

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. René Gómez Puigpinos

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA FRAGMENTACIÓN
SECUNDARIA EN MINERÍA DE CAVING A TRAVÉS DE DEM**



OSCAR ALBERTO JIMÉNEZ ARÉVALO

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Mayo 2020

RESUMEN

La estimación de la fragmentación en minería de *caving* es crucial para asegurar el éxito del negocio minero, en particular, la predicción de la fragmentación secundaria, ya que esta es decisiva en el diseño del nivel de producción y es un parámetro importante en la planificación minera, debido a que define la recuperación y producción de la mina. La existencia de modelos predictivos, generalmente empíricos y numéricos han ayudado en la estimación de la fragmentación, de los cuales, se destaca el método de Laubscher, Rapid Emulator Based On PCF (REBOP), Block Cave Fragmentation (BCF) o Block Caving Comminution Model (BCCM).

El objetivo de este estudio fue simular con ayuda de un software llamado ESyS-Particle, el cual está basado en el método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés), la fragmentación final en un modelo físico utilizado para representar la fragmentación generada por el flujo gravitacional bajo confinamiento.

En primer lugar, se realizaron ensayos de compresión uniaxial (UCS, por sus siglas en inglés) en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad de Concepción y su posterior simulación en el software, para calibrar las propiedades mecánicas de la roca en el modelo de fragmentación secundaria. Seguido de esto, se desarrolló el modelo de fragmentación secundaria en ESyS-Particle.

En la calibración se logró simular los dos tipos de ensayo realizados en laboratorio y simular dos ensayos que representaran un ensayo UCS de las rocas utilizadas en el modelo físico con un error relativo del UCS de 0.74% y 0.09% para los dos ensayos simulados de las rocas *B* y *C* respectivamente. Con el modelo de fragmentación secundaria se realizaron simulaciones con cargas de 2 [MPa]. Con los datos obtenidos se construyó la curva granulométrica a los 0 [ms] y a los 1000 [ms] para ambas simulaciones.

Con esto se concluyó que la construcción de un modelo, que logre simular un modelo físico o predecir la fragmentación secundaria, es realizable en el software ESyS-Particle.

ABSTRACT

Estimation of rock fragmentation in caving mining is key to ensure the mining business, especially the secondary fragmentation, since this is decisive in the production level design. It is also an important input for mining planning, because defines the ore recovery and production. The existence of empirical and numerical predictive model, help in the estimation of rock fragmentation, some of these models are: the Laubscher method, the block caving fragmentation (BCF) or the block caving comminution model (BCCM).

The objective of this study was to simulate the final fragmentation using ESyS-Particle software, which is based on the Discrete Element Method (DEM), emulating a physical model used to represent the rock fragmentation generated for the gravity flow under confinement.

First, uniaxial compression tests (UCS) were carried out in the rock mechanics laboratory of the University of Concepcion.

Second, UCS simulation were performed in the software to calibrate the mechanical properties of the rock in the secondary fragmentation model.

Following this, the secondary fragmentation model was developed in ESyS-Particle software.

In the calibration stage, was possible simulate two UCS test in the software with a UCS relative error of 0.74% and 0.09%, compared to the rocks B and C used in physical model, respectively.

Secondary fragmentation model simulations applying load of 2 [MPa] were performed. The data provided the particle size distribution curve constructed at 0 [ms] and 1000 [ms] for both simulations.

Finally, it was concluded that the construction of numerical model, to simulate the confined physical model, is feasible in ESyS-Particle software.

AGRADECIMIENTOS

Sin duda que, para llegar hasta aquí, el camino recorrido hubiera sido mucho más difícil sin las personas que estuvieron a mi lado, es por esto que me gustaría agradecerles por todo el apoyo y compañía durante todos estos años. En primer lugar, agradecer a mis padres Juan y Viviana, quienes con su esfuerzo y sacrificio sacaron adelante una gran familia y me entregaron las herramientas para enfrentar este desafío. Agradecer a mis hermanos Esperanza y Felipe, quienes con su apoyo incondicional en todo momento siempre estuvieron ahí para aconsejarme, ayudarme y alentarme a seguir adelante.

También me gustaría agradecer a los profesores y personal del Departamento de Ingeniería Metalurgia de la Universidad de Concepción, quienes con su trabajo ayudan años tras año a muchos estudiantes a cumplir sus metas.

Finalmente agradecer a mis amigos que siempre han estado en las buenas y en las malas, como también en mi memoria, dando momentos de alegría, compañía y diversión. Además, a todas las personas que conocí en esta hermosa etapa que me ayudaron de una u otra forma a crecer como persona y hacer de esta, una linda etapa en mi vida.

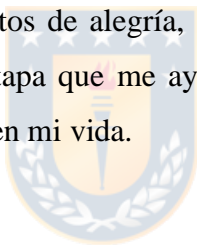


TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Motivación de la investigación.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.4	Propuesta de trabajo.....	4
2	ANTECEDENTES.....	5
2.1	Material granular.....	5
2.1.1	<i>Fragmentación en material granular</i>	6
2.1.2	<i>Fragmentación por compresión</i>	7
2.1.3	<i>Fragmentación por corte</i>	12
2.2	Flujo gravitacional.....	13
2.2.1	<i>Variables que afectan el flujo gravitacional</i>	15
2.2.2	<i>Modelos predictivos de flujo gravitacional</i>	15
2.3	Fragmentación en minería de caving.....	17
2.3.1	<i>Fragmentación in-situ</i>	17
2.3.2	<i>Fragmentación primaria</i>	17
2.3.3	<i>Fragmentación secundaria</i>	17
2.4	Modelación de elementos discretos (DEM).....	24
2.4.1	<i>Softwares basados en DEM</i>	25
2.4.2	<i>ParaView</i>	32
2.4.3	<i>Aplicación en minería</i>	33
2.5	Conclusiones del capítulo.....	34
3	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
3.1	Descripción y antecedentes.....	35
3.1.1	<i>Modelo físico</i>	36
3.1.2	<i>Representación numérica del modelo físico</i>	36
3.2	Calibración de los parámetros de roca para la creación de ensamblados en ESyS-Particle.....	36
3.2.1	<i>Ensayos UCS en laboratorio</i>	37
3.2.2	<i>Ensayos UCS en ESyS-Particle</i>	39
3.2.3	<i>Ensayos de calibración en ESyS-Particle</i>	40
3.3	Modelo de fragmentación secundaria.....	42
3.3.1	<i>Cambio de unidades</i>	42
3.3.2	<i>Creación de ensamblados de partículas</i>	44

3.3.3	<i>Inserción de los ensamblados</i>	46
3.3.4	<i>Estudio del damping adecuado para simular</i>	46
3.3.5	<i>Obtención de las masas de ensamblados en un paso de tiempo determinado</i>	47
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES	51
4.1	Ensayos UCS en laboratorio	51
4.2	Ensayos UCS en ESyS-Particle.....	51
4.2.1	<i>Influencia del módulo de Young</i>	52
4.2.2	<i>Influencia de la cohesión</i>	53
4.2.3	<i>Calibración de parámetros</i>	54
4.3	Modelo de fragmentación secundaria	57
5	CONCLUSIONES	65
5.1	Recomendaciones para trabajo futuro.....	67
6	BIBLIOGRAFÍA	68
7	ANEXOS	71
Anexo A.	Tablas de granulometría.....	71
Anexo B.	Gráficos de calibración para ensayos R	75
Anexo C.	Tablas de UCS laboratorio.....	77
Anexo D.	Tablas de parámetros usados para estudiar la influencia de los parámetros en el valor de UCS y deformación unitaria l12	
Anexo E.	Códigos utilizados en calibración.....	117
Anexo F.	Códigos utilizados en modelo de fragmentación secundaria.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de Block Caving con cargadores LHD, El Teniente, Chile [3].....	1
Figura 2. Esquema de definición de IMZ y IEZ para un punto de extracción [2].	2
Figura 3. Esquema general del proceso de investigación.	4
Figura 4. Representación esquemática de la transmisión de fuerzas a través de un suelo a) Ampliación de una parte de la sección mostrando las fuerzas transmitidas por dos puntos de contacto b) Sección de un recipiente lleno de suelo [14].	6
Figura 5. Relaciones entre las fases de un suelo. a) Elemento de suelo natural. b) División de un elemento de fase [14].....	6
Figura 6. Dispositivo de chancado de partícula [19].....	8
Figura 7. Definición de quiebre potencial [10].....	10
Figura 8. Celda de corte anular usada para el estudio del desgaste en bajos esfuerzos. [23]...	12
Figura 9. Muestras de formas hechas para los experimentos de desgaste. Los extruidos triangulares tienen una longitud de 3 mm [23].	13
Figura 10. Modelo simultaneo y separado [24].	14
Figura 11. Zonas en un flujo gravitacional [24].....	14
Figura 12. Mecanismo de flujo gravitacional elíptico identificado por la relación del elipsoide de extracción EE, elipsoide de loosening EL, embudo de salida F y cono de material de extracción R con volumen Vc [24].	15
Figura 13. Interrelación de las variables involucradas en el mecanismo del flujo granular [2].	15
Figura 14: Máximo/Mínimo espaciamiento de zonas de flujo basado en el diámetro de zonas de flujos aislados [1].	16
Figura 15. La ley fuerza-desplazamiento [11].	25
Figura 16. Diagrama ilustrativo de fuerzas y momentos entre partículas conectadas por conexiones elasto-fragiles rotacionales [31].....	30
Figura 17. Líneas de código para la creación de enlaces entre partículas en ESyS-Particle [31].	30
Figura 18. Líneas de código para crear fricción entre partículas en contacto [31].	31
Figura 19. Interfaz de ParaView [33].	33
Figura 20. Curva granulométrica usada en [35] y ajustada en [34].	33

Figura 21. a) Modelo cilíndrico en una prensa para aplicar diferentes cargas verticales. b) Punto de extracción dentro del modelo físico [6].	35
Figura 22. Equipos para medición de UCS y deformación de la Universidad de Concepción.	37
Figura 23. a) Testigo para ensayo UCS "R". b) Testigo para ensayo UCS "CC".....	38
Figura 24. Diagrama de realización de la calibración de los parámetros	41
Figura 25. Visualización de gran+exterior.geo.....	43
Figura 26. Visualización de la geometría del modelo de fragmentación secundaria a los 0 [ms]. a) visualización según los tag de partícula. b) visualización de las conexiones entre partículas al interior de cada ensamblado a los 0 [ms].....	45
Figura 27. Visualización de los ensamblados según radio de volumen relleno. a) ensamblado de radio 4.763. b) ensamblado de radio 6.350. c) ensamblado de radio 9.525 d) ensamblado de radio 11.113. e) ensamblado de radio 12.700. f) ensamblado de radio 14.287	46
Figura 28. Energía cinética en simulación.....	47
Figura 29. Cuadro resumen para la creación del ensayo UCS.....	49
Figura 30. Diagrama de creación del modelo de fragmentación secundaria y obtención de la curva granulométrica.....	50
Figura 31. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS CC en ESyS-Particle.....	52
Figura 32. Gráfico de E v/s deformación unitaria con diferente cohesión para los ensayos UCS CC en ESyS-Particle.....	52
Figura 33. Gráfico cohesión v/s UCS con diferentes módulos de Young, para ver la influencia de la variación de cohesión en el UCS a E constante.....	53
Figura 34. Gráfico cohesión v/s deformación unitaria con diferentes módulos de Young, para ver la influencia de la variación de cohesión en la deformación unitaria a E constante.	53
Figura 35. Gráfico esfuerzo deformación del ensayo para simular roca B	55
Figura 36. Comparación entre ensayo UCS en laboratorio y ensayo realizado en ESyS-Particle. a) visualización de la fractura en las conexiones. B) fractura generada en ensayo UCS de laboratorio c) visualización de la fractura del ensayo UCS en ESyS-particle con las partículas que forman el ensamblado.....	56
Figura 37. Curvas granulométricas	57
Figura 38 Curvas granulométricas del modelo de fragmentación secundaria	58

Figura 39. Curvas granulométricas acumuladas de ensamblados en modelo de fragmentación secundaria	58
Figura 40. Curvas granulométricas de ensamblados y modelo Roca B	59
Figura 41. Gráfico del porcentaje de enlaces rotos acumulado respecto del total de enlaces en el ensayo	60
Figura 42. Gráfico del porcentaje de enlaces rotos acumulado respecto del total de enlaces rotos en el ensayo.....	60
Figura 43. Gráfico del esfuerzo ejercido sobre el ensayo para la simulación de roca B.....	61
Figura 44. Energía cinética en la simulación del ensayo UCS para roca B.....	61
Figura 45. Energía total de deformación en la simulación del UCS roca B	62
Figura 46. Porcentaje de enlaces rotos por timestep y porcentaje de enlaces rotos acumulados	62
Figura 47. Esfuerzo sobre modelo de fragmentación secundaria	63
Figura 48. Energía cinética en el modelo de fragmentación secundaria	63
Figura 49. Energía total de deformación en el modelo de fragmentación secundaria	64
Figura 50 Imágenes del modelo a los 6 [ms]. a) desplazamiento en Z. b) Velocidad de cada partícula. c) enlaces sobrevivientes a los 6[ms]. d) enlaces a los 0[ms].....	64
Figura 51. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	75
Figura 52. Gráfico de deformación unitaria v/s E con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	75
Figura 53. Gráfico de C v/s UCS con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	76
Figura 54. Gráfico de deformación unitaria v/s C con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables que afectan en la fragmentación secundaria.....	18
Tabla 2. Dimensiones de las muestras ensayadas	37
Tabla 3. Dimensiones de las muestras ensayadas en el software ESyS-Particle.....	39
Tabla 4. Tipos de roca usados en [6].....	40
Tabla 5. Relaciones entre unidades modelo/real y consideraciones.	43
Tabla 6. Valores promedio de los ensayos de laboratorio utilizado.....	51
Tabla 7. Inputs para realizar ensayos UCS que representen a roca B y C de Tabla 3.	54
Tabla 8. Inputs para conexiones de partículas en los ensayos UCS.....	54
Tabla 9. Resultados de los ensayos para simular roca B y C de la Tabla 3.....	55
Tabla 10. Granulometría utilizada en [36].....	71
Tabla 11. Granulometría utilizada en [35].....	71
Tabla 12. Granulometría inicial y final de ensayo físico Roca B	72
Tabla 13. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria	72
Tabla 14. Granulometría final modelo fragmentación secundaria, simulando la mitad del modelo	73
Tabla 15. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria solo ensamblados	73
Tabla 16. Granulometría final modelo fragmentación secundaria solo ensamblados.....	74
Tabla 17. Datos de UCS ensayo 1 R.	77
Tabla 18. Datos de UCS ensayo 2 R.	84
Tabla 19. Datos de UCS ensayo 3 R.	94
Tabla 20. Datos de UCS ensayo 1 CC.....	102
Tabla 21. Datos de UCS ensayo 2 CC.....	104
Tabla 22. Datos de UCS ensayo 3 CC.....	106
Tabla 23. Datos de UCS ensayo 4 CC.....	108
Tabla 24. Resultados de ensayos UCS en laboratorio.....	111
Tabla 25. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle.	112
Tabla 26. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	113
Tabla 27. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	114
Tabla 28. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	115

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.1. Granulometría utilizada en [36]	71
Anexo A.2. Granulometría utilizada en [35]	71
Anexo A.3. Granulometría inicial y final de ensayo físico Roca B	72
Anexo A.4. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria	72
Anexo A.5. Granulometría final modelo fragmentación secundaria, simulando la mitad del modelo	73
Anexo A.6. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria solo ensamblados	73
Anexo A.7. Granulometría final modelo fragmentación secundaria solo ensamblados	74
Anexo B.1. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	75
Anexo B.2. Gráfico de deformación unitaria v/s E con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	75
Anexo B.3. Gráfico de C v/s UCS con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle	76
Anexo B.4. Gráfico de deformación unitaria v/s C con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle.....	76
Anexo C.1. Datos de UCS ensayo 1 R	77
Anexo C.2. Datos de UCS ensayo 2 R	84
Anexo C.3 Datos de UCS ensayo 3 R	94
Anexo C.4. Datos de UCS ensayo 1 CC.....	102
Anexo C.5. Datos de UCS ensayo 2 CC.....	104
Anexo C.6. Datos de UCS ensayo 3 CC.....	106
Anexo C.7. Datos de UCS ensayo 4 CC.....	108
Anexo C.8. Resultados de ensayos UCS en laboratorio.....	111
Anexo D.1. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle	112
Anexo D.2. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	113
Anexo D.3. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	114
Anexo D.4. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación).....	115
Anexo E.1. Grain_UCS.py	117

Anexo E.2. UCS_Roca_B.py.....	118
Anexo E.3. UCS_Roca_C.py.....	125
Anexo E.4. WallLoader.py	131
Anexo E.5. Tiempo.py.....	132
Anexo E.6. make_stress_strain_Roca_B.py	133
Anexo F.1. cilybat.py (Cambio de unidades físicas al archivo cilybat.msh).....	134
Anexo F.2. Granulometría.py (cambio de unidades físicas al archivo gran+exterior.geo).....	135
Anexo F.3. Ensamblados.py	137
Anexo F.4. Modelo_2MPa.py (modificación a Prensa.py)	147



SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

<i>DEM</i>	Método de elementos discretos
<i>EZ</i>	Zona de Extracción
<i>MZ</i>	Zona de movimiento
<i>IMZ</i>	Zona de movimiento aislada
<i>IEZ</i>	Zona de extracción aislada
<i>E</i>	Módulo de elasticidad o módulo de Young
σ	Esfuerzo
σ_{UCS}	Esfuerzo de resistencia máximo
ε	Deformación unitaria
<i>C</i>	Cohesión
ν	Razón de Poisson
ϕ	Ángulo de fricción interna
τ	Resistencia a la tensión
<i>UCS</i>	Ensayo de compresión uniaxial
\bar{X}	Media aritmética
μ_e	Coefficiente de fricción estático
μ_d	Coefficiente de fricción dinámico

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Block/Panel Caving, Inclined Drawpoint Caving y Front Caving, son algunos de los distintos métodos de extracción por hundimiento que han sido desarrollados, asociados a menores costos y mayores tasas de producción en minería subterránea, pero requieren de gran capital inicial y no permiten mayores cambios en su diseño una vez que la operación inició, por lo cual, es primordial una buena planificación del diseño y sus procesos [1,2].

El método de *caving* está presente en una operación minera subterránea, donde, el cuerpo mineral hunde naturalmente después de la socavación inicial (*undercutting* en inglés) y el material hundido es cargado en los puntos de extracción por los equipos de carguío [1]. En la Figura 1, se muestran los principales componentes y estructuras necesarias para la extracción de mineral en una operación de Block Caving.

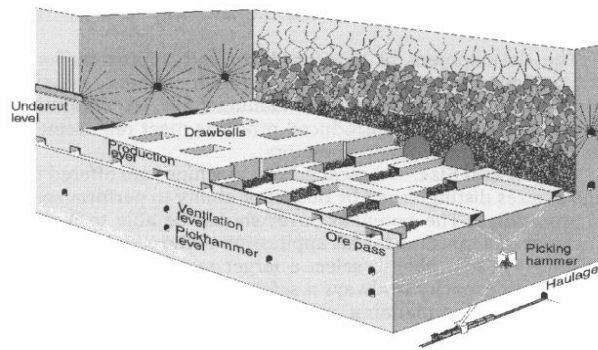


Figura 1. Ejemplo de Block Caving con cargadores LHD, El Teniente, Chile [3]

Para que el mineral tenga un libre flujo hacia los puntos de extracción, en primer lugar, el macizo rocoso debe ser fracturado. Todo macizo rocoso presenta una fragmentación *in-situ* como condición inicial, antes que se inicie cualquier labor minera, la cual está definida por zonas de falla y discontinuidades-preexistentes, sin embargo, éstas no son suficientes para generar un hundimiento. Generalmente, mediante tronaduras en el nivel de hundimiento y remoción de este material en la base de la columna de mineral, el proceso de socavación inicial es realizado. Una vez iniciado el hundimiento, los bloques de roca se separan del *cave back* e inician su viaje hacia los puntos de extracción, aquí es donde está presente la fragmentación primaria. Posterior a la socavación inicial, la extracción realizada, por equipos de carguío, logra que se produzca un flujo de material en la columna de mineral desde su lugar *in-situ* hasta los puntos de extracción, donde fragmentos de roca interactúan

entre ellos, produciendo desgaste o quiebre en las rocas, proceso denominado fragmentación secundaria [4,5].

La fragmentación secundaria es decisiva en el diseño del nivel de producción y es un parámetro importante en la planificación minera, debido a que define la recuperación y producción de la mina, afectando a un gran número de variables operacionales y de diseño como tamaño y espaciamiento de los puntos de extracción, selección de equipos, procedimientos de control de tiraje, tasas de producción, entrada de dilución, colgaduras, reducción secundaria y procesos de conminución posteriores [6].

Junto con los procesos de fragmentación se reconoce otro proceso, de gran relevancia para la operación minera de caving, debido a que tiene un impacto directo en la recuperación y el contenido de dilución, el flujo producido por la extracción, llamado flujo gravitacional [2].

En este proceso, se han identificado dos zonas de relevancia, una zona de extracción (EZ, por sus siglas en inglés), que describe el volumen del material extraído y una zona de movimiento (MZ, por sus siglas en inglés), que describe el volumen perturbado para una masa extraída dada, cuando estas zonas están completamente aisladas se definen como zona de extracción aislada (IEZ, por sus siglas en inglés) y zona de movimiento aislada (IMZ, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 2 [2].

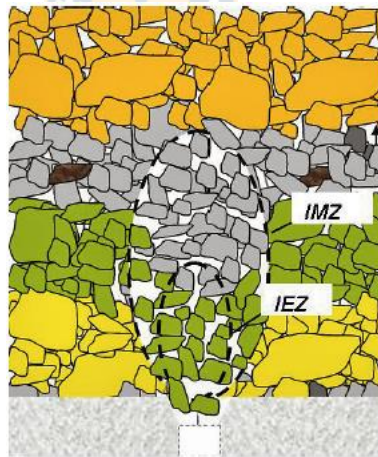


Figura 2. Esquema de definición de IMZ y IEZ para un punto de extracción [2].

Como estos dos procesos tienen un impacto significativo en la planificación y operación de una explotación minera, se han realizado modelos empíricos como Laubscher [1], numéricos como BCCM de Gómez *et al.* [6] o REBOP de Cundall *et al.* [7] y una combinación de ambos como BCF de Esterhuizen [8] para lograr predecir estos procesos. Pero para poder verificar si sus resultados son confiables, se tiene que realizar modelos físicos y toma de datos de los puntos de extracción y de la columna de extracción (idealmente), lo que es muchas veces es difícil de lograr por el alto riesgo que

genera entrar a estas zonas en una mina. Por lo cual, mediante el uso de DEM se pueden simular estos procesos con base en la física de partículas, lo que puede ayudar a recrear un proceso de extracción teniendo resultados que pueden ayudar a comparar estos modelos y/o predecir el comportamiento de la columna de extracción bajo ciertas variables.

Así, para el estudio y entendimiento de los procesos que ocurren en el caving especialmente en la columna de extracción, como la fragmentación secundaria y el flujo gravitacional. Se plantea la utilización de un método de elementos discretos (DEM), con el fin de poder estudiar con un mayor grado de detalle estos fenómenos.

1.2 Motivación de la investigación

Los avances en ciencia y tecnología, junto con el desarrollo de variados softwares han llevado a que hoy en día se puedan predecir y modelar comportamientos muy complejos como el clima, flujos de vehículos y personas. Esto se ha aprovechado en minería para tener un control en los diversos procesos que afectan a una operación, en particular, en minería de *caving*, uno de los desafíos más grandes e importantes es la predicción de la fragmentación del macizo rocoso, debido a que esta afecta a una gran cantidad de variables aguas abajo. Es por esto que lograr un buen modelo numérico ayudaría a comprender los fenómenos presentes en la fragmentación secundaria.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar, a través de modelamiento de elementos discretos utilizando el software ESyS-Particle, la fragmentación secundaria del material presente en la columna de mineral.

1.3.2 Objetivos específicos

Realizar un estudio detallado del estado del arte de la fragmentación secundaria y flujo gravitacional en minería de *caving*.

Realizar una calibración de los parámetros necesarios para simular un tipo de roca específico en el modelo de fragmentación secundaria.

Diseñar un modelo numérico que permita representar la fragmentación secundaria replicando un modelo físico a escala de laboratorio.

1.4 Propuesta de trabajo

Para realizar la investigación y cumplir con los objetivos, se estableció la siguiente metodología de trabajo.

1. Revisión bibliográfica y estado del arte

Realizar una investigación sobre el estado del arte de conceptos como material granular, flujo gravitacional, fragmentación y DEM.

2. Calibración de parámetros para modelar ensamblados

Llevar a cabo ensayos en laboratorio, posteriormente simularlos en el software junto con un estudio de la influencia del cambio de parámetros en los resultados, para finalmente simular ensayos de compresión uniaxial en el software calibrados a un tipo de roca usada en el modelo físico.

3. Diseño y construcción del modelo fragmentación secundaria

Para la realización del modelo de fragmentación secundaria, realizar una serie de *scripts*, utilizando la librería Gen-Geo y el software ESyS-Particle, con los parámetros calibrados. Posteriormente realizar una serie de simulaciones, donde se ajustaron algunos parámetros de la simulación como el *damping*.

4. Análisis de resultados

En esta etapa, discutir los resultados obtenidos, para llegar a algunas conclusiones.

En la Figura 3, se muestra un esquema general del trabajo realizado para lograr construir un modelo de fragmentación secundaria en ESyS-Particle.

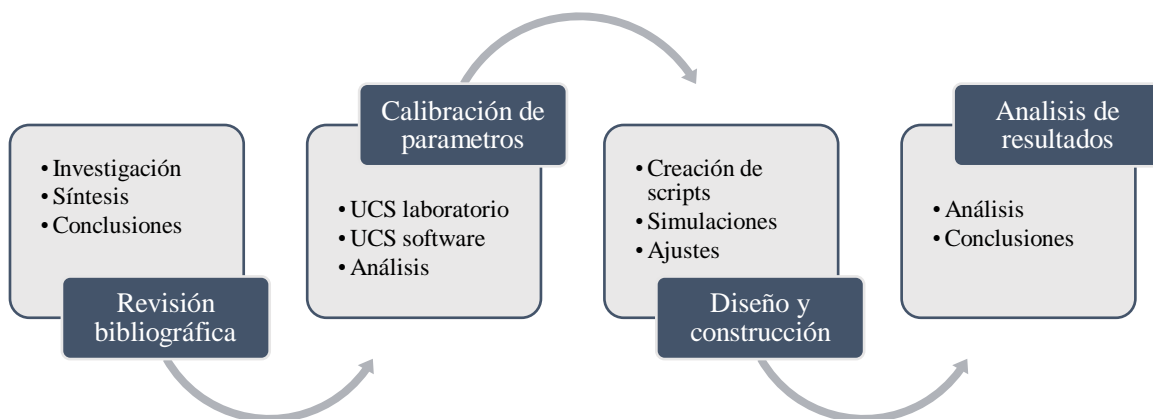


Figura 3. Esquema general del proceso de investigación.

2 ANTECEDENTES

En el presente capítulo se presenta el marco teórico, en el cual, se sustenta la presente memoria. Se realizó un estudio del estado del arte de los principales conceptos que fueron necesarios para llevar a cabo el trabajo, estos son material granular, flujo gravitacional, fragmentación y DEM.

2.1 Material granular

El contenido de un reloj de arena, sal en un salero, material estéril en un botadero minero, mineral en las columnas de *caving*, son algunos ejemplos de materiales granulares. Su estudio ha sido realizado desde hace mucho tiempo por variados autores como Jaeger [9], Hardin [10] o Cundall [11], pero su comportamiento es aún tema de interés debido a que muestran un comportamiento diferente al de otras sustancias [9].

Los materiales granulares se pueden definir como grandes conglomerados de partículas macroscópicas discretas, que si son no cohesivas las fuerzas entre ellas solo son repulsivas, de modo que la forma del material está determinada por los límites externos y la gravedad, como se muestra en la Figura 4 b). Sin embargo, a pesar de esta aparente simplicidad, un material granular se comporta de manera diferente a cualquiera de las otras formas familiares de materia (sólidos, líquidos o gases) y, por lo tanto, debe considerarse un estado adicional de la materia [12].

Para comprender el comportamiento de un medio granular en un ambiente minero, el estudio de los suelos provee una gran ayuda [2].

El suelo es cualquier acumulación no cementada o débilmente cementada de partículas minerales formadas por la erosión de las rocas, en donde el espacio vacío entre las partículas contiene agua y / o aire [13].

El límite para la clasificación entre suelos gruesos y finos generalmente se considera 35% finos (es decir, partículas más pequeñas que 0.06 mm), junto a esto se clasifican en [13]:

- Cohesivos: son aquellos suelos compuestos de arcilla y/o limo que tienen tamaños menores a 0.06 mm.
- No cohesivos: son los suelos compuestos de arena y/o grava que tienen tamaños de partícula mayores a 0.06 mm.

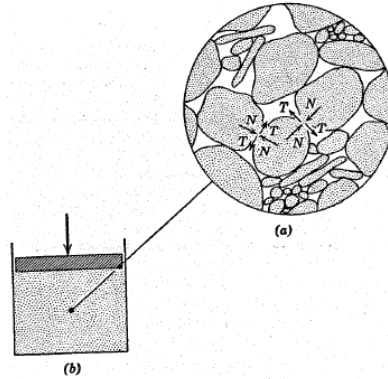


Figura 4. Representación esquemática de la transmisión de fuerzas a través de un suelo a) Ampliación de una parte de la sección mostrando las fuerzas transmitidas por dos puntos de contacto b) Sección de un recipiente lleno de suelo [14].

El suelo por tratarse de un sistema discontinuo de partículas, está constituido por varias fases [14], estas pueden ser sólida líquida y/o gaseosa, dispuestos de diferentes maneras como se muestra en la Figura 5, por esto se utilizan diferentes definiciones para entender la composición de los suelos, como porosidad, razón de vacíos, humedad, saturación, etc.

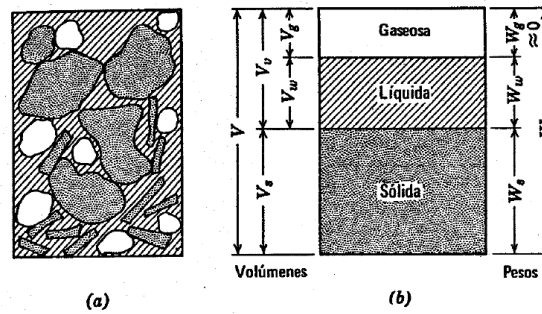


Figura 5. Relaciones entre las fases de un suelo. a) Elemento de suelo natural. b) División de un elemento de fase [14].

Reconociendo la presencia de finos, espacios de aire, agua y considerando que en minería de *caving* se trabaja con tamaños sobre los 0.06 mm, el estudio de suelos no cohesivos (suelos gruesos) nos puede ayudar a entender y predecir el comportamiento del material en la columna de quebrado.

2.1.1 Fragmentación en material granular

Es un hecho que la fragmentación en un material, sometido a esfuerzos, ocurre cuando estos superan la resistencia a la tensión, compresión o al corte. Pero como el material granular no es un material sólido o líquido, sino un sistema de partículas, estas se relacionan entre si e interactúan cuando son sometidas a cargas como se observa en la Figura 4, por lo que la resistencia a los esfuerzos no es el único parámetro a tener en cuenta para estudiar la fragmentación en materiales granulares, debido a que también afecta el cambio en las distribuciones granulométricas, la cantidad de contactos

entre las partículas, los tamaños de las partículas, razón de vacío, etc., es por esto que varios autores como Marsal [15], Mc.Dowell [16] y Jaeger [9], estudiaron el comportamiento de los materiales granulares.

Dentro de los primeros estudios del comportamiento de materiales granulares bajo esfuerzos, Marsal [15] propuso que *“Aparentemente, el factor más importante que afecta tanto a la resistencia al corte como a la compresibilidad es el fenómeno de fragmentación que sufre un cuerpo granular cuando se lo somete a cambios en su estado de esfuerzos, tanto durante la etapa de compresión uniforme como durante la aplicación de la carga desviadora. Un hecho similar es observado en ensayos de compresión unidimensional.”*. Lo que implica que la división de las partículas, cambia el comportamiento del material en su conjunto [10].

Las propiedades mecánicas más importantes de los materiales granulares, como el comportamiento de esfuerzo-deformación, la resistencia, el cambio de volumen, la evolución de la presión de los poros, y la variación en la permeabilidad dependen de la integridad de las partículas o la cantidad de trituración de partículas que se produce debido a los cambios en los esfuerzos. Por lo tanto, es importante poder identificar y cuantificar los efectos de la compresión de partículas en estas propiedades [17].

2.1.2 Fragmentación por compresión

Resultados de numerosos estudios de laboratorio y analíticos han demostrado que la división de las partículas es la principal falla a ocurrir en materiales granulares bajo compresión, por ejemplo, como expuso Marsal [15].

Hardin [10] propuso que la cantidad de aplastamiento de partículas en un elemento de suelo bajo esfuerzos depende de la distribución del tamaño de las partículas, la forma de las partículas, el estado de la tensión efectiva, la trayectoria de la tensión efectiva, la relación de vacío, la dureza de las partículas y la presencia o ausencia de agua, con lo cual, realizó un modelo empírico de la fragmentación en materiales granulares.

Mc.Dowell [16] estudió el comportamiento micro-mecánico de suelos “chancables”, comprimiendo granos entre dos placas planas y aplicando cargas a un suelo “chancable”. La compresión de granos, estaba basada en el estudio de Jaeger [18], quien propuso que la resistencia a la tensión de una partícula de suelo puede medirse indirectamente comprimiendo el grano entre dos placas planas, mostradas en la Figura 6, hasta que ocurra la falla, obteniendo el esfuerzo de tensión inducido según la Ec.(1) [19].

$$\sigma \text{ [Pa]} = \frac{F \text{ [N]}}{d^2 \text{ [m}^2\text{]}} \quad (1)$$

Donde,

σ es el esfuerzo de tensión inducido, para granos de tamaño d cargados diametralmente bajo una fuerza F , medido en [Pa]

F es la fuerza de compresión diametral aplicada por los platos medida en [N]

d es el diámetro del grano en la falla, medido en [m^2]

Por lo que Mc.Dowell [16], usando la Ec. (1), propuso que las resistencias a la tracción obtenidas de partículas individuales de varios tamaños chancadas entre placas planas podrían estar relacionadas con el tamaño por Ec.(2).

$$\sigma_m \propto d^b \quad (2)$$

Donde σ_m es la fuerza media, en [Pa] y b describe la ley de endurecimiento del tamaño.

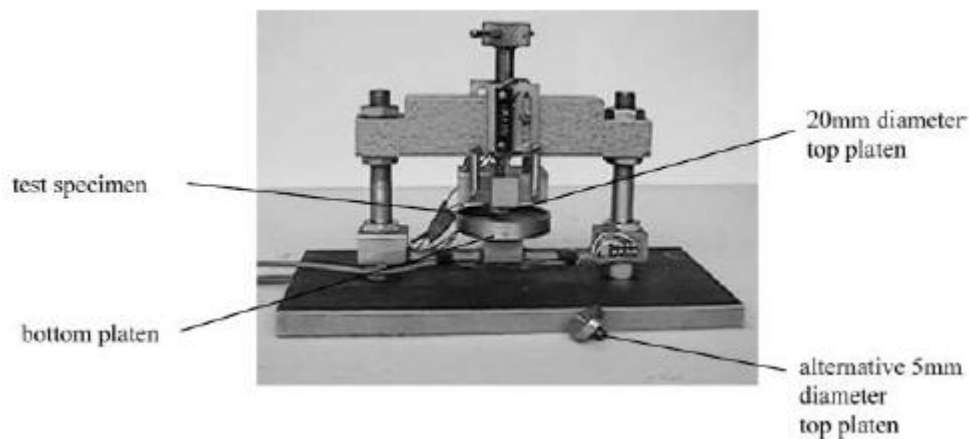


Figura 6. Dispositivo de chancado de partícula [19].

Con lo cual, Mc.Dowell [16] concluyó que la resistencia a la tensión de los granos de suelo comprimidos entre placas planas satisfacen las estadísticas de Weibull de fractura de cerámicas frágiles y esta gobierna la resistencia y dilatancia de los suelos “chancables”. Además, propuso que, en un agregado bajo compresión normal unidimensional, el *yield stress* (el punto de máxima curvatura en una gráfica de razón de vacío con el logaritmo del esfuerzo efectivo) es proporcional a la resistencia a la tracción del grano. Finalmente, indicó que la fractura sucesiva de las partículas más pequeñas bajo incremento de esfuerzos macroscópicos tiende a formar una geometría fractal limitada [16].

Según Mc.Dowell [20], si una partícula se carga de manera uniforme sobre su superficie y está bajo un alto esfuerzo hidrostático pero bajo esfuerzo desviatorio, sería poco probable de romper. Por lo tanto, no sería realista utilizar el esfuerzo medio para establecer si una partícula se rompería o no

(o el máximo esfuerzo principal), ya que esto significaría que el criterio de fractura no se vería afectada, incluso si los otros esfuerzos principales eran de igual magnitud.

Mc.Dowell, *et al.* [21] demostraron que las estadísticas de Weibull pueden aplicarse con éxito a la fractura de los granos del suelo. Es ampliamente aceptado que la falla de una partícula esférica bajo compresión pura es de tracción, y que las fracturas se inician a partir de fallas existentes y las concentraciones de esfuerzos asociados. Suponiendo que las fallas de las partículas se producen por fractura rápida bajo esfuerzos de tensión inducidos, Mc.Dowell, *et al.* [21] obtuvieron la probabilidad de supervivencia para una partícula bajo compresión diametral por la integración de la función de probabilidad como una función de los esfuerzos de tensión inducidos sobre el volumen de la partícula bajo tensión; demostrando que el efecto de tamaño Weibull es válido para dicha carga, suponiendo que las partículas tienen una forma similar y se cargan de la misma manera. Por lo que, propusieron que la resistencia a la tracción de los granos del suelo comprimidos entre planchas, mostrado en la Figura 6, satisface las estadísticas de fractura de las cerámicas frágiles de Weibull.

Las distribuciones de Weibull se describen mediante dos parámetros: uno que define la forma de la distribución, generalmente denominado módulo de Weibull m , que está relacionado directamente con el coeficiente de variación, y el otro que define la escala, que es un valor característico de la distribución tal que el 37% (por ejemplo, $\exp(-1)$) de las variables aleatorias son mayores (en el caso de las fuerzas de las partículas, esto determina la probabilidad de supervivencia del 37%) y es proporcional a la media. Para una fuerza dada del 37%, el aumento del módulo de Weibull disminuye la variabilidad en las fuerzas. De la probabilidad de supervivencia de Weibull para un bloque de material bajo tensión, es posible derivar la siguiente relación Ec.(3).

$$\sigma_0 \propto d^{-3/m} \quad (3)$$

Donde,

σ_0 es el valor del esfuerzo de tensión en el que sobrevive el 37% del número total de partículas de tamaño d

m es el módulo de Weibull.

Según Mc.Dowell *et al.* [22], la probabilidad de fractura de una partícula está determinada por la aplicación de esfuerzos macroscópicos, el tamaño de la partícula y el número de coordinación (número de contactos con las partículas vecinas). Las partículas más pequeñas son estadísticamente más resistentes, pero tienen menos contactos. Por consiguiente, el endurecimiento plástico del suelo es debido a la reducción del tamaño de partícula más pequeña bajo niveles de incremento de esfuerzo. Los granos pequeños se vuelven estadísticamente más fuertes y distribuyen la carga en las partículas

grandes, haciendo las partículas grandes relativamente invulnerables. Si la probabilidad de fractura de las partículas más pequeñas es constante, entonces se tiene una distribución fractal de tamaño de granos [19].

2.1.2.1 Modelos predictivos de fragmentación por compresión

- Modelo de Hardin [10]

Mediante ensayos de laboratorio sobre distintos suelos con partículas de diferente forma y material de relleno de roca, se estudiaron los efectos de distintas variables sobre la fractura bajo compresión, presentando ecuaciones que pueden ser usadas para estimar la totalidad de quiebre esperado para un suelo dado sujeto a cargas específicas.

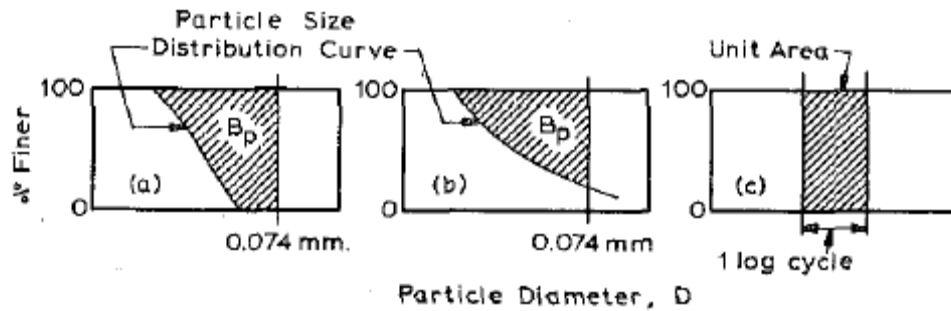


Figura 7. Definición de quiebre potencial [10].

Para calcular la cantidad total de quiebre (B_t) que ocurre durante la compresión utiliza el concepto de potencial de rotura (B_p), que es igual el área entre la distribución de tamaño inicial y un tamaño límite de limo igual a 0.074 [mm] en un gráfico % fino *v/s* log del diámetro de partícula, mostrado en la Figura 7. El tamaño límite es debido a que por ser partículas muy finas es difícil que sean afectadas por los esfuerzos y además bajo esos tamaños los comportamientos comienzan a ser cohesivos. También se define el concepto de rotura relativa (B_r) representada según la Ec.(4).

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \tag{4}$$

Donde,

B_r , es la pendiente de la gráfica entre el potencial de rotura B_p Ec(5) y el quiebre total B_t Ec. (8).

$$B_p = \int_0^1 b_p df \tag{5}$$

En la Ec.(5) b_p es el potencial para rotura que es significativo al comportamiento del suelo, para una fracción de tamaño dada df en un elemento de suelo.

Con,

$$b_p = \log_{10} \left[\frac{D [mm]}{0.074 [mm]} \right] \quad (6)$$

Para $D \geq 0.074 [mm]$ en la Ec.(6).

Y,

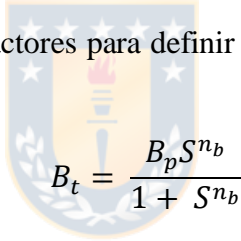
$$b_p = 0 \quad (7)$$

Para $D < 0.074 [mm]$ en la Ec.(7).

df , es un diferencial del “porcentaje pasante” dividido por 100.

Hardin [10] mostró que el quiebre total para un material es directamente proporcional a su potencial de rotura, además concluyó que la cantidad de partículas chancándose en un elemento de suelo bajo esfuerzos depende de distribución del tamaño de partículas, forma de partículas, condición del esfuerzo efectivo, camino del esfuerzo efectivo, tasa de vacíos, dureza de partículas, y la presencia o ausencia de agua.

Finalmente combinó todos estos factores para definir el potencial de quiebre total, dado por la Ec. (8).



$$B_t = \frac{B_p S^{n_b}}{1 + S^{n_b}} \quad (8)$$

El factor S está dado por Ec. (9).

$$S = \frac{(1 + e_i) n_s \sigma_o}{800 h^2 p_a} \left[1 + 9 \left\{ \frac{\tau_o}{\sigma_o} \right\}^3 \right] \quad (9)$$

Donde,

p_a , es la presión atmosférica.

e_i , la tasa de vacíos inicial.

h , la dureza de chancado.

σ_o , esfuerzo efectivo normal octaédrico.

τ_o , esfuerzo efectivo de corte octaédrico.

n_s , el número de forma.

El exponente n_b es el número de quiebre expresado en función de h , e_i y el número de forma n_s según Ec.(10).

$$n_b = \frac{h^2}{(1 + e_i) n_s} + 0.3 \quad (10)$$

2.1.3 Fragmentación por corte

Este tipo de fragmentación provoca principalmente el redondeamiento de las partículas actuando sobre los bordes cuando hay altos esfuerzos de corte y bajos esfuerzos normales, también ocurre cuando hay bajos esfuerzos normales cercanos a la resistencia a la tensión de las partículas.

2.1.3.1 Modelos predictivos de fragmentación por corte

- Modelo de Bridgwater [23]

Bridgwater [23] estudió el desgaste del material a través de cizalle, considerando como variables el esfuerzo normal, deformación de corte, tamaño de partícula y resistencia de la partícula.

La configuración de prueba empleada por Bridgwater [23] consistió en una celda de corte anular cuyo esfuerzo normal se controló mediante un sistema de peso y polea, que giraba para lograr esfuerzos de corte totales superiores a 46000 [kPa], el esquema se muestra en la Figura 8.

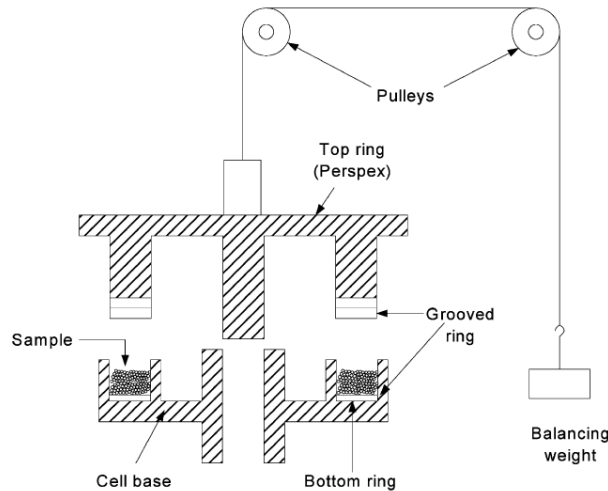


Figura 8. Celda de corte anular usada para el estudio del desgaste en bajos esfuerzos. [23].

Pellets de extruido de aluminio de tamaño casi uniforme de varias formas y tamaños, como se muestra en la Figura 9 se colocaron dentro de la celda de corte, y se sometieron a diferentes tensiones y deformaciones. Durante los experimentos, el producto extruido se retiró periódicamente de la celda de corte y se tamizó a través de cuatro tamices con tamaños de 0.106 [mm], 0.18 [mm], 0.425 [mm], 1.0 [mm] y 2.8 [mm]. El peso del material que pasa por cada tamiz se registró y los resultados se tabularon.

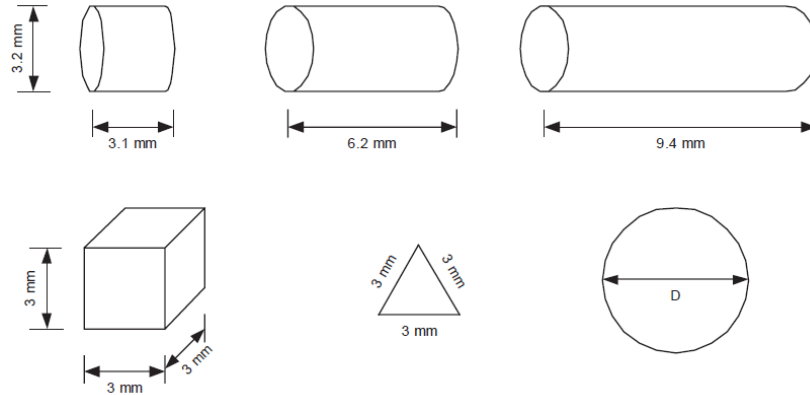


Figura 9. Muestras de formas hechas para los experimentos de desgaste. Los extruidos triangulares tienen una longitud de 3 mm [23].

Bridgwater [23] demostró que los mecanismos de desgaste para una distribución inicial de igual tamaño, cuando se evalúan en una amplia gama de esfuerzos-deformaciones, están unidos de una manera simple, pudiendo ser explicados mediante una ley de desgaste empírica Ec.(11), la cual está relacionada con el proceso de desgaste que está en gran parte controlado por las cadenas de esfuerzo [23].

Bridgwater [23] definió la fracción masa triturada W como la Ec. (11)

$$W = K_N \left(\frac{\sigma_N \Gamma \phi}{\sigma_{scs}} \right)^\beta \quad (11)$$

Donde,

σ_{scs} , es el esfuerzo de tensión de fractura asociado con el chancado de la partícula individual.

K_N , β , y ϕ , son características de la trituración del material.

Γ , es deformación córtate.

σ_N , es el esfuerzo normal.

2.2 Flujo gravitacional

El flujo gravitacional de materiales granulares es el proceso, en el cual, el material se mueve desde su posición inicial por la acción de la gravedad [2].

Kvapil [24] describió dos casos que observó en el flujo gravitacional en silos, el primero es una extracción y llenado por separado, Figura 10 a) y una extracción y llenado simultaneo, Figura 10 b).

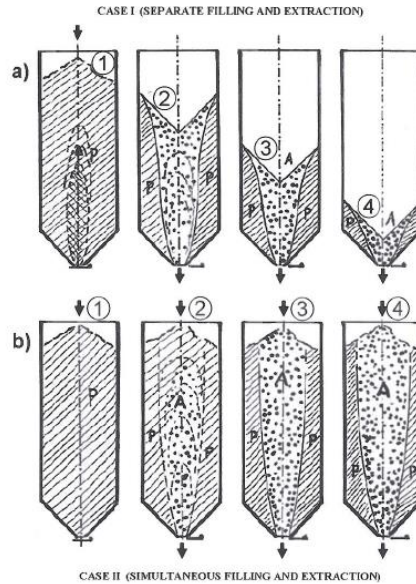


Figura 10. Modelo simultaneo y separado [24].

Para los métodos de minería masiva, Kvapil [24] consideró que se describe mejor únicamente con el caso dos, de llenado y extracción simultánea.

Dentro de este flujo gravitacional, Kvapil [24] determina 3 zonas de interés para el estudio del flujo gravitacional, estos son la zona activa (A), zona pasiva de bajo movimiento (P) y Elipsoide de aflojamiento (EL), Figura 11.

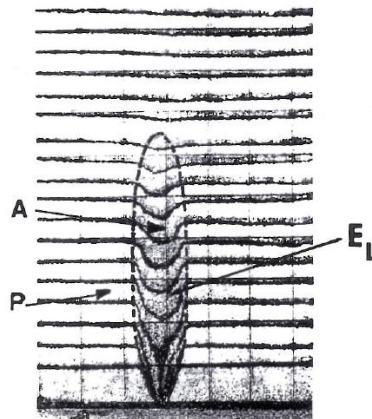


Figura 11. Zonas en un flujo gravitacional [24].

Kvapil [24], describe una relación entre la velocidad de abertura del punto de descarga y el tiempo de exposición de las partículas. Junto a esto, descubre que, al extraer una pequeña cantidad de material desde el punto de drenaje, se desarrolla un pequeño (EL) en la parte baja del flujo gravitacional, el cual llamó elipsoide de extracción (EE), mostrado en la Figura 12. Definiendo dos zonas, la MZ y EZ [2], mostradas en la Figura 2.

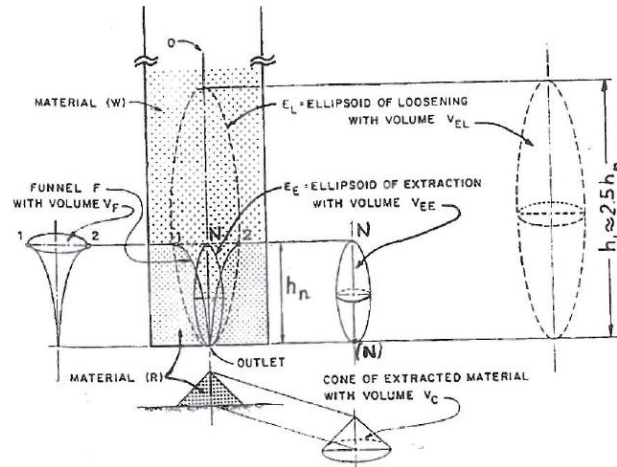


Figura 12. Mecanismo de flujo gravitacional elíptico identificado por la relación del elipsoide de extracción E_E , elipsoide de loosening E_L , embudo de salida F y cono de material de extracción R con volumen V_C [24].

2.2.1 Variables que afectan el flujo gravitacional

Según Castro [2], los mecanismos que controlan el flujo granular en minería de *caving* están influenciado por las siguientes variables: características del medio (material granular estudiado como suelo), estado esfuerzos *in-situ*, esfuerzos inducidos durante el flujo, condiciones de contorno. Su interrelación se muestra en la Figura 13.

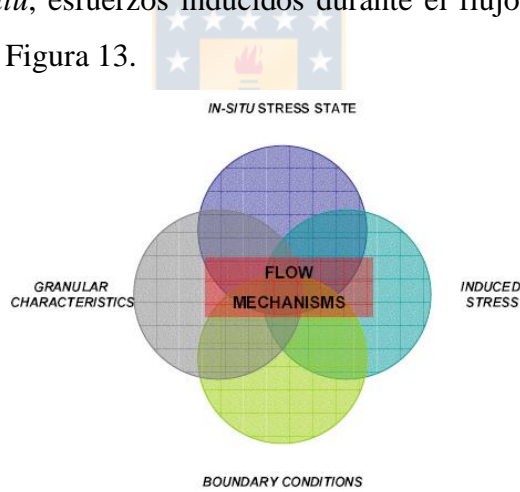


Figura 13. Interrelación de las variables involucradas en el mecanismo del flujo granular [2].

2.2.2 Modelos predictivos de flujo gravitacional

- Modelo de Laubscher [25]

Basándose en los resultados de las pruebas de modelos físicos y las observaciones in situ de la suspensión del material y los movimientos de marcadores en las operaciones de *caving*, Laubscher [25] propuso que una zona cilíndrica de movimiento del material se desarrolla sobre un punto de estiramiento y crece hasta un diámetro finito que es depende del ancho de estiramiento y la distribución del tamaño del fragmento, Figura 14. Además propuso que los materiales muy gruesos exhibían una variación pulsante en el ancho de IMZ como resultado del desarrollo intermitente de

arcos estables; por lo tanto, el diámetro de la IMZ para materiales muy gruesos se basó en observaciones de complejos sobre los puntos de trazado en operaciones de *caving* [4].

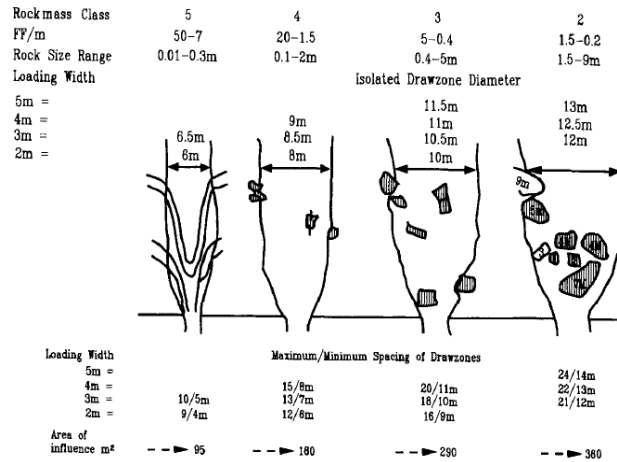


Figura 14: Máximo/Mínimo espaciamiento de zonas de flujo basado en el diámetro de zonas de flujos aislados [1].

- Rapid Emulator Based On PFC (REBOP)

Es un modelo matemático para predecir la propagación ascendente y la ampliación de las IMZ, sumando en la vertical geometrías cilíndricas, y los movimientos internos correspondientes del material. Fue desarrollado por Cundall *et al.* [7] basado en observaciones de flujo en simulaciones PFC3D de drenaje [4].

En lugar de depender de las funciones que se ajustan a las formas IMZ observadas, las IMZ se componen de varias capas en forma de disco, y el crecimiento de IMZ se debe a leyes incrementales aplicadas a nivel de capa. El crecimiento de la IMZ se produce a través de la expansión (es decir, aumento del radio) de una capa existente o mediante la adición de nuevas capas en la parte superior. Los movimientos de material asociados con el crecimiento de IMZ son rastreados por un campo de marcadores que se establecen en una red fija al inicio de la simulación. Cuando un marcador es engullido por un IMZ, su posición se actualiza en función de su ubicación dentro del IMZ (distancia desde la línea central y el número de capa) y una ley incremental (derivada de PFC3D) que controla cómo el material se mueve hacia abajo de una capa a la siguiente. Se consideran drenados cuando salen de la capa más baja, lo que proporciona un medio para registrar el material drenado y delinear la zona de extracción (IEZ). Las leyes incrementales que rigen la expansión de IMZ local y el movimiento de material en REBOP se derivaron de los patrones de flujo observados en las

simulaciones de drenaje de PFC3D y FLAC realizadas por Cundall *et al* [7]. La mayoría de las simulaciones incorporaron un único punto de extracción aislado [4].

Sobre la base de la observación de los movimientos de partículas y los perfiles de desplazamiento dentro de la zona de movimiento resultante, se postularon tres mecanismos principales para controlar el crecimiento hacia arriba y hacia afuera de una IMZ: salto de porosidad (o dilatación), colapso y erosión. Se desarrollaron reglas incrementales para describir cómo cada uno de estos mecanismos controla el crecimiento de capas discretas dentro de la zona de movimiento. El flujo se simula extrayendo una pequeña masa de la *layer* más baja y moviéndola hacia arriba a través de las *layers* superiores, haciendo crecer cada *layer* en secuencia según sea necesario para cumplir con las leyes incrementales mientras se asegura la continuidad y el balance de masa [4].

2.3 Fragmentación en minería de caving

El grado de fragmentación en minería de *caving* está dado, en gran medida, por el estado natural de fragmentación del macizo rocoso, la cualidad de la roca presente y de los procesos de conminución que ocurren en el interior de la columna de flujo. Hoy en día son aceptados tres tipos de fragmentación presentes en *caving*, nombrados a continuación [5].

2.3.1 Fragmentación in-situ

Esta descrita por los bloques presentes naturalmente en el macizo rocoso antes de la actividad minera, los cuales están descritos por las discontinuidades pre-existentes.

2.3.2 Fragmentación primaria

Después de la socavación inicial y una vez iniciado el *caving* los bloques que se separan del *cave back* y caen en la columna de extracción han sido afectados por la fragmentación primaria, la cual está determinada por los esfuerzos en el *cave*, la resistencia y orientación de los sistemas de discontinuidades respecto a los esfuerzos [26].

2.3.3 Fragmentación secundaria

Los fragmentos de roca que caen en la columna de extracción y viajan a través de esta hasta los puntos de extracción, producto de la fragmentación primaria, sufren otro proceso llamado fragmentación secundaria, el cual, consiste en la reducción de tamaño producto de distintos mecanismos de rotura de roca que se producen en el transporte por la interacción de los fragmentos. Los mecanismos que someten a las partículas determinan la distribución del tamaño de los fragmentos que llegan a los puntos de extracción [1].

2.3.3.1 Mecanismos de fragmentación secundaria

De la literatura de material granular, se deduce que hay dos mecanismos de fragmentación que afectan directamente a la fragmentación secundaria, estos son los mecanismos de compresión y abrasión los cuales se llevan a cabo por los esfuerzos sobre la columna de extracción, además Pierce [4] agrega otro mecanismo presente en la fragmentación secundaria, fragmentación por impacto.

- Fragmentación por compresión: Generada por altos esfuerzos inducidos sobre la columna de mineral, afectando los llamados “puntos de carga” en los bloques de rocas, logrando la división de estos una vez es superada la resistencia de la roca intacta
- Fragmentación por abrasión: Generada por bajos esfuerzos de compresión (cercanos a la resistencia de roca intacta) o altos esfuerzos de corte, logra el “redondeamiento” de las rocas con la remoción de las esquinas
- Fragmentación por impacto: Es generada por la caída de material a través del air gap que golpea al material que se encuentra en la superficie superior de la columna de extracción, este tipo de fragmentación es muy difícil de cuantificar debido a que es difícil el estudio de la generación y tamaño de los air gap en el cave, por lo que este tipo de fragmentación no se considera en los distintos modelos predictivos de fragmentación secundaria.

2.3.3.2 Variables que afectan la fragmentación secundaria

Luego de una amplia revisión en la literatura, las principales variables que afectan a la fragmentación secundaria se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables que afectan en la fragmentación secundaria.

	Variables	Efecto en la fragmentación secundaria	Referencias
Variables geomecánicas	Estado de esfuerzos efectivos y trayectoria efectiva de esfuerzos	Considerado como un factor de control primario, impacta en la fragmentación por corte y por compresión. Las tensiones pueden ser muy diferentes en las zonas móviles y estancadas del <i>cave</i> . Las tensiones en las zonas de movimiento tienden a ser bajas; Las tensiones en la zona estancada tienden a ser mayores.	[4,6,10]
	Deformación de corte	Parámetro relevante que controla la fragmentación bajo corte, dominando en las	[4,23]

		IMZ producidas por el flujo gravitacional, donde las deformaciones por corte son más altas.	
	Resistencia	Impacta en el redondeamiento y división de la roca bajo compresión y corte.	[4]
	Forma de la partícula (Razón de aspecto)	Afecta en la potencialidad de ruptura de una roca bajo compresión. Las partículas con una alta razón de aspecto son más susceptibles a las cargas de flexión.	[4-5,10]
	Forma de la partícula (Angularidad)	Aumenta el potencial de división y redondeamiento bajo compresión.	[4]
	Presencia de discontinuidades	La probabilidad de rotura para rocas con discontinuidades es más alta.	[5]
	Distribución de tamaño	Los granos más grandes en un conjunto de fragmentos son los menos propensos a dividirse bajo compresión, lo que resulta en una rotación de la distribución del tamaño de partícula. Los materiales de tamaño uniforme son más susceptibles a la división que los materiales bien clasificados tanto en compresión como en cizallamiento. Esto se debe a la influencia del número de coordinación que actúa para estabilizar las partículas y aumenta con un empaque más denso.	[4,10]
	Porosidad inicial o razón de vacíos	Relevante para la fragmentación bajo compresión. Hardin [10] descubrió que los materiales con una porosidad inicial más baja experimentan menos roturas bajo	[4,10]

		compresión. Esto se lo atribuyó al hecho de que, en un ensamblaje más compacto, las fuerzas se distribuyen entre un mayor número de partículas, lo que disminuye los esfuerzos de tensión generados en cualquier partícula.	
	Dureza de la partícula	Influye en la potencialidad de rotura de un fragmento de suelo.	[10]
	Presencia o ausencia de agua	Influye en la potencialidad de rotura de un fragmento de suelo.	[10]
Variables operacionales	Tasa de drenaje	Influye en el tiempo que un bloque permanece en la columna de extracción. La fragmentación disminuye si se realiza más extracción.	[6] [5]
	Altura de la columna mineral	Define la distancia que los fragmentos tienen que descender. Si aumenta la altura también aumenta el tiempo de residencia.	[6]
	Presión vertical actuando en la columna	Aumenta con la altura de la columna, aumentando los esfuerzos sobre los fragmentos en el interior de la columna de mineral.	[6]

2.3.3.3 Modelos predictivos de fragmentación secundaria

Con el fin de predecir la distribución de tamaño en una muestra de material granular se han realizado diferentes estudios entorno al modelado y simulación de la fragmentación de los materiales granulares, algunos de estos estudios son presentados a continuación.

- Block Cave Fragmentation (BCF)

Generado por Esterhuizen [8], es un programa desarrollado para estimar el tamaño de los fragmentos de roca reportados en los puntos de extracción durante el Block Caving, basado en reglas empíricas y analíticas que describen los procesos y factores que juegan un rol en la fragmentación durante el *caving* [27].

Actualmente BCF es el método más amplio y completo para fragmentación in-situ, primaria y secundaria en block caving.

Contiene tres módulos principales [27]:

- Fragmentación primaria: Cálculo de la fragmentación de la roca que rodea el macizo rocoso. El cálculo está basado en orientación y espaciamiento de discontinuidades y campo de esfuerzos existente.
- Fragmentación secundaria: Calcula la ruptura de la roca mientras se mueve durante la extracción de la columna. El cálculo considera factores de forma de los bloques, resistencia del bloque, presión del cave, esfuerzos inducidos por arqueamiento de la columna de extracción y la altura de extracción.
- Análisis de colgaduras. Determina las colgaduras posibles en una batea usando la fragmentación secundaria como dato de entrada.

La información de entrada básica para el software BCF es [27]:

- Discontinuidades
- Resistencia macizo rocoso
- Orientación frente de hundimiento
- Esfuerzos



BCF entrega un set de gráficos que representan la distribución de tamaños y otras estadísticas de los bloques de roca en cualquier etapa de extracción. Si bien es el software más completo a la fecha, dado que considera mecanismos de ruptura para fragmentación secundaria, es de difícil manejo por la cantidad de datos de entrada [28].

- Size

Esta metodología creada por Merino [26], permite predecir la fragmentación primaria y secundaria de una mina de Block/Panel Caving.

La estimación de la fragmentación primaria se calcula a partir de la frecuencia de fracturas por metro de cada set principal de discontinuidades y luego se realizan simulaciones de Montecarlo para determinar el tamaño de los bloques primarios.

La fragmentación secundaria se calcula evaluando dos funciones: función de selección y función de quiebre. Lo anterior se realiza para cada una de las etapas por las cuales pasará cada bloque, etapas que son determinadas por un *slice* en el cual ocurrirá un solo evento de ruptura, donde cada *slice* corresponde a un 20 [%] de extracción del bloque.

Respecto a la función de selección, se basa en la forma de los fragmentos para elegirlos y para que luego sean quebrados, mientras mayor sea el factor de forma, mayor probabilidad de que sea seleccionado. Para la función de quiebre, el programa asume que un bloque seleccionado se quiebra en dos. Luego, según la forma de cada nuevo trozo existe la posibilidad de volver a ser seleccionado y quebrado, sólo si el tamaño de los fragmentos es menor a 0.01 [m^3] no podrá ser seleccionado.

En general, este método se basa principalmente en la información de las frecuencias de fractura por metro de los sets de discontinuidades, no se considera información de entrada relevante como condición de esfuerzos o información de relleno de discontinuidades [28].

- Block Caving Comminution Model (BCCM)

Gómez *et al.* [6] establecieron un modelo de fragmentación secundaria para predecir la distribución del tamaño de partícula aplicando las características del mineral y las condiciones de operación, el cual está basado en el modelo de balance de masa poblacional.

Este modelo utiliza tres conceptos para determinar la distribución de tamaño final, selección de partículas, cantidad de partículas que se quebraran y masa mineral total en un dominio, además utiliza siete parámetros que se determinan de manera experimental [6].

Los conceptos son determinados mediante ecuaciones las cuales son:

1. Fracción de masa mineral en el intervalo de tamaño i -ésimo, m_i Ec.(12).

$$m_i = \sum_{j=1}^i A_{ij} e^{-S_j \tau} \quad (12)$$

Donde, A_{ij} se expresa por la Ec.(13), S_j es la función selección en la que el material se rompe en el intervalo de tamaño j -ésimo y τ es el tiempo de residencia y denota el tiempo que el material está en proceso de rotura.

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i < j \\ f_{i0} - \sum_{k=1}^{i-1} A_{ik} & \text{if } i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} S_k}{S_i - S_j} A_{kj} & \text{if } i > j \end{cases} \quad (13)$$

Aquí f_{i0} es la distribución inicial del tamaño de partícula.

2. Selección de los fragmentos que se quebraran, según la función selección, S_i Ec.(14).

$$S_i = S_i^E(\sigma_V) \quad (14)$$

Donde, σ_V es la presión vertical en MPa y S_i^E es un parámetro del modelo dado por la Ec. (15).

$$S_i^E = S_1^E \exp \left\{ Z_1 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + Z_2 \left[\ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

En el cual, Z_1 y Z_2 parámetros del modelo que representan la forma de la variación de la tasa específica de rotura con el tamaño de partícula, S_1^E representa la tasa específica de rotura para partículas de la fracción de tamaño máximo ($i = 1$), los cuales deben ser ajustados con los datos experimentales, d_i es la media geométrica del i -ésimo clase de tamaño, dada por Ec. (16).

$$d_i = \sqrt{x_i x_{i+1}} \quad (16)$$

3. Partículas quebradas, según la función de quiebre, B_{i1} Ec.(17).

$$B_{i1} = \alpha_1 \left(\frac{x_i}{x_2} \right)^{\alpha_2} + (1 - \alpha_1) \left(\frac{x_i}{x_2} \right)^{\alpha_3} \quad (17)$$

Donde, α_1 , α_2 , α_3 son parámetros del modelo ($0 < \alpha_1 < 1$; $\alpha_3 > \alpha_2$) representando la forma de la distribución de tamaño de los fragmentos y x_i es un tamaño de malla para un intervalo de tamaño dado.

2.4 Modelación de elementos discretos (DEM)

DEM (por sus siglas en inglés) es un modelo numérico capaz de describir el comportamiento mecánico de conjuntos de discos o esferas, donde la interacción de éstas se ve como un problema transitorio con estados de equilibrio que se desarrollan cada vez que las fuerzas internas se equilibran [11]. Basado en las leyes de Newton para el movimiento de las partículas y las leyes de Hook para la interacción de estas en los planos donde actúan las fuerzas normales y de corte, como se ilustra en la Figura 15.

Creado por Cundall [11], los primeros modelos se desarrollaron originalmente para simular el comportamiento micro-mecánico de los medios no cohesivos, como los suelos y las arenas, así se convirtió en una gran herramienta para investigar modelos físicos, como los materiales granulares [2,29].

Caracterizado por modelar el fenómeno de interés al calcular el movimiento individual de una gran cantidad de partículas, este método se destaca por la incorporación de grados de libertad rotacionales, es decir, considera y simula tanto el desplazamiento como la rotación en el espacio de las partículas involucradas en la simulación.

Ventajas generales: permite un análisis en detalle de micro interacciones entre partículas. Es aplicable a una amplia gama de modelos que involucran flujo granular. Una de las principales ventajas de DEM es que los sistemas altamente complejos se pueden modelar utilizando metodologías básicas sin suposiciones sobre los comportamientos constitutivos de los materiales y cualquier predisposición sobre dónde y cómo pueden ocurrir y propagarse las grietas. Esta ventaja permite a DEM estudiar con gran simplicidad muchos problemas que son altamente dinámicos con grandes deformaciones y una gran cantidad de contactos que cambian con frecuencia [30].

Desventajas generales: la duración de la simulación y el número de partículas está limitado por la cantidad de cómputo. Para altas constantes de elasticidad requiere de pasos de tiempo muy pequeños, lo que lleva a simulaciones muy largas.

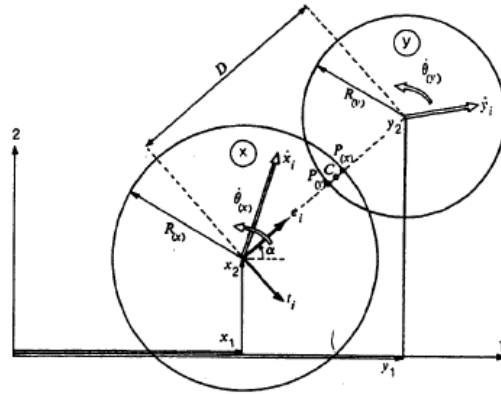


Figura 15. La ley fuerza-desplazamiento [11].

En DEM, las fuerzas de contacto en equilibrio y los desplazamientos de conjuntos de partículas bajo esfuerzos se encuentran a través de una serie de cálculos que rastrean los movimientos de las partículas individuales. Estos movimientos son el resultado de la propagación por medio de perturbaciones que se originan en los límites, es un proceso dinámico. La velocidad de propagación es una función de las propiedades físicas de un medio discreto. Describiendo este comportamiento numéricamente, toma pasos de tiempo sobre los cuales se supone que las velocidades y aceleraciones son constantes, por lo que DEM se basa en la idea de que el paso de tiempo elegido puede ser tan pequeño que durante un solo paso de tiempo, las perturbaciones no pueden propagarse desde ningún disco más allá de sus vecinos inmediatos. Así, las fuerzas resultantes en cualquier disco están determinadas exclusivamente por su interacción con los discos con los que está en contacto [11].

2.4.1 Softwares basados en DEM

2.4.1.1 LIGGGHTS®-PUBLIC

LIGGGHTS® es un software de código abierto basado en DEM. Se utilizar para la simulación de material particulado, principalmente para modelar flujo de partículas, dinámica granular e interacciones entre partículas y "paredes".

Posee importación y manejo de geometrías complejas, se puede realizar análisis de fuerza y desgaste en mallas, también posee una variedad de implementaciones de contacto partícula-partícula.

Funciona en equipos capaces de compilar C++, además posee paralelismo altamente escalable y eficiente utilizando MPI (interfaz de paso de mensajes).

La salida de datos es en formato VTK de código abierto.

2.4.1.2 3DEC

3DEC es un código de modelado numérico tridimensional basado en el método de elementos discretos (DEM) para el modelado discontinuo, realizado por Itasca S.A., posee una versión bidimensional llamada UDEC.

Se pueden realizar análisis geotécnicos de suelos, rocas, aguas subterráneas, soporte estructural y albañilería. 3DEC simula la respuesta de medios discontinuos (como rocas con discontinuidades o ladrillos de albañilería) que están sujetos a carga estática o dinámica. La formulación numérica también contiene un lenguaje de script incorporado Itasca FISH.

3DEC posee distintas opciones que se venden por separado de la licencia general, estas son:

- **Análisis dinámico:** simula la respuesta no lineal de un sistema (suelo, roca y estructuras) a la excitación desde una fuente externa (p. Ej., Sísmica) o interna (p. Ej., Vibración o explosión).
- **Análisis térmico:** La opción térmica en 3DEC permite la simulación de conducción de calor transitoria.
- **Modelos constitutivos definidos por el usuario:** Los modelos constitutivos definidos por el usuario (UDM) se pueden escribir en C ++ para materiales de bloques deformables (zonas) y cualquier discontinuidad (juntas, fallas, camas, superficies artificiales) para calcular nuevas tensiones, desplazamientos y tensiones, para un modelo de material existente modificado o un comportamiento de material totalmente personalizado

2.4.1.3 YADE

Código abierto extensible para modelos numéricos discretos, centrado en el método de elementos discretos. Las partes de cálculo están escritas en C ++ usando un modelo de objeto flexible, lo que permite la implementación independiente de nuevos algoritmos e interfaces. Utiliza Python para la construcción de escenas, control de simulación, post-procesamiento y depuración.

Yade es relativamente fácil de aprender a usar y tiene una buena base de soporte de los usuarios y desarrolladores actuales. Actualmente solo es de memoria compartida paralela OpenMP y, como tal, no se escala bien a tamaños de problemas extremadamente grandes en clústeres HPC.

2.4.1.4 Esys-Particle

Para la realización del modelo se utilizó ESYs-Particle, un software de modelamiento numérico con código abierto basado en DEM. Hoy en día, se utiliza en el modelamiento de terremotos, flujos en silos, predicción de la fragmentación de rocas y otros usos en la industria. Este programa funciona principalmente en sistemas operativos Linux, su núcleo está compuesto por un motor de simulación

de C++ que implementa la descomposición del dominio espacial a través de la interfaz de paso de mensajes (MPI). Se implementa un algoritmo de búsqueda de vecino en *verlet list* para detectar partículas vecinas y se implementa una variedad de leyes de interacción para interacciones unidas o no unidas entre partículas [31].

Dado que las aplicaciones para el DEM son amplias y variadas, ESyS-Particle proporciona una interfaz de programación de aplicaciones (API) simple que permite a los usuarios diseñar simulaciones a través de *scripts* escritos en el lenguaje de programación Python.

La API de Python permite a los usuarios especificar las ubicaciones y propiedades iniciales de partículas y paredes, definir los tipos de interacciones que actúan sobre estos objetos, seleccionar los tipos y la frecuencia de salida de datos durante las simulaciones, y realizar cálculos definidos por el usuario a intervalos regulares a través de módulos Runnable [31].

Ventajas de usar ESyS-Particle:

- Mediante una cuenta en Launchpad se puede tener acceso gratuito a la descarga del software y a un foro donde se pueden hacer preguntas respecto al uso del software.
- Código abierto, se pueden hacer modificaciones según los requerimientos específicos de cada usuario.
- Se pueden realizar diferentes tipos de ensayo y simulaciones como compresión uniaxial, de corte, explosiones, propagaciones de ondas, flujos en silos, etc.
- Posee una librería llamada GenGeo, donde se pueden crear volúmenes geométricos simples y complejos, para representar ensamblados de partículas.
- Entrega archivos que se pueden visualizar, lo que permite un mejor estudio y entendimiento de las simulaciones realizadas.

Desventajas de usar ESyS-Particle:

- Dado que se basa en DEM, requiere de un alto grado de cómputo para simulaciones de muchas partículas.
- Hay ciertos parámetros que no se pueden agregar en las simulaciones o no es tan evidente su implementación, por ejemplo, la humedad o la presión de poros en un ensamblado que simule una roca.
- No posee interfaz gráfica.
- A la fecha no cuenta con una herramienta para crear distribuciones granulométricas específicas.

Al usar ESyS-Particle, es necesario tener en consideración ciertas nociones, a continuación, se presentan algunas de ellas.

- Tamaño de los pasos de tiempo (Time step)

Según Wang *et al.* [30], el paso de tiempo se puede determinar según la Ec.(18).

$$dt = \alpha \sqrt{\frac{M_{min}}{K_{max}}} \quad (18)$$

Con,

$\alpha \sim 0.1$,

M_{min} , masa mínima.

K_{max} , la contante de elasticidad máxima.

Para simulaciones donde la densidad es constante, es mejor sustituir M_{min} por $\rho_{min} * V_{min}$; donde V_{min} es el volumen de una esfera con el menor radio de partícula en la simulación y ρ_{min} la densidad de esa partícula.

- Amortiguamiento artificial y viscosidad

Según Wang *et al.* [30], en ESyS-Particle, se emplean dos tipos de amortiguamiento. El primero es el amortiguamiento global, mostrado en la Ec.(19).

$$f_1^v = -v_1 M v \quad (19)$$

Aquí,

v , es la velocidad absoluta de la partícula.

v_1 , es el coeficiente de amortiguamiento.

v_1 , no puede ser significativamente grande, de modo que en un paso de tiempo una partícula cambia su dirección de movimiento únicamente por la fuerza de amortiguación, es decir, $f_1^v dt < Mv$ entonces tenemos $v_1 < \frac{1}{dt}$ como límite superior.

El segundo tipo de fuerza de amortiguamiento es el que se muestra en la Ec.(20).

$$f_2^v = -v_2 K v_{ij} \quad (20)$$

Aquí,

v_{ij} , es la velocidad relativa entre dos partículas.

K , es la rigidez en el contacto.

v_2 , el coeficiente de amortiguamiento.

Este tipo de amortiguación alienta a las partículas a moverse como cuerpos rígidos, pero desalienta el movimiento relativo entre las partículas (como la propagación de ondas). De manera similar, tenemos $f_2^v dt < Mv_{ij}$, o $v_2 < \frac{dt}{a}$, aquí $a \sim 0.1$ [30].

En el modelo el amortiguamiento se puede especificar de dos formas. Con Lin/RotDamping, donde el parámetro de viscosidad es generalmente un poco difícil de especificar, ya que tiene unidades de $1/t$ por lo que su valor depende del sistema de unidades que se elige usar para definir otros parámetros del modelo, como la densidad de partículas, los módulos de Young, los radios de partículas, etc. Generalmente, en las simulaciones que involucran este tipo de amortiguamiento se debe ejecutar algunas simulaciones con diferentes valores del parámetro de viscosidad y observar si la simulación está suficientemente amortiguada. Trazar la energía cinética total frente al tiempo es una buena manera de ver si la viscosidad es suficiente. O con LocalDampingPrms y RotLocalDampingPrms, donde el parámetro de viscosidad para estas interacciones es adimensional y toma un valor en el rango de 0.0 a 1.0. Un valor bajo implica muy poca amortiguación, mientras que un valor alto implica una amortiguación bastante severa. En general, es mucho más fácil seleccionar un valor apropiado para la viscosidad utilizando estos grupos de interacción. Este tipo de amortiguamiento no es recomendable para simulaciones que involucren gravedad, ya que las partículas experimentarán una aceleración gravitacional ligeramente diferente dependiendo de si se mueven hacia arriba o hacia abajo con respecto a la dirección de la gravedad [32].

- Tasa de carga

Dentro de un paso de tiempo, las partículas no deben moverse una distancia mayor que su tamaño, como se muestra en la Ec.(21).

$$V_{load} dt \ll R \quad (21)$$

Donde,

V_{load} , es la velocidad de la partícula.

dt , es el paso de tiempo.

R , es el radio.

Este principio también debería ser válido para procesos altamente dinámicos como las simulaciones de impacto o explosión, en cuyo caso los pasos de tiempo son muy pequeños debido a las grandes velocidades [30].

- Creación de enlaces y fricción entre partículas rotacionales

Para simular fallas frágiles en rocas, se requieren interacciones entre pares de partículas que incorporen cuatro grados de libertad tanto rotacionales como traslacionales, como se muestra en la Figura 16 [31].

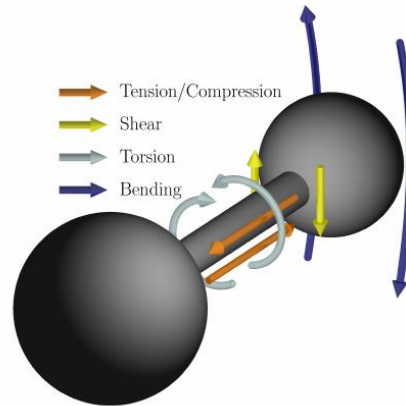


Figura 16. Diagrama ilustrativo de fuerzas y momentos entre partículas conectadas por conexiones elasto-frágiles rotacionales [31].

Como se ve en la Figura 16, dos partículas unidas pueden sufrir fuerzas normales y de corte, así como momentos de flexión y torsión. Los enlaces diseñados para impartir tales fuerzas y momentos se conocen como enlaces cementativos, en ESYS-particle se llaman *BrittleBeamPrms*, Figura 17.

También hay una interacción específicamente diseñada para interacciones de fricción entre partículas rotacionales no unidas llamada *FrictionPrms*. Las interacciones de fricción rotacional imparten un torque a ambas partículas, haciendo que las partículas giren entre si cuando están en contacto por fricción [31].

```
#create rotational elastic-brittle bonds between particles:
pp_bonds = sim.createInteractionGroup (
  BrittleBeamPrms(
    name="pp_bonds",
    youngsModulus=100000.0,
    poissonsRatio=0.25,
    cohesion=100.0,
    tanAngle=1.0,
    tag=1
  )
)
```

Figura 17. Líneas de código para la creación de enlaces entre partículas en ESYS-Particle [31].

La interpretación física de los enlaces rotacionales es que dos partículas entre sí con un haz elástico cilíndrico cuyo radio es la media de los radios de las partículas unidas y cuya longitud de equilibrio es la suma de los radios de esas partículas. La elasticidad de los enlaces está determinada

por un módulo microscópico de Young (parámetro *youngsModulus*) y una relación microscópica de poisson (parámetro *poissonsRatio*). Las propiedades elásticas macroscópicas de un conjunto de partículas unidas no necesariamente coinciden con las propiedades elásticas microscópicas de los mismos. La topología de la red de enlaces de un conjunto de partículas también influye en sus propiedades elásticas macroscópicas. Para simular fallas frágiles de las muestras, las uniones requieren un criterio de umbral de falla (o resistencia a la rotura). En ESyS, se emplea un criterio de falla de Mohr-Coulomb. Un enlace fallara si el esfuerzo cortante dentro del enlace excede su resistencia al corte τ dada por la Ec.(22).

$$\tau = C + \sigma_N \tan(\phi_f) \quad (22)$$

Donde,

C , es la resistencia cohesiva de la unión para esfuerzo normal cero σ_N

σ_N , es el esfuerzo normal.

ϕ_f , es el ángulo de fricción interno de la unión.

Los parámetros de *cohesion* y *Tanangle* definen la resistencia cohesiva y el ángulo de fricción de los enlaces respectivamente.

Cuando se rompe un enlace entre dos partículas, se necesita especificar el tipo de interacciones no ligadas que experimentan las partículas si entran en contacto. Como un enlace roto representa una superficie de fractura, es apropiado especificar interacciones de fricción entre partículas no unidas. La Figura 18 muestra el código que implementa interacciones de fricción entre partículas no unidas que se tocan.

```
#initialise frictional interactions for unbonded particles:
sim.createInteractionGroup (
  FrictionPrms(
    name="friction",
    youngsModulus=100000.0,
    poissonsRatio=0.25,
    dynamicMu=0.4,
    staticMu=0.6
  )
)
```

Figura 18. Líneas de código para crear fricción entre partículas en contacto [31].

En los DEM unidos (cohesivos), las partículas se unen para que las fuerzas de tracción se puedan transmitir, pero en los DEM no unidos (sin cohesión), solo se pueden transmitir fuerzas repulsivas entre las partículas. El primero se usa a menudo para modelar la propagación de ondas y la fractura

de materiales intactos como rocas. Mientras que este último, o modelo "realmente discreto", se usa para modelar movimientos explosivos y comportamientos de materiales granulares [30].

- GenGeo

Es una librería del software ESyS-Particle, en la cual se pueden crear volúmenes, de geometrías establecidas para llenarlas con partículas, GenGeo se basa en tres conceptos básicos [31]:

1. Volúmenes geométricos para llenar con partículas
2. Un "Empaquetador" para colocar las partículas en los volúmenes de acuerdo con los criterios dados. Las ventajas de esta estrategia de empaquetamiento son que produce disposiciones de partículas relativamente densas donde cada partícula interior es tocada por al menos otras 4 partículas en 3D (por otras 3 partículas en 2D) y que no hay tensiones congeladas entre las partículas. La desventaja es que el usuario no puede controlar la distribución del tamaño de partícula excepto por el radio mínimo y máximo permitido, además estos radios deben tener una relación $R_{min}/R_{max} \approx 1/10$, para que el "empaquetamiento" sea óptimo si se requiere conectar las partículas.
3. La "Tabla de vecinos": un contenedor para almacenar las partículas y realizar un seguimiento de sus posiciones relativas y relaciones de vecinos

La principal desventaja de esta librería es que no se puede tener un control riguroso sobre la distribución de tamaño de las partículas, la cual es uno de los principales factores en el estudio de los materiales granulares.

2.4.2 ParaView

Para la visualización del modelo se usó ParaView, Figura 19. Es una aplicación de código abierto para visualizar conjuntos de datos bidimensionales y tridimensionales. El tamaño de los conjuntos de datos que este software puede manejar varía ampliamente según la arquitectura en la que se ejecuta la aplicación. Las plataformas admitidas por ParaView van desde estaciones de trabajo de un solo procesador hasta supercomputadoras de memoria distribuida de múltiples procesadores o grupos de estaciones de trabajo. Usando una máquina paralela, ParaView puede procesar conjuntos de datos muy grandes en paralelo y luego recopilar los resultados [33].

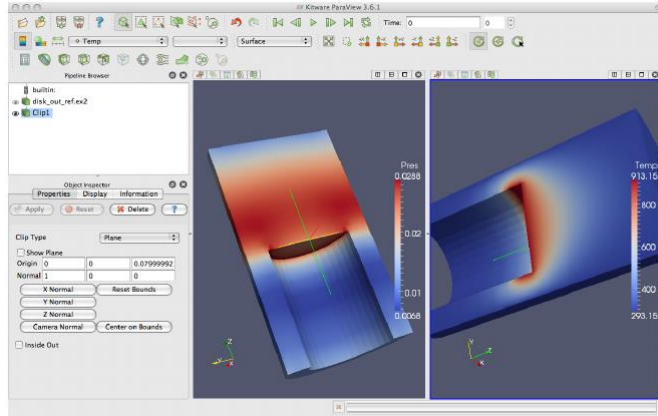


Figura 19. Interfaz de ParaView [33].

2.4.3 Aplicación en minería

DEM es una gran herramienta para el estudio de diferentes parámetros en minería. Un ejemplo es el trabajo realizado por Hancock *et al.* [34], en el cual, mediante ESyS-Particle realizaron un modelo para el estudio del flujo gravitacional en minería de caving.

Otro estudio basado en DEM, para su aplicación en minería es el de Cid [35], donde se estudia el flujo granular y la frecuencia de colgaduras, en este caso, en una batea de extracción aislada, simulando un ensayo de laboratorio. De este aquí, se tomaron algunas consideraciones para el presente trabajo como, la geometría del punto de extracción y la granulometría inicial, la cual se muestra en la Figura 20.

Dentro de las suposiciones realizadas en [35], fueron que todas las partículas son esferas rígidas, las que no están afectas a la fragmentación, por lo cual, no se puede hacer un estudio de la influencia de todos los parámetros que afectan en el flujo como en la fragmentación, mediante la introducción de los ensamblados (conjunto de partículas unidas a través de enlaces frágiles), se logra estudiar más parámetros, lo cual se explica más adelante.

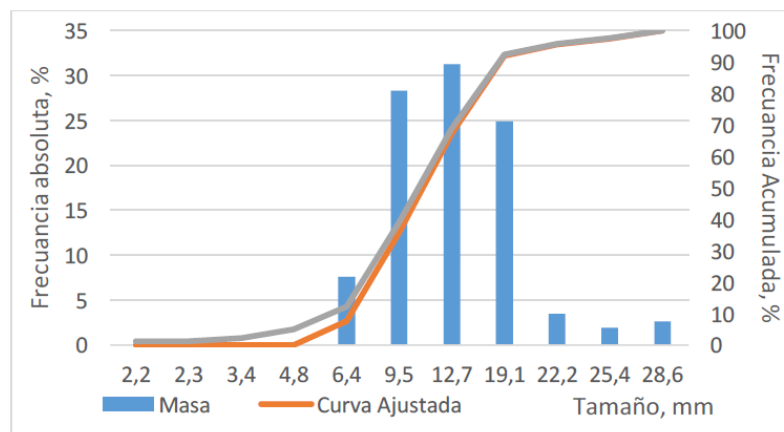


Figura 20. Curva granulométrica usada en [35] y ajustada en [34].

2.5 Conclusiones del capítulo

Los materiales granulares cambian su comportamiento en la medida como cambian las interacciones entre las partículas, las características iniciales y estímulos externos.

Dentro de los principales parámetros que inciden en el comportamiento de un material granular es la división de las partículas, esto afecta en gran medida a la fragmentación en el tiempo y al flujo del material [2,4]. Por lo que estudiar las interacciones entre cada partícula y el comportamiento de cada una frente a acciones externas ayuda a comprender el comportamiento a gran escala de los materiales granulares. Numéricamente esto es posible mediante el uso de DEM, ya que modela el comportamiento de cada partícula individualmente y la incidencia que esta ejerce sobre sus vecinos, por lo cual una buena herramienta para el estudio de la fragmentación en materiales granulares y exclusivamente en este caso para el estudio de la fragmentación secundaria en minería de *caving*.



3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la creación del modelo de fragmentación secundaria se consideró el modelo físico realizado en [6], con los datos de roca utilizado en aquel trabajo. Además, se calibraron parámetros del software con la ayuda de ensayos UCS en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad de Concepción, con lo cual, se crearon conglomerados para simular la fractura de roca bajo esfuerzos dentro de un punto de extracción. Finalmente se ingresaron estos conglomerados en el modelo realizado en [35] para poder estudiar los efectos de esfuerzos y desplazamiento sobre los conglomerados.

3.1 Descripción y antecedentes

Debido a que la necesidad de predecir la fragmentación en los puntos de extracción o la fragmentación secundaria, es crucial para la operación minera, Gómez *et al.* [6], desarrollaron un modelo que entrega una estimación de la fragmentación secundaria esperada en función de la altura de extracción y la presión vertical, llamado BCCM. Para su realización, utilizó un modelo físico a escala que recrea una batea de extracción, como se muestra en Figura 21.

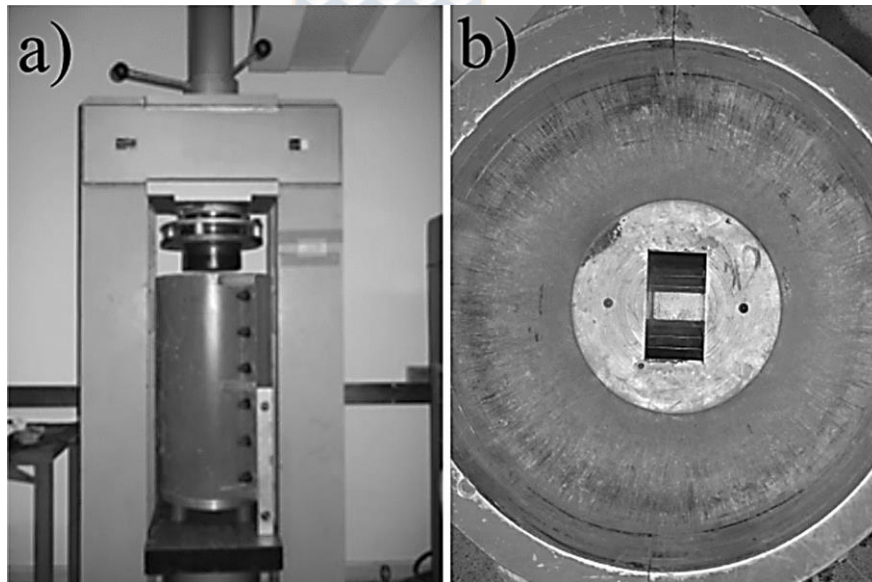


Figura 21. a) Modelo cilíndrico en una prensa para aplicar diferentes cargas verticales. b) Punto de extracción dentro del modelo físico [6].

Posteriormente, debido a la necesidad de recrear estas características fuera del laboratorio, se desarrolló un modelo numérico por Cid [35], el cual recrea la geometría y granulometría de entrada del modelo físico para el estudio de colgaduras.

3.1.1 Modelo físico

El modelo físico expuesto Gómez *et al.* [6], se basa en un cilindro de acero contenedor del material con un diámetro interno de 34 [cm] y una altura de 70 [cm], el punto de extracción en su extremo inferior consistió en una batea con una entrada de 53 [mm] x 96 [mm] con los paredes verticales en los lados de mayor tamaño y con paredes inclinadas a 72° con respecto a la horizontal en los lados de menos tamaño, como se muestra en la Figura 21. La batea de extracción estaba ubicada en el centro del cilindro de acero y descarga en una galería de sección transversal cuadrada de 6 [cm] de ancho.

3.1.2 Representación numérica del modelo físico

Este modelo se desarrolló en el software ESyS-Particle [35], recreando la misma geometría de la batea de laboratorio y la granulometría de entrada, pero sin el 5% de las partículas correspondientes al material bajo la malla 4#+6# (por temas de capacidad de cómputo), como se muestra en la Figura 20. Las granulometrías de cada modelo se muestran en la Tabla 10 y la Tabla 11, en Anexo A.1 y Anexo A.2 respectivamente. En este modelo, las partículas estaban representadas por esferas indivisibles usadas para estudiar las colgaduras. Pero en la presente investigación, como se busca estudiar la fragmentación, se requiere que estas partículas se puedan dividir, es por ello que se requiere del uso de conglomerados (o ensamblados; varias partículas unidas para conformar una sola unidad) para representar la curva granulométrica deseada.

3.2 Calibración de los parámetros de roca para la creación de ensamblados en ESyS-Particle.

La calibración de los parámetros para modelar ensamblados de partículas que modelen el comportamiento de rocas en el software ESyS-Particle es necesario debido a que las propiedades macroscópicas de los ensamblados dependen de estos, como también de la relación R_{min}/R_{max} , por lo que, si esta relación es cambiada, es necesario volver a hacer la calibración en el software. Para la presente calibración, a modo general, se realizaron cuatro etapas. Primero se realizaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS, por sus siglas en inglés) en laboratorio, en segundo lugar, ensayos en software ESyS-Particle, en tercer lugar, estudio de la influencia de los parámetros en el UCS y deformación unitaria y, finalmente, ensayos en ESyS para lograr un UCS y deformación unitaria específica.

3.2.1 Ensayos UCS en laboratorio

Se realizaron siete ensayos de compresión uniaxial en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad de Concepción mostrado en la Figura 22, con dos tipos de material, tres muestras del material denominado *R* mostrado en la Figura 23 a), y cuatro muestras del material denominado *CC* mostrado en la Figura 23 b).

Los materiales *R* y *CC*, son dos tipos de roca diferente que se utilizaron para poder calcular un módulo de Young coherente físicamente, ya que no se contó con este dato desde el modelo físico, y también para tener datos con los que comparar los obtenidos del software en ensayos UCS.

A estos materiales no se le realizaron estudios de su composición mineralógica, debido a que solo interesaba el comportamiento mecánico de la muestra.



Figura 22. Equipos para medición de UCS y deformación de la Universidad de Concepción.

En cada ensayo se midió la resistencia y la deformación vertical, los datos de resistencia fueron proporcionados por la máquina de compresión uniaxial, presente en Anexo C.1 a Anexo C.7 y la deformación se midió mediante un reloj comparador analógico, ambos datos se muestran en Anexo C.8.

Tabla 2. Dimensiones de las muestras ensayadas

Ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Área [mm ²]
1R	49.900	93.800	1955.649
2R	49.900	66.300	1955.649
3R	49.550	80.000	1928.311
1CC	26.800	51.450	564.104
2CC	26.800	52.500	564.104
3CC	26.800	51.050	564.104
4CC	26.800	51.550	564.104

Obtenidos los datos de la resistencia y la deformación vertical se procedió a obtener el UCS mediante la Ec.(23), con los datos de área de la Tabla 2 y los datos de carga máxima de la Tabla 24, mostrada en Anexo C.8.

$$\sigma_{UCS} = \frac{\text{Carga maxima [N]}}{\text{Área muestra [m}^2\text{]}} \quad (23)$$

Posteriormente se realizó el cálculo de la deformación unitaria de cada muestra ensayada, para esto se utilizó la Ec.(24), con los datos de la deformación vertical de la Tabla 24, presente en Anexo C.8, y los datos de la altura de cada muestra presentes en la Tabla 2.

$$\varepsilon = \frac{\text{Deformacion vertical [mm]}}{\text{Altura muestra [mm]}} \quad (24)$$

Finalmente se calculó el módulo de Young, para esto se asumió una pendiente constante entre cero y la deformación máxima, (debido a que no se contó con la deformación en cada lectura de fuerza), por lo cual, se introdujo los datos de σ_{UCS} y deformación unitaria, presentes en la Tabla 24, en la Ec.(25).

$$E = \frac{\sigma_{UCS}}{\varepsilon} \quad (25)$$

Con esto se caracterizó cada muestra con sus parámetros mecánicos de elasticidad y resistencia a la compresión, con los datos de la Tabla 24 mostrada en Anexo C.8, se procedió a calcular el promedio para los parámetros de módulo de Young, resistencia a la compresión uniaxial y la deformación unitaria, mostrados en la Tabla 6, con el fin de modelar un ensayo UCS en el software ESyS-Particle que replicara los mismos resultados de los ensayos realizados en el laboratorio.

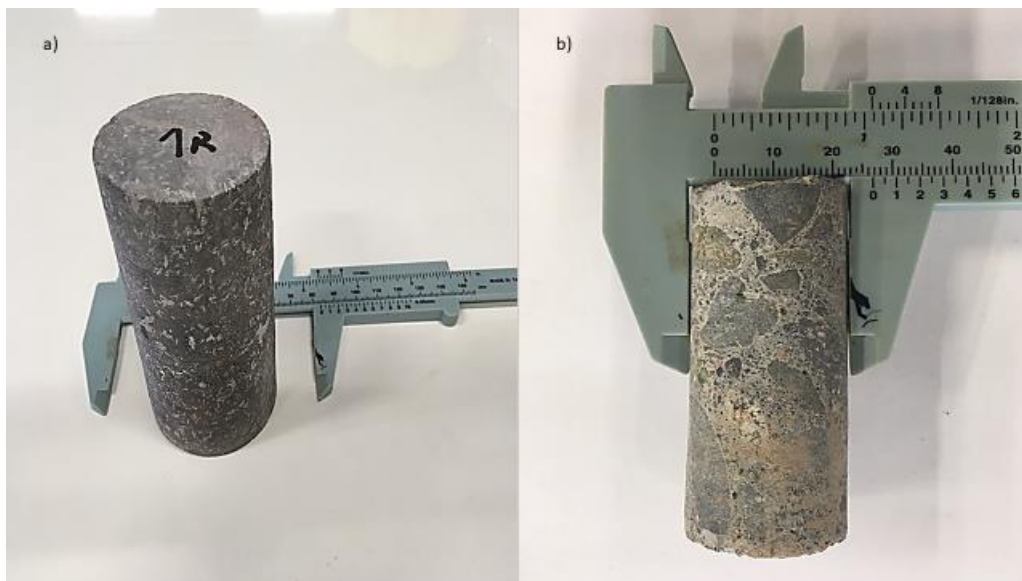


Figura 23. a) Testigo para ensayo UCS "R". b) Testigo para ensayo UCS "CC".

3.2.2 Ensayos UCS en ESyS-Particle

Como se discutió en la sección 2.4.1.4, para simular un ensamblado en ESyS-Particle se necesita calibrar los parámetros que se deben introducir en *BrittleBeamPrms* y *FrictionPrm*, estos son E , C , ν y ϕ para el primero, mientras que para el segundo son E , ν , μ_e , μ_d .

Cabe destacar, que en el trabajo realizado por Cid [35], se eliminaron el 5% de las partículas bajo tamaño por temas de capacidad de cómputo, por lo que la distribución de tamaño de las partículas que forman un ensamblado se determinó que sea entre el menor y mayor tamaño eliminado, es decir entre 2.17 y 4.75 [mm] para poder integrar tamaños más pequeños de partícula. Debido a que la relación R_{min}/R_{max} es un poco mayor a la óptima (por temas de capacidad de cómputo) y los radios esta cercanos a la unidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a modelar los dos tipos de ensayo, R y CC , en ESyS-Particle para estudiar los efectos de los parámetros en el UCS, E y ϵ macroscópicos.

Para modelar los dos ensayos se utilizó el promedio de las dimensiones de los ensayos de laboratorio, mostrados en la Tabla 3

Tabla 3. Dimensiones de las muestras ensayadas en el software ESyS-Particle

Tipo de ensayo	Distribución de tamaño [mm]	Altura \bar{X} [mm]	Diámetro \bar{X} [mm]
R	1.018-2.375	80.033	49.783
CC	1.018-2.375	51.637	26.8

Los *scripts* necesarios para modelar los ensayos en el software se presentan en Anexo E.1 - Anexo E.5. Cabe destacar que para el estudio del cambio de los parámetros y para simular los ensayos de laboratorio se modificaron los datos del script de Anexo E.2 y Anexo E.3 para cada simulación de UCS, según los datos de la Tabla 25, Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28 mostradas en Anexos D.

Una vez obtenidos los resultados, se analizaron las curvas, presentadas en la Figura 31 a la Figura 34 y la Figura 51 a la Figura 54, luego con ayuda de las ecuaciones de cada una de las curvas se buscaron los parámetros que se ajustaban para lograr los parámetros macroscópicos requeridos.

Se realizaron 9 ensayos por cada tipo, obteniendo un total de 18 ensayos mostrados en la Tabla 25 a la Tabla 28 en Anexo D.1 a Anexo D.4.

Los tipos de roca utilizada en el modelo físico se muestran en la Tabla 4, como el ensayo CC presento valores de UCS cercanos a los del tipo de roca B y C , se optó por modelar con la geometría

de *CC* para calibrar los parámetros necesarios para obtener valores cercanos al tipo de roca *B* y *C* en ESyS-Particle.

3.2.3 Ensayos de calibración en ESyS-Particle

Para la calibración se procedió a realizar una serie de ensayos en el software ESyS-Particle para encontrar los valores adecuados que modelaran un UCS de 30 [MPa] para roca *B* y 39.36 [MPa] para roca *C*.

Teniendo los datos mostrados en la Tabla 6, se procedió a determinar qué tipo de roca se modelaría en el modelo de fragmentación.

Los tipos de roca disponibles se muestran en la Tabla 4, como la resistencia de los tipos de roca estaba en I_{s50} , se procedió a convertir a resistencia UCS según la Ec.(26)

$$\sigma_{UCS} = 24 I_{s50} \tag{26}$$

Tabla 4. Tipos de roca usados en [6].

Tipo de Roca	Densidad [t/m3]	Densidad [kg/m3]	Is50 [Mpa]	Esfericidad	Redondez	Ángulo fricción [°]	UCS [MPa]
A	2.62	2620	5.93	0.58	0.25	39	142.32
B	2.60	2600	1.25	0.68	0.22	40	30
C	2.71	2710	1.64	0.68	0.20	37	39.36
D	2.69	2690	6.93	0.65	0.51	48	166.32

Con esto se notó que los tipos de roca *B* y *C*, tenían valores de UCS cercanos a los ensayos *CC*, por lo cual se procedió a calibrar según las dimensiones del ensayo *CC*, Figura 23 b).

En la Figura 24, se muestra una breve síntesis del trabajo realizado.

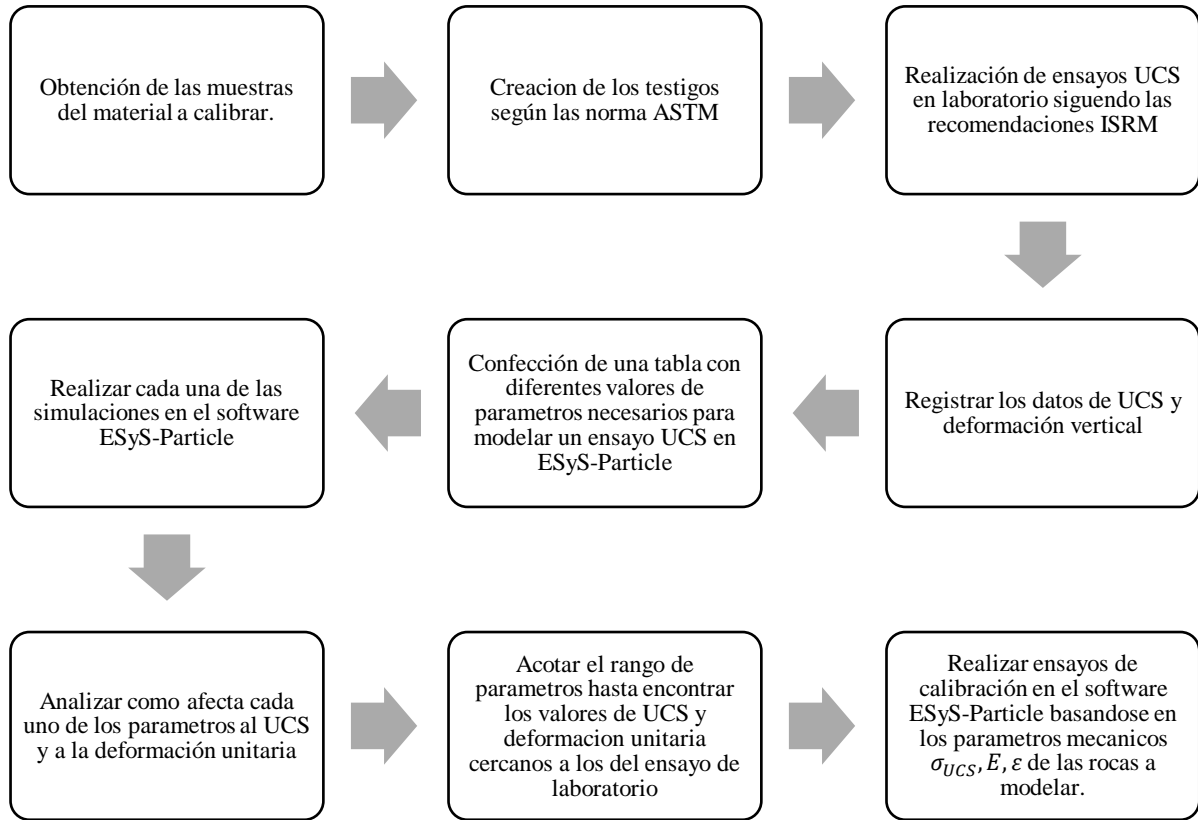


Figura 24. Diagrama de realización de la calibración de los parámetros

3.3 Modelo de fragmentación secundaria

Para desarrollar un modelo de fragmentación secundaria y poder comparar sus resultados, se utilizó el modelo realizado por Gómez et al. [6], de donde se tomaron diferentes datos, como los valores de los UCS de las rocas utilizadas en [6], las dimensiones del modelo físico y las curvas granulométricas de las rocas. Con esto en consideración se siguieron los siguientes pasos para lograr un modelo basado en DEM:

1. Cambio de las unidades del modelo realizado por Cid [35], como se mencionó anteriormente fue necesario cambiar las unidades en las cuales se realizaría la simulación, mostradas en la Tabla 5.
2. Creación de ensamblados de partículas que emularan una roca con probabilidad de rotura.
3. Inserción de los ensamblados en el modelo realizado por Cid [35], como se mencionó anteriormente, se utilizó la geometría de la batea de este modelo y la granulometría inicial, por lo cual, los ensamblados se crean desde esa granulometría e insertan en esa geometría.
4. Creación del modelo de fragmentación secundaria.
5. Calibración de los parámetros gobiernan los ensamblados
6. Simulaciones para determinar un *damping* adecuado a utilizar
7. Obtención de datos, comparación de los datos y conclusiones.

3.3.1 Cambio de unidades

La simulación de [35], se realizó con unidades de modelo que representaban las unidades físicas del SI, pero como el empaquetamiento de Gen-Geo funciona mejor con radios cercanos a 1, según [32], se debió cambiar las unidades de modelo, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Relaciones entre unidades modelo/real y consideraciones.

Relación modelo/real	Magnitud física	Unidad según SI	Factor de conversión	Unidad usada en el modelo
Lm/Lr	Longitud	m	10e-3	mm
Fm/Fr	Fuerza	N	1	N
vm/vr	Velocidad	m/s	1	m/s
Tm/Tr	Tiempo	s	10e-3	ms
Mm/Mr	Masa	kg	10e-3	g
Dm/Dr	Densidad	Kg/m ³	10e6	g/mm ³
σm/σr	Esfuerzo	Pa	10e6	MPa
am/ar	Aceleración	m/s ²	10e3	mm/ms ²
Vm/Vr	Volumen	mm ³	10e-9	mm ³

En primer lugar, se obtuvo el archivo gran+exterior.geo, que representa la granulometría del modelo físico sin el 5% de las partículas de menor tamaño y tiene las partículas que representan las paredes del modelo físico, ya que no se puede hacer fricción entre *mesh* y partículas, por lo cual se colocan partículas no dinámicas con las cuales se puede generar un roce para simular las paredes del modelo físico, esto se obtuvo del trabajo realizado en [35], se visualiza el archivo gran+exterior.geo en la Figura 25. Luego, mediante el script mostrado en Anexo F.2 se cambió la escala de las partículas, obteniendo el archivo granulometría.geo.

Posteriormente se cambió la escala del archivo cilybat.msh, que contenía la *mesh* que representaba la geometría del modelo físico, según el script mostrado en Anexo F.1, obteniendo el archivo cilybat_mm.msh.

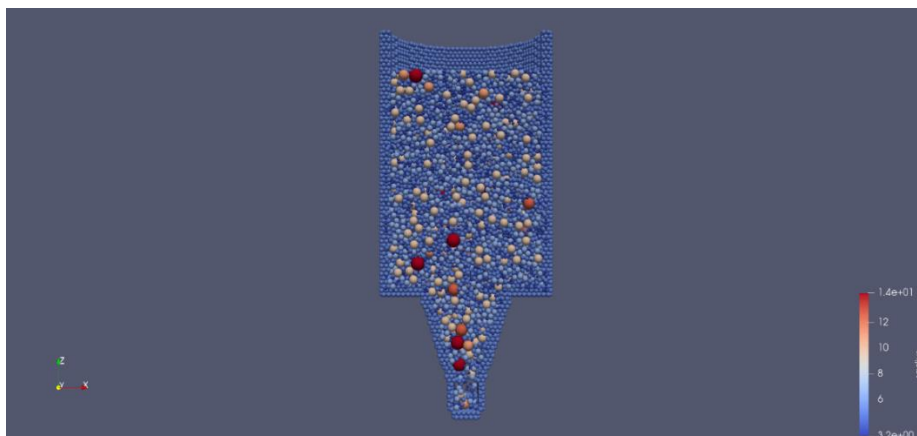


Figura 25. Visualización de gran+exterior.geo

Se crearon ensamblados a partir de los volúmenes de las partículas, presentes en el modelo de Cid [35], las cuales se muestran en la Figura 25. Los ensamblados son conjuntos de partículas que están unidas, mediante enlaces frágiles, simulando una roca. Esto entrega la posibilidad de calcular la fragmentación, ya que, estos enlaces frágiles se pueden romper, logrando así tener una granulometría diferente en un tiempo determinado y con ensamblados que lograban tener formas diferentes a una esfera.

Al crear ensamblados, estos deben tener la misma densidad que las partículas sólidas, por lo cual se procedió a calcular densidades diferentes para las partículas formadoras de ensamblados, según la Ec.(28).

3.3.2 Creación de ensamblados de partículas

En el software ESyS-Particle, los ensamblados de partículas pueden ser creados de varias formas, ya sea directamente en el script de simulación de ESyS-Particle o en un script llamando a la librería Gen-Geo, como se ve en la línea 1 de Anexo E.1, para después llamar al archivo creado en el *script* de simulación de ESyS-Particle.

Estos ensamblados son creados relleno un volumen, creado en el *script* mediante comandos pre-establecidos o mediante *meshs*, con partículas de diferente tamaño que siguen una distribución de tamaño de radio que es una ley de potencia [32], dando un radio mínimo y un radio máximo, como se ve en las líneas 7 y 8 de Anexo F.3.

Usando la librería Gen-Geo de ESyS-Particle, se creó el archivo Ensamblados.py que recorre el archivo granulometria.geo leyendo cada una de las partículas presente, esto se hace con las líneas 30 a 32 de Anexo F.3, para posteriormente crear los ensamblados con las líneas 34 a la 126.

Para asegurar una elección aleatoria de la posición de las partículas a rellenar, se decidió que las partículas con ID divisible por 6 fueran las rellenas, con esto se logró crear un número de ensamblados que representan cerca del 10 % del total de las partículas en la simulación. Usando los radios de las partículas de sobre tamaño se construyó un volumen para el llenado con partículas de radio menor.

Posteriormente se crearon enlaces entre las partículas que estaban contenidas en un volumen, mediante *BrittleBrmsPrims* logrando así los ensamblados, con tolerancia del orden de $10e-5$ para que solamente se conecten las partículas más cercanas, como se puede ver en la Figura 26 b). Esto se logra con las líneas 128 a 136 presentes en Anexo F.3. Con esto se lograron 6 tipos de ensamblados los cuales se muestran en la Figura 27.

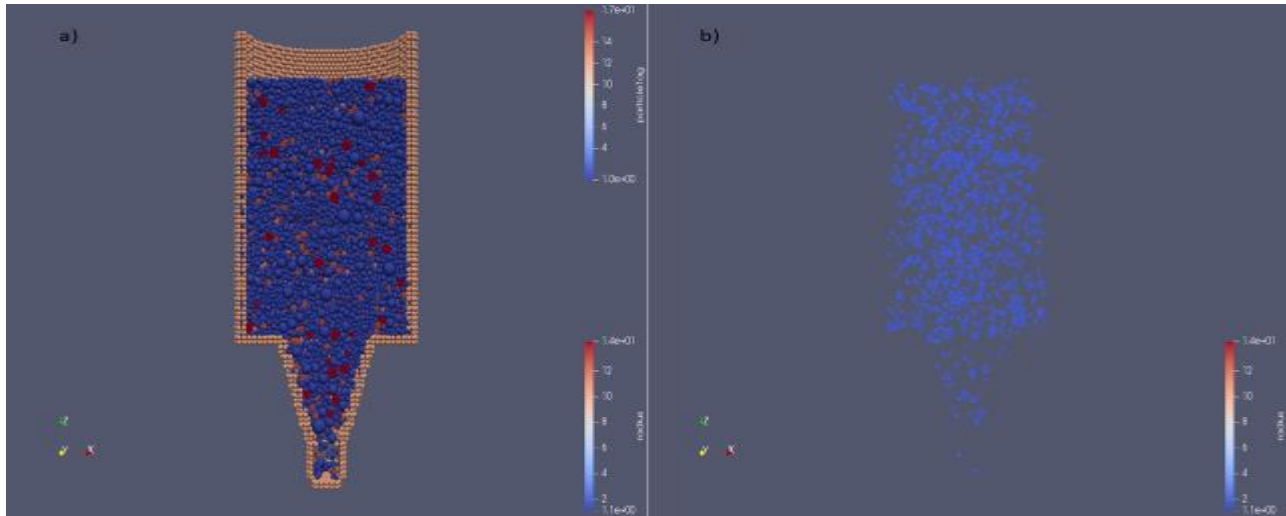


Figura 26. Visualización de la geometría del modelo de fragmentación secundaria a los 0 [ms]. a) visualización según los tag de partícula. b) visualización de las conexiones entre partículas al interior de cada ensamblado a los 0 [ms].

Para la creación de un ensamblado que sea una buena representación de la realidad se requieren de algunas consideraciones. En primer lugar una relación entre $Rmin/Rmax = 1/10$ es la más óptima debido a que se logran insertar partículas en espacios pequeños, sin embargo, esto conlleva a la creación de un gran número de partículas para grandes volúmenes, por lo que la simulación requeriría de mayor capacidad de cómputo, por lo que si la relación $Rmin/Rmax$ es muy menor, el aumento del número de partículas crece considerablemente, mientras que si es muy mayor los enlaces no logran ser creados por el algoritmo de Gen-Geo. El empaquetamiento y creación de contactos funciona mejor en escalas cercanas a 1.

Al momento de definir la densidad para las partículas que forman el ensamblado, es preciso definir una densidad de ensamblado y a través de la porosidad Ec.(27), designar la densidad de las partículas según la Ec.(28).

$$Porosidad = \frac{Volumen\ de\ ensamblado - mntable.getSumVolume}{Volumen\ de\ ensamblado} \quad (27)$$

Donde $mntable.getSumVolume$ es la suma de los volúmenes de cada partícula en un grupo específico.

$$Densidad\ de\ Particulas = \frac{Densidad\ aparente}{1 - Porosidad} \quad (28)$$

Es recomendable llegar a una porosidad de ensamblado de 0.33, el cual representa una buena inserción de partículas [32].

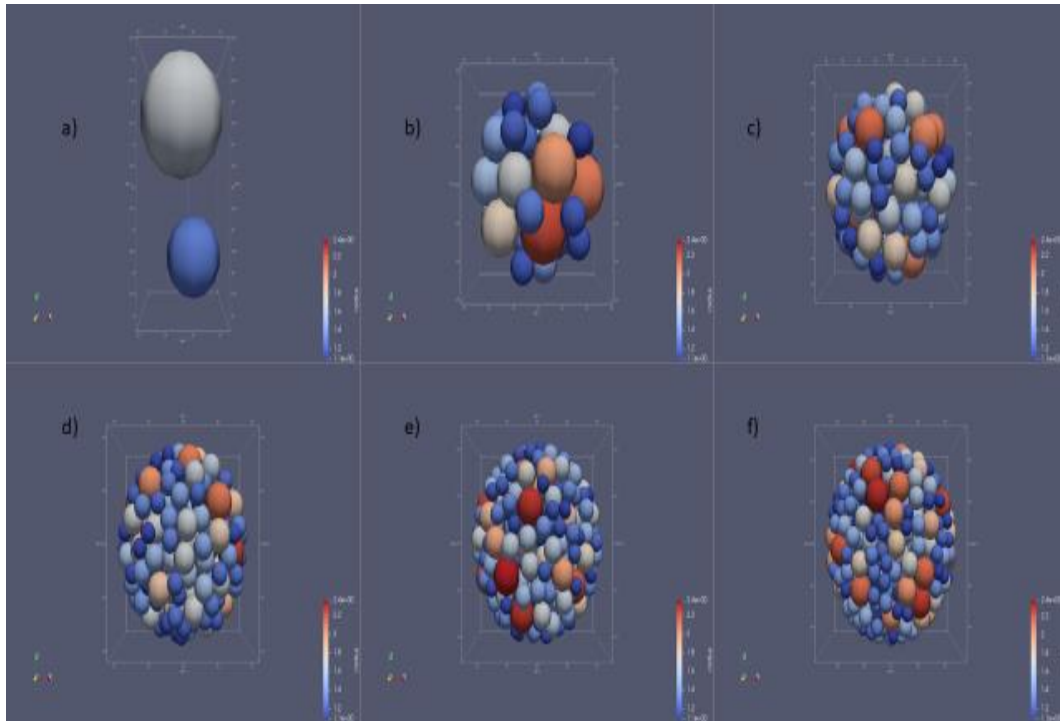


Figura 27. Visualización de los ensamblados según radio de volumen relleno. a) ensamblado de radio 4.763. b) ensamblado de radio 6.350. c) ensamblado de radio 9.525 d) ensamblado de radio 11.113. e) ensamblado de radio 12.700. f) ensamblado de radio 14.287

3.3.3 Inserción de los ensamblados

Una vez creados los ensamblados en el archivo `Ensamblados.py`, presente en Anexo F.3, en el mismo código se creó un archivo para que contuviera los ensamblados junto con las demás partículas llamado `batea.geo`, esto se hizo con las líneas 229 a 242 del archivo `Ensamblados.py` en Anexo F.3, el resultado es el presente en la Figura 26.

3.3.4 Estudio del *damping* adecuado para simular

Una vez terminado el modelo, se procedió a realizar una serie de simulaciones para estudiar qué tipo de *damping* y valor de coeficiente de *damping* eran los más adecuados para realizar las simulaciones. El *damping* es un amortiguamiento artificial que se utiliza para representar por ejemplo el roce con el aire o para disminuir las velocidades de las partículas para realizar simulaciones cuasi-estáticas.

En primer lugar se modificó el tipo de *damping* utilizado en [35], debido a que cuando está presente la gravedad en las simulaciones el *LocalDamping* actúa distinto si la partícula sube o baja [32], es por esto que se decidió usar *LinDamping*.

Posteriormente se realizaron las simulaciones para lograr un coeficiente de *damping* que mantuviera una simulación dinámica pero que fuera capaz de disminuir la alta energía cinética

generada en los primeros pasos de tiempo de la simulación, para que una cantidad considerable de enlaces sobreviviera.

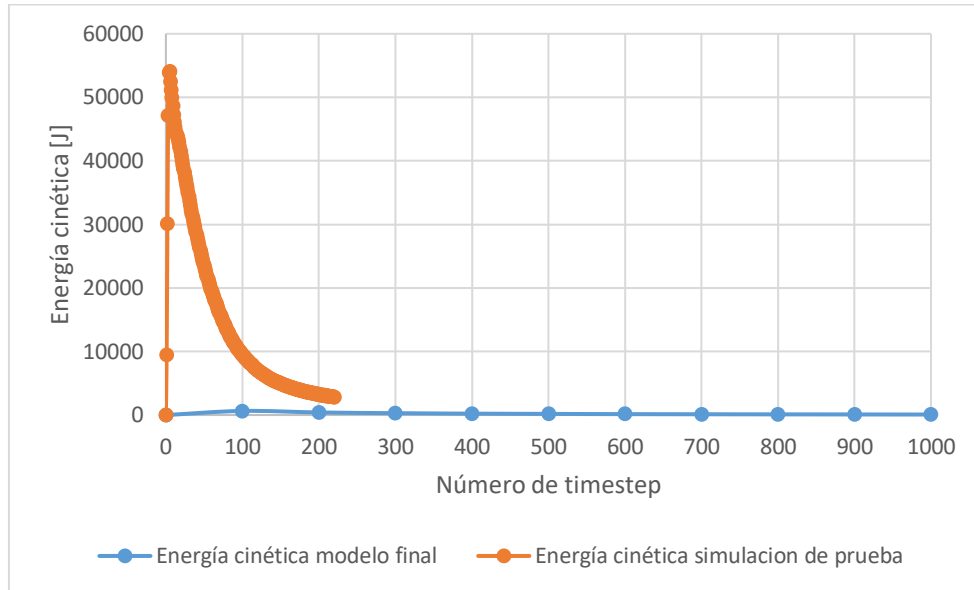


Figura 28. Energía cinética en simulación.

Como se aprecia en la Figura 28, la energía cinética en los primeros ensayos era demasiado alta, por lo cual el coeficiente de *damping* se aumentó hasta que la energía cinética logro valores cercanos a la curva azul, esto logro aumentar la supervivencia de los enlaces, pero aún se presentó un alto porcentaje de quiebre, por lo cual, se procedió a hacer un breve análisis de que pudo afectar este comportamiento, el cual está en la sección 4.3.

3.3.5 Obtención de las masas de ensamblados en un paso de tiempo determinado

Para poder estudiar la fragmentación generada en la simulación, se utilizó el comando `grainextract`, llamado en la terminal del sistema operativo, los cuales son:

- `grainextract -i nombre_del_checkpoint_t=numero_del_checkpoint_0.txt -list nombre_archivo.txt`
- `grainextract -i nombre_del_checkpoint_t=numero_del_checkpoint_0.txt -om nombre_archivo_t=numero_checkpoint.txt`

El primer comando entrega una lista con 3 columnas, la primera son los ID de las partículas presentes en los ensamblados, la segunda columna el ID de cada ensamblado y la tercera columna la masa del ensamblado.

El segundo comando entrega una lista con 2 columnas, la primera el ID del ensamblado, la segunda la masa del ensamblado.

Cabe destacar que este comando (`grainextract`) considera cada partícula (unida o no) como componente de un grano (o ensamblado), por lo que para su uso se deben identificar las partículas que no representan ensamblados.

El otro comando útil para el estudio de fragmentación es el `fracextract`, este comando entrega una lista con el punto medio del enlace roto, el radio del enlace roto, el checkpoint en el que se registra la rotura, la orientación de la rotura del enlace para cada coordenada y los Id de las partículas enlazadas

- `fracextract -i nombre_checkpoint -o nombre_archivo.txt -rot -t`
`numero_checkpoint_inicial numero_cantidad_checkpoint`
`numero_variacion_entre_checkpoint`

En la Figura 29 y la Figura 30 se muestra un breve resumen de cómo se obtuvo la simulación del ensayo UCS y las curvas granulométricas el modelo de fragmentación secundaria.



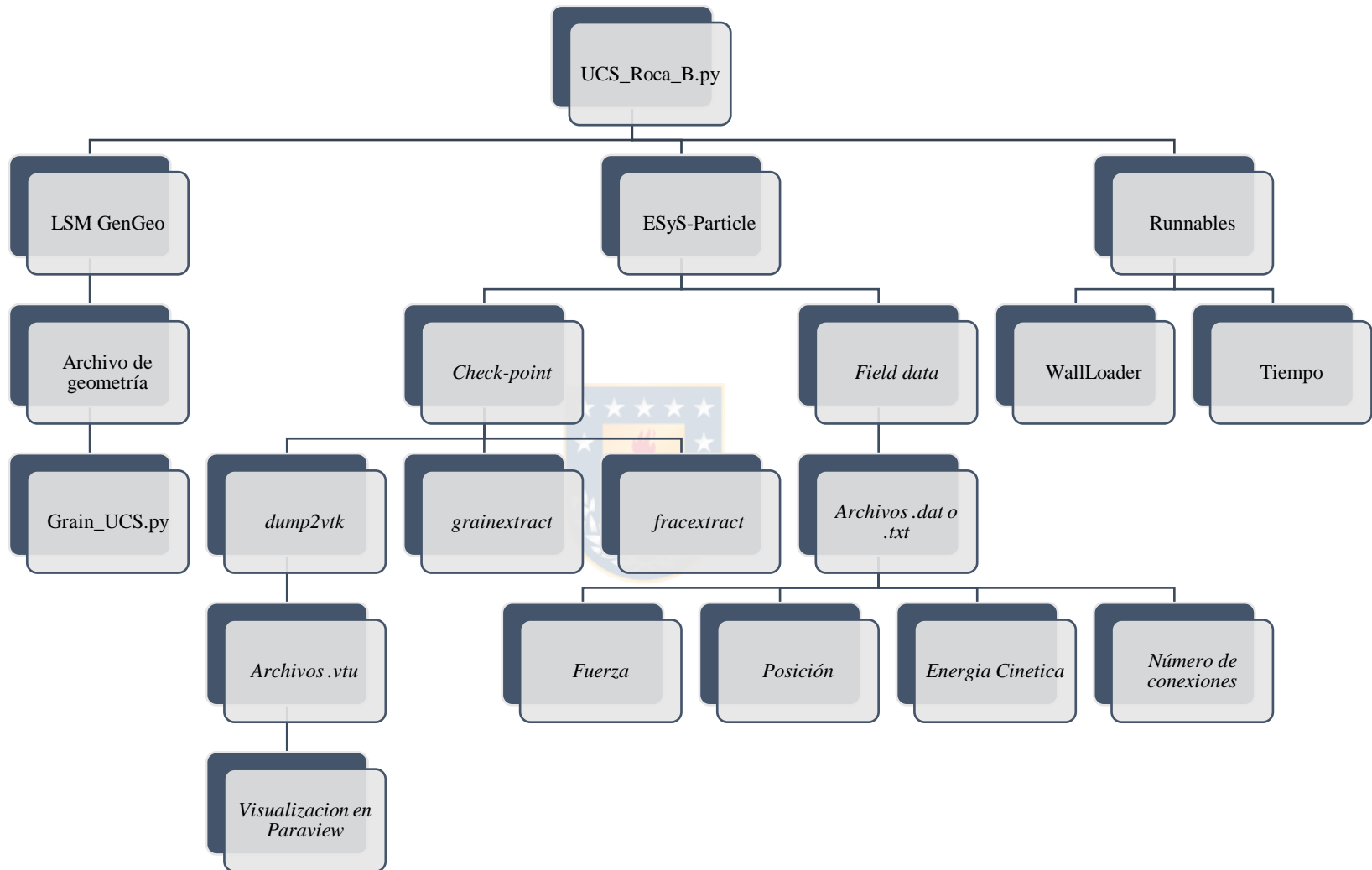


Figura 29. Cuadro resumen para la creación del ensayo UCS

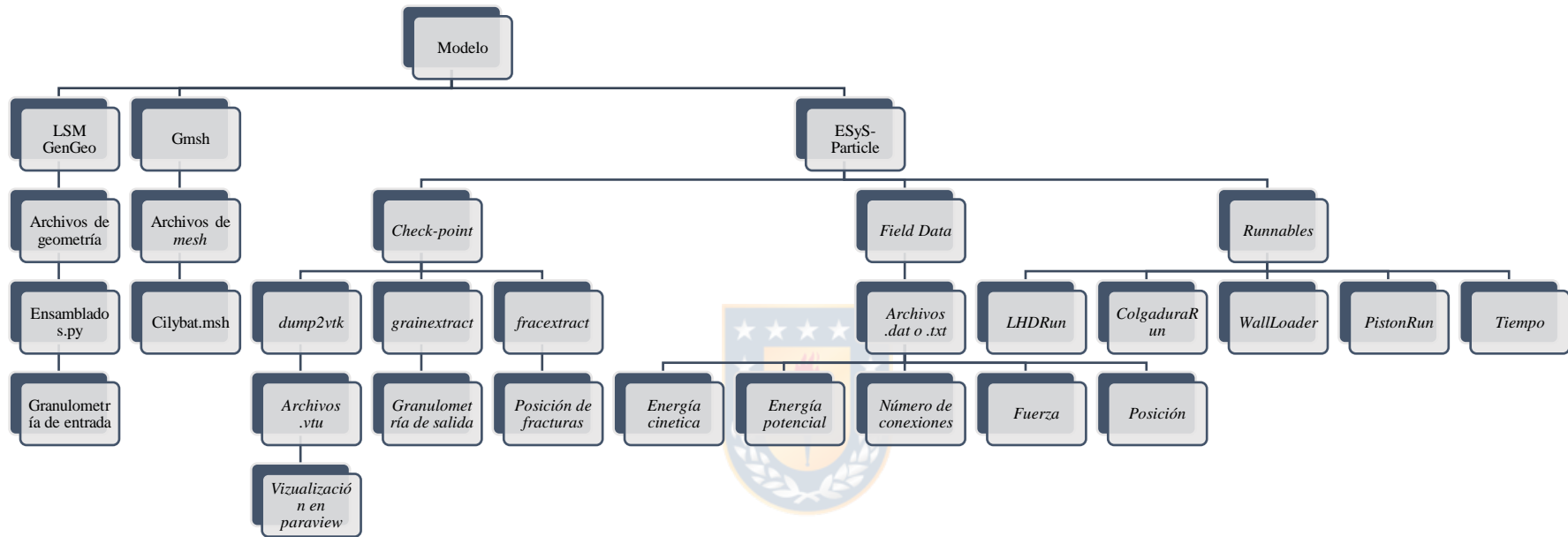


Figura 30. Diagrama de creación del modelo de fragmentación secundaria y obtención de la curva granulométrica

4 RESULTADOS Y DISCUCIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, calibración de los parámetros y en el modelo de fragmentación secundaria.

4.1 Ensayos UCS en laboratorio

Los resultados de los ensayos UCS para cada ensayo se muestran en la Tabla 17 a la Tabla 24 de Anexo C.

En la Tabla 6 se indican los valores promedio de las propiedades mecánicas σ_{UCS} , E y ε que fueron utilizadas para estudiar la influencia del cambio de parámetros en las propiedades mecánicas macroscópicas, estas fueron calculadas con la media aritmética \bar{X} para cada parámetro.

Tabla 6. Valores promedio de los ensayos de laboratorio utilizado

Ensayos	UCS \bar{X} laboratorio [MPa]	Desviación estándar UCS \bar{X} laboratorio [MPa]	E \bar{X} laboratorio [GPa]	Desviación estándar E \bar{X} laboratorio [GPa]	ε \bar{X} en laboratorio	Desviación estándar \bar{X} ε laboratorio
R	77.399	7.646	6.590	1.936	0.0125	0.0042
CC	37.576	7.883	3.775	1.912	0.0115	1.9124

4.2 Ensayos UCS en ESyS-Particle

Como se mencionó en la sección 3.2, antes de la calibración se realizaron una serie de ensayos para estudiar la influencia de parámetros como la cohesión y el módulo de Young sobre la resistencia a la compresión uniaxial, posterior a estos ensayos se replicaron los ensayos de laboratorio. Una vez realizado lo anterior se procedió a calibrar los valores de E y C ingresados en *Brittlebrimprms* que dieran como resultado un UCS de 30 [MPa] para roca B y 39,7 [MPa] para roca C, junto con una deformación unitaria cercana a 0,0115.

A continuación, se muestran los resultados para los ensayos *CC*, ya que la geometría de estos fue elegida para calibrar los parámetros que modelarían los ensamblados en el modelo de fragmentación secundaria

En primer lugar, se realizaron 9 ensayos por cada tipo (*R* y *CC*) para analizar la influencia de cada parámetro en el UCS y deformación unitaria, la Tabla 28 con los resultados se muestra en Anexo D.4.

4.2.1 Influencia del módulo de Young

En la Figura 31 se muestra que el módulo de Young no tiene una gran influencia en el UCS, para valores bajo los 100 MPa, para valores sobre esto, influye en el aumento de la resistencia para valores de módulo de Young bajo 1 GPa, esto se explica porque al modelar con cohesiones altas, el ensamblado resiste mayor deformación al tener módulo de Young pequeños, no así con cohesiones bajas, donde el ensamblado no resiste mucha deformación.

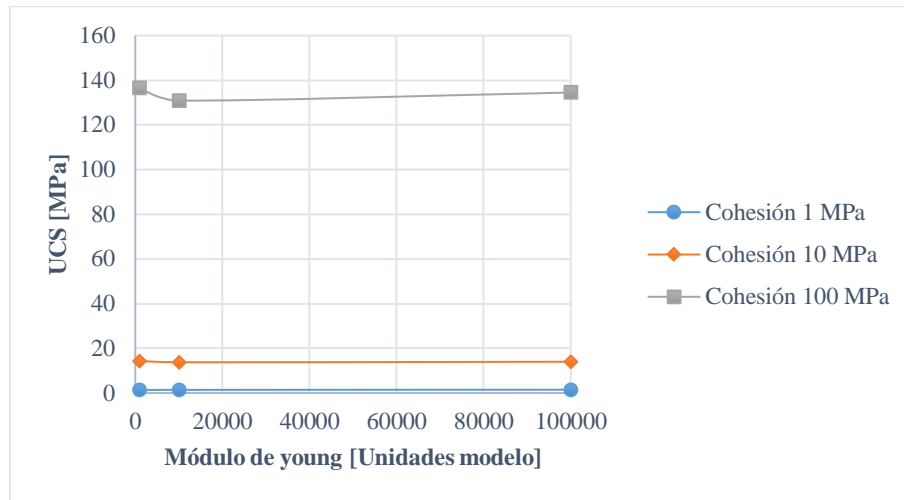


Figura 31. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS CC en ESyS-Particle.

En cuanto a la influencia en la deformación unitaria, en la Figura 32 se observa que a medida que se modela con módulo de Young menores el ensamblado tiene una mayor deformación, ligado a la cohesión correspondiente, ya que el aumento de cohesión hace que se desplace la curva, con lo cual modelando con el mismo módulo de Young pero una cohesión mayor el ensamblado resiste mayor deformación.

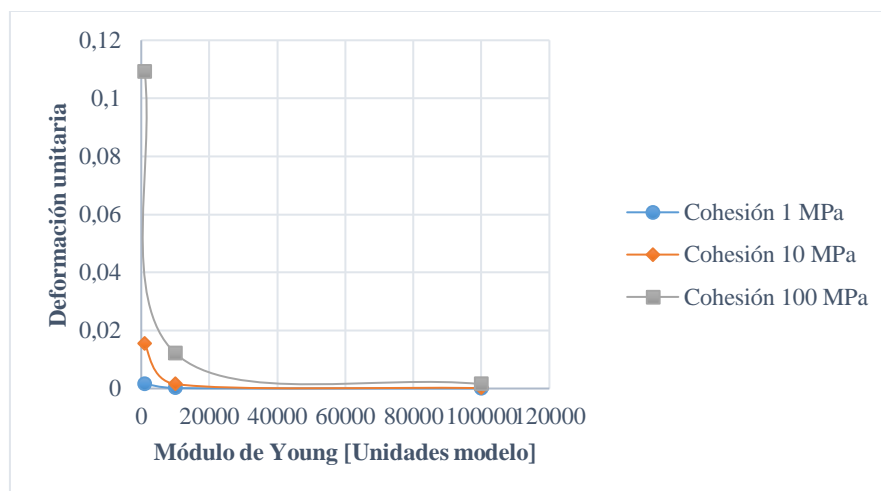


Figura 32. Gráfico de E v/s deformación unitaria con diferente cohesión para los ensayos UCS CC en ESyS-Particle.

4.2.2 Influencia de la cohesión

La cohesión tiene una gran influencia en el valor del UCS, teniendo un comportamiento lineal a medida que aumenta su valor como se aprecia en la Figura 33.

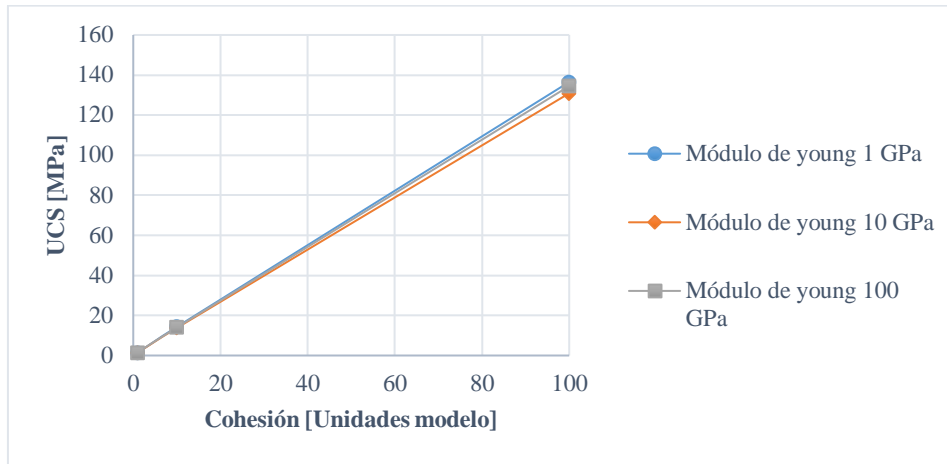


Figura 33. Gráfico cohesión v/s UCS con diferentes módulos de Young, para ver la influencia de la variación de cohesión en el UCS a E constante.

Para la deformación unitaria también tiene un comportamiento lineal, pero está estrechamente ligado al valor del módulo de Young, como se puede ver en la Figura 34.

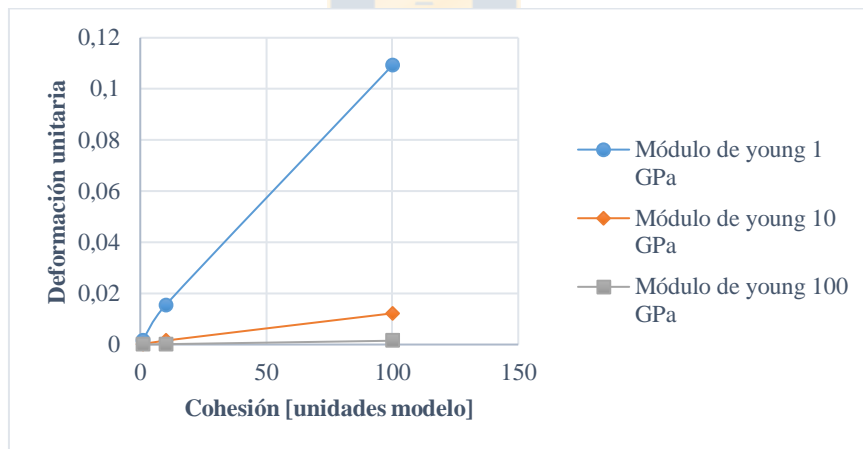


Figura 34. Gráfico cohesión v/s deformación unitaria con diferentes módulos de Young, para ver la influencia de la variación de cohesión en la deformación unitaria a E constante.

Una vez realizados los 18 ensayos se compararon los resultados entre ambos tipos de ensayos UCS en el software, mostrando que el comportamiento es el mismo frente a la variación de los parámetros. Con esta conclusión se procedió a realizar ensayos buscando los parámetros adecuados, finalmente después de una serie de ensayos se llegaron a los *inputs* mostrados en la Tabla 8.

4.2.3 Calibración de parámetros

Una vez estudiado los parámetros y recreando los ensayos de laboratorio en ESyS-Particle, se comprobó que era posible modelar un ensayo de compresión uniaxial en el software, con resultados cercanos a la realidad, por lo cual se procedió a realizar la calibración de los parámetros.

Para la realización de la calibración se utilizaron los *inputs* mostrados en la Tabla 7, en cuanto a la geometría de los ensayos, las propiedades de las esferas y el ensamblado. Como se mencionó anteriormente las dimensiones del ensayo *CC* fueron las elegidas para simular los ensayos UCS en software que buscaban replicar la resistencia a la compresión uniaxial de los tipos de roca *B* y *C* de la Tabla 4.

Tabla 7. Inputs para realizar ensayos UCS que representen a roca *B* y *C* de Tabla 4.

Ensayo	Diámetro ensayo [mm]	Altura ensayo [mm]	Radio mínimo [mm]	Radio máximo [mm]	Porosidad [adimensional]	Densidad aparente	Densidad de partícula
B	26.8	51.637	1.085	2.375	0.458	0.0026	0.004797
C	26.8	51.637	1.085	2.375	0.458	0.00271	0.005

Luego para cada simulación se variaban los parámetros presentes en la Tabla 8 en los comandos que formaban los enlaces y roce entre partículas, para cada simulación en ESyS-Particle, en las líneas 91-98 y 103-109 de Anexo E.2 y Anexo E.3.

Tabla 8. Inputs para conexiones de partículas en los ensayos UCS

Ensayo	E [MPa]	C [MPa]	ϕ [°]	ν [adimensional]	μ_d [adimensional]	μ_e [adimensional]
B	2200	18	40	0.2	0.4	0.5
C	3000	23	37	0.2	0.4	0.5

Con los valores de los parámetros de la Tabla 8 se corrió la simulación, la cual logra acercarse a los valores de las rocas del modelo físico, como se muestra en los resultados de los UCS en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de los ensayos para simular roca B y C de la Tabla 4

Ensayo	UCS	ϵ	E [Gpa]	Error relativo UCS	Error relativo Deformación	Error relativo UCS %	Error relativo Deformación %
B	29.777	0.0118	2.519	0.00741	0.0198	0.741	1.988
C	39.323	0.0116	3.362	0.000922	0.00893	0.0922	0.893

Una vez realizado los dos ensayos se procedió a obtener la curva esfuerzo deformación para cada muestra ensayada en el software, mediante el *script make_stress_strain.py* de Anexo E.6, los resultados se muestran en la Figura 35.

Finalmente se visualizaron los ensayos para poder corroborar la similitud con el comportamiento de un ensayo de laboratorio, esto se muestra en la Figura 36.

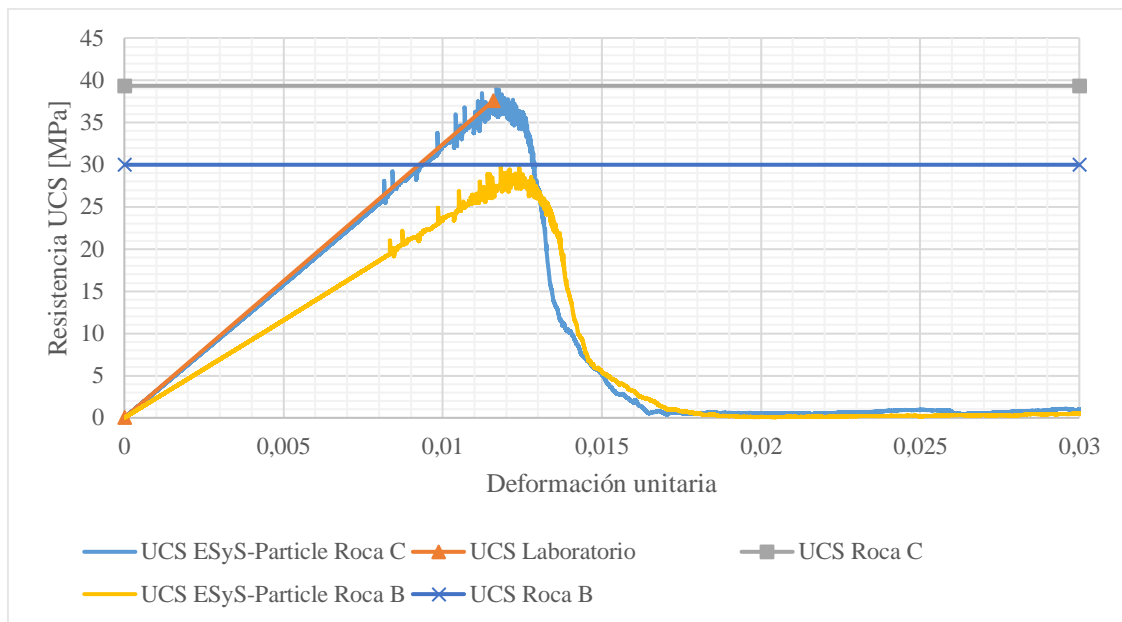


Figura 35. Gráfico esfuerzo deformación del ensayo para simular roca B

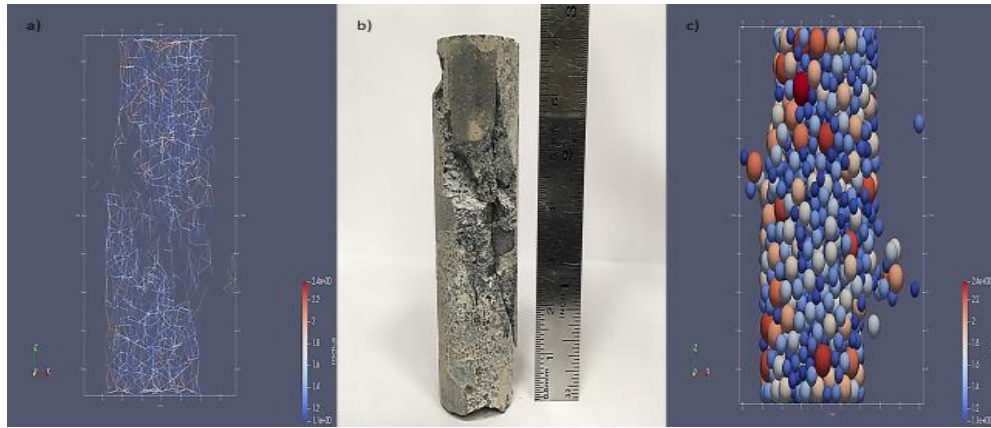


Figura 36. Comparación entre ensayo UCS en laboratorio y ensayo realizado en ESyS-Particle. a) visualización de la fractura en las conexiones. B) fractura generada en ensayo UCS de laboratorio c) visualización de la fractura del ensayo UCS en ESyS-particle con las partículas que forman el ensamblado.



4.3 Modelo de fragmentación secundaria

Luego de tener calibrado las propiedades del material en el modelo numérico, se realizaron las simulaciones que replicaban el modelo físico descrito en la sección 3.1.1.

Los resultados obtenidos para el modelo de fragmentación se tomaron a los 1000 [ms], bajo un confinamiento de 2 [MPa], los datos se muestran en la Tabla 14 y Tabla 16 de Anexo A.5 y Anexo A.7 respectivamente.

Debido a que la granulometría inicial no se encontraba ajustada para la presentada en el tipo de roca B, no es posible hacer una comparación entre ambas, pero si se observa cómo se desplaza la curva el primer segundo, es posible ver una mayor fragmentación en los ensamblados de tamaño medio, lo cual concuerda con la teoría y tiene un comportamiento similar al de la roca tipo B, debido a que se aprecia como los ensamblados de tamaño 9.526, 12.7 y 19.05[mm] tuvieron una mayor fragmentación frente a los ensamblados de mayor y menor tamaño, obteniendo mayor número de partículas con tamaños entre 3.35 y 6.35 como se aprecia en la Figura 38 y Figura 37, sin embargo hay que tener en cuenta que solamente cerca de un 10% de la simulación corresponden a ensamblados por lo cual la curva no cambia según la fragmentación del total sino sobre ese porcentaje.

Como se observa en la Figura 37 y Figura 38, no se formaron conglomerados de tamaño 1.2 [mm] o inferior, esto se debe a que el radio mínimo de partícula que conformaba un ensamblado es de 1.0875 [mm], por lo cual el menor tamaño posible es 2.175 [mm], es por esto que el estudio con partículas de menor tamaño tiene relevancia porque se podrían formar ensamblados más pequeños lo que cambiaría la distribución granulométrica e influir en la fragmentación de los ensamblados.

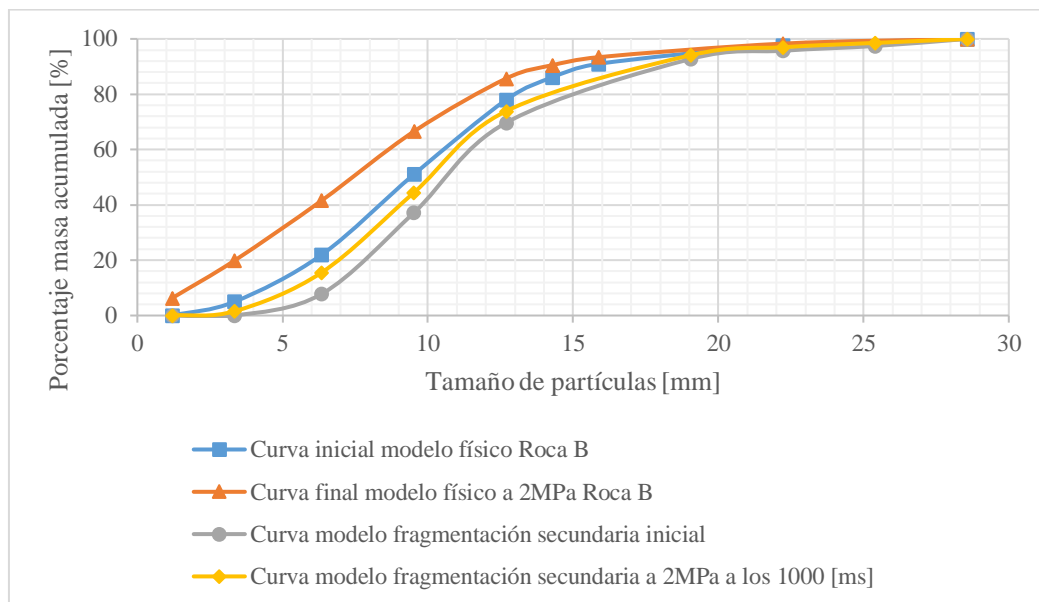


Figura 37. Curvas granulométricas

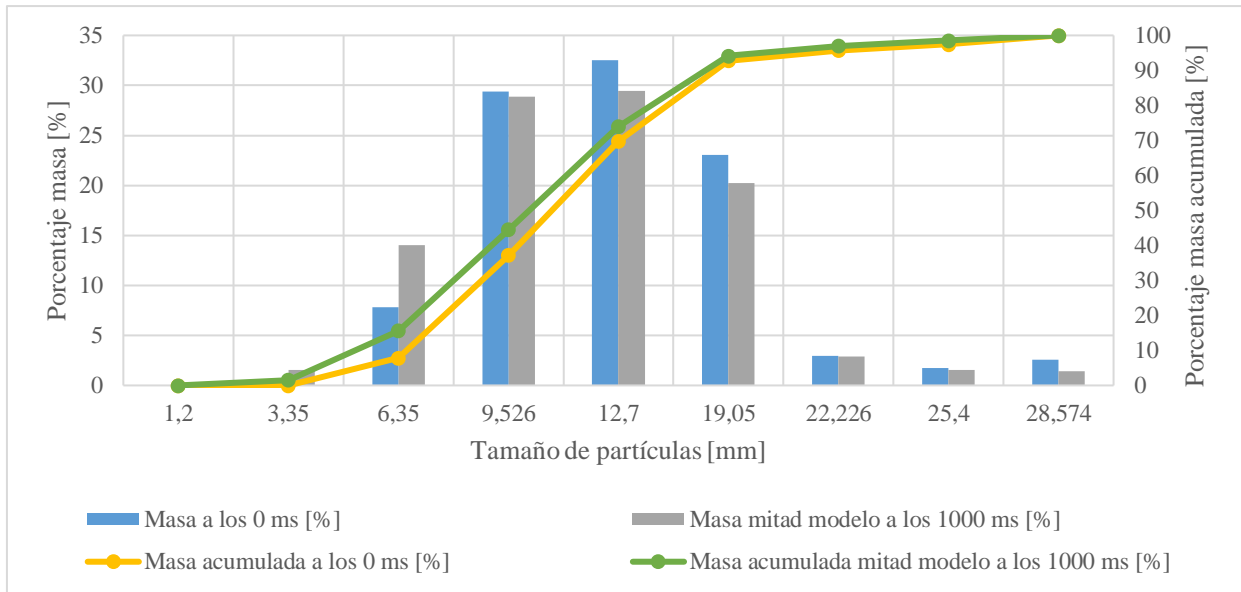


Figura 38 Curvas granulométricas del modelo de fragmentación secundaria

Para estudiar la verdadera fragmentación ocurrida en el modelo se procedió a realizar las curvas granulométricas a los 1000 [ms] pero solo para los conglomerados Figura 39, resultando en un cambio mucho más significativo que el mostrado anteriormente, debido a que las partículas sólidas que no sufren fragmentación desplazan la curva, mostrando un porcentaje menor de fragmentación del modelo.

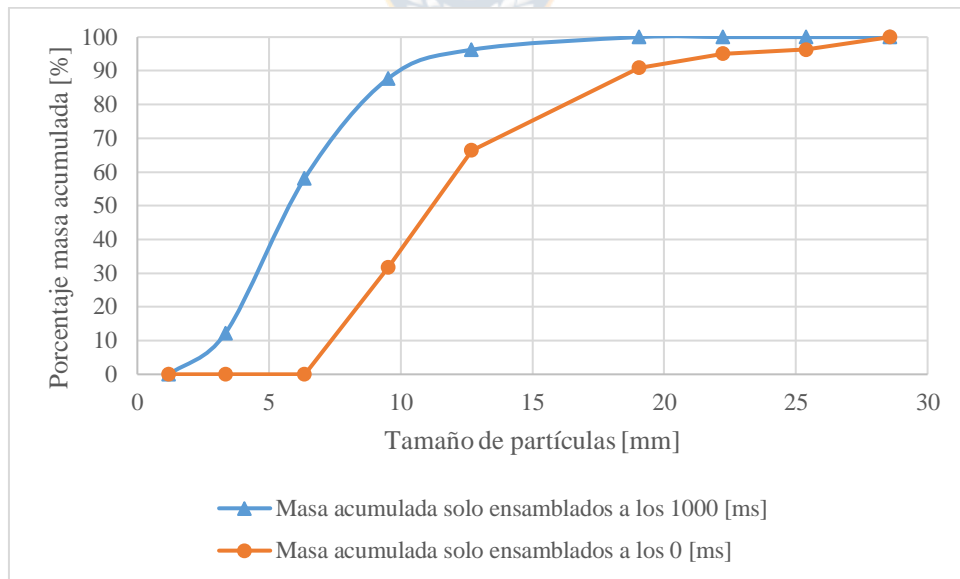


Figura 39. Curvas granulométricas acumuladas de ensamblados en modelo de fragmentación secundaria

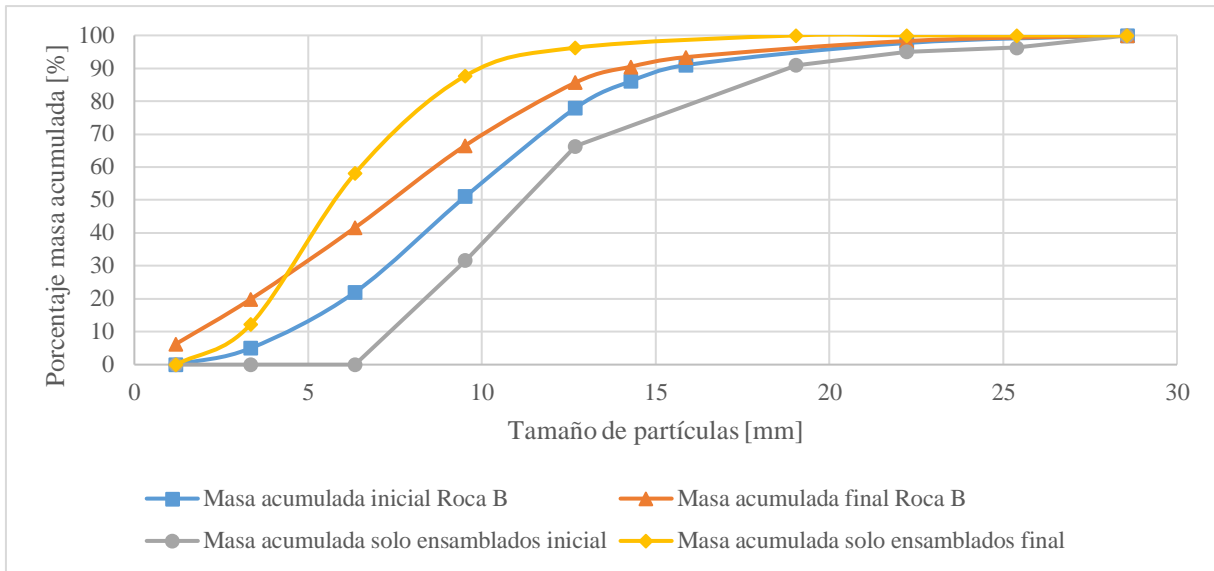


Figura 40. Curvas granulométricas de ensamblados y modelo Roca B

El análisis de las curvas, especialmente el de las presentes en la Figura 40, llevan a concluir que hay una sobre fragmentación de los ensamblados, debido a que en un corto periodo de tiempo hay una mayor fragmentación que en todo el tiempo que se realizó el modelo físico en la roca B, por lo que, es necesario seguir realizando ajustes al modelo de fragmentación secundaria, uno de los ajustes se deduce de las imágenes presentes en la Figura 50. Donde se observa que en los lugares donde hay una velocidad y desplazamiento altos de las partículas ocurren mayores quiebres de conexiones, esto podría ser efecto del Runnable WallLoader en las partículas encerradas con la coloración roja. Por otro lado, las que se indican con el círculo amarillo muestran quiebres donde las partículas están más cerca de las paredes del modelo, lo que podría indicar que la aún alta energía cinética inicial del modelo produce una especie de “vibración” en el modelo lo que produciría un efecto en cadena de quiebres, el cual fue medianamente detenido con el *damping* elegido.

Graficando el porcentaje de enlaces rotos sobre los pasos de tiempo de simulación se obtienen los gráficos mostrados en la Figura 46, donde se observa que la mayor cantidad de quiebres ocurre durante los primeros tiempos de la simulación, llegando a un alto porcentaje acumulado durante la misma cantidad de tiempo, lo que junto con el gráfico mostrado en la Figura 47, donde se grafica esfuerzo sobre la pared en cada paso de tiempo, indicaría que hay una fuerza sobre las partículas mayor que 2 [MPa], debido a que el cálculo de fuerza sobre la pared se hace con la fuerza ejercida sobre esta, que es la misma que está ejerciendo sobre las partículas, esta fuerza al compararla con un ensayo UCS, mostrada en la Figura 43, vemos que no se comporta de la misma manera, ya que suponiendo que antes del flujo el modelo se comporte como un ensayo de compresión, el esfuerzo

debería aumentar paulatinamente hasta el esfuerzo confinante y de ahí mantenerse constante, es por este aumento abrupto de la fuerza sobre el sistema que los enlaces resisten menos, por lo cual, para lograr un modelo más realista se tendría que lograr el aumento paulatino del esfuerzo hasta el esfuerzo confinante.

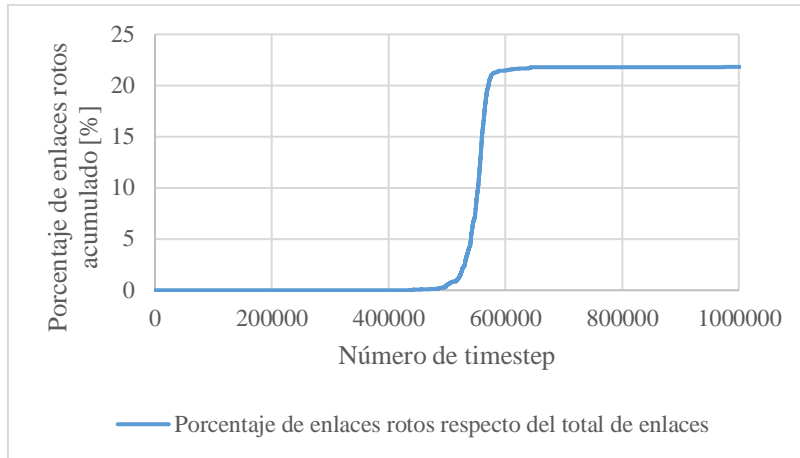


Figura 41. Gráfico del porcentaje de enlaces rotos acumulado respecto del total de enlaces en el ensayo



Figura 42. Gráfico del porcentaje de enlaces rotos acumulado respecto del total de enlaces rotos en el ensayo

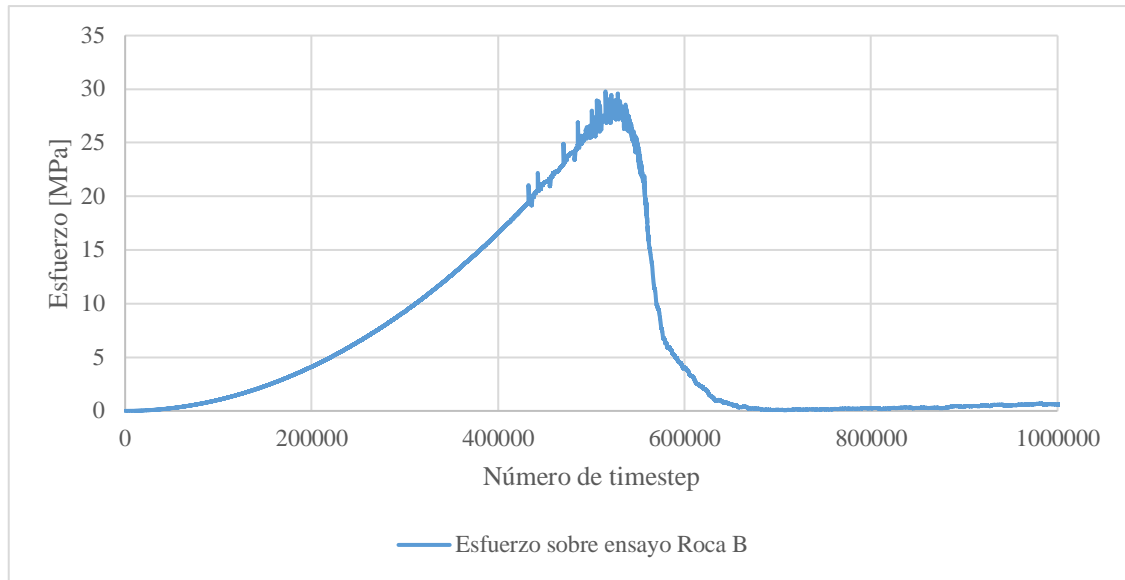


Figura 43. Gráfico del esfuerzo ejercido sobre el ensayo para la simulación de roca B

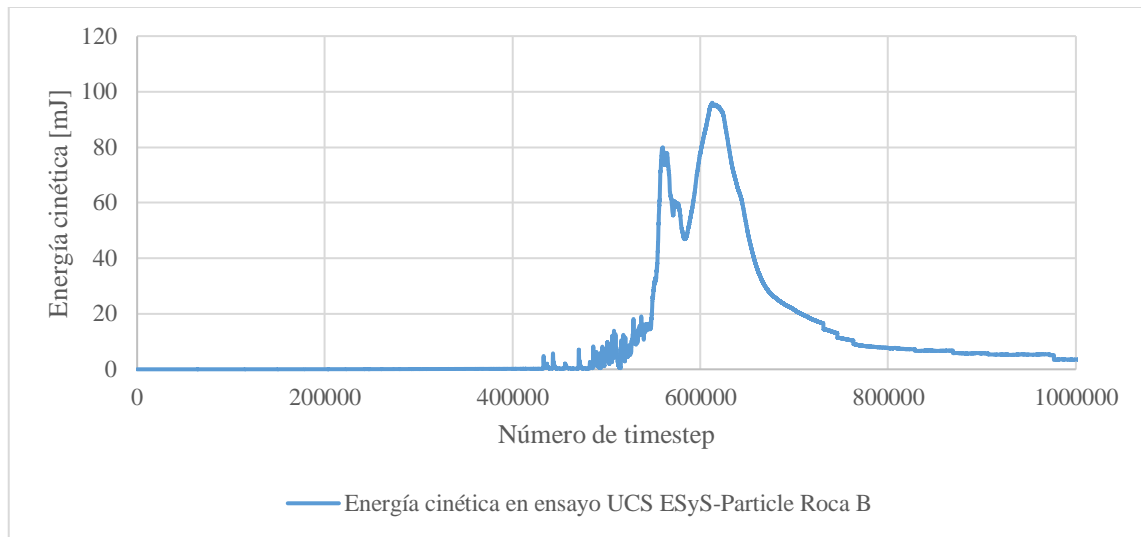


Figura 44. Energía cinética en la simulación del ensayo UCS para roca B

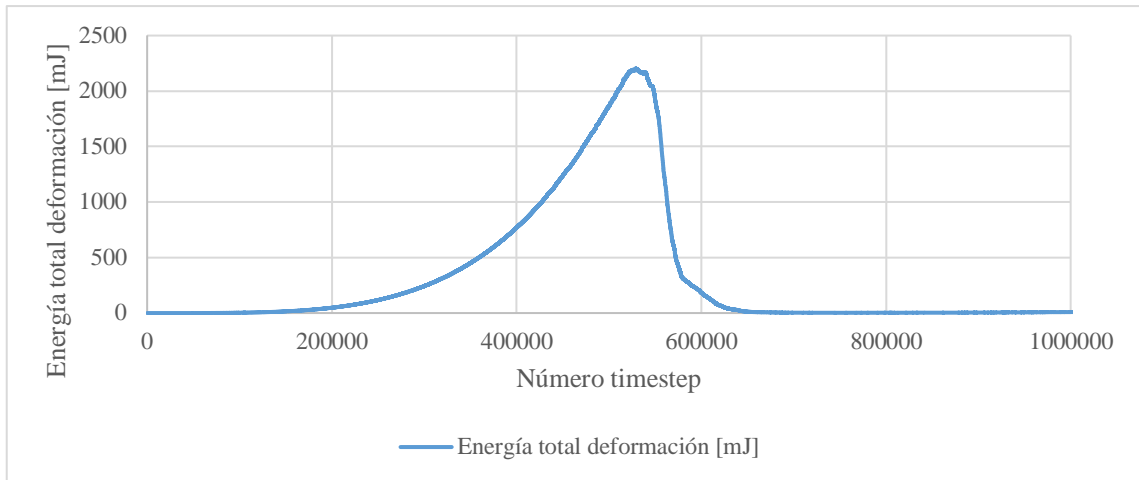


Figura 45. Energía total de deformación en la simulación del UCS roca B

La etapa inicial del modelo de fragmentación, antes que empiece un flujo, se puede comparar con un ensayo de compresión, como vemos en las gráficas de los ensayos de compresión (Figura 41 a la Figura 45), las energías parten desde cero y van aumentando paulatinamente respecto a ciertos sucesos, por ejemplo la energía cinética Figura 44, una vez que comienzan los quiebres en los enlaces al igual que la energía total de deformación Figura 45, aumentan proporcionalmente con el esfuerzo aplicado al ensayo Figura 43, por ende para los primeros instantes del modelo de fragmentación se debería lograr comportamientos similares, pero con menores porcentajes de fragmentación debido a que los esfuerzos deberían distribuirse por todas la partículas y ensamblados.

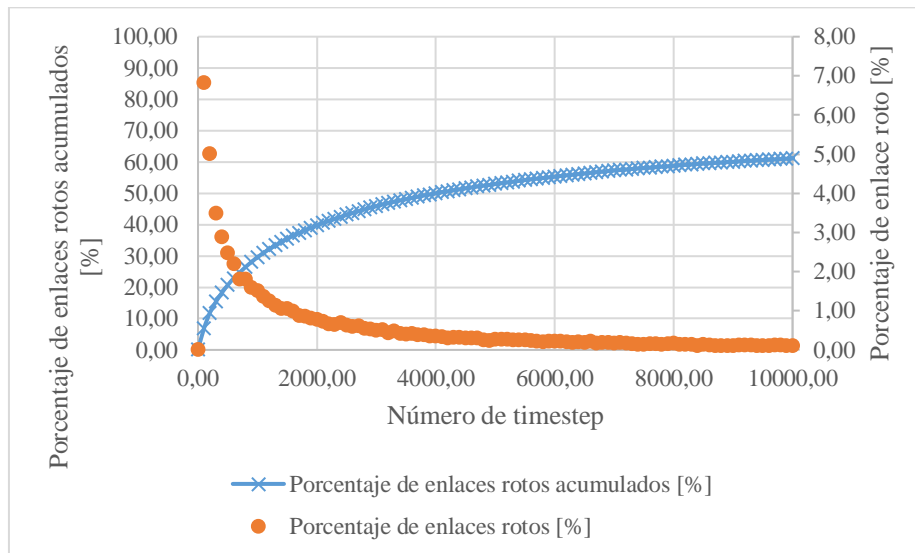


Figura 46. Porcentaje de enlaces rotos por timestep y porcentaje de enlaces rotos acumulados

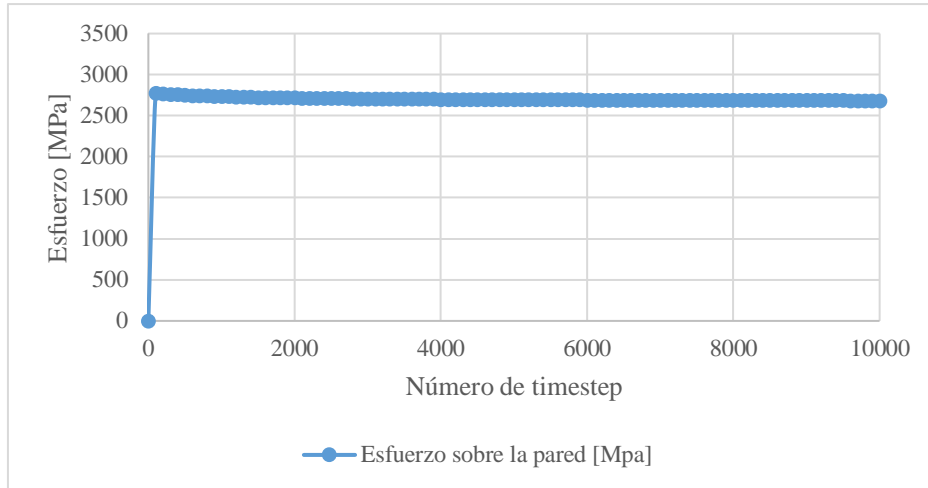


Figura 47. Esfuerzo sobre modelo de fragmentación secundaria

En la Figura 47, se aprecia como la primera lectura de esfuerzo sobre la pared que confina el modelo es muy alta, por encima de la resistencia de los enlaces, debido a que se utilizó el mismo Runnable que en los ensayos de compresión, esto podría indicar que la distribución de partículas en el modelo presentaba una condición inicial de alta energía, ya que la variación posterior debido a la fuerza aplicada por la pared varía muy poco, por lo que se tendría que estudiar el mecanismo de creación de la granulometría y su interacción con la geometría de la batea.

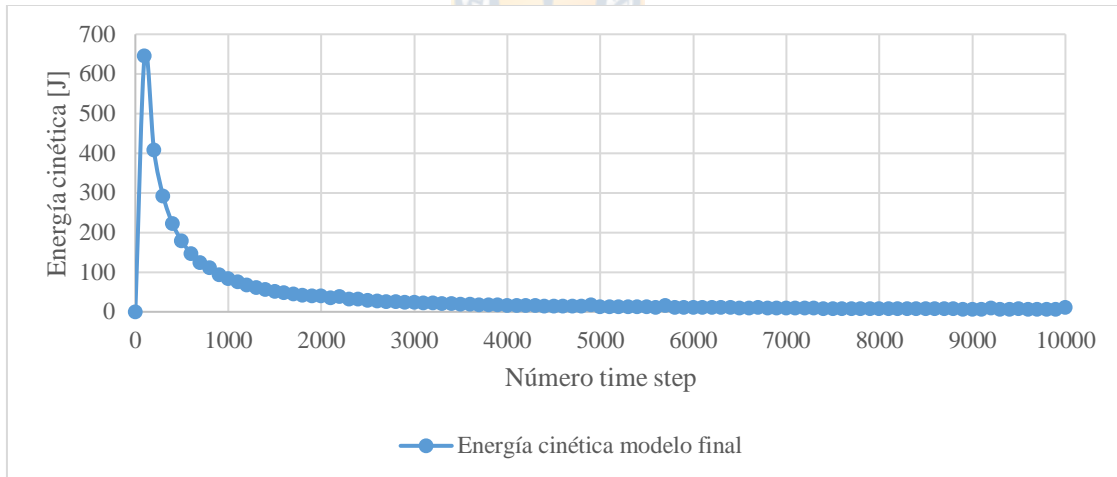


Figura 48. Energía cinética en el modelo de fragmentación secundaria

En cuanto a la energía cinética mostrada en la Figura 48, muestra un valor muy alto en los instantes iniciales, esto se podría deber a la “condición inicial” o a la rápida rotura de los enlaces, se debería estudiar si es una causa o una consecuencia de la rotura de enlaces, ya que en comparación con los ensayos UCS la energía cinética aparece una vez los enlaces rompen, en el modelo de fragmentación solo debería tener *peaks* de energía cinética cuando hay flujo.

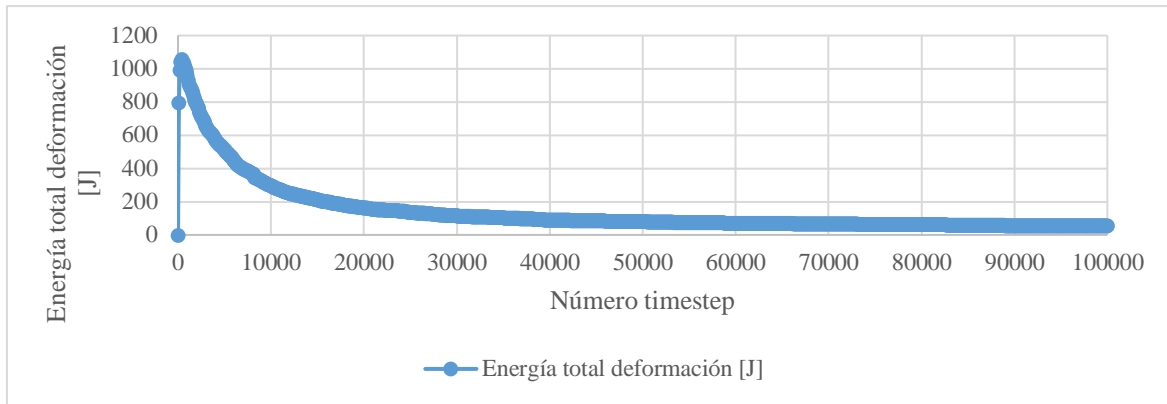


Figura 49. Energía total de deformación en el modelo de fragmentación secundaria

Así en el modelo de fragmentación vemos que sucede algo no esperado que es un incremento brusco en la energía, presente en el sistema en los primeros instantes de la simulación, a diferencia de los ensayos UCS donde aumenta gradualmente desde cero, aquí se apreció un valor muy alto desde la primera lectura, el cual pudo estar relacionado con el rápido quiebre de algunos enlaces o una “condición inicial” que genera altas fuerzas o altas velocidades sobre las partículas, la solución para esto podría estar en realizar una simulación previa de amortiguamiento, con un alto *damping* para dejar la energía inicial cercana a cero y diseñar una *script* para tener un control en la fuerza que ejerce el Runnable, ya que como se aprecia en la Figura 50, la mayor cantidad de quiebre está asociado a esos dos factores.

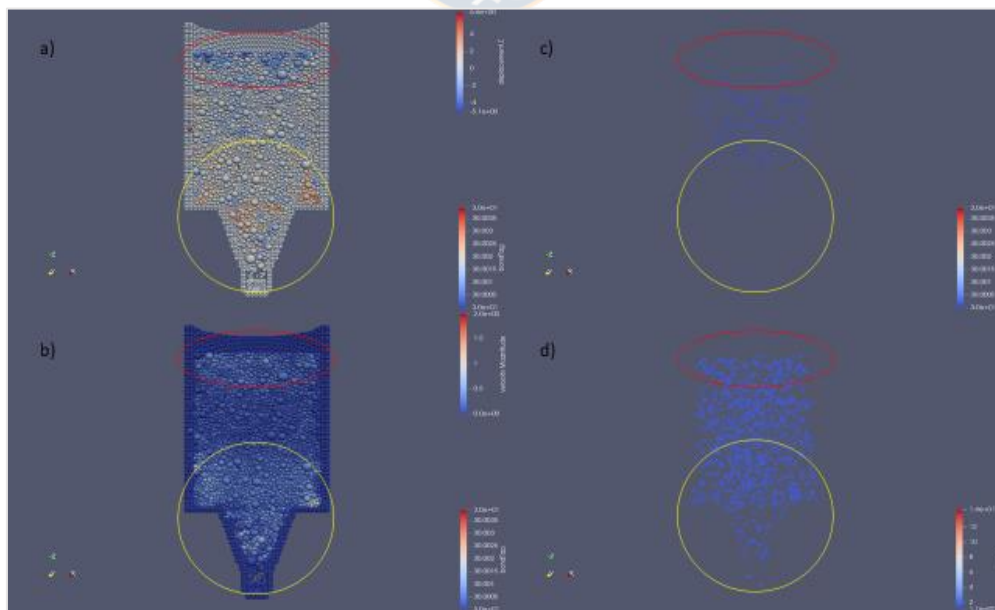


Figura 50 Imágenes del modelo a los 6 [ms]. a) desplazamiento en Z. b) Velocidad de cada partícula. c) enlaces sobrevivientes a los 6[ms]. d) enlaces a los 0[ms].

5 CONCLUSIONES

En la realización de ensayos UCS para la calibración de parámetros, se logró simular ensayos de compresión uniaxial en el software ESyS-Particle que recrearon el comportamiento de muestras ensayadas en laboratorio, obteniendo esfuerzos UCS y deformaciones unitarias muy cercanas a las obtenidas en el laboratorio, por lo cual, estos ensamblados pueden simular el comportamiento de una roca bajo esfuerzos normales de confinamiento, sin embargo, es importante mantener una relación R_{min}/R_{max} adecuada y la distribución de los radios de las partículas que forman estos ensamblados con valores cercanos a 1, para lograr una simulación exitosa. Aunque es preciso estudiar si un cambio en las dimensiones de los ensamblados, cambian los resultados de la resistencia y deformación de los ensamblados.

Debido a que la relación R_{min}/R_{max} utilizada fue mayor a la que se sugiere por los desarrolladores del software, se deduce que los ensamblados no se fracturaron de una manera “real”, ya que un cambio en la distribución de tamaño de las partículas que forman los ensamblados, produce un cambio en la resistencia, esto se midió en un ensayo UCS donde se cambió solamente la distribución de partículas, pero dejando los mismos parámetros de los enlaces, los resultados mostraron un aumento en la resistencia a la compresión. Al tener un rango más amplio de radios de partículas para formar un ensamblado hay un aumento en el número de conexiones al interior del ensamblado, por lo que, los esfuerzos se distribuirían entre más enlaces, lo que aumentaría la resistencia del ensamblado. Sin embargo, al aumentar el número de partículas que conforman un ensamblado aumentaría la capacidad de cómputo para realizar una simulación óptima, por lo cual, es necesario elegir una relación R_{min}/R_{max} adecuada para modelos que presentan muchos ensamblados.

En cuanto al modelo de fragmentación secundaria, se deduce que es posible realizar un modelo aceptable que simule un modelo físico a escala de laboratorio, pero es necesario disponer de computadores de alta gama. Dependiendo del tiempo que se disponga, la realización en este software podría ser una opción para calibrar parámetros sin necesidad de hacer modelos físicos una y otra vez.

Los principales inconvenientes en este tipo de modelos donde se mezclan flujos con esfuerzos y ensamblados es que para que haya una buena fragmentación es preciso tener bajas velocidades de movimiento para que la energía cinética no genere una sobre fragmentación, pero al mismo tiempo tener condiciones que generen un flujo, es decir *dampings* adecuados, por lo cual, es de gran importancia realizar algunas simulaciones variando este parámetro. Por otro lado, las constantes elásticas para lograr recrear un modelo físico específico pueden ser muy altas lo que llevaría a un

prolongado tiempo de simulación, por otro lado, el flujo y contacto con esferas solidas que no fragmentan lleva a que los ensamblados estén sometidos a una deformación alta, por lo cual la calibración de la resistencia al corte se vuelve primordial. También es importante considerar que la construcción de la granulometría puede jugar un rol relevante en estos modelos ya que si no se deja en condiciones iniciales adecuadas puede influir mucho en el comportamiento inicial del modelo, debido a que si esta es realizada con los mecanismos del software las condiciones iniciales son las adecuadas pero al realizarla con otras herramientas para tener un control sobre la granulometría no es posible tener un control sobre la condición en que interactúan inicialmente las partículas, por ende una vez que influyen las condiciones externas en un modelo, como cargas, gravedad, etc., puede haber un periodo inicial de “acomodo” que no corresponde a un comportamiento realista. Finalmente es necesario tener un control sobre el esfuerzo aplicado al modelo ya que, con los Runnables utilizados, la fuerza ejercida fue muy alta, teniendo una gran incidencia sobre la cantidad de quiebres en los enlaces del modelo.

En cuanto a la aplicación de un modelo DEM a la industria minera, se ve factible su implementación, pero con alta capacidad de cómputo (HCP, por sus siglas en inglés), ya que los datos requeridos son muchos más que en un ensayo de laboratorio. Por otro lado, debido a la gran cantidad de tiempo requerido para la simulación, se ve factible su implementación solo en etapas de prefactibilidad de la operación, hasta que se logre disminuir los tiempos de simulación DEM.

Con lo anterior se concluye que la realización de un modelo de fragmentación secundaria es realizable en el software ESyS-Particle, pero es necesario un buen manejo de las herramientas, tiempo para la realización de un modelo confiable, su posterior simulación y calibración, preferentemente en computadores de alta gama para modelos que involucren flujo y fragmentación al mismo tiempo, debido a que mientras mayor cantidad de partículas formen los conglomerados, estos representaran de mejor manera una roca en un modelo físico.

5.1 Recomendaciones para trabajo futuro

Para simular un tipo de roca específico, es necesario realizar la calibración mostrada en el presente trabajo debido a que el comportamiento mecánico de un ensamblado varía según los parámetros con los cuales se modela. Además, se debió trabajar con constantes elásticas muy altas, que llevaron a simular con pasos de tiempo muy pequeños, lo que hizo que las simulaciones fueran extensas, lo cual, no fue óptimo para lograr un resultado en un periodo corto de tiempo, por ende, antes de trabajar con altas constantes elásticas es necesario conocer el manejo del software a cabalidad para no perder tiempo simulando modelos que requieren mucho tiempo para simular pocos segundos.

Debido a que en la librería GenGeo no se puede tener un control sobre la granulometría (distribución de tamaños de partícula), es necesario recurrir a otros métodos para lograr esas granulometría, pero una vez la granulometría es colocada en el modelo, es primordial realizar una compactación de las partículas con los parámetros a utilizar en los conglomerados posteriormente, logrando con esto disminuir la energía cinética inicial, ya que un *damping* alto no es posible, debido a que la simulación es dinámica.

Para la realización de un buen modelo de fragmentación es necesaria la calibración de los parámetros para simular un tipo de roca específico, como lo fue realizado en este trabajo mediante un ensayo de UCS, para una mayor precisión se debería realizar un ensayo de corte y posteriormente, realizar los dos ensayos a los distintos tipos de ensamblados dependiendo de su tamaño, para comprobar si el efecto de escala tiene una gran influencia sobre las resistencias de un ensamblado.

Otro factor a estudiar es la distribución de partículas que forman los ensamblados, debido a que esta tiene un efecto en la resistencia del ensamblado.

Si se tiene acceso a un computador de alta gama, realizar una simulación del modelo completo y con todos los volúmenes convertidos en ensamblados, con una distribución de partículas adecuada y parámetros calibrados, después de todas las calibraciones necesarias con partículas sólidas.

Se debería estudiar la influencia del factor de forma de los ensamblados en la fragmentación ya que estos hasta el momento fueron modelados solo como esferas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laubscher, D. Cave mining-the state of the art. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 94 (10): 279-293, Octubre 1994.
- [2] Castro, R. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. (Doctoral thesis). Brisbane, Australia: University of Queensland, 2006. 316 p.
- [3] Hamrin, H.: Choosing an underground mining method. In : *Underground Mining Methods Handbook 1.*, New York: W. A. Hustrulid, (1982) 88-112
- [4] Pierce, M. A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. (Doctoral thesis). Brisbane: University of Queensland, 2009. 317 p.
- [5] Brown , E. Block caving Geomechanics.: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2002. 515 p.
- [6] Gómez, R., Castro, R., Casali, A., Palma, S., Hekmat, A. A comminution model for secondary fragmentation assessment for block caving. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50 (603): 3073-3084, Junio 2017.
- [7] Cundall, P., Mukundakrishnan, B., Loring, L. REBOP (Rapid Emulator Based on PFC3D) formulation and user's guide.: Itasca Consulting Group Inc., October 2000
- [8] Esterhuizen, G.: A program to predict block caving fragmentation. In : *Technical Reference and User's Guide 21st edn.*, (1994)
- [9] Jaeger, H., Nagel, S. Physics of the granular state. *American Association for the Advancement of Science*, 255 (5051): 1523-1531, 1992.
- [10] Hardin, Crushing of soil particles. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (10): 1177-1192, 1985.
- [11] Cundall, P., Strack, O. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29 (1): 47-65, 1979.
- [12] Jaeger, H., Nagel, S. Granular solids, liquids, and gases. *The American Physical Society*, 68 (4): 1259-1273, 1996.
- [13] Craig, R. Craig's soil mechanics. 7th ed.: Taylor & Francis Group, 2004. 447 p.
- [14] Lambe, T., Whitman, R. Mecanica de suelos. 4th ed.: Limusa,S.A., 1984. 582 p.

- [15] Marsal, R. Large Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of the soild Mechanics and Foundations Division*, 93 (SM2): 27-43, 1967.
- [16] McDowell, G., Bolton, M. On the micromechanics of crushable aggregate. *Géotechnique*, 48 (5): 667-679, 1998.
- [17] Lade, P., Yamamuro, J., Bopp, P. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of geotechnical engineering* , 122 (4): 309-316, Abril 1996.
- [18] Jaeger, J. FAILURE OF ROCKS UNDER TENSILE CONDITIONS. *Int J. Rock Min. Sci.*, 4: 219-227, 1967.
- [19] McDowell, G., Humphreys, A. Yielding of granular material. *Granular matter*, 4: 1-8, 2002.
- [20] McDowell, G., de Bono, J., Yue, P., Yu, H.-S. Micro mechanics of isotropic normal compression. *Géotechnique Letters*, 3: 166-172, 2013.
- [21] Mc.Dowell, G., Amon, A. The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles. *Soils and found*, 40 (5): 133-141, 2000.
- [22] McDowell, G., Bolton, M., Robertson, D. The fractal crushing of granular materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 44 (12): 2079-2102, 1996.
- [23] Bridgwater, J., Utsumi, R., Zhang, Z., Tuladhar, T. Particle attrition due to shearing—the effects of stress. *Chemical Engineering Science*, 58: 4649-4665, Julio 2003.
- [24] Kvapil, R. Gravity flow in sublevel and panel caving - a common sense approach.: Luleå University of Technology Press, Sweden 2008
- [25] Laubscher, D. A practical manual on Block Caving. 2000
- [26] Merino, L. Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines. (Tesis de Máster): University of London, 1986.
- [27] Eadie, B. A framework for modelling fragmentation in block caving. (Tesis doctoral): University of Queensland, 2003.
- [28] Montecinos , N. Modelo de mezcla de fragmentacion secundaria en mineria de Block/Panel caving. (Tesis de Magister). Santiago: Universidad de Chile, 2011.

- [29] Lisjak, A., Grasselli, G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (4): 301-314, 2014.
- [30] Wang , Y., Mora, P. The ESyS_Particle: A New 3-D Discrete Element Model with Single Particle. *Earth Sciences* , 119: 183-228, 2009.
- [31] Weatherley, D., Hancock, W., Boros, V. ESyS-Particle Tutorial and User's Guide.: University of Queensland, 2014.
- [32] ESyS-Particle. Available at: <https://answers.launchpad.net/esys-particle/+question/678967>
- [33] Moreland, K. The Paraview Tutorial.: Sandia National Laboratories, 2017.
- [34] Hancock, W., Weatherley, D., Chitombo, G. Modeling the gravity flow of rock using the Discrete Element Method.
- [35] Cid, P. Simulación de flujo granular en batea de extracción a través de elementos discretos. (Memoria de título). Concepción: Universidad de Concepción, 2019.
- [36] Castro, R., Gómez, R., Hekmat, A. Experimental quantification of hang-up for block caving applications. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (85): 1-9, 2016.
- [37] McDowell, G., Harireche, O. Discrete element modeling of soil particle fracture. *Géotechnique*, 52 (2): 131-135, 2002.

7 ANEXOS

Anexo A. Tablas de granulometría

Anexo A.1. Granulometría utilizada en [36]

Tabla 10. Granulometría utilizada en [36].

Malla	Tamaño	Fu	fi
1 1/8+1"	28.575	100.0%	2.5%
1+7/8"	25.4	97.5%	1.8%
7/8+3/4"	22.225	95.7%	3.3%
3/4+1/2"	19.05	92.4%	23.6%
1/2 +3/8"	12.7	68.8%	29.7%
3/8+1/4"	9.525	39.1%	26.9%
1/4"+#4	6.35	12.2%	7.2%
#4+#6	4.75	5.0%	2.8%
#6+#8	3.35	2.2%	1.0%
#8+#12	2.3	1.2%	0.1%
#12+#16	2.17	1.1%	1.1%

Anexo A.2. Granulometría utilizada en [35]

Tabla 11. Granulometría utilizada en [35].

Malla	Tamaño (mm)	Fu	fi
1 1/8+1"	28.575	100.00%	2.63%
1+7/8"	25.4	97.37%	1.89%
7/8+3/4"	22.225	95.47%	3.47%
3/4+1/2"	19.05	92.00%	24.84%
1/2 +3/8"	12.7	67.16%	31.26%
3/8+1/4"	9.525	35.89%	28.32%
1/4"+#4	6.35	7.58%	7.58%

Anexo A.3. Granulometría inicial y final de ensayo físico Roca B

Tabla 12. Granulometría inicial y final de ensayo físico Roca B

Tamaño [mm]	% masa acumulada	% masa acumulada
1.2	0	6.3
3.35	5	19.9
6.35	22	41.6
9.53	51.1	66.6
12.7	78	85.7
14.29	86.1	90.5
15.88	91	93.4
22.23	97.7	98.3
28.58	100	100

Anexo A.4. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria

Tabla 13. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria

Tamaño medio [mm]	Masa [kg]	Masa acumulada [kg]	Masa [%]	Masa acumulada [%]
1.2	0	0	0	0
3.35	0	0	0	0
6.35	5.311	5.311	7.815	7.815
9.526	19.980	25.292	29.39	37.213
12.7	22.096	47.389	32.511	69.725
19.05	15.651	63.040	23.028	92.754
22.226	2.017	65.058	2.968	95.723
25.4	1.160	66.218	1.706	97.429
28.574	1.746	67.965	2.570	100

Anexo A.5. Granulometría final modelo fragmentación secundaria, simulando la mitad del modelo

Tabla 14. Granulometría final modelo fragmentación secundaria, simulando la mitad del modelo

Tamaño medio [mm]	Masa [kg]	Masa acumulada [kg]	Masa [%]	Masa acumulada [%]
1.200	0.000	0.000	0.000	0.000
3.350	0.445	0.445	1.560	1.560
6.350	4.002	4.448	14.028	15.589
9.526	8.244	12.692	28.897	44.485
12.700	8.394	21.086	29.421	73.907
19.050	5.763	26.849	20.201	94.108
22.226	0.822	27.672	2.881	96.989
25.400	0.446	28.118	1.564	98.553
28.574	0.413	28.531	1.447	100.000
	28.531			

Anexo A.6. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria solo ensamblados

Tabla 15. Granulometría inicial modelo fragmentación secundaria solo ensamblados

Tamaño medio [mm]	Masa [kg]	Masa acumulada [kg]	Porcentaje masa [%]	Porcentaje masa acumulada [%]
1.200	0.000	0.000	0.000	0.000
3.350	0.000	0.000	0.000	0.000
6.350	0.000	0.000	0.000	0.000
9.526	3.313	3.313	31.712	31.712
12.700	3.625	6.938	34.703	66.415
19.050	2.560	9.498	24.506	90.921
22.226	0.433	9.931	4.149	95.070
25.400	0.134	10.065	1.281	96.352
28.574	0.381	10.446	3.648	100.000
	10.446			

Anexo A.7. Granulometría final modelo fragmentación secundaria solo ensamblados

Tabla 16. Granulometría final modelo fragmentación secundaria solo ensamblados

Tamaño medio [mm]	Masa [kg]	Masa acumulada [kg]	Porcentaje masa [%]	Porcentaje masa acumulada [%]
0.600	0.000	0.000	0.000	0.000
1.675	0.445	0.445	12.262	12.262
3.175	1.663	2.109	45.818	58.080
4.763	1.077	3.185	29.652	87.732
6.350	0.310	3.495	8.539	96.271
9.525	0.135	3.631	3.729	100.000
11.113	0.000	3.631	0.000	100.000
12.700	0.000	3.631	0.000	100.000
14.287	0.000	3.631	0.000	100.000
	3.631			



Anexo B. Gráficos de calibración para ensayos R

Anexo B.1. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

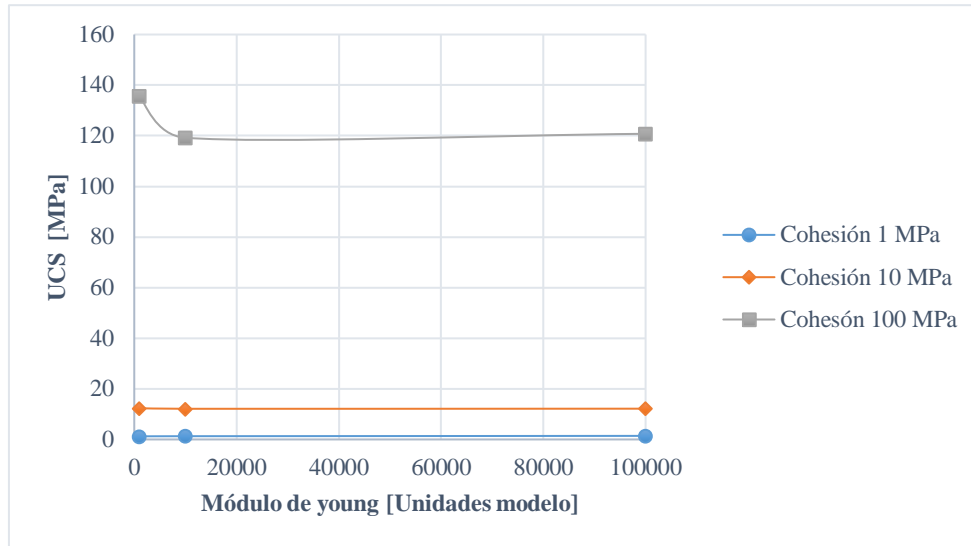


Figura 51. Gráfico de E v/s UCS con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

Anexo B.2. Gráfico de deformación unitaria v/s E con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

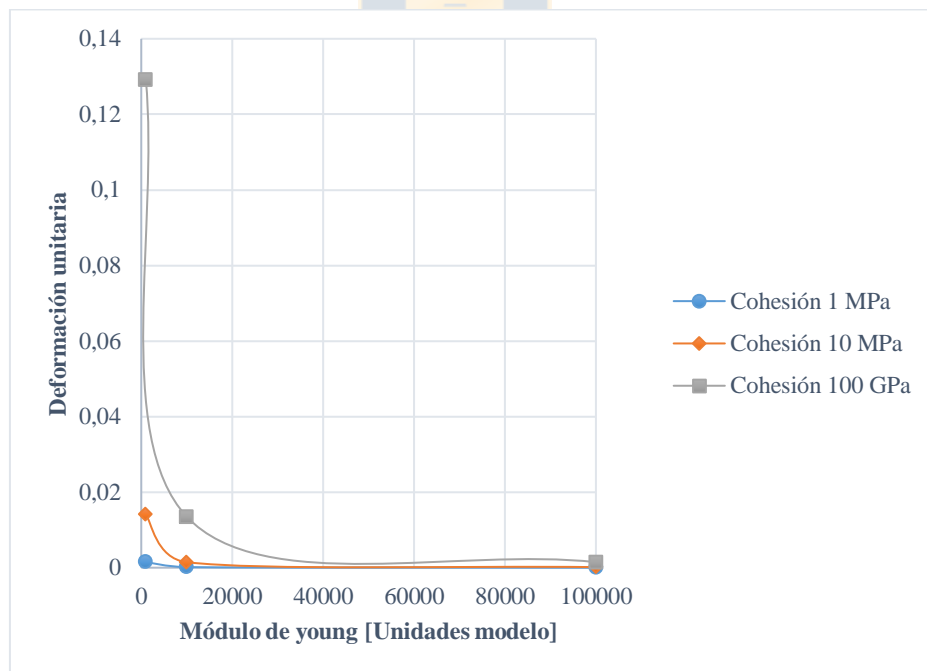


Figura 52. Gráfico de deformación unitaria v/s E con diferente cohesión para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

Anexo B.3. Gráfico de C v/s UCS con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

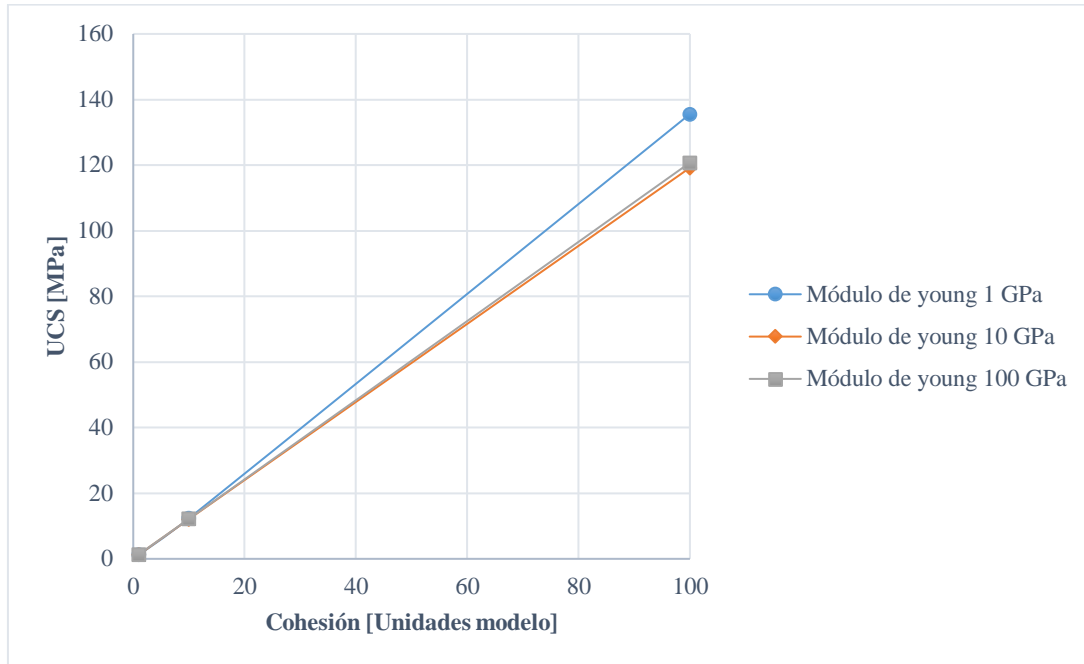


Figura 53. Gráfico de C v/s UCS con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

Anexo B.4. Gráfico de deformación unitaria v/s C con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

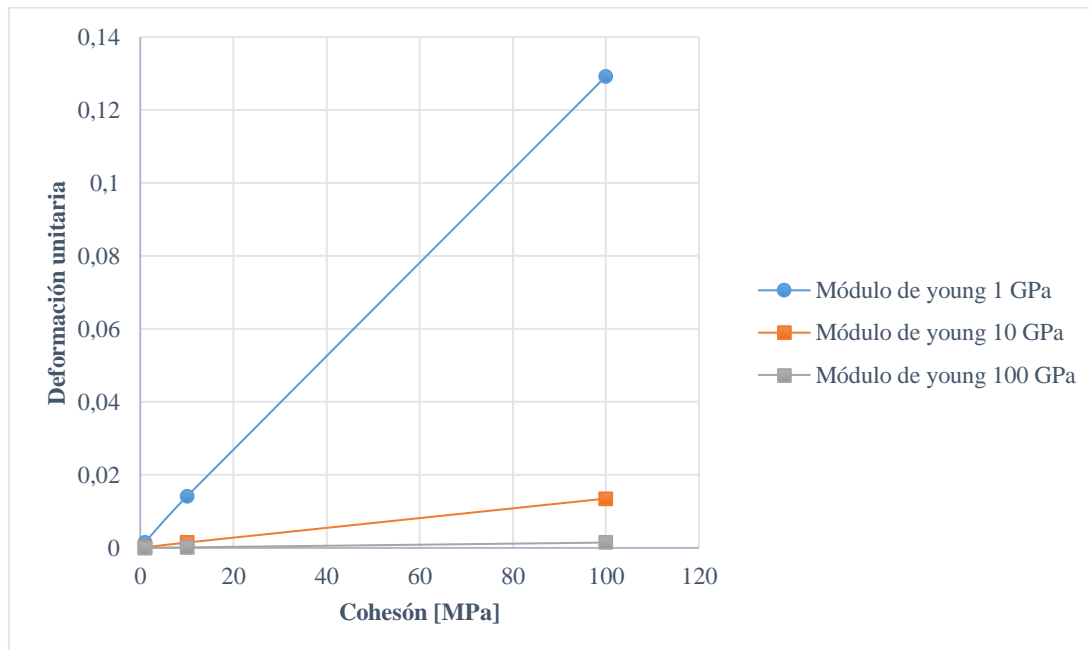


Figura 54. Gráfico de deformación unitaria v/s C con diferente Módulo de Young para los ensayos UCS R en ESyS-Particle

Anexo C. Tablas de UCS laboratorio

Anexo C.1. Datos de UCS ensayo I R

Tabla 17. Datos de UCS ensayo I R.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Esfuerzo [Pa]	Esfuerzo [MPa]
0.05	0	0	0	0
0.1	7.63	7630	3901517.555	3.901517555
0.15	7.702	7702	3938333.972	3.938333972
0.2	7.774	7774	3975150.389	3.975150389
0.25	7.774	7774	3975150.389	3.975150389
0.3	7.845	7845	4011455.467	4.011455467
0.35	7.917	7917	4048271.885	4.048271885
0.4	7.989	7989	4085088.302	4.085088302
0.45	8.061	8061	4121904.719	4.121904719
0.5	8.205	8205	4195537.554	4.195537554
0.55	8.349	8349	4269170.388	4.269170388
0.6	8.565	8565	4379619.64	4.37961964
0.65	8.781	8781	4490068.892	4.490068892
0.7	8.997	8997	4600518.144	4.600518144
0.75	9.213	9213	4710967.396	4.710967396
0.8	9.501	9501	4858233.065	4.858233065
0.85	9.789	9789	5005498.734	5.005498734
0.9	10.077	10077	5152764.403	5.152764403
0.95	10.437	10437	5336846.49	5.33684649
1	10.869	10869	5557744.994	5.557744994
1.05	11.156	11156	5704499.324	5.704499324
1.1	11.66	11660	5962214.245	5.962214245
1.15	12.092	12092	6183112.749	6.183112749
1.2	12.596	12596	6440827.67	6.44082767
1.25	13.028	13028	6661726.173	6.661726173
1.3	13.676	13676	6993073.929	6.993073929
1.35	14.107	14107	7213461.094	7.213461094
1.4	14.683	14683	7507992.432	7.507992432
1.45	15.403	15403	7876156.605	7.876156605
1.5	16.123	16123	8244320.778	8.244320778
1.55	16.771	16771	8575668.533	8.575668533
1.6	17.562	17562	8980137.784	8.980137784
1.65	18.354	18354	9385118.375	9.385118375
1.7	19.074	19074	9753282.548	9.753282548
1.75	19.866	19866	10158263.14	10.15826314
1.8	20.729	20729	10599548.81	10.59954881

1.85	21.593	21593	11041345.81	11.04134581
1.9	22.601	22601	11556775.66	11.55677566
1.95	23.608	23608	12071694.16	12.07169416
2	24.688	24688	12623940.42	12.62394042
2.05	25.696	25696	13139370.26	13.13937026
2.1	26.775	26775	13691105.18	13.69110518
2.15	27.855	27855	14243351.44	14.24335144
2.2	29.079	29079	14869230.53	14.86923053
2.25	30.158	30158	15420965.45	15.42096545
2.3	31.238	31238	15973211.71	15.97321171
2.35	32.39	32390	16562274.39	16.56227439
2.4	33.541	33541	17150825.73	17.15082573
2.45	34.621	34621	17703071.99	17.70307199
2.5	35.701	35701	18255318.25	18.25531825
2.55	36.852	36852	18843869.58	18.84386958
2.6	37.788	37788	19322483.01	19.32248301
2.65	38.868	38868	19874729.27	19.87472927
2.7	39.875	39875	20389647.77	20.38964777
2.75	40.883	40883	20905077.61	20.90507761
2.8	41.675	41675	21310058.2	21.3100582
2.85	42.682	42682	21824976.71	21.82497671
2.9	43.474	43474	22229957.3	22.2299573
2.95	44.338	44338	22671754.3	22.6717543
3	45.13	45130	23076734.89	23.07673489
3.05	45.849	45849	23444387.73	23.44438773
3.1	46.641	46641	23849368.32	23.84936832
3.15	47.433	47433	24254348.91	24.25434891
3.2	48.081	48081	24585696.66	24.58569666
3.25	48.584	48584	24842900.25	24.84290025
3.3	49.16	49160	25137431.58	25.13743158
3.35	49.664	49664	25395146.51	25.39514651
3.4	50.168	50168	25652861.43	25.65286143
3.45	50.744	50744	25947392.76	25.94739276
3.5	51.248	51248	26205107.69	26.20510769
3.55	51.751	51751	26462311.27	26.46231127
3.6	52.399	52399	26793659.02	26.79365902
3.65	52.831	52831	27014557.53	27.01455753
3.7	53.263	53263	27235456.03	27.23545603
3.75	53.623	53623	27419538.12	27.41953812
3.8	54.199	54199	27714069.46	27.71406946
3.85	54.631	54631	27934967.96	27.93496796
3.9	55.062	55062	28155355.12	28.15535512

3.95	55.566	55566	28413070.05	28.41307005
4	55.998	55998	28633968.55	28.63396855
4.05	56.43	56430	28854867.05	28.85486705
4.1	56.862	56862	29075765.56	29.07576556
4.15	57.366	57366	29333480.48	29.33348048
4.2	57.798	57798	29554378.98	29.55437898
4.25	58.229	58229	29774766.15	29.77476615
4.3	58.661	58661	29995664.65	29.99566465
4.35	59.093	59093	30216563.15	30.21656315
4.4	59.597	59597	30474278.07	30.47427807
4.45	59.957	59957	30658360.16	30.65836016
4.5	60.461	60461	30916075.08	30.91607508
4.55	60.964	60964	31173278.66	31.17327866
4.6	61.396	61396	31394177.17	31.39417717
4.65	61.9	61900	31651892.09	31.65189209
4.7	62.332	62332	31872790.59	31.87279059
4.75	62.764	62764	32093689.1	32.0936891
4.8	63.052	63052	32240954.77	32.24095477
4.85	63.556	63556	32498669.69	32.49866969
4.9	63.988	63988	32719568.19	32.71956819
4.95	64.419	64419	32939955.35	32.93995535
5	64.851	64851	33160853.86	33.16085386
5.05	65.211	65211	33344935.94	33.34493594
5.1	65.643	65643	33565834.45	33.56583445
5.15	66.147	66147	33823549.37	33.82354937
5.2	66.579	66579	34044447.87	34.04444787
5.25	67.083	67083	34302162.79	34.30216279
5.3	67.586	67586	34559366.38	34.55936638
5.35	68.09	68090	34817081.3	34.8170813
5.4	68.594	68594	35074796.22	35.07479622
5.45	69.026	69026	35295694.72	35.29569472
5.5	69.602	69602	35590226.06	35.59022606
5.55	70.106	70106	35847940.98	35.84794098
5.6	70.609	70609	36105144.56	36.10514456
5.65	71.185	71185	36399675.9	36.3996759
5.7	71.617	71617	36620574.41	36.62057441
5.75	72.193	72193	36915105.74	36.91510574
5.8	72.625	72625	37136004.25	37.13600425
5.85	73.057	73057	37356902.75	37.35690275
5.9	73.632	73632	37650922.75	37.65092275
5.95	74.136	74136	37908637.67	37.90863767
6	74.568	74568	38129536.18	38.12953618

6.05	75.144	75144	38424067.51	38.42406751
6.1	75.72	75720	38718598.85	38.71859885
6.15	76.296	76296	39013130.19	39.01313019
6.2	76.727	76727	39233517.35	39.23351735
6.25	77.231	77231	39491232.28	39.49123228
6.3	77.807	77807	39785763.61	39.78576361
6.35	78.383	78383	40080294.95	40.08029495
6.4	78.887	78887	40338009.87	40.33800987
6.45	79.535	79535	40669357.63	40.66935763
6.5	80.038	80038	40926561.21	40.92656121
6.55	80.614	80614	41221092.55	41.22109255
6.6	81.19	81190	41515623.89	41.51562389
6.65	81.838	81838	41846971.64	41.84697164
6.7	82.414	82414	42141502.98	42.14150298
6.75	82.989	82989	42435522.98	42.43552298
6.8	83.493	83493	42693237.9	42.6932379
6.85	84.141	84141	43024585.66	43.02458566
6.9	84.717	84717	43319117	43.319117
6.95	85.365	85365	43650464.75	43.65046475
7	85.869	85869	43908179.67	43.90817967
7.05	86.444	86444	44202199.67	44.20219967
7.1	86.876	86876	44423098.18	44.42309818
7.15	87.308	87308	44643996.68	44.64399668
7.2	87.668	87668	44828078.77	44.82807877
7.25	88.1	88100	45048977.27	45.04897727
7.3	88.532	88532	45269875.77	45.26987577
7.35	88.964	88964	45490774.28	45.49077428
7.4	89.467	89467	45747977.86	45.74797786
7.45	90.043	90043	46042509.2	46.0425092
7.5	90.547	90547	46300224.12	46.30022412
7.55	90.979	90979	46521122.62	46.52112262
7.6	91.267	91267	46668388.29	46.66838829
7.65	89.683	89683	45858427.11	45.85842711
7.7	85.725	85725	43834546.84	43.83454684
7.75	84.573	84573	43245484.16	43.24548416
7.8	84.573	84573	43245484.16	43.24548416
7.85	85.149	85149	43540015.5	43.5400155
7.9	86.012	86012	43981301.17	43.98130117
7.95	87.236	87236	44607180.26	44.60718026
8	88.604	88604	45306692.19	45.30669219
8.05	89.971	89971	46005692.78	46.00569278
8.1	90.835	90835	46447489.79	46.44748979

8.15	89.467	89467	45747977.86	45.74797786
8.2	89.467	89467	45747977.86	45.74797786
8.25	90.331	90331	46189774.87	46.18977487
8.3	91.555	91555	46815653.96	46.81565396
8.35	92.85	92850	47477838.13	47.47783813
8.4	94.29	94290	48214166.48	48.21416648
8.45	95.369	95369	48765901.4	48.7659014
8.5	95.369	95369	48765901.4	48.7659014
8.55	94.65	94650	48398248.56	48.39824856
8.6	93.642	93642	47882818.72	47.88281872
8.65	92.922	92922	47514654.55	47.51465455
8.7	92.85	92850	47477838.13	47.47783813
8.75	92.346	92346	47220123.21	47.22012321
8.8	88.604	88604	45306692.19	45.30669219
8.85	84.717	84717	43319117	43.319117
8.9	84.285	84285	43098218.49	43.09821849
8.95	84.429	84429	43171851.33	43.17185133
9	85.581	85581	43760914	43.760914
9.05	87.452	87452	44717629.51	44.71762951
9.1	89.971	89971	46005692.78	46.00569278
9.15	91.987	91987	47036552.46	47.03655246
9.2	94.146	94146	48140533.64	48.14053364
9.25	96.521	96521	49354964.08	49.35496408
9.3	99.184	99184	50716660.18	50.71666018
9.35	101.631	101631	51967907.02	51.96790702
9.4	104.007	104007	53182848.8	53.1828488
9.45	106.382	106382	54397279.23	54.39727923
9.5	108.757	108757	55611709.66	55.61170966
9.55	110.917	110917	56716202.18	56.71620218
9.6	113.22	113220	57893816.19	57.89381619
9.65	115.163	115163	58887348.12	58.88734812
9.7	117.107	117107	59881391.39	59.88139139
9.75	118.834	118834	60764474.06	60.76447406
9.8	120.417	120417	61573923.9	61.5739239
9.85	121.857	121857	62310252.25	62.31025225
9.9	123.44	123440	63119702.09	63.11970209
9.95	124.736	124736	63782397.6	63.7823976
10	125.96	125960	64408276.7	64.4082767
10.05	126.967	126967	64923195.2	64.9231952
10.1	127.903	127903	65401808.62	65.40180862
10.15	128.695	128695	65806789.21	65.80678921
10.2	129.487	129487	66211769.8	66.2117698

10.25	130.278	130278	66616239.05	66.61623905
10.3	130.854	130854	66910770.39	66.91077039
10.35	131.43	131430	67205301.73	67.20530173
10.4	131.862	131862	67426200.24	67.42620024
10.45	132.294	132294	67647098.74	67.64709874
10.5	132.582	132582	67794364.41	67.79436441
10.55	133.013	133013	68014751.57	68.01475157
10.6	133.301	133301	68162017.24	68.16201724
10.65	133.589	133589	68309282.91	68.30928291
10.7	133.949	133949	68493365	68.493365
10.75	134.309	134309	68677447.08	68.67744708
10.8	134.597	134597	68824712.75	68.82471275
10.85	134.885	134885	68971978.42	68.97197842
10.9	135.173	135173	69119244.09	69.11924409
10.95	135.605	135605	69340142.6	69.3401426
11	135.893	135893	69487408.26	69.48740826
11.05	136.252	136252	69670979.01	69.67097901
11.1	136.612	136612	69855061.1	69.8550611
11.15	136.972	136972	70039143.18	70.03914318
11.2	137.26	137260	70186408.85	70.18640885
11.25	137.692	137692	70407307.36	70.40730736
11.3	138.052	138052	70591389.44	70.59138944
11.35	138.412	138412	70775471.53	70.77547153
11.4	138.844	138844	70996370.03	70.99637003
11.45	139.203	139203	71179940.78	71.17994078
11.5	139.635	139635	71400839.29	71.40083929
11.55	139.995	139995	71584921.37	71.58492137
11.6	140.355	140355	71769003.46	71.76900346
11.65	140.787	140787	71989901.96	71.98990196
11.7	141.147	141147	72173984.05	72.17398405
11.75	141.507	141507	72358066.14	72.35806614
11.8	142.011	142011	72615781.06	72.61578106
11.85	142.37	142370	72799351.8	72.7993518
11.9	142.802	142802	73020250.31	73.02025031
11.95	143.234	143234	73241148.81	73.24114881
12	143.738	143738	73498863.73	73.49886373
12.05	144.17	144170	73719762.24	73.71976224
12.1	144.602	144602	73940660.74	73.94066074
12.15	144.962	144962	74124742.83	74.12474283
12.2	145.393	145393	74345129.99	74.34512999
12.25	145.825	145825	74566028.49	74.56602849
12.3	146.401	146401	74860559.83	74.86055983

12.35	146.833	146833	75081458.34	75.08145834
12.4	147.337	147337	75339173.26	75.33917326
12.45	147.841	147841	75596888.18	75.59688818
12.5	148.345	148345	75854603.1	75.8546031
12.55	148.776	148776	76074990.26	76.07499026
12.6	149.208	149208	76295888.77	76.29588877
12.65	149.712	149712	76553603.69	76.55360369
12.7	150.216	150216	76811318.61	76.81131861
12.75	150.72	150720	77069033.53	77.06903353
12.8	151.224	151224	77326748.45	77.32674845
12.85	151.583	151583	77510319.2	77.5103192
12.9	152.087	152087	77768034.12	77.76803412
12.95	152.447	152447	77952116.21	77.95211621
13	149.712	149712	76553603.69	76.55360369
13.05	147.913	147913	75633704.6	75.6337046
13.1	147.409	147409	75375989.67	75.37598967
13.15	147.409	147409	75375989.67	75.37598967
13.2	147.697	147697	75523255.34	75.52325534
13.25	148.345	148345	75854603.1	75.8546031
13.3	149.208	149208	76295888.77	76.29588877
13.35	150.36	150360	76884951.44	76.88495144
13.4	151.655	151655	77547135.62	77.54713562
13.45	152.879	152879	78173014.71	78.17301471
13.5	154.031	154031	78762077.39	78.76207739
13.55	155.038	155038	79276995.89	79.27699589
13.6	155.614	155614	79571527.23	79.57152723
13.65	155.614	155614	79571527.23	79.57152723
13.7	155.542	155542	79534710.81	79.53471081
13.75	155.758	155758	79645160.06	79.64516006
13.8	156.55	156550	80050140.65	80.05014065
13.85	157.63	157630	80602386.91	80.60238691
13.9	158.709	158709	81154121.83	81.15412183
13.95	159.789	159789	81706368.09	81.70636809
14	161.156	161156	82405368.68	82.40536868
14.05	162.308	162308	82994431.36	82.99443136
14.1	163.46	163460	83583494.04	83.58349404
14.15	164.395	164395	84061596.12	84.06159612
14.2	165.259	165259	84503393.13	84.50339313
14.25	166.123	166123	84945190.14	84.94519014
14.3	166.915	166915	85350170.73	85.35017073
14.35	167.706	167706	85754639.98	85.75463998
14.4	167.922	167922	85865089.23	85.86508923

14.45	144.602	144602	73940660.74	73.94066074
14.5	90.907	90907	46484306.2	46.4843062
14.55	66.291	66291	33897182.2	33.8971822

Anexo C.2. Datos de UCS ensayo 2 R

Tabla 18. Datos de UCS ensayo 2 R.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Esfuerzo [Pa]	Esfuerzo [MPa]
0.1	7.126	7126	3643802.634	3.643802634
0.15	7.27	7270	3717435.468	3.717435468
0.2	7.27	7270	3717435.468	3.717435468
0.25	7.27	7270	3717435.468	3.717435468
0.3	7.342	7342	3754251.886	3.754251886
0.35	7.414	7414	3791068.303	3.791068303
0.4	7.486	7486	3827884.72	3.82788472
0.45	7.63	7630	3901517.555	3.901517555
0.5	7.774	7774	3975150.389	3.975150389
0.55	7.917	7917	4048271.885	4.048271885
0.6	8.133	8133	4158721.137	4.158721137
0.65	8.277	8277	4232353.971	4.232353971
0.7	8.565	8565	4379619.64	4.37961964
0.75	8.781	8781	4490068.892	4.490068892
0.8	9.069	9069	4637334.561	4.637334561
0.85	9.429	9429	4821416.648	4.821416648
0.9	9.789	9789	5005498.734	5.005498734
0.95	10.149	10149	5189580.821	5.189580821
1	10.509	10509	5373662.907	5.373662907
1.05	10.94	10940	5594050.072	5.594050072
1.1	11.444	11444	5851764.993	5.851764993
1.15	11.876	11876	6072663.497	6.072663497
1.2	12.38	12380	6330378.418	6.330378418
1.25	12.884	12884	6588093.339	6.588093339
1.3	13.46	13460	6882624.677	6.882624677

1.35	14.107	14107	7213461.094	7.213461094
1.4	14.827	14827	7581625.266	7.581625266
1.45	15.475	15475	7912973.022	7.912973022
1.5	16.195	16195	8281137.195	8.281137195
1.55	16.915	16915	8649301.368	8.649301368
1.6	17.706	17706	9053770.619	9.053770619
1.65	18.498	18498	9458751.209	9.458751209
1.7	19.29	19290	9863731.799	9.863731799
1.75	20.01	20010	10231895.97	10.23189597
1.8	20.945	20945	10709998.06	10.70999806
1.85	21.953	21953	11225427.9	11.2254279
1.9	22.889	22889	11704041.32	11.70404132
1.95	23.896	23896	12218959.83	12.21895983
2	24.904	24904	12734389.67	12.73438967
2.05	25.84	25840	13213003.09	13.21300309
2.1	26.919	26919	13764738.01	13.76473801
2.15	27.999	27999	14316984.27	14.31698427
2.2	29.007	29007	14832414.12	14.83241412
2.25	30.158	30158	15420965.45	15.42096545
2.3	31.238	31238	15973211.71	15.97321171
2.35	32.246	32246	16488641.56	16.48864156
2.4	33.253	33253	17003560.06	17.00356006
2.45	34.333	34333	17555806.32	17.55580632
2.5	35.341	35341	18071236.16	18.07123616
2.55	36.348	36348	18586154.66	18.58615466
2.6	37.356	37356	19101584.5	19.1015845
2.65	38.292	38292	19580197.93	19.58019793
2.7	39.299	39299	20095116.43	20.09511643
2.75	40.163	40163	20536913.44	20.53691344
2.8	41.099	41099	21015526.86	21.01552686
2.85	41.891	41891	21420507.46	21.42050746

2.9	42.61	42610	21788160.29	21.78816029
2.95	43.474	43474	22229957.3	22.2299573
3	44.266	44266	22634937.89	22.63493789
3.05	45.058	45058	23039918.48	23.03991848
3.1	45.849	45849	23444387.73	23.44438773
3.15	46.569	46569	23812551.9	23.8125519
3.2	47.217	47217	24143899.66	24.14389966
3.25	47.865	47865	24475247.41	24.47524741
3.3	48.44	48440	24769267.41	24.76926741
3.35	49.016	49016	25063798.75	25.06379875
3.4	49.52	49520	25321513.67	25.32151367
3.45	50.096	50096	25616045.01	25.61604501
3.5	50.528	50528	25836943.51	25.83694351
3.55	51.104	51104	26131474.85	26.13147485
3.6	51.536	51536	26352373.35	26.35237335
3.65	52.039	52039	26609576.94	26.60957694
3.7	52.471	52471	26830475.44	26.83047544
3.75	52.975	52975	27088190.36	27.08819036
3.8	53.407	53407	27309088.87	27.30908887
3.85	53.911	53911	27566803.79	27.56680379
3.9	54.343	54343	27787702.29	27.78770229
3.95	54.846	54846	28044905.87	28.04490587
4	55.278	55278	28265804.38	28.26580438
4.05	55.71	55710	28486702.88	28.48670288
4.1	56.142	56142	28707601.38	28.70760138
4.15	56.646	56646	28965316.3	28.9653163
4.2	57.006	57006	29149398.39	29.14939839
4.25	57.51	57510	29407113.31	29.40711331
4.3	57.941	57941	29627500.48	29.62750048
4.35	58.373	58373	29848398.98	29.84839898
4.4	58.733	58733	30032481.07	30.03248107

4.45	59.309	59309	30327012.41	30.32701241
4.5	59.741	59741	30547910.91	30.54791091
4.55	60.173	60173	30768809.41	30.76880941
4.6	60.677	60677	31026524.33	31.02652433
4.65	61.18	61180	31283727.92	31.28372792
4.7	61.54	61540	31467810	31.46781
4.75	61.9	61900	31651892.09	31.65189209
4.8	62.404	62404	31909607.01	31.90960701
4.85	62.908	62908	32167321.93	32.16732193
4.9	63.34	63340	32388220.43	32.38822043
4.95	63.844	63844	32645935.36	32.64593536
5	64.275	64275	32866322.52	32.86632252
5.05	64.779	64779	33124037.44	33.12403744
5.1	65.211	65211	33344935.94	33.34493594
5.15	65.643	65643	33565834.45	33.56583445
5.2	66.147	66147	33823549.37	33.82354937
5.25	66.651	66651	34081264.29	34.08126429
5.3	67.155	67155	34338979.21	34.33897921
5.35	67.658	67658	34596182.79	34.59618279
5.4	68.09	68090	34817081.3	34.8170813
5.45	68.594	68594	35074796.22	35.07479622
5.5	69.026	69026	35295694.72	35.29569472
5.55	69.602	69602	35590226.06	35.59022606
5.6	70.034	70034	35811124.56	35.81112456
5.65	70.537	70537	36068328.15	36.06832815
5.7	71.113	71113	36362859.48	36.36285948
5.75	71.617	71617	36620574.41	36.62057441
5.8	72.193	72193	36915105.74	36.91510574
5.85	72.697	72697	37172820.66	37.17282066
5.9	73.201	73201	37430535.59	37.43053559
5.95	73.704	73704	37687739.17	37.68773917

6	74.28	74280	37982270.51	37.98227051
6.05	74.784	74784	38239985.43	38.23998543
6.1	75.288	75288	38497700.35	38.49770035
6.15	75.864	75864	38792231.69	38.79223169
6.2	76.368	76368	39049946.61	39.04994661
6.25	76.943	76943	39343966.61	39.34396661
6.3	77.447	77447	39601681.53	39.60168153
6.35	78.023	78023	39896212.87	39.89621287
6.4	78.599	78599	40190744.2	40.1907442
6.45	79.103	79103	40448459.13	40.44845913
6.5	79.607	79607	40706174.05	40.70617405
6.55	75.36	75360	38534516.77	38.53451677
6.6	72.193	72193	36915105.74	36.91510574
6.65	71.761	71761	36694207.24	36.69420724
6.7	71.977	71977	36804656.49	36.80465649
6.75	72.769	72769	37209637.08	37.20963708
6.8	73.704	73704	37687739.17	37.68773917
6.85	75.072	75072	38387251.1	38.3872511
6.9	76.368	76368	39049946.61	39.04994661
6.95	77.735	77735	39748947.2	39.7489472
7	79.031	79031	40411642.71	40.41164271
7.05	80.326	80326	41073826.88	41.07382688
7.1	81.478	81478	41662889.56	41.66288956
7.15	82.774	82774	42325585.07	42.32558507
7.2	83.925	83925	42914136.41	42.91413641
7.25	84.789	84789	43355933.41	43.35593341
7.3	85.869	85869	43908179.67	43.90817967
7.35	86.804	86804	44386281.76	44.38628176
7.4	87.74	87740	44864895.18	44.86489518
7.45	88.676	88676	45343508.61	45.34350861
7.5	89.611	89611	45821610.69	45.82161069

7.55	90.403	90403	46226591.28	46.22659128
7.6	91.195	91195	46631571.87	46.63157187
7.65	92.059	92059	47073368.88	47.07336888
7.7	92.85	92850	47477838.13	47.47783813
7.75	93.57	93570	47846002.31	47.84600231
7.8	94.362	94362	48250982.9	48.2509829
7.85	95.154	95154	48655963.49	48.65596349
7.9	95.945	95945	49060432.74	49.06043274
7.95	96.737	96737	49465413.33	49.46541333
8	97.457	97457	49833577.5	49.8335775
8.05	98.033	98033	50128108.84	50.12810884
8.1	98.608	98608	50422128.84	50.42212884
8.15	99.4	99400	50827109.43	50.82710943
8.2	99.832	99832	51048007.93	51.04800793
8.25	100.408	100408	51342539.27	51.34253927
8.3	100.984	100984	51637070.61	51.63707061
8.35	101.631	101631	51967907.02	51.96790702
8.4	102.207	102207	52262438.36	52.26243836
8.45	102.783	102783	52556969.7	52.5569697
8.5	103.287	103287	52814684.62	52.81468462
8.55	103.935	103935	53146032.38	53.14603238
8.6	104.511	104511	53440563.72	53.44056372
8.65	104.942	104942	53660950.88	53.66095088
8.7	105.446	105446	53918665.8	53.9186658
8.75	105.878	105878	54139564.31	54.13956431
8.8	106.094	106094	54250013.56	54.25001356
8.85	105.59	105590	53992298.64	53.99229864
8.9	105.59	105590	53992298.64	53.99229864
8.95	105.662	105662	54029115.05	54.02911505
9	105.878	105878	54139564.31	54.13956431
9.05	106.454	106454	54434095.64	54.43409564

9.1	107.174	107174	54802259.82	54.80225982
9.15	107.965	107965	55206729.07	55.20672907
9.2	108.757	108757	55611709.66	55.61170966
9.25	109.621	109621	56053506.67	56.05350667
9.3	110.485	110485	56495303.67	56.49530367
9.35	111.276	111276	56899772.92	56.89977292
9.4	112.068	112068	57304753.51	57.30475351
9.45	112.86	112860	57709734.11	57.70973411
9.5	113.508	113508	58041081.86	58.04108186
9.55	114.227	114227	58408734.69	58.40873469
9.6	114.875	114875	58740082.45	58.74008245
9.65	115.595	115595	59108246.62	59.10824662
9.7	116.387	116387	59513227.21	59.51322721
9.75	117.107	117107	59881391.39	59.88139139
9.8	117.826	117826	60249044.22	60.24904422
9.85	118.474	118474	60580391.98	60.58039198
9.9	119.122	119122	60911739.73	60.91173973
9.95	119.626	119626	61169454.65	61.16945465
10	119.698	119698	61206271.07	61.20627107
10.05	119.698	119698	61206271.07	61.20627107
10.1	119.914	119914	61316720.32	61.31672032
10.15	120.417	120417	61573923.9	61.5739239
10.2	120.993	120993	61868455.24	61.86845524
10.25	121.713	121713	62236619.41	62.23661941
10.3	122.361	122361	62567967.17	62.56796717
10.35	122.937	122937	62862498.51	62.86249851
10.4	123.656	123656	63230151.34	63.23015134
10.45	124.448	124448	63635131.93	63.63513193
10.5	125.24	125240	64040112.52	64.04011252
10.55	126.032	126032	64445093.11	64.44509311
10.6	126.751	126751	64812745.95	64.81274595

10.65	127.471	127471	65180910.12	65.18091012
10.7	128.263	128263	65585890.71	65.58589071
10.75	128.839	128839	65880422.05	65.88042205
10.8	129.559	129559	66248586.22	66.24858622
10.85	130.062	130062	66505789.8	66.5057898
10.9	130.494	130494	66726688.31	66.72668831
10.95	130.782	130782	66873953.98	66.87395398
11	131.286	131286	67131668.9	67.1316689
11.05	131.862	131862	67426200.24	67.42620024
11.1	132.366	132366	67683915.16	67.68391516
11.15	132.941	132941	67977935.16	67.97793516
11.2	133.445	133445	68235650.08	68.23565008
11.25	134.093	134093	68566997.83	68.56699783
11.3	134.669	134669	68861529.17	68.86152917
11.35	135.173	135173	69119244.09	69.11924409
11.4	135.749	135749	69413775.43	69.41377543
11.45	136.108	136108	69597346.18	69.59734618
11.5	136.396	136396	69744611.85	69.74461185
11.55	136.54	136540	69818244.68	69.81824468
11.6	136.612	136612	69855061.1	69.8550611
11.65	136.828	136828	69965510.35	69.96551035
11.7	137.116	137116	70112776.02	70.11277602
11.75	137.476	137476	70296858.11	70.29685811
11.8	137.908	137908	70517756.61	70.51775661
11.85	138.412	138412	70775471.53	70.77547153
11.9	139.06	139060	71106819.29	71.10681929
11.95	139.779	139779	71474472.12	71.47447212
12	140.571	140571	71879452.71	71.87945271
12.05	141.363	141363	72284433.3	72.2844333
12.1	142.083	142083	72652597.47	72.65259747
12.15	142.586	142586	72909801.06	72.90980106

12.2	143.09	143090	73167515.98	73.16751598
12.25	143.522	143522	73388414.48	73.38841448
12.3	144.026	144026	73646129.4	73.6461294
12.35	144.53	144530	73903844.32	73.90384432
12.4	145.178	145178	74235192.08	74.23519208
12.45	145.825	145825	74566028.49	74.56602849
12.5	146.401	146401	74860559.83	74.86055983
12.55	147.121	147121	75228724.01	75.22872401
12.6	147.337	147337	75339173.26	75.33917326
12.65	145.609	145609	74455579.24	74.45557924
12.7	144.602	144602	73940660.74	73.94066074
12.75	144.386	144386	73830211.49	73.83021149
12.8	144.386	144386	73830211.49	73.83021149
12.85	144.386	144386	73830211.49	73.83021149
12.9	141.651	141651	72431698.97	72.43169897
12.95	134.885	134885	68971978.42	68.97197842
13	132.15	132150	67573465.9	67.5734659
13.05	131.862	131862	67426200.24	67.42620024
13.1	132.366	132366	67683915.16	67.68391516
13.15	133.157	133157	68088384.41	68.08838441
13.2	134.021	134021	68530181.41	68.53018141
13.25	134.381	134381	68714263.5	68.7142635
13.3	134.741	134741	68898345.59	68.89834559
13.35	135.101	135101	69082427.67	69.08242767
13.4	135.677	135677	69376959.01	69.37695901
13.45	136.036	136036	69560529.76	69.56052976
13.5	136.396	136396	69744611.85	69.74461185
13.55	137.188	137188	70149592.44	70.14959244
13.6	137.836	137836	70480940.19	70.48094019
13.65	120.705	120705	61721189.57	61.72118957
13.7	104.726	104726	53550501.63	53.55050163

13.75	98.177	98177	50201741.67	50.20174167
13.8	96.089	96089	49134065.57	49.13406557
13.85	93.21	93210	47661920.22	47.66192022
13.9	87.38	87380	44680813.1	44.6808131
13.95	85.077	85077	43503199.08	43.50319908
14	84.141	84141	43024585.66	43.02458566
14.05	84.141	84141	43024585.66	43.02458566
14.1	84.141	84141	43024585.66	43.02458566
14.15	84.717	84717	43319117	43.319117
14.2	85.437	85437	43687281.17	43.68728117
14.25	86.516	86516	44239016.09	44.23901609
14.3	87.596	87596	44791262.35	44.79126235
14.35	88.388	88388	45196242.94	45.19624294
14.4	89.539	89539	45784794.28	45.78479428
14.45	90.835	90835	46447489.79	46.44748979
14.5	91.915	91915	46999736.05	46.99973605
14.55	93.21	93210	47661920.22	47.66192022
14.6	93.858	93858	47993267.97	47.99326797
14.65	91.195	91195	46631571.87	46.63157187
14.7	82.989	82989	42435522.98	42.43552298
14.75	77.735	77735	39748947.2	39.7489472
14.8	74.568	74568	38129536.18	38.12953618
14.85	72.913	72913	37283269.92	37.28326992

Anexo C.3 Datos de UCS ensayo 3 R

Tabla 19. Datos de UCS ensayo 3 R.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Esfuerzo [Pa]	Esfuerzo [MPa]
0.05	7.917	7917	4105664.39	4.10566439
0.1	8.133	8133	4217679.486	4.217679486
0.15	8.205	8205	4255017.851	4.255017851
0.2	8.205	8205	4255017.851	4.255017851
0.25	8.277	8277	4292356.216	4.292356216
0.3	8.349	8349	4329694.581	4.329694581
0.35	8.421	8421	4367032.946	4.367032946
0.4	8.493	8493	4404371.311	4.404371311
0.45	8.493	8493	4404371.311	4.404371311
0.5	8.637	8637	4479048.041	4.479048041
0.55	8.781	8781	4553724.771	4.553724771
0.6	8.853	8853	4591063.136	4.591063136
0.65	8.925	8925	4628401.501	4.628401501
0.7	9.069	9069	4703078.231	4.703078231
0.75	9.285	9285	4815093.326	4.815093326
0.8	9.429	9429	4889770.057	4.889770057
0.85	9.717	9717	5039123.517	5.039123517
0.9	9.933	9933	5151138.612	5.151138612
0.95	10.221	10221	5300492.072	5.300492072
1	10.437	10437	5412507.167	5.412507167
1.05	10.797	10797	5599198.993	5.599198993
1.1	11.156	11156	5785372.229	5.785372229
1.15	11.516	11516	5972064.055	5.972064055
1.2	11.948	11948	6196094.245	6.196094245
1.25	12.38	12380	6420124.435	6.420124435
1.3	12.884	12884	6681492.991	6.681492991
1.35	13.316	13316	6905523.181	6.905523181
1.4	13.82	13820	7166891.736	7.166891736

1.45	14.395	14395	7465080.068	7.465080068
1.5	14.971	14971	7763786.989	7.763786989
1.55	15.691	15691	8137170.639	8.137170639
1.6	16.339	16339	8473215.925	8.473215925
1.65	16.987	16987	8809261.21	8.80926121
1.7	17.778	17778	9219464.637	9.219464637
1.75	18.57	18570	9630186.653	9.630186653
1.8	19.362	19362	10040908.67	10.04090867
1.85	20.154	20154	10451630.68	10.45163068
1.9	20.873	20873	10824495.75	10.82449575
1.95	21.809	21809	11309894.49	11.30989449
2	22.745	22745	11795293.24	11.79529324
2.05	23.68	23680	12280173.39	12.28017339
2.1	24.76	24760	12840248.87	12.84024887
2.15	25.84	25840	13400324.35	13.40032435
2.2	26.847	26847	13922542.87	13.92254287
2.25	27.999	27999	14519956.71	14.51995671
2.3	29.079	29079	15080032.19	15.08003219
2.35	30.302	30302	15714265.8	15.7142658
2.4	31.382	31382	16274341.28	16.27434128
2.45	32.606	32606	16909093.48	16.90909348
2.5	33.757	33757	17505988.74	17.50598874
2.55	34.909	34909	18103402.58	18.10340258
2.6	36.132	36132	18737636.2	18.7376362
2.65	37.284	37284	19335050.04	19.33505004
2.7	38.508	38508	19969802.24	19.96980224
2.75	39.659	39659	20566697.49	20.56669749
2.8	40.811	40811	21164111.34	21.16411134
2.85	42.035	42035	21798863.54	21.79886354
2.9	43.186	43186	22395758.79	22.39575879
2.95	44.122	44122	22881157.54	22.88115754

3	45.274	45274	23478571.38	23.47857138
3.05	46.281	46281	24000789.9	24.0007899
3.1	47.289	47289	24523527.01	24.52352701
3.15	48.225	48225	25008925.76	25.00892576
3.2	49.232	49232	25531144.28	25.53114428
3.25	50.024	50024	25941866.3	25.9418663
3.3	50.888	50888	26389926.68	26.38992668
3.35	51.679	51679	26800130.1	26.8001301
3.4	52.399	52399	27173513.75	27.17351375
3.45	53.191	53191	27584235.77	27.58423577
3.5	53.983	53983	27994957.79	27.99495779
3.55	54.559	54559	28293664.71	28.29366471
3.6	55.134	55134	28591853.04	28.59185304
3.65	55.638	55638	28853221.59	28.85322159
3.7	56.142	56142	29114590.15	29.11459015
3.75	56.646	56646	29375958.7	29.3759587
3.8	57.078	57078	29599988.89	29.59998889
3.85	57.582	57582	29861357.45	29.86135745
3.9	57.941	57941	30047530.69	30.04753069
3.95	58.373	58373	30271560.88	30.27156088
4	58.805	58805	30495591.07	30.49559107
4.05	59.165	59165	30682282.89	30.68228289
4.1	59.525	59525	30868974.72	30.86897472
4.15	59.885	59885	31055666.54	31.05566654
4.2	60.173	60173	31205020	31.20502
4.25	60.533	60533	31391711.83	31.39171183
4.3	60.893	60893	31578403.65	31.57840365
4.35	61.18	61180	31727238.53	31.72723853
4.4	61.54	61540	31913930.35	31.91393035
4.45	61.972	61972	32137960.54	32.13796054
4.5	62.332	62332	32324652.37	32.32465237

4.55	62.692	62692	32511344.19	32.51134419
4.6	63.052	63052	32698036.02	32.69803602
4.65	63.412	63412	32884727.84	32.88472784
4.7	63.7	63700	33034081.3	33.0340813
4.75	64.131	64131	33257592.9	33.2575929
4.8	64.563	64563	33481623.09	33.48162309
4.85	64.923	64923	33668314.92	33.66831492
4.9	65.355	65355	33892345.11	33.89234511
4.95	65.715	65715	34079036.94	34.07903694
5	66.147	66147	34303067.13	34.30306713
5.05	66.507	66507	34489758.95	34.48975895
5.1	66.939	66939	34713789.14	34.71378914
5.15	67.37	67370	34937300.74	34.93730074
5.2	67.802	67802	35161330.93	35.16133093
5.25	68.234	68234	35385361.12	35.38536112
5.3	68.666	68666	35609391.31	35.60939131
5.35	69.026	69026	35796083.14	35.79608314
5.4	69.458	69458	36020113.33	36.02011333
5.45	69.89	69890	36244143.52	36.24414352
5.5	70.321	70321	36467655.12	36.46765512
5.55	70.825	70825	36729023.68	36.72902368
5.6	71.329	71329	36990392.23	36.99039223
5.65	71.833	71833	37251760.79	37.25176079
5.7	72.337	72337	37513129.34	37.51312934
5.75	72.841	72841	37774497.9	37.7744979
5.8	73.417	73417	38073204.82	38.07320482
5.85	73.776	73776	38259378.06	38.25937806
5.9	74.28	74280	38520746.61	38.52074661
5.95	74.856	74856	38819453.53	38.81945353
6	75.288	75288	39043483.72	39.04348372
6.05	75.792	75792	39304852.28	39.30485228

6.1	76.368	76368	39603559.2	39.6035592
6.15	76.799	76799	39827070.8	39.8270708
6.2	77.375	77375	40125777.72	40.12577772
6.25	77.735	77735	40312469.55	40.31246955
6.3	78.383	78383	40648514.83	40.64851483
6.35	78.959	78959	40947221.75	40.94722175
6.4	79.463	79463	41208590.31	41.20859031
6.45	79.966	79966	41469440.27	41.46944027
6.5	80.542	80542	41768147.19	41.76814719
6.55	81.19	81190	42104192.48	42.10419248
6.6	81.622	81622	42328222.67	42.32822267
6.65	82.27	82270	42664267.96	42.66426796
6.7	82.774	82774	42925636.51	42.92563651
6.75	83.349	83349	43223824.84	43.22382484
6.8	83.853	83853	43485193.4	43.4851934
6.85	84.429	84429	43783900.32	43.78390032
6.9	85.005	85005	44082607.24	44.08260724
6.95	85.509	85509	44343975.79	44.34397579
7	86.084	86084	44642164.13	44.64216413
7.05	86.732	86732	44978209.41	44.97820941
7.1	87.308	87308	45276916.33	45.27691633
7.15	87.884	87884	45575623.25	45.57562325
7.2	88.46	88460	45874330.17	45.87433017
7.25	89.036	89036	46173037.09	46.17303709
7.3	89.611	89611	46471225.43	46.47122543
7.35	90.115	90115	46732593.98	46.73259398
7.4	90.763	90763	47068639.27	47.06863927
7.45	91.339	91339	47367346.19	47.36734619
7.5	91.987	91987	47703391.47	47.70339147
7.55	92.562	92562	48001579.8	48.0015798
7.6	93.138	93138	48300286.72	48.30028672

7.65	93.786	93786	48636332.01	48.63633201
7.7	94.29	94290	48897700.57	48.89770057
7.75	94.938	94938	49233745.85	49.23374585
7.8	95.513	95513	49531934.18	49.53193418
7.85	96.161	96161	49867979.47	49.86797947
7.9	96.737	96737	50166686.39	50.16668639
7.95	97.313	97313	50465393.31	50.46539331
8	97.961	97961	50801438.59	50.80143859
8.05	98.464	98464	51062288.56	51.06228856
8.1	98.968	98968	51323657.12	51.32365712
8.15	99.544	99544	51622364.04	51.62236404
8.2	100.192	100192	51958409.32	51.95840932
8.25	100.696	100696	52219777.88	52.21977788
8.3	101.2	101200	52481146.43	52.48114643
8.35	101.847	101847	52816673.13	52.81667313
8.4	102.423	102423	53115380.05	53.11538005
8.45	102.927	102927	53376748.61	53.37674861
8.5	103.503	103503	53675455.53	53.67545553
8.55	103.719	103719	53787470.62	53.78747062
8.6	103.575	103575	53712793.89	53.71279389
8.65	103.647	103647	53750132.26	53.75013226
8.7	104.007	104007	53936824.08	53.93682408
8.75	104.583	104583	54235531	54.235531
8.8	105.23	105230	54571057.7	54.5710577
8.85	105.878	105878	54907102.99	54.90710299
8.9	106.526	106526	55243148.27	55.24314827
8.95	106.742	106742	55355163.37	55.35516337
9	107.246	107246	55616531.92	55.61653192
9.05	107.75	107750	55877900.48	55.87790048
9.1	108.397	108397	56213427.17	56.21342717
9.15	109.189	109189	56624149.19	56.62414919

9.2	109.909	109909	56997532.84	56.99753284
9.25	110.701	110701	57408254.86	57.40825486
9.3	111.42	111420	57781119.92	57.78111992
9.35	112.14	112140	58154503.57	58.15450357
9.4	112.86	112860	58527887.22	58.52788722
9.45	113.652	113652	58938609.23	58.93860923
9.5	114.371	114371	59311474.3	59.3114743
9.55	115.091	115091	59684857.95	59.68485795
9.6	115.595	115595	59946226.5	59.9462265
9.65	116.315	116315	60319610.15	60.31961015
9.7	116.963	116963	60655655.44	60.65565544
9.75	117.682	117682	61028520.5	61.0285205
9.8	118.33	118330	61364565.79	61.36456579
9.85	118.978	118978	61700611.07	61.70061107
9.9	119.554	119554	61999317.99	61.99931799
9.95	119.698	119698	62073994.72	62.07399472
10	119.914	119914	62186009.82	62.18600982
10.05	120.345	120345	62409521.42	62.40952142
10.1	120.705	120705	62596213.24	62.59621324
10.15	120.777	120777	62633551.61	62.63355161
10.2	119.914	119914	62186009.82	62.18600982
10.25	117.394	117394	60879167.04	60.87916704
10.3	117.107	117107	60730332.17	60.73033217
10.35	117.394	117394	60879167.04	60.87916704
10.4	118.33	118330	61364565.79	61.36456579
10.45	119.482	119482	61961979.63	61.96197963
10.5	120.777	120777	62633551.61	62.63355161
10.55	122.073	122073	63305642.18	63.30564218
10.6	123.297	123297	63940394.39	63.94039439
10.65	124.736	124736	64686643.1	64.6866431
10.7	125.744	125744	65209380.21	65.20938021

10.75	126.823	126823	65768937.1	65.7689371
10.8	127.831	127831	66291674.21	66.29167421
10.85	128.767	128767	66777072.95	66.77707295
10.9	129.702	129702	67261953.11	67.26195311
10.95	130.494	130494	67672675.13	67.67267513
11	131.214	131214	68046058.78	68.04605878
11.05	132.006	132006	68456780.79	68.45678079
11.1	132.798	132798	68867502.81	68.86750281
11.15	133.589	133589	69277706.23	69.27770623
11.2	134.381	134381	69688428.25	69.68842825
11.25	135.173	135173	70099150.27	70.09915027
11.3	135.749	135749	70397857.19	70.39785719
11.35	136.468	136468	70770722.25	70.77072225
11.4	136.9	136900	70994752.44	70.99475244
11.45	136.828	136828	70957414.07	70.95741407
11.5	136.036	136036	70546692.06	70.54669206
11.55	135.245	135245	70136488.63	70.13648863
11.6	126.32	126320	65508087.13	65.50808713
11.65	84.573	84573	43858577.05	43.85857705
11.7	58.877	58877	30532929.43	30.53292943

Anexo C.4. Datos de UCS ensayo 1 CC

Tabla 20. Datos de UCS ensayo 1 CC.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Esfuerzo [Pa]	Esfuerzo [MPa]
0.05	6.406	6406	11356054.42	11.35605442
0.1	6.478	6478	11483690.37	11.48369037
0.15	6.55	6550	11611326.32	11.61132632
0.2	6.55	6550	11611326.32	11.61132632
0.25	6.55	6550	11611326.32	11.61132632
0.3	6.622	6622	11738962.28	11.73896228
0.35	6.694	6694	11866598.23	11.86659823
0.4	6.694	6694	11866598.23	11.86659823
0.45	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.5	6.91	6910	12249506.09	12.24950609
0.55	7.054	7054	12504778	12.504778
0.6	7.198	7198	12760049.9	12.7600499
0.65	7.342	7342	13015321.81	13.01532181
0.7	7.486	7486	13270593.72	13.27059372
0.75	7.702	7702	13653501.58	13.65350158
0.8	7.917	7917	14034636.72	14.03463672
0.85	8.133	8133	14417544.58	14.41754458
0.9	8.493	8493	15055724.34	15.05572434
0.95	8.709	8709	15438632.21	15.43863221
1	9.069	9069	16076811.97	16.07681197
1.05	9.357	9357	16587355.79	16.58735579
1.1	9.717	9717	17225535.55	17.22553555
1.15	10.077	10077	17863715.32	17.86371532
1.2	10.437	10437	18501895.09	18.50189509
1.25	10.94	10940	19393574.04	19.39357404
1.3	11.444	11444	20287025.72	20.28702572
1.35	11.876	11876	21052841.44	21.05284144
1.4	12.452	12452	22073929.06	22.07392906

1.45	12.956	12956	22967380.74	22.96738074
1.5	13.532	13532	23988468.37	23.98846837
1.55	14.036	14036	24881920.04	24.88192004
1.6	14.611	14611	25901234.95	25.90123495
1.65	15.331	15331	27177594.48	27.17759448
1.7	16.051	16051	28453954.02	28.45395402
1.75	16.771	16771	29730313.55	29.73031355
1.8	17.49	17490	31004900.36	31.00490036
1.85	18.282	18282	32408895.85	32.40889585
1.9	19.074	19074	33812891.34	33.81289134
1.95	19.866	19866	35216886.83	35.21688683
2	20.585	20585	36491473.64	36.49147364
2.05	21.377	21377	37895469.13	37.89546913
2.1	22.169	22169	39299464.62	39.29946462
2.15	22.961	22961	40703460.11	40.70346011
2.2	23.752	23752	42105682.87	42.10568287
2.25	24.256	24256	42999134.55	42.99913455
2.3	24.328	24328	43126770.5	43.1267705
2.35	24.832	24832	44020222.17	44.02022217
2.4	25.048	25048	44403130.04	44.40313004
2.45	24.76	24760	43892586.22	43.89258622
2.5	24.688	24688	43764950.27	43.76495027
2.55	24.256	24256	42999134.55	42.99913455
2.6	17.131	17131	30368493.32	30.36849332
2.65	10.581	10581	18757167	18.757167

Anexo C.5. Datos de UCS ensayo 2 CC

Tabla 21. Datos de UCS ensayo 2 CC.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Resistencia [Pa]	Resistencia [MPa]
0.05	6.622	6622	11738962.28	11.73896228
0.1	6.766	6766	11994234.18	11.99423418
0.15	6.766	6766	11994234.18	11.99423418
0.2	6.766	6766	11994234.18	11.99423418
0.25	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.3	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.35	6.91	6910	12249506.09	12.24950609
0.4	6.982	6982	12377142.04	12.37714204
0.45	7.054	7054	12504778	12.504778
0.5	7.198	7198	12760049.9	12.7600499
0.55	7.27	7270	12887685.86	12.88768586
0.6	7.342	7342	13015321.81	13.01532181
0.65	7.486	7486	13270593.72	13.27059372
0.7	7.702	7702	13653501.58	13.65350158
0.75	7.845	7845	13907000.76	13.90700076
0.8	8.061	8061	14289908.62	14.28990862
0.85	8.277	8277	14672816.48	14.67281648
0.9	8.493	8493	15055724.34	15.05572434
0.95	8.781	8781	15566268.16	15.56626816
1	9.069	9069	16076811.97	16.07681197
1.05	9.429	9429	16714991.74	16.71499174
1.1	9.789	9789	17353171.51	17.35317151
1.15	10.149	10149	17991351.27	17.99135127
1.2	10.437	10437	18501895.09	18.50189509
1.25	10.869	10869	19267710.81	19.26771081
1.3	11.3	11300	20031753.81	20.03175381
1.35	11.732	11732	20797569.53	20.79756953
1.4	12.164	12164	21563385.25	21.56338525

1.45	12.668	12668	22456836.92	22.45683692
1.5	13.172	13172	23350288.6	23.3502886
1.55	13.676	13676	24243740.27	24.24374027
1.6	14.179	14179	25135419.23	25.13541923
1.65	14.755	14755	26156506.85	26.15650685
1.7	15.403	15403	27305230.43	27.30523043
1.75	15.907	15907	28198682.11	28.19868211
1.8	16.555	16555	29347405.69	29.34740569
1.85	17.131	17131	30368493.32	30.36849332
1.9	17.274	17274	30621992.5	30.6219925
1.95	16.555	16555	29347405.69	29.34740569
2	16.555	16555	29347405.69	29.34740569
2.05	15.979	15979	28326318.06	28.32631806
2.1	14.971	14971	26539414.71	26.53941471
2.15	14.971	14971	26539414.71	26.53941471
2.2	15.043	15043	26667050.67	26.66705067
2.25	15.547	15547	27560502.34	27.56050234
2.3	16.051	16051	28453954.02	28.45395402
2.35	16.411	16411	29092133.78	29.09213378
2.4	16.555	16555	29347405.69	29.34740569
2.45	16.339	16339	28964497.83	28.96449783
2.5	14.539	14539	25773598.99	25.77359899
2.55	12.956	12956	22967380.74	22.96738074
2.6	12.092	12092	21435749.3	21.4357493
2.65	11.3	11300	20031753.81	20.03175381
2.7	10.581	10581	18757167	18.757167
2.75	9.861	9861	17480807.46	17.48080746
2.8	9.501	9501	16842627.69	16.84262769
2.85	9.357	9357	16587355.79	16.58735579
2.9	9.213	9213	16332083.88	16.33208388
2.95	9.141	9141	16204447.93	16.20444793

3	8.997	8997	15949176.02	15.94917602
3.05	8.709	8709	15438632.21	15.43863221
3.1	8.421	8421	14928088.39	14.92808839

Anexo C.6. Datos de UCS ensayo 3 CC

Tabla 22. Datos de UCS ensayo 3 CC.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Resistencia [Pa]	Resistencia [MPa]
0.05	6.622	6622	11738962.28	11.73896228
0.1	6.694	6694	11866598.23	11.86659823
0.15	6.766	6766	11994234.18	11.99423418
0.2	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.25	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.3	6.838	6838	12121870.14	12.12187014
0.35	6.91	6910	12249506.09	12.24950609
0.4	6.91	6910	12249506.09	12.24950609
0.45	7.126	7126	12632413.95	12.63241395
0.5	7.126	7126	12632413.95	12.63241395
0.55	7.27	7270	12887685.86	12.88768586
0.6	7.414	7414	13142957.76	13.14295776
0.65	7.558	7558	13398229.67	13.39822967
0.7	7.702	7702	13653501.58	13.65350158
0.75	7.917	7917	14034636.72	14.03463672
0.8	8.133	8133	14417544.58	14.41754458
0.85	8.349	8349	14800452.44	14.80045244
0.9	8.637	8637	15310996.25	15.31099625
0.95	8.853	8853	15693904.11	15.69390411
1	9.141	9141	16204447.93	16.20444793
1.05	9.501	9501	16842627.69	16.84262769
1.1	9.861	9861	17480807.46	17.48080746
1.15	10.221	10221	18118987.23	18.11898723
1.2	10.509	10509	18629531.04	18.62953104

1.25	11.012	11012	19521209.99	19.52120999
1.3	11.372	11372	20159389.76	20.15938976
1.35	11.804	11804	20925205.48	20.92520548
1.4	12.308	12308	21818657.16	21.81865716
1.45	12.74	12740	22584472.88	22.58447288
1.5	13.244	13244	23477924.55	23.47792455
1.55	13.82	13820	24499012.18	24.49901218
1.6	14.251	14251	25263055.18	25.26305518
1.65	14.827	14827	26284142.81	26.28414281
1.7	15.619	15619	27688138.3	27.6881383
1.75	16.195	16195	28709225.92	28.70922592
1.8	16.915	16915	29985585.46	29.98558546
1.85	17.562	17562	31132536.32	31.13253632
1.9	18.354	18354	32536531.81	32.53653181
1.95	19.146	19146	33940527.29	33.94052729
2	19.866	19866	35216886.83	35.21688683
2.05	20.585	20585	36491473.64	36.49147364
2.1	21.377	21377	37895469.13	37.89546913
2.15	22.313	22313	39554736.52	39.55473652
2.2	23.177	23177	41086367.97	41.08636797
2.25	24.04	24040	42616226.69	42.61622669
2.3	24.832	24832	44020222.17	44.02022217
2.35	24.976	24976	44275494.08	44.27549408
2.4	24.904	24904	44147858.13	44.14785813
2.45	24.904	24904	44147858.13	44.14785813
2.5	25.048	25048	44403130.04	44.40313004
2.55	24.976	24976	44275494.08	44.27549408
2.6	24.112	24112	42743862.64	42.74386264
2.65	20.729	20729	36746745.55	36.74674555
2.7	16.771	16771	29730313.55	29.73031355
2.75	15.763	15763	27943410.2	27.9434102

2.8	15.619	15619	27688138.3	27.6881383
2.85	15.475	15475	27432866.39	27.43286639
2.9	15.331	15331	27177594.48	27.17759448
2.95	13.532	13532	23988468.37	23.98846837
3	8.925	8925	15821540.07	15.82154007

Anexo C.7. Datos de UCS ensayo 4 CC

Tabla 23. Datos de UCS ensayo 4 CC.

Hora [sec]	Carga [kN]	Carga [N]	Resistencia [Pa]	Resistencia [MPa]
0.05	7.126	7126	12632413.95	12.63241395
0.1	7.198	7198	12760049.9	12.7600499
0.15	7.27	7270	12887685.86	12.88768586
0.2	7.27	7270	12887685.86	12.88768586
0.25	7.27	7270	12887685.86	12.88768586
0.3	7.342	7342	13015321.81	13.01532181
0.35	7.414	7414	13142957.76	13.14295776
0.4	7.486	7486	13270593.72	13.27059372
0.45	7.486	7486	13270593.72	13.27059372
0.5	7.702	7702	13653501.58	13.65350158
0.55	7.774	7774	13781137.53	13.78113753
0.6	7.917	7917	14034636.72	14.03463672
0.65	8.061	8061	14289908.62	14.28990862
0.7	8.205	8205	14545180.53	14.54518053
0.75	8.421	8421	14928088.39	14.92808839
0.8	8.565	8565	15183360.3	15.1833603
0.85	8.781	8781	15566268.16	15.56626816
0.9	9.069	9069	16076811.97	16.07681197
0.95	9.285	9285	16459719.83	16.45971983
1	9.501	9501	16842627.69	16.84262769
1.05	9.789	9789	17353171.51	17.35317151
1.1	10.077	10077	17863715.32	17.86371532

1.15	10.437	10437	18501895.09	18.50189509
1.2	10.797	10797	19140074.86	19.14007486
1.25	11.084	11084	19648845.95	19.64884595
1.3	11.444	11444	20287025.72	20.28702572
1.35	11.732	11732	20797569.53	20.79756953
1.4	12.164	12164	21563385.25	21.56338525
1.45	12.596	12596	22329200.97	22.32920097
1.5	13.028	13028	23095016.69	23.09501669
1.55	13.388	13388	23733196.46	23.73319646
1.6	13.892	13892	24626648.13	24.62664813
1.65	14.179	14179	25135419.23	25.13541923
1.7	14.467	14467	25645963.04	25.64596304
1.75	14.899	14899	26411778.76	26.41177876
1.8	15.187	15187	26922322.57	26.92232257
1.85	15.259	15259	27049958.53	27.04995853
1.9	14.611	14611	25901234.95	25.90123495
1.95	14.323	14323	25390691.13	25.39069113
2	14.323	14323	25390691.13	25.39069113
2.05	14.755	14755	26156506.85	26.15650685
2.1	15.187	15187	26922322.57	26.92232257
2.15	15.547	15547	27560502.34	27.56050234
2.2	15.907	15907	28198682.11	28.19868211
2.25	16.195	16195	28709225.92	28.70922592
2.3	16.339	16339	28964497.83	28.96449783
2.35	16.339	16339	28964497.83	28.96449783
2.4	16.267	16267	28836861.88	28.83686188
2.45	16.267	16267	28836861.88	28.83686188
2.5	16.267	16267	28836861.88	28.83686188
2.55	16.483	16483	29219769.74	29.21976974
2.6	16.771	16771	29730313.55	29.73031355
2.65	17.059	17059	30240857.36	30.24085736

2.7	17.274	17274	30621992.5	30.6219925
2.75	17.418	17418	30877264.41	30.87726441
2.8	17.418	17418	30877264.41	30.87726441
2.85	17.418	17418	30877264.41	30.87726441
2.9	16.483	16483	29219769.74	29.21976974
2.95	14.827	14827	26284142.81	26.28414281
3	14.036	14036	24881920.04	24.88192004
3.05	13.82	13820	24499012.18	24.49901218
3.1	13.532	13532	23988468.37	23.98846837
3.15	13.172	13172	23350288.6	23.3502886
3.2	12.812	12812	22712108.83	22.71210883
3.25	12.596	12596	22329200.97	22.32920097
3.3	12.308	12308	21818657.16	21.81865716
3.35	12.02	12020	21308113.34	21.30811334
3.4	11.588	11588	20542297.62	20.54229762
3.45	11.3	11300	20031753.81	20.03175381
3.5	10.94	10940	19393574.04	19.39357404
3.55	10.797	10797	19140074.86	19.14007486
3.6	10.653	10653	18884802.95	18.88480295
3.65	10.509	10509	18629531.04	18.62953104
3.7	10.437	10437	18501895.09	18.50189509
3.75	10.437	10437	18501895.09	18.50189509
3.8	10.365	10365	18374259.14	18.37425914
3.85	9.645	9645	17097899.6	17.0978996
3.9	8.997	8997	15949176.02	15.94917602
3.95	8.565	8565	15183360.3	15.1833603

Anexo C.8. Resultados de ensayos UCS en laboratorio

Tabla 24. Resultados de ensayos UCS en laboratorio.

Ensayo	Modo de falla	Carga máxima [kN]	Deformación vertical [mm]	UCS laboratorio [MPa]	E laboratorio [GPa]	ϵ laboratorio	Número de fragmentos
1R	Extensión múltiple	167.92 2	1.09	85.865	7.389	0.0116	3 , 4
2R	Fracturamiento múltiple	147.33 7	1.14	75.339	4.381	0.0171	5 , 6
3R	Corte simple	136.9	0.71	70.994	7.999	0.0088	2
1CC	Extensión simple	25.048	0.385	44.403	5.933	0.0074	2 , 3
2CC	Extensión simple	17.274	0.58	30.621	2.771	0.0110	2
3CC	Fracturamiento múltiple	25.048	0.48	44.403	4.722	0.0094	4
4CC	Extensión simple	17.418	0.95	30.877	1.675	0.0184	2 , 3



Anexo D. Tablas de parámetros usados para estudiar la influencia de los parámetros en el valor de UCS y deformación unitaria

Anexo D.1. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle

Tabla 25. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle.

ID	Ensayo Esys- Particle	Ensayo laboratorio	Distribución [m]	E real [Pa]	E modelo
1	1	R	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
2	2	R	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
3	3	R	0.001085- 0.002375	1E+11	100000
4	4	R	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
5	5	R	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
6	6	R	0.001085- 0.002375	1E+11	100000
7	7	R	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
8	8	R	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
9	9	R	0.001085- 0.002375	1E+11	100000
10	1	CC	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
11	2	CC	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
12	3	CC	0.001085- 0.002375	1E+11	100000

13	4	CC	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
14	5	CC	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
15	6	CC	0.001085- 0.002375	1E+11	100000
16	7	CC	0.001085- 0.002375	1000000000	1000
17	8	CC	0.001085- 0.002375	10000000000	10000
18	9	CC	0.001085- 0.002375	1E+11	100000

Anexo D.2. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación)

Tabla 26. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación)

C real [Pa]	C modelo	ϕ	ν	μ_d	μ_e	Viscosidad
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
10000000	10	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
10000000	10	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
10000000	10	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
100000000	100	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
100000000	100	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
100000000	100	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
1000000	1	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
10000000	10	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1
10000000	10	0.809784033	0.24	0.3	0.5	0.1

0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05
0.0026	0.003880597	0.00108	1.085	0.00237	2.375	0.4568421
		5		5		05

Anexo D.4. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación)

Tabla 28. Parámetros y resultados de ensayos UCS en ESyS-Particle (continuación)

Comprobación Rmin/Rmax > 1/10	Relación dimensión muestra - Rmax	Comprobación dimensiones de la prueba < Rmax	Time step increment	UCS modelo [MPa]	Deformación unitaria modelo	E macroscopico [GPa]
VERDADERO	118.75	VERDADERO	0.0001365 43	1.226499	0.001505	0.81494950 2
VERDADERO	118.75	VERDADERO	4.31786E- 05	1.276782	0.000157	8.13236942 7
VERDADERO	118.75	VERDADERO	1.36543E- 05	1.406722	0.000017	82.7483529 4

VERDADER	118.75	VERDADER	0.0001365	12.33929	0.014079	0.87643291
O		O	43	9		4
VERDADER	118.75	VERDADER	4.31786E-	12.10898	0.001459	8.29951062
O		O	05	6		4
VERDADER	118.75	VERDADER	1.36543E-	12.15849	0.000152	79.9901118
O		O	05	7		4
VERDADER	118.75	VERDADER	0.0001365	135.5817	0.129201	1.04938637
O		O	43	69		5
VERDADER	118.75	VERDADER	4.31786E-	119.2135	0.013511	8.82344156
O		O	05	19		6
VERDADER	118.75	VERDADER	1.36543E-	120.7700	0.001457	82.8895360
O		O	05	54		3
VERDADER	118.75	VERDADER	0.0001365	1.35301	0.001649	0.82050333
O		O	43			5
VERDADER	118.75	VERDADER	4.31786E-	1.409622	0.000157	8.97848407
O		O	05			6
VERDADER	118.75	VERDADER	1.36543E-	1.488836	0.000018	82.7131111
O		O	05			1
VERDADER	118.75	VERDADER	0.0001365	14.31257	0.015364	0.93156593
O		O	43	9		3
VERDADER	118.75	VERDADER	4.31786E-	13.76385	0.001547	8.89712669
O		O	05	5		7
VERDADER	118.75	VERDADER	1.36543E-	14.00239	0.000152	92.1210065
O		O	05	3		8
VERDADER	118.75	VERDADER	0.0001365	136.5367	0.109165	1.25073769
O		O	43	8		1
VERDADER	118.75	VERDADER	4.31786E-	130.9043	0.012208	10.7228329
O		O	05	44		
VERDADER	118.75	VERDADER	1.36543E-	134.5022	0.001492	90.1489423
O		O	05	22		6

Anexo E. Códigos utilizados en calibración

Anexo E.1. Grain_UCS.py

```

1 from gengeo import *
2 from math import *
3
4 minRadius = 1.085
5 maxRadius = 2.375
6 dGrain = 26.8000
7 hGrain = 51.6375
8 rGrain = dGrain/2
9
10 minPoint = Vector3 (-hGrain/2,-hGrain/2,-hGrain/2)
11 maxPoint = Vector3 (hGrain/2,hGrain/2,hGrain/2)
12
13 mntable = MNTable3D (
14     minPoint = minPoint,
15     maxPoint = maxPoint,
16     gridSize = 2.5*maxRadius,
17     numGroups = 1
18 )
19
20 packer = InsertGenerator3D (
21     minRadius = minRadius,
22     maxRadius = maxRadius,
23     insertFails = 100000,
24     maxIterations = 500000,
25     tolerance = 1.0e-6,
26     seed=True
27 )
28
29 grain = CylinderVol (
30     origin = Vector3(0,0,-hGrain/2),
31     axis = Vector3(0,0,1),
32     length = hGrain,
33     radius = rGrain
34 )
35
36 packer.generatePacking (
37     volume = grain,
38     ntable = mntable,
39     groupID = 0,
40     tag = 0
41 )
42
43 mntable.generateBonds (
44     groupID = 0,

```

```

45     tolerance = 1.0e-5,
46     bondID = 0
47 )
48
49 mntable.tagParticlesAlongPlane (
50     plane = Plane (Vector3(0,0,-hGrain/2),Vector3(0,0,1)),
51     distance = 2.5*maxRadius,
52     tag = 2,
53     groupID = 0
54 )
55
56 mntable.tagParticlesAlongPlane (
57     plane = Plane (Vector3(0,0,hGrain/2),Vector3(0,0,-1)),
58     distance = 2.5*maxRadius,
59     tag = 3,
60     groupID = 0
61 )
62
63 mntable.write (
64     fileName = "grain_UCS.geo",
65     outputStyle = 1
66 )
67
68 mntable.write (
69     fileName = "grain_UCS.geo.vtu",
70     outputStyle = 2
71 )
72
73 volumen_particulas = mntable.getSumVolume(groupID=0)
74 volumen_cilindro = (pi*rGrain**2)*hGrain
75 porosidad = (volumen_cilindro - volumen_particulas)/volumen_cilindro
76 razon_de_vacios = (volumen_cilindro - volumen_particulas)/ volumen_particulas
77
78 print ('Volumen de particulas es %5.3f.' % volumen_particulas)
79 print ('Porosidad es %5.3f.' % porosidad)
80 print ('Razon de vacios es %5.3f.' % razon_de_vacios)

```

Anexo E.2. UCS_Roca_B.py

```

1 #import the appropriate ESyS-Particle modules:
2 from esys.lsm import *
3 from esys.lsm.util import *
4 from esys.lsm.geometry import *
5 from WallLoader import WallLoaderRunnable
6 from Tiempo import tiempo
7 from math import *

```

```

8
9 Rmin = 1.085
10 Rmax = 2.375
11 dGrain = 26.8000
12 hGrain = 51.6375
13 rGrain = dGrain/2
14
15 modulo_young_bonds = 2200
16 cohesion_bonds = 18
17 angulo_friccion_bonds = tan(radians(40))
18 razon_poisson_bonds = 0.2
19
20 modulo_young_friccion = 2200
21 razon_poisson_friccion = 0.2
22
23 mu_dinamico = 0.4
24 mu_estatico = 0.6
25
26 k_normal = 2200
27
28 viscosidad = 0.4
29
30 Densidad = 2.6e-3
31
32 numT = 250000
33
34 porosidad = 0.458
35
36 Da_Dp = (1-porosidad)
37
38 Densidad_particula = Densidad/Da_Dp
39
40 timeStepIncrement = 0.1*sqrt(4.*Densidad*Rmin**3./3./modulo_young_bonds/Rmax)
41
42 #instantiate a simulation object:
43 sim = LsmMpi (numWorkerProcesses = 1, mpiDimList = [1,1,1])
44
45 #initialise the neighbour search algorithm:
46 sim.initNeighbourSearch (
47     particleType = "RotSphere",
48     gridSpacing = 2.5*Rmax,
49     verletDist = 0.2*Rmin
50 )
51
52 #set the number of timesteps and timestep increment:
53 sim.setNumTimeSteps (numT)
54 sim.setTimeStepSize (timeStepIncrement)

```

```

55
56 sim.readGeometry("grain_UCS.geo")
57
58 sim.setParticleDensity(
59     tag = 0,
60     mask = -1,
61     Density = Densidad_particula
62 )
63
64 sim.setParticleDensity(
65     tag = 2,
66     mask = -1,
67     Density = Densidad_particula
68 )
69
70 sim.setParticleDensity(
71     tag = 3,
72     mask = -1,
73     Density = Densidad_particula
74 )
75
76 #create a wall at the bottom of the model:
77 sim.createWall (
78     name = "bottom_wall",
79     posn = Vec3(0.0000, 0.0000, -hGrain/2),
80     normal = Vec3(0.0000, 0.0000, 1.0000)
81 )
82
83 #create a wall at the top of the model:
84 sim.createWall (
85     name = "top_wall",
86     posn = Vec3(0.0000, 0.0000, hGrain/2),
87     normal = Vec3(0.0000, 0.0000, -1.0000)
88 )
89
90 #create rotational elastic-brittle bonds between particles:
91 pp_bonds = sim.createInteractionGroup (
92     BrittleBeamPrms (
93         name="pp_bonds",
94         youngsModulus=modulo_young_bonds,
95         poissonsRatio=razon_poisson_bonds,
96         cohesion=cohesion_bonds,
97         tanAngle=angulo_friccion_bonds,
98         tag=0
99     )
100 )
101

```

```

102 #initialise frictional interactions for unbonded particles:
103 sim.createInteractionGroup (
104     FrictionPrms (
105         name="friction",
106         youngsModulus=modulo_young_friccion,
107         poissonsRatio=razon_poisson_bonds,
108         dynamicMu=mu_dinamico,
109         staticMu=mu_estatico
110     )
111 )
112
113 #create an exclusion between bonded and frictional interactions:
114 sim.createExclusion (
115     interactionName1 = "pp_bonds",
116     interactionName2 = "friction"
117 )
118
119 sim.createInteractionGroup(
120     LocalDampingPrms (
121         name='LinDamping',
122         viscosity=viscosidad
123     )
124 )
125 sim.createInteractionGroup(
126     RotLocalDampingPrms (
127         name='RotDamping',
128         viscosity=viscosidad
129     )
130 )
131
132 #add a wall loader to move the top wall:
133
134 sim.createInteractionGroup (
135     NRotSoftBondedWallPrms (
136         name = "pbw_bonds",
137         wallName = "bottom_wall",
138         normalK = k_normal,
139         shearK = 0.0,
140         particleTag = 2,
141         tagMask = -1,
142         scaling = True
143     )
144 )
145
146 sim.createInteractionGroup (
147     NRotSoftBondedWallPrms (
148         name = "ptw_bonds",

```

```

149     wallName = "top_wall",
150     normalK = k_normal,
151     shearK = 0.0,
152     particleTag = 3,
153     tagMask = -1,
154     scaling = True
155 )
156 )
157
158 wall_loader1 = WallLoaderRunnable(
159     LSMmpi = sim,
160     wallName = "top_wall",
161     vPlate = Vec3 (0.0, 0.0, -0.125),
162     startTime = 0,
163     rampTime = 50000
164 )
165 sim.addPreTimeStepRunnable (wall_loader1)
166
167
168 wall_loader2 = WallLoaderRunnable(
169     LSMmpi = sim,
170     wallName = "bottom_wall",
171     vPlate = Vec3 (0.0, 0.0, 0.125),
172     startTime = 0,
173     rampTime = 50000
174 )
175 sim.addPreTimeStepRunnable (wall_loader2)
176
177
178 sim.createCheckPointer(
179     CheckPointPrms(
180         fileNamePrefix="UCS_Roca_B",
181         beginTimeStep=0,
182         endTimeStep=numT,
183         timeStepIncr=1000
184     )
185 )
186
187 #create a FieldSaver to store number of bonds:
188 sim.createFieldSaver (
189     InteractionScalarFieldSaverPrms(
190         interactionName="pp_bonds",
191         fieldName="count",
192         fileName="nbonds.dat",
193         fileFormat="SUM",
194         beginTimeStep=0,
195         endTimeStep=numT,

```

```
196     timeStepIncr=1
197   )
198 )
199
200 #create a FieldSaver to store the total kinetic energy of the particles:
201 sim.createFieldSaver (
202   ParticleScalarFieldSaverPrms (
203     fieldName="e_kin",
204     fileName="ekin.dat",
205     fileFormat="SUM",
206     beginTimeStep=0,
207     endTimeStep=numT,
208     timeStepIncr=1
209   )
210 )
211
212 #create a FieldSaver to store potential energy stored in bonds:
213 sim.createFieldSaver (
214   InteractionScalarFieldSaverPrms (
215     interactionName="pp_bonds",
216     fieldName="potential_energy",
217     fileName="epot.dat",
218     fileFormat="SUM",
219     beginTimeStep=0,
220     endTimeStep=numT,
221     timeStepIncr=1
222   )
223 )
224
225 #create a FieldSaver to wall positions:
226 posn_saver = WallVectorFieldSaverPrms (
227   wallName=["bottom_wall", "top_wall"],
228   fieldName="Position",
229   fileName="out_Position.dat",
230   fileFormat="RAW_SERIES",
231   beginTimeStep=0,
232   endTimeStep=numT,
233   timeStepIncr=1
234 )
235 sim.createFieldSaver(posn_saver)
236
237 #create a FieldSaver to wall forces:
238 force_saver = WallVectorFieldSaverPrms (
239   wallName=["bottom_wall", "top_wall"],
240   fieldName="Force",
241   fileName="out_Force.dat",
242   fileFormat="RAW_SERIES",
```



```
243     beginTimeStep=0,  
244     endTimeStep=numT,  
245     timeStepIncr=1  
246 )  
247 sim.createFieldSaver(force_saver)  
248  
249 tiempo=tiempo(sim=sim)  
250 sim.addPostTimeStepRunnable(tiempo)  
251  
252 #execute the simulation:  
253 sim.run()
```



Anexo E.3. UCS_Roca_C.py

```

1 #import the appropriate ESyS-Particle modules:
2 from esys.lsm import *
3 from esys.lsm.util import *
4 from esys.lsm.geometry import *
5 from WallLoader import WallLoaderRunnable
6 from Tiempo import tiempo
7 from math import *
8
9 Rmin = 1.085
10 Rmax = 2.375
11 dGrain = 26.8000
12 hGrain = 51.6375
13 rGrain = dGrain/2
14
15 modulo_young_bonds = 3000
16 cohesion_bonds = 23
17 angulo_friccion_bonds = tan(radians(37))
18 razon_poisson_bonds = 0.2
19
20 modulo_young_friccion = 3000
21 razon_poisson_friccion = 0.2
22
23 mu_dinamico = 0.4
24 mu_estatico = 0.6
25
26 k_normal = 3000
27
28 viscosidad = 0.4
29
30 Densidad = 2.71e-3
31
32 numT = 250000
33
34 porosidad = 0.458
35
36 Da_Dp = (1-porosidad)
37
38 Densidad_particula = Densidad/Da_Dp
39
40 timeStepIncrement = 0.1*sqrt(4.*Densidad*Rmin**3./3./modulo_young_bonds/Rmax)
41
42 #instantiate a simulation object:
43 sim = LsmMpi (numWorkerProcesses = 1, mpiDimList = [1,1,1])
44
45 #initialise the neighbour search algorithm:

```

```

46 sim.initNeighbourSearch (
47     particleType = "RotSphere",
48     gridSpacing = 2.5*Rmax,
49     verletDist = 0.2*Rmin
50 )
51
52 #set the number of timesteps and timestep increment:
53 sim.setNumTimeSteps (numT)
54 sim.setTimeStepSize (timeStepIncrem)
55
56 sim.readGeometry("grain_UCS.geo")
57
58 sim.setParticleDensity(
59     tag = 0,
60     mask = -1,
61     Density = Densidad_particula
62 )
63
64 sim.setParticleDensity(
65     tag = 2,
66     mask = -1,
67     Density = Densidad_particula
68 )
69
70 sim.setParticleDensity(
71     tag = 3,
72     mask = -1,
73     Density = Densidad_particula
74 )
75
76 #create a wall at the bottom of the model:
77 sim.createWall (
78     name = "bottom_wall",
79     posn = Vec3(0.0000, 0.0000, -hGrain/2),
80     normal = Vec3(0.0000, 0.0000, 1.0000)
81 )
82
83 #create a wall at the top of the model:
84 sim.createWall (
85     name = "top_wall",
86     posn = Vec3(0.0000, 0.0000, hGrain/2),
87     normal = Vec3(0.0000, 0.0000, -1.0000)
88 )
89
90 #create rotational elastic-brittle bonds between particles:
91 pp_bonds = sim.createInteractionGroup (
92     BrittleBeamPrms (

```

```

93     name="pp_bonds",
94     youngsModulus=modulo_young_bonds,
95     poissonsRatio=razon_poisson_bonds,
96     cohesion=cohesion_bonds,
97     tanAngle=angulo_friccion_bonds,
98     tag=0
99 )
100 )
101
102 #initialise frictional interactions for unbonded particles:
103 sim.createInteractionGroup (
104     FrictionPrms (
105         name="friction",
106         youngsModulus=modulo_young_friccion,
107         poissonsRatio=razon_poisson_bonds,
108         dynamicMu=mu_dinamico,
109         staticMu=mu_estatico
110     )
111 )
112
113 #create an exclusion between bonded and frictional interactions:
114 sim.createExclusion (
115     interactionName1 = "pp_bonds",
116     interactionName2 = "friction"
117 )
118
119 sim.createInteractionGroup(
120     LocalDampingPrms (
121         name='LinDamping',
122         viscosity=viscosidad
123     )
124 )
125 sim.createInteractionGroup(
126     RotLocalDampingPrms (
127         name='RotDamping',
128         viscosity=viscosidad
129     )
130 )
131
132 #add a wall loader to move the top wall:
133
134 sim.createInteractionGroup (
135     NRotSoftBondedWallPrms (
136         name = "pbw_bonds",
137         wallName = "bottom_wall",
138         normalK = k_normal,
139         shearK = 0.0,

```

```
140     particleTag = 2,
141     tagMask = -1,
142     scaling = True
143 )
144 )
145
146 sim.createInteractionGroup (
147     NRotSoftBondedWallPrms (
148         name = "ptw_bonds",
149         wallName = "top_wall",
150         normalK = k_normal,
151         shearK = 0.0,
152         particleTag = 3,
153         tagMask = -1,
154         scaling = True
155     )
156 )
157
158 wall_loader1 = WallLoaderRunnable(
159     LsmMpi = sim,
160     wallName = "top_wall",
161     vPlate = Vec3 (0.0, 0.0, -0.125),
162     startTime = 0,
163     rampTime = 50000
164 )
165 sim.addPreTimeStepRunnable (wall_loader1)
166
167
168 wall_loader2 = WallLoaderRunnable(
169     LsmMpi = sim,
170     wallName = "bottom_wall",
171     vPlate = Vec3 (0.0, 0.0, 0.125),
172     startTime = 0,
173     rampTime = 50000
174 )
175 sim.addPreTimeStepRunnable (wall_loader2)
176
177
178 sim.createCheckPointer(
179     CheckPointPrms(
180         fileNamePrefix="UCS_Roca_C",
181         beginTimeStep=0,
182         endTimeStep=numT,
183         timeStepIncr=1000
184     )
185 )
186
```

```
187 #create a FieldSaver to store number of bonds:
188 sim.createFieldSaver (
189     InteractionScalarFieldSaverPrms (
190         interactionName="pp_bonds",
191         fieldName="count",
192         fileName="nbonds.dat",
193         fileFormat="SUM",
194         beginTimeStep=0,
195         endTimeStep=numT,
196         timeStepIncr=1
197     )
198 )
199
200 #create a FieldSaver to store the total kinetic energy of the particles:
201 sim.createFieldSaver (
202     ParticleScalarFieldSaverPrms (
203         fieldName="e_kin",
204         fileName="ekin.dat",
205         fileFormat="SUM",
206         beginTimeStep=0,
207         endTimeStep=numT,
208         timeStepIncr=1
209     )
210 )
211
212 #create a FieldSaver to store potential energy stored in bonds:
213 sim.createFieldSaver (
214     InteractionScalarFieldSaverPrms (
215         interactionName="pp_bonds",
216         fieldName="potential_energy",
217         fileName="epot.dat",
218         fileFormat="SUM",
219         beginTimeStep=0,
220         endTimeStep=numT,
221         timeStepIncr=1
222     )
223 )
224
225 #create a FieldSaver to wall positions:
226 posn_saver = WallVectorFieldSaverPrms (
227     wallName=["bottom_wall", "top_wall"],
228     fieldName="Position",
229     fileName="out_Position.dat",
230     fileFormat="RAW_SERIES",
231     beginTimeStep=0,
232     endTimeStep=numT,
233     timeStepIncr=1
```

```
234 )
235 sim.createFieldSaver(posn_saver)
236
237 #create a FieldSaver to wall forces:
238 force_saver = WallVectorFieldSaverPrms(
239     wallName=["bottom_wall", "top_wall"],
240     fieldName="Force",
241     fileName="out_Force.dat",
242     fileFormat="RAW_SERIES",
243     beginTimeStep=0,
244     endTimeStep=numT,
245     timeStepIncr=1
246 )
247 sim.createFieldSaver(force_saver)
248
249 tiempo=tiempo(sim=sim)
250 sim.addPostTimeStepRunnable(tiempo)
251
252 #execute the simulation:
253 sim.run()
```



Anexo E.4. WallLoader.py

```

1 #WallLoader.py: A Runnable for moving walls in ESyS-Particle simulations
2 #     Author: D. Weatherley
3 #     Date: 28 December 2008
4 #     Organisation: ESSCC, University of Queensland
5 #     (C) All rights reserved, 2008.
6 #
7 #
8 #import the division module for compatibility between Python 2 and Python 3
9 from future import division
10 #import the appropriate ESyS-Particle modules:
11 from esys.lsm import *
12 from esys.lsm.util import *
13
14 #This script implements a Runnable designed to move a wall at a specified
15 #speed. The Runnable also implements initial acceleration of the wall
16 #from zero to the desired speed as well as an optional initial idle
17 #period during which the wall does not move.
18
19 class WallLoaderRunnable (Runnable):
20     def __init__ (self,
21                 LsmMpi=None,
22                 wallName=None,
23                 vPlate=Vec3(0,0,0),
24                 startTime=0,
25                 rampTime = 200):
26         """
27         Subroutine to initialise the Runnable and store parameter values.
28         """
29         Runnable.__init__(self)
30         self.sim = LsmMpi
31         self.wallName = wallName
32         self.Vplate = vPlate
33         self.dt = self.sim.getTimeStepSize()
34         self.rampTime = rampTime
35         self.startTime = startTime
36         self.Nt = 0
37
38     def run (self):
39         """
40         Subroutine to move the specified wall. After self.startTime
41         timesteps, the speed of the wall increases linearly over
42         self.rampTime timesteps until the desired wall speed is achieved.
43         Thereafter the wall is moved at that speed.
44         """
45         if (self.Nt >= self.startTime):

```



```

46
47     #compute the slowdown factor if still accelerating the wall:
48     if (self.Nt < (self.startTime + self.rampTime)):
49         f = float(self.Nt - self.startTime) / float(self.rampTime)
50     else:
51         f = 1.0
52
53     #compute the amount by which to move the wall this timestep:
54     Dplate = Vec3(
55         f*self.Vplate[0]*self.dt,
56         f*self.Vplate[1]*self.dt,
57         f*self.Vplate[2]*self.dt
58     )
59     #instruct the simulation to move the wall:
60     self.sim.moveWallBy (self.wallName, Dplate)
61
62     #count the number of timesteps completed thus far:
63     self.Nt += 1

```

Anexo E.5. Tiempo.py

```

1 from math import*
2 from esys.lsm import*
3 from esys.lsm.util import *
4
5
6 class tiempo (Runnable):
7     def __init__(self,
8         sim=None
9     ):
10
11         Runnable.__init__(self)
12         self.sim=sim
13
14         self.Nt=1
15
16     def run(self):
17         if (self.Nt%1000)==0:
18             print self.Nt, '/', self.sim.getNumTimeSteps(), 'Time Steps,
19 ', self.Nt*self.sim.getTimeStepSize(), '/',
20 self.sim.getNumTimeSteps()*self.sim.getTimeStepSize(), 'milisegundos,', self.sim.g
21 etNumParticles(), 'Particulas'
22         self.Nt+=1

```

Anexo E.6. *make_stress_strain_Roca_B.py*

```

1 from math import*
2
3 dGrain = 26.8000
4 hGrain = 51.6375
5 rGrain = dGrain/2
6
7 posnfile = open("out_Position.dat","r")
8 posn = posnfile.readlines()
9 posnfile.close()
10
11 forcefile = open("out_Force.dat","r")
12 force = forcefile.readlines()
13 forcefile.close()
14
15 stress_strain = []
16 for i in range (len(posn)):
17     Z_bottom = float(posn[i].split()[2])
18     Z_top = float(posn[i].split()[5])
19     F_bottom = float(force[i].split()[2])
20     F_top = float(force[i].split()[5])
21
22     stress = (F_bottom - F_top)/(pi*(rGrain**2)) # fuerza/area
23     strain = 1.0 - (Z_top - Z_bottom)/((hGrain/2)-(-hGrain/2))
24     stress_strain.append([stress, strain])
25     print stress, strain
26
27 salida = "stress strain\n"
28 for pp in stress_strain:
29     salida+="%f %f\n" % (float(pp[0]),float(pp[1]))
30
31 stress_strain_file = open("stress_strain_Roca_B.dat","w")
32 stress_strain_file.write(salida)
33 stress_strain_file.close()
34
35 stress_strain_filecsv = open("stress_strain_Roca_B.csv","w")
36 stress_strain_filecsv.write(salida)
37 stress_strain_filecsv.close()

```

Anexo F. Códigos utilizados en modelo de fragmentación secundaria

Anexo F.1. cilybat.py (Cambio de unidades físicas al archivo cilybat.msh)

```

1 from sys import argv
2 from math import *
3
4 script, filename = argv
5
6 print("Creando el archivo %r"%filename)
7
8 f1 = "cilybat.msh"
9
10 file1=open(f1,'r+')
11 lines1=file1.readlines()
12 file1.close()
13
14 nodos=[]
15 numnodos=int(lines1[1].split()[1])
16 for line in lines1[2:numnodos+1]:
17     data=line.split()
18     ID=data[0]
19     Dummy=data[1]
20     Tag=data[2]
21     X=data[3]
22     Y=data[4]
23     Z=data[5]
24     X2=float(data[3])*1000
25     Y2=float(data[4])*1000
26     Z2=float(data[5])*1000
27     nodos.append([ID, Dummy, Tag, X2, Y2, Z2])
28
29 triangulos=[]
30 numtri=int(lines1[numnodos+3].split()[1])
31 for line1 in lines1[numnodos+4:numnodos+numtri+4]:
32     data1=line1.split()
33     ID1=data1[0]
34     Tag1=data1[1]
35     P1=data1[2]
36     P2=data1[3]
37     P3=data1[4]
38     triangulos.append([ID1, Tag1, P1, P2, P3])
39
40 salida="Triangle\n"
41 salida+= "3D-Nodes\n%d\n" % (int(numnodos))
42 for nn in nodos:
43     salida += "%d %d %d %f %f %f\n" %
(int(nn[0]),int(nn[1]),int(nn[2]),float(nn[3]),float(nn[4]),float(nn[5]))

```

```

44 salida+= "Tri3\n%d\n" % (numtri)
45 for nt in triangulos:
46     salida += "%d %d %d %d %d\n" %
(int(nt[0]),int(nt[1]),int(nt[2]),int(nt[3]),int(nt[4]))
47
48 outfile=open(filename,"w")
49 outfile.write(salida)
50 outfile.close()
51
52 print("terminado")

```

Anexo F.2. Granulometría.py (cambio de unidades físicas al archivo gran+exterior.geo)

```

1 from sys import argv
2 from math import *
3
4 script, filename = argv
5
6 print("Creando el archivo %r"%filename)
7
8 f1 = "gran+exterior.geo"
9
10 file1=open(f1,'r+')
11 lines1=file1.readlines()
12 file1.close()
13
14 particulas=[]
15 numpp1=int(lines1[6].split()[0])
16 for line in lines1[7:numpp1+7]:
17     data=line.split()
18     X=data[0]
19     Y=data[1]
20     Z=data[2]
21     radio=data[3]
22     ID=data[4]
23     tag=data[5]
24     X2=float(data[0])*1000
25     Y2=float(data[1])*1000
26     Z2=float(data[2])*1000
27     radio2=float(data[3])*1000
28     particulas.append([X2, Y2, Z2, radio2, ID, tag])
29     Box=lines1[1].split()
30
encabezado=(lines1[0].split()[1],Box[1],Box[2],Box[3],Box[4],Box[5],Box[6])
31
32 salida= "LSMGeometry %f\n" % (float(encabezado[0]))

```

```
33 salida+="BoundingBox %f %f %f %f %f %f\n" %
(float(encabezado[1])*1000,float(encabezado[2])*10000,float(encabezado[3])*1000,
float(encabezado[4])*1000,float(encabezado[5])*1000,float(encabezado[6])*1000)
34 salida+="PeriodicBoundaries 0 0 0\nDimension 3D\n"
35 salida+= "BeginParticles\nSimple\n%d\n"% (numpp1)
36 for pp in particulas:
37     salida += "%f %f %f %f %d %d\n" %
(float(pp[0]),float(pp[1]),float(pp[2]),float(pp[3]),int(pp[4]),int(pp[5]))
38 salida+= "EndParticles\nBeginConnect\n0\nEndConnect"
39
40 outfile=open(filename,"w")
41 outfile.write(salida)
42 outfile.close()
43
44 print("terminado")
```



Anexo F.3. Ensamblados.py

```
1 from gengeo import *
2 from math import *
3 from sys import argv
4
5 script, filename = argv
6
7 minRadius = 1.085
8 maxRadius = 2.375
9
10 grupos=[0,1,2,3,4,5]
11
12 minPoint = Vector3 (-200,-200,0)
13 maxPoint = Vector3 (200,200,900)
14
15 mntable = MNTable3D (
16     minPoint = minPoint,
17     maxPoint = maxPoint,
18     gridSize = 2.5*maxRadius,
19     numGroups = int(len(grupos))
20 )
21
22 packer = InsertGenerator3D (
23     minRadius = minRadius,
24     maxRadius = maxRadius,
25     insertFails = 1000,
26     maxIterations = 1000,
27     tolerance = 1.0e-6
28 )
29
30 infile = open("granulometria.geo", "r+")
31 inlines = infile.readlines()
32 infile.close()
33
34 lista_ne_grupo1 = []
35 lista_ne_grupo2 = []
36 lista_ne_grupo3 = []
37 lista_ne_grupo4 = []
38 lista_ne_grupo5 = []
39 lista_ne_grupo6 = []
40
41 lista_volumen_esferas_grupo1 = []
42 lista_volumen_esferas_grupo2 = []
43 lista_volumen_esferas_grupo3 = []
44 lista_volumen_esferas_grupo4 = []
45 lista_volumen_esferas_grupo5 = []
```

```

46 lista_volumen_esferas_grupo6 = []
47
48 def empaquetar(volumen, tabla, grupo, t):
49     packer.generatePacking (volume = volumen, ntable = tabla, groupID =
grupo, tag = t)
50
51 def listaesferas(grupo):
52     lista_s = []
53     lista = mntable.getSphereListFromGroup(groupID = grupo)
54     for s in lista:
55         Centro = s.Centre()
56         x_s = Centro.X()
57         y_s = Centro.Y()
58         z_s = Centro.Z()
59         id_s = s.Id()
60         radio_s = s.Radius()
61         tag_s = s.Tag()
62         lista_s.append([x_s, y_s, z_s, radio_s, id_s, tag_s])
63     return lista_s
64
65
66 numpp = int(inlines[6].split()[0])
67 for pp in inlines[7:numpp+7]:
68     data = pp.split()
69     X = data[0]
70     Y = data[1]
71     Z = data[2]
72     RADIO = data[3]
73     ID = data[4]
74     TAG = data[5]
75     esfera = SphereVol(
76         centre = Vector3(float(X), float(Y), float(Z)),
77         radius = float(RADIO)
78     )
79     if float(RADIO) == 4.763 and (float(ID)%6) == 0:
80         empaquetar(esfera, mntable, int(grupos[0]), 13)
81         sumvolumen1 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[0]))
82         lista_volumen_esferas_grupo1.append(sumvolumen1)
83         volumen_ensamblado_grupo1 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3
84         lista_esferas1=listaesferas(int(grupos[0]))
85         numero_esferas1 = int(len(lista_esferas1))
86         lista_ne_grupo1.append(numero_esferas1)
87     elif float(RADIO) == 6.350 and (float(ID)%6) == 0:
88         empaquetar(esfera, mntable, int(grupos[1]), 15)
89         sumvolumen2 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[1]))
90         lista_volumen_esferas_grupo2.append(sumvolumen2)
91         volumen_ensamblado_grupo2 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3

```

```

92     lista_esferas2=listaesferas(int(grupos[1]))
93     numero_esferas2 = int(len(lista_esferas2))
94     lista_ne_grupo2.append(numero_esferas2)
95     elif float(RADIO) == 9.525 and (float(ID)%6) == 0:
96         empaquetar(esfera,mntable,int(grupos[2]),17)
97         sumvolumen3 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[2]))
98         lista_volumen_esferas_grupo3.append(sumvolumen3)
99         volumen_ensamblado_grupo3 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3
100        lista_esferas3=listaesferas(int(grupos[2]))
101        numero_esferas3 = int(len(lista_esferas3))
102        lista_ne_grupo3.append(numero_esferas3)
103        elif float(RADIO) == 11.113 and (float(ID)%6) == 0:
104            empaquetar(esfera,mntable,int(grupos[3]),19)
105            sumvolumen4 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[3]))
106            lista_volumen_esferas_grupo4.append(sumvolumen4)
107            volumen_ensamblado_grupo4 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3
108            lista_esferas4=listaesferas(int(grupos[3]))
109            numero_esferas4 = int(len(lista_esferas4))
110            lista_ne_grupo4.append(numero_esferas4)
111            elif float(RADIO) == 12.700 and (float(ID)%6) == 0:
112                empaquetar(esfera,mntable,int(grupos[4]),21)
113                sumvolumen5 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[4]))
114                lista_volumen_esferas_grupo5.append(sumvolumen5)
115                volumen_ensamblado_grupo5 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3
116                lista_esferas5=listaesferas(int(grupos[4]))
117                numero_esferas5 = int(len(lista_esferas5))
118                lista_ne_grupo5.append(numero_esferas5)
119                elif float(RADIO) == 14.287 and (float(ID)%6) == 0:
120                    empaquetar(esfera,mntable,int(grupos[5]),23)
121                    sumvolumen6 = mntable.getSumVolume(groupID = int(grupos[5]))
122                    lista_volumen_esferas_grupo6.append(sumvolumen6)
123                    volumen_ensamblado_grupo6 = 4./3.*pi*float(RADIO)**3
124                    lista_esferas6=listaesferas(int(grupos[5]))
125                    numero_esferas6 = int(len(lista_esferas6))
126                    lista_ne_grupo6.append(numero_esferas6)
127
128 def generarbonds(grupoid,tolerancia,bondsid):
129     mntable.generateBonds(
130         groupID = grupoid,
131         tolerance = tolerancia,
132         bondID = bondsid
133     )
134
135 for i in grupos:
136     generarbonds(i,1.0e-5,30)
137
138 mntable.write (

```



```
139     fileName = "conglomerados.geo",
140     outputStyle = 1
141 )
142
143 mntable.write (
144     fileName = "conglomerados.geo.vtu",
145     outputStyle = 2
146 )
147
148 print("Creando el archivo %r"%filename)
149
150 confile = open("conglomerados.geo",'r+')
151 conlines = confile.readlines()
152 confile.close()
153
154 particulas = []
155 numppcon = int(conlines[6].split()[0])
156 for ppcon in conlines[7:numppcon+7]:
157     datacon = ppcon.split()
158     Xcon = datacon[0]
159     Ycon = datacon[1]
160     Zcon = datacon[2]
161     radiocon = datacon[3]
162     IDcon = datacon[4]
163     tagcon = datacon[5]
164     particulas.append([Xcon, Ycon, Zcon, radiocon, IDcon, tagcon])
165
166 numcon=int(len(particulas))
167 print("numero de particulas total en conglomerados es: %r"%numcon)
168
169 lastIDcon= int(IDcon)
170 print("ultimo ID conglomerados: %r"%lastIDcon)
171 print(lastIDcon)
172
173 bonds = []
174 numbonds = int(conlines[numppcon+9].split()[0])
175 print("numero de bonds es: %r"%numbonds)
176 for bns in conlines[numppcon+10:numbonds+numppcon+10]:
177     datosbns = bns.split()
178     ID1bns = datosbns[0]
179     ID2bns = datosbns[1]
180     BondsTag = datosbns[2]
181     bonds.append([ID1bns, ID2bns, BondsTag])
182
183 print(int(len(bonds)))
184
185 lista_particulas_id_impar = []
```

```

186
187 for pp in inlines[7:numpp+7]:
188     datai = pp.split()
189     Xi = datai[0]
190     Yi = datai[1]
191     Zi = datai[2]
192     radioi = datai[3]
193     IDi = datai[4]
194     tagi = datai[5]
195     NEWIDi = int(ID)+lastIDcon
196     volumenpp = (4/3)*pi*(float(radioi))**3
197     if float(radioi) == 3.175:
198         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
199         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
200     elif float(radioi) == 4.763 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
201         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
202         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
203     elif float(radioi) == 6.350 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
204         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
205         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
206     elif float(radioi) == 9.525 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
207         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
208         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
209     elif float(radioi) == 11.113 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
210         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
211         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
212     elif float(radioi) == 12.700 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
213         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
214         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
215     elif float(radioi) == 14.287 and (float(pp.split()[4]) % 6) != 0:
216         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
217         lista_particulas_id_impar.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
218     elif float(radioi) == 12:
219         particulas.append([Xi, Yi, Zi, radioi, NEWIDi, tagi])
220     Box=inlines[1].split()
221
encabezado=(inlines[0].split()[1],Box[1],Box[2],Box[3],Box[4],Box[5],Box[6])
222
223 numppimpares = int(len(lista_particulas_id_impar))
224 print("numero de particulas con ID impar: %r"%numppimpares)
225
226 numpptotal=int(len(particulas))
227 print("numero de particulas final es: %r"%numpptotal)
228
229 salida= "LSMGeometry %f\n" % (float(encabezado[0]))

```

```

230 salida+="BoundingBox %f %f %f %f %f %f\n" %
(float(encabezado[1]),float(encabezado[2]),float(encabezado[3]),float(encabezado
[4]),float(encabezado[5]),float(encabezado[6]))
231 salida+="PeriodicBoundaries 0 0 0\nDimension 3D\n"
232 salida+= "BeginParticles\nSimple\n%d\n"% (numpptotal)
233 for ppf in particulas:
234     salida += "%f %f %f %f %d %d\n" %
(float(ppf[0]),float(ppf[1]),float(ppf[2]),float(ppf[3]),int(ppf[4]),int(ppf[5])
)
235 salida+= "EndParticles\nBeginConnect\n%d\n"% (numbonds)
236 for bb in bonds:
237     salida += "%d %d %d\n" % (int(bb[0]),int(bb[1]),int(bb[2]))
238 salida+="EndConnect"
239
240 outfile=open(filename,"w")
241 outfile.write(salida)
242 outfile.close()
243
244 def listanumeroparticulas(lista):
245     lista_particulas_por_ensamblado = []
246     for i in range(len(lista)):
247         if i == 0:
248             numero_particulas_ensablado_grupo = lista[i]
249
250         elif i > 0:
251             numero_particulas_ensablado_grupo = lista[i] - lista[i-1]
252
253     lista_particulas_por_ensamblado.append(numero_particulas_ensablado_grupo)
254     return lista_particulas_por_ensamblado
255
256 lista_particulas_por_ensamblado_1 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo1)
257 lista_particulas_por_ensamblado_2 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo2)
258 lista_particulas_por_ensamblado_3 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo3)
259 lista_particulas_por_ensamblado_4 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo4)
260 lista_particulas_por_ensamblado_5 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo5)
261 lista_particulas_por_ensamblado_6 = listanumeroparticulas(lista_ne_grupo6)
262
263 def volumendeparticulasensamblado(lista):
264     lista_volumen_sumparticulas_por_ensamblado = []
265     for i in range(len(lista)):
266         if i == 0:
267             volumen_por_ensamblado = lista[i]
268
269         elif i > 0:
270             volumen_por_ensamblado = lista[i] - lista[i-1]

```

```

270
lista_volumen_sumparticulas_por_ensamblado.append(volumen_por_ensamblado)
271     return lista_volumen_sumparticulas_por_ensamblado
272
273 lista_volumen_esferas_ensamblado_1 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo1)
274 lista_volumen_esferas_ensamblado_2 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo2)
275 lista_volumen_esferas_ensamblado_3 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo3)
276 lista_volumen_esferas_ensamblado_4 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo4)
277 lista_volumen_esferas_ensamblado_5 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo5)
278 lista_volumen_esferas_ensamblado_6 =
volumendeparticulasensamblado(lista_volumen_esferas_grupo6)
279
280 def porosidad(lista, volumen):
281     lista_porosidad = []
282     for i in range(len(lista)):
283         porosidad_ensamblado = (volumen - lista[i])/volumen
284         lista_porosidad.append(porosidad_ensamblado)
285     return lista_porosidad
286
287 lista_porosidad_ensamblados_1 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_1,volumen_ensamblado_grupo1)
288 lista_porosidad_ensamblados_2 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_2,volumen_ensamblado_grupo2)
289 lista_porosidad_ensamblados_3 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_3,volumen_ensamblado_grupo3)
290 lista_porosidad_ensamblados_4 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_4,volumen_ensamblado_grupo4)
291 lista_porosidad_ensamblados_5 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_5,volumen_ensamblado_grupo5)
292 lista_porosidad_ensamblados_6 =
porosidad(lista_volumen_esferas_ensamblado_6,volumen_ensamblado_grupo6)
293
294 def densidadparticulas(densidad, lista):
295     lista_densidad_particulas = []
296     for i in range(len(lista)):
297         densidad_particulas = densidad/(1 - lista[i])
298         lista_densidad_particulas.append(densidad_particulas)
299     return lista_densidad_particulas
300
301 lista_densidad_particulas_1 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_1)

```

```

302 lista_densidad_particulas_2 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_2)
303 lista_densidad_particulas_3 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_3)
304 lista_densidad_particulas_4 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_4)
305 lista_densidad_particulas_5 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_5)
306 lista_densidad_particulas_6 = densidadparticulas(2.6e-3,
lista_porosidad_ensamblados_6)
307
308 file_ensamblados=open(filename,"r+")
309 file_ensamblados_rl=file_ensamblados.readlines()
310 file_ensamblados.close()
311
312 salida2 = "Radio Diametro Id Tag numeroparticulas volumen_ensamblado
densidad_ensamblado masa_ensamblado volumensumparticulas densidad-particulas
masa-particulas porosidad\n"
313
314 def listaconglomerados(lista1, lista2, lista3, lista4, radioensamblado, ID,
tag, volumenesnamblado, densidadensamblado):
315     lista_ensamblados = []
316     for i in range(len(lista1)):
317         lista_ensamblados.append([radioensamblado, float(radioensamblado)*2,
ID, tag, int(lista1[i]), volumenesnamblado, densidadensamblado,
float(volumenesnamblado)*float(densidadensamblado), float(lista2[i]),
float(lista3[i]), float(lista2[i])*float(lista3[i]), float(lista4[i])])
318     return lista_ensamblados
319
320 lista_ensamblados_grupo1 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_1,
lista_volumen_esferas_ensamblado_1, lista_densidad_particulas_1,
lista_porosidad_ensamblados_1, 4.763, 0, 13, volumen_ensamblado_grupo1, 2.6e-3)
321 lista_ensamblados_grupo2 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_2,
lista_volumen_esferas_ensamblado_2, lista_densidad_particulas_2,
lista_porosidad_ensamblados_2, 6.350, 1, 15, volumen_ensamblado_grupo2, 2.6e-3)
322 lista_ensamblados_grupo3 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_3,
lista_volumen_esferas_ensamblado_3, lista_densidad_particulas_3,
lista_porosidad_ensamblados_3, 9.525, 2, 17, volumen_ensamblado_grupo3, 2.6e-3)
323 lista_ensamblados_grupo4 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_4,
lista_volumen_esferas_ensamblado_4, lista_densidad_particulas_4,
lista_porosidad_ensamblados_4, 11.113, 3, 19, volumen_ensamblado_grupo4, 2.6e-3)
324 lista_ensamblados_grupo5 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_5,

```

```

lista_volumen_esferas_ensamblado_5, lista_densidad_particulas_5,
lista_porosidad_ensamblados_5, 12.700, 4, 21, volumen_ensamblado_grupo5, 2.6e-3)
325 lista_ensamblados_grupo6 =
listaconglomerados(lista_particulas_por_ensamblado_6,
lista_volumen_esferas_ensamblado_6, lista_densidad_particulas_6,
lista_porosidad_ensamblados_6, 14.287, 5, 23, volumen_ensamblado_grupo6, 2.6e-3)
326
327 for p in lista_ensamblados_grupo1:
328     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
329
330 for p in lista_ensamblados_grupo2:
331     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
332
333 for p in lista_ensamblados_grupo3:
334     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
335
336 for p in lista_ensamblados_grupo4:
337     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
338
339 for p in lista_ensamblados_grupo5:
340     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
341
342 for p in lista_ensamblados_grupo6:
343     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(p[0]),
float(p[1]), float(p[2]), float(p[3]), float(p[4]), float(p[5]), float(p[6]),
float(p[7]), float(p[8]), float(p[9]), float(p[10]), float(p[11]))
344
345 for ppf in lista_particulas_id_impar:
346     salida2 += "%f %f %d %d %f %f %f %f %f %f %f %f\n" % (float(ppf[3]),
float(ppf[3])*2, int(ppf[4]), int(ppf[5]), 1, 4./3.*pi*float(ppf[3])**3, 2.6e-3,
(4./3.*pi*float(ppf[3])**3)*2.6e-3, 4./3.*pi*float(ppf[3])**3, 2.6e-3,
(4./3.*pi*float(ppf[3])**3)*2.6e-3, 1)
347
348
349 filee=open("parametros_ensamblados","w")
350 filee.write(salida2)
351 filee.close()

```

```
352  
353 print("Terminado")
```



Anexo F.4. Modelo_2MPa.py (modificación a Prensa.py)

```

1 from esys.lsm import *
2 from esys.lsm.util import *
3 from esys.lsm.geometry import *
4 from LHDRun import LHD
5 from WallLoader import WallLoaderRunnable
6 from PistonRun import PistonRun
7 from ColgaduraRun import colgadura
8 from Tiempo import tiempo
9 from math import *
10
11 sim = LsmMpi(numWorkerProcesses=8 , mpiDimList=[2,1,4])
12
13 # Parametros maestros
14 # tamaño particulas
15 Rmin=1.085 # mm
16 Rmax=14.287 # mm
17
18 #Gravedad
19 Gravedad=-9.810e-3 # mm/s2
20
21 #geometry file
22 GeoName='batea.geo'
23
24 modulo_young_bonds = 2200 # 2.2 GPa
25 cohesion_bonds = 18 # MPa
26 angulo_friccion_bonds = tan(radians(40))
27 razon_poisson_bonds = 0.2
28
29 #Friccion entre particulas interiores
30 modulo_young_friccion = 2200 # 2.2 GPa
31 razon_poisson_friccion = 0.2
32 mu_dinamico = 0.4
33 mu_estatico = 0.6
34
35 #repulsion con el cilindro exterior
36 k_normal_cil = 2200 # 2.2 GPa
37
38 #Viscosidad rotacional y traslacional
39 Viscosidad=2000
40
41 #Piston
42 PosnPis=Vec3(0,0,822.719306)
43
44 normalKpis=k_normal_cil
45

```



```

46 Densidad_conglomerado = 2600e-6 # g/mm3
47
48 porosidad_esfera_4 = 0.917
49 porosidad_esfera_6 = 0.346
50 porosidad_esfera_9 = 0.306
51 porosidad_esfera_11 = 0.305
52 porosidad_esfera_12 = 0.294
53 porosidad_esfera_14 = 0.290
54
55 Da_Dp_esfera_4 = (1-porosidad_esfera_4)
56 Da_Dp_esfera_6 = (1-porosidad_esfera_6)
57 Da_Dp_esfera_9 = (1-porosidad_esfera_9)
58 Da_Dp_esfera_11 = (1-porosidad_esfera_11)
59 Da_Dp_esfera_12 = (1-porosidad_esfera_12)
60 Da_Dp_esfera_14 = (1-porosidad_esfera_14)
61
62 Densidad_particula_esfera_4 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_4
63 Densidad_particula_esfera_6 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_6
64 Densidad_particula_esfera_9 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_9
65 Densidad_particula_esfera_11 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_11
66 Densidad_particula_esfera_12 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_12
67 Densidad_particula_esfera_14 = Densidad_conglomerado/Da_Dp_esfera_14
68
69 intervaloLHD = 2000 # milisegundos
70
71 pressure = 2 # MPa
72
73 # tiempo
74 Time=60000 # milisegundos de simulacion
75 TimeBckP = 0.0100 # tiempo entre check points [milisegundos]
76 TimeStepSize=
0.1*sqrt(4.*pi*Densidad_conglomerado*Rmin**3./3./modulo_young_bonds/Rmax)
77 NumTimeSteps=int(Time/TimeStepSize)
78
79 sim.initNeighbourSearch(
80     particleType="RotSphere",
81     gridSpacing=2.5*Rmax, # 2.5*maxRadius
82     verletDist=0.2*Rmin # 0.2*minRadius
83 )
84
85 # Time Steps
86 sim.setNumTimeSteps(NumTimeSteps)
87 sim.setTimeStepSize(TimeStepSize)
88
89 # importar particulas (mineral)
90 sim.readGeometry(GeoName)
91

```

```
92 # Gravedad
93 sim.createInteractionGroup(
94     GravityPrms(name="earth-gravity",
95                 acceleration=Vec3(0, 0, Gravedad)
96     )
97 )
98
99 #importar mesh
100 sim.readMesh(
101     fileName='cilybat_mm.msh',
102     meshName='paredes'
103 )
104
105 #repulsion de las paredes
106 sim.createInteractionGroup(
107     NRotElasticTriMeshPrms(
108         name='mesh_rep',
109         meshName='paredes',
110         normalK=normalKpis
111     )
112 )
113
114 # set density (aftem import particles)
115
116 sim.setParticleDensity(
117     tag = 13,
118     mask = -1,
119     Density = Densidad_particula_esfera_4
120 )
121
122 sim.setParticleDensity(
123     tag = 15,
124     mask = -1,
125     Density = Densidad_particula_esfera_6
126 )
127
128 sim.setParticleDensity(
129     tag = 17,
130     mask = -1,
131     Density = Densidad_particula_esfera_9
132 )
133
134 sim.setParticleDensity(
135     tag = 19,
136     mask = -1,
137     Density = Densidad_particula_esfera_11
138 )
```

```

139
140 sim.setParticleDensity(
141     tag = 21,
142     mask = -1,
143     Density = Densidad_particula_esfera_12
144 )
145
146 sim.setParticleDensity(
147     tag = 23,
148     mask = -1,
149     Density = Densidad_particula_esfera_14
150 )
151
152 sim.setParticleDensity(
153     tag = 12,
154     mask = -1,
155     Density = Densidad_conglomerado
156 )
157
158 sim.setParticleDensity(
159     tag = 1,
160     mask = -1,
161     Density = Densidad_conglomerado
162 )
163
164 # fijar cilindro exterior
165 sim.setParticleNonDynamic(tag=12)
166
167 #bond entre particulas con igual tag
168 pp_bonds=sim.createInteractionGroup(
169     BrittleBeamPrms(
170         name='pp_bonds',
171         youngsModulus=modulo_young_bonds,
172         poissonsRatio=razon_poisson_bonds,
173         cohesion=cohesion_bonds,
174         tanAngle=angulo_friccion_bonds,
175         tag=30
176     )
177 )
178
179 #friccion entre particulas rotacionales
180 sim.createInteractionGroup(
181     prms=FrictionPrms(
182         name="friccion",
183         youngsModulus=modulo_young_friccion,
184         poissonsRatio=razon_poisson_friccion,
185         dynamicMu=mu_dinamico,

```

```

186         staticMu=mu_estatico
187     )
188 )
189
190 sim.createExclusion(
191     interactionName1='pp_bonds',
192     interactionName2='friccion'
193 )
194
195 sim.createInteractionGroupTagged(
196     prms=FrictionPrms (
197         name="friccion_pared",
198         youngsModulus=modulo_young_friccion,
199         poissonsRatio=razon_poisson_friccion,
200         dynamicMu=mu_dinamico,
201         staticMu=mu_estatico
202     ),
203     tag1=1,
204     mask1=-1,
205     tag2=12,
206     mask2=-1
207 )
208
209 sim.createInteractionGroup(
210     LinDampingPrms (
211         name='LinDamping',
212         viscosity=Viscosidad,
213         maxIterations=100
214     )
215 )
216
217 sim.createInteractionGroup(
218     RotDampingPrms (
219         name='RotDamping',
220         viscosity=Viscosidad,
221         maxIterations=100
222     )
223 )
224
225 # crear pared piston
226 sim.createWall(
227     name='disco',
228     posn=PosnPis,
229     normal=Vec3(0,0,-1)
230 )
231
232 # indicar repulsion del piston

```

```

233 sim.createInteractionGroup(
234     prms=NRotElasticWallPrms(
235         name='piston_repel',
236         wallName='disco',
237         normalK=normalKpis
238     )
239 )
240
241 sim.createWall(
242     name='divisor',
243     posn=Vec3(0,0,0),
244     normal=Vec3(0,1,0)
245 )
246
247 plist=sim.getParticleList()
248 for pp in plist:
249     if pp.getPosn()[1]<Rmax:
250         sim.moveParticleTo(pp.getId(),Vec3(0,0,-1))
251
252 sim.createInteractionGroup(
253     prms=NRotElasticWallPrms(
254         name='divisor_repel',
255         wallName='divisor',
256         normalK=normalKpis
257     )
258 )
259
260 # check pointer
261 sim.createCheckPointer(
262     CheckPointPrms(
263         fileNamePrefix="prensa",
264         beginTimeStep=0,
265         endTimeStep=NumTimeSteps,
266         timeStepIncr=100000
267     )
268 )
269
270 # create a FieldSaver to wall positions:
271 posn_saver = WallVectorFieldSaverPrms(
272     wallName=['disco'],
273     fieldName="Position",
274     fileName="out_Position.dat",
275     fileFormat="RAW_SERIES",
276     beginTimeStep=0,
277     endTimeStep=NumTimeSteps,
278     timeStepIncr=100
279 )

```

```
280 sim.createFieldSaver(posn_saver)
281
282 # create a FieldSaver to wall forces:
283 force_saver = WallVectorFieldSaverPrms(
284     wallName=['disco'],
285     fieldName="Force",
286     fileName="out_Force.dat",
287     fileFormat="RAW_SERIES",
288     beginTimeStep=0,
289     endTimeStep=NumTimeSteps,
290     timeStepIncr=100
291 )
292 sim.createFieldSaver(force_saver)
293
294
295 sim.createFieldSaver (
296     ParticleScalarFieldSaverPrms(
297         fieldName="e_kin",
298         fileName="ekin.dat",
299         fileFormat="SUM",
300         beginTimeStep=0,
301         endTimeStep=NumTimeSteps,
302         timeStepIncr=100
303     )
304 )
305
306 sim.createFieldSaver (
307     InteractionScalarFieldSaverPrms(
308         interactionName="pp_bonds",
309         fieldName="potential_energy",
310         fileName="epot.dat",
311         fileFormat="SUM",
312         beginTimeStep=0,
313         endTimeStep=NumTimeSteps,
314         timeStepIncr=100
315     )
316 )
317
318 sim.createFieldSaver (
319     InteractionScalarFieldSaverPrms(
320         interactionName="pp_bonds",
321         fieldName="count",
322         fileName="nbonds.dat",
323         fileFormat="SUM",
324         beginTimeStep=0,
325         endTimeStep=NumTimeSteps,
326         timeStepIncr=100
```

```

327     )
328 )
329
330 # LHD Runnable
331 lhd=LHD(
332     sim=sim,
333     intervalo=intervaloLHD #milisegundos
334 )
335 sim.addPostTimeStepRunnable(lhd)
336
337 #colgadura runnable
338 colgadura=colgadura(
339     sim=sim,
340     CanonVelocity=1, #modulo en m/s
341     CanonPosn=Vec3(0,43,170),
342     CanonRadius=5,
343     CanonMass=100,
344     CanonID=999999,
345     intervaloLHD=intervaloLHD #milisegundos
346 )
347 sim.addPostTimeStepRunnable(colgadura)
348
349 # importar wall loader runnable
350 wall_loader=WallLoaderRunnable(
351     LsmMpi=sim,
352     wallName='disco',
353     vPlate=Vec3(0,0,-0.500), # m/s
354     startTime=0,
355     endTime=1000, #milisegundos
356     rampTime = 100, #milisegundos
357     pressure=pressure # MPa
358 )
359 sim.addPostTimeStepRunnable(wall_loader)
360
361 # importar piston rnnable
362 piston=PistonRun(
363     sim=sim,
364     wallName='disco',
365     wallInteractionName='piston_repel',
366     rampTime=int(float(1000/TimeStepSize)),
367     pressure=pressure, # MPa
368     startTime=int(float(1000/TimeStepSize))
369 )
370 sim.addPostTimeStepRunnable(piston)
371
372 tiempo=tiempo(sim=sim)
373 sim.addPostTimeStepRunnable(tiempo)

```

```
374  
375 # iniciar simulacion  
376 sim.run()
```

