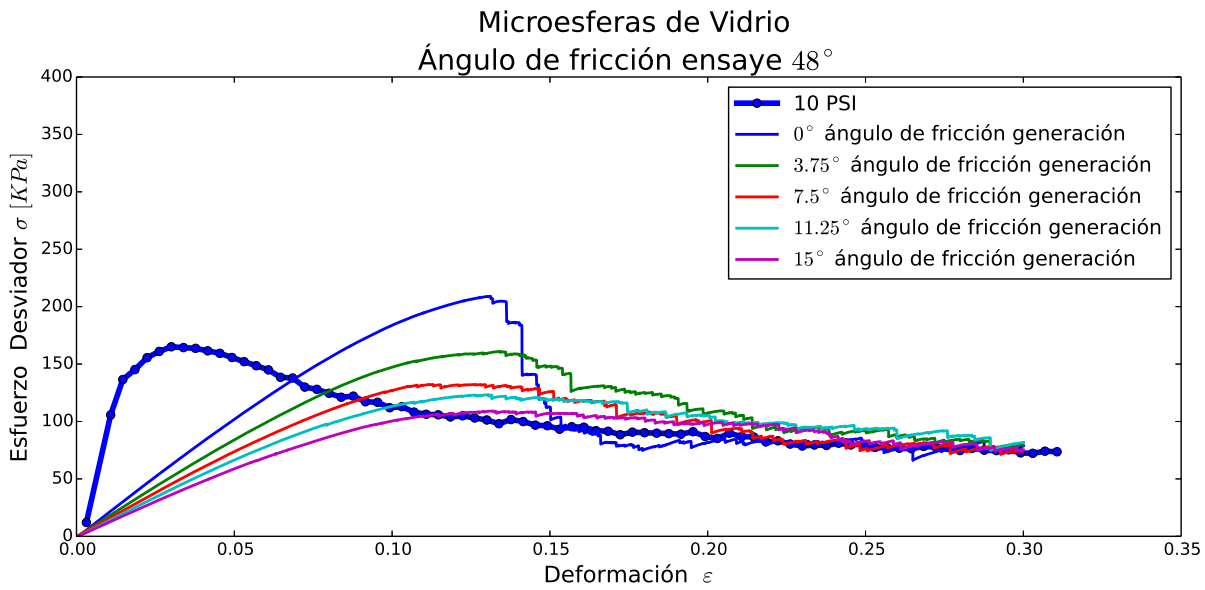


Figura B.18: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye

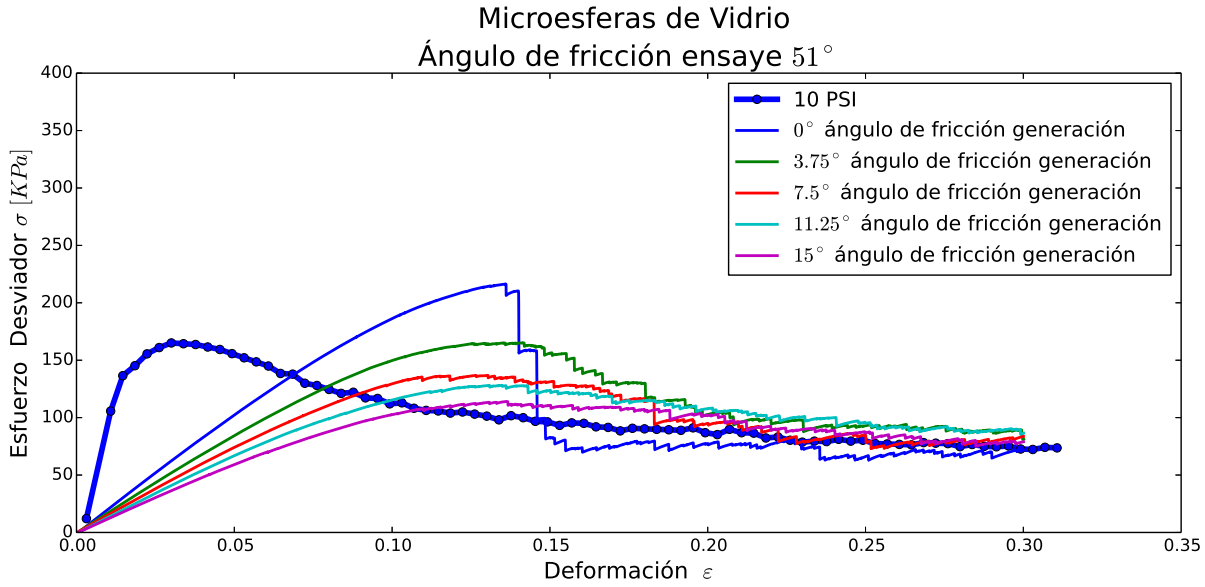


Figura B.19: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye

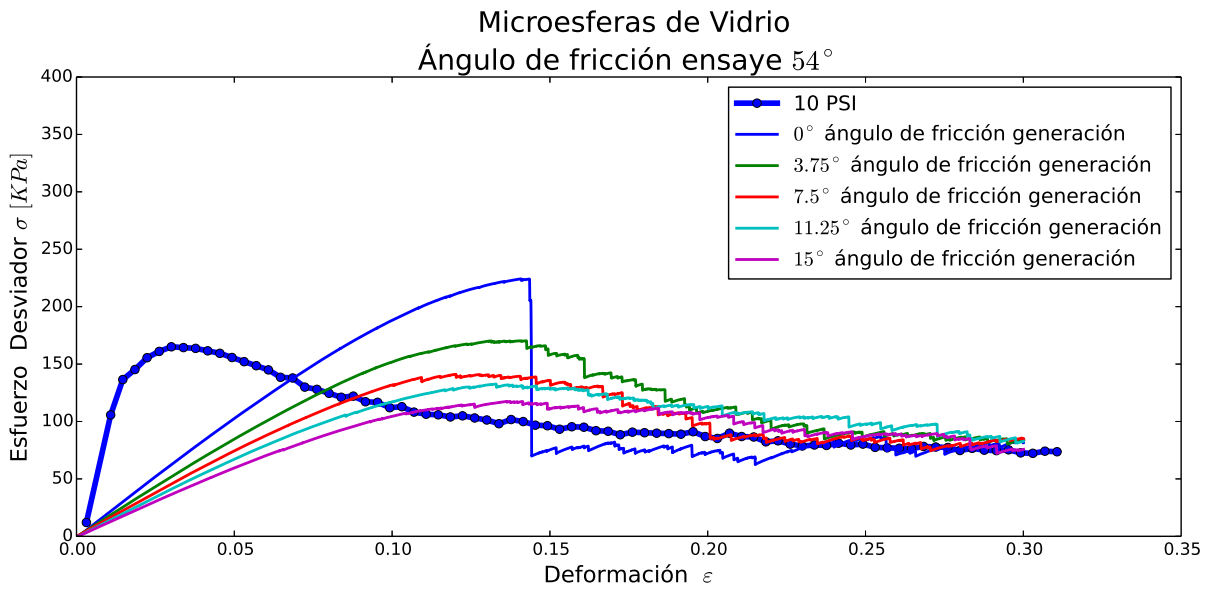


Figura B.20: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye

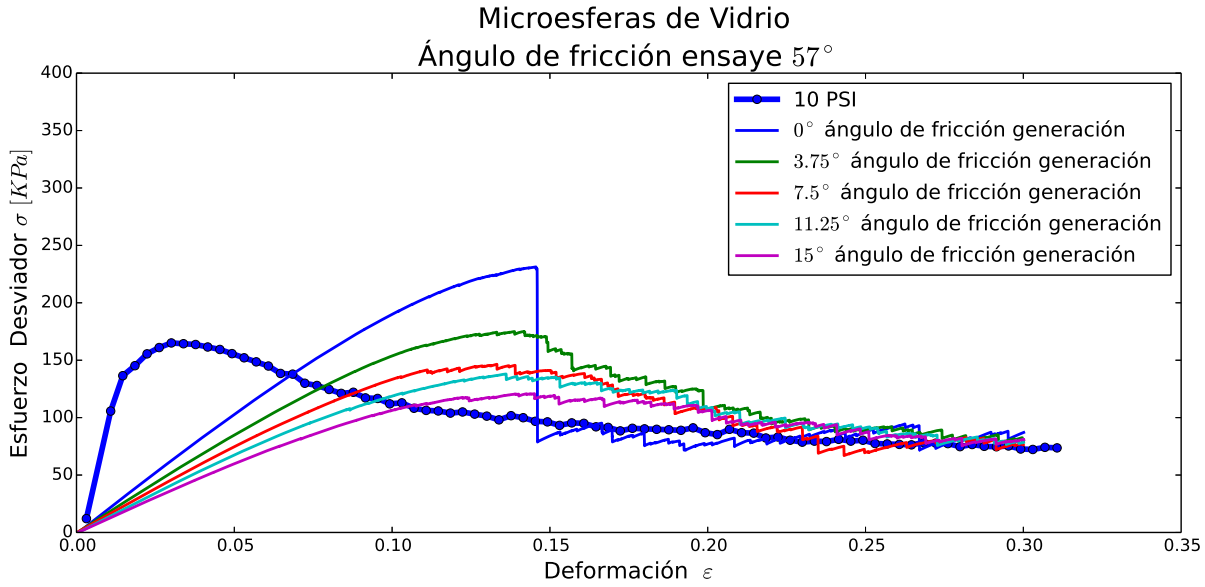


Figura B.21: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 57° ensaye

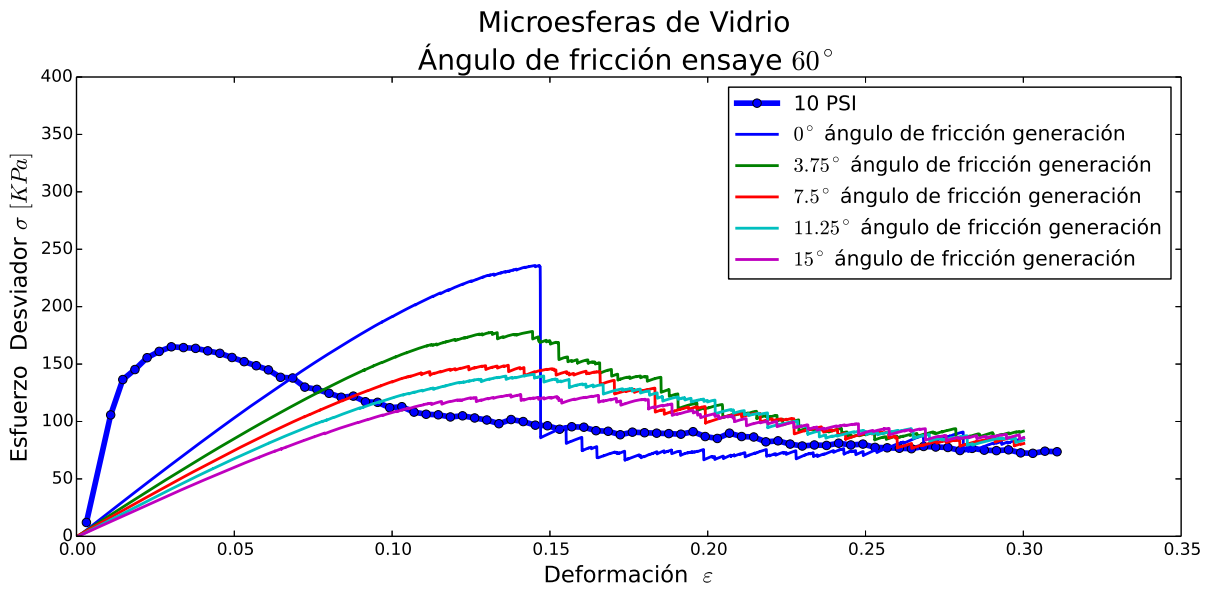


Figura B.22: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 10[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

B.1.3. Simulaciones con Microesferas de Vidrio 20[psi]

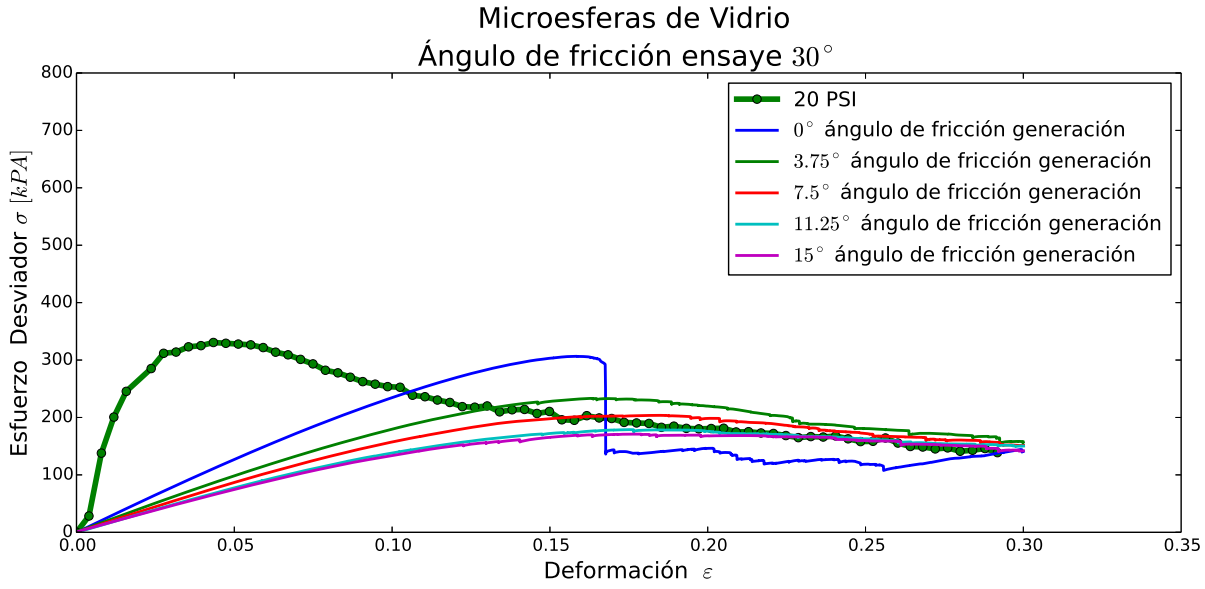


Figura B.23: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 30° ensaye

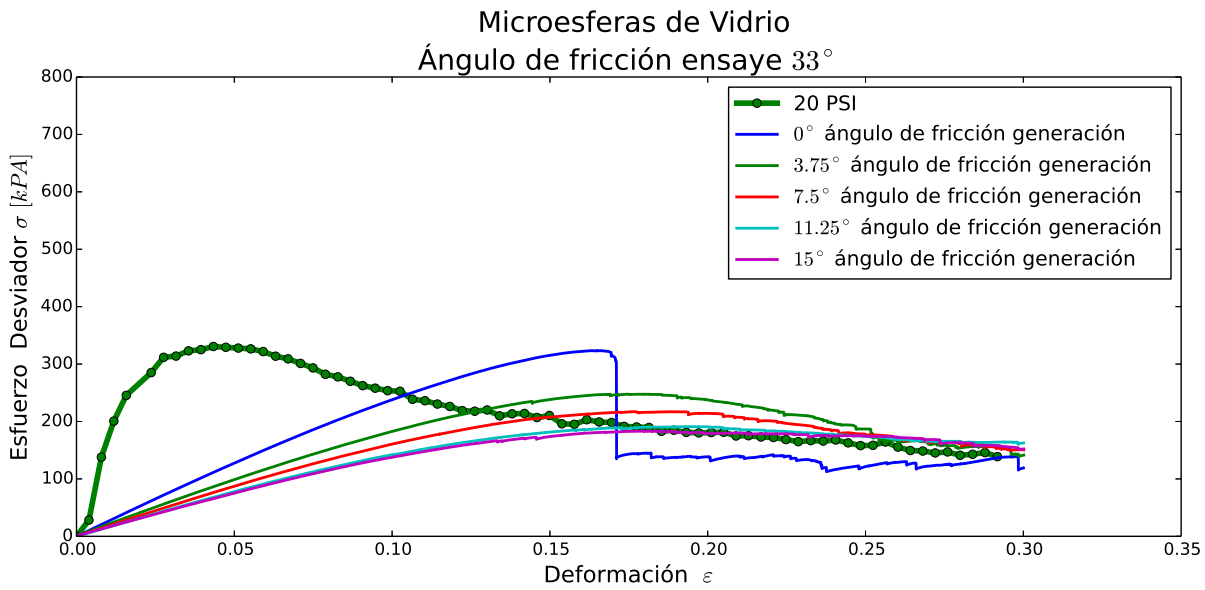


Figura B.24: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 33° ensaye

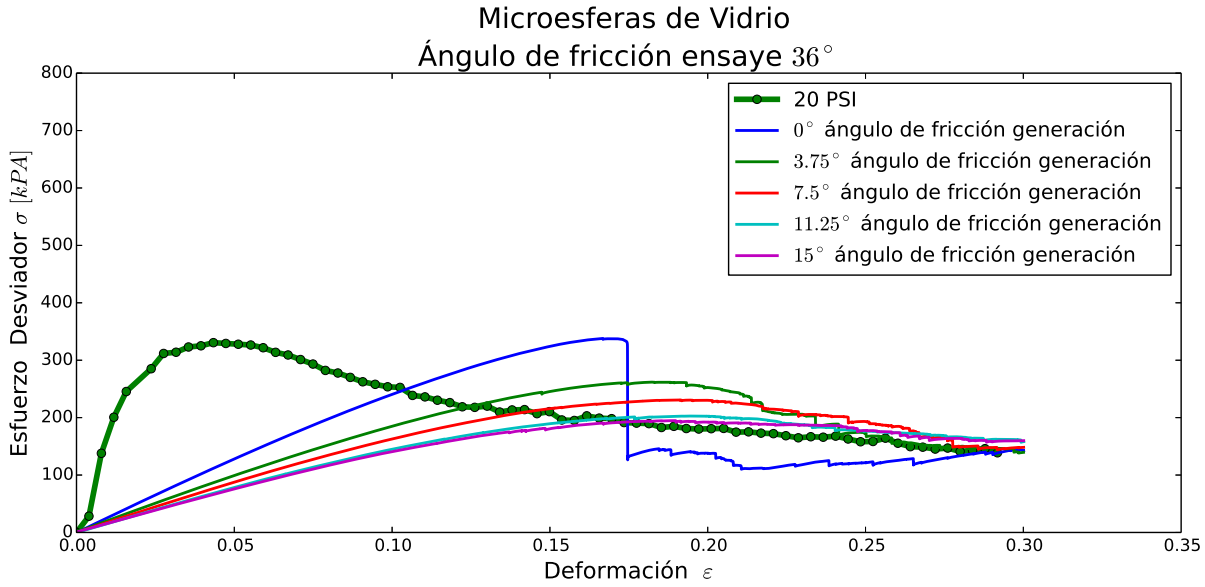


Figura B.25: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 36° ensaye

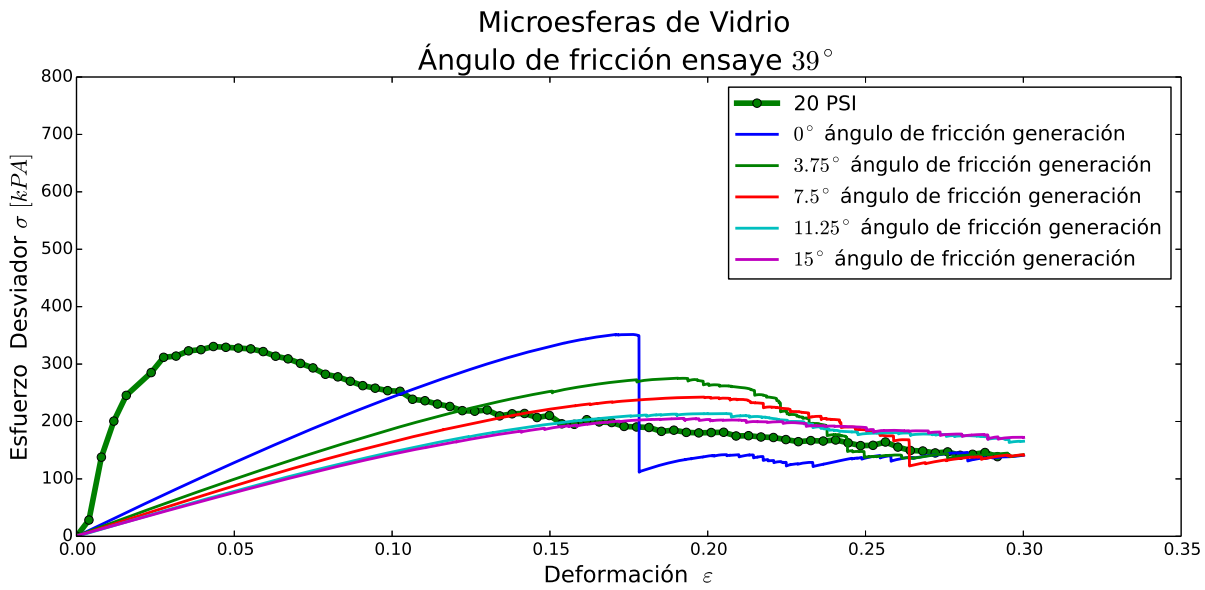


Figura B.26: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 39° ensaye

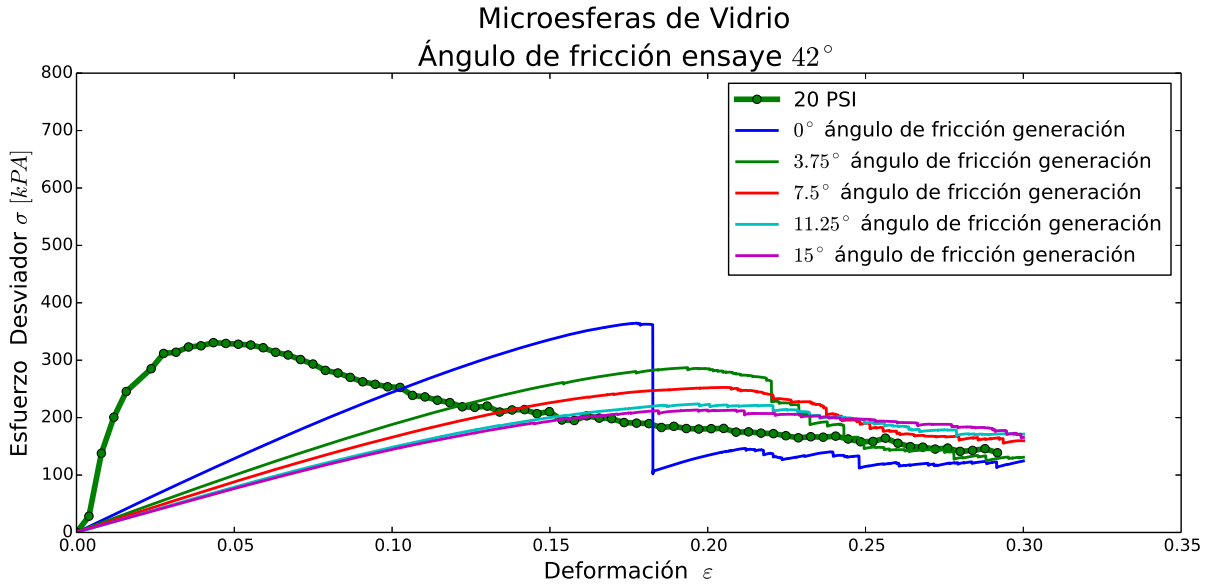


Figura B.27: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 42° ensaye

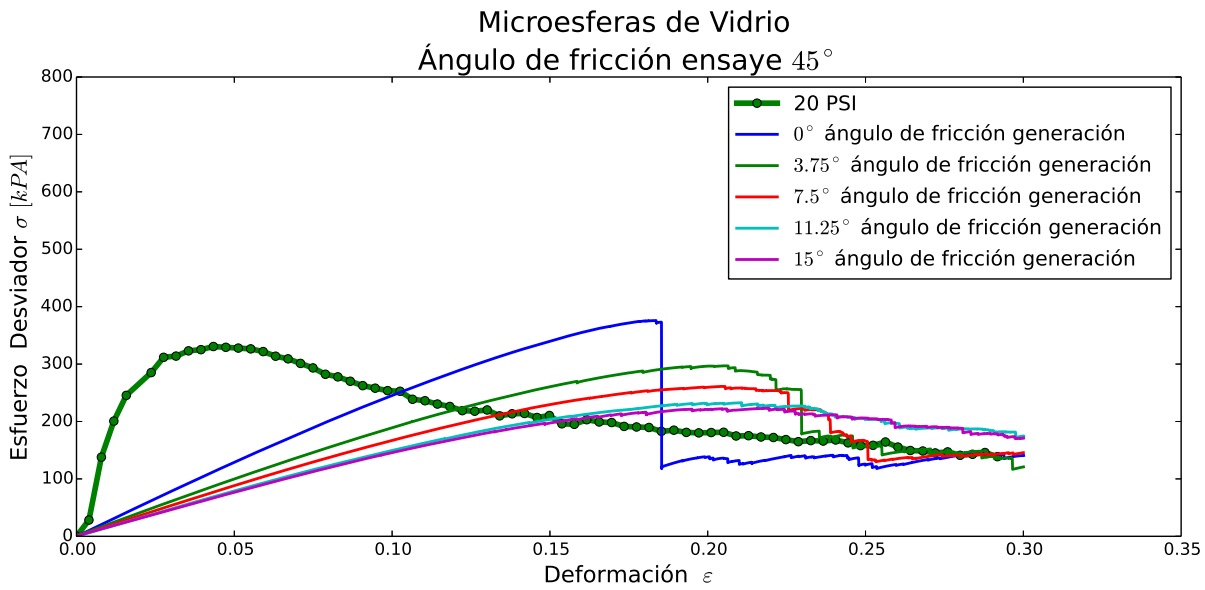


Figura B.28: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

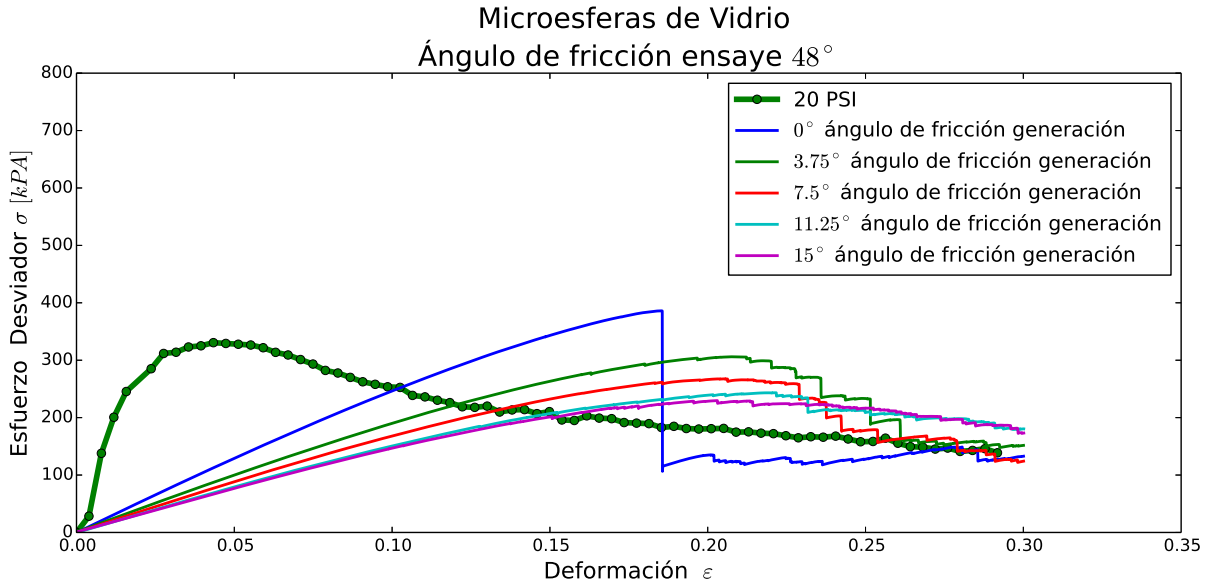


Figura B.29: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 48° ensaye

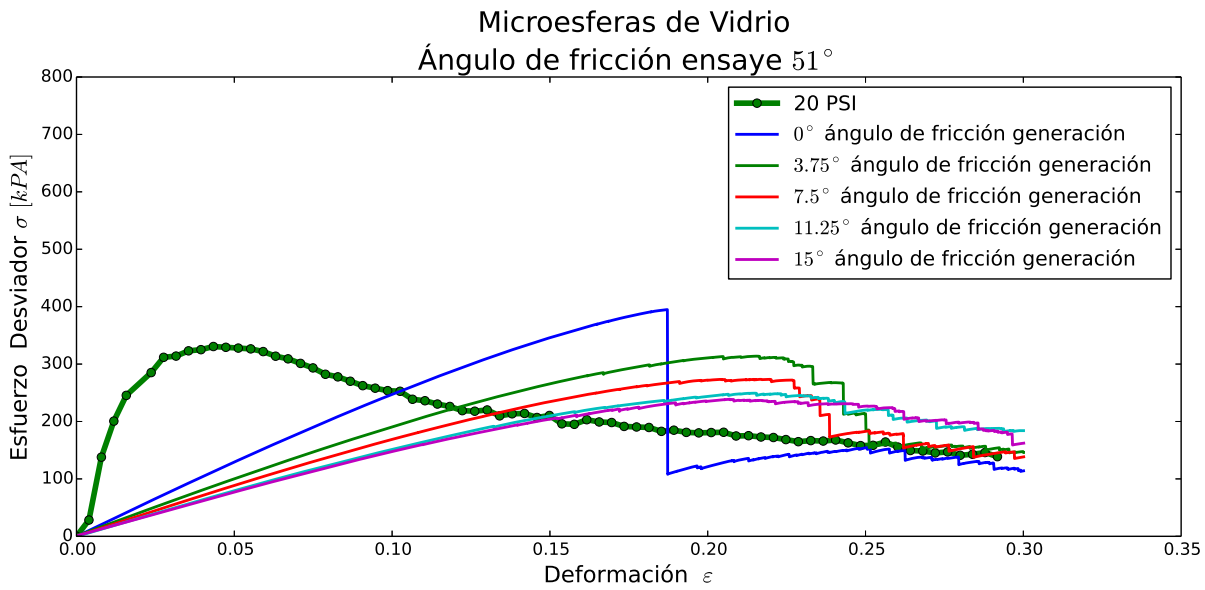


Figura B.30: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 51° ensaye

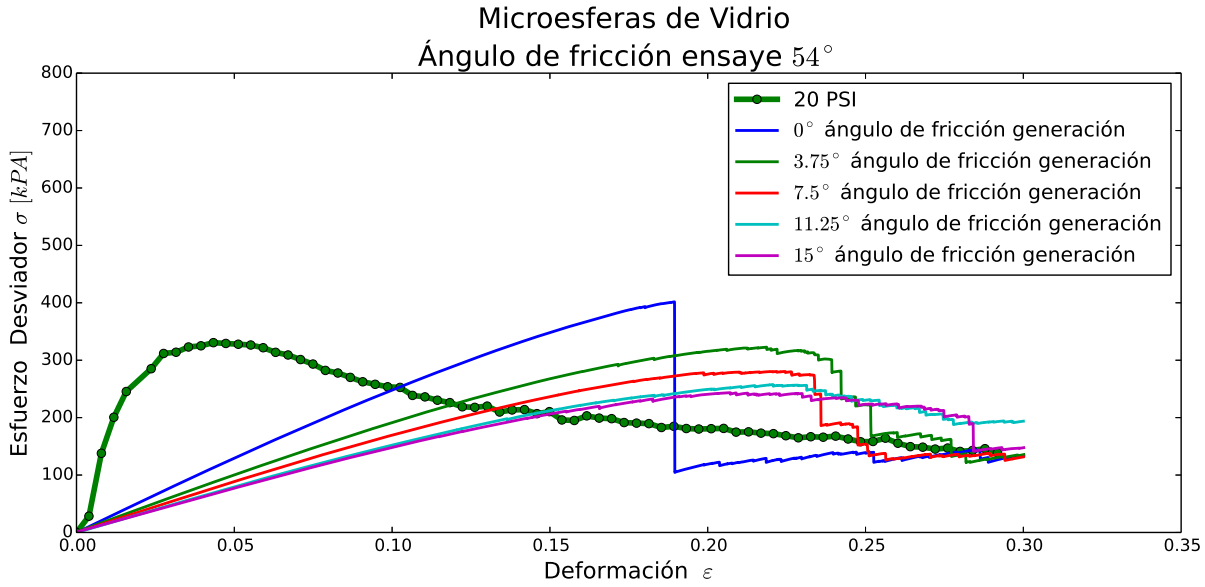


Figura B.31: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 54° ensaye

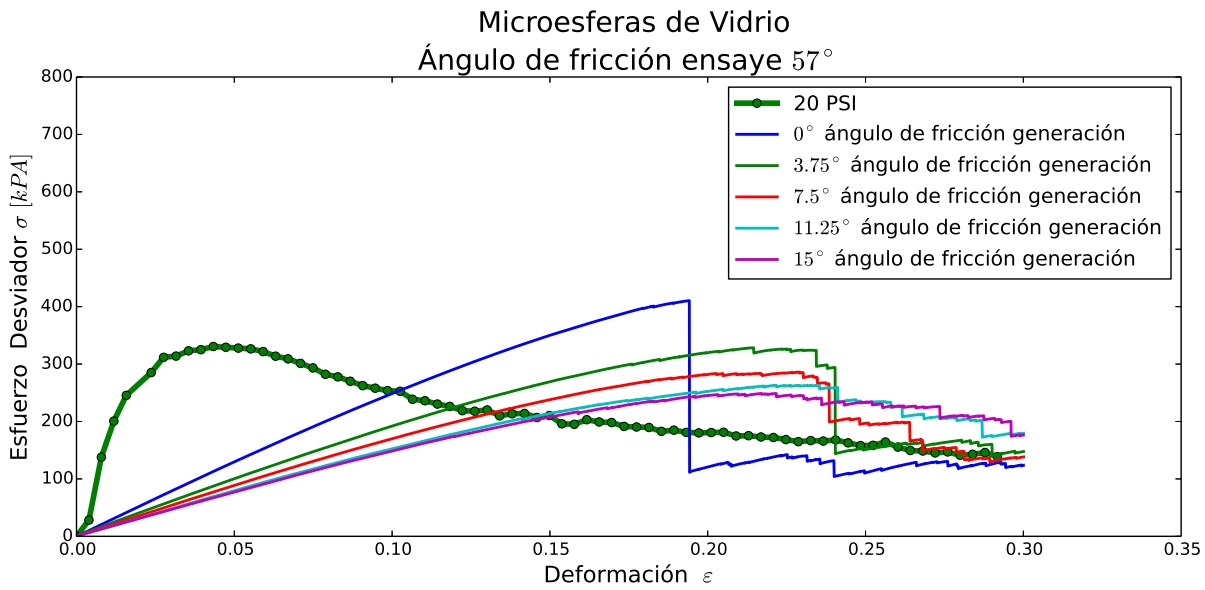


Figura B.32: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 57° ensaye

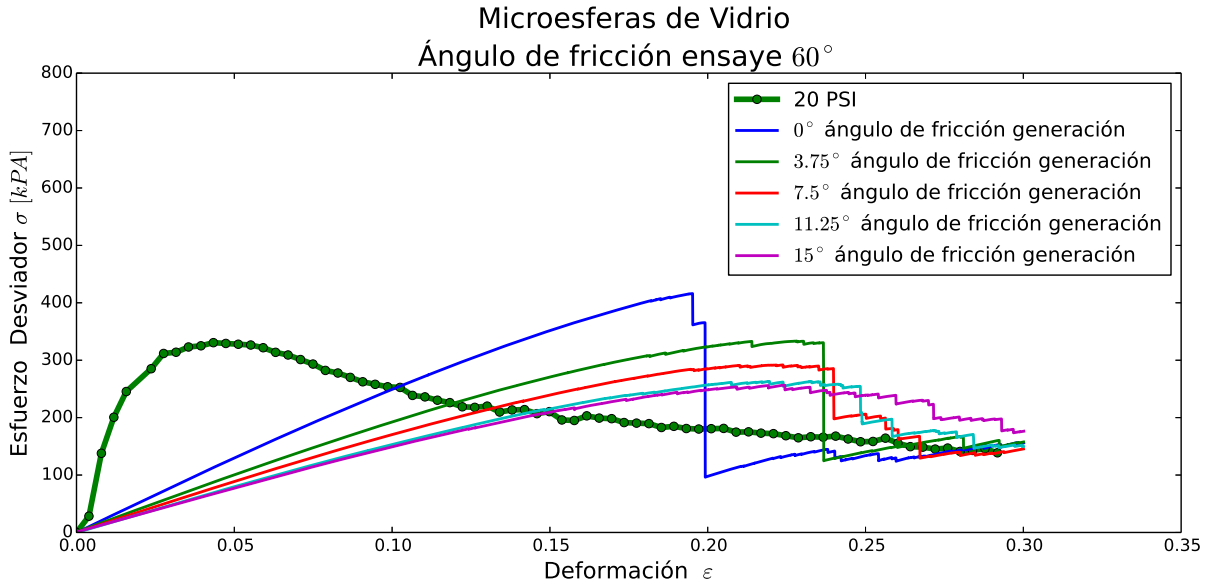


Figura B.33: Simulación con Microesferas de Vidrio confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

C | Simulaciones de Granito Meteorizado con Clumps

En este capitulo se presentan un barrido de la simulaciones realizadas para simular el granito meteorizado. Se utilizaron tres geometrias diferentes de clumps las cuales se presentaran individualmente en los siguentes apartados.

C.1. Simulaciones con Clumps Diédricos

C.1.1. Simulaciones con Clumps Diédricos $5[psi]$

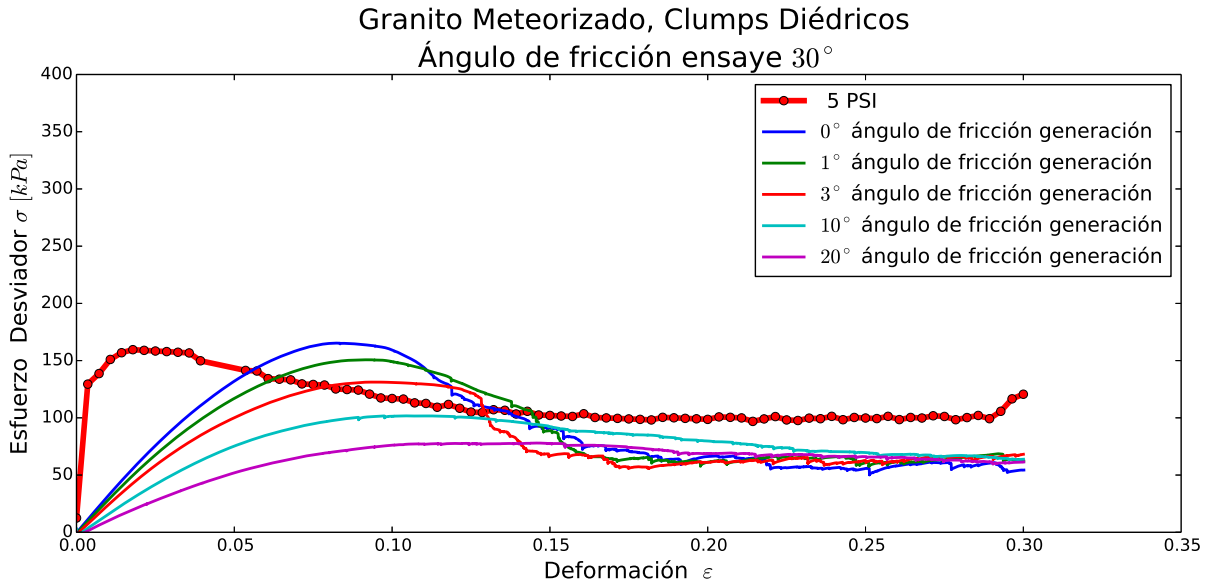


Figura C.1: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye

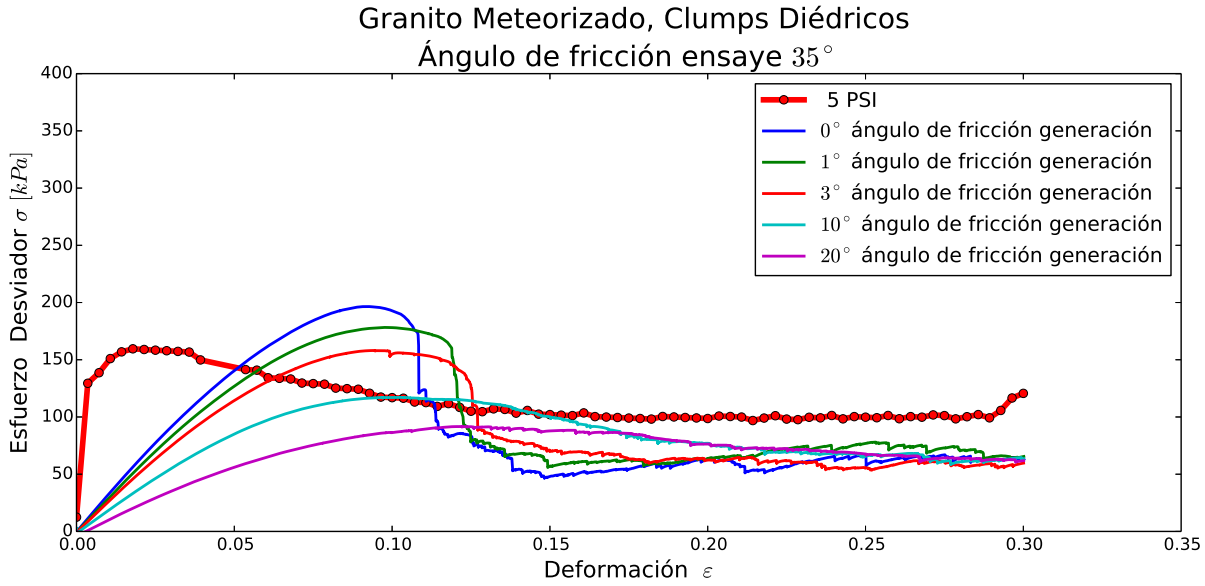


Figura C.2: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

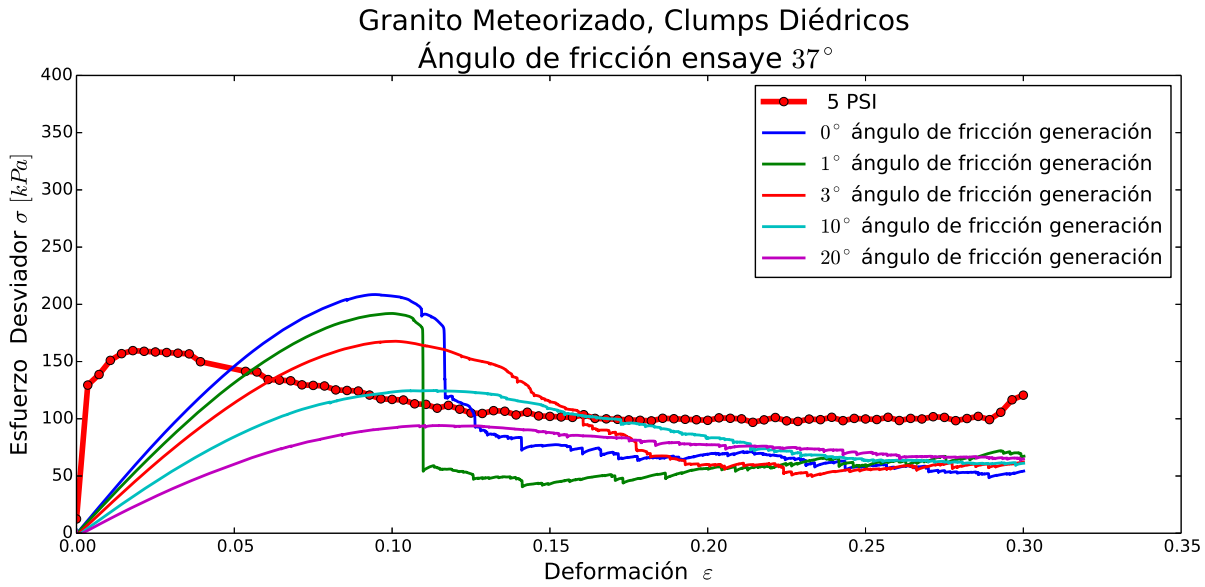


Figura C.3: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

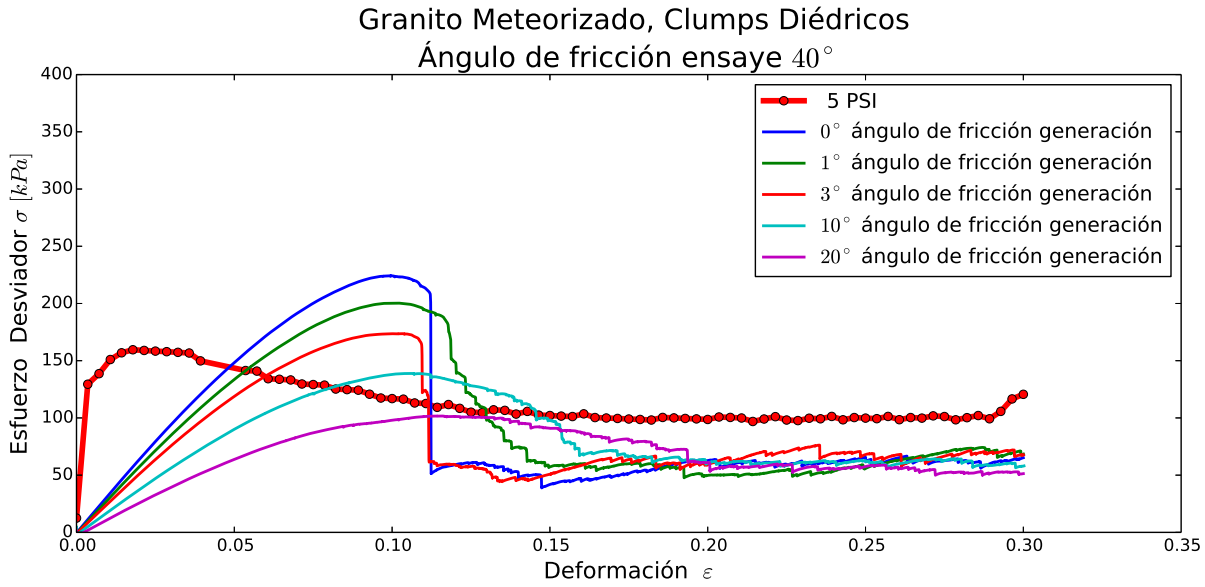


Figura C.4: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

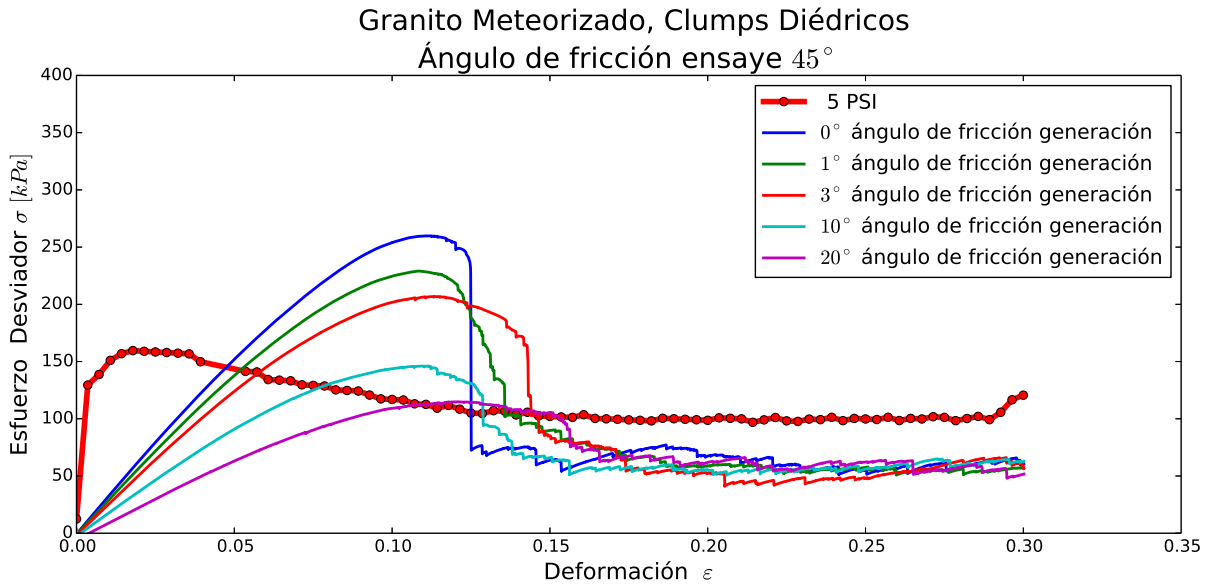


Figura C.5: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

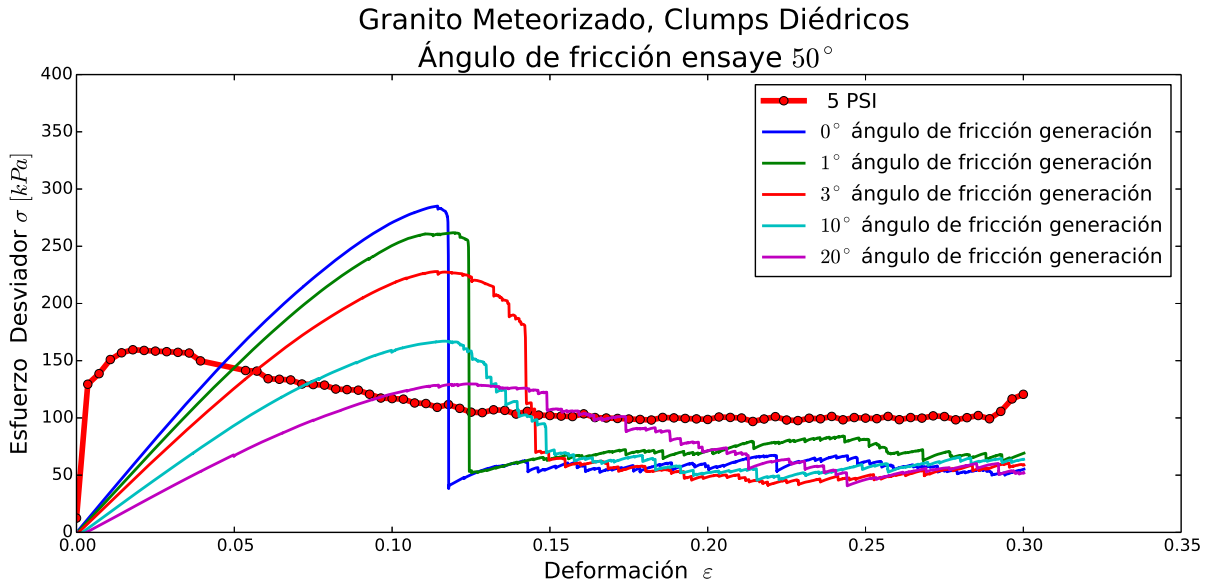


Figura C.6: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

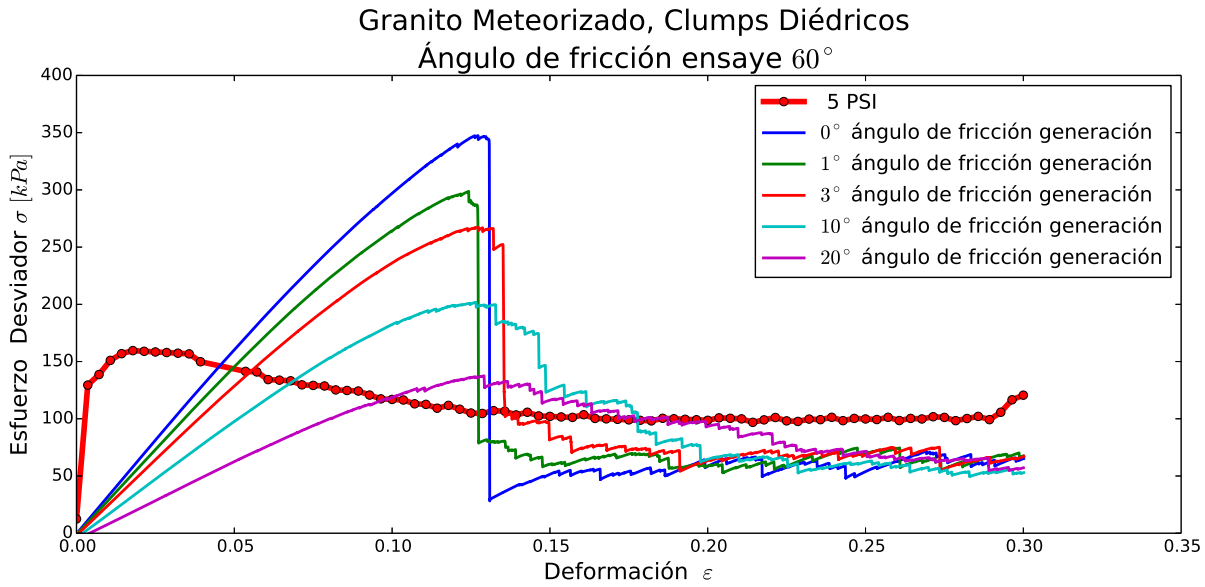


Figura C.7: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

C.1.2. Simulaciones con Clumps Diédricos 10[psi]

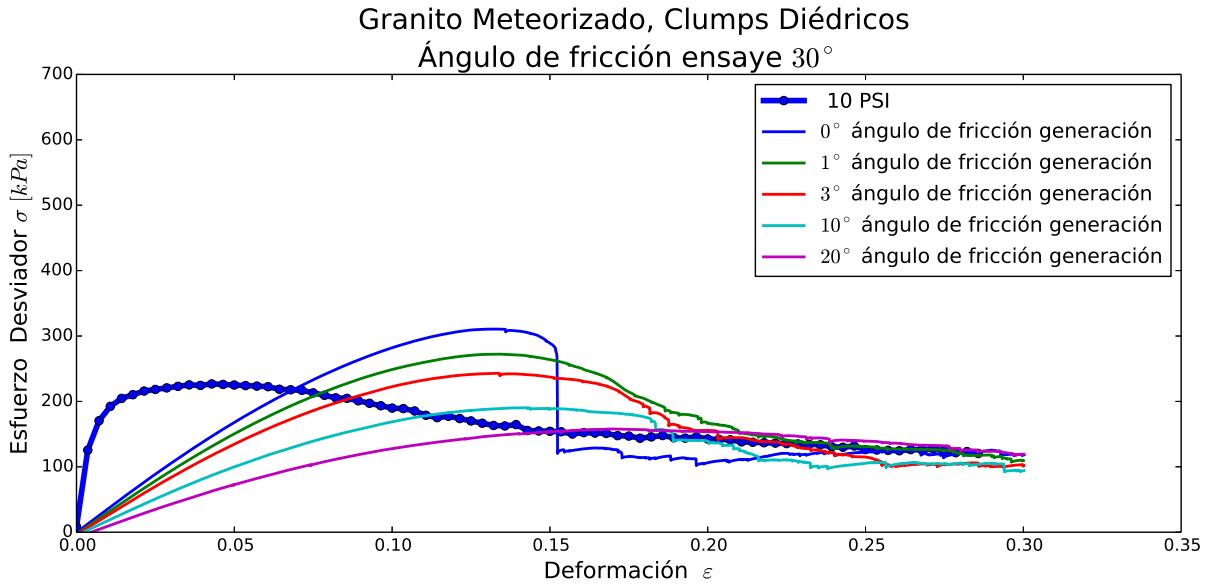


Figura C.8: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[psi], ángulo de fricción 30° ensaye

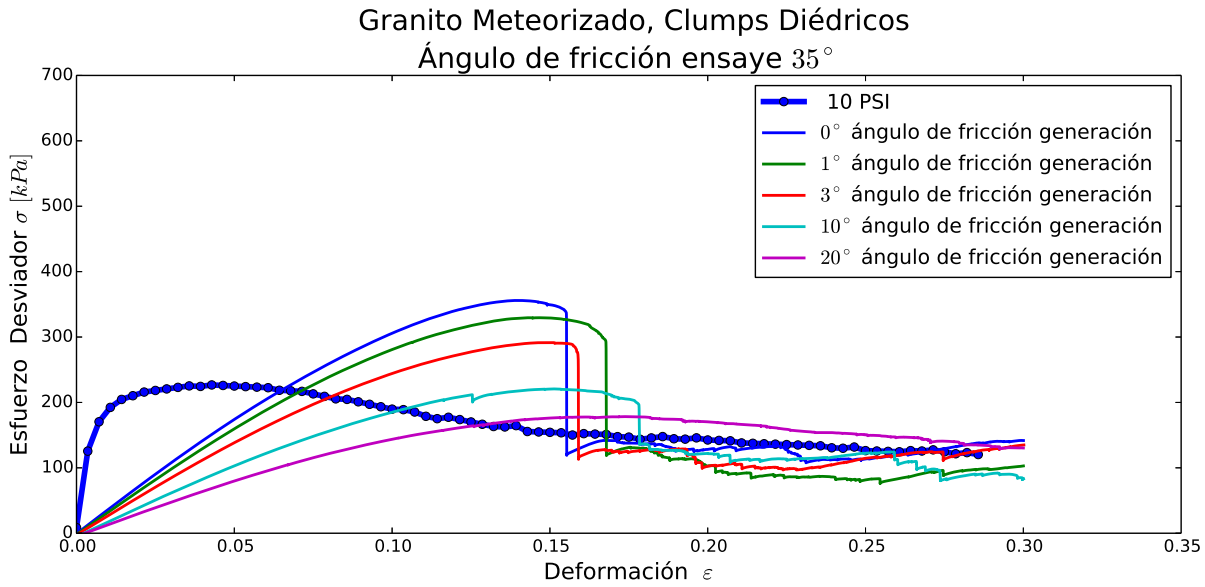


Figura C.9: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

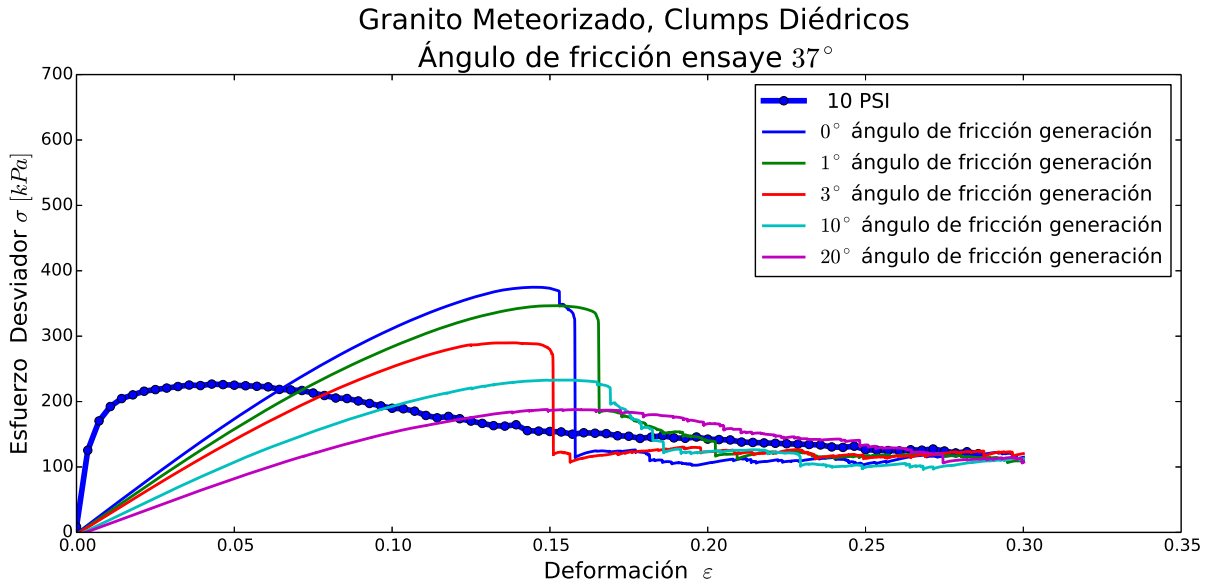


Figura C.10: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

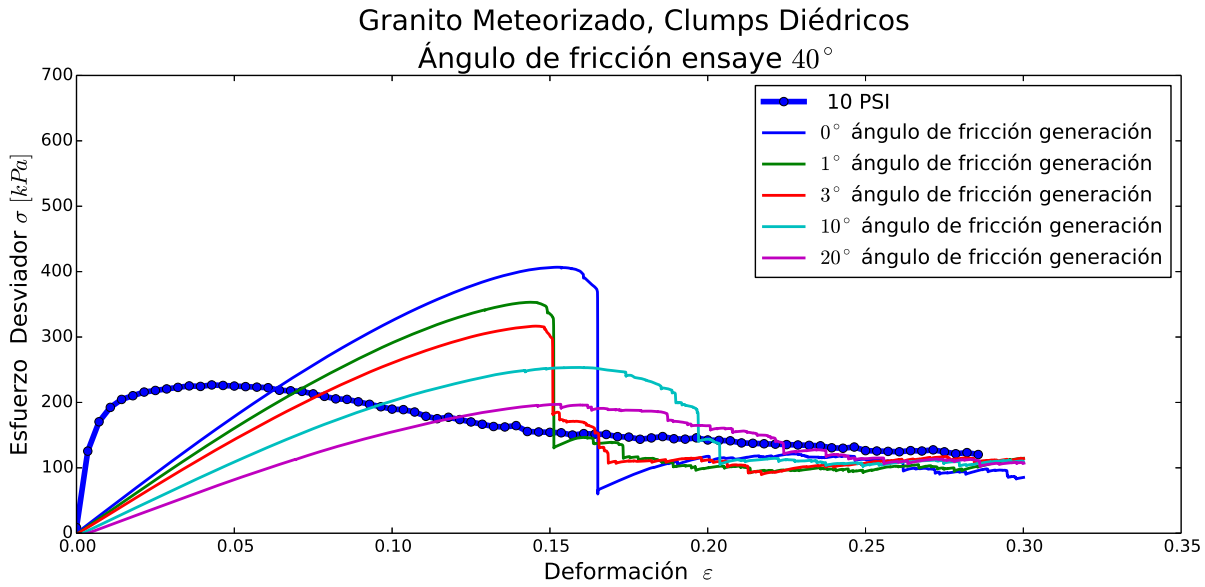


Figura C.11: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

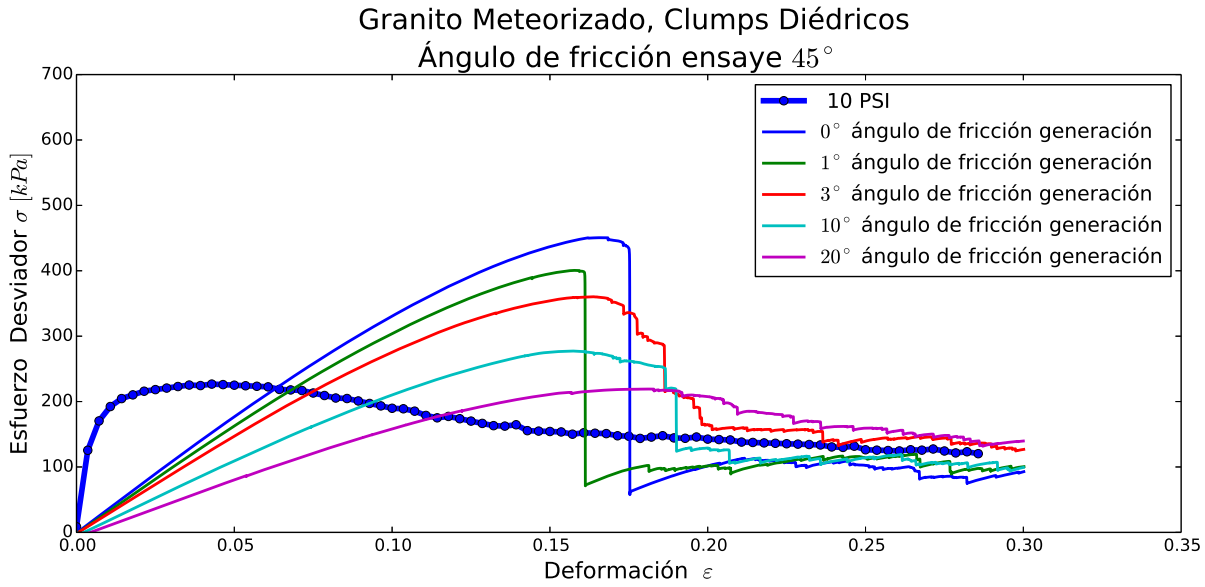


Figura C.12: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

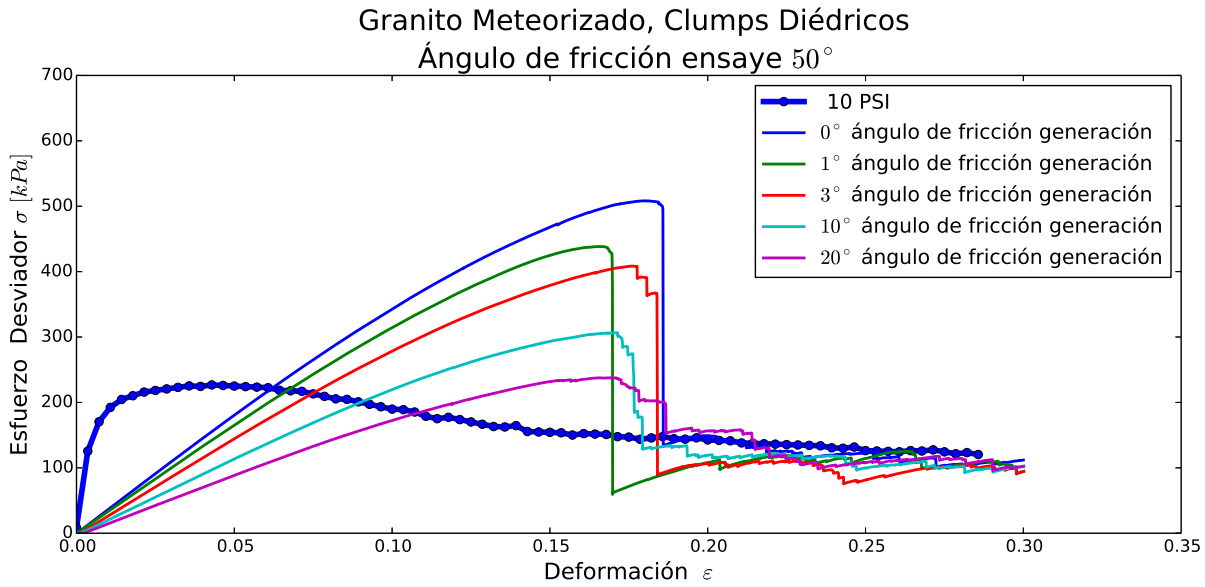


Figura C.13: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

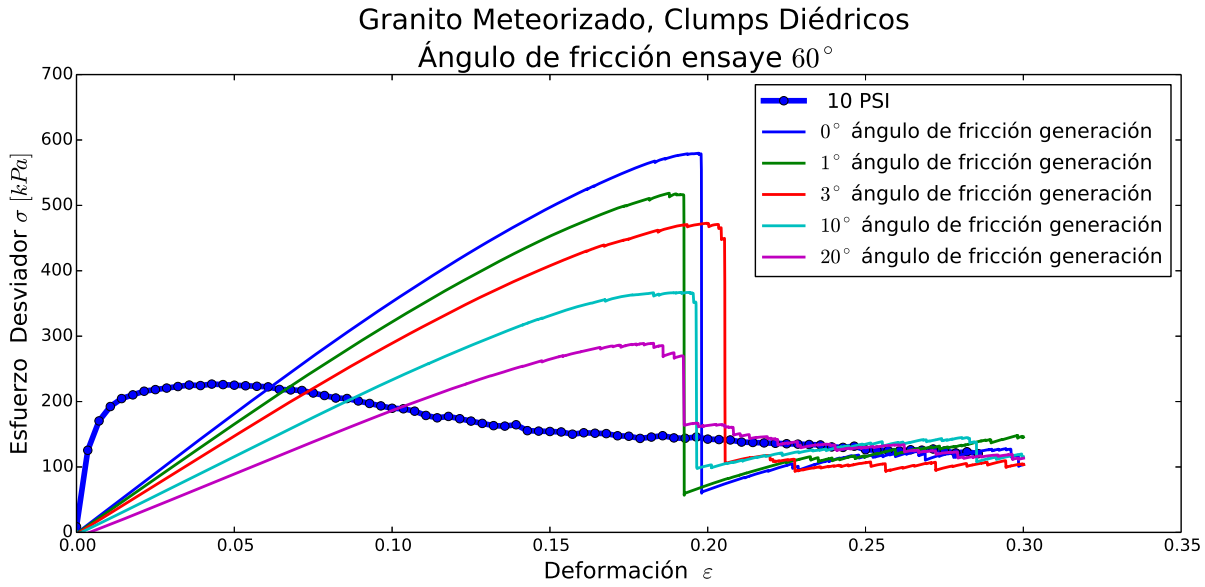


Figura C.14: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

C.1.3. Simulaciones con Clumps Diédricos $20[psi]$

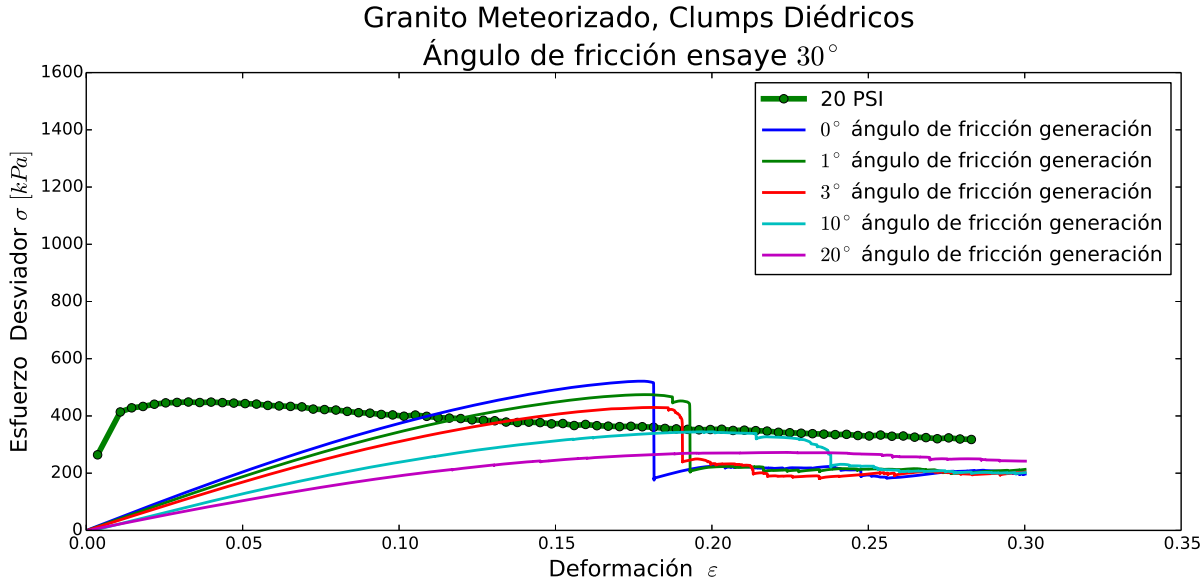


Figura C.15: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de $20[psi]$, ángulo de fricción 30° ensaye

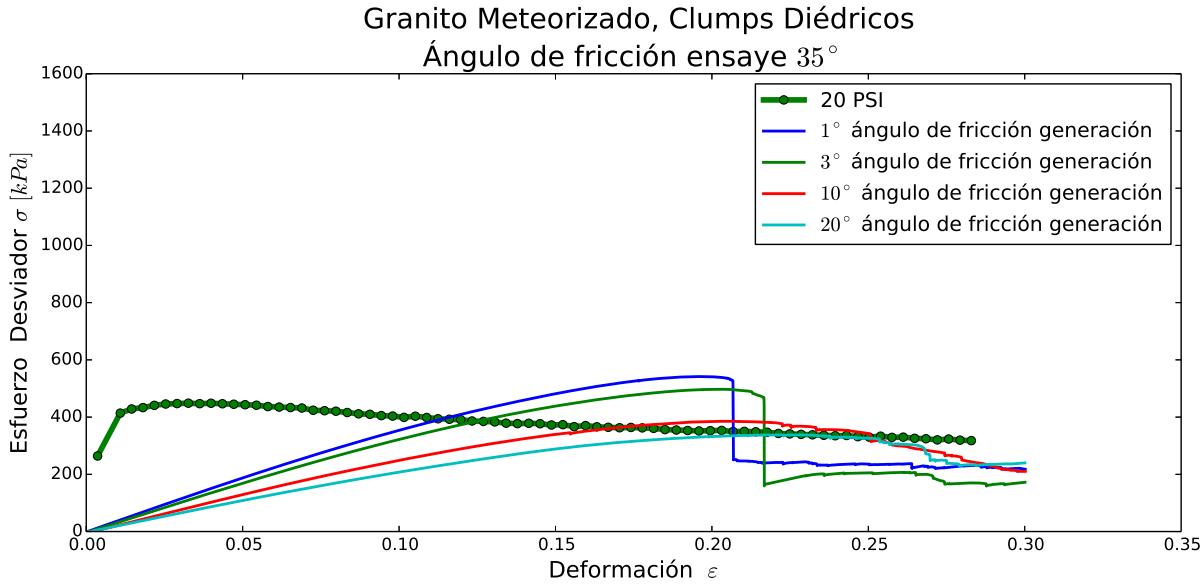


Figura C.16: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de $20[psi]$, ángulo de fricción 35° ensaye

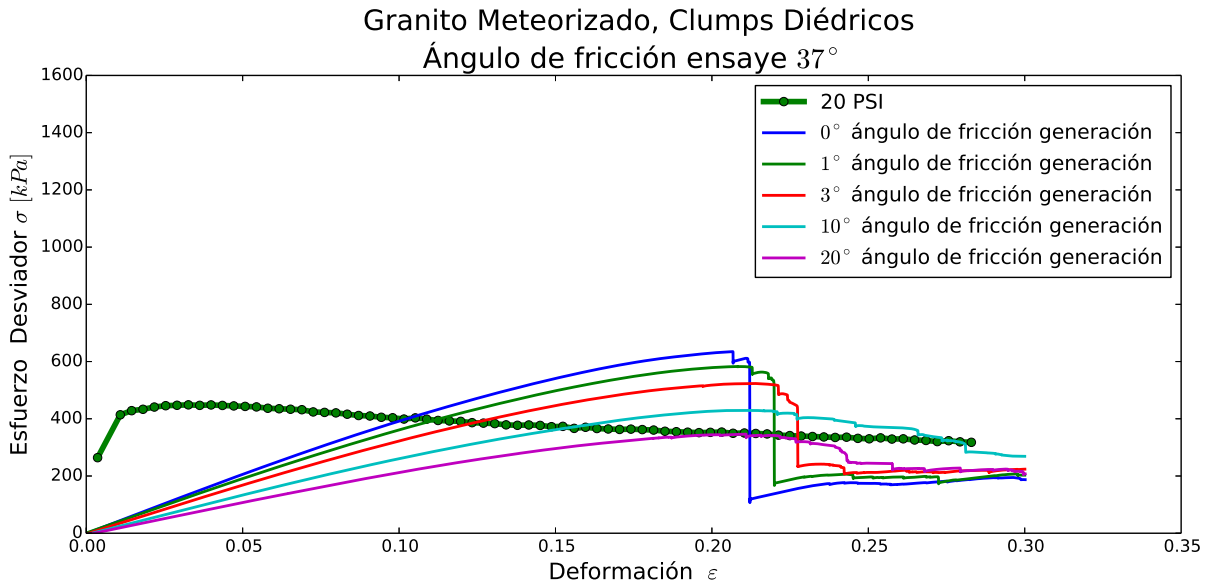


Figura C.17: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 37° ensaye

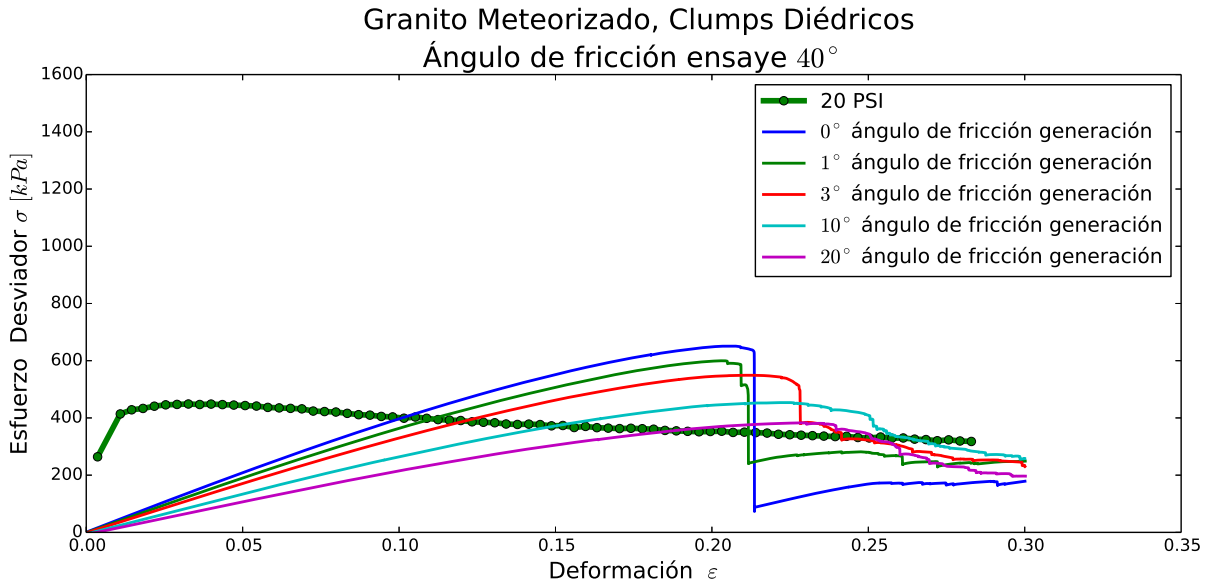


Figura C.18: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 40° ensaye

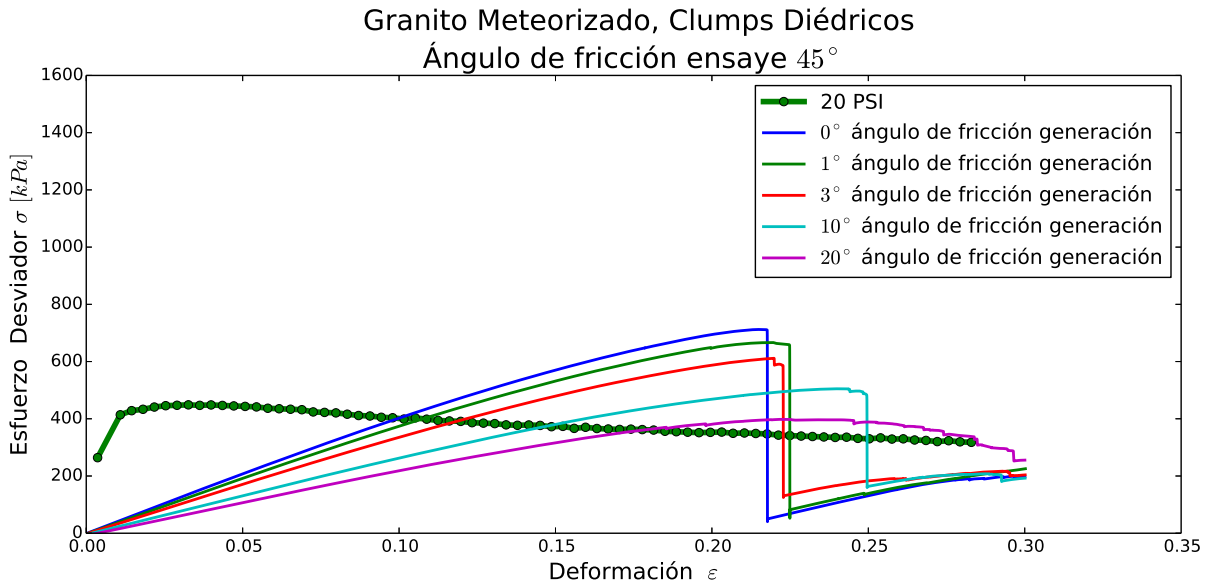


Figura C.19: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

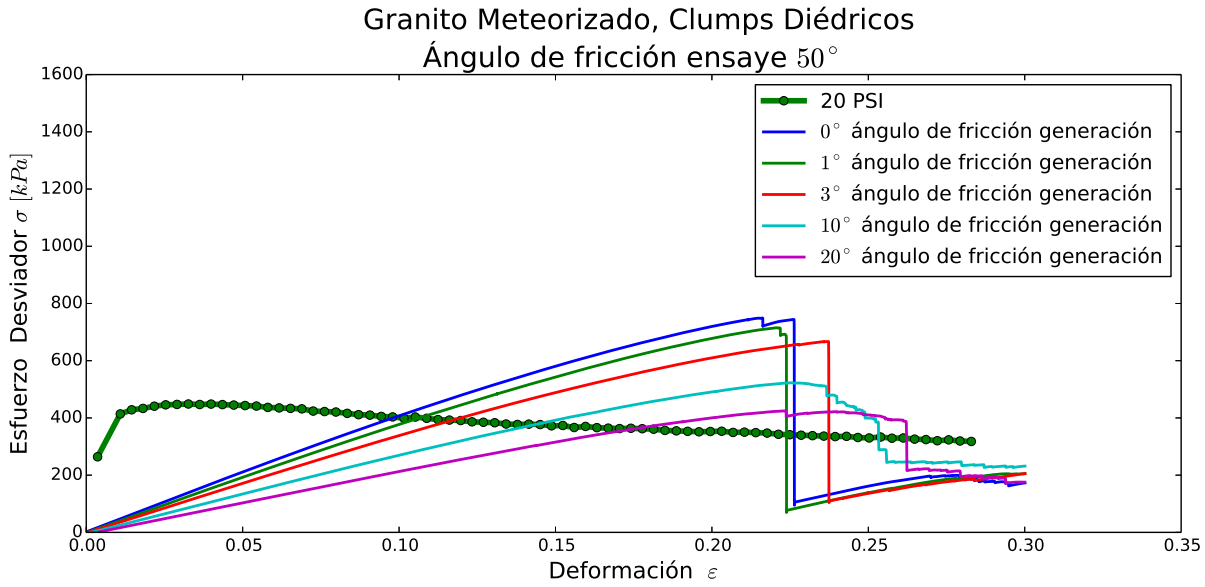


Figura C.20: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

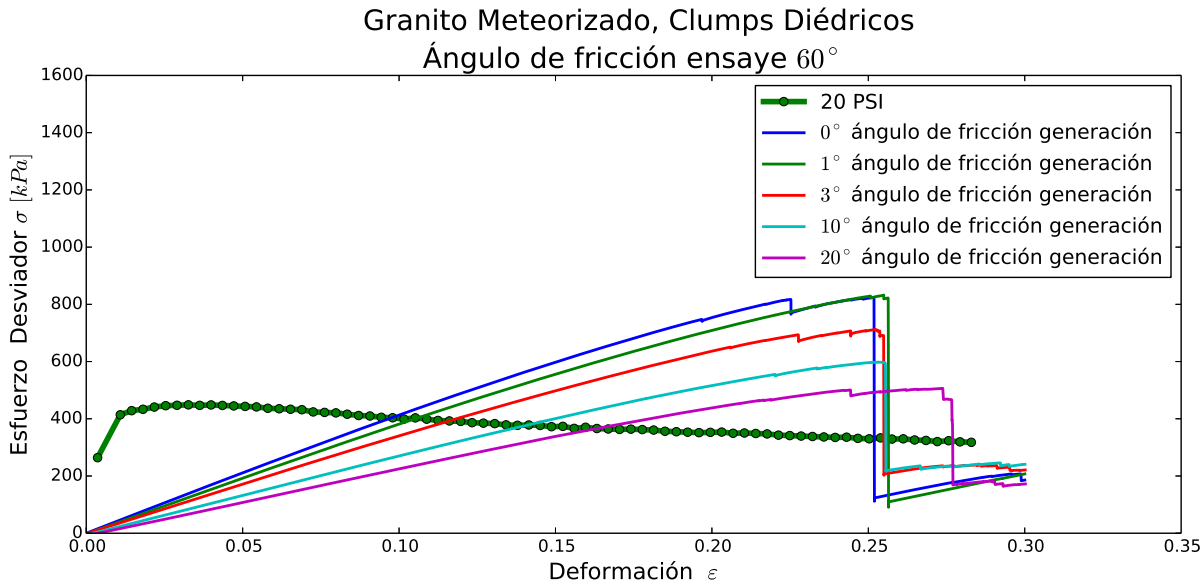


Figura C.21: Simulación Granito Meteorizado Clumps Diédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

C.2. Simulaciones con Clumps Tetraédricos

C.2.1. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 5[psi]

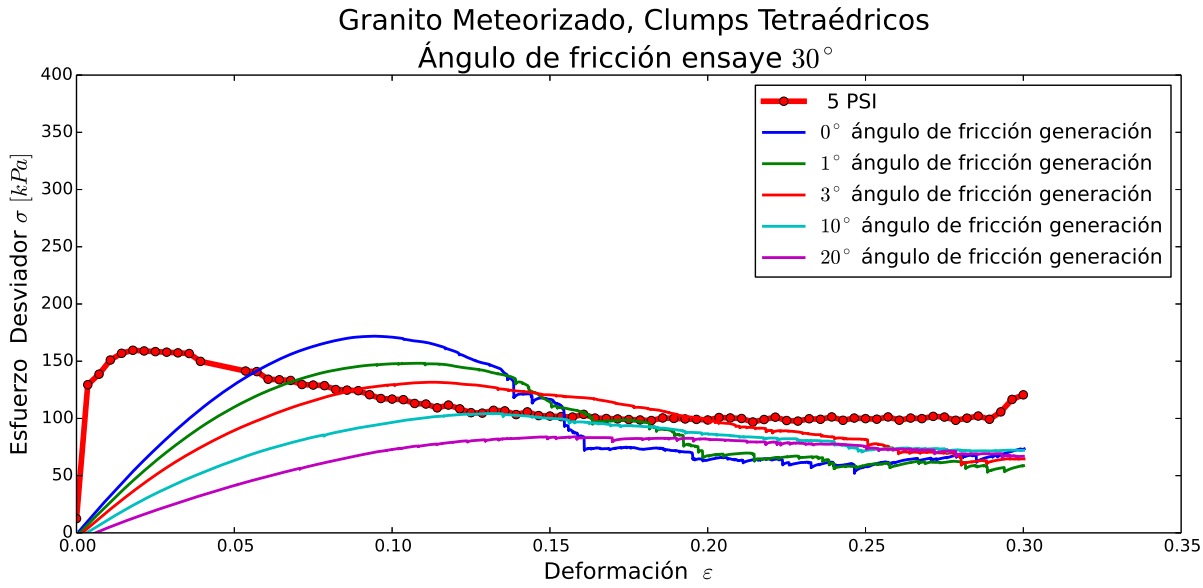


Figura C.22: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 30° ensaye

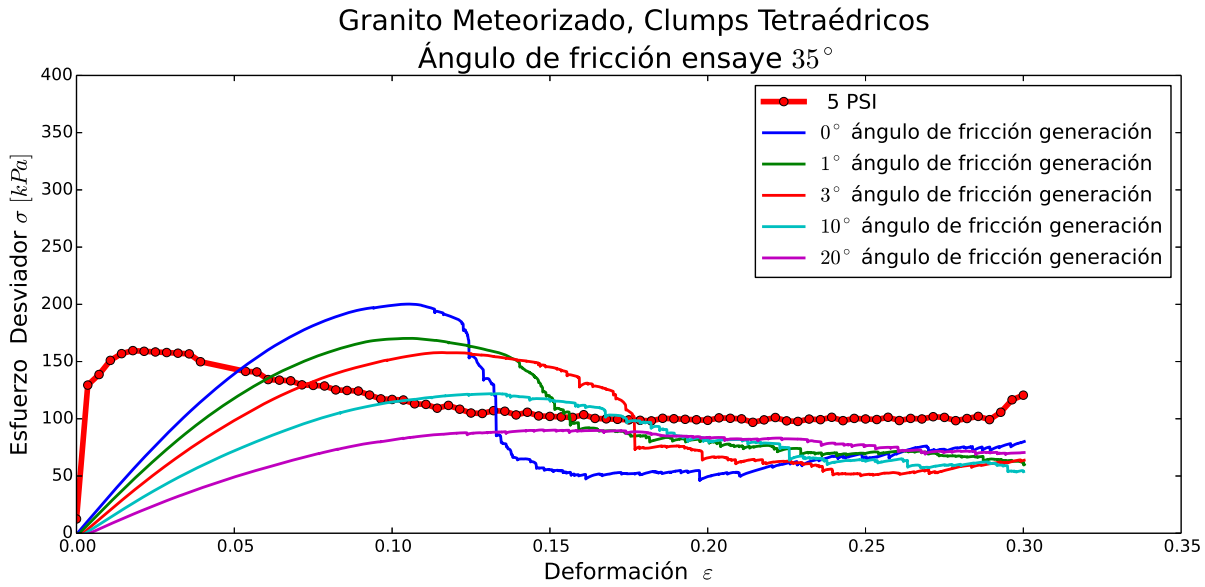


Figura C.23: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

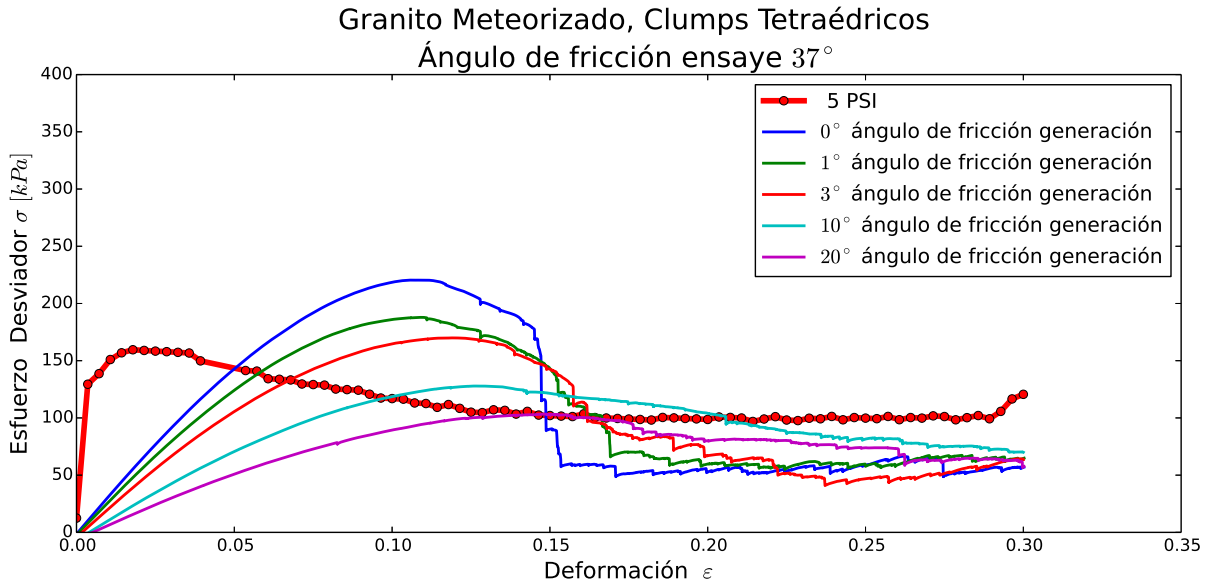


Figura C.24: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

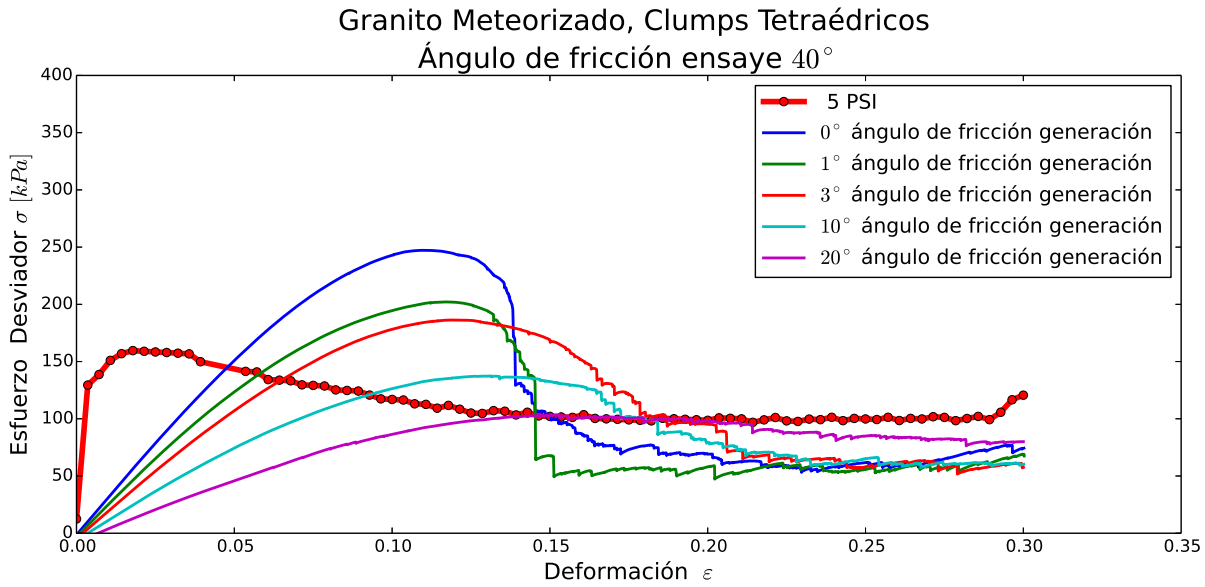


Figura C.25: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

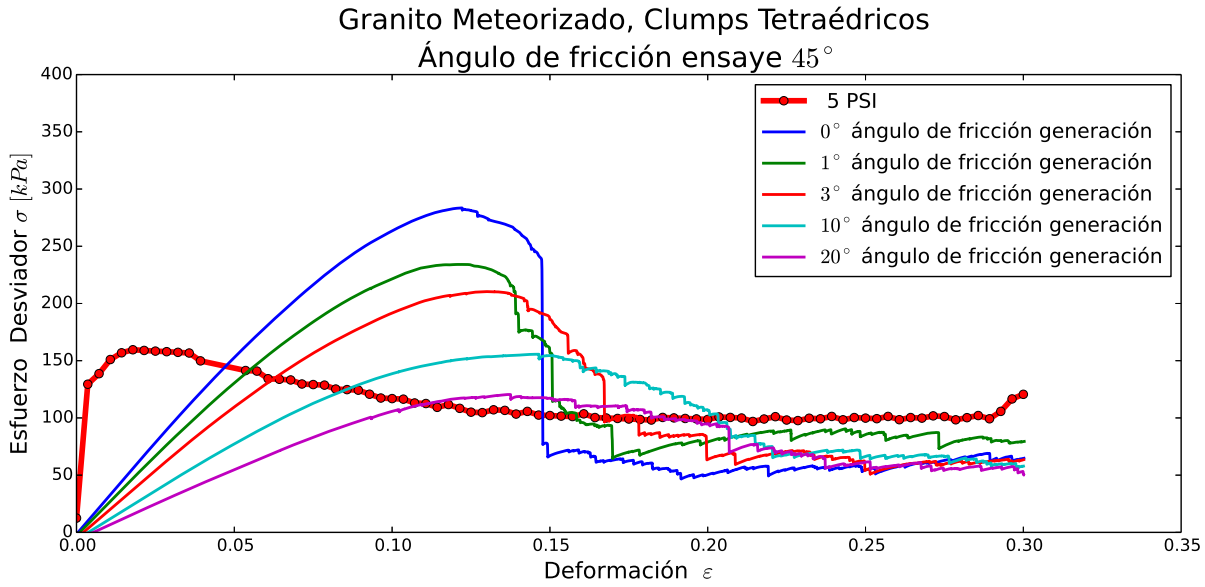


Figura C.26: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

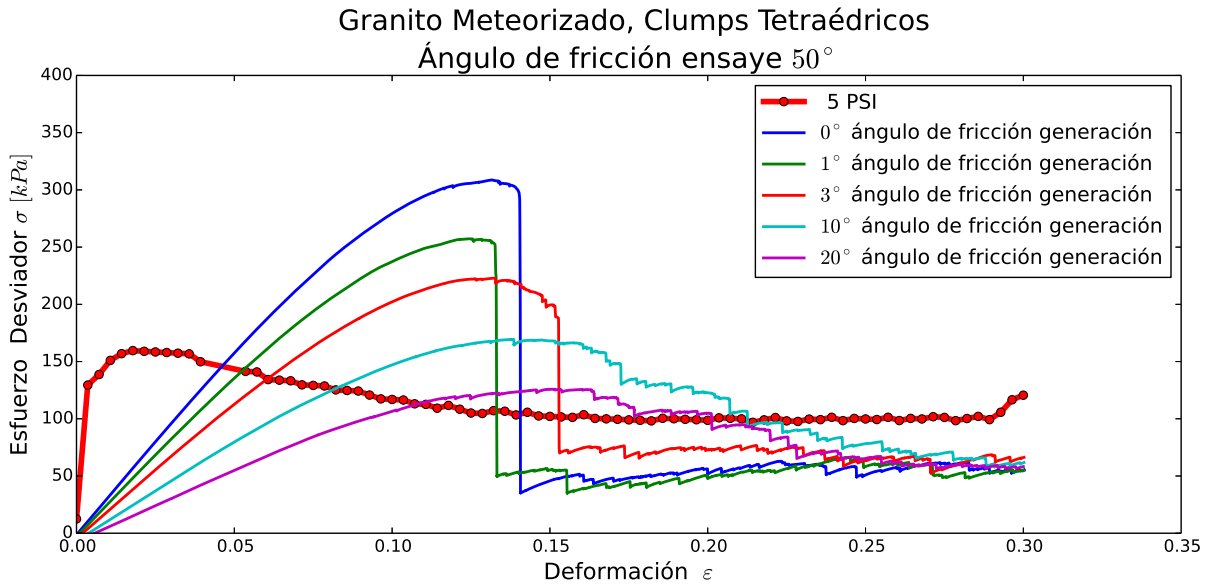


Figura C.27: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

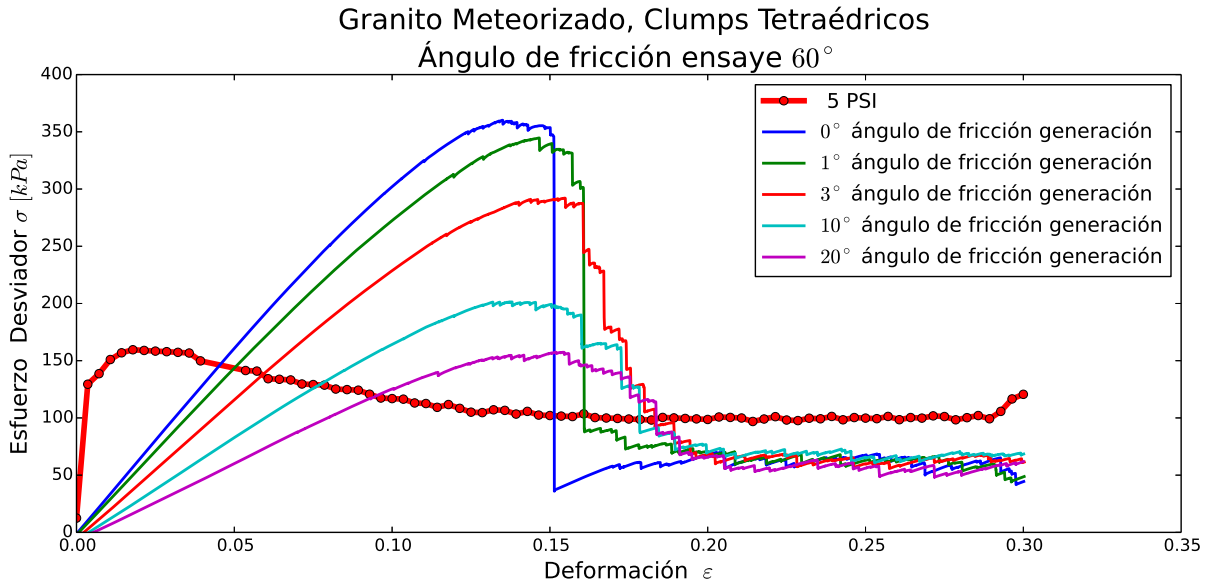


Figura C.28: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

C.2.2. Simulaciones con Clumps Tetraédricos $10[psi]$

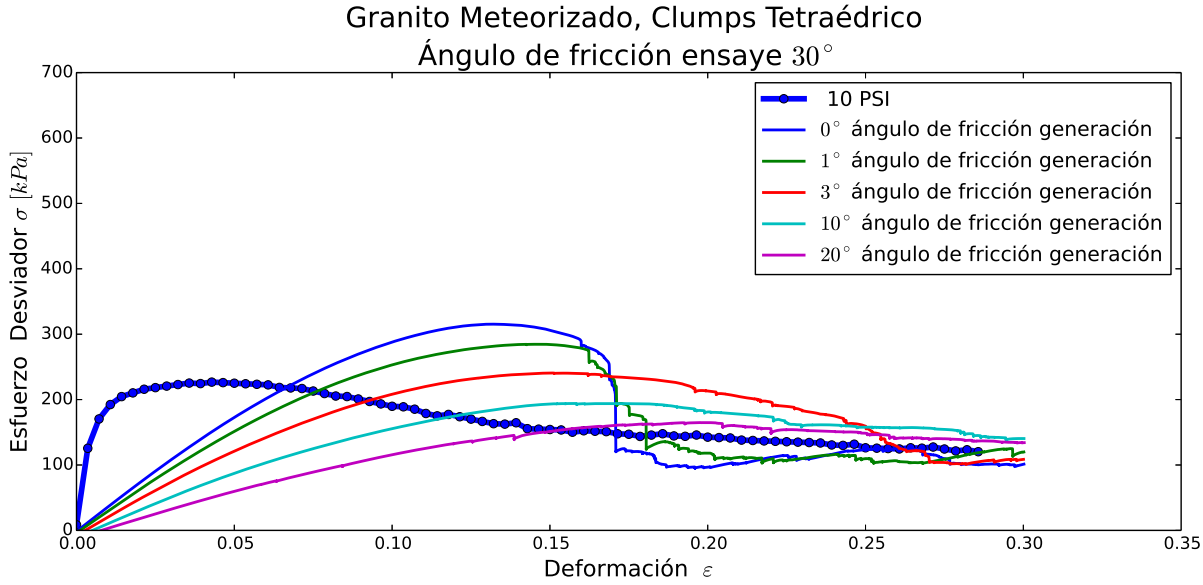


Figura C.29: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de $10[psi]$, ángulo de fricción 30° ensaye

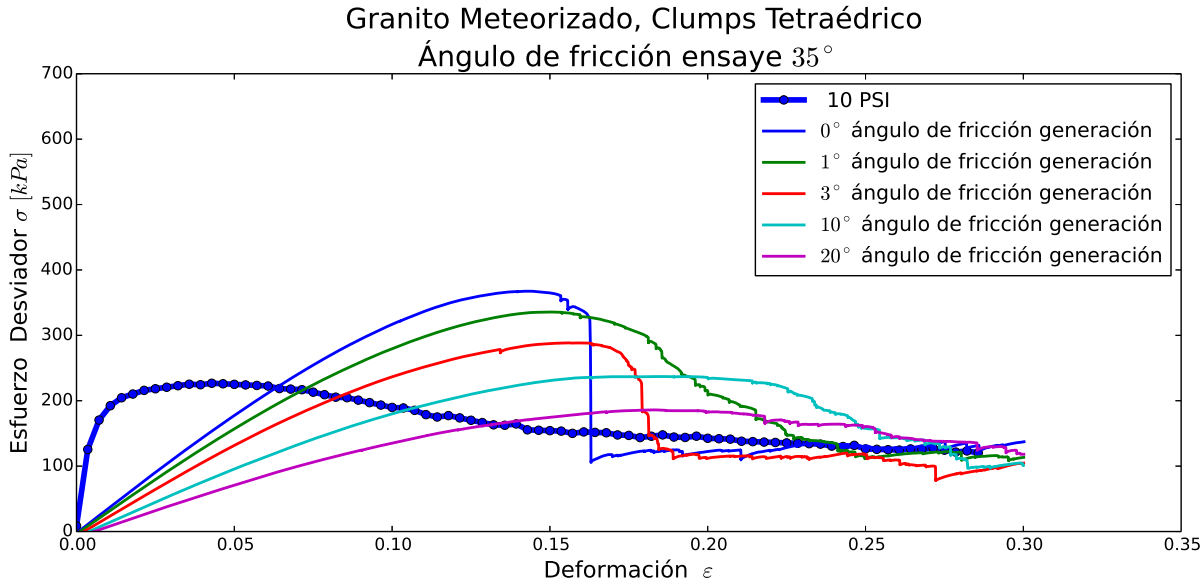


Figura C.30: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de $10[psi]$, ángulo de fricción 35° ensaye

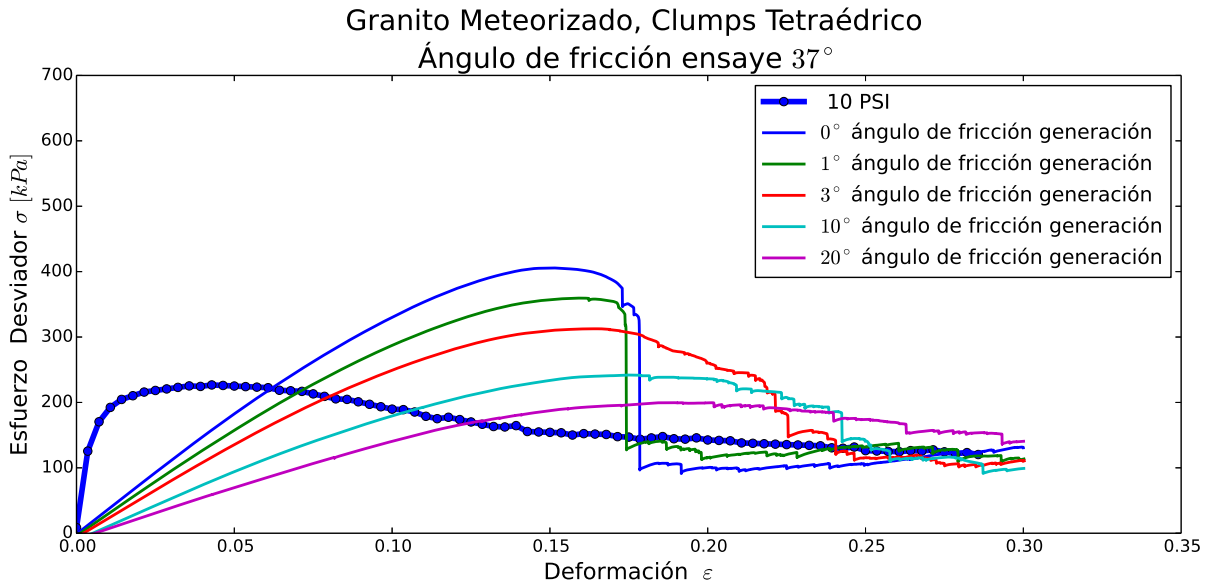


Figura C.31: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

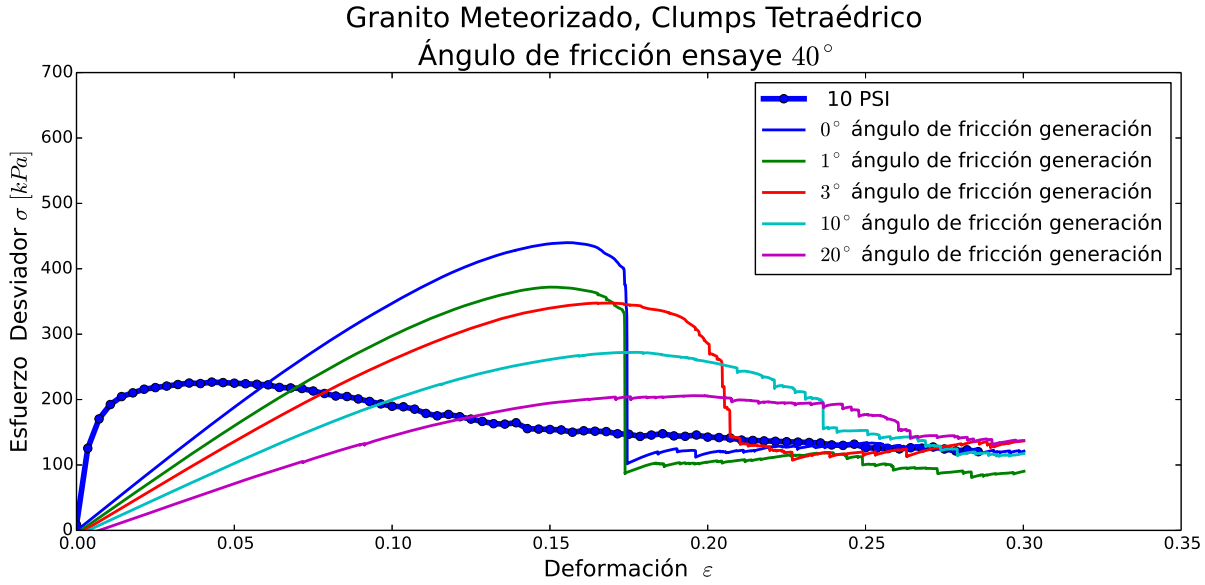


Figura C.32: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

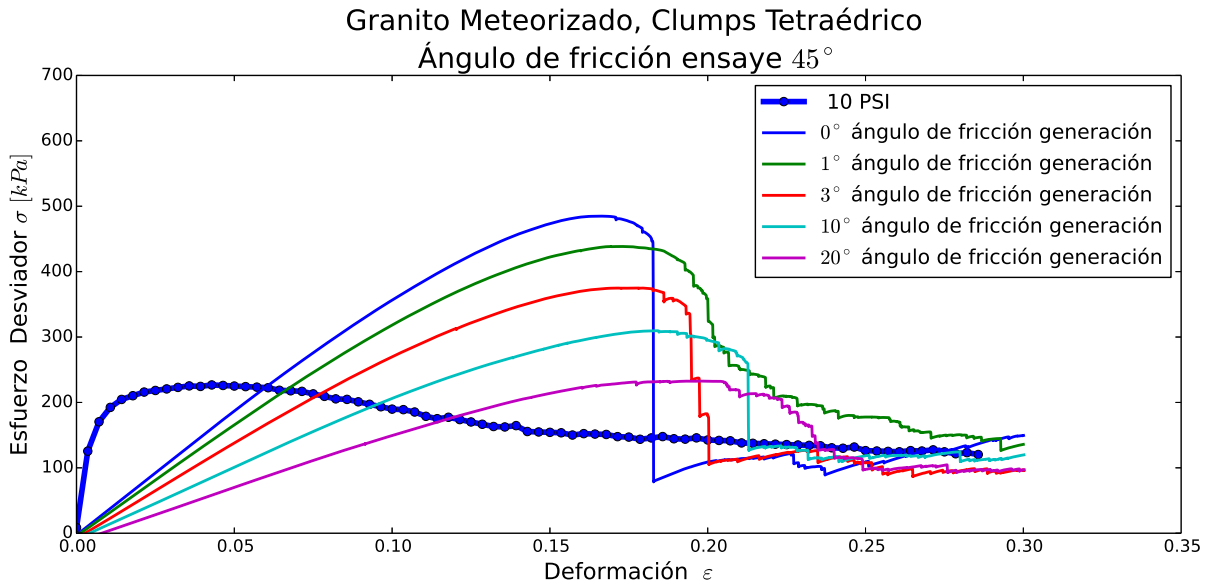


Figura C.33: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

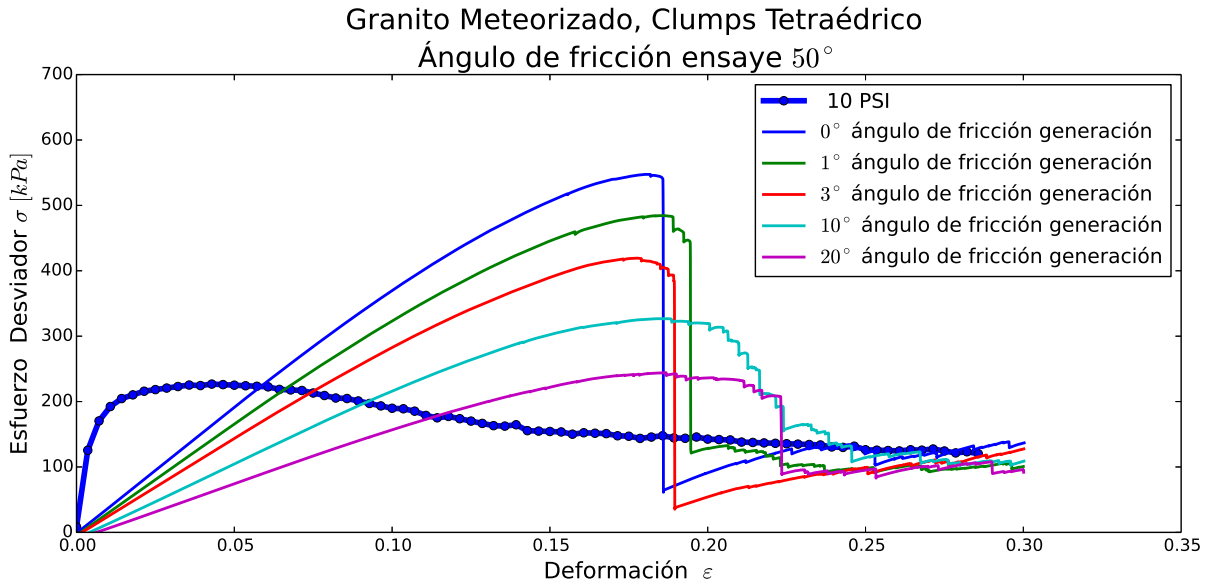


Figura C.34: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

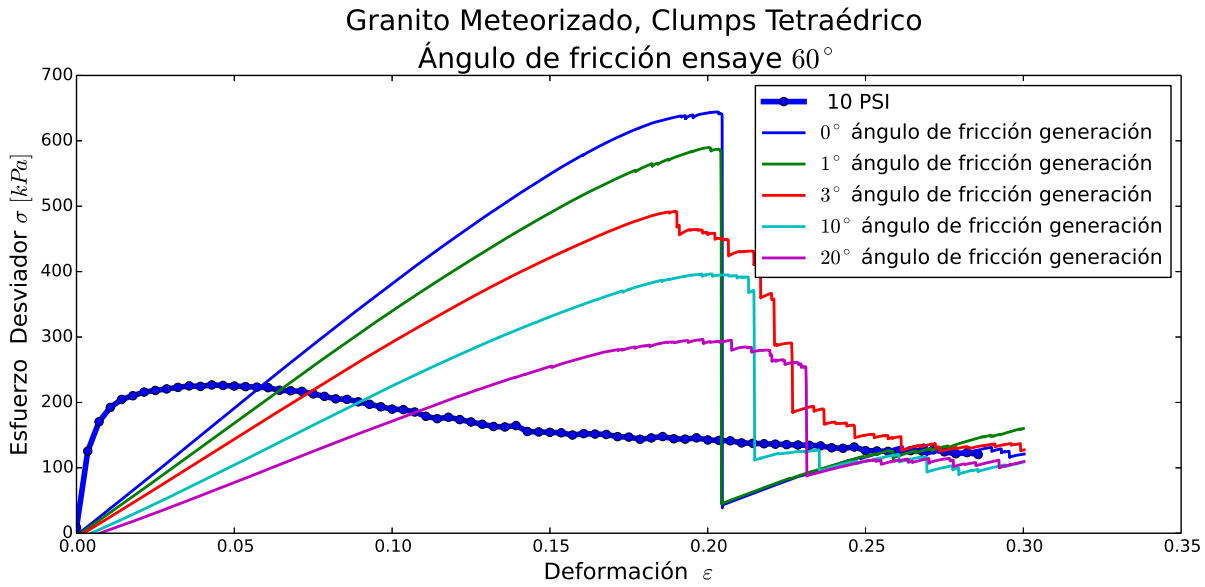


Figura C.35: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

C.2.3. Simulaciones con Clumps Tetraédricos 20[*psi*]

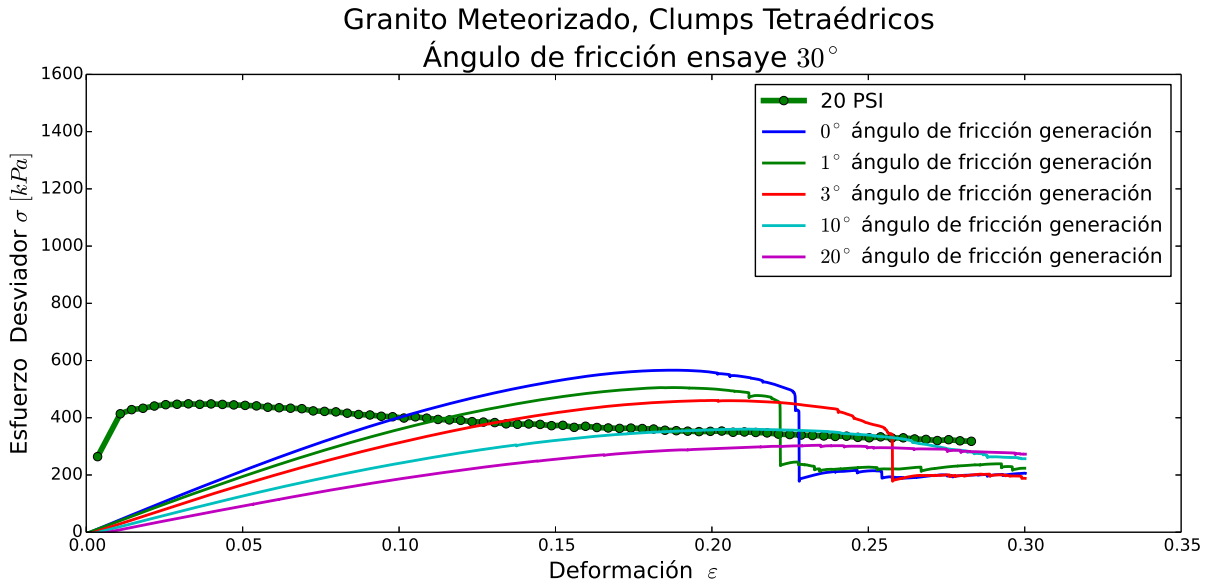


Figura C.36: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 30° ensaye

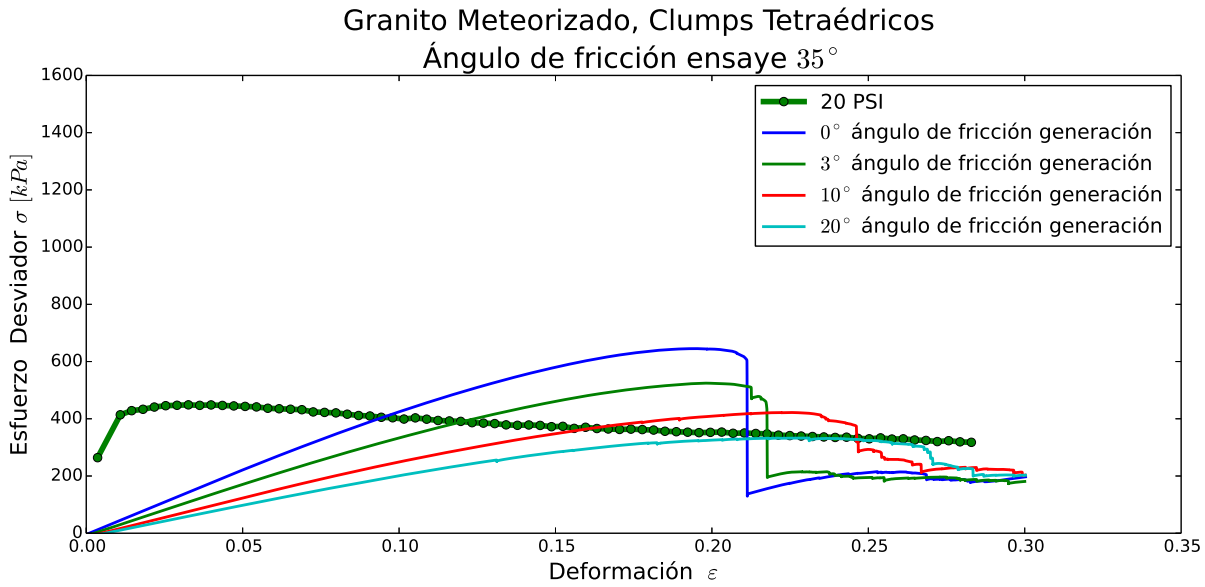


Figura C.37: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

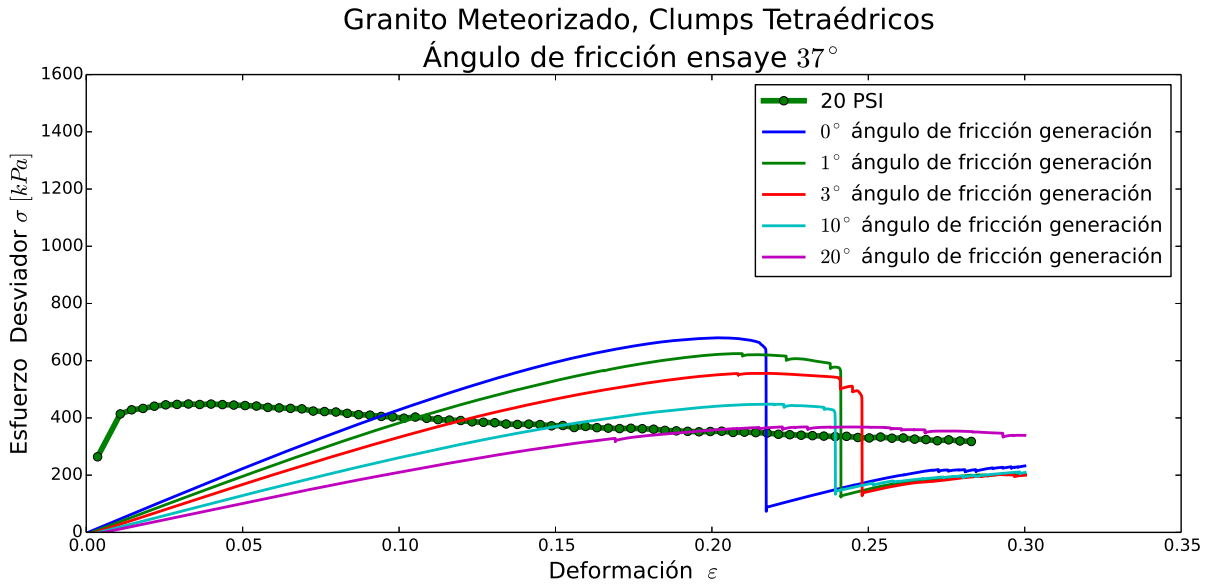


Figura C.38: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

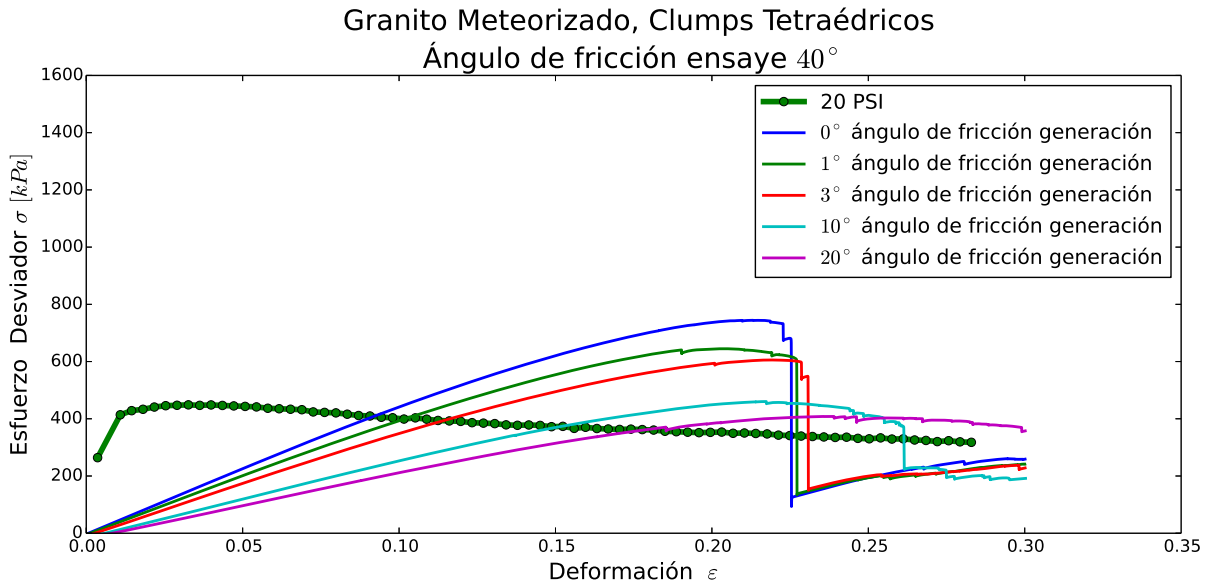


Figura C.39: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

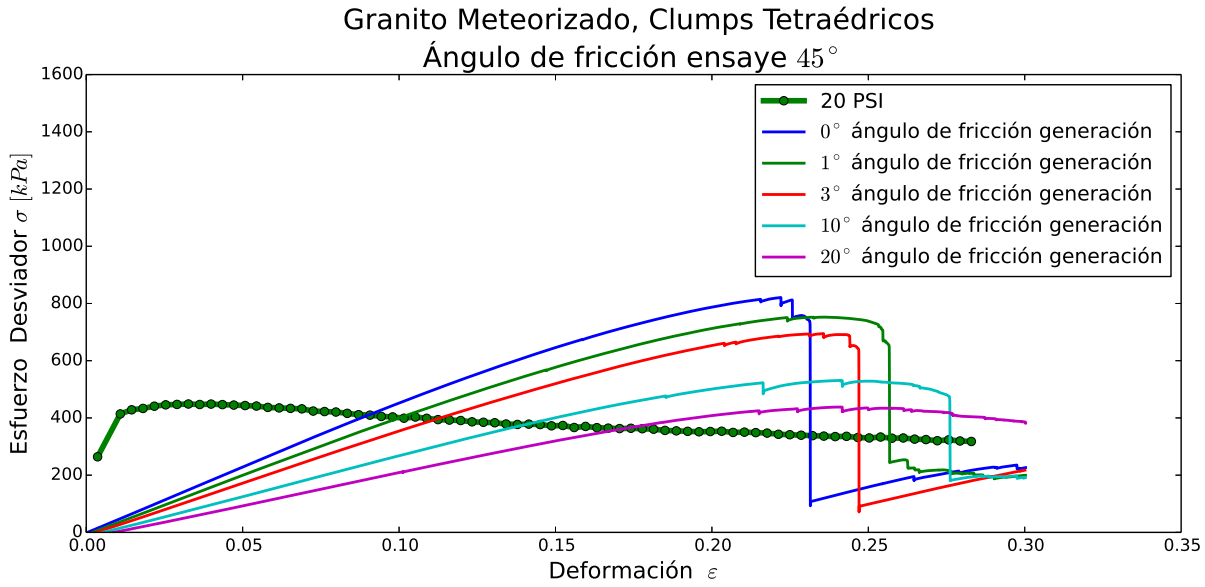


Figura C.40: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

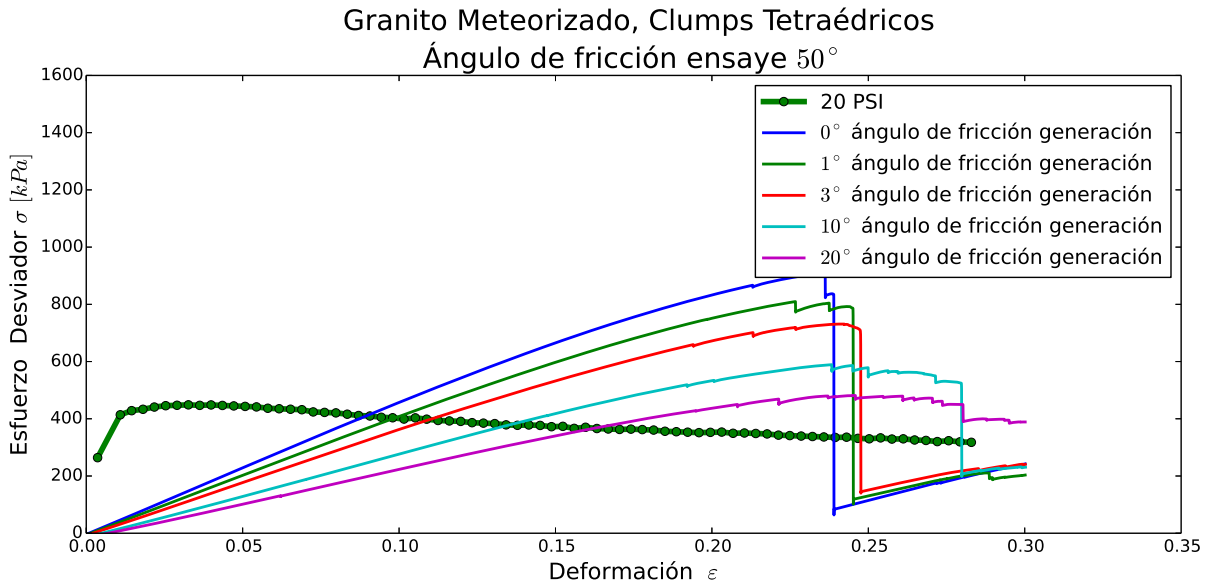


Figura C.41: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

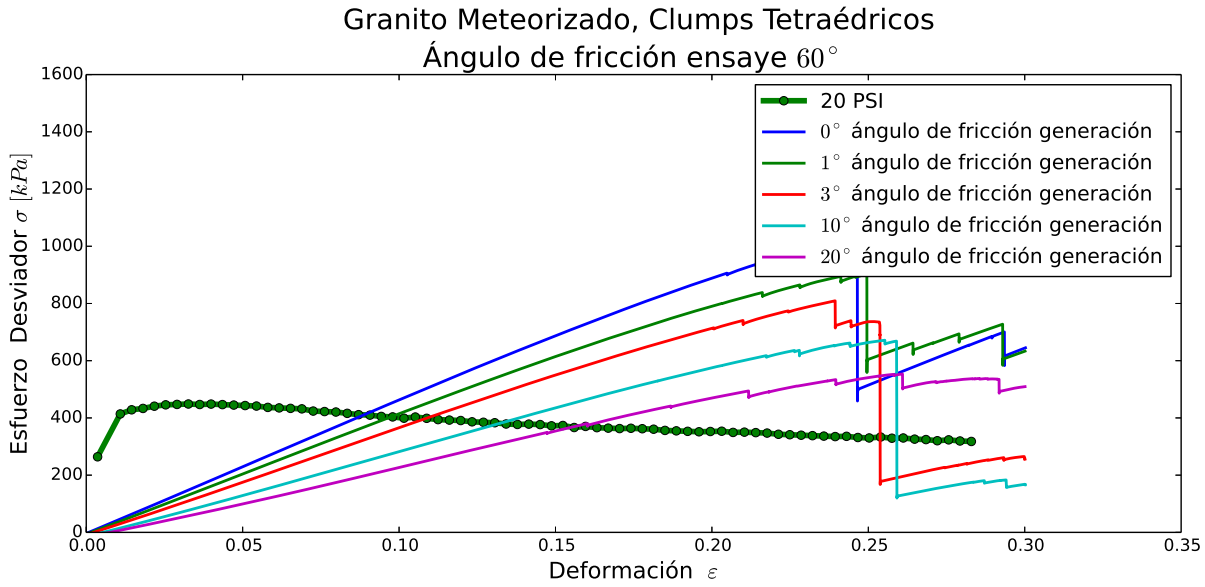


Figura C.42: Simulación Granito Meteorizado Clumps Tetraédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

C.3. Simulaciones con Clumps Octaédricos

C.3.1. Simulaciones con Clumps Octaédricos 5[psi]

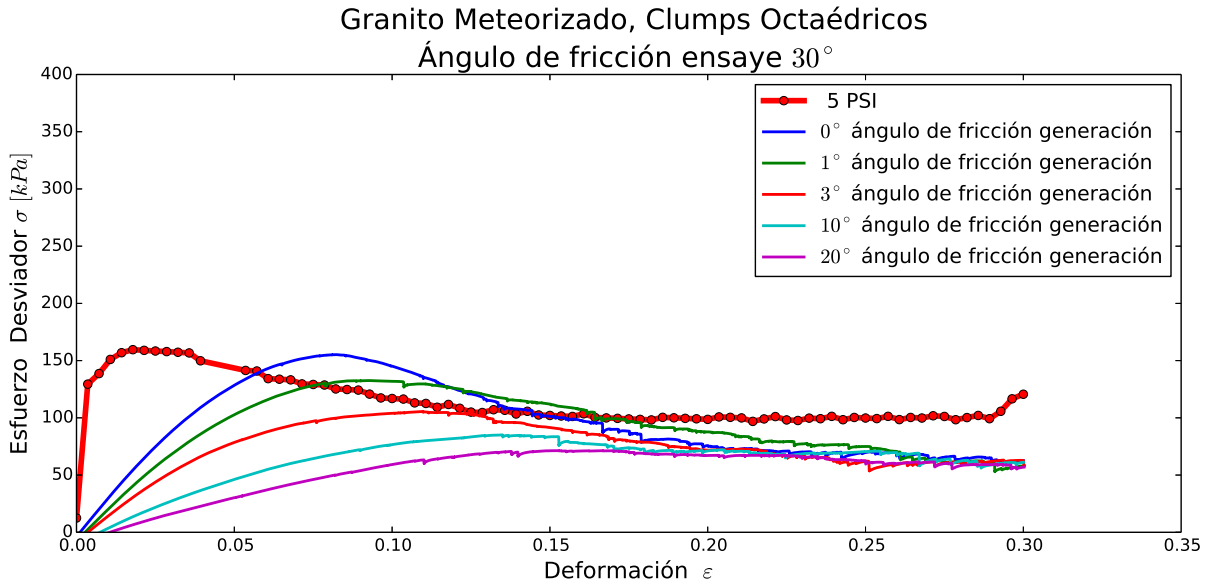


Figura C.43: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 30° ensaye

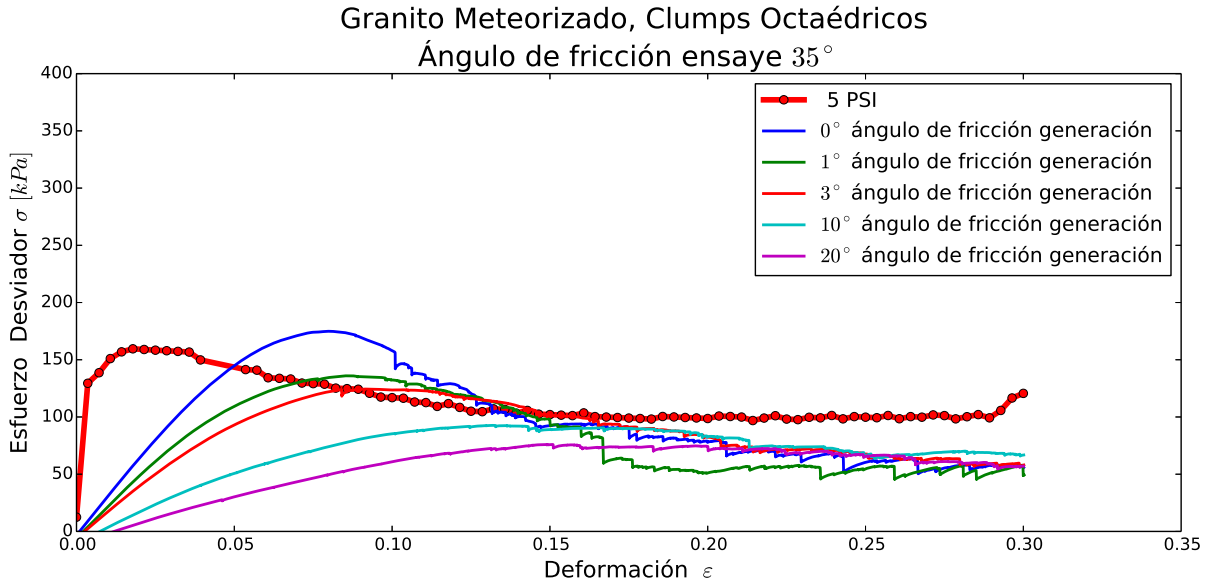


Figura C.44: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 35° ensaye

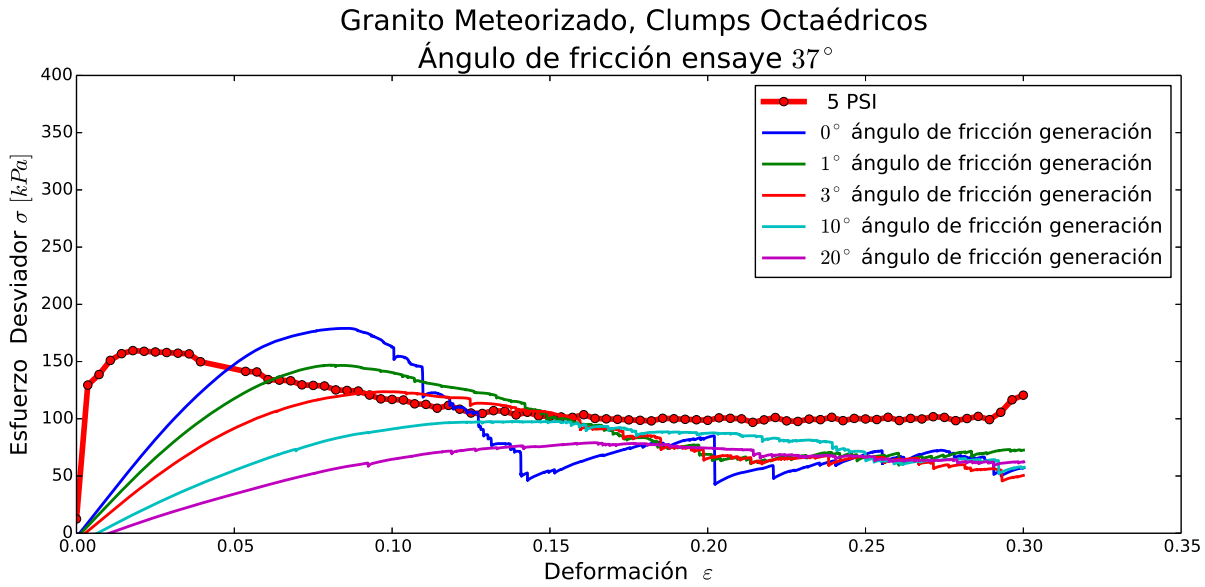


Figura C.45: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

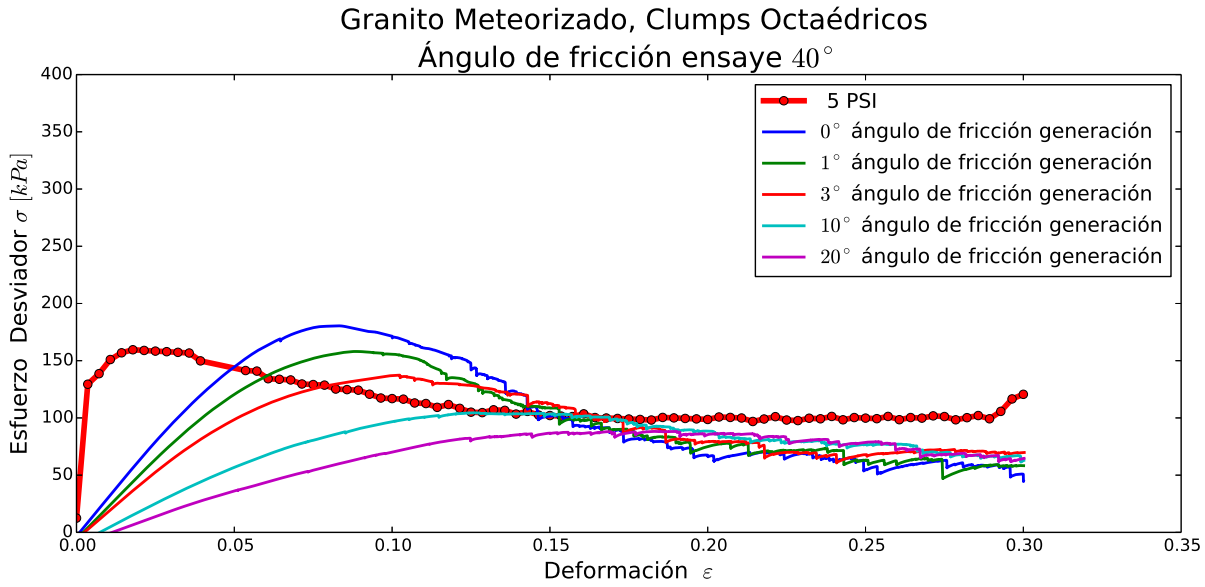


Figura C.46: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

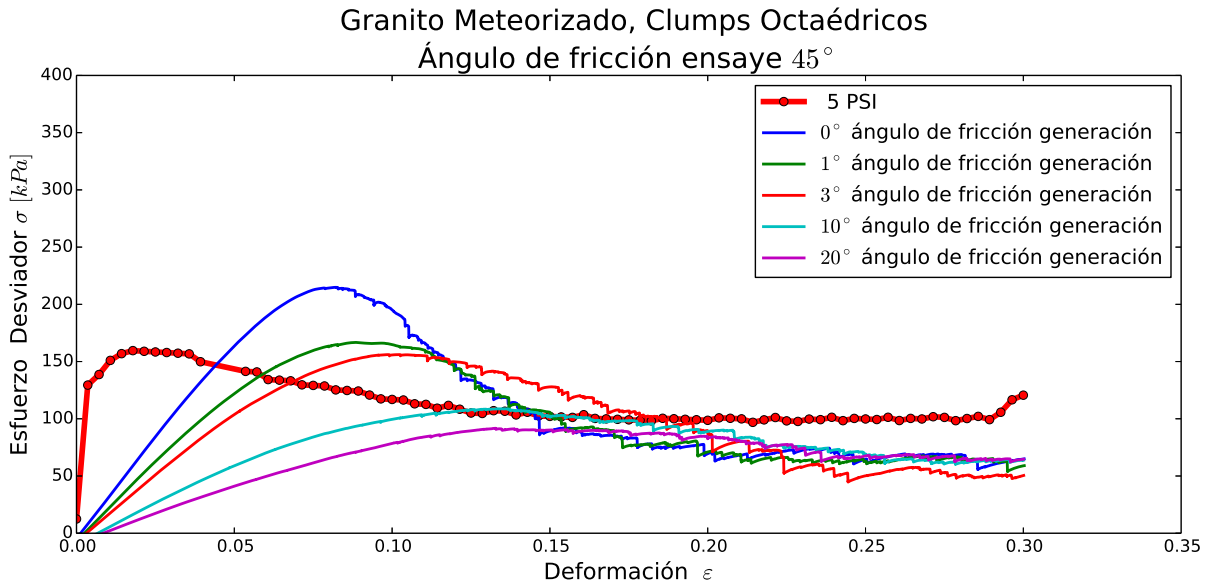


Figura C.47: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

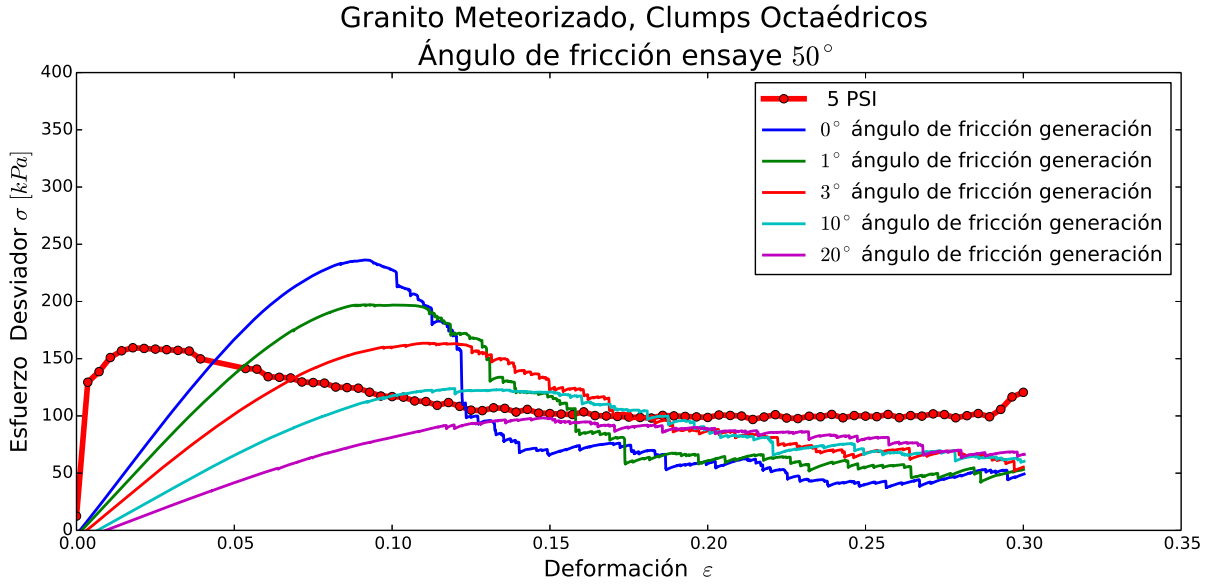


Figura C.48: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

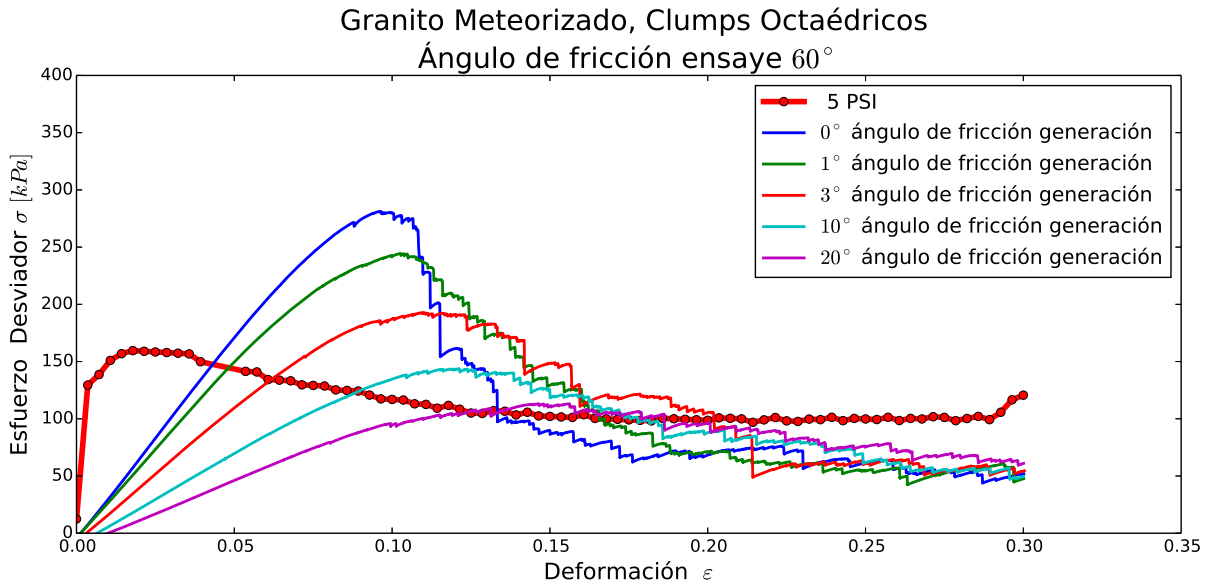


Figura C.49: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 5[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

C.3.2. Simulaciones con Clumps Octaédricos 10[psi]

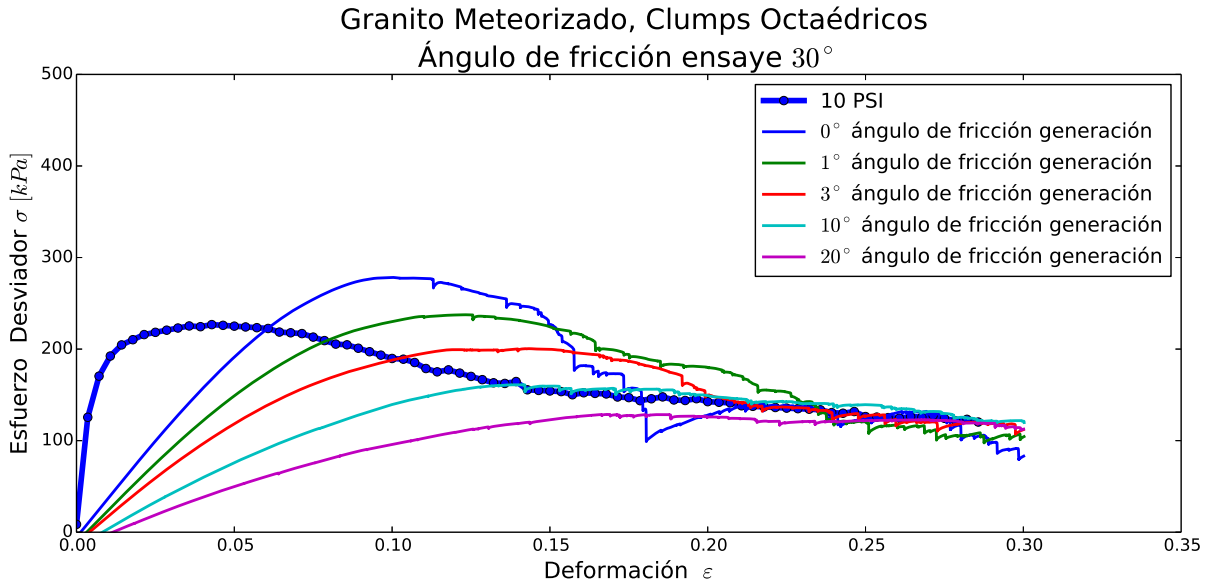


Figura C.50: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[psi], ángulo de fricción 30° ensaye

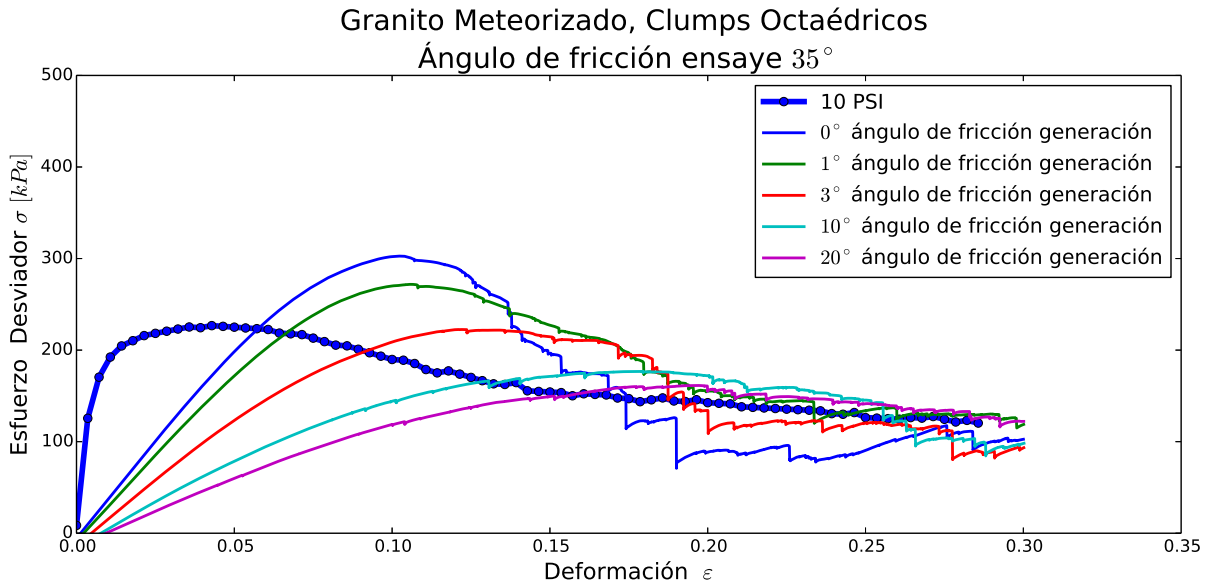


Figura C.51: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 35° ensaye

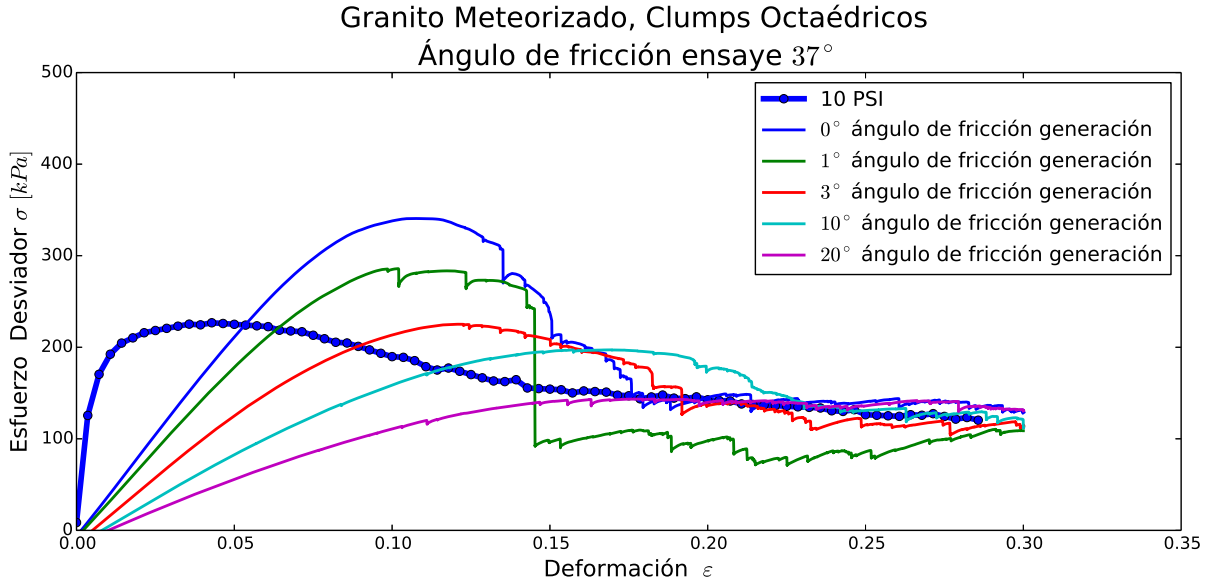


Figura C.52: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 37° ensaye

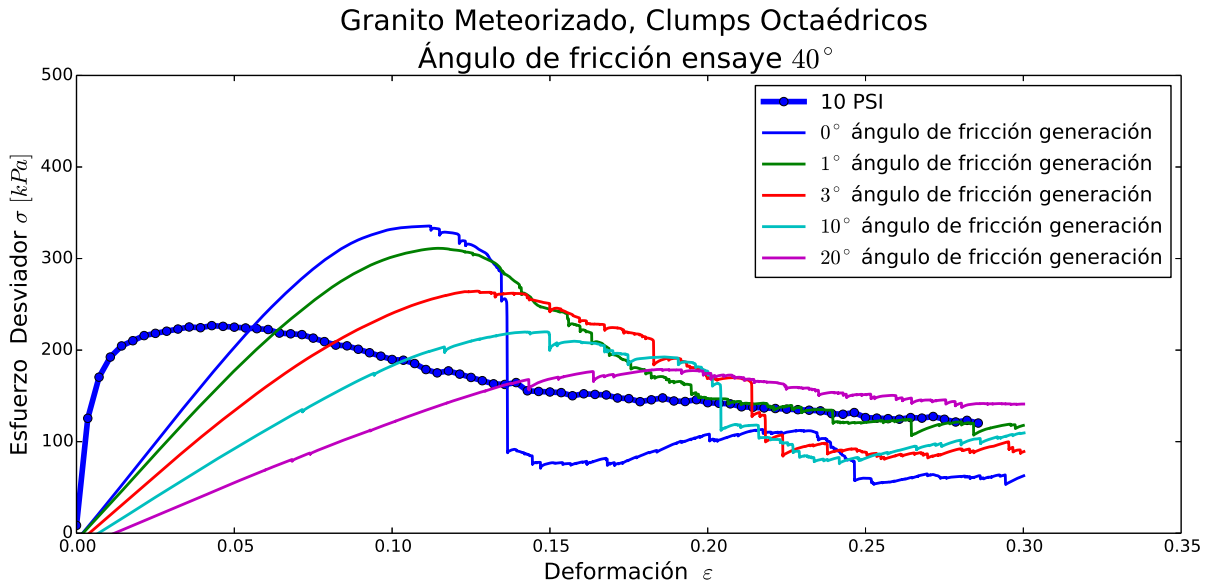


Figura C.53: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 40° ensaye

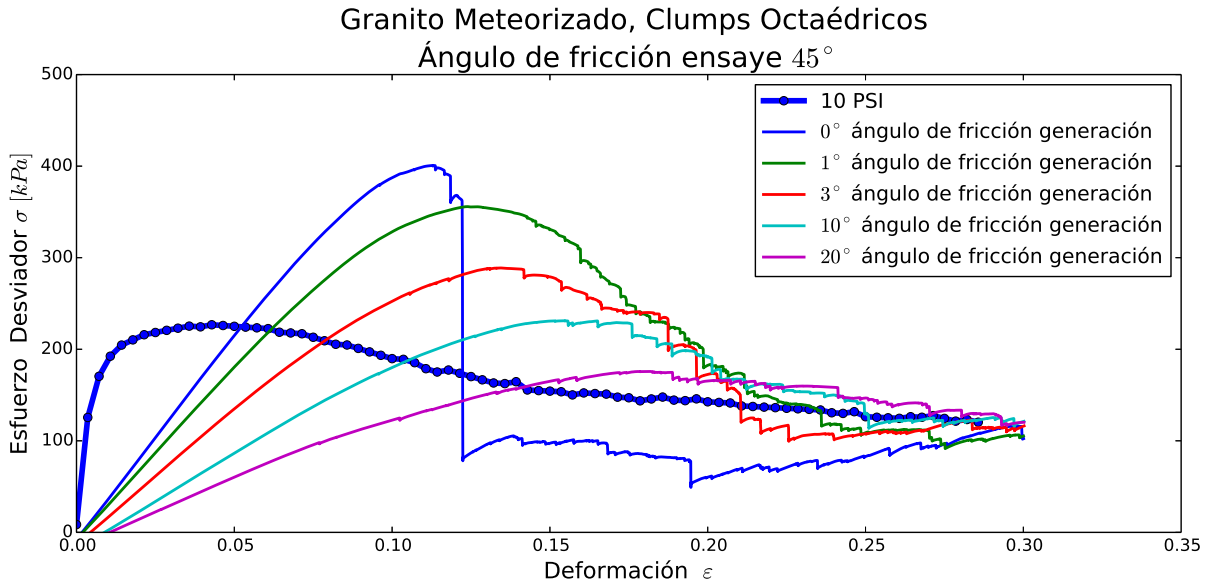


Figura C.54: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

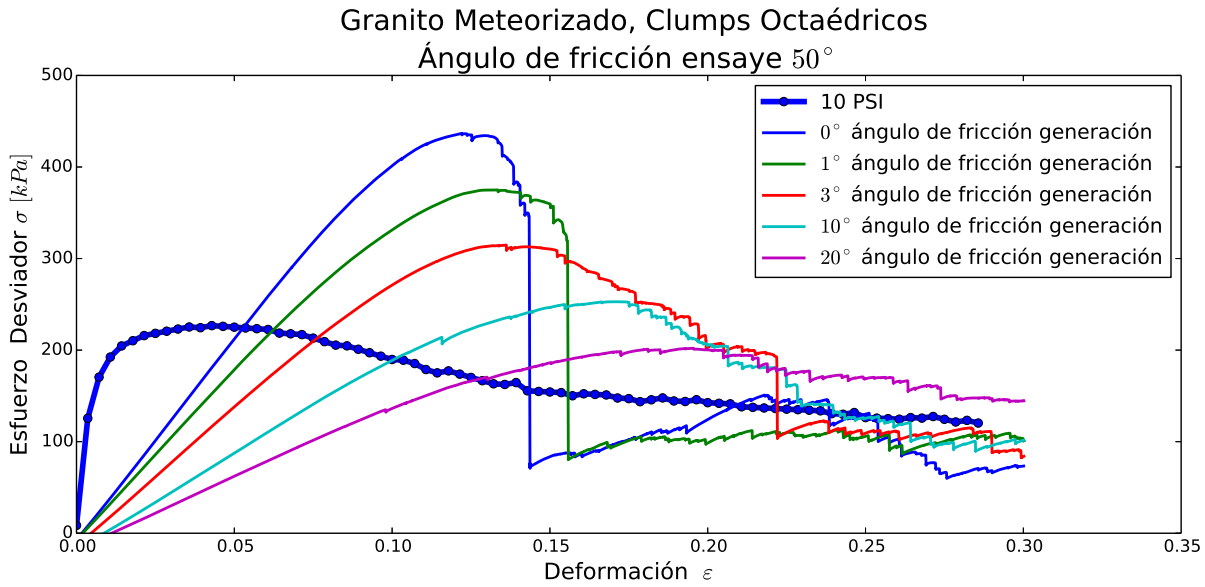


Figura C.55: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

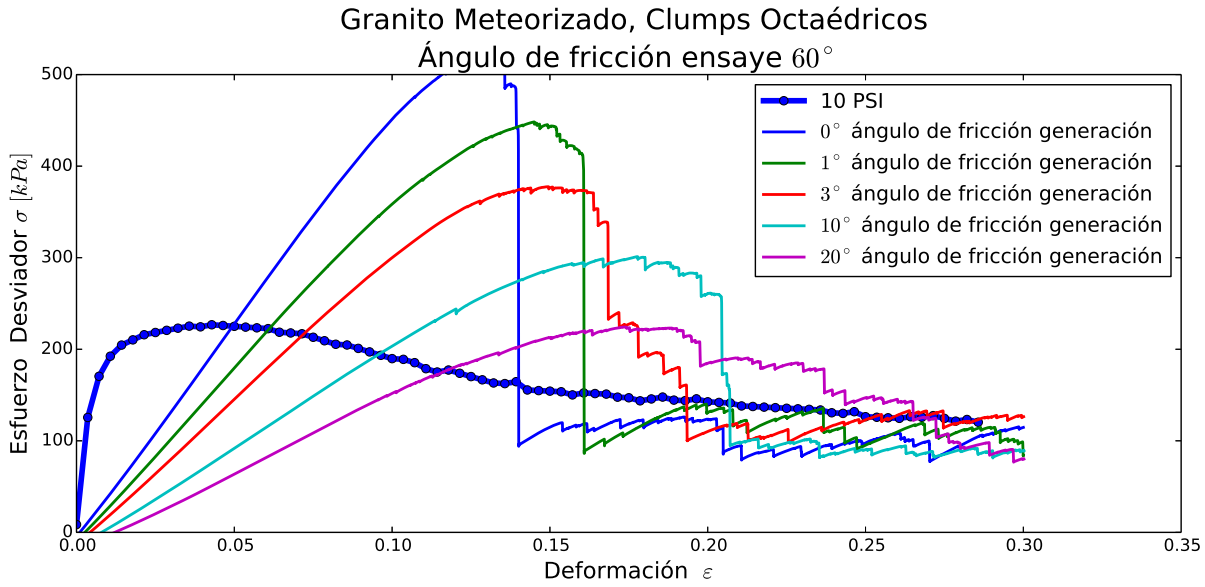


Figura C.56: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 10[*psi*], ángulo de fricción 60° ensaye

C.3.3. Simulaciones con Clumps Octaédricos $20[psi]$

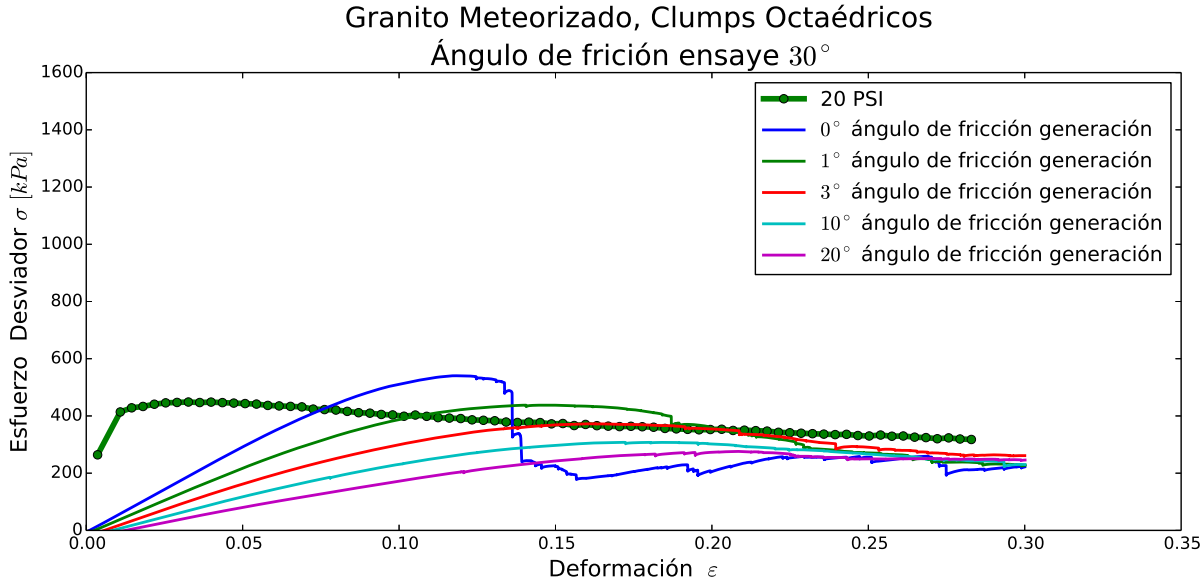


Figura C.57: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de $20[psi]$, ángulo de fricción 30° ensaye

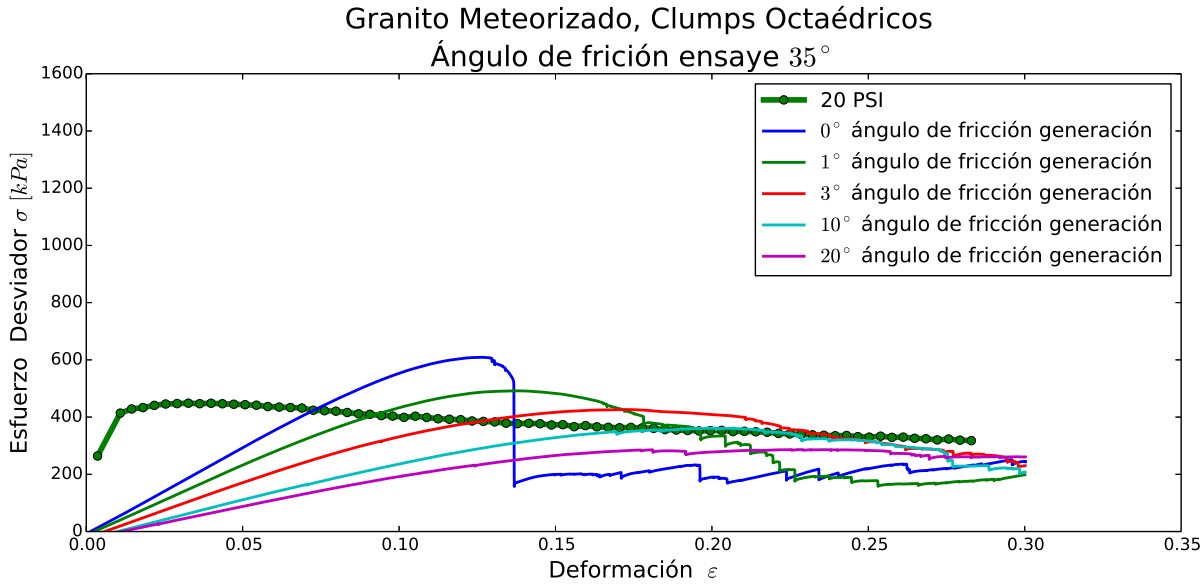


Figura C.58: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de $20[psi]$, ángulo de fricción 35° ensaye

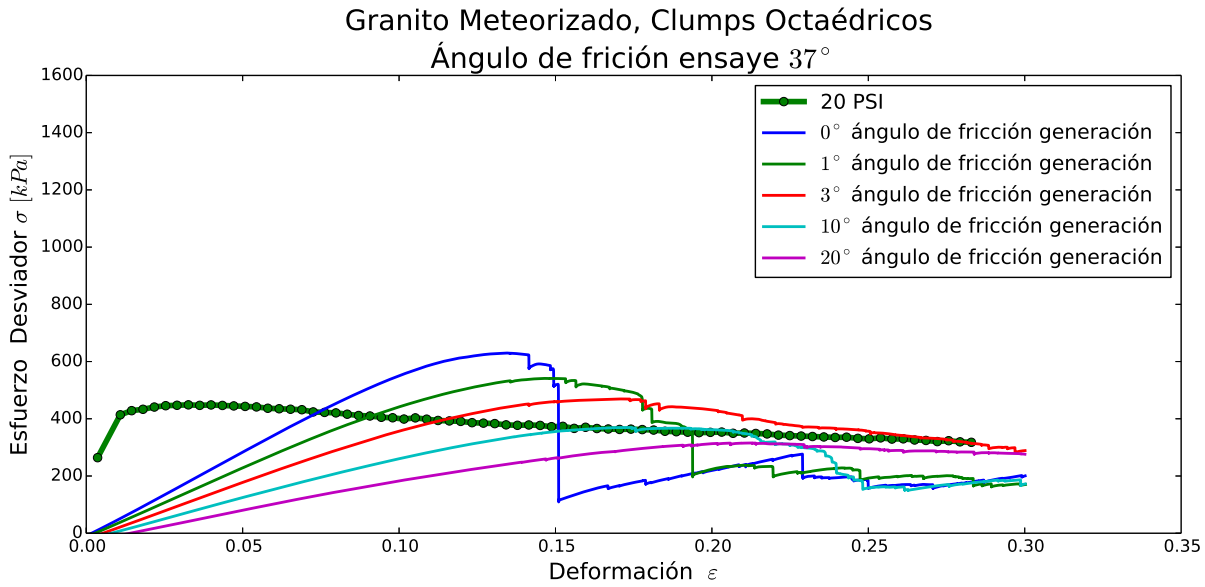


Figura C.59: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 37° ensaye

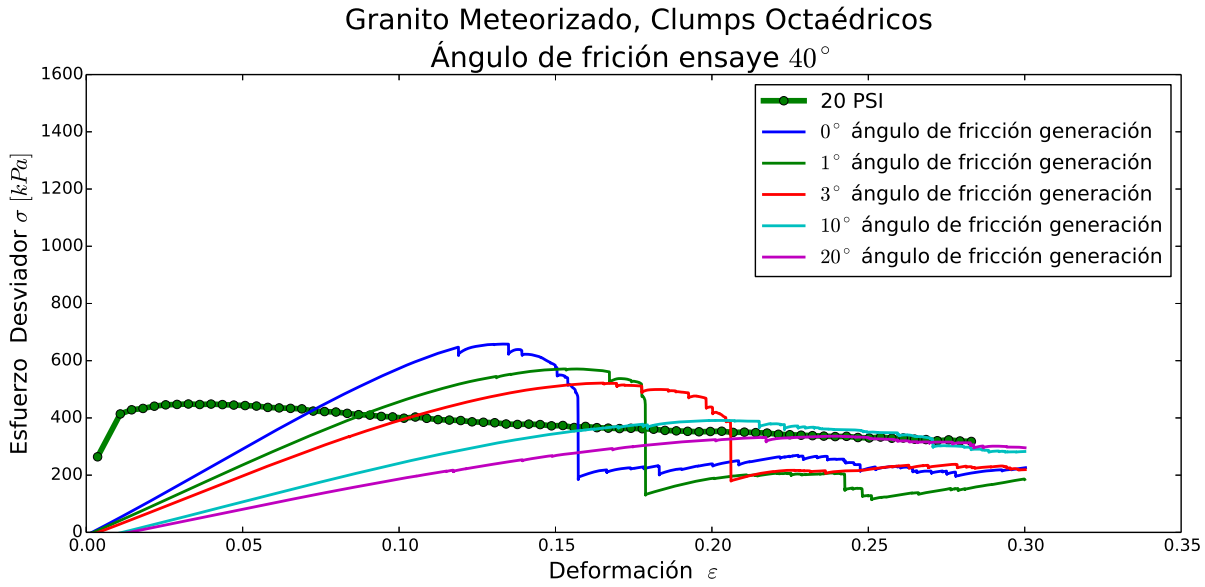


Figura C.60: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 40° ensaye

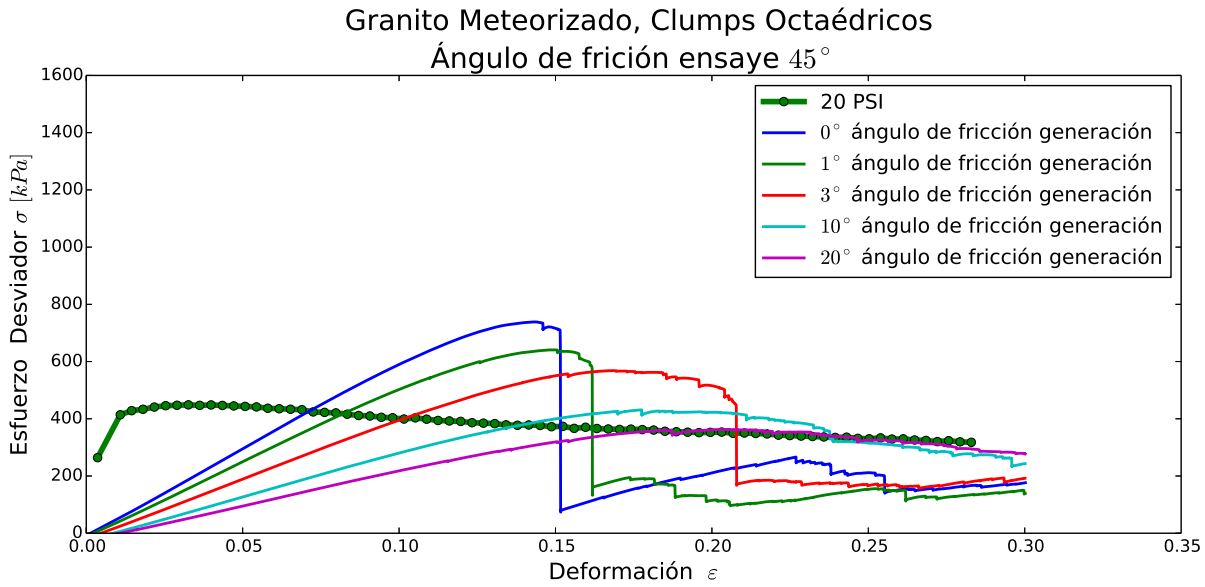


Figura C.61: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 45° ensaye

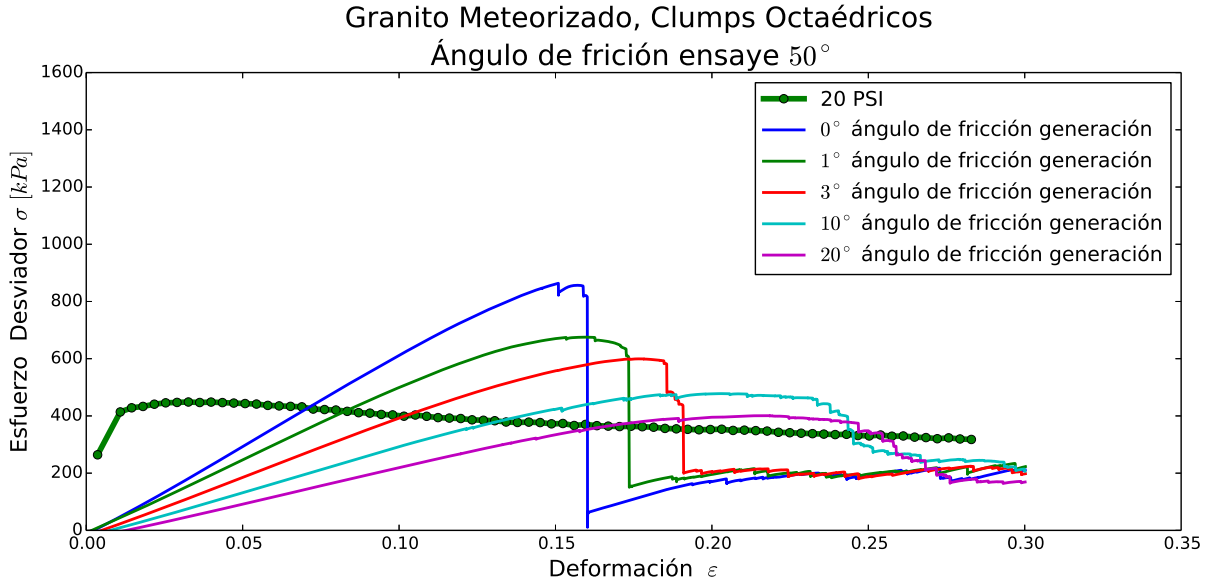


Figura C.62: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[*psi*], ángulo de fricción 50° ensaye

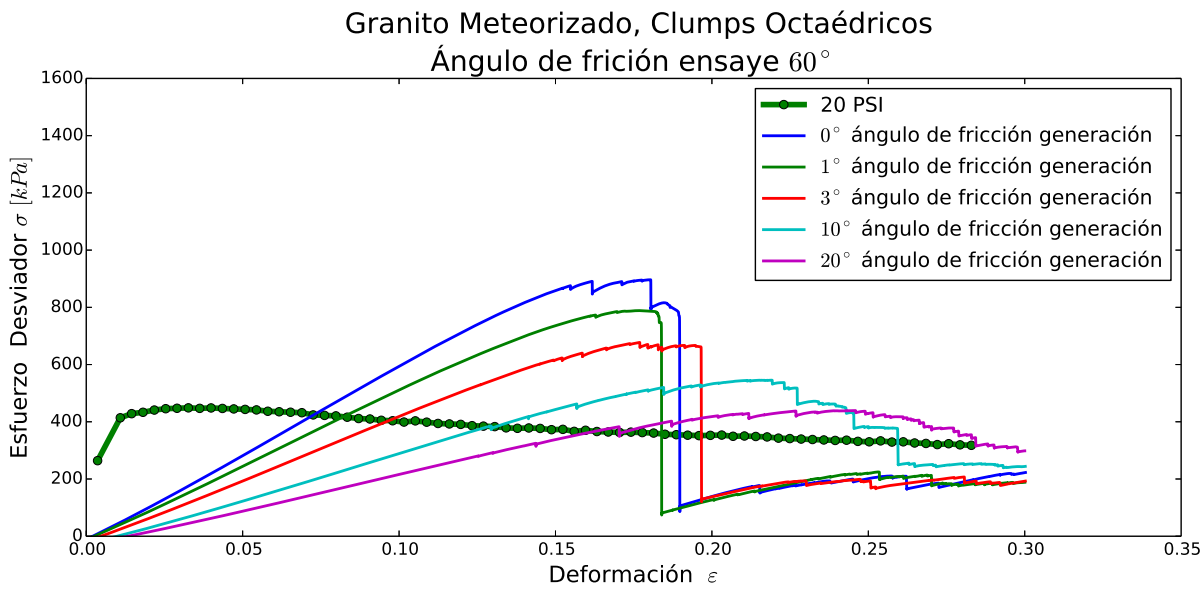


Figura C.63: Simulación Granito Meteorizado Clumps Octaédrico confinamiento de 20[psi], ángulo de fricción 60° ensaye

D | Recursos Computacionales

A continuación se presenta las propiedades del computador y los softwares utilizados en la investigación.

D.1. Computador

CPU	Intel Core i5 4440 Quad-Core C/GPU 3.1GHZ
RAM	8GB DDR3 Kingston HyperX Fury 1600MHZ
MB	MSI H87M-G43 DDR3 HDMI LGA1150
GPU	EVGA GeForce GTX 750 Ti FTW 2GB GDDR5 128-bit PCI-E 3.0
HDD	3.5” Western Digital 1TB 64MB Caviar Blue SATA3 6gb/s

D.2. Software

Se utilizó como sistema operativo LINUX UBUNTU 14.04.2 LTS. Se instala YADE desde los repositorios de UBUNTU, utilizando el siguiente comando en la terminal *sudo apt-get install yade*. Para el procesamiento de datos se utiliza Phyton que está preinstalado en el Sistema Operativo.

Al momento de la redacción de esta memoria, existe la página *www.yade.com* dónde informarse sobre el software, manuales, guías, foros, etc para orientarse sobre el uso del programa. También existe en esta página una zona de ejemplos y descargas de diversas ver-

siones del programa en forma de paquetes para compilar llamados "Trunk". Se recomienda usar la instalación indicada anteriormente dada las complicaciones que surgen con otros software necesarios para compilar.

Se requiere destreza en el uso del S.O. LINUX y de UBUNTU en particular.

La instalación de YADE necesita que el computador esté conectado a la red de internet. Pero no es necesaria esta conexión para ejecutarlo.

YADE tiene la opción de una interfaz gráfica que puede mostrar la evolución de la simulación. Esta interfaz es útil para depurar la programación, pero relentiza notablemente la ejecución. Se recomienda cerrar esta ventana al correr simulaciones con gran número de partículas y/o clumps.

Las últimas versiones de YADE incluyen la posibilidad de paralelización, esto es, la distribución de las tareas de cálculo entre varios ”cores” o CPU que tenga un computador o trabajar en red local con otros computadores. En este trabajo exploratorio no se utilizo esta posibilidad.

El proyecto YADE está cerrado, la página todavía existe pero no hay nuevas actualizaciones y los foros tienen actividad esporádica. Por esta razón y por un software libre no tiene soporte ni garantía. Existen otras alternativas a YADE y en S.O. Windows tales como PASIMODO y LIGGGHT, que son gratuitos pero más difícil de verificar obtener y utilizar.

Existen numerosos softwares comerciales que usan DEM, incluso empresas especializadas en prestar este tipo de servicios. La empresa YADEWOO emplea a desarrolladores de YADE.