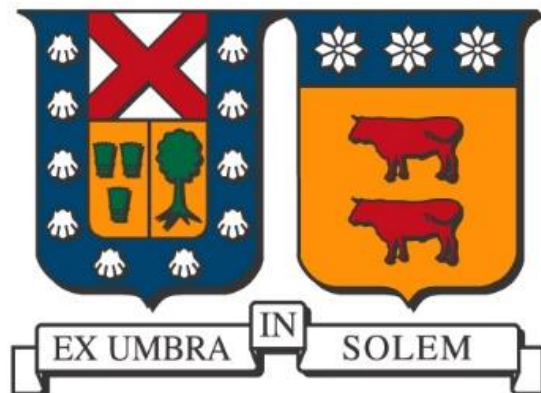


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**“MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE
MATERIAL GRANULAR COHESIVO Y SU
APLICACIÓN EN MINERÍA DE BLOCK/PANEL
CAVING MEDIANTE SOFTWARE EDEM”**

CATALINA ISABEL ORELLANA GAJARDO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS**

Profesor Guía:

Dr. Sergio Palma M.

Profesor correferente:

Mg. Kenji Basaure M.

AGOSTO 2021

*Dedicado a mi familia, quienes creyeron fielmente en mis talentos,
quienes me apoyaron sobre todo cuando yo misma empezaba a dudar.*

*Dedico especialmente mi trabajo a mi Tata que está en el cielo.
Sé que está orgulloso y plenamente feliz de cada uno de mis logros.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres, el motor de mi impulso a conocer y comprender el mundo. A mi hermana, quien no importando como me hizo reír y sentirme más feliz. A mis tías que siempre fueron un ejemplo de la fuerza y el poder que las mujeres podemos ejercer para lograr los cambios que esperamos para nuestra sociedad. Agradezco de corazón a mi Lela y a mi Tata, de quienes aprendí grandes lecciones de vida. Especialmente de mi Tata Domingo, aprendí a ser feliz con pequeñas cosas como la hora de comer y compartir.

También, quiero agradecer a mi profesor Sergio Palma quien, sin conocerlo demasiado en la modalidad presencial, fue un pilar fundamental para el desarrollo de esta memoria, brindándome el apoyo que yo necesitara. Agradezco de corazón su paciencia. Fue una etapa muy larga, dura y compleja para mí, pero él siempre estuvo ahí para apoyarme, generando ideas que llevaron a la consecución de este trabajo.

No podría terminar estos agradecimientos sin mencionar a aquellas amistades que desde el primer día estuvieron a mi lado. Estoy segura de que seguirá siendo igual desde aquí en adelante. Gracias queridos: Osmar, Soledad, Humberto, Christopher y Constanza. Me quedo con los más lindos recuerdos y les deseo todo el éxito y felicidad que merecen.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a todas las personas del departamento de minas, a mis profesores, funcionarios y ayudantes, de quienes me llevo un lindo recuerdo, en especial a la tía Leslie, quien siempre me ayudó, se preocupó por mí no solo en lo académico, sino que también en lo personal. Me llevo la siguiente reflexión: “No desesperar, todo llegará a su debido tiempo”.

RESUMEN

Los bombeos de agua-barro son repentinos ingresos de mineral fino, con gran contenido de agua en forma de barro que entran desde los puntos de extracción hacia el nivel de producción u otras aberturas en las instalaciones mineras subterráneas. Es uno de los accidentes con mayor frecuencia y más peligrosos en minería de Block/Panel Caving a causa de las infiltraciones de aguas subterráneas y la percolación de aguas lluvia, con resultados fatales.

El objetivo de este trabajo es estudiar el fenómeno de bombeo agua-barro en minería de Block/Panel Caving utilizando una modelación computacional. Así como comprender los mecanismos y características geotécnicas que tienen los medios granulares cohesivos, estudiando estos materiales con diferentes granulometrías y niveles de cohesión, por medio del modelo de cohesión JKR en el software EDEM.

En primer lugar, se desarrollaron modelaciones computacionales de asentamiento ocupando el Cono de Abrams con 3 curvas granulométricas diferentes, variando la energía superficial, midiendo el área y altura de la pila. En segundo lugar, se determinó la influencia de la geometría del cono de Abrams utilizando un cilindro. Finalmente, se realizó una modelación de la segregación de partículas, con dos tipos de tamaños con una diferencia notoria variando la cohesión.

Se determinó que a medida que la granulometría es variada, el contenido de agua que necesita el material granular para lograr una compactación será menor. Las partículas finas se encargan de rellenar los espacios vacíos, presentando una mayor atracción entre ellas debido a la energía superficial de la cohesión. En cuanto a la geometría, no se aprecia mayor efecto en cambiar el cono por un cilindro. Por último, en la segregación de partículas se puede observar que las partículas pequeñas son más susceptibles a la presencia de agua que las partículas grandes, a las que superan en número. Estas pueden generar mayores contactos, pues la energía superficial entre partículas presenta mayor fuerza de adherencia.

PALABRAS CLAVE: Block/Panel Caving, EDEM, bombeo de agua-barro, modelo de cohesión JKR, cono de Abrams, segregación.

ABSTRACT

The mud rushes are sudden inflows of fine ore, with great water content in form of mud from extraction points to production level or other apertures in subway mining installations. This is one of the more frequent and dangerous accidents in Block/Panel Caving mining because of groundwater infiltration and rainwater percolation with lethal results.

The objective of this work is to study the phenomenon of mud rushes in Block / Panel Caving mining by means of a computational modeling study, so as to understand the mechanisms and geotechnical characteristics of granular media, where these materials are studied with varied granulometries and cohesion levels by means of the JKR cohesion model in the EDEM software.

The first step was to develop computational models with the Abrams Cone with 3 different granulometric curves, by varying the surface energy, measuring the area and height of the pile. Second, the influence of the Abrams Cone geometry was determined using a cylinder. Finally, a model of particle segregation was developed, with two types of sizes with a notorious difference by changing the cohesion.

It was determined that as the granulometry is varied, the water content required by the granular material to achieve compaction will be lower. The fine particles are in charge of filling the empty spaces, presenting a greater attraction between them due to the surface energy of the cohesion. In terms of the geometry of the Abrams Cone, there is not a significant effect on the change of the geometry. And finally, in particle segregation it can be observed that smaller particles are more susceptible to the presence of water than larger particles, outnumbering them. These can generate greater contacts due to that the surface energy between particles has a higher adhesion force.

KEY WORDS: Block/Panel Caving, EDEM, mud rushes, JKR cohesion model, Abram's cone, segregation.

NOMENCLATURA

SF_f :	Factor de seguridad del fluido
FL :	Utilizando los límites de consistencia del fluido
ω :	Contenido de agua
$RD(\%)$:	Densidad relativa porcentual
e :	Relación de vacíos real
e_{min} :	Relaciones de vacío mínima
e_{max} :	Relaciones de vacío máxima
S :	Saturación
V_ω :	Volumen de agua en el material granular
V_V :	Volumen de vacíos entre las partículas sólidas
G_s :	Gravedad específica
σ' :	Esfuerzo efectivo
u :	Presión de poro
σ :	Esfuerzo total
R :	Radio de unas esferas elásticas
F_{ext} :	Fuerza externa
δ :	Desplazamiento de la esfera
a :	Radio de la zona de contacto
F_{el} :	Fuerza repulsiva.

F_{adh} :	Fuerza de adhesión
γ_S :	Tensión superficial de los sólidos
$2h$:	Espesor de puente líquido
$2a$:	Ancho
r :	Radio de curvatura
F_{cap} :	Fuerzas de capilaridad
γ_{LV} :	Tensión superficial (líquido/aire)
θ :	Ángulo de contacto del líquido sobre el sólido
d :	Diámetro
ρ_p :	Densidad bajo presión de confinamiento
P :	Presión de confinamiento
$\dot{\gamma}$:	Deformación de corte
V_w :	Velocidad
L :	Distancia entre las placas
I :	Número inercial
τ :	Esfuerzo cortante
$\mu(I)$:	Coefficiente de fricción
P :	Esfuerzo normal
ϕ :	Fracción de volumen
a_H :	Radio del círculo de contacto

F :	Carga de contacto
R :	Radio de contacto esférico
R^* :	Radio equivalente
E^* :	Módulo de elasticidad equivalente del contacto
E :	Módulo de Young
ν :	Relación de Poisson
E_A :	Energía de adhesión
a_{JKR} :	Radio de contacto crítico
E_A :	Energía de adhesión
F_C :	Valor crítico
F_{JKR} :	Fuerza normal
δ :	Solapamiento
γ :	Energía superficial
γ_c :	Tensión superficial del líquido
θ :	Ángulo de humectación
ΔA :	Energía suministrada
ΔE :	Un escalar

ABREVIATURAS

DEM:	Método de Elementos Discretos
GPR:	Ground Penetrating Radar
LHD:	Load Haul Dump
JKR:	Johnson – Kendall – Roberts
IOZ:	Intermediate Ore Zone
NC:	Condición Normal
IO:	En Observación
CR:	Riesgo Crítico
DR:	Diablo Regimiento
DMT:	Derjaguin, Müller y Toporov
ASTM:	American Society for Testing and Materials

LISTA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 General.....	15
1.2 Motivación	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo principal.....	4
1.3.2 Objetivos secundarios	4
1.4 Alcances.....	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Bombeos de agua-barro	5
2.3 Método de Block/Panel Caving	6
2.3.1 Factores asociados.....	7
2.4 Casos de estudio.....	8
2.4.1 Casos generales	8
2.4.1.1 Modelamiento numérico del flujo de agua y su aplicación en minería de Caving (Sánchez, Palma, y Castro 2016).	8
2.4.1.2 Estimación de la humedad y profundidad del agua barro en Block Caving (Briceño, Adams, y Castro 2016).	9
2.4.1.3 Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo (Garcés et al. 2016).	10
2.4.1.4 Modelado numérico del flujo de agua a través de material granular para extracciones aisladas y simultáneas en espeleología en bloque (Sánchez, Palma, y Castro 2019).	10
2.4.2 Casos de estudio en faenas mineras	11
2.4.2.1 Caso minería en Sudáfrica	11
2.4.2.2 Caso minería Indonesia.....	11
2.4.2.3 Caso minería en Australia.....	12
2.4.2.4 Caso minería Chile.....	13
2.4.2.5 Caso mina Diablo Regimiento	14
2.4.3 Conclusiones de casos de estudios	18
2.5 Mecanismos desencadenantes y advertencias del fenómeno	18
2.5.1 Agua	18
2.5.2 Perturbación	19
2.5.3 Otros mecanismos del barro	19
2.6 Medios granulares	20
2.6.1 Tipos de barro.....	21
2.6.1.1 Barro fluido.....	21
2.6.1.2 Barro viscoso	22
2.6.2 Física de medios granulares	22
2.6.2.1 Definición de medios granulares.....	22
2.6.2.2 Fuerzas de cohesión.....	24
2.6.2.3 Fuerzas de adhesión	26
2.6.2.4 Fuerzas capilares.....	28
2.6.2.5 Empaquetamiento	29
2.6.2.6 Segregación.....	31

2.7	Mecánica de contacto de adherencia	32
2.7.1	Teoría de Hertz.....	32
2.7.2	Teoría de Johnson – Kendall – Roberts.....	34
2.7.3	Hertz-Mindlin with JKR cohesión	37
2.7.4	Energía superficial.....	40
3.	METODOLOGÍA	41
3.1	Desarrollo experimental	41
3.2	Cono de Abrams	43
3.3	Caracterización del material	44
3.4	Dimensiones del modelo físico	47
3.5	Definición de parámetros físicos	50
3.6	Plan computacional.....	53
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
4.1	Distribución de tamaños	58
4.1.1	Distribución monodispersa.....	58
4.1.2	Distribución bidispersa.....	60
4.1.3	Distribución polidispersa.....	61
4.1.4	Comparativa de las distribuciones.....	63
4.2	Análisis de altura.....	64
4.3	Análisis de área.....	67
4.4	Influencia de la geometría	70
4.5	Segregación	73
4.5.1	Estado estable	73
4.5.2	Estado inestable.....	76
4.5.3	Comparación caso estable e inestable	78
5.	CONCLUSIONES.....	79
6.	RECOMENDACIONES.....	82
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	84
8.	ANEXOS	87
	ANEXO A	87
	ANEXO B.....	90
	ANEXO C	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos necesarios para formación de barro.	7
Figura 2: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 1 (Vallejos 2017).	15
Figura 3: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 2 (Vallejos 2017).	15
Figura 4: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 3 (Vallejos 2017).	16
Figura 5: Ejemplo de barro tipo fluido (izquierda) y de barro viscoso (derecha) (Jakubec 2012).	22
Figura 6: Una clasificación de material particulado en función del tamaño de partícula: coloides (barro), polvo (harina) y medios granulares (una duna de arena) (Andreotti et al. 2013).	23
Figura 7: (a) Contacto adhesivo entre dos esferas elásticas. (b) La distribución de las fuerzas repulsivas y adhesivas en la zona de contacto. Las fuerzas de atracción intermolecular crean una junta adhesiva de altura δ^* en el borde de la zona de contacto (Andreotti et al. 2013).	27
Figura 8: Se muestra un puente capilar entre dos esferas lisas en contacto (Andreotti et al. 2013).	28
Figura 9: La fuerza capilar entre dos esferas idénticas, para un rango de volúmenes de puente líquido en función de la separación de las esferas s (Andreotti et al. 2013).	29
Figura 10: Casos extremos (a) Muchas partículas gruesas y pocas finas (b) Muchas partículas finas y pocas gruesas (Andreotti et al. 2013).	30
Figura 11: Proceso de tamizado cinético (Caplan 2018).	32
Figura 12: Esfera rígida de contacto por una fuerza vertical (Johnson et al. 1971).	33
Figura 13: Esquema del área de contacto (JKR) (Johnson et al. 1971).	34
Figura 14: Ancho de contacto vs fuerza de contacto (Johnson et al. 1971).	36
Figura 15: Fuerza normal en función de la superposición normal (Johnson et al. 1971).	38
Figura 16: Esquema general del trabajo.	42

Figura 17: Configuraciones de columnas iniciales consideradas en estos experimentos (Caplan 2018).	43
Figura 18: Cono de Abrams utilizado comúnmente en pruebas de laboratorio (Vallejos 2017).	44
Figura 19: Distribución de tamaños de partículas para el estudio de segregación, partículas grises (izquierda) radio de 1,5 mm y partículas rojas (derecha) radio 5 mm (Caplan 2018).	47
Figura 20: Cono de Abrams utilizado en la modelación computacional.	47
Figura 21: Cilindro utilizado en la modelación computacional.	49
Figura 22: Estados del material granular, suelo seco (izquierda), suelo cohesivo (en medio) y suelo sobresaturado (derecha).	52
Figura 23: Secuencia del experimento computacional en Cono de Abrams para caso monodisperso, bidisperso y polidisperso en EDEM.	54
Figura 24: Secuencia del experimento computacional con cilindro en EDEM.	55
Figura 25: Configuraciones de columnas iniciales consideradas en estos experimentos de segregación, caso estable e inestable.	56
Figura 26: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución monodispersa.	58
Figura 27: Distribución monodispersa en EDEM.	59
Figura 28: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución bidispersa.	60
Figura 29: Distribución bidispersa en EDEM.	61
Figura 30: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución polidispersa.	62
Figura 31: Distribución polidispersa en EDEM.	62
Figura 32: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material con distintas distribuciones de partículas.	63
Figura 33: h/h_0 en función del número de cohesión (Coh) para distintas distribuciones de partículas.	65

Figura 34: Comparativa de h/h_0 en función del número de cohesión (Coh) del material para distintas distribuciones de partículas y radios equivalentes.	66
Figura 35: h/h_0 en función del número adimensional ψ_1	67
Figura 36: A/A_0 en función del número de cohesión (Coh) para distintas distribuciones de partículas.....	68
Figura 37: Comparativa de A/A_0 en función del número de cohesión (Coh) del material para distintas distribuciones de partículas y radios equivalentes.	69
Figura 38: A/A_0 en función del número adimensional ψ_2	70
Figura 39: Altura y área de la pila con respecto a la cohesión del material, distribución polidispersa en geometría de cilindro.	71
Figura 40: Comparación de altura y área de la pila en geometría de cono y cilindro.	72
Figura 41: Secuencia del experimento computacional en Cono de Abrams y cilindro para caso polidisperso en EDEM.	72
Figura 42: Altura y área en función de la cohesión del material (caso estable).....	74
Figura 43: Secuencia de resultados de simulaciones en un estado estable, vista planta (parte superior) y vista lateral (parte inferior).....	74
Figura 44: Altura y área en función de la cohesión del material (caso estable).....	76
Figura 45: Secuencia de resultados de simulaciones en un estado inestable, vista planta (parte superior) y vista lateral (parte inferior).	77
Figura 46: Comparación de altura y área en función de la cohesión del material.....	78
Figura 47: Plano de corte (Andreotti et al. 2013).....	87
Figura 48: Resultados de simulaciones y medidas experimentales en discos y esferas (Andreotti et al. 2013).	89
Figura 49: (a) Regímenes de flujo en función del número de inercia (Andreotti et al. 2013).	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clases de mineral de barro propuestas para mina IOZ, Freeport, Indonesia (Call & Nicholas, Freeport McMoRan, and Hydrologic Consultants, 1998).....	12
Tabla 2: Clasificación de riesgo de barro para puntos de extracción mina El Teniente (Becerra 2011).	13
Tabla 3: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 1 (Vallejos 2017).16	
Tabla 4: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 2 (Vallejos 2017).17	
Tabla 5: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 3 (Vallejos 2017).17	
Tabla 6: Distribución monodispersa y bidispersa.	45
Tabla 7: Distribución granulométrica adaptada de Castro 2017.	46
Tabla 8: Dimensiones del cono de Abrams utilizado en la modelación computacional.	48
Tabla 9: Dimensiones de la placa cuadrada utilizada en la modelación computacional.	48
Tabla 10: Dimensiones del cilindro utilizado para la comparación de geometrías.	48
Tabla 11: Dimensiones del cilindro utilizado en los estudios de segregación.	49
Tabla 12: Propiedades físicas definidas por EDEM para representar un material granular.	50
Tabla 13: Propiedades físicas definidas por EDEM para representar el material de la geometría.	53
Tabla 15: Distribución original de Castro 2017.	91
Tabla 16: Tamaño de partículas elegidos de forma intercalada y ajustados al modelo utilizado en esta investigación.	91
Tabla 17: Distribución final adaptada utilizada en esta investigación.	92
Tabla 18: Resultados de mediciones de área y altura para el caso monodisperso.....	93
Tabla 19: Resultados de mediciones de área y altura para el caso bidisperso.....	94
Tabla 20: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso.....	94
Tabla 21: Resultados de mediciones de área y altura para el caso monodisperso midiendo el error.	95
Tabla 22: Resultados de mediciones de área y altura para el caso bidisperso midiendo el error.	96

Tabla 23: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso midiendo el error.	97
Tabla 24: Error relativo promedio para altura y área de la pila.	97
Tabla 25: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso en geometría de cilindro.	98
Tabla 26: Mediciones de altura y área del caso estable de segregación.	98
Tabla 27: Mediciones de altura y área del caso inestable de segregación.	99

1. INTRODUCCIÓN

1.1 General

Actualmente la minería del futuro presenta un gran desafío producto de los costos cada vez más altos, la explotación de yacimientos más bajos y cada vez con menor ley, lo que conlleva a la necesidad de utilizar métodos de explotación masivos y de bajo costo. Además, el impacto ambiental que puedan generar dichos proyectos mineros toma mayor importancia, por lo que se está optando por una minería subterránea, en donde el impacto ambiental se ve disminuido, se puede llegar a mayores profundidades y ser más selectivos al momento de extraer el mineral.

La minería subterránea es muy importante en Chile y existe una gran cantidad de yacimientos masivos en las zonas cordilleranas del país. Uno de los métodos subterráneos más conocido y utilizado es el Block/Panel Caving el cual es utilizado en yacimientos de grandes dimensiones como lo son los pórfidos cupríferos, los cuales son depósitos de cobre de alto tonelaje y baja ley, este método permite mover grandes cantidades de tonelaje día a día, pero existen condiciones que pueden generar cierto peligro dentro de la mina.

El Block/Panel Caving es un método de minería subterránea basado en la acción de la gravedad para la fracturación y el transporte de minerales. Tiene el costo más bajo y las tasas más altas de producción de todos los métodos subterráneos (Heslop 2000; Hubert et al. 2000). La buena gestión de los riesgos es importante para garantizar la seguridad del personal y la infraestructura. Además, el Block/Panel Caving es el método de minería subterránea más seguro, no obstante, los riesgos operativos para el método incluyen estallidos de rocas, explosiones de aire y bombeos de agua-barro (Hubert et al. 2000).

Esto último riesgo se produce producto de las actividades mineras. A causa de los deshielos de glaciares, las precipitaciones de lluvia y nieve, las aguas se acumulan en las zonas subterráneas en la cordillera. Estas aguas comienzan a percolar arrastrando el material fino, pudiendo generar estos bombeos. Los bombeos de agua-barro son repentinos ingresos de mineral fino y con gran contenido de agua en forma de barro que entran violentamente desde los puntos de extracción al nivel de producción u otras aberturas en las instalaciones mineras subterráneas. Este es uno de los fenómenos con mayor frecuencia y de mayor riesgo en minas subterráneas de Block/Panel Caving de Chile y todo el mundo. Los bombeos de agua-barro se pueden convertir en graves accidentes que por definición generan daño personal o material. En

ese sentido el riesgo es alto, sin embargo, hoy en día se presentan más incidentes (sin daño) que accidentes.

La velocidad con que entra el barro tiene tal magnitud que evacuar al personal de la mina a tiempo resultaría imposible, con terribles consecuencias para la seguridad de las personas. Estos eventos han producido grandes daños tanto a personas como equipos, atrasos en la producción e incluso muertes (Butcher, Stacey, y Joughin 2000).

El método de Block/Panel Caving es altamente susceptible a los bombeos de agua-barro pues están presentes todos los elementos necesarios para que este fenómeno ocurra como lo son el material formador de barro, las perturbaciones, un punto de descarga y agua (Butcher et al. 2000).

La presente memoria tiene como finalidad estudiar los mecanismos físicos que controlan un medio granular cohesivo presente en el fenómeno de bombeo agua-barro en minería de Block/Panel Caving mediante una recopilación de material bibliográfico de investigaciones históricas. Donde se explican las condiciones y mecanismos para que ocurran estos eventos, métodos utilizados para combatirlos, cómo son evaluados los riesgos y qué características geotécnicas tienen los minerales que están relacionados con los bombeos de agua-barro. Además, para completar esta investigación se realizarán distintas modelaciones con diferentes granulometrías, todo esto variando la cantidad de finos y humedad desde un punto de extracción por medio del cono de Abrams y variaciones de este en cada una de las simulaciones para así obtener un mejor entendimiento del material granular presente en este fenómeno.

1.2 Motivación

Existen varias medidas para el control al problema de bombeos de agua-barro como realizar túneles de drenaje que trasladen el barro hacia los niveles inferiores o al exterior de la mina, limitar la altura de columna de extracción, restringir la velocidad de extracción según clasificación de puntos de extracción respecto a su humedad y cantidad de finos, estrategias de planificación donde las columnas de mineral saturado no son consideradas en la extracción, entre otras. Esta última alternativa es la que más afecta al negocio minero debido a que implica dejar grandes cantidades de mineral sin extraer, generando grandes pérdidas de reservas producto del cierre temprano de puntos de extracción. Es por esta razón que resulta tan importante y necesario analizar los mecanismos físicos que controlan este fenómeno, para comprender de mejor manera como se producen estos ingresos repentinos de agua-barro y poder

establecer medidas para su control. Por lo tanto, el resolver este problema permitiría la explotación de grandes cantidades de reservas de mineral saturado, además de minimizar la exposición del personal y daños de equipos e infraestructura en operaciones mineras.

1.3 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos planteados para el desarrollo de esta memoria de título.

1.3.1 Objetivo principal

Simular y caracterizar computacionalmente la muestra de un medio granular cohesivo usando ensayos geotécnicos aplicado al fenómeno de bombeo de agua-barro en minería de Block/Panel Caving mediante el software EDEM.

1.3.2 Objetivos secundarios

- Analizar el comportamiento de una pila de material cohesivo, midiendo la altura y el área mediante el ensayo del Cono de Abrams en un suelo seco, cohesivo y saturado.
- Determinar cómo el comportamiento del material se ve afectado por su contenedor al cambiar el cono por un cilindro.
- Estudiar el efecto de la segregación de partículas de acuerdo a su tamaño en un colapso granular ocupando un material con cohesión en aumento.

1.4 Alcances

La modelación se llevará a cabo con un modelo físico 3D a escala de laboratorio, en una simulación computacional mediante EDEM, utilizando el cono de Abrams para caracterizar la pila de mineral.

El material que será ingresado a la simulación computacional se realizará utilizando distintas curvas granulométricas definidas arbitrariamente.

Los porcentajes de humedad y cantidad de finos serán definidos arbitrariamente.

Las simulaciones se llevarán a cabo utilizando partículas perfectamente esféricas.

2. ANTECEDENTES

2.1 Introducción

Los bombeos de agua-barro es uno de los riegos operativos más complejos que pueden existir en minería subterránea, es por esta razón que cada vez es más importante su estudio y análisis para poder comprender este fenómeno y poder evitar sus consecuencias, como daños a personas o equipos, cierre temporal de faenas e incluso accidentes fatales. Frente a este problema se han tomado distintas medidas, como la construcción de túneles de drenaje, estrategias de operación y de planificación e incluso el cierre temprano de puntos de extracción dejando columnas de mineral saturado sin extraer (Butcher, Stacey, y Joughin 2005).

En este apartado se darán a conocer el concepto de bombeos de agua-barro, como está relacionado con la minería de Block/Panel Caving y que elementos están involucrados en este fenómeno. Dar a conocer las investigaciones que existen hasta la fecha y los casos en faenas mineras en donde se ha desencadenado este fenómeno. Los mecanismos que se encuentran involucrados en la activación de estos eventos y que acontecimientos pueden servir como advertencia ante un posible bombeo de agua-barro. Y finalmente, un apartado en el que se explique el comportamiento físico de los medios granulares.

2.2 Bombeos de agua-barro

Los bombeos de agua-barro son entradas repentinas y violentas de mineral fino saturado de agua en forma de barro en puntos de extracción u otras aberturas en las instalaciones mineras subterráneas. Es uno de los eventos más peligrosos y frecuentes en minas subterráneas de Block/Panel Caving de Chile y todo el mundo. La rapidez con que entra el barro es tan grande que evacuar a los trabajadores del área afectada resultaría imposible y tendría consecuencias fatales. Estos son sucesos peligrosos que han causado numerosos daños a personas y equipos, demoras de producción, dilución en la extracción, cierres de minas e incluso muertes en el pasado. Además, se cree que los incidentes correspondientes a bombeos de agua-barro que no están asociados a accidentes se asumen como sucesos comunes que por lo general no son informados (Butcher et al. 2005).

Las minas de Block/Panel Caving son propensas a la acumulación de barro en sus niveles de producción, y el barro fluye desde los puntos de extracción. Diferentes minas han desarrollado métodos para controlar las condiciones del punto de extracción y, por lo tanto, realizar una extracción segura del mineral (Vallejos 2017), pero estos eventos continúan ocurriendo y por lo cual se requiere estudiar con mayor profundidad como influye el contenido de finos y agua en la ocurrencia de un bombeo de agua-barro.

2.3 Método de Block/Panel Caving

El Block/Panel Caving o hundimiento de bloques o paneles es un método de explotación utilizado en minería subterránea en depósitos masivos con mediana o baja ley, como lo son los denominados pórfidos, los cuales presentan una gran cantidad de fracturas. Gran parte de la producción chilena de cobre provienen de pórfidos cupríferos, donde Chile posee algunos de los más grandes como El Teniente y Chuquicamata, donde este último pasó de ser una mina de rajo abierto a subterránea utilizando este método de explotación subterráneo.

El método de Block/Panel Caving consiste en desarrollar un nivel de socavación en la base del yacimiento, al cual se le llama nivel de hundimiento (UCL) y se construye un nivel de producción a cierta distancia por debajo. Se excava una disposición de aberturas llamadas bateas de extracción entre el nivel de hundimiento y el nivel de producción, y los puntos de extracción se encuentran en las bases de las bateas de extracción. Se extrae una capa de mineral horizontal del nivel de hundimiento para colapsar el yacimiento de mineral hacia arriba, y el mineral quebrado cae en las bateas y se extraen en el nivel de producción. A medida que el mineral quebrado se extrae de los puntos de extracción, el flujo de mineral continúa rompiéndose y cayendo (Douglas 1992).

El mineral debe ser tan quebradizo como sea posible para que se rompa gracias a la acción de la gravedad, lo que quiere decir que caiga por su propio peso y por la inestabilidad que genera la socavación, también es necesario que las leyes y los límites del cuerpo sean regulares, ya que el método no permite que se pueda realizar una explotación selectiva.

La diferencia entre un Block Caving y un Panel Caving se define por su secuencia de preparación, hundimiento y producción. El primer método consiste en la preparación de un bloque, su desarrollo y completo hundimiento para luego pasar a operar en régimen. El segundo, se trabaja con una pequeña

parte del bloque que cumpla con el área mínima para que se propague el hundimiento hacia la superficie, por lo que las operaciones de preparación, hundimiento y producción se realizan al mismo tiempo.

2.3.1 Factores asociados

Este método es inherentemente susceptible a la formación de barro debido a que tiene todos los 4 elementos necesarios: material formador de barro, agua, perturbaciones y puntos de descarga (Butcher et al. 2000).

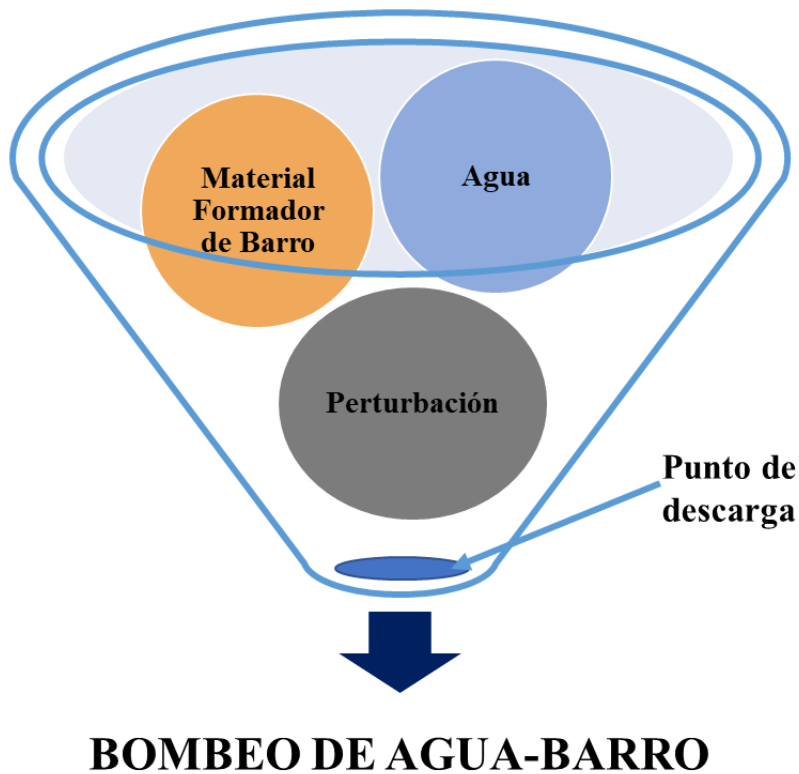


Figura 1: Elementos necesarios para formación de barro.

El barro está formado por partículas finas granulares y agua (Becerra 2011; Hubert et al. 2000; Jakubec 2012). Las partículas granulares finas provienen de la superficie o de la abrasión del mineral durante el hundimiento y el agua proviene de la superficie, producto de las lluvias o de fuentes subterráneas, como glaciares que se encuentran en la cordillera. Las perturbaciones son propias del método al extraer mineral y producir el movimiento del flujo granular desde el material quebrado producto del hundimiento hacia

los puntos de descarga. Asimismo, los puntos de descarga corresponden a los puntos de extracción en el nivel de producción, a través de los cuales el barro puede entrar en las operaciones de la mina.

Los bombeos de agua barro que se desencadenan por perturbaciones, que pueden ser dinámicas o estáticas. Ya sea a causa de las vibraciones por tronaduras, movimientos de equipos o sismos (Call & Nicholas 1998; Jakubec 2012), o como en el colapso de los arcos de los puntos de extracción, cambios en las condiciones de esfuerzos y la extracción de mineral (Butcher et al. 2000; Call & Nicholas 1998; Jakubec 2012), respectivamente.

En investigaciones anteriores se han postulado dos mecanismos para la ocurrencia de barro. En uno de los mecanismos, el estrés induce una alta presión de agua en los poros del barro (Call & Nicholas 1998; Hubert et al. 2000), lo que produce una disminución repentina de la resistencia al corte, este fenómeno es llamado licuefacción estática (Yamamuro y Lade 1998) o falla de flujo (Yoshimine y Ishihara 1998). En el otro mecanismo, el mineral pierde resistencia al corte, un aumento en el contenido de agua del barro puede cambiar sus propiedades (Butcher et al. 2005; Jakubec 2012), lo que disminuye su resistencia al corte.

2.4 Casos de estudio

En este apartado se darán a conocer casos de estudios científicos del fenómeno de bombeos de agua-barro y antecedentes históricos de los eventos ocurridos en faenas mineras.

2.4.1 Casos generales

2.4.1.1 Modelamiento numérico del flujo de agua y su aplicación en minería de Caving (Sánchez, Palma, y Castro 2016).

Uno de los estudios relacionado con flujo del agua en minería de Block Caving se realizó una investigación numérica para obtener una solución mediante una metodología para determinar el flujo de agua esperado en los puntos de extracción, en relación con el agua, ya que es la fuerza movilizadora que genera el fenómeno de bombeos de agua-barro. Para esto utilizaron las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido, en este caso el agua, en un medio granular son las ecuaciones de la Ley de Darcy y Brinkman. Los resultados de esta investigación pudieron deducir que las estrategias que

controlan o incluso retrasan el flujo de agua subterránea en función de la geometría del cave back es una extracción uniforme permitiría evitar la entrada temprana de agua en los puntos de extracción. Es por esta razón que recomiendan implementar una estrategia de extracción de tiraje uniforme, lo cual evitaría la entrada prematura de agua en los puntos.

Por otro lado, es importante advertir que la existencia de niveles antiguos sobre las áreas de trabajo genera un peligro potencial, puesto que funcionan como canalizadores de agua, lo que genera una disminución de caudal en los puntos de abajo por un cierto periodo de tiempo, pero una vez que estos conectan con estas labores es muy probable una ocurrencia de bombeos de agua-barro.

2.4.1.2 Estimación de la humedad y profundidad del agua barro en Block Caving (Briceño, Adams, y Castro 2016).

En este otro caso, se realizó una estimación de humedad y profundidad de agua-barro en minería de block Caving, proponiendo una metodología para estimar la cantidad de agua y su profundidad usando mediciones de un radar penetrante de suelo (GPR) en los puntos de extracción así obtener la velocidad de onda y la atenuación de la onda electromagnética producida por el GPR pasando a través del material bajo prueba. Para conseguir un perfil de profundidad y humedad del material sobre un punto de extracción.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el GPR se demostró que puede ser un buen complemento a los métodos tradicionales de medición para la profundidad y contenido de agua en un punto de extracción, entrega información precisa, veloz y a un bajo costo.

Actualmente las mediciones de humedad son tomadas en el punto de extracción, pero analizadas fuera de la mina con un retraso de 24 horas y, además, la profundidad del volumen de agua no es medible con este sistema de alerta temprana. No obstante, el GPR si puede hacer todo esto, lo que podría mejorar las decisiones tomadas en la operación y planificación, mejorar y modernizar los sistemas de drenaje y la seguridad de la mina, reduciendo la pérdida de infraestructura, vidas y dinero.

2.4.1.3 Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo (Garcés et al. 2016).

En este caso, en Mina El Teniente se presenta un modelo predictivo multivariable para evaluar el riesgo en la entrada de barro en la planificación de largo plazo. En este modelo se espera ayudar a cuantificar las reservas secas basándose en la probabilidad estadística de la entrada de agua-barro. Este modelo fue aplicable para definir la cantidad de reservas secas que pueden ser extraídas antes de que sea declarada la entrada de barro en un punto de extracción, incorporando el riesgo de entrada de barro asociado a las reservas de mineral. Este modelo predictivo puede ayudar a evaluar distintas estrategias a largo plazo, así como ubicación del nivel de producción, punto de inicio en el hundimiento, secuencia de extracción y planes de producción.

De acuerdo con los resultados esta metodología permite mejorar la evaluación de la recuperación de reservas de mineral considerando el riesgo de entrada de barro a largo plazo. Concluyendo que el modelo es adecuado para estimar el tonelaje extraído antes de la entrada de barro.

Además, recomienda considerar la inclusión de equipos tele-comandados con el fin de aumentar la recuperación de reservas de mineral extrayendo el mineral de barro. Considerando esta automatización de LHD es una oportunidad para mejorar el manejo de barro, mejorando la producción a corto plazo.

Este modelo predictivo permite evaluar diferentes estrategias y mejorar la toma de decisiones en la planificación de producción a largo plazo. Ya que una bien definida evaluación de riesgos sería un factor clave para mejorar los resultados económicos.

2.4.1.4 Modelado numérico del flujo de agua a través de material granular para extracciones aisladas y simultáneas en espeleología en bloque (Sánchez, Palma, y Castro 2019).

En esta investigación resolvieron numéricamente la ecuación Brinkman-Darcy ajustada al modelo cinemático granular utilizando el método de elementos finitos en 2D, para así describir la entrada de agua en los puntos de extracción en minería de block Caving. En este caso los modelos propuestos permiten la estimación de velocidad del agua en los puntos de extracción, ayudando a predecir el tiempo y el lugar en donde puede existir una mayor probabilidad de que ocurra un bombeo de barro. Estos resultados son

aplicables en el diseño y optimización de secuencias de extracción cuando el agua está presente en el subsuelo.

En este modelo se determinaron las variables con mayor influencia en el comportamiento del flujo del agua, como la velocidad del flujo del agua en el punto de extracción, la existencia de material con granulometría fina, lo cual aumentaría la probabilidad de un evento de barro, la velocidad de flujo de agua subterránea, lo que aumentaría las vías de circulación del flujo del agua disipando su velocidad.

Este modelo matemático permite ajustar la evolución en la extracción en el área de hundimiento estimando la velocidad del agua en el punto de extracción, sin los requisitos de que se haya provocado un bombeo de barro previamente.

2.4.2 Casos de estudio en faenas mineras

2.4.2.1 Caso minería en Sudáfrica

Los bombeos de agua-barro asociados con la minería en Sudáfrica se observaron por primera vez en las minas De Beers y Kimberley a fines del siglo XIX (Hunt y Daniel 1952). Hunt y Daniel, en 1952, reconocieron que el problema del bombeo agua-barro podría combatirse parcialmente aumentando el drenaje de la mina con el desarrollo de túneles de drenaje de agua. Estos túneles solo tuvieron un éxito parcial, ya que no impidieron que el agua de lluvia llegara a la pila de desechos. Describen el desarrollo del primer túnel de agua en esta mina en 1899. Sin embargo, esto no detuvo la aparición de la avalancha de barro, con 20 vidas perdidas por la avalancha de barro entre 1919 y 1950.

2.4.2.2 Caso minería Indonesia

En el caso de la mina Intermediate Ore Zone (IOZ), Freeport, Indonesia, (Call & Nicholas, Freeport McMoRan Copper and Gold, y Hydrologic Consultants 1998) caracterizaron geotécnicamente las muestras involucradas en los barros presentes en esta mina. Donde concluyeron que al presentarse una saturación mayor al 80%, el material tenderá a sufrir licuefacción producto del exceso de presión de poros. También se midió la densidad de la pila de mineral en los puntos de extracción para establecer el contenido de agua en los cuales el mineral alcanzaba el 80% de saturación. Se efectuaron pruebas triaxiales no saturadas, consolidadas y sin drenaje, donde todos los resultados mostraron que al llegar al 100% de saturación después de la consolidación y algunas desarrollaron licuefacción, es decir,

inestabilidad con un aumento en la presión de poro (Yamamuro y Lade 1998). No obstante, las condiciones específicas en la que ocurre la licuefacción no fueron establecidas.

Además, se propuso un sistema de clasificación, el cual recomienda un procedimiento de extracción de acuerdo con el contenido de agua y tamaño de grano del mineral en los puntos de extracción.

Tabla 1: Clases de mineral de barro propuestas para mina IOZ, Freeport, Indonesia (Call & Nicholas, Freeport McMoRan, and Hydrologic Consultants, 1998).

ω : <i>Contenido de agua</i> (%)	G: Tamaño de grano < 50 mm	
	G < 30%	G > 30%
$\omega < 8.5\%$	A: Grueso Seco	B: Fino Seco
$\omega > 8.5\%$ y $\omega < 11\%$	C: Grueso Húmedo	E: Fino Húmedo
$\omega > 11\%$	D: Grueso Muy Húmedo	F: Fino Muy Húmedo

Este sistema de clasificación se estableció específicamente para la mina IOZ. Cabe destacar que la densidad que fue medida en la pila pudo diferir de la columna de mineral, puesto que la saturación depende directamente de la densidad. Por esta razón el método podría resultar inexacto para predecir la acumulación de barro en la columna de mineral, puesto que solo usa la densidad de la pila de mineral para considerar el contenido de agua. Por lo que se recomienda que para una mina diferente se requerirán recomendaciones diferentes y más específicas (Vallejos 2017).

2.4.2.3 Caso minería en Australia

Según informó el Departamento de Minería y Energía de Australia Occidental en febrero de 1992 un supervisor, que se encontraba inspeccionando la carga de un cargador frontal de un conductor desde un punto de extracción de mineral, donde falleció producto de una repentina oleada de roca, mineral fino, barro y agua que se descargó desde un punto de extracción. Durante ya algunas semanas que no se había trabajado en dicho punto de extracción.

Los hechos relevantes de este suceso fueron los siguientes:

- Se sabía que existía una acumulación de agua sobre la roca en el punto de extracción. Debido a que se había observado agua drenándose a través de la roca en el fondo de la zanja.

- Se descubrió que el agua provenía de la perforación de pozos largos y de una tubería reventada que había sido reparada.
- El supervisor y el conductor del cargador sabían que había agua en el punto y no verificaron el nivel de agua antes de comenzar a cargar en el punto de extracción.
- El supervisor fue visto por última vez por el conductor del cargador frente al punto de extracción justo antes del bombeo de agua-barro. La avalancha de barro ocurrió cuando el conductor se encontraba lejos del punto de extracción descargando el mineral.

2.4.2.4 Caso minería Chile

En el caso de la mina El Teniente, Chile, el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta, producto del agua que se infiltra a causa de los deshielos, el material fino que se genera a causa del quiebre y hundimientos asociados al método propiamente tal, uno de sus principales riesgos son los bombeos de agua-barro. Debido a esto, se han registrado varios accidentes de este tipo con consecuencias fatales.

Debido a estos problemas, se creó una matriz de criticidad, con la finalidad de determinar el riesgo de bombeos de agua-barro en los puntos de extracción, donde se utilizan como parámetros la humedad, que se determina midiéndose en los puntos, o con muestras, que son medidas en laboratorios, y granulometría utilizando un % de mineral en los puntos que se encuentran bajo 25 cm. En este caso, la clasificación de riesgo se mide con 3 categorías: condición normal (NC), en observación (IO) y riesgo crítico (CR).

Tabla 2: Clasificación de riesgo de barro para puntos de extracción mina El Teniente (Becerra 2011).

Contenido de humedad	Tamaño de grano (G) ≤ 25 cm		
	G < 30% (granulometría gruesa)	30% ≤ G < 70%	G ≥ 70% (granulometría fina)
< 4%	NC	NC	NC
4% – 7%	IO	IO	IO
7% – 10%	IO	IO	CR
≥ 10%	CR	CR	CR

Debido a los pocos datos históricos que fueron utilizados en este estudio puede resultar inexacta esta clasificación para predecir el riesgo en zonas particulares y con distintos tipos de mineral (Becerra 2011).

2.4.2.5 Caso mina Diablo Regimiento

Dentro de la mina El Teniente existen distintas minas en diferentes sectores, uno de ellos es Diablo Regimiento (DR), donde se muestra un caso más específico, en esta mina se llevó a cabo la construcción de una matriz de decisión para ser aplicada en diferentes puntos de extracción. Fue evaluada la resistencia no confinada para el mineral en diferentes grados de saturación. Además, se realizaron pruebas de asentamiento en muestras de barro y se caracterizó su consistencia al establecer un grado de saturación y empaquetamiento por medio del Cono de Abrams. Se observó que el contenido de agua provoca que la consistencia del fluido cambia de plástica a un comportamiento más blando con respecto a la clasificación de asentamiento. Y finalmente, definieron un factor de seguridad para diseñar un patrón de extracción basándose en el contenido de agua.

Para los resultados de las muestras utilizando el Cono de Abrams, en las pruebas de caídas, revelan que cada curva representa un grado de saturación diferente, por lo que también hay tres estados de compactación. También, se muestran divisiones horizontales indicando diferentes clases de consistencia dependiendo de la depresión. Lo que indica que la depresión aumenta con el aumento de la saturación del material, pero disminuye con el aumento de la densidad relativa (Vallejos 2017).

A continuación, se muestran los gráficos resultantes de estas pruebas, donde se muestra que el eje horizontal representa el contenido de agua y el eje vertical caída del material.

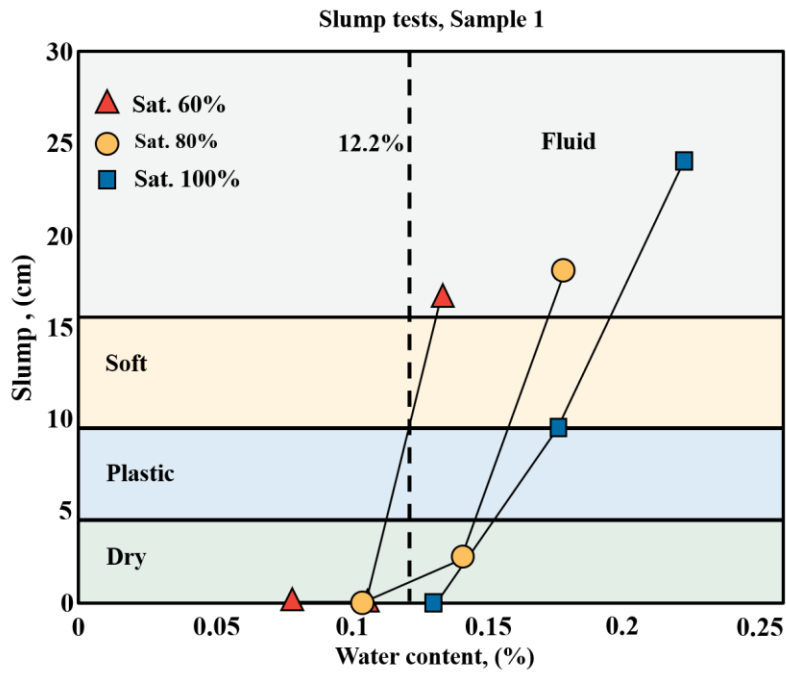


Figura 2: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 1 (Vallejos 2017).

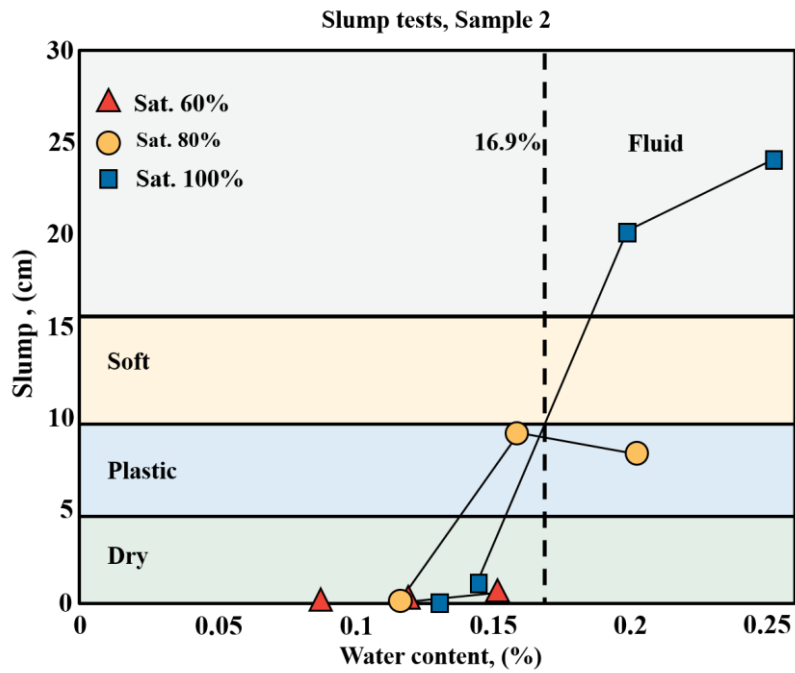


Figura 3: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 2 (Vallejos 2017).

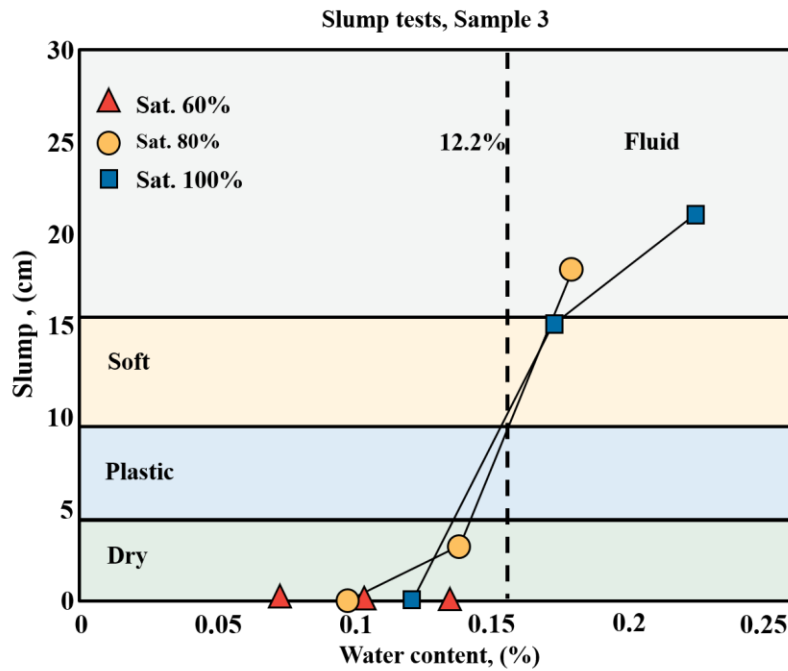


Figura 4: Pruebas de depresión, determinación y clasificación de consistencia, muestra 3 (Vallejos 2017).

Luego de estos resultados se estableció una clasificación de riesgo, utilizando un factor de seguridad del fluido (SF_f), utilizando los límites de consistencia del fluido (FL) y ω como el contenido de agua.

$$SF_f = \frac{FL}{\omega} \quad (1)$$

Por lo que se estableció una clasificación de riesgo por medio del contenido de agua en el cual se instauró una clasificación para cada muestra extraída. Las cuales se muestran a continuación:

Tabla 3: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 1 (Vallejos 2017).

Factor de Seguridad del Fluido (SF_f)	Contenido de agua (ω)	Tamaño de grano ($G \leq 25$ cm)	
		$G < 70\%$	$G > 70\%$
> 1.5	$< 8\%$	NC	NC
$1.5 - 1.2$	$8\% - 10\%$	IO	IO
$1.2 - 1.1$	$10\% - 11\%$	IO	CR
< 1.1	$> 11\%$	CR	CR

Tabla 4: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 2 (Vallejos 2017).

Factor de Seguridad del Fluido (SF_f)	Contenido de agua (ω)	Tamaño de grano (G) ≤ 25 cm	
		$G < 70\%$	$G > 70\%$
> 1.5	$< 11\%$	NC	NC
$1.5 - 1.2$	$11\% - 14\%$	IO	IO
$1.2 - 1.1$	$14\% - 15\%$	IO	CR
< 1.1	$> 15\%$	CR	CR

Tabla 5: Clasificación de riesgo para Diablo Regimiento para muestra 3 (Vallejos 2017).

Factor de Seguridad del Fluido (SF_f)	Contenido de agua (ω)	Tamaño de grano (G) ≤ 25 cm	
		$G < 70\%$	$G > 70\%$
> 1.5	$< 10\%$	NC	NC
$1.5 - 1.2$	$10\% - 13\%$	IO	IO
$1.2 - 1.1$	$13\% - 14\%$	IO	CR
< 1.1	$> 14\%$	CR	CR

Producto de la variación en la composición de las muestras este criterio no toma en cuenta las diferencias en el comportamiento del mineral. Este método toma en cuenta para cada mineral en específico la densidad. Por lo que se concluyó que un mineral altamente compactado no puede fluir, a diferencia de que un mineral medianamente compactado y/o suelto puede fluir, dependiendo su grado de saturación, es decir, a mayor saturación, el mineral será más propenso a fluir. Para determinar el comportamiento como flujo el contenido de agua fue de 12,2%, para el mineral de sulfuro, 16,9% para el mineral de óxido y 15,6% para el mineral mixto. Por último, se puede concluir que el mineral de sulfuro es más propenso a fluir que el óxido y mineral mixto, por lo que las distintas muestras con el mismo contenido de agua tienen diferentes propensiones a fluir.

2.4.3 Conclusiones de casos de estudios

Respecto a estos casos, se puede identificar que los bombeos de agua-barro han afectado de sobremanera las operaciones en la minería de Sudáfrica durante más de un siglo, e incluso muchas veces con consecuencias fatales. Sin embargo, existe poca información histórica detallada asociada a este fenómeno. No obstante, la literatura apunta a que la presencia de agua en general ya sea el agua subterránea y/o de lluvias, presentan una gran influencia en la aparición de barro y la existencia de material quebrado que contenían minerales arcillosos que pueden formar un material “pegajoso”.

Por otro lado, tanto la mina IOZ como El Teniente, usaron el tamaño de grano de mineral y el contenido de agua para lograr clasificar el mineral en los puntos de extracción. También se debe considerar que el contenido y tipo de arcilla que se encuentre el mineral en los distintos puntos de extracción puede resultar fundamental en la evaluación de riesgo de bombeos, puesto que dependerá netamente de sus propiedades de absorción del agua (Call & Nicholas et al. 1998). Asimismo, se debe considerar la densidad en la caracterización física del mineral. Por lo cual, para lograr desarrollar una mejor clasificación es necesario caracterizar el comportamiento de los minerales en específico y no solo utilizando la granulometría y el contenido de agua, sino que también se deben incluir los parámetros relacionados con la densidad del mineral (Vallejos 2017).

2.5 Mecanismos desencadenantes y advertencias del fenómeno

Según los estudios de Butcher 2005, existen dos posibles elementos que podrían desencadenar los bombeos de agua-barro, estos son el agua y las perturbaciones. Esto ocurre puesto que estos factores son los que controlan el proceso de liberación de barro. El agua actúa como una fuerza que mueve el barro, ya sea aplicando una presión debido al aumento de la altura del agua o cambiando las propiedades del material de barro. Y la perturbación crea la condición que se necesita para producir la descarga de barro (Butcher et al. 2005).

2.5.1 Agua

El agua tiene un papel fundamental en la formación de barro y en el desencadenamiento de este fenómeno. Existen posibles señales que pueden ser consideradas como advertencias ante un eventual bombeo de agua-barro:

- La falta de un sistema de túneles de drenaje correctamente diseñados en la mina.
- Un mantenimiento deficiente de los túneles de drenajes. Lo que puede ser producto del colapso de estos túneles y bloqueo de los agujeros de drenaje o los desagües subterráneos. O si el desagüe es realizado por medio de uso de bombas de agua y este se ve afectado por el vandalismo o el hurto de estas bombas, lo que conlleva al colapso de estos desagües.

Es de suma importancia tomar como una señal de advertencia la ausencia de drenaje de agua en el área de operaciones. Lo que puede ser una indicación de que existe un bloqueo que, permitiendo que se acumule agua y junto con este material detrás.

2.5.2 Perturbación

Las perturbaciones son las acciones que pueden desencadenar este fenómeno, donde la principal alteración es la extracción de mineral y de forma secundaria tronaduras, sismos, descuelgue de zanjas, entre otros. Lo más importante es identificar las señales de advertencia tales como:

- Un diseño deficiente de la zanja, la geometría de la batea, las paredes laterales y las cajas.
- La entrada de aguas subterráneas a las obras de producción debilitando el macizo rocoso.
- El colapso de las paredes laterales de zanjas y existencia de planchones en el techo.

2.5.3 Otros mecanismos del barro

Existen distintos factores desencadenantes de barro de acuerdo con los experimentos realizados en el estudio de Castro, Basaure, Palma y Vallejos 2017. Ellos analizaron el comportamiento geomecánico para determinar la variabilidad de estos mecanismos desencadenantes. Llegando a que “el esfuerzo que genera un cizallamiento en un material se le llama esfuerzo desviador, por lo que el material fluye o sufre una deformación en el momento en que los esfuerzos de cizallamiento que actúan sobre este material exceden su resistencia al cizalle. Por esta razón se espera que la fuerza de desviación del mineral está directamente relacionada con su capacidad de fluir. Por lo que se postula que pueden existir dos mecanismos por los cuales el barro puede perder resistencia al cizalle para fluir, los cuales serían el aumento en el contenido de agua y la licuefacción”. En el caso de la saturación, “esta no solo depende

del contenido de agua, sino que también de la relación de vacíos. Por lo que, a saturación constante, en cuanto mayor sea el volumen de huecos, mayor será el contenido de agua” (Castro 2017).

Además, en el caso de los puntos de extracción “al extraer mineral el mineral tenderá a aflojarse por lo que se espera que la carga vertical disminuya, debido a que las tensiones verticales serían más bajas. Lo cual significa que las zonas que no son extraídas comienzan a presentar un aumento en sus cargas verticales, lo que provoca una consolidación en el caso de la saturación total o una compactación si se presenta una saturación parcial, es decir, para una consolidación completa del mineral se necesitarán tasas de extracción más altas y a una más baja entregará el tiempo suficiente para una consolidación completa. En consecuencia, si la extracción es demasiado rápida y el mineral está saturado para permitir la consolidación, este será más propenso a fluir que un mineral consolidado. En cambio, si el mineral no está saturado, también tenderá a perder resistencia con la extracción debido a que pierde compactación. No obstante, la resistencia en condiciones saturadas es más baja que en el caso de una saturación parcial, por lo cual el mineral en condiciones saturadas siempre es más susceptible a fluir que en condiciones no saturadas. Por otro lado, un barro muy compacto en la base de las bateas de extracción es un medio de muy baja permeabilidad, el cual favorecerá la acumulación de agua” (Castro 2017).

Por otro lado, para la resistencia al cizalle del barro se habla de que “en condiciones saturadas dependen del esfuerzo de confinamiento efectivo y en condiciones de saturación parcial dependen de la compactación. Por consiguiente, el mineral puede perder resistencia al cizalle solo si pierde el esfuerzo de confinamiento efectivo en condiciones saturadas o puede volverse más suelto en condiciones insaturadas. Por esta razón se debe considerar que un mineral de barro siempre puede fluir si se encuentra expuesto a una perturbación que exceda su resistencia al cizalle” (Castro 2017).

2.6 Medios granulares

Los medios granulares son aquellos materiales que se encuentran formados por partículas macroscópicas y microscópicas donde existe una fuerza de fricción que representa la interacción entre ellas, es decir, este medio este compuesto por granos o partículas que interactúan entre sí.

El mineral de barro está formado principalmente por material granular fino y una cierta cantidad de humedad, uno de sus mecanismos desencadenantes es su contenido de agua, el cual se mantiene en los huecos que existen entre las partículas sólidas, no obstante la porosidad y relación de vacíos de este

material granular en particular es incierta, debido a que producto de las tasas de extracción que puedan presentar el punto de extracción será como fluye esta columna de mineral, lo que causará cambios en su densidad continuamente. Un material granular con una alta densidad puede contener menos agua que un material de baja densidad y viceversa. Además, el contenido de agua en el material granular puede ir variando, dependiendo del sector de la mina, producto de la permeabilidad del mineral y donde se concentren las percolaciones de aguas subterráneas, producto de las lluvias u otras fuentes.

2.6.1 Tipos de barro

Como el material granular al fluir a través de la columna de mineral presenta grandes variaciones de humedad, este tiende a comportarse de forma diferente dependiendo de su contenido de agua, por lo que existen dos categorías para determinar la consistencia del barro según su porcentaje de humedad (Jakubec, Clayton, y Guest 2016).

2.6.1.1 Barro fluido

El barro fluido posee un alto contenido de agua (hasta 50%), el cual puede incluir grandes rocas de hasta 3 m, el cual puede fluir fácilmente en una superficie horizontal de grandes longitudes. En barro que se presenta se asemeja a una suspensión fina que generalmente se ve como una descarga de agua. A diferencia de un flujo de barro, el cual tiene una viscosidad más alta, lo que implica presentar un mayor porcentaje de masa con respecto al agua.

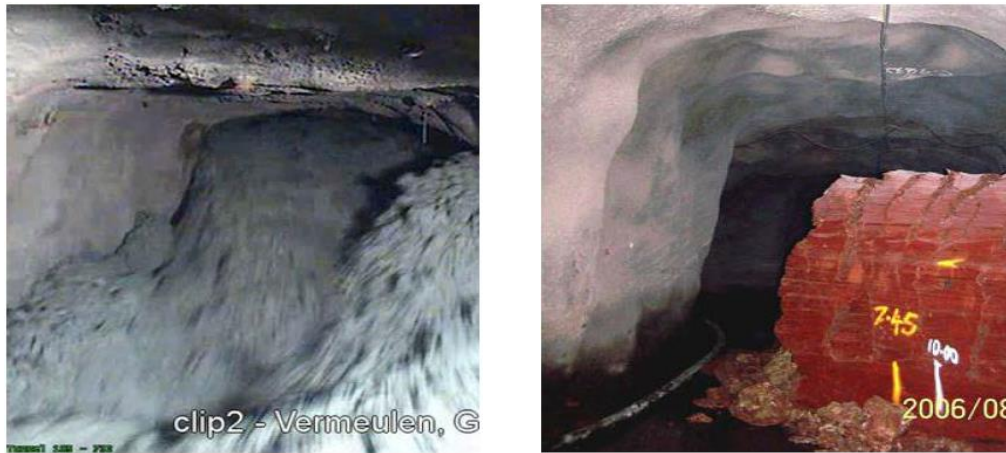


Figura 5: Ejemplo de barro tipo fluido (izquierda) y de barro viscoso (derecha) (Jakubec 2012).

2.6.1.2 Barro viscoso

El barro viscoso presenta un bajo contenido de agua (entre 17 – 23%). El cual generalmente presenta propiedades que muestran un cambio en su viscosidad en el tiempo y tiende a ser rígido. Es por esta razón que el material no fluirá libremente bajo la influencia de la gravedad, no obstante, si existe una perturbación, este podría moverse y ser expulsado por la presión fuera del punto de extracción. Este barro puede resultar destructivo a pesar de presentar una viscosidad alta.

2.6.2 Física de medios granulares

2.6.2.1 Definición de medios granulares

Los medios granulares son parte de una familia muy extensa, la cual presenta granos con formas y materiales muy diferentes entre sí, presentando diferentes tamaños. Sin embargo, todos estos comparten características fundamentales. Se encuentran desordenados a nivel de grano, pero estos pueden comportarse como un sólido o un fluido a nivel macroscópico, un ejemplo de ello es la arena.

En esta sección se presentarán conceptos que explican el comportamiento de un medio granular. Un medio granular es un conjunto discreto de partículas sólidas que están en contacto entre sí. Definiéndose ampliamente como una colección de partículas rígidas macroscópicas, cuyo tamaño de partícula suele ser superior a 100 [μm] (Andreotti, Forterre, y Pouliquen 2013).

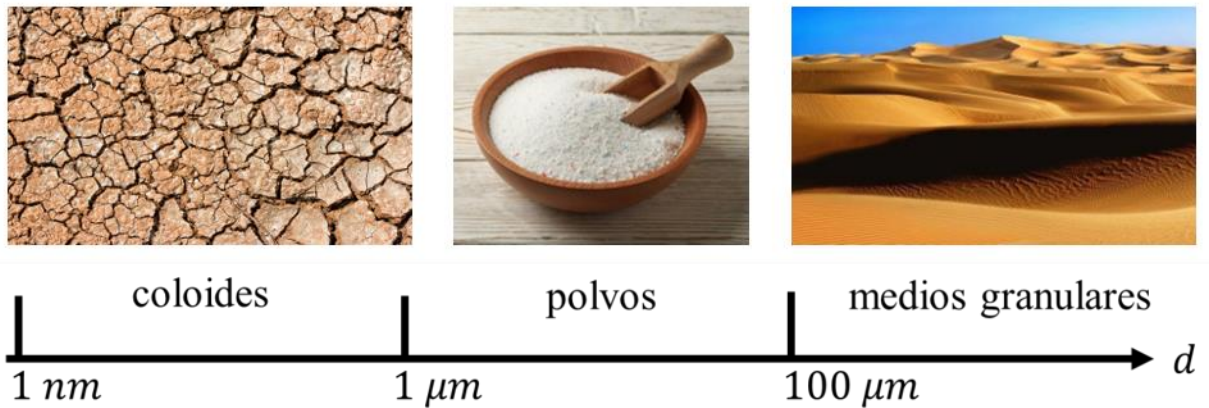


Figura 6: Una clasificación de material particulado en función del tamaño de partícula: coloides (barro), polvo (harina) y medios granulares (una duna de arena) (Andreotti et al. 2013).

Los principales sectores en la minería que manejan material granular son en la extracción, transporte y molienda. No obstante, a pesar de sus aplicaciones en la industria, los medios granulares aún son complejos de comprender, y es aún más complejo describir su comportamiento con relación a la ingeniería, incluso en un caso ideal donde se cuenta con partículas esféricas idénticas. Algunas de las dificultades para entender los medios granulares son:

- Los medios granulares están compuestos por una gran cantidad de partículas por lo que es muy difícil generar una descripción continua del movimiento de cada una de las partículas.
- Las fluctuaciones térmicas son insignificantes, debido a que en un medio granular, las partículas son demasiado grandes para experimentar el movimiento browniano y no es posible realizar promedios estadísticos sobre diferentes configuraciones. Por tanto, los medios granulares son sistemas a térmicos.
- La falta de una clara separación de escalas, entre la escala microscópica, es decir, tamaño de grano y la escala macroscópica, es decir, el tamaño de flujo.
- La interacción entre granos es compleja.
- Los medios granulares disipan fácilmente la energía.
- Los medios granulares pueden exhibir diferentes estados de la materia, un material granular puede comportarse como un sólido, un líquido o un gas.

Este tipo de medio granular juega un papel principal en minería, ya que este estudio se basa en el flujo gravitacional en medios granulares saturados de agua. El comportamiento de los medios granulares cohesivos se puede explicar definiendo las fuerzas cohesivas físicas por las que se rigen.

2.6.2.2 Fuerzas de cohesión

Las fuerzas de contacto sólidas como la elasticidad y la fricción son las interacciones más importantes para los granos macroscópicos. No obstante, pueden existir otras interacciones. En una atmosfera seca suelen producirse fuerzas electrostáticas si las partículas se cargan durante su manipulación. Por el contrario, en una atmósfera húmeda, la condensación de agua entre granos puede generar una cantidad significativa de cohesión producto de las fuerzas capilares. Producto de esto, bajo ciertas condiciones, se pueden formar puentes sólidos entre los granos, dando cohesión a la estructura granular (Andreotti et al. 2013).

Realizar modelaciones computacionales de medios granulares, escalar el tamaño de partícula con respecto a las propiedades físicas y mecánicas es un trabajo complejo. En especial en la modelación de polvos cohesivos, ya que se puede emplear una gran cantidad de tiempo para el proceso de calibración debido a la falta de un criterio para ajustar el nivel de energía superficial de las partículas. El número de Bond ha sido utilizado para este criterio, comparando el significado de la fuerza adhesiva con la fuerza gravitacional de las partículas, no obstante, la influencia que presentan las propiedades de los materiales, particularmente la rigidez de las partículas, no se observa de manera detallada en este número (Bond 1935). A causa de que el número de Bond no considere rigidez de las partículas tiene un impacto considerable en cómo las partículas responden a una fuerza aplicada. Si las fuerzas definidas en el número de Bond se reemplazan por energías potenciales y de cohesión, se obtendrá un nuevo número adimensional, el cual considerará el efecto de la rigidez de las partículas. Esto fue propuesto en primer lugar por Behjani et al. 2017 donde introdujeron un número adimensional titulado como el número de cohesión.

El número de cohesión (Coh) es un número adimensional muy útil en la modelación computacional de partículas mediante el cual se puede comparar la cohesión de diferentes materiales granulares. Esto es especialmente útil en modelaciones utilizando herramientas DEM (Método de elementos discretos) de materiales granulares donde el escalar el tamaño y la rigidez de las partículas es inevitable, debido a la naturaleza computacionalmente exigente del modelado DEM.

El número de cohesión es un número adimensional que muestra la relación entre el trabajo requerido para separar dos partículas sólidas arbitrarias (trabajo de cohesión) y su energía potencial gravitacional como se expresa a continuación:

$$Cohesion\ number = \frac{work\ of\ cohesion}{gravitational\ potential\ energy} \quad (1)$$

Un ejemplo, en el modelo de contacto JKR (Johnson, Kendall, y Roberts 1971) el trabajo de cohesión es $7,09 \left(\frac{\Gamma^5 R^{*4}}{E^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}$ (Thornton y Ning 1998) por el cual el número de cohesión se deriva de la siguiente manera:

$$Coh = \frac{7,09 \left(\frac{\Gamma^5 R^{*4}}{E^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}}{mgR^*} \quad (2)$$

La masa se puede escribir en forma de densidad y volumen eliminando el número constante:

$$Coh = \frac{7,09 \left(\frac{\Gamma^5 R^{*4}}{E^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}}{\rho R^{*3} g R^*} \quad (3)$$

Resultando finalmente el número de cohesión de la siguiente manera:

$$Coh = \frac{1}{\rho g} \left(\frac{\Gamma^5}{E^{*2} R^{*8}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Donde:

ρ es la densidad de las partículas.

g es la gravedad.

Γ es la energía superficial.

E^* es el módulo de Young equivalente: $E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$

ν es el material de la relación de Poisson.

R^* muestra el radio equivalente: $R^* = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$

El número de cohesión depende de la energía superficial de las partículas, el tamaño de las partículas, la gravedad, la densidad de las partículas y el módulo de Young. Demuestra bien que los materiales que tienen menor rigidez se vuelven "más pegajosos" si son adhesivos y es un método de escala útil para las modelaciones DEM en las que el módulo de Young es más pequeño que el valor real para aumentar la velocidad de cálculo (Behjani, Hassanpour, et al. 2017). Recientemente, un análisis riguroso de la reducción de la rigidez de los contactos adhesivos para acelerar los cálculos en herramientas DEM muestra la misma forma fraccionaria (Hærvig et al. 2017).

2.6.2.3 Fuerzas de adhesión

Se puede decir que siempre existe una pequeña atracción entre dos cuerpos macroscópicos idénticos, a pesar de la ausencia de carga eléctrica. Para partículas microscópicas las fuerzas de interacción son de muy corto alcance, es decir, del orden de una distancia de tamaño molecular. Donde estas interacciones moleculares son de origen electrostático y corresponden a la parte atractiva del potencial de interacción entre dos moléculas. Por lo tanto, para las partículas macroscópicos, la atracción solo es significativa cuando las superficies están muy próximas o en contacto. Esta fuerza de atracción en el contacto se llama fuerza de adhesión.

Si se consideran dos esferas elásticas con radio R en el vacío, y se ponen en contacto por una fuerza externa F_{ext} (Figura 8 (a)). Expresamos el desplazamiento de la esfera como δ y a el radio de la zona de contacto. Es por ello que, en una primera aproximación, la fuerza de equilibrio total ejercida por una esfera sobre otra se puede dividir en dos partes (Figura 8 (b)). Por una parte, existe una fuerza repulsiva F_{el} en el área de contacto que se encuentra bajo compresión. Por otro lado, la atracción de corto alcance entre las moléculas de los dos sólidos induce una atracción global que identificamos formalmente como la fuerza de adhesión F_{adh} . Esta atracción tiende a deformar ligeramente los sólidos cercanos a la zona de contacto, dando lugar a una zona de tensión en el borde del área de contacto (Figura 8 (b)). Y luego,

usando una relación geométrica válida para pequeños desplazamientos, encuentra la siguiente relación para la fuerza de adherencia:

$$F_{adh} \sim \pi \gamma_S R \quad (5)$$

Por tanto, la fuerza de adherencia es proporcional al radio de las partículas y a la tensión superficial de los sólidos (Andreotti et al. 2013).

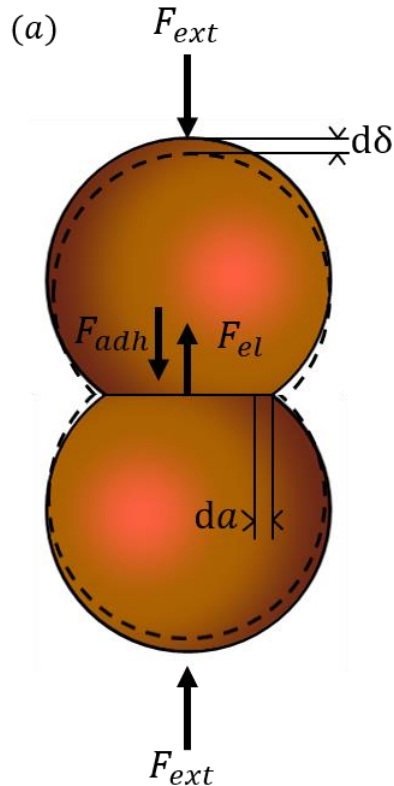


Figura 7: (a) Contacto adhesivo entre dos esferas elásticas. (b) La distribución de las fuerzas repulsivas y adhesivas en la zona de contacto. Las fuerzas de atracción intermolecular crean una junta adhesiva de altura δ_* en el borde de la zona de contacto (Andreotti et al. 2013).

Increíblemente, la fuerza de adhesión no depende del módulo de Young de las partículas, aunque se ha supuesto que las esferas son elásticas en la derivación. Investigaciones más profundas muestran que la fuerza adhesiva en realidad se encuentra entre dos límites:

$$\frac{3}{2} \pi \gamma_S R < F_{adh} < 2 \pi \gamma_S R \quad (6)$$

El valor más bajo es válido para esferas blandas y se denomina límite JKR en referencia a un artículo de Johnson, Kendall y Roberts (Johnson et al. 1971). Por el contrario, el valor superior se aplica a esferas rígidas y se denomina límite DMT en referencia a un artículo de Derjaguin, Müller y Toporov (Andreotti et al. 2013).

2.6.2.4 Fuerzas capilares

El comportamiento cohesivo se produce debido a las fuerzas capilares que actúan como puentes de líquidos de granos a niveles muy pequeños, esto ocurre cuando a un medio granular se le agrega una pequeña cantidad de agua lo que provoca cohesión en el medio. Para estimar la magnitud de las fuerzas de capilaridad, se considera un puente de espesor $2h$, ancho $2a$, con un radio r de curvatura y dos partículas esféricas de radio R que se encuentren en contacto.

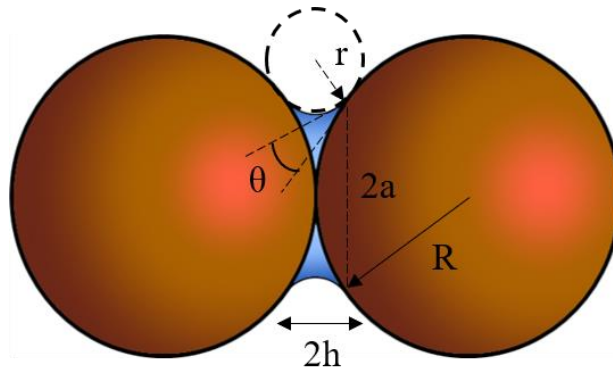


Figura 8: Se muestra un puente capilar entre dos esferas lisas en contacto (Andreotti et al. 2013).

Existe una diferencia de presión entre un punto dentro y otro fuera del menisco con lo que se obtiene la ecuación de Young-Laplace, la cual describe las fuerzas de capilaridad. Donde γ_{LV} es la tensión superficial (líquido/aire) y θ es el ángulo de contacto del líquido sobre el sólido. Lo cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_{cap} \sim 2\pi\gamma_{LV}R \cos(\theta) \quad (7)$$

En el caso de las fuerzas de capilaridad dependen de la distancia que existe entre las partículas, es decir, cuando las partículas están muy juntas la fuerza de capilaridad es máxima y cuando se encuentran muy lejos esta tiende a cero.

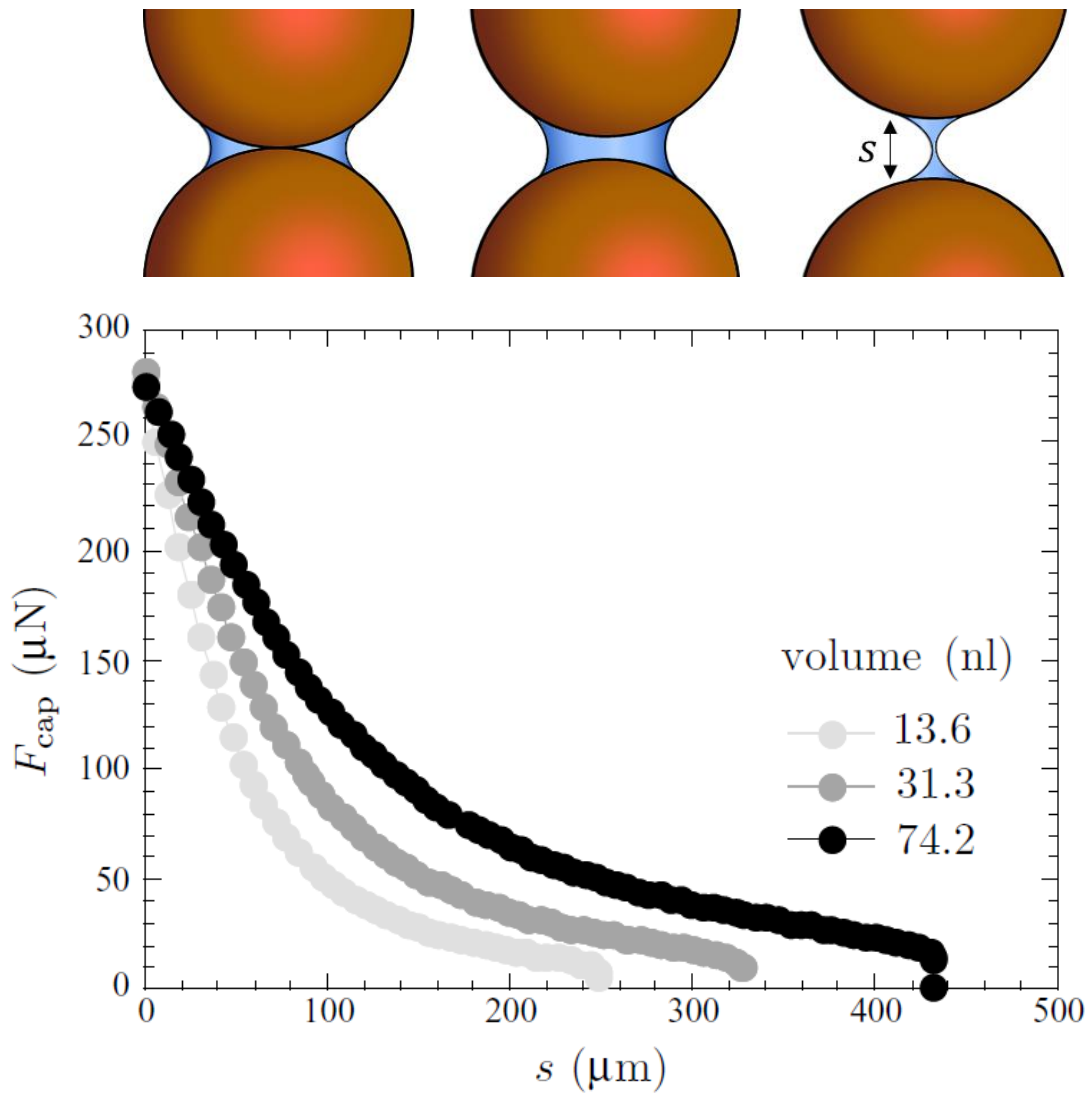


Figura 9: La fuerza capilar entre dos esferas idénticas, para un rango de volúmenes de puente líquido en función de la separación de las esferas s (Andreotti et al. 2013).

2.6.2.5 Empaquetamiento

Otro de los fenómenos que se pueden encontrar dentro de un medio granular, son empaquetamientos con esferas de distintos tamaños. Lo más común es encontrar mezclas de fragmentos de diferentes tamaños. A esto se le llama fracción de volumen que mezclan dos tamaños.

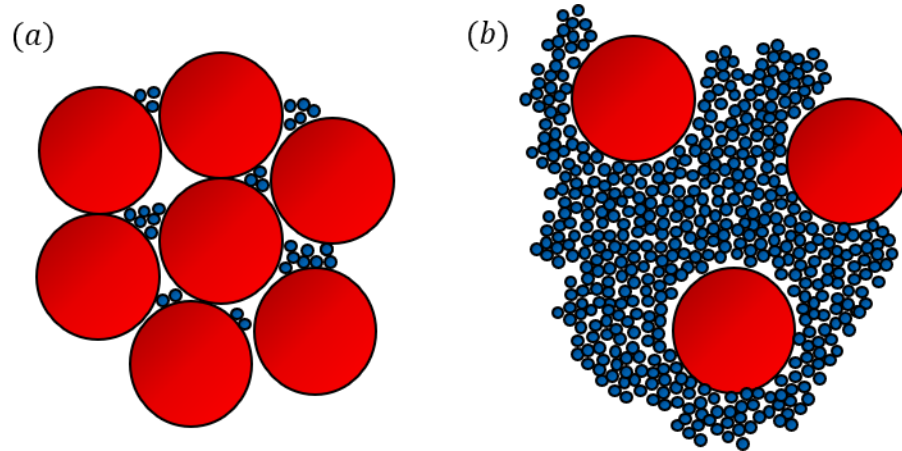


Figura 10: Casos extremos (a) Muchas partículas gruesas y pocas finas (b) Muchas partículas finas y pocas gruesas (Andreotti et al. 2013).

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas en Castro, Basaure, Palma y Vallejos 2017 de densidad relativa, “el cual es utilizado para comparar el empaquetamiento en diferentes medios granulares en función de sus propiedades de empaquetamiento individual. Donde la relación de vacíos es la relación de vacío y volumen sólido, e es la relación de vacíos real y e_{min} y e_{max} son las relaciones de vacío mínimas y máximas posibles de un material granular, respectivamente (Lambe y Whitman 1991)”.

$$RD(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (8)$$

La saturación es utilizada para determinar “la cantidad de agua presente en un medio granular en relación a los vacíos (o huecos) que presenta, es decir, es la cantidad de agua que puede contener este medio dependiendo de los huecos que presente (Lambe y Whitman 1991). Donde V_ω es el volumen de agua en el material granular y V_V el volumen de vacíos entre las partículas sólidas” (Castro 2017).

$$S = \frac{V_\omega}{V_V} \quad (9)$$

Existe una correspondencia entre “la relación de vacíos y la saturación, junto con el contenido de agua ω y la gravedad específica G_s , la cual es utilizada para describir la relación entre el volumen y la masa de un medio granular. Donde el contenido de agua es la relación entre el peso del agua y el peso de sólido

y la gravedad específica es el peso unitario del sólido dividido por el peso unitario de un volumen igual de agua (Lambe y Whitman 1991)” (Castro 2017).

$$G_s \omega = S e \quad (10)$$

Por otro lado, también se debe considerar “la presión de poros, el cual está definido por la presión de agua que se encuentra dentro de los huecos de un medio granular saturado. La presión de poro está relacionada con el esfuerzo efectivo (σ'), el cual se obtiene restando la presión de poro (u) a esfuerzo total (σ)” (Castro 2017).

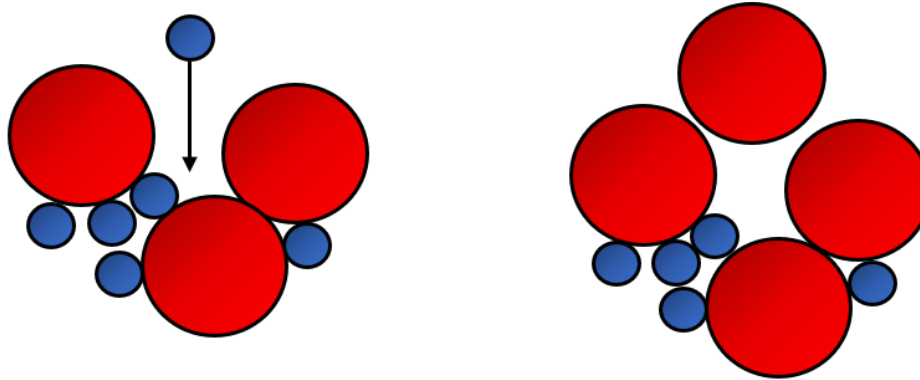
$$\sigma' = \sigma - u \quad (11)$$

2.6.2.6 Segregación

En la mayoría de los fenómenos naturales o procesos industriales en donde los medios granulares están presentes, los granos no son todos idénticos, sino que, todo lo contrario, son diferentes en formas, tamaños o propiedades mecánicas, etc. En el caso de los flujos con distribución polidispersa se encuentra el fenómeno de segregación. Una mezcla homogénea de granos es difícil de lograr cuando existen diferencias entre partículas ya sea en términos de masa, propiedades mecánicas o tamaños, a diferencia de los líquidos que son más fáciles de mezclar. Entre los distintos mecanismos que existen para impedir una buena mezcla el más eficaz es la segregación. Sin embargo, a pesar de sus consecuencias para muchos problemas industriales y su papel en los procesos geomorfológicos, la segregación por tamaño aún no se comprende bien (Andreotti et al. 2013).

Cuando se tiene una mezcla de dos o más partículas diferentes, es decir una distribución polidispersa, las cuales fluyen debido a la gravedad, estas diferentes variedades de partículas tenderán a separarse o segregarse. Lo cual puede suceder en dos formas principales: segregación de densidad donde las partículas más densas se hunden hasta el fondo y segregación de tamaño donde las partículas más grandes se elevan a la superficie de un flujo. Cuando un flujo presenta un colapso granular, se espera que esto se deba principalmente al proceso de tamizado cinético. El tamizado cinético se produce debido al cizallamiento en el flujo que hace que se abran espacios entre las partículas. Por lo tanto, otras partículas pueden caer a través de estos espacios, y las partículas más pequeñas tienen más probabilidades de

hacerlo que las partículas más grandes, como se ilustra en la siguiente figura. Lo que da como resultado, que las partículas pequeñas tiendan a acumularse en la base del flujo y las partículas grandes se encuentran necesariamente hacia la superficie (Caplan 2018).



(a) Una partícula pequeña puede caer fácilmente a través de los huecos de la estructura granular y acumularse cerca de la base.

(b) Las partículas grandes no pueden caer tan fácilmente y permanecen cerca de la superficie.

Figura 11: Proceso de tamizado cinético (Caplan 2018).

2.7 Mecánica de contacto de adherencia

2.7.1 Teoría de Hertz

La teoría sobre la mecánica de contacto comienza con Heinrich Hertz en 1881, el cual fue el primero en predecir cómo el área de contacto inducida por la fuerza de dos cuerpos con geometrías distintas se ven afectadas por la fuerza de contacto. Hertz descubrió que el radio del círculo de contacto a_H está en función de la carga de contacto F , el radio de contacto esférico R y las propiedades elásticas de los materiales que se encuentran en contacto. Su relación se muestra a continuación:

$$a_H^3 = \frac{F \cdot R^*}{E^*} \quad (12)$$

Donde R^* es el radio equivalente que se encuentra dado por:

$$R^* = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

Y E^* es el módulo de elasticidad equivalente del contacto y la muestra, que podrían ser dos cuerpos esféricos de la siguiente manera:

$$E^* = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right)^{-1} \quad (14)$$

En el caso de dos materiales idénticos la ecuación anterior se puede simplificar de la siguiente forma:

$$E^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (15)$$

Y al tener el caso de un material rígido de contacto con un material muy blando en la siguiente expresión:

$$E^* \approx \frac{4}{3} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (16)$$

donde E y ν son el módulo de Young y la relación de Poisson, respectivamente. Se ha demostrado que la teoría de Hertz describe con precisión el área de contacto entre cuerpos elásticos (grandes) con fuerzas de adhesión despreciables. No obstante, esta teoría no es aplicable a materiales elásticos blandos.

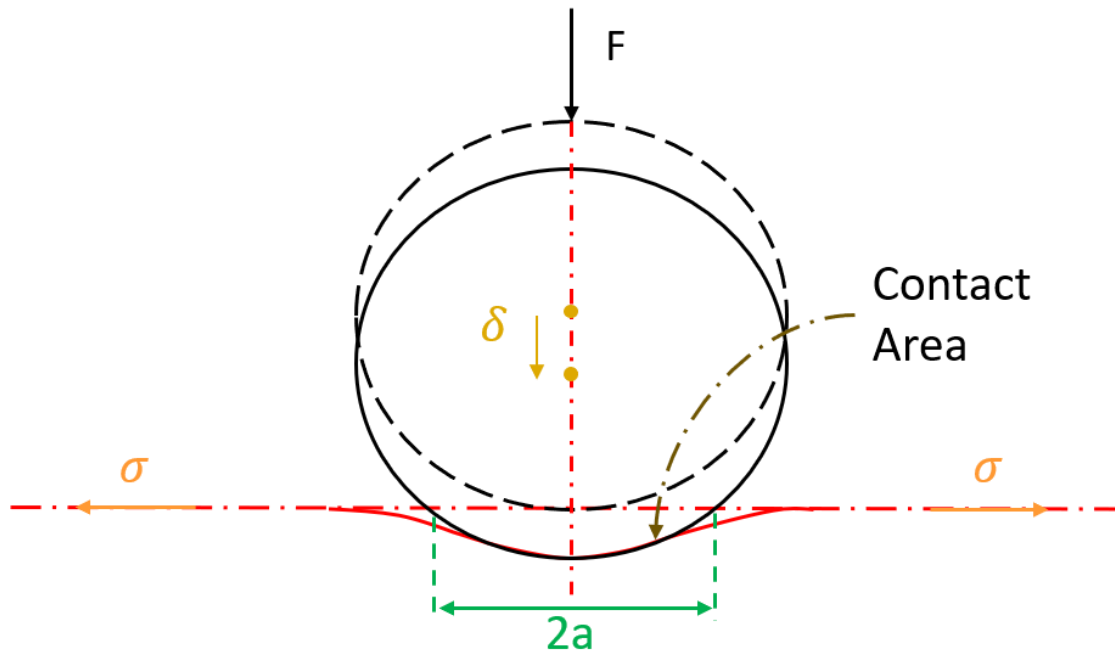


Figura 12: Esfera rígida de contacto por una fuerza vertical (Johnson et al. 1971).

2.7.2 Teoría de Johnson – Kendall – Roberts

Según los postulados de Johnson – Kendall – Roberts (Johnson et al. 1971), ellos describen cómo entran en contacto entre sí dos cuerpos que se adhieren y las deformaciones que sufren. Donde esta última resulta de dos fuerzas opuestas que son las resultantes de la deformación elástica y la tensión superficial.

Esta teoría de JKR se desarrolló para lograr describir el contacto macroscópico entre un material rígido y un material adhesivo blando, es decir, un polímero pegajoso. No obstante, se han utilizado bastante su aplicación en sistemas microscópicos.

Ellos en su modelo asumieron que las fuerzas de adhesividad solo están presentes en la región de contacto entre partículas. Johnson, Kendall y Roberts (1971) se basan en el concepto de minimizar las energías que están presentes en la zona de deformación, esto quiere decir que la energía de adhesión se equilibra, lo que favorece el contacto, frente a la energía elástica, lo cual se opone a la deformación (Johnson et al. 1971).

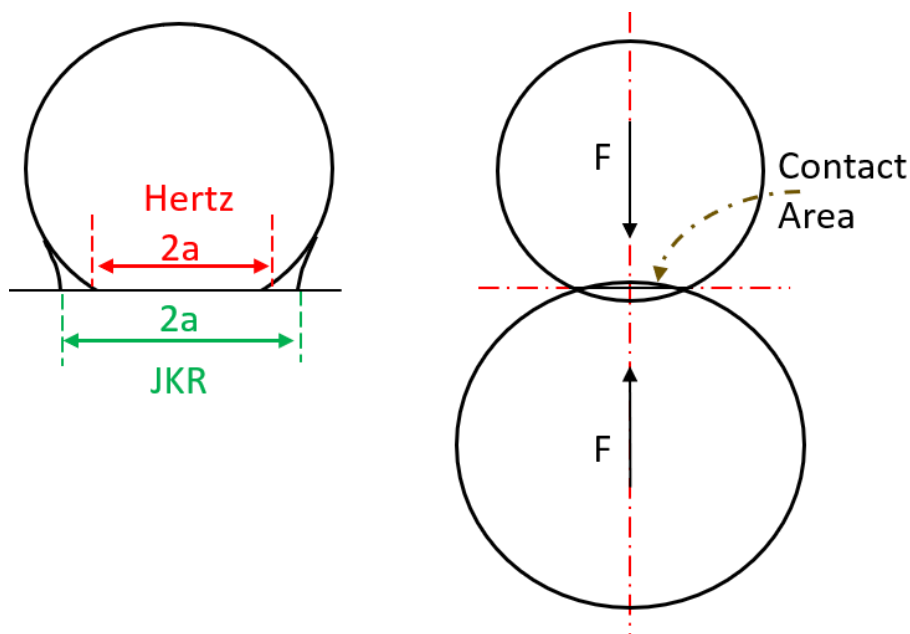


Figura 13: Esquema del área de contacto (JKR) (Johnson et al. 1971).

Según la teoría JKR, el radio de contacto de una esfera rígida en contacto con un semiespacio elástico blando está dado por:

$$a_{JKR}^3 = \frac{R^*}{E^*} \cdot \left\{ F + 3\pi E_A R^* + \sqrt{[6\pi E_A R^* F + (3\pi E_A R^*)^2]} \right\} \quad (17)$$

donde E es el módulo de elasticidad equivalente y E_A es la energía de adhesión. Después de la aplicación de una carga negativa, la separación de las superficies sucederá cuando la fuerza externa sea igual a:

$$F_C = -\frac{3}{2}\pi E_A R^* \quad (18)$$

Por tanto, la fuerza de arranque es independiente del módulo elástico, es decir, depende únicamente del radio de curvatura equivalente y del trabajo de adhesión. El valor del radio de contacto crítico con carga cero viene dado por:

$$a_{JKR} = \sqrt[3]{\left(\frac{6\pi E_A R^{*2}}{E^*}\right)} \quad (19)$$

Para el caso especial de un medio espacio elástico blando en contacto con un plano rígido, la fórmula JKR se puede escribir como:

$$a_{JKR}^3 = \frac{3(1 - \nu^2)R}{4E} \cdot \left\{ F + 3\pi E_A R + \sqrt{[6\pi E_A R F + (3\pi E_A R)^2]} \right\} \quad (20)$$

El valor del radio de contacto crítico con carga cero está dado por:

$$a_{JKR} = \sqrt[3]{\left(\frac{9(1 - \nu^2)\pi E_A R^2}{E}\right)} \quad (21)$$

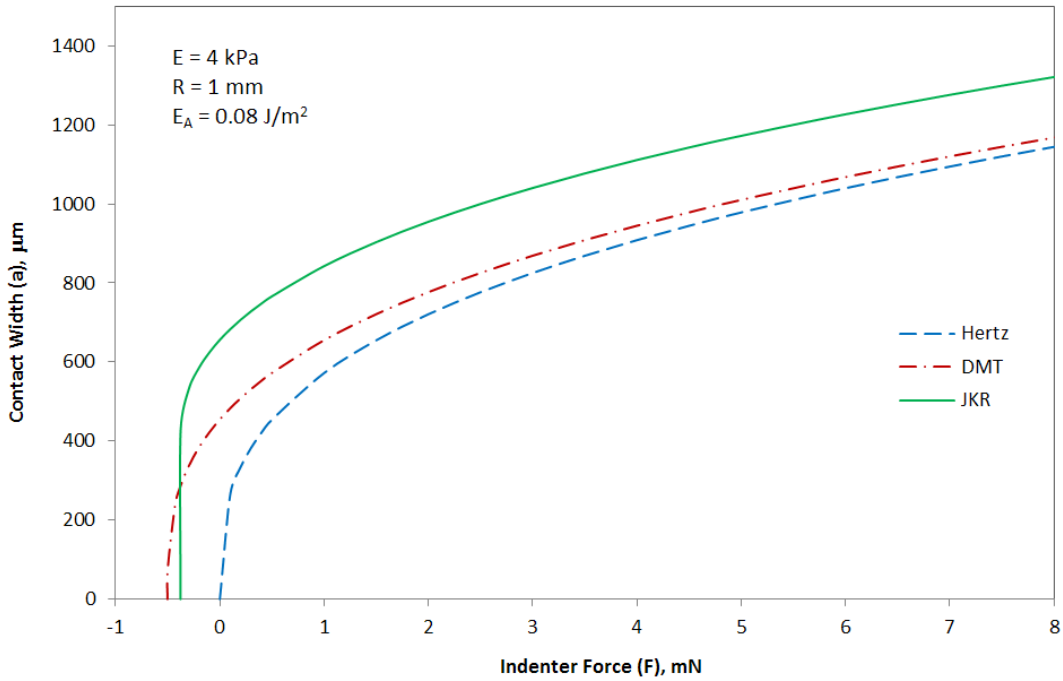


Figura 14: Ancho de contacto vs fuerza de contacto (Johnson et al. 1971).

La figura anterior muestra el área de contacto en función de la fuerza aplicada para una esfera de polímero de 1 mm de radio y de módulo de Young bajo sobre un sustancia rígida y plano con un módulo mucho mayor. Esta situación se puede describir con el modelo JKR, mientras que el modelo Hertziano y el modelo DMT predicen áreas de contacto demasiado pequeñas. La curva JKR muestra un ancho de contacto de fuerza cero relativamente grande de aproximadamente $650 \mu\text{m}$. A partir de dicha curva, se pueden deducir tanto el módulo de youngs E como la energía de adhesión E_A . Las curvas también muestran lo que sucede cuando la esfera se aleja de la superficie y la fuerza se vuelve negativa. La esfera rompe el contacto repentinamente cuando se alcanza el valor crítico F_C :

$$F_C = -\frac{3}{2}\pi E_A R \quad (22)$$

2.7.3 Hertz-Mindlin with JKR cohesión

La función Hertz-Mindlin con JKR (Johnson-Kendall-Roberts) Cohesión es un modelo de contacto de cohesión utilizado en el software EDEM, el cual toma en cuenta la influencia que tienen las fuerzas de Van der Waals dentro de la zona de contacto, de tal modo que permite al usuario modelar sistemas fuertemente adhesivos, como materiales secos o húmedos. En este modelo, la implementación de la fuerza de contacto elástica normal se basa en la teoría de Johnson-Kendall-Roberts (Johnson et al. 1971).

La función “Hertz-Mindlin with JKR cohesion” utiliza los mismos cálculos que el modelo de contacto de “Hertz-Mindlin (no slip)” del software EDEM, para los siguientes tipos de fuerza:

- Fuerza elástica tangencial.
- Fuerza de disipación normal.
- Fuerza de disipación tangencial.

La fuerza normal de JKR depende del solapamiento δ y del parámetro de interacción, energía superficial γ de la siguiente manera:

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} a^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (23)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{4\pi\gamma a/E^*} \quad (24)$$

Aquí, E^* es el módulo de Young equivalente y R^* es el radio equivalente definido en la sección "Modelo de contacto de Hertz-Mindlin (no slip)".

A continuación, se muestra el típico gráfico de la fuerza normal de JKR en función de la superposición normal. Los resultados del modelo de cohesión de “Hertz-Mindlin with JKR cohesión” se comparan con los resultados del modelo de “Hertz-Mindlin (no slip)”. La superposición negativa es el espacio entre dos partículas separadas. En donde la fuerza normal de EDEM JKR sigue la misma solución de las ecuaciones anteriores para las fases de carga y descarga.

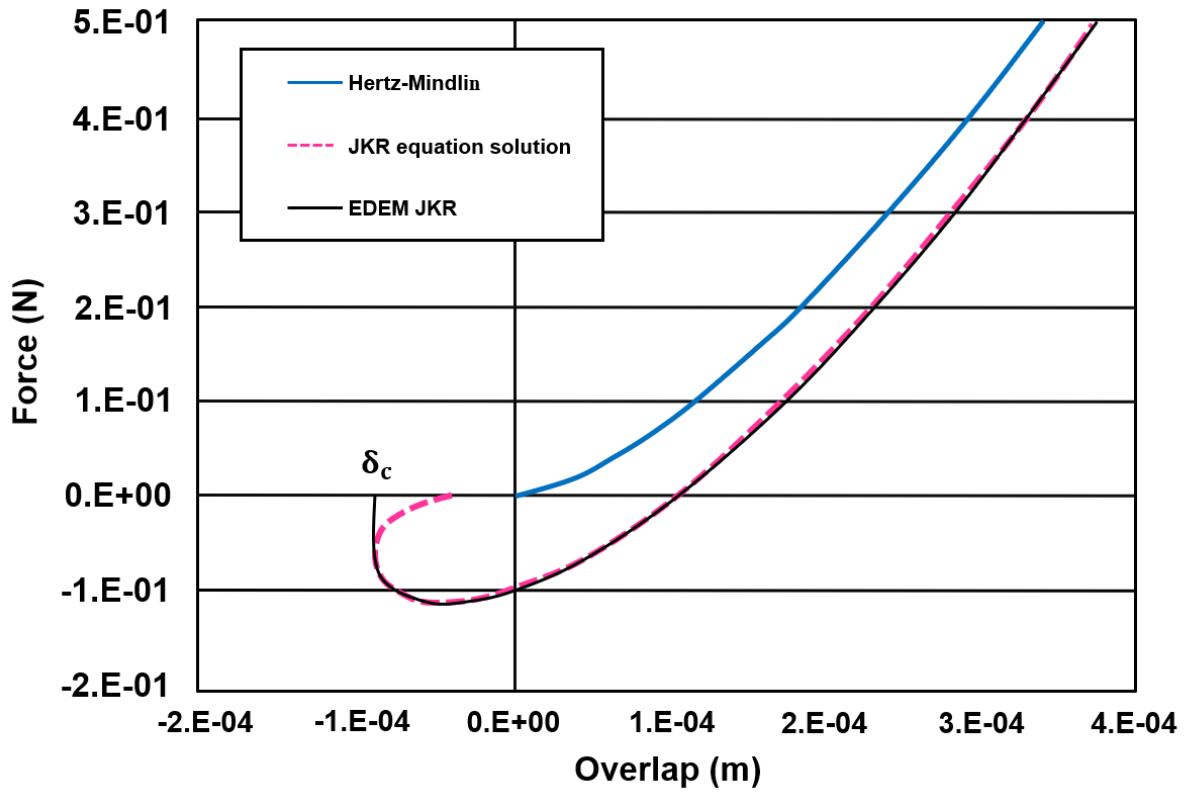


Figura 15: Fuerza normal en función de la superposición normal (Johnson et al. 1971).

Para $\gamma = 0$, la fuerza se convierte en fuerza normal de Hertz-Mindlin:

$$F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (25)$$

Este modelo proporciona fuerzas de cohesión atractivas incluso si las partículas no están en contacto físico. La brecha máxima entre partículas con fuerza distinta de cero está dada por:

$$\delta_c = -\sqrt{\frac{4\pi\gamma a_c}{E^*} + \frac{a_c^2}{R^*}} \quad (26)$$

$$a_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

Para $\delta < \delta_c$, el modelo devuelve fuerza cero. El valor máximo de la fuerza de cohesión ocurre cuando las partículas no están en contacto físico y el espacio de separación es menor que δ_c . El valor de la fuerza de cohesión máxima, llamado fuerza de extracción, está dado por:

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \quad (28)$$

El cálculo de la fuerza de fricción es diferente al modelo de contacto de Hertz-Mindlin (no slip) en que depende de la parte repulsiva positiva de la fuerza normal JKR. Como resultado, el modelo de fricción EDEM JKR proporciona una mayor fuerza de fricción cuando el componente de cohesión de la fuerza de contacto es mayor. Aunque este modelo fue diseñado para partículas finas y secas, se puede utilizar para modelar partículas húmedas. La fuerza necesaria para separar dos partículas depende de la tensión superficial del líquido γ_c y del ángulo de humectación θ :

$$F_{pullout} = 2\pi\gamma_s \cos(\theta)\sqrt{R_i R_j} \quad (29)$$

Al igualar la fuerza anterior con la fuerza máxima de JKR, da como resultado lo siguiente:

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \quad (30)$$

Lo que permite la estimación del parámetro de energía de superficie JKR si el tamaño de partícula de EDEM no está escalado.

Las fuerzas de cohesión y adhesión en medios granulares se pueden modelar introduciendo una componente de fuerza de atracción en el modelo de contacto. La cohesión se define como la fuerza de atracción entre materiales similares, mientras que la adhesión es la fuerza de atracción entre materiales diferentes. En términos de la manipulación y modelación de materiales a granel, la cohesión es la resistencia al cizallamiento de partícula a partícula y partícula a muro bajo tensión normal cero, mientras que, la adhesión se puede definir como la fuerza de tracción de partícula a partícula y de partícula a pared del material a granel (Carr et al. s. f.).

Es por todo esto que la teoría de contacto desarrollada por Johnson, Kendall y Roberts (Johnson et al. 1971) que se conoce como el modelo de cohesión JKR, el cual es una extensión del conocido modelo de contacto de Hertz. En donde este modelo toma en cuenta las fuerzas de atracción producidas por los efectos de Van der Waals. No obstante, este modelo también se usa para modelar material donde la adhesión es causada por fuerzas capilares o de puente líquido (Coetzee 2020).

2.7.4 Energía superficial

La energía superficial está definida como la energía que se necesita para romper enlaces intermoleculares en una superficie. En el caso de los líquidos, la tensión superficial (fuerza por unidad de longitud) y la densidad de energía superficial son idénticos. En el caso del agua esta tiene la densidad de energía superficial igual a $0,072 \left[\frac{J}{m^2} \right]$ y una tensión superficial de $0,072 \left[\frac{N}{m} \right]$.

En física, la tensión superficial de un líquido es la fuerza que actúa tangencialmente por unidad de longitud en el borde de una superficie libre en equilibrio, la cual se tiende a contraer dicha superficie. Otra definición es que se puede definir como la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. La tensión superficial se suele representar con la letra griega γ y las unidades de tensión o energía superficial en el sistema internacional son $\left[\frac{J}{m^2} \right]$, $\left[\frac{N}{m} \right]$.

La tensión superficial es una demostración de las fuerzas intermoleculares que se presentan en los líquidos, estas fuerzas junto con las de las superficies sólidas que entran en contacto, dan paso a la capilaridad. El cual presenta como efecto la elevación o depresión de la superficie de un líquido en la zona de contacto con un sólido. Además, cabe destacar que las fuerzas cohesivas entre moléculas de un líquido son las responsables del fenómeno conocido como tensión superficial (Departamento de Química Física 2020).

En términos termodinámicos la tensión superficial es un fenómeno de superficie, el cual se define como la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta que su energía de superficie potencial es mínima, la cual es una condición necesaria para que el equilibrio sea estable. Debido a que una esfera que presenta un área mínima para un volumen dado, debido a la acción de la tensión superficial, la tendencia de una porción de líquido llevará a formar una esfera o a producir una superficie curva o menisco cuando este líquido entre en contacto con un recipiente (Domínguez, Toro, y Serrano 2014).

La tensión superficial γ se puede interpretar como la energía necesaria que se debe dar a un sistema líquido para lograr aumentar su superficie en una unidad, y así lograr vencer la atracción entre sus moléculas.

$$\gamma = \frac{\Delta E}{\Delta A} \quad (31)$$

Donde la tensión superficial γ es un vector que tiene una dirección tangencial a la superficie antes de ampliar el área de un ΔA y la energía suministrada ΔE es un escalar (Domínguez et al. 2014).

La tensión superficial puede ser afectada por la intensidad de las fuerzas intermoleculares, de modo que a medida que haya un mayor valor de γ significa una mayor fuerza de atracción intermolecular a vencer para lograr aumentar su superficie en una unidad.

3. METODOLOGÍA

3.1 Desarrollo experimental

En esta sección se describirá la metodología computacional a utilizar para la presente memoria de título. Primero, se determinarán los parámetros que definirán el material granular y sus características en la modelación computacional, desde una distribución monodispersa, bidispersa y finalmente polidispersa. Esta última se asemejará a la realidad y podrá representar muestras a escala de laboratorio. En segundo lugar, se delimitarán las dimensiones del modelo físico que computacionalmente represente a un cono de Abrams en un laboratorio y, además, se definirá un modelo equivalente, respecto de sus dimensiones. Finalmente, se desarrollará un estudio del mismo material con respecto a la segregación por tamaños de partículas.

Para lo anteriormente descrito a continuación se presenta un esquema general:



Figura 16: Esquema general del trabajo.

Luego de definir los pasos a seguir se procede a dividir el trabajo en 3 partes.

En la *primera parte* se replicará el ensayo de Abrams. Se definirá una geometría de cono con una superficie, donde se realizará este ensayo variando la cohesión para estudiar el comportamiento del material. Para este ensayo se ocuparán 3 tipos de distribuciones granulométricas: monodispersa, bidispersa y polidispersa. Se observará el comportamiento del material granular comparando las distintas distribuciones. La distribución polidispersa presentará mayor cercanía a la realidad.

La *segunda parte* se realizará una comparativa de geometrías para el ensayo del cono de Abrams, donde se verificará si la geometría influye en el comportamiento del material, por lo que se usará un cilindro, cuya ventaja será un llenado más sencillo y rápido en términos computacionales.

Por último, en la *tercera parte* se hará un estudio de cómo la pila de material granular se comportará en un estado de segregación con contenido de agua variable. En esta sección se empleará un cilindro que será llenado con dos tipos de partículas - distinto tamaño - y se irá variando el contenido de agua. En este estudio se presentarán dos escenarios, con una configuración de columnas iniciales opuestas, es decir,

uno en el cual las partículas más grandes estarán arriba y las más pequeñas abajo y luego la condición inversa.

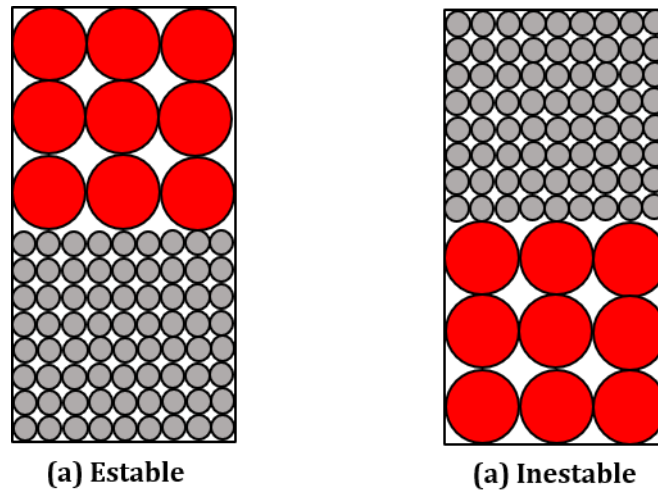


Figura 17: Configuraciones de columnas iniciales consideradas en estos experimentos (Caplan 2018).

En este caso también se muestra una distribución bidispersa, pero a diferencia del caso anterior este se llevará a cabo para determinar el efecto de la segregación de las partículas. Por lo que se considerarán dos configuraciones, como se muestra en la figura 20, donde a la izquierda se muestra una columna con una capa de partículas grandes sobre una capa igual de partículas pequeñas (caso estable) y la derecha se muestra una columna con partículas pequeñas en la parte superior y las partículas más grandes en la parte inferior (caso inestable). Esto introduce la posibilidad de segregación granular, mediante la cual se separan diferentes tipos de partículas a medida que avanza el flujo. Esto puede tener efectos dramáticos en la estructura del flujo, por ejemplo, la inestabilidad de digitación observada por Pouliquen y Vallance (1999). Estos términos de estable o inestable hacen referencia a la estabilidad de la configuración con respecto a los efectos de segregación (Caplan 2018). Más adelante se explicarán estos conceptos de estado estable e inestable.

3.2 Cono de Abrams

El cono de Abrams es un molde de metal estándar (según el estándar ASTM C143) que comúnmente es utilizado en ensayos de hormigón en su estado fresco con el objetivo de medir su consistencia, es decir, la fluidez o plasticidad del hormigón. El ensayo consiste en llenar el molde de metal con material a través de la parte superior, mientras que la base es ubicada sobre una superficie plana. Posteriormente, el molde

es retirado verticalmente. Inmediatamente después de que se haya retirado el molde, se debe medir el asentamiento del material. Asentamiento se refiere a la diferencia entre la altura del molde y la altura del material.



Figura 18: Cono de Abrams utilizado comúnmente en pruebas de laboratorio (Vallejos 2017).

Este método del Cono de Abrams fue utilizado en el estudio de Vallejos 2017. Se utilizó el cono de Abrams para realizar pruebas de asentamiento en muestras de barro, caracterizar su consistencia al establecer el grado de saturación y el empaquetamiento. Luego se evaluó la resistencia no confinada para diferentes grados de saturación y empaquetamiento. Los resultados mostraron que las condiciones para la respuesta del fluido en las pruebas de asentamiento correspondían a las condiciones de baja resistencia en las pruebas de compresión no confinada.

También en el estudio de Salas 2019. Se realizó una modelación física de extracción de mineral en una batea saturada de barro. Para ello se analizó la extracción aislada de barro, desde un punto de extracción con diferentes porcentajes de humedad previamente definidos por una prueba de consistencia llamado “Cono de Abrams”.

3.3 Caracterización del material

Se sabe, gracias a distintos autores como Butcher 2000, Becerra 2011, Hubert 2000, Jakubec 2012, entre otros, que existen cuatro mecanismos que pueden llevar a desencadenar el fenómeno de bombeo de agua-

barro. Estas condiciones son: presencia de agua, material formador de barro, una perturbación al terreno y un punto de descarga. Es importante, entonces, estudiar un material granular que represente distribuciones granulométricas que puedan darse en la pila de mineral en los puntos de descarga. También es de suma importancia medir el contenido de agua que puede contener el material, pues será este el que defina como se comportará en situaciones reales de extracción, cuándo este pasa a ser considerado barro. Especialmente cuando sus niveles de saturación comienzan a ser críticos.

Los tipos de partículas que serán utilizados en este estudio presentará las siguientes características que serán definidas a continuación. Dichas partículas presentarán una geometría esférica, lo cual mostrará una situación ideal de una partícula. Esto se debe a que es necesaria la optimización de los cálculos de la modelación computacional, debido a que simulaciones más complejas y a una mayor escala significa grandes costos computaciones que actualmente no se pueden costear.

Se definirán 3 casos donde la distribución de partículas que estarán presentes en dichas simulaciones. Estas serán monodispersa, que presentará un solo tipo de partícula con un radio de 0,35 cm. En el caso de la bidispersa estas serán dos partículas y tendrán un radio de 0,35 cm y 0,25 cm, las cuales presentarán una distribución en un 50% cada una. Tal como se muestra en la figura a continuación.

Tabla 6: Distribución monodispersa y bidispersa.

Distribución Monodispersa	
Radio Partícula (cm)	0,35
Distribución Bidispersa	
Radio Partícula (cm)	0,35
Radio Partícula (cm)	0,25

Y en cuanto a las partículas polidispersas se presentará una distribución granulométrica adaptada. Para esta curva granulométrica se tomó como base la publicación “Geotechnical characterization of ore related to mudrushes in block caving mining” de Castro, Basaure, Palma y Vallejo (Castro 2017). En esta publicación, se realizó una caracterización geotécnica del material contenido en un punto del sector Diablo Regimiento de Minera El Teniente. Los valores de la distribución granulométrica que utilizaron fueron ajustados al modelo ocupado en esta investigación (véase en anexos), los cuales se presentan en la tabla 7.

Tabla 7:Distribución granulométrica adaptada de Castro 2017.

Tamaño original (mm)	Pasante (%)
4,5	100
4	94
3,5	74
3	40
2,5	19
2	13,5

Por otro lado, para la primera y segunda parte de las simulaciones se estarán variando las fuerzas cohesivas de las partículas. Estas comenzarán con una fuerza cohesiva igual a cero, las que mostrarán una condición de “polvo” o suelo seco. Luego se comenzará a aumentar la energía superficial de esta fuerza cohesiva de $2,5 \text{ J/m}^2$ en $2,5 \text{ J/m}^2$ hasta que las partículas no muestren movimiento al ser levantado el cono. La masa de partículas estará completamente compacta que tomará la forma del cono sin mostrar desplazamiento. Es decir, podrá considerarse como un suelo totalmente cohesivo.

Para la segunda parte de este experimento se utilizará la misma distribución polidispersa descrita anteriormente, porque de acuerdo a lo ya señalado, se considera que tiene mayor similitud con un material extraído en minería de Block/Panel Caving. Así como el mismo aumento en la energía superficial.

Por último, para los experimentos de segregación se usarán dos tipos de partículas, basadas en el estudio “Granular Collapses” (Caplan 2018). En este se emplearon partículas pequeñas de radio $300 \mu\text{m}$ y $425 \mu\text{m}$ y las partículas grandes eran de radio $1000 \mu\text{m}$ y $1300 \mu\text{m}$. Se escoge un radio para partículas pequeñas y un radio para partículas grandes prefiriendo las partículas con menor radio en cada caso. Luego estas son escaladas a los parámetros de la modelación computacional. La escala a utilizar es de 1:5 veces el tamaño dando como resultado partículas pequeñas de radio $1,5 \text{ mm}$ y partículas grandes de radio 5 mm .

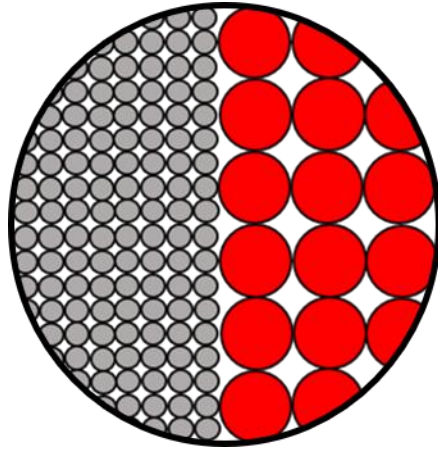


Figura 19: Distribución de tamaños de partículas para el estudio de segregación, partículas grises (izquierda) radio de 1,5 mm y partículas rojas (derecha) radio 5 mm (Caplan 2018).

3.4 Dimensiones del modelo físico

Para esta modelación computacional, se necesitará generar una superficie plana donde las partículas y el cono de Abrams puedan permanecer en un estado quieto en la base. Sobre la base se posicionará el cono truncado, dentro del cual se depositarán las partículas a través de la abertura superior. La finalidad será medir cómo se comportará la pila de mineral que se encontrará depositada en la base a la hora de levantar el cono.

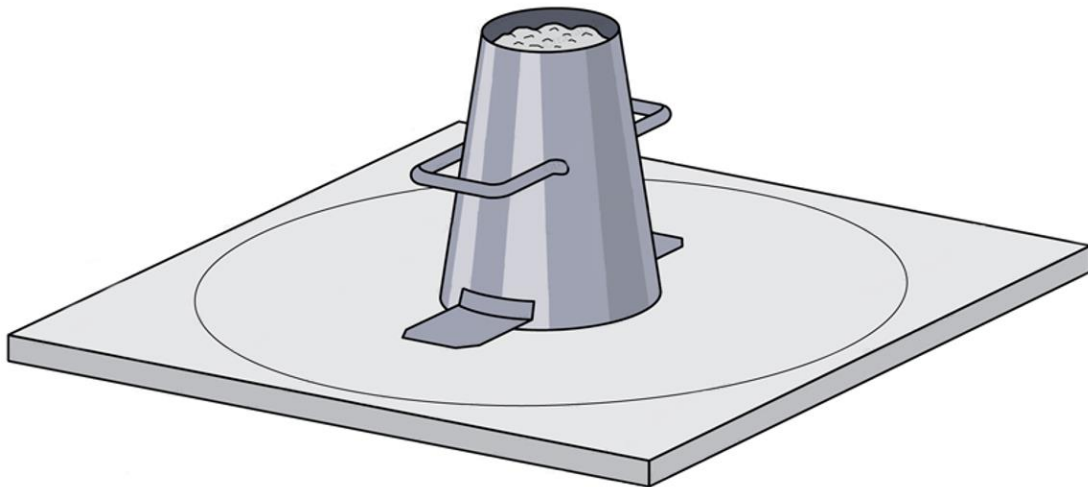


Figura 20: Cono de Abrams utilizado en la modelación computacional.

Tabla 8: Dimensiones del cono de Abrams utilizado en la modelación computacional.

Dimensiones del Cono de Abrams	
Diámetro 1 (cm)	10
Diámetro 2 (cm)	20
Altura (cm)	30
Espesor (cm)	0,2

Tabla 9: Dimensiones de la placa cuadrada utilizada en la modelación computacional.

Dimensiones de la Placa Cuadrada	
Lado (cm)	100
Espesor (cm)	3

Las dimensiones que presentará este modelo computacional son las siguientes. Se utilizará un cono truncado con un diámetro superior de 10 cm, un diámetro inferior de 20 cm y con una altura de 30 cm con un espesor de 0,2 cm, sobre una placa cuadrada que será utilizada como base de lado 100 cm y con un espesor de 3 cm. Este cono se llenará completamente de partículas. Luego se levantará verticalmente y las partículas caerán formando una pila sobre la placa.

En el segundo experimento se usará un cilindro equivalente en volumen al cono de Abrams. Para lo cual se ocupará igual superficie y dimensiones empleadas anteriormente. El cilindro conservará la misma altura de 30 cm, igual que el cono de Abrams empleado anteriormente y en el caso de los diámetros se establecerá una relación matemática para llegar a un diámetro equivalente (véase en anexos).

Tabla 10: Dimensiones del cilindro utilizado para la comparación de geometrías.

Dimensiones del Cilindro	
Diámetro (cm)	15,28
Altura (cm)	30
Espesor (cm)	0,2

En el tercer experimento se ocupará una geometría de cilindro, con la misma superficie y altura de 30 cm como en el experimento del cono de Abrams, pero con un diámetro de 10 cm. La finalidad es simplificar

los cálculos y que estos se desarrollen con mayor rapidez. Se ingresarán partículas pequeñas que ocuparán el 50% de la altura del cilindro, ya sea arriba o abajo, y por consiguiente la otra mitad será ocupada por las partículas de mayor tamaño.

Tabla 11: Dimensiones del cilindro utilizado en los estudios de segregación.

Dimensiones del Cilindro	
Diámetro (cm)	20
Altura (cm)	30
Espesor (cm)	0,2

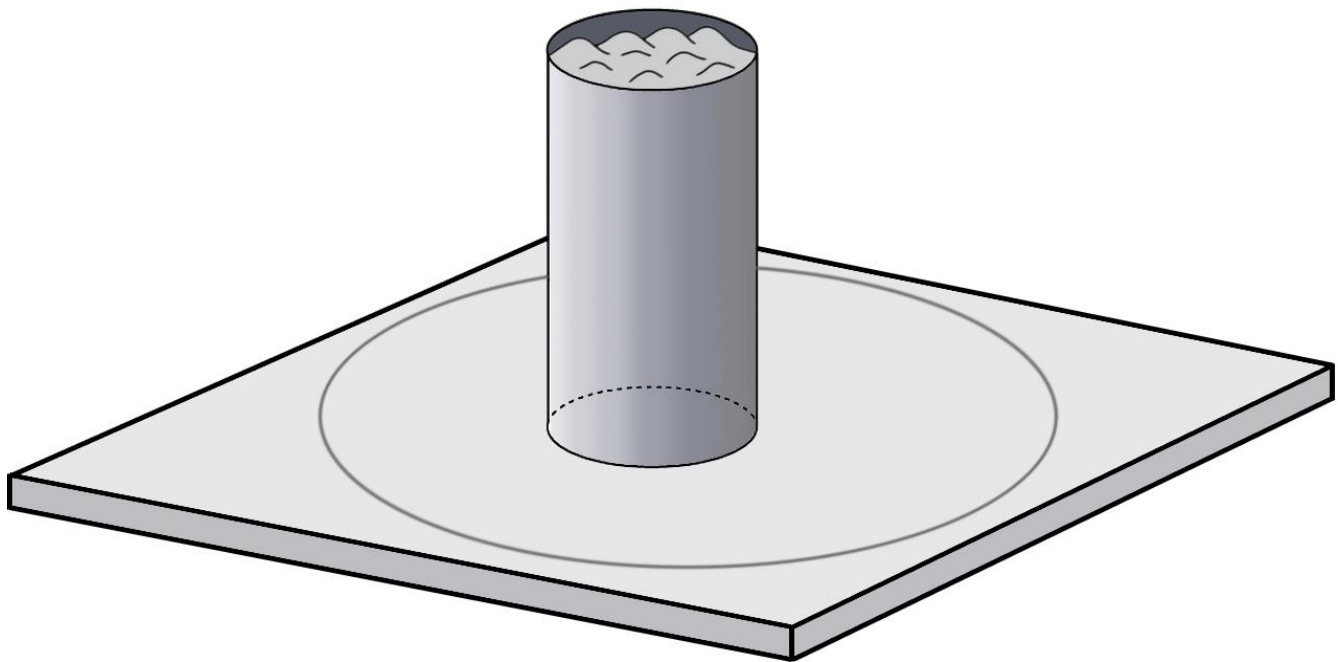


Figura 21: Cilindro utilizado en la modelación computacional.

La velocidad con que serán levantados tanto el cono de Abrams como el cilindro para la primera y segunda parte de las simulaciones será una velocidad de 1 m/s. Se ha elegido esta velocidad para evitar que el material genere adherencia al cono y optimizar las simulaciones disminuyendo el tiempo de espera. Por otro lado, el cilindro de la tercera parte será levantado con una menor velocidad. Esto para evitar posibles adherencias o atascamiento de las partículas mayores entre sí y que no interfieran en la depositación del material. Información obtenida a partir del estudio “Granular Collapses” (Caplan 2018)

que indica ocupar una velocidad entre 0,7 m/s a 1 m/s, se usará el valor inferior esperando obtener resultados similares.

3.5 Definición de parámetros físicos

El software EDEM cuenta con una gran cantidad de herramientas y parámetros que permiten definir de forma correcta un medio granular desde casi cualquier perspectiva física. Esto permitirá representar un caso seco, cohesivo en distintos niveles y sobresaturado.

En el caso del **suelo seco** o sin cohesión, gran parte de estos parámetros fueron entregados por el software EDEM. Estos valores representan un material granular en el que se definirá su contenido de agua. Estos parámetros se encargan específicamente de definir las características de cada una de las partículas que el programa crea, además de sus propiedades físicas que se encargarán de definir el comportamiento al interactuar entre sí o con otros elementos. Por ejemplo, el material de la geometría que las va a contener. A continuación, se muestran la magnitud de cada una de estas propiedades del suelo.

Tabla 12: Propiedades físicas definidas por EDEM para representar un material granular.

Propiedades del Material Granular	
Coefficiente de Poisson ν	0,25
Densidad solido ρ (kg/m ³)	2500
Módulo de corte G (Pa)	1×10^8
Coefficiente de Restitución	0,25
Coefficiente de Fricción Estática	0,95
Coefficiente de Fricción de Rodadura	0,01

Para las propiedades de las partículas, masa, volumen y momento de inercia, se empleó la herramienta de “auto calculation”. Para el modelamiento del contenido de agua de estas simulaciones se utilizó la función “JKR cohesion model parameter values”, que se encargó de modelar la cohesión existente entre las partículas que interactuaban en la simulación. En el software EDEM, al ocupar el modelo JKR es necesario definir solo el parámetro “surface energy”, con los datos de suelo que se requieran. Por ejemplo, para un suelo seco el valor de la energía superficial sería igual a 0 J/m².

Se eligió la función “JKR cohesion model parameter values” ya que tiene la capacidad de modelar la tensión superficial que existe entre partículas que presentan un contenido de agua y las atracciones entre estas. Debido a las fuerzas de capilaridad, logra modelar los meniscos existentes entre partículas y agua, mostrando como resultado una aproximación de un material granular cohesivo.

En el caso del **suelo cohesivo** se establecieron las mismas condiciones físicas de las partículas que eran entregadas por defecto a través del programa. La función “JKR cohesion model parameter values” requería una única variación en cuanto a la energía superficial que necesitaban las partículas. Este modelo, a medida que aumenta la energía superficial, muestra como la fuerza de adherencia que existe entre partículas es cada vez más fuerte. Este modelo toma en cuenta las fuerzas de atracción producidas por los efectos de Van der Waals (Johnson et al. 1971). No obstante, este modelo también se usa para modelar material donde la adhesión es causada por fuerzas capilares o de puente líquido (Coetzee 2020).

Para el caso de **suelo sobresaturado** se establecieron las mismas condiciones, a excepción del coeficiente de fricción estática del material granular que fue igualado a cero para lograr modelar un suelo que muestre un exceso en el contenido de agua, lo que evitará mayormente su resistencia al movimiento. Con la finalidad de lograr modelar un estado en que el material granular se asemejará a un barro con la capacidad de escurrir sobre la superficie libremente. Esto se define como un estado sobresaturado. Cabe destacar que solo se disminuyó el valor del coeficiente de fricción estática, puesto que el valor del coeficiente de rodadura ya era cercano a cero.

Además, la energía superficial del modelo JKR fue definida igual a 0 J/m^2 , lo que evitaría que el material granular pudiera mostrar un comportamiento cohesivo en la interacción entre sus partículas. Dado que al momento en que el material llegue a un porcentaje de humedad tal alto que este se encuentre sobresaturado de agua este perderá todo grado de cohesión entre sus partículas mostrando un valor nulo.

Cualquier configuración en las condiciones físicas de las partículas de este material granular, será imposible modelar perfectamente un medio con un alto contenido de humedad. Al utilizar herramientas DEM es imposible modelar un líquido porque el método discretiza un conjunto de partículas, una a una y no como un conjunto. Por lo que se requieren herramientas con la capacidad de modelar elementos continuos como un líquido. Pero para ello se buscan herramientas que representen de la mejor manera el efecto del agua en un material granular, es decir, que les entregue más movilidad a las partículas y pareciera que contienen agua. Algunos de los métodos empleados para modelar la dinámica de los fluidos

de forma computacional son los basados en el modelo Euleriano. Se han desarrollado diversos programas computacionales de carácter comercial, basados principalmente en las técnicas de elementos y volúmenes finitos para modelos continuos (Avaria 2005).

A continuación, en la figura 25 se presentan los 3 estados señalados anteriormente: suelo seco, suelo cohesivo y el suelo sobresaturado.

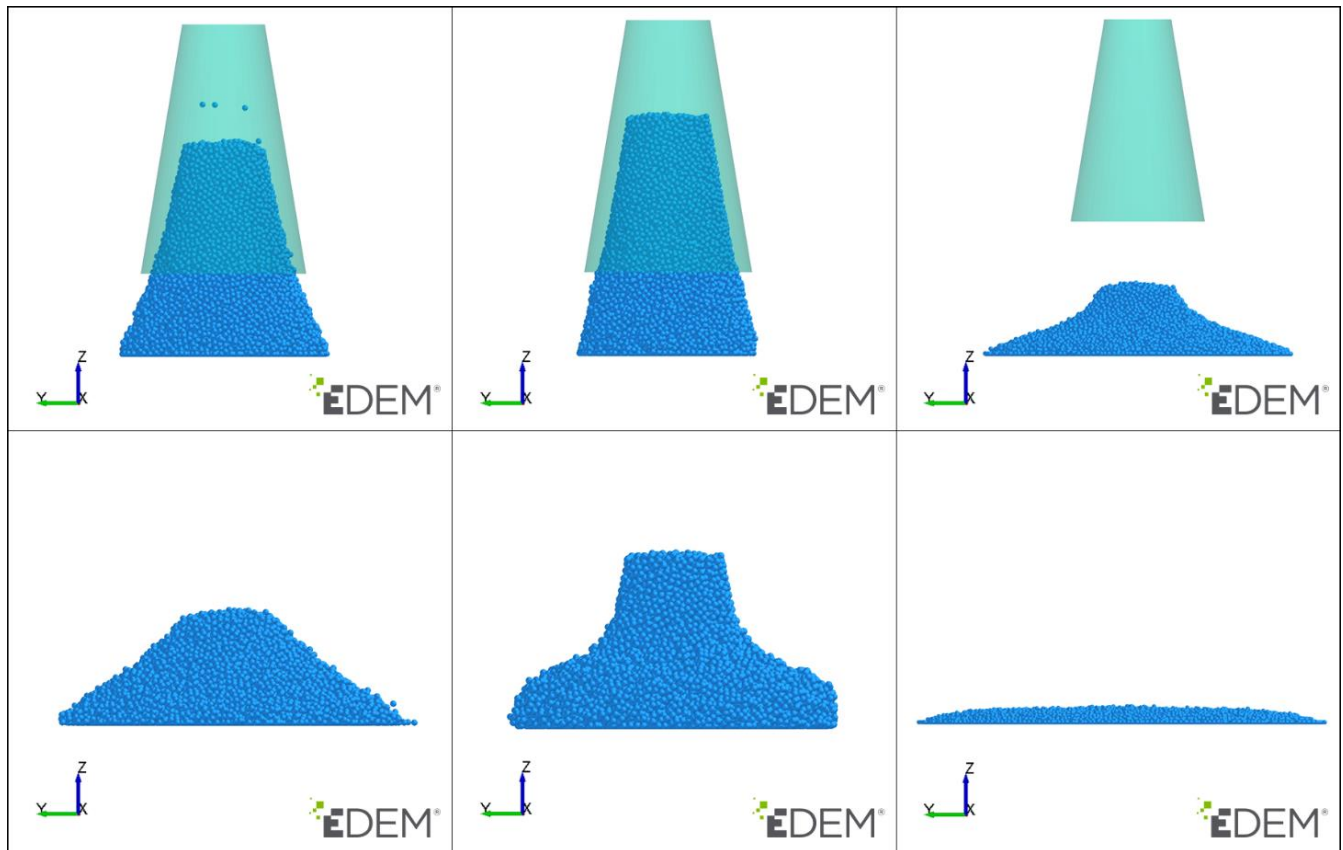


Figura 22: Estados del material granular, suelo seco (izquierda), suelo cohesivo (en medio) y suelo sobresaturado (derecha).

Finalmente, en el caso de las geometrías, lo cual incluye el cono de Abrams, el cilindro y la superficie que contiene a las partículas, se definió un material en el cual se utilizaron los valores que entregaba el software EDEM por defecto, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 13: Propiedades físicas definidas por EDEM para representar el material de la geometría.

Propiedades de la Geometría	
Coefficiente de Poisson ν	0,25
Densidad solido ρ (kg/m ³)	2500
Módulo de corte G (Pa)	1×10^8
Coefficiente de Restitución	0,5
Coefficiente de Fricción Estática	0,5
Coefficiente de Fricción de Rodadura	0,01

3.6 Plan computacional

En este apartado se definirá el procedimiento a utilizar en las simulaciones computacionales mediante el software EDEM.

La caracterización del material se trabajará variando sus propiedades para estudiar y entender cómo este se comporta. Para realizar la modelación numérica se realizarán distintos experimentos computacionales, en los cuales las principales variables que estarán involucradas serán la granulometría de material y el contenido de agua. Por lo tanto, se definirá un caso base con un material granular seco, al cual se le irá aumentando la cohesión por medio del aumento de la energía superficial para un cierto tamaño de partícula.

Se presentarán imágenes de lo que serán las simulaciones. Estas serán utilizadas para realizar este análisis. Para explicar cómo cambia la altura y área de la pila de este material granular, se irá aumentando la energía superficial, de modo de ver cómo y cuándo se compacta por completo. Además, comprobar cómo este material pasa de ser un medio seco a una pasta y luego llegar a ser un fluido.

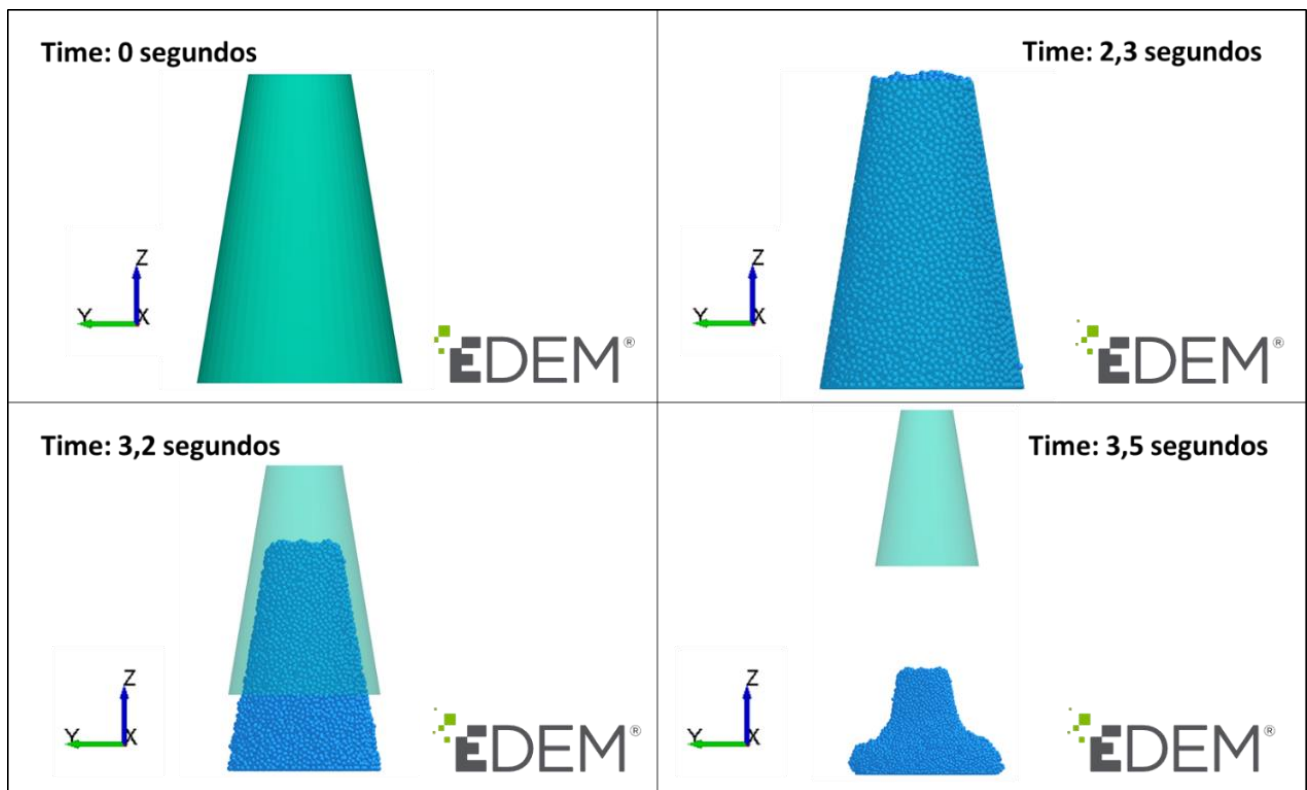


Figura 23: Secuencia del experimento computacional en Cono de Abrams para caso monodisperso, bidisperso y polidisperso en EDEM.

Como se ilustra en la Figura 23, la modelación computacional de este experimento se muestra en 4 momentos del procedimiento. Se observa una geometría de cono que se llena completamente de un material granular, a los 2,3 segundos. El cono es levantado verticalmente y a los 3,2 segundos la mitad del material se comienza a depositar sobre la base. A los 3,5 segundos se muestra la pila ya formada. Como se visualiza en la imagen la pila presenta una forma irregular, por lo que medir su ángulo de reposo se vuelve complejo y poco fiable. A partir de este resultado se decidió medir el diámetro y altura de la pila y cuánto puede desplazarse esta dependiendo de su estado de cohesión.

Por otro lado, se elige para cada una de las 3 simulaciones con distinta distribución de tamaño un caso, al cual se le aplicarán mediciones en diferentes direcciones tanto para la altura y diámetro, para luego obtener un promedio. Con esto se obtiene una desviación estándar y se calcula mediante un análisis estadístico un error porcentual. Lo que representa el error típico que podrían presentar los resultados de esta investigación.

Cabe señalar que estos experimentos tienen como propósito generar una curva que explique el comportamiento de la altura y el área de la pila en función del contenido de agua. Además de separar por categorías el comportamiento que presenta el material, ya sea seco o cohesivo.

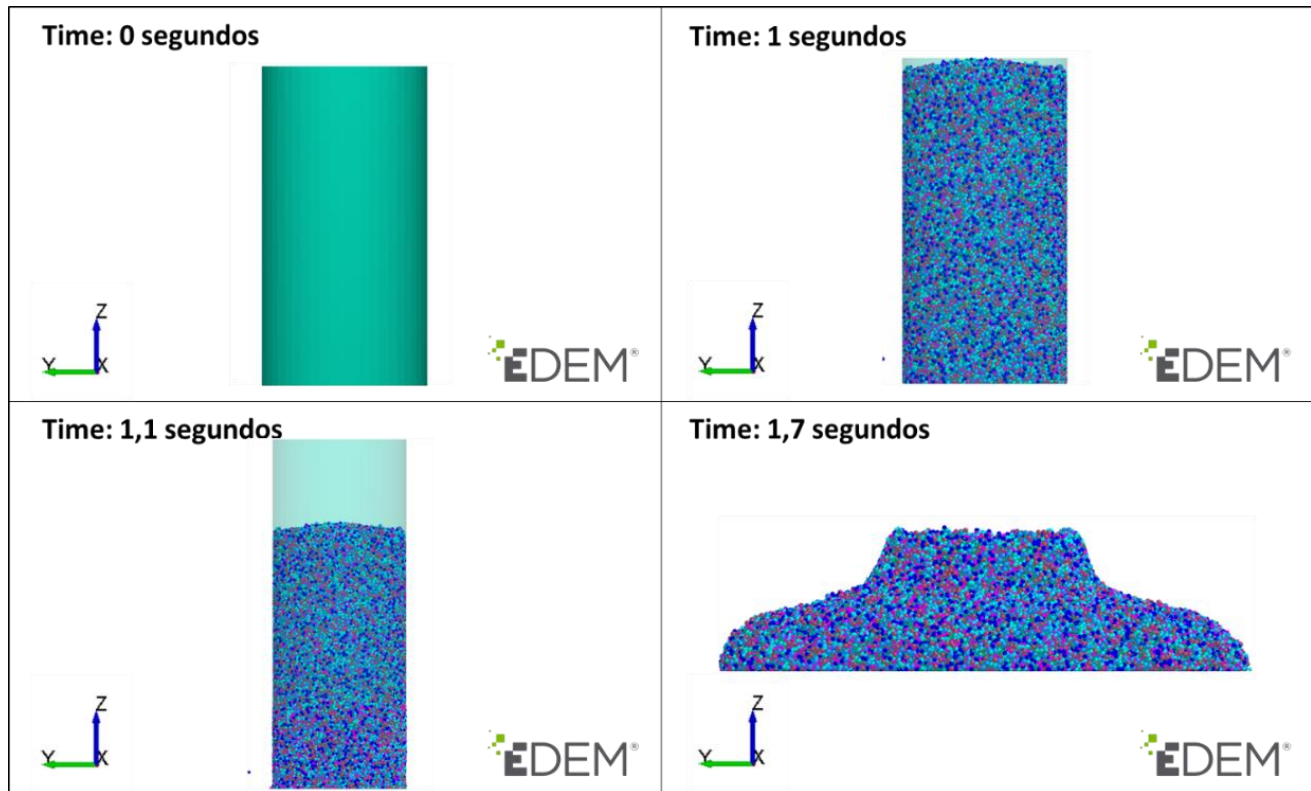


Figura 24: Secuencia del experimento computacional con cilindro en EDEM.

En la comparación de geometría que será parte de las segundas simulaciones se utilizará una geometría de cilindro, en donde el material granular con una distribución de tamaño polidispersa será introducida. Posteriormente, al levantar el cono se espera verificar si el cambio de geometría tiene incidencia en su comportamiento o no, tal como se muestra en la Figura 24.

En la última parte de las simulaciones se usará una geometría cilíndrica. Se emplearán llenados por separado, utilizando dos tamaños de partículas, unas grandes de 5 mm y otras pequeñas de 1,5 mm. Se distribuirán unas arriba y las otras abajo y viceversa como se muestra a continuación en la figura 25. Se replicarán los experimentos de Caplan 2018, pero a diferencia de estos, aquí se estudiará la variación de la cohesión del material y cómo esta afecta a la segregación de partículas.

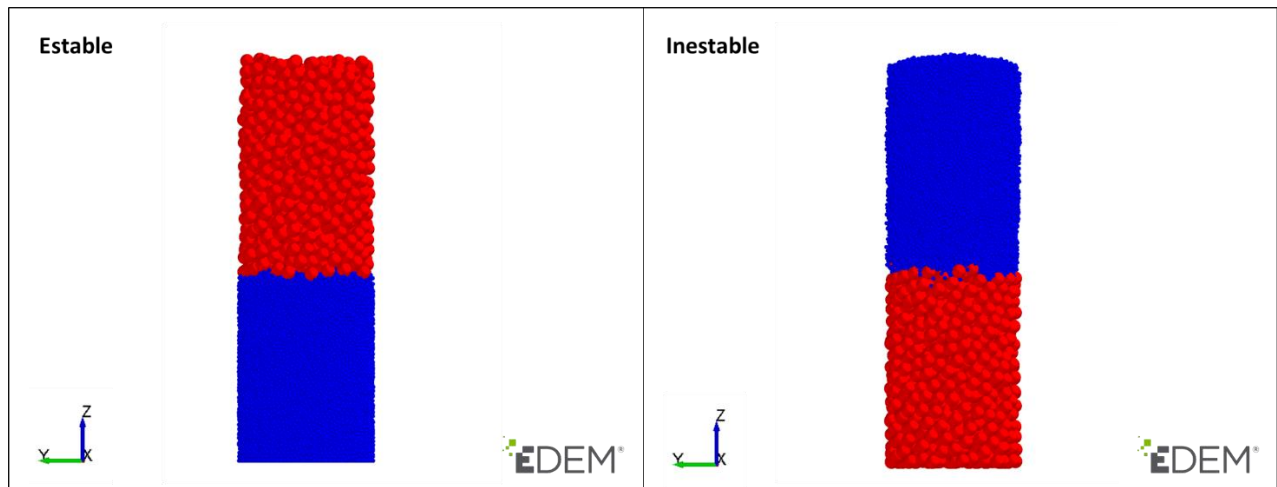


Figura 25: Configuraciones de columnas iniciales consideradas en estos experimentos de segregación, caso estable e inestable.

En este modelo computacional se consideraron dos configuraciones, como se ilustra en la figura xx: a la izquierda una columna con una capa de partículas grandes sobre una capa de partículas pequeñas (estado estable); y la inversa, con las pequeñas en la parte superior (inestable). Los términos estable e inestable se refieren a la estabilidad de la configuración con respecto a los efectos de segregación (Caplan 2018).

La investigación experimental definida por Pouliquen y Vallance 1999 sobre flujos granulares que contienen partículas de varios tamaños y que descienden por pendientes, muestra que la segregación de partículas de grano grueso y de forma irregular induce una inestabilidad de digitación en el frente de propagación. La digitación es el proceso de desplazamiento de un fluido por otro, en el cual la inestabilidad del flujo produce un movimiento irregular (en forma de dedos).

Los autores postularon que, el mecanismo de segregación por tamaño implica la percolación de partículas pequeñas hacia abajo y la correspondiente migración de las grandes hacia la superficie del flujo, por lo tanto, consideraron, entonces que el “estado estable” era la configuración natural para dichas partículas. Y en el caso contrario, cuando las partículas grandes se encuentran abajo y las partículas pequeñas se encuentran hacia la superficie, en la parte superior, se considera una configuración de un “estado inestable”.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al comenzar las simulaciones computacionales en este trabajo, se consideró un tipo de partícula esférica. Se utilizaron 3 tipos de distribuciones de tamaño, monodispersa, bidispersa y polidispersa.

Se pudieron observar distintos comportamientos del material a medida que la distribución granulométrica iba cambiando. Se trabajó aumentando la fuerza de cohesión por medio de la energía superficial de las partículas. Luego de realizar las simulaciones computacionales fueron medidas la altura y el diámetro de la pila que se formaba del material al levantar el cono de Abrams. En el caso del diámetro, se calculó el área que abarca la pila para dimensionar su desplazamiento, logrando observar el comportamiento del material ocupado ya que a medida que la energía superficial aumentaba el área de la base disminuía.

Cabe recordar que se consideraron las mediciones de altura y área, no el ángulo de la pila debido a que cuando el material granular comenzaba a presentar alguna fuerza de cohesión se formaba una pila diferente de una “pirámide” (véase en la figura 26). Esta forma de pirámide se muestra en las pruebas de asentamiento con arena seca en los experimentos de Flores-Johnson 2016, quienes miden la altura y el ángulo de reposo de la pila. No obstante, en esta investigación el ángulo de la pila deja de ser representativo debido a la forma irregular de la pila y por ende es mejor medir la altura y área de la pila para analizar su desplazamiento.

Posteriormente, para analizar el caso polidisperso, se usaron las mismas condiciones y la misma granulometría, cambiando solo la geometría de cono a una cilíndrica. El cilindro fue llenado con una cantidad similar de partículas para cada uno de los casos simulados. La finalidad fue comprobar que la geometría no afectaba el comportamiento de la pila a medida que aumentaba su cohesión.

Finalmente, para estudiar la segregación de partículas se definieron dos tipos de partículas manteniendo los mismos parámetros físicos. Se cambió el cono por un cilindro y al igual que en los casos anteriores se aumentó la cohesión para observar el comportamiento de las partículas al levantar el cilindro.

A partir del trabajo realizado se presentan los siguientes resultados.

4.1 Distribución de tamaños

4.1.1 Distribución monodispersa

En la primera distribución de tamaño se utilizó una partícula esférica de radio 0,35 cm, para llenar el cono de Abrams. Este experimento se realizó con una energía superficial del modelo de cohesión JKR de 0 J/m^2 es decir, una condición seca. En este tipo de experimento, la energía de cohesión fue aumentando cada $2,5 \text{ J/m}^2$ hasta alcanzar los $32,5 \text{ J/m}^2$. La pila tomó la forma del cono y no se apreció movimiento de partículas. En estos casos se midieron la altura y se calcula el área que abarcaban las partículas dispersas sobre la placa en la base. La altura de la pila llegó a ser igual a la altura del cono de $0,3 \text{ m}$ y al llegar a este valor la altura se vuelve constante. Para el área de la pila sucede lo mismo, esta toma el mismo valor del área basal del cono de $0,03 \text{ m}^2$. Ambos resultados de este estudio se muestran a continuación en los gráficos de la figura 26.

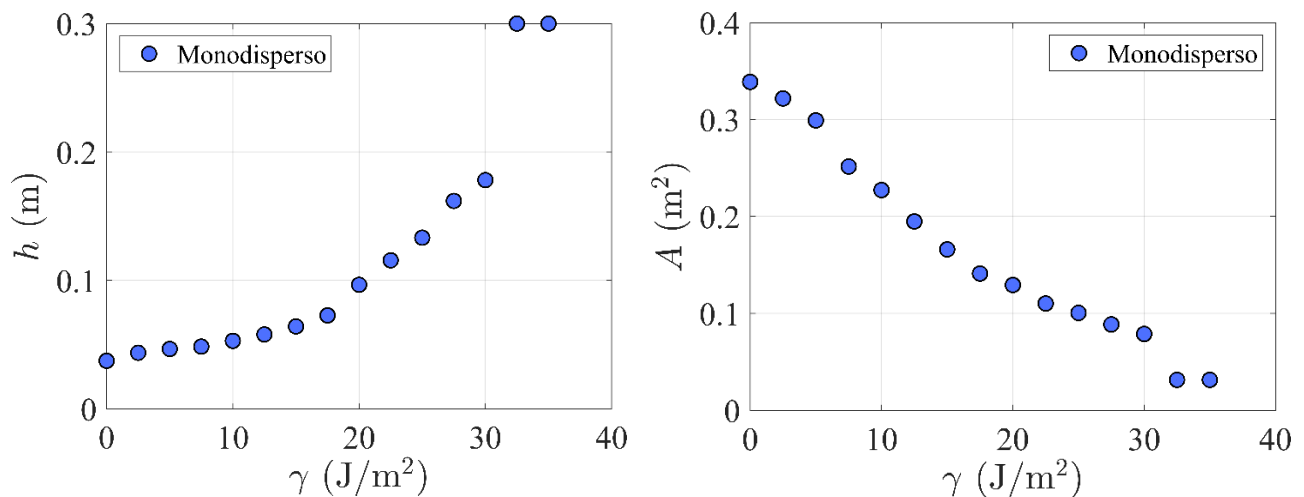


Figura 26: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución monodispersa.

En la figura 27, a la izquierda se presenta una secuencia en donde el cono se encuentra perfectamente lleno de partículas con distribución monodispersa y a la derecha cómo se comporta el material en un caso medianamente cohesivo.

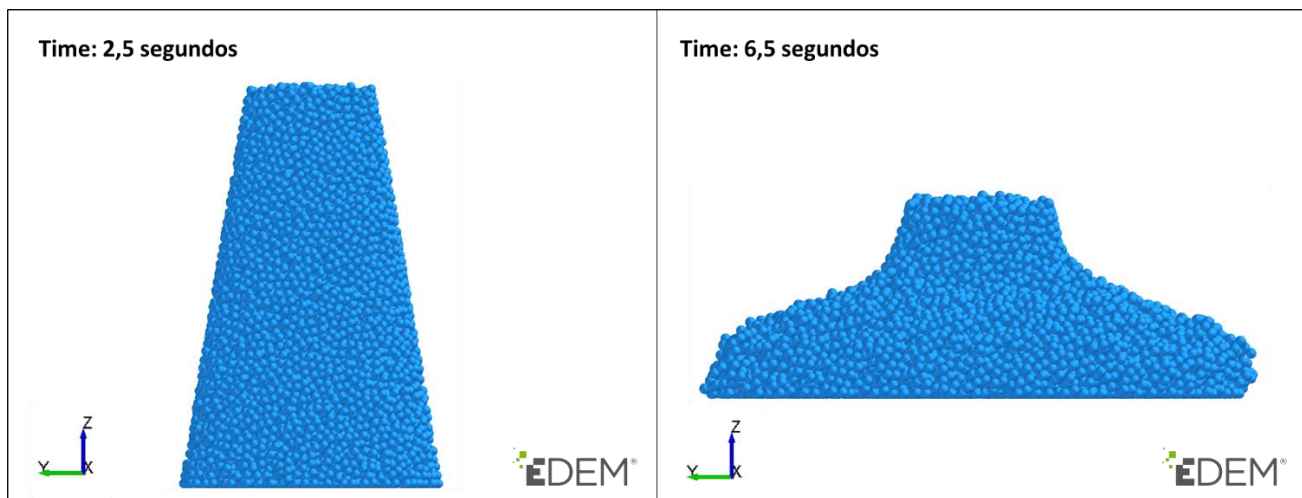


Figura 27: Distribución monodispersa en EDEM.

En el gráfico de altura de la figura 26 se puede observar que la fuerza de cohesión de las partículas con la que comienza el experimento es nula. Al levantar el cono el material colapsa completamente. Actuando como un material seco, dispersándose por completo sobre la superficie. Quedando con una altura final de unos 3,7 cm aproximadamente. Luego de aumentar la fuerza cohesiva se apreció que la altura aumentaba de una manera exponencial creciente. La pila formada comenzó a desplazarse cada vez menos hasta que el material toma la misma forma que su contenedor. En este caso la altura de la pila es igual a 30 cm, no existe, por lo tanto, movimiento por parte del material. La energía de cohesión toma un valor de $32,5 \text{ J/m}^2$, lo que quiere decir que el material se encuentra completamente compactado y el contenido de agua ya no permite que el material tenga posibilidad de fluir, de este modo disminuye o anula su desplazamiento por medio de la gravedad.

En el caso del área se muestra un comportamiento inverso al de la altura, similar a una función lineal decreciente, puesto que el material al presentar un estado seco, las partículas se desplazan libremente y cubren una amplia área de la base. A medida que comienza a aumentar la cohesión se puede observar que la pila se contrae cada vez más, pues a medida que aumenta la energía superficial esta se compacta a tal grado en que la pila toma la forma del cono y tomando el valor del área basal del cono de $314,2 \text{ cm}^2$ aproximadamente. En este punto el comportamiento del material se vuelve constante y no existen movimiento.

4.1.2 Distribución bidispersa

En la segunda distribución de tamaño se utilizaron dos partículas esféricas de radio 0,35 cm y 0,25[cm], con las cuales era llenado el cono de Abrams. Este experimento se realizó con una energía superficial del modelo cohesivo JKR de 0 J/m² también aumentando cada 2,5 J/m² hasta llegar a los 27,5 J/m². La pila toma la forma del cono y no se aprecia movimiento de las partículas. En este caso se utilizó el mismo cono que en la simulación anterior y la pila resultante tomó las mismas dimensiones cuando se logró compactar completamente. En los gráficos de la figura 28, se muestran los resultados de las mediciones de la altura, el área de la pila y su comportamiento.

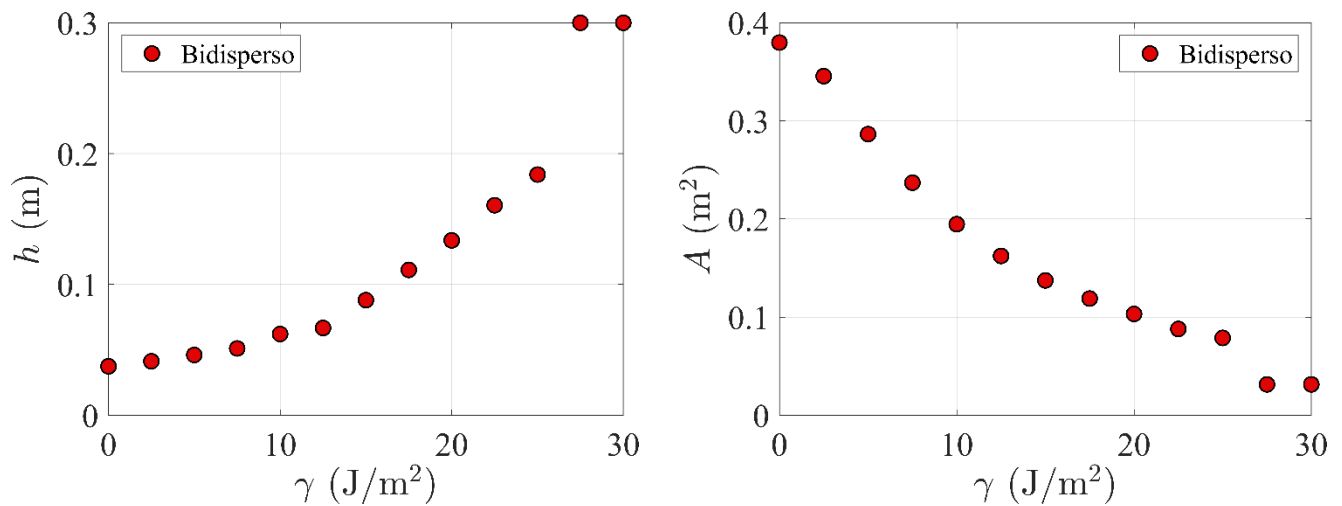


Figura 28: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución bidispersa.

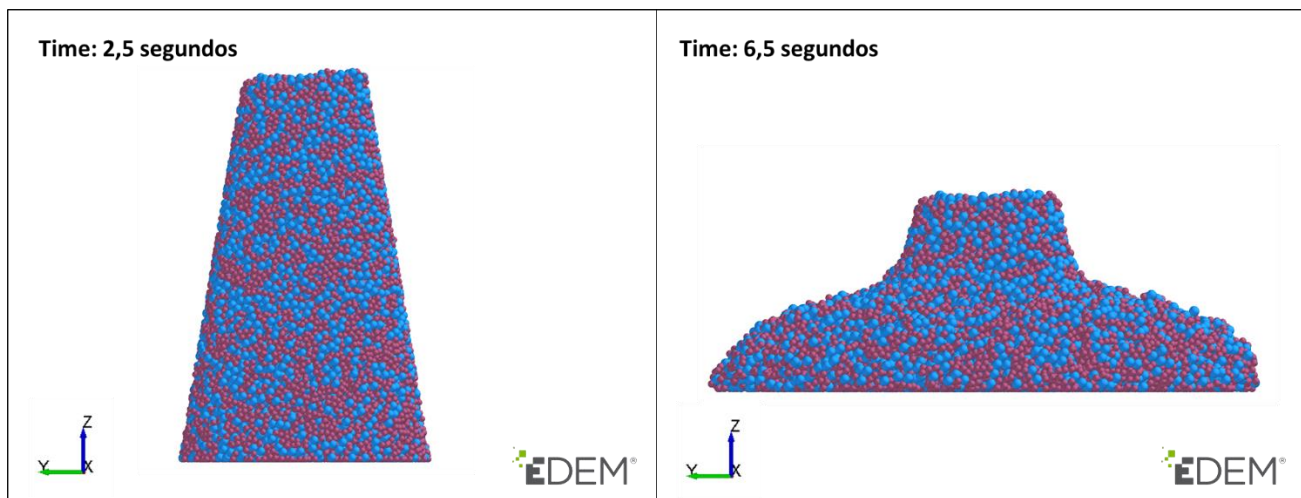


Figura 29: Distribución bidispersa en EDEM.

En el gráfico de altura se puede observar un comportamiento similar al caso anterior en cuanto a una función exponencial creciente, con una pequeña diferencia. Ya que al tener el 50% de partículas de menor tamaño, estas se desplazan entre los espacios vacíos que existen entre las partículas mayores. A consecuencia de las fuerzas cohesivas mayores, el material toma la forma de la pila a un menor valor de energía superficial. Esto se puede comprobar al ver que la pila llega a un estado completamente compacto a los $27,5 \text{ J/m}^2$.

Respecto del área se muestra el mismo comportamiento visto anteriormente, es decir, similar a una función lineal decreciente. El área disminuye a medida que aumenta la fuerza de cohesión puesto que las partículas se adhieren cada vez más hasta que la pila toma la forma del cono.

4.1.3 Distribución polidispersa

Finalmente, se trabajó con utilizando una distribución granulométrica adaptada de Castro (2017) con partículas esféricas polidispersas para el llenado el cono de Abrams. Este experimento se realizó con una energía superficial de partículas de 0 J/m^2 , aumentando en $2,5 \text{ J/m}^2$ hasta alcanzar los 15 J/m^2 . La pila tomó la forma del cono y no se apreció ningún movimiento de las partículas. Hasta alcanzar un estado en que la altura y el área eran igual a la forma del cono.

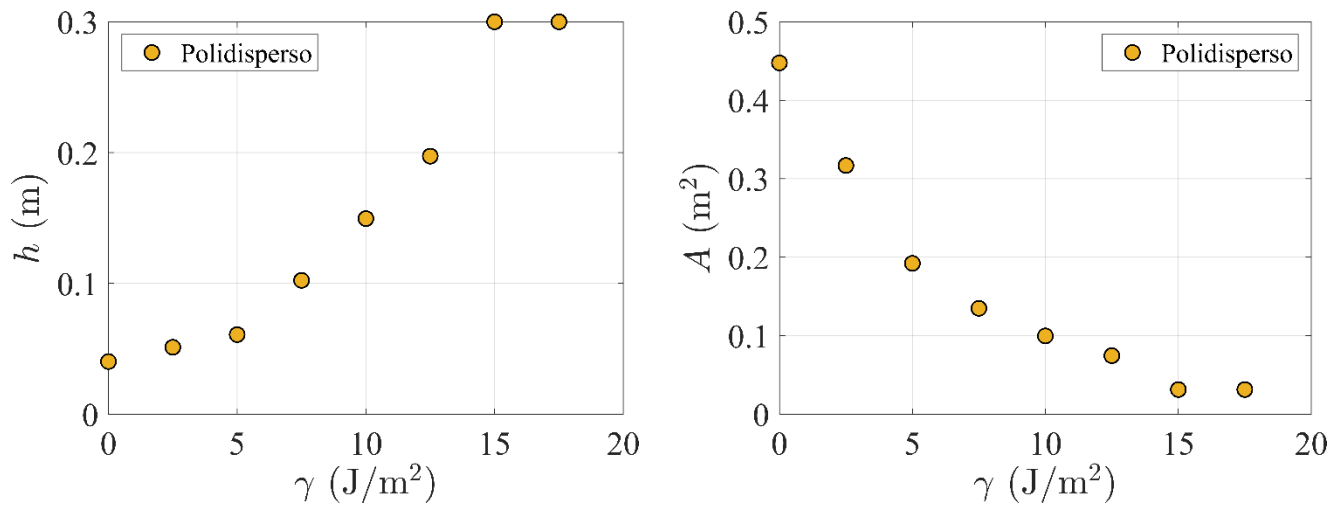


Figura 30: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material, distribución polidispersa.

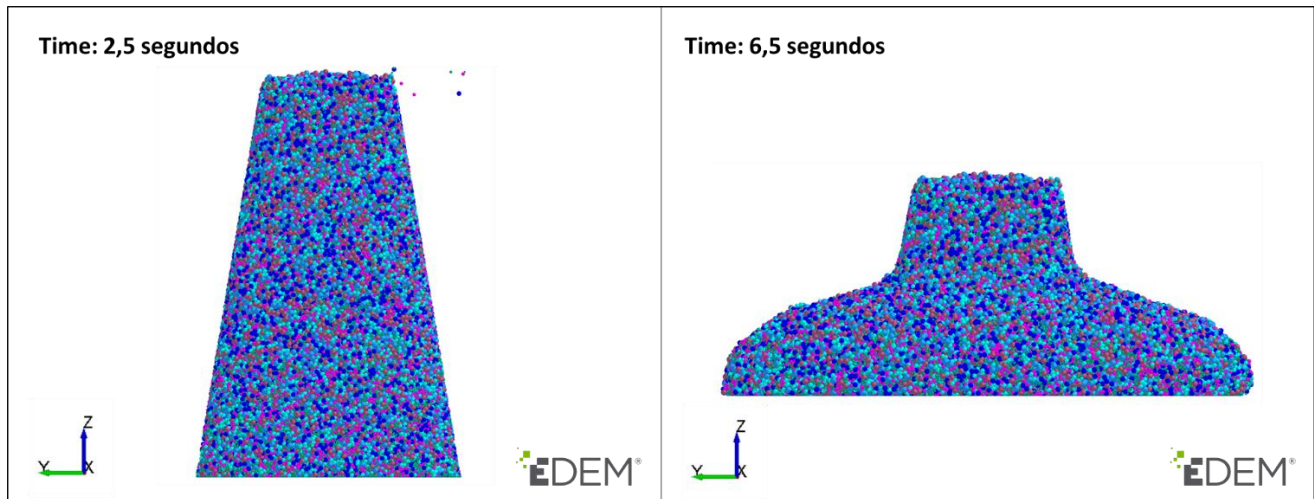


Figura 31: Distribución polidispersa en EDEM.

En relación con la altura de la pila, esta aumenta con una tendencia exponencial creciente. Su aumento es claramente más rápido ya que requiere una menor energía superficial que en los casos anteriores. Tal como lo muestran los datos obtenidos en el gráfico de la figura 30. La pila toma la forma del cono a los 15 J/m² de energía superficial de la cohesión. La evidencia sugiere que esta rapidez en la compactación se debe a que las partículas de menor tamaño llenan los espacios vacíos aumentando la adherencia con la influencia de los puentes líquidos.

En cuanto al área ocurre lo mismo, esta disminuye de una manera bastante rápida con una tendencia exponencial decreciente, tomando la forma basal del cono. Es en este preciso momento que el material se compacta de tal manera que ya no puede fluir libremente producto de la gravedad.

4.1.4 Comparativa de las distribuciones

A partir de los 3 distintos escenarios presentados en dichas simulaciones, se exhibe una comparativa de acuerdo con la cohesión del material y cómo afectaba en el comportamiento de la pila formada al levantar el cono. En cuanto a la altura de la pila de material en los 3 casos estos logran llegar a un estado completamente cohesivo en donde todas las partículas están adheridas, tomando la forma del cono y alcanzando su altura a los 0,3 m. No obstante, dicha altura se alcanza a distintos niveles de cohesión para los 3. También se logra observar que todos comienzan con una altura inicial muy similar.

En relación con el área de la pila, se logra llegar a un estado completamente cohesivo en las 3 distribuciones, pero en distintos valores de la energía superficial. Además, en el estado inicial de cohesión estas presentan un desplazamiento diferente, siendo la distribución polidispersa la que comienza con un mayor desplazamiento. Este cruce en las curvas se asocia a la diferencia en las distribuciones y el diámetro equivalente en cada caso, siendo para la distribución polidispersa el menor de los diámetros.

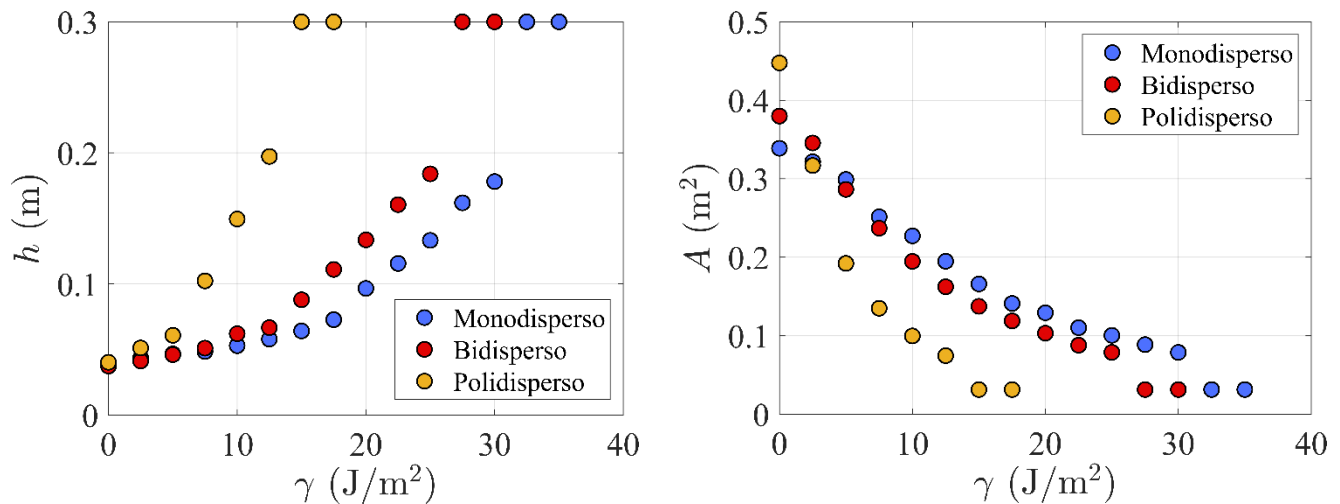


Figura 32: Altura y área de la pila con respecto a la energía superficial de cohesión del material con distintas distribuciones de partículas.

Luego de terminar con estos experimentos con 3 distribuciones granulométricas distintas, se realizó un análisis estadístico mediante mediciones que ayudaron a determinar el error típico de las herramientas

de medición del software EDEM (véase en anexos), con el objetivo de validar la confiabilidad de los resultados y del software. Se escogió un caso en cada distribución (monodispersa, bidispersa y polidispersa), tomando para cada distribución caso del medio. Para determinar el error típico se realizaron 20 mediciones tanto de altura como de área en diferentes direcciones. Se calculó el promedio y desviación estándar para estas mediciones (véase en anexos). Luego, se calculó el error aleatorio y con esto se obtuvo el error relativo porcentual para cada uno de los casos. Todo esto permitió determinar un error relativo porcentual promedio para el área y altura. Al analizar la tabla 24 donde se encuentran estos resultados, se observa que los errores son del orden del 1% en las mediciones, por lo tanto, se determinó que son tan pequeños que no es necesario considerarlos por ahora. Debido a que el software cuenta con una buena resolución y las mediciones se pueden realizar perfectamente con la ayuda de sus herramientas.

Al observar los últimos gráficos donde se muestra la comparativa de las distintas distribuciones, se puede analizar que, tanto en el gráfico de la altura como del área, el material sigue la misma tendencia en cada uno de estos casos. La altura continúa presentando una forma exponencial creciente hasta llegar a un valor constante, aunque en los 3 casos comienzan con una altura de similar valor. A medida que la cantidad de energía superficial va aumentando se observan distintos comportamientos para cada una de las distribuciones. Los resultados señalan que la distribución monodispersa necesita una mayor energía superficial a diferencia de la distribución polidispersa en la cual se necesita una menor energía superficial para lograr la compactación total.

En el caso del área se observa que en los 3 casos existe una tendencia decreciente. Al comenzar con un JKR de energía superficial igual a 0 J/m^2 estos presentan un desplazamiento diferente, pues en el caso monodisperso su diseminación es un tanto menor que en el caso del polidisperso, abarcando una mayor área sobre la placa en donde reposan. Los resultados muestran que el caso monodisperso presenta una mayor dificultad para compactarse, a diferencia del caso polidisperso que requiere una menor energía superficial para lograr compactar el material.

4.2 Análisis de altura

Por medio de los resultados de altura en función de la energía superficial se obtuvieron 3 curvas que dependían de su distribución y del diámetro equivalente de las partículas. Es sabido que existe un número de cohesión (Coh) que depende de la energía superficial (Behjani, Rahmanian, et al. 2017). Para lograr

condensar los resultados, los datos son graficados de forma adimensional, tanto para la altura como para el número de cohesión para las 3 distribuciones, como se ilustra en la figura 33. Para la altura (h) se utilizan los datos de altura divididos en la altura inicial h/h_0 y para la energía superficial (γ) se escribe en términos del número de cohesión, el cual es un balance entre la energía gravitacional y la energía de cohesión según la ecuación 4.

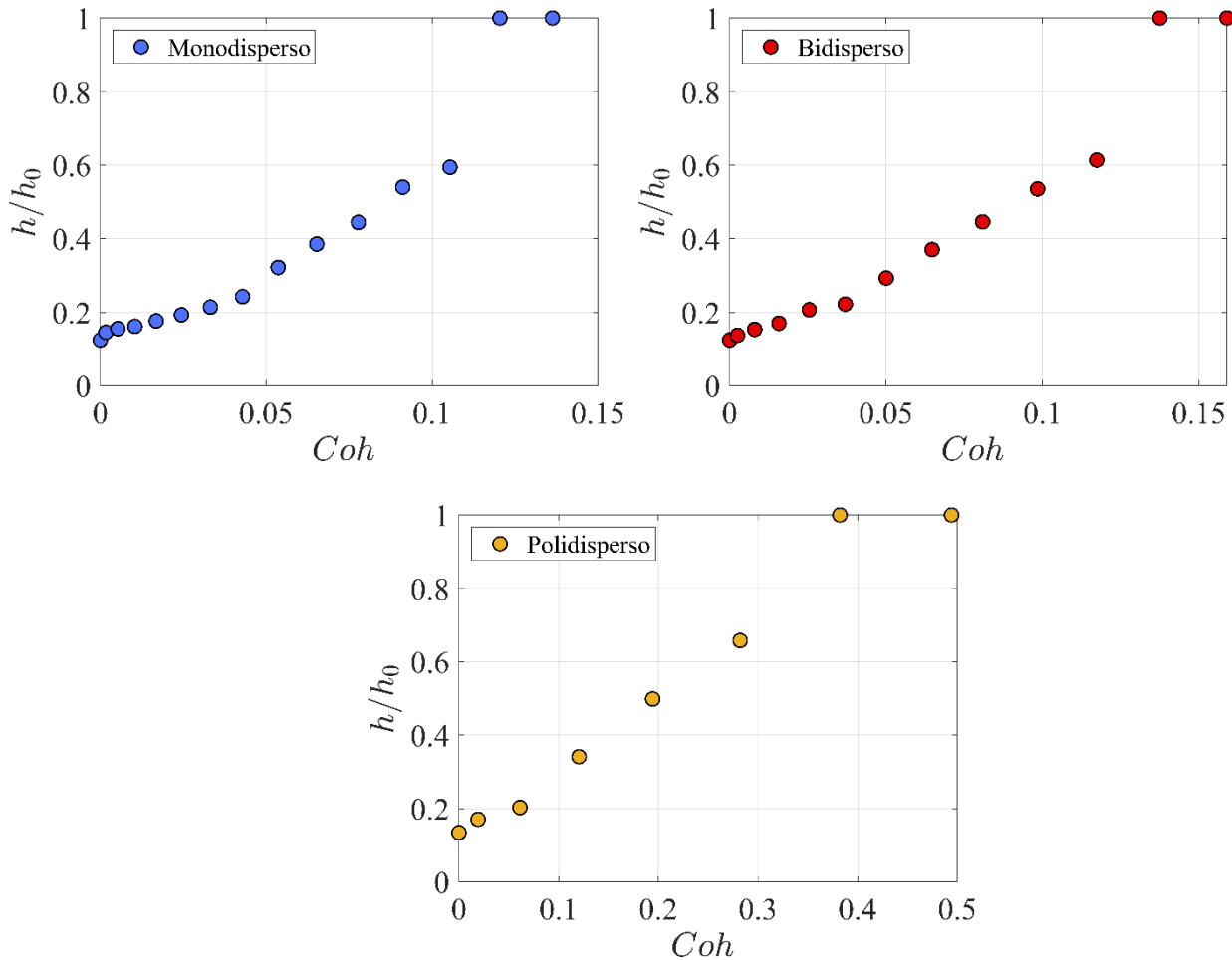


Figura 33: h/h_0 en función del número de cohesión (Coh) para distintas distribuciones de partículas.

Modelando los datos se observa que hay una proporcionalidad entre la cohesión y la razón entre las alturas, la cual se presenta en la ecuación 32.

$$\frac{h}{h_0} = f_1(Coh) \quad (32)$$

Al graficar las 3 distribuciones de forma adimensional se obtiene una nube de datos más condensada.

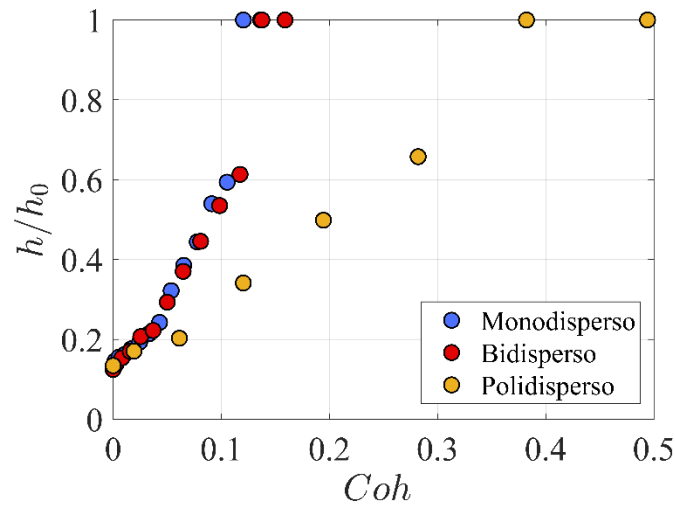


Figura 34: Comparativa de h/h_0 en función del número de cohesión (Coh) del material para distintas distribuciones de partículas y radios equivalentes.

Al comparar los 3 gráficos se ve una dependencia de h/h_0 con el tamaño de las partículas de la muestra. Por lo tanto, se decidió generar un nuevo número adimensional que incorporará Coh y D , donde D es el diámetro adimensional. Este nuevo número adimensional se define de la siguiente manera:

$$\psi_1 = f_2(Coh, D) \quad (33)$$

Para la función f_2 se buscó un producto de monomios:

$$\psi_1 = \alpha_1 Coh^{\alpha_2} D^{\alpha_3} \quad (34)$$

Al hacer un ajuste multidimensional se obtienen los valores para α_i , estos valores serán encontrados aplicando el método de los mínimos cuadrados con las herramientas del software MATLAB, obteniendo los siguientes valores:

$$\psi_1 = 2,2Coh^{0,9} D^{1,1} \quad (35)$$

Al graficar los datos h/h_0 en función de este nuevo número adimensional, se observa que los datos convergen. Finalmente, se puede proponer un modelo para la altura que agrupa todos los experimentos computacionales tal como se muestra en la figura 35.

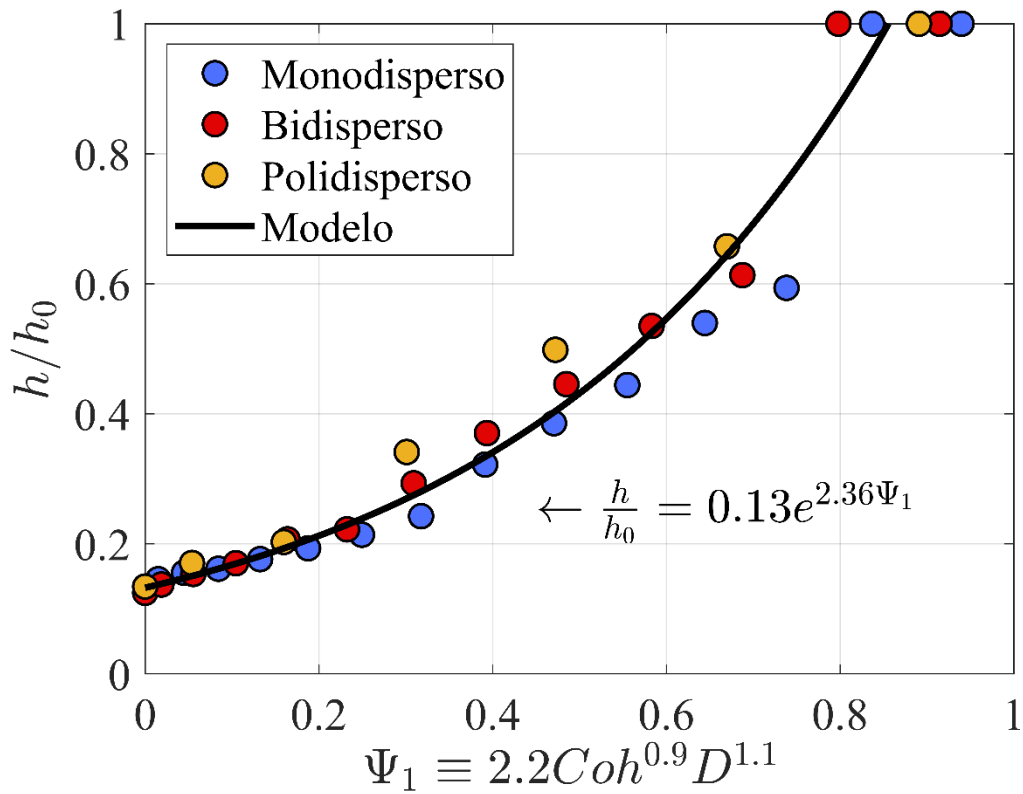


Figura 35: h/h_0 en función del número adimensional ψ_1 .

Este gráfico ajusta los datos es una exponencial para la altura donde los parámetros a y b son obtenidos del ajuste usando la función “cftool”. Dando como resultado para $a = 0,13$ y $b = 2,36$:

$$\frac{h}{h_0} = 0,13e^{2,36\psi_1} \quad (36)$$

Como resultado se propone un modelo simple para la altura que depende de este nuevo número adimensional que está en función del número de cohesión que a su vez se obtiene a partir de la energía superficial del modelo de cohesión JKR y de la altura inicial.

$$h = h_0 0,13e^{2,36\psi_1} \quad (37)$$

4.3 Análisis de área

Para los resultados de área en función de la energía superficial se realizó un procedimiento similar al de la altura. Para lograr condensar los resultados, los datos fueron graficados de forma adimensional, tanto

para el área como para el número de cohesión para las 3 distribuciones, como se ilustra en la figura 36. Para el eje de las ordenadas se utilizan los datos de área sobre área inicial (A/A_0) y para el eje de las abscisas la energía superficial (γ) la cual se escribe en términos del número de cohesión (Coh).

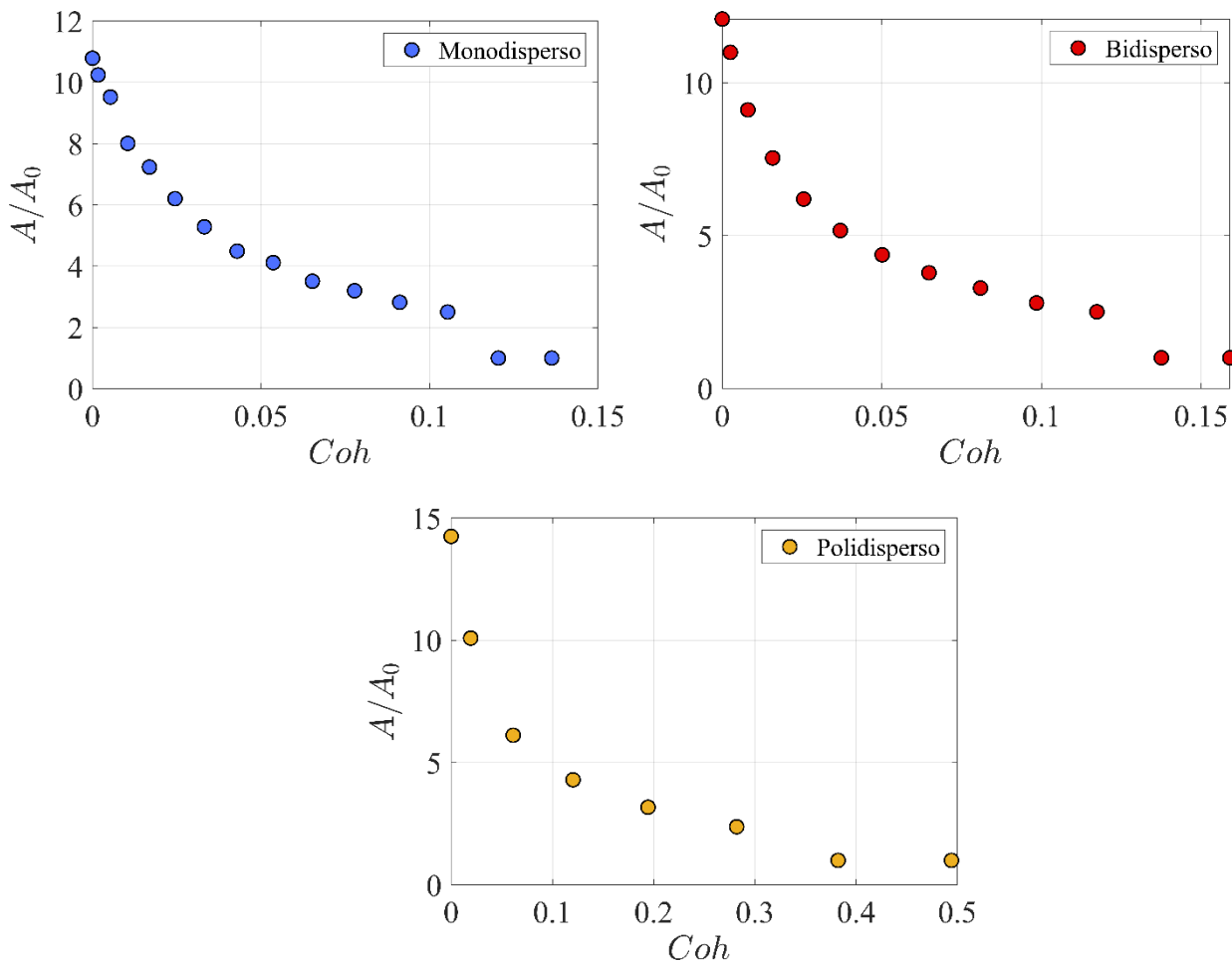


Figura 36: A/A_0 en función del número de cohesión (Coh) para distintas distribuciones de partículas.

Modelando los datos se observa que hay una proporcionalidad entre la cohesión y la razón de áreas, la cual se presenta en la ecuación 38.

$$\frac{A}{A_0} = g_1(Coh) \quad (38)$$

Al graficar A/A_0 en función del número adimensional Coh , se observó una dependencia con el tamaño de las partículas de la muestra tal como se visualiza en la figura 37, por lo tanto, también se buscó un nuevo número adimensional que incorporará Coh y D , donde D es el diámetro adimensional.

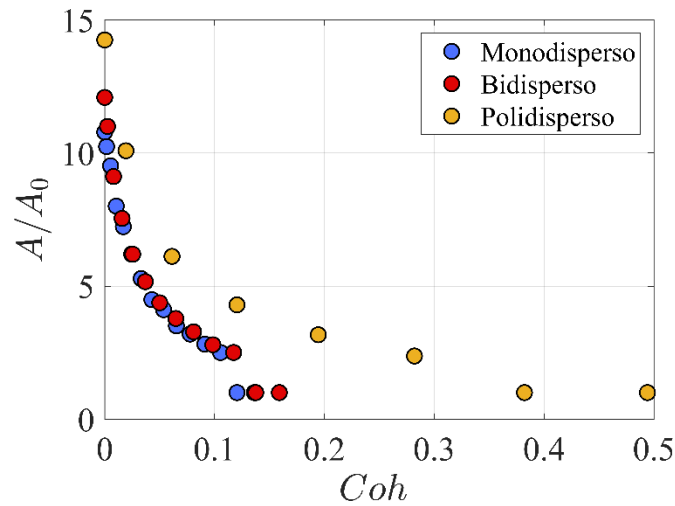


Figura 37: Comparativa de A/A_0 en función del número de cohesión (Coh) del material para distintas distribuciones de partículas y radios equivalentes.

Estudiando los 3 gráficos para el área se ve una dependencia de A/A_0 con el diámetro de las partículas de la muestra. Permitiendo generar un nuevo número adimensional que incorporará Coh y D . Este nuevo número adimensional se define de la siguiente manera:

$$\psi_2 = g_2(Coh, D) \tag{39}$$

Para la función g_2 se buscó un producto de monomios:

$$\psi_2 = \alpha_1 Coh^{\alpha_2} D^{\alpha_3} \tag{40}$$

Realizando un ajuste multidimensional se obtienen los valores para α_i , estos valores fueron encontrados de forma similar al caso de la altura utilizando las herramientas del software MATLAB, obteniendo los siguientes valores:

$$\psi_2 = Coh^{1.5} D^2 \tag{41}$$

Al graficar los datos A/A_0 en función del nuevo número adimensional ψ_2 , se ajustan unos con otros. Con el cual se puede proponer un modelo para el área que agrupa todos los experimentos computacionales tal como se muestra en la figura 38.

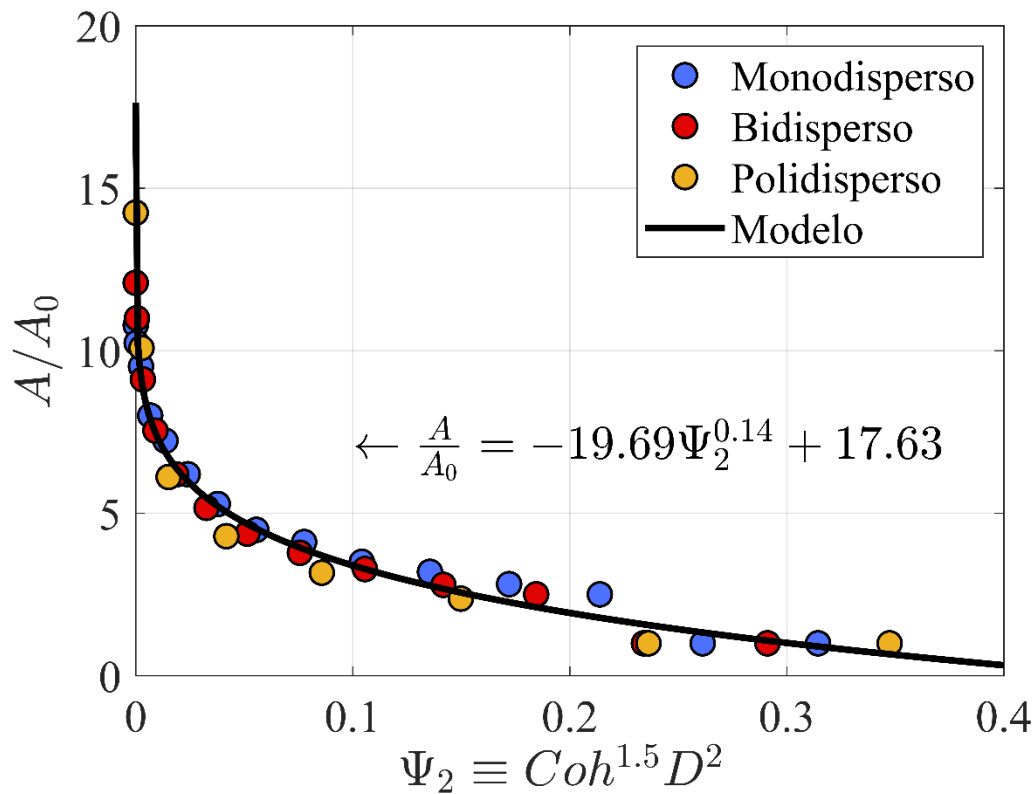


Figura 38: A/A_0 en función del número adimensional ψ_2 .

Se presenta en la ecuación (42) para el área que ajusta los datos es una función potencial decreciente donde los parámetros a, b y c son obtenidos del ajuste usando la función “cftool” en MATLAB. Dando como resultado para $a = -19,69$; $b = 0,14$ y $c = 17,63$:

$$\frac{A}{A_0} = -19,69\psi_2^{0,14} + 17,63 \quad (42)$$

Finalmente, como resultado se propone un modelo simple para el área que depende de este nuevo número adimensional que utiliza del número de cohesión y el área inicial.

$$A = A_0(-19,69\psi_2^{0,14} + 17,63) \quad (43)$$

4.4 Influencia de la geometría

Luego de realizar los estudios anteriores, se visualizó una dificultad a la hora de llenar el cono de Abrams con el software EDEM. Esto requería de bastante tiempo, por lo que se decidió estudiar si la geometría

tenía influencia en el comportamiento del material granular. Para esto se reemplazó el cono por un cilindro y se aplicó al caso de distribución polidispersa como se ilustra en la figura 41. Este cilindro tiene la misma altura que el cono y su radio interior permite contener el mismo volumen de partículas.

Para llevar a cabo este experimento se procedió a llenar el cilindro con el mismo material, en condiciones iguales en términos de parámetros físicos del material granular y la geometría. En los siguientes gráficos se puede observar que el comportamiento es similar al de distribución polidispersa tanto para la altura como el área. El resultado fue que al ocupar ambas geometrías estas necesitaron un mismo valor de energía superficial para lograr la compactación completa como se muestra en los gráficos de la figura 40.

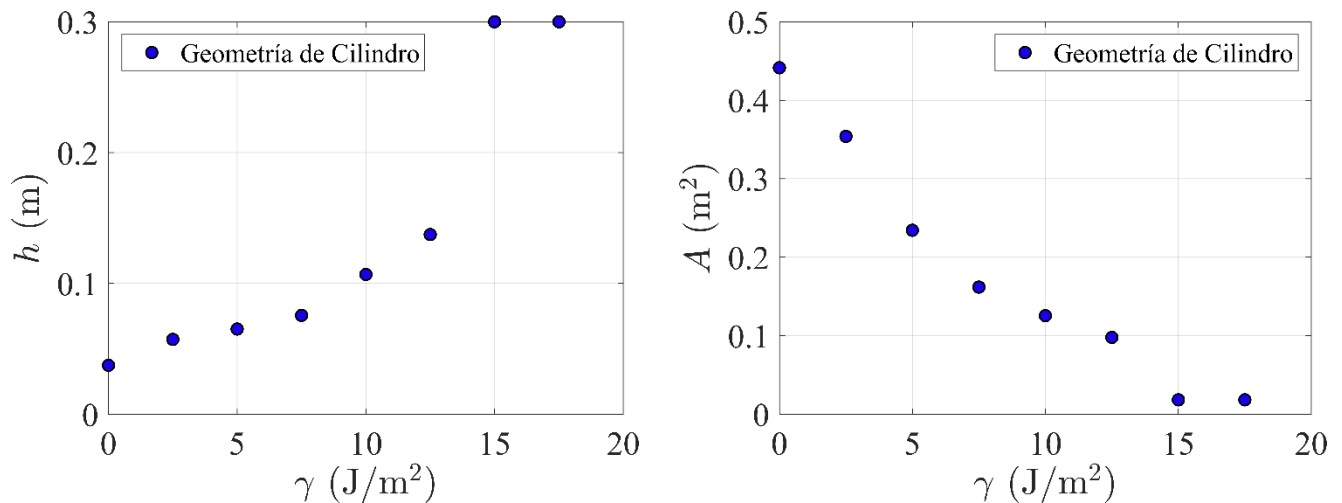


Figura 39: Altura y área de la pila con respecto a la cohesión del material, distribución polidispersa en geometría de cilindro.

Se pueden observar los resultados en la figura 40. Los gráficos comparativos muestran una similitud en el comportamiento de la curva. Ambos escenarios muestran una altura y área inicial similar, así como se alcanza el estado de compactación entre partículas con el mismo valor de energía superficial. Cabe señalar que el diámetro de ambas geometrías son diferentes para mantener un volumen equivalente, por lo cual las áreas finales, donde la gráfica se vuelve constante, son ligeramente distintas. No ocurre lo mismo con la altura, que se vuelven constantes en el mismo punto.

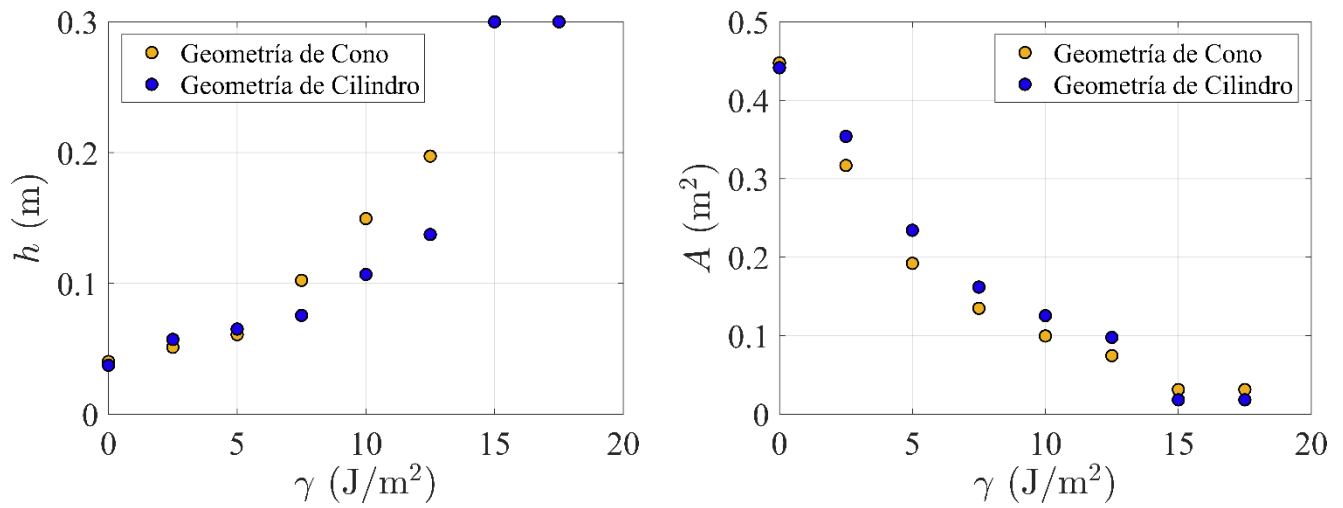


Figura 40: Comparación de altura y área de la pila en geometría de cono y cilindro.

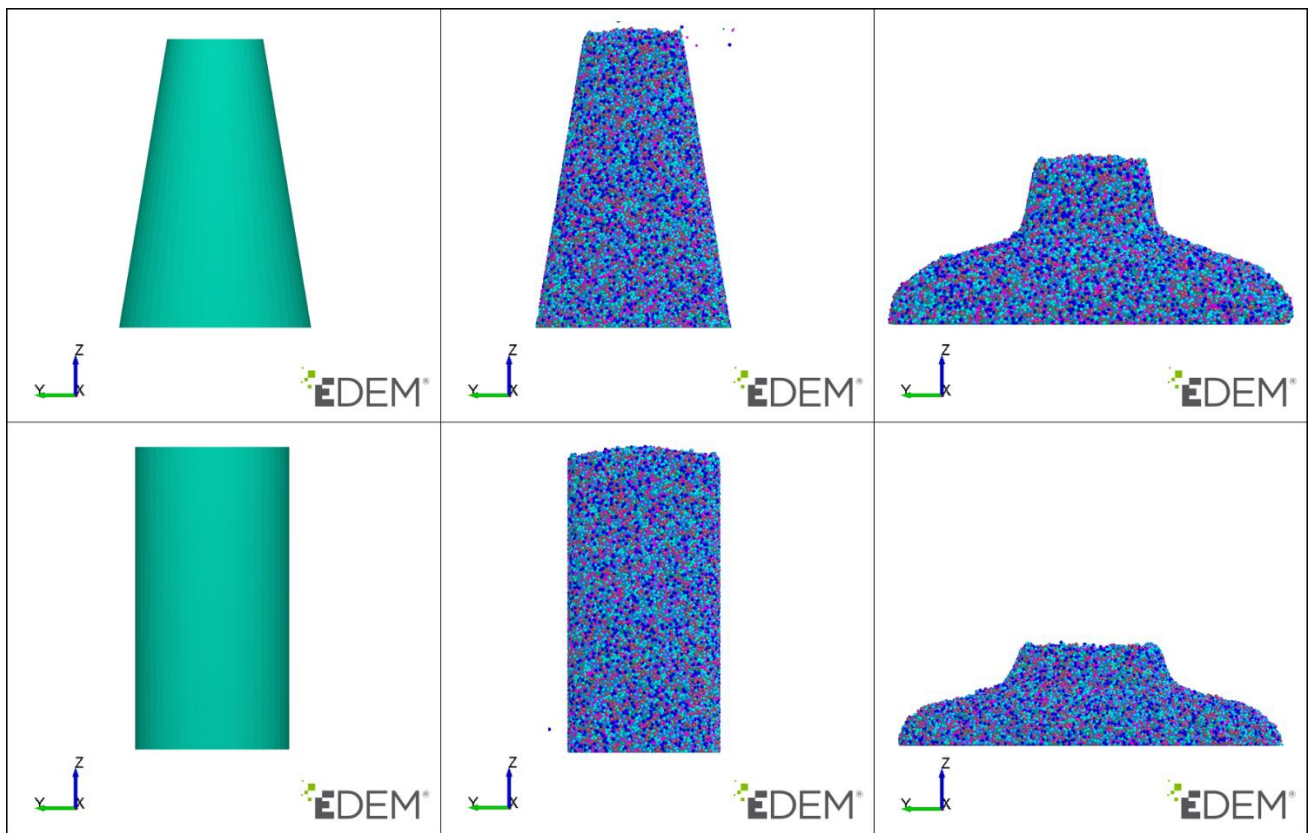


Figura 41: Secuencia del experimento computacional en Cono de Abrams y cilindro para caso polidisperso en EDEM.

Se debe agregar otra dificultad por la que se optó utilizar un cilindro en lugar del cono. Este último provocaba que el material generara espacios vacíos entre las partículas y el borde del cono, alterando los

resultados del experimento. Se decidió probar distintas maneras de llenado, según como lo permitiera el software. Se pudo llegar a buenos resultados, donde el cono se encontraba perfectamente lleno, pero el tiempo que tardaba cada simulación era demasiado.

Se realiza una comparación entre los resultados en la altura y área de la pila en función de la cohesión del modelo JKR. Se observa en el gráfico de altura en la figura 40 que, ambos inician con una altura muy similar en el estado de cohesión cero, luego ambas curvas tienen un comportamiento ascendente similar a una función exponencial y luego se llega a un nivel de cohesión de 15 J/m^2 en que la altura permanece constante.

Para el cálculo del área, se observa que en ambos casos el desplazamiento de las partículas es similar. En el estado seco el área de la pila presenta una cohesión igual a cero. A medida que aumenta la energía superficial el comportamiento de ambas curvas muestran un comportamiento descendente similar a una función exponencial decreciente hasta llegar al punto 15 J/m^2 en el cual el material logra un estado completamente cohesivo. La gráfica muestra que en ambas situaciones una leve variación del valor exacto de área, pues los diámetros son diferentes.

4.5 Segregación

Para finalizar la investigación se decidió estudiar el efecto de la segregación, basándose en los experimentos de Caplan 2018, pero a diferencia de este se utilizó el efecto la energía de superficie para modelar la cohesión del modelo JKR. Se utilizaron dos escenarios, en donde se emplearon dos tipos de partículas con una diferencia de tamaños bastante notoria. Se ocupó un cilindro al igual que en los experimentos de Caplan y se estableció que la cohesión comenzaría con un valor de 0 J/m^2 y aumentaría de 2 J/m^2 en 2 J/m^2 hasta alcanzar la compactación completa.

4.5.1 Estado estable

En términos de efectos de la segregación, donde las partículas pequeñas se encuentran abajo y las grandes en la parte superior del cilindro que las contiene, se realizó un experimento similar a los casos anteriores. Utilizando el modelo JKR el experimento comenzó con un valor de inicio de 0 J/m^2 para luego ir aumentando en 2 J/m^2 hasta lograr un estado completamente cohesivo en que las partículas ya no mostraran movimiento alguno, tomando la forma del cilindro. Esto se logró a los 26 J/m^2 . Se midieron

tanto la altura de la pila como el área que esta cubría, obteniendo los gráficos que se muestran en la siguiente figura.

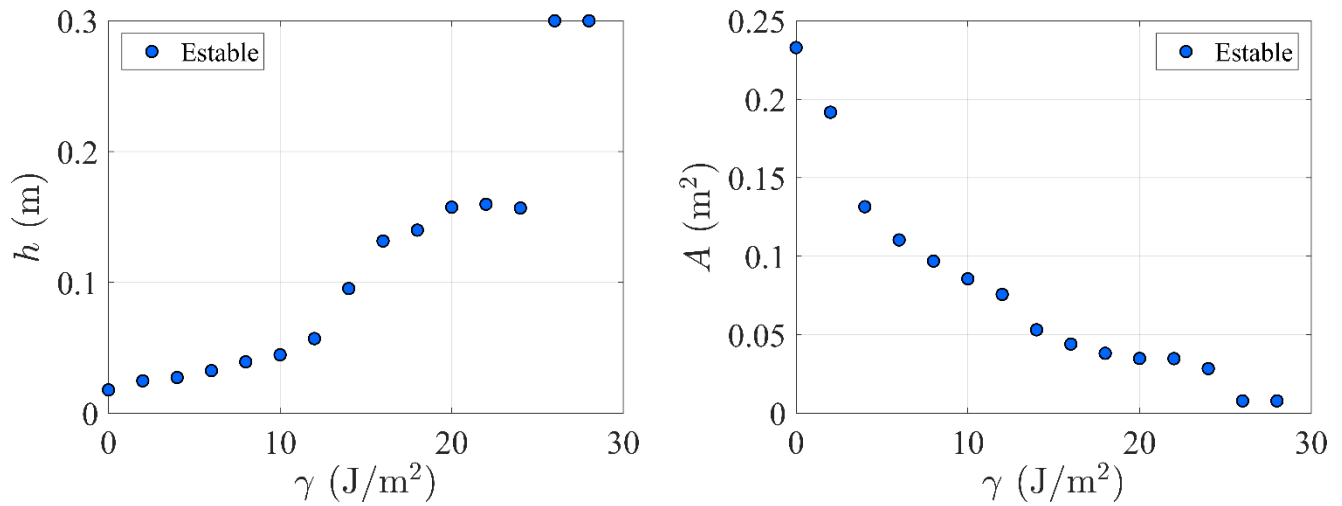


Figura 42: Altura y área en función de la cohesión del material (caso estable).

En la figura 43, se puede visualizar una secuencia de los resultados de las simulaciones. Se muestra el comportamiento del material a medida que aumenta la cohesión de las partículas en una vista en planta y lateral. Hasta lograr un estado completamente cohesivo.

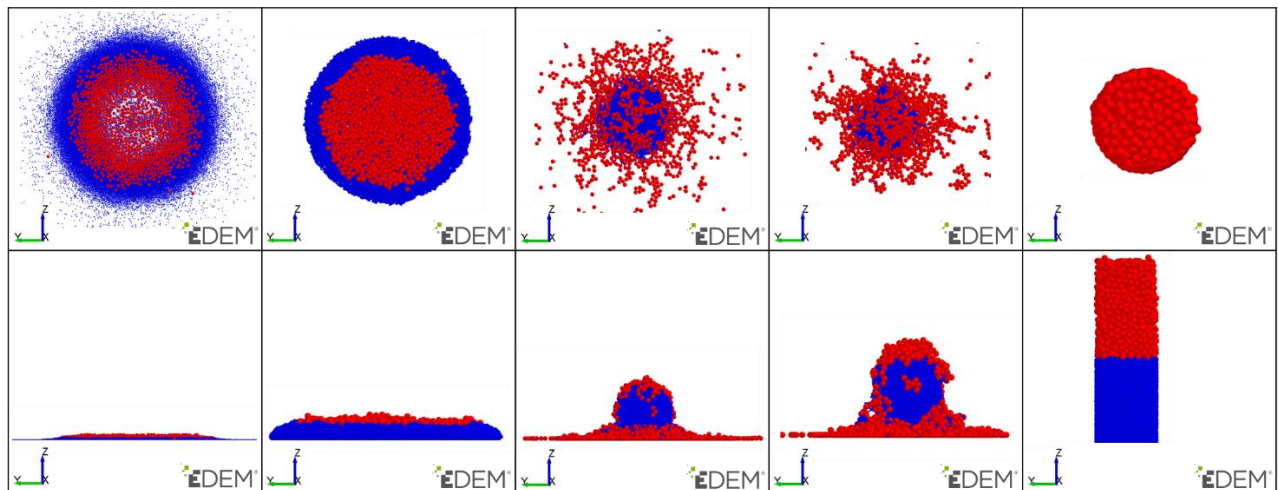


Figura 43: Secuencia de resultados de simulaciones en un estado estable, vista planta (parte superior) y vista lateral (parte inferior).

Continuando con las sucesivas simulaciones se observaron algunas dificultades en el caso estable tal como se esperaba que pudiera suceder. Para las primeras simulaciones se utilizó un valor de 1 m/s^2 al

igual que en las simulaciones anteriores de la primera y segunda parte de esta investigación. Solo en el tercer escenario de la segregación del estado estable la velocidad con que era levantado el cilindro afectaba el comportamiento de las partículas que se veían perturbadas por este movimiento tan repentino. Lo ideal era que las partículas cayeran bajo su propio peso por efecto de la gravedad y no por fuerzas externas. Entonces, para lograr estudiar con mayor certeza la cohesión del material y la adhesión entre sus partículas, se optó por utilizar una velocidad de $0,7 \text{ m/s}^2$. Esta velocidad es adecuada de acuerdo con los datos entregados por el estudio de Caplan, 2018.

Al observar los resultados del experimento se visualiza que, en un estado de cohesión igual a cero, el material se desplazó hacia los bordes dejando espacios vacíos en el centro. De igual manera se observa una clara diferencia entre partículas pequeñas y grandes, las cuales no se mezclan.

Sin embargo, en la altura hubo un aumento, puesto que se alcanzaron mayores alturas del material hasta lograr llegar a un estado completamente cohesivo en que el material toma la forma del cilindro. Esto se logró en los 26 J/m^2 .

En la mitad del experimento, cuando la cohesión comenzaba a presentar un valor mayor a 10 J/m^2 se observó que la pila del material se deformaba. Las partículas pequeñas caían primero, se depositaban en el centro al presentar una mayor adherencia gracias a su mayor número, y las grandes, que eran menos, se dispersaban hacia los extremos en forma de pequeñas acumulaciones de partículas.

Otra dificultad que se presentó en esta parte fue que al aumentar la cohesión hasta los 20 J/m^2 el material se adhirió a las paredes del cilindro al ser levantado. Al ocurrir esto el material caía con mayor fuerza quedando aplastado por la fuerza de la caída libre. Como las partículas ya presentaban cierto nivel de cohesión, se tomó la decisión de modificar el material del cilindro de modo que se eliminara la fricción entre las partículas y el cilindro. De acuerdo con estas modificaciones, el coeficiente de fricción estática, así como el coeficiente de rodadura fueron llevados a un valor nulo. Así el cilindro se comportó de la forma más lisa posible sin interferir en el comportamiento de las partículas.

Al analizar el gráfico de la figura 42 de altura en función de la cohesión se puede visualizar lo siguiente. Primero, la altura aumenta de una forma ascendente y de forma lineal hasta el punto 12 J/m^2 . Segundo, la curva sufre un aumento más rápido debido a que las partículas pequeñas se compactan a menores

valores de cohesión. Tercero, la curva se estabiliza hasta que toma un ascenso brusco cuando el material se compacta completamente y las partículas grandes logran adherirse entre ellas completamente.

En cuanto al área se puede señalar que esta comienza con un desplazamiento no tan amplio, la curva descende en forma de una función exponencial decreciente hasta alcanzar un valor constante. Esto se alcanza una vez que el área logra la compactación completa, tomando las dimensiones del área basal del cilindro.

4.5.2 Estado inestable

En el caso inverso, es decir el caso inestable, en donde las partículas pequeñas se encontraban en la parte superior y las grandes en la parte inferior del cilindro, se realizó el mismo experimento, comenzando con un caso seco en que las partículas no presentaban cohesión para luego aumentar. La energía superficial en esta simulación comenzó en 0 J/m^2 , luego fue aumentando en 2 J/m^2 hasta lograr un estado completamente cohesivo. Las partículas ya no mostraron movimiento alguno y tomaran la forma del cilindro, lo que ocurrió a los 60 J/m^2 tal como se puede observar en las gráficas de la figura 44.

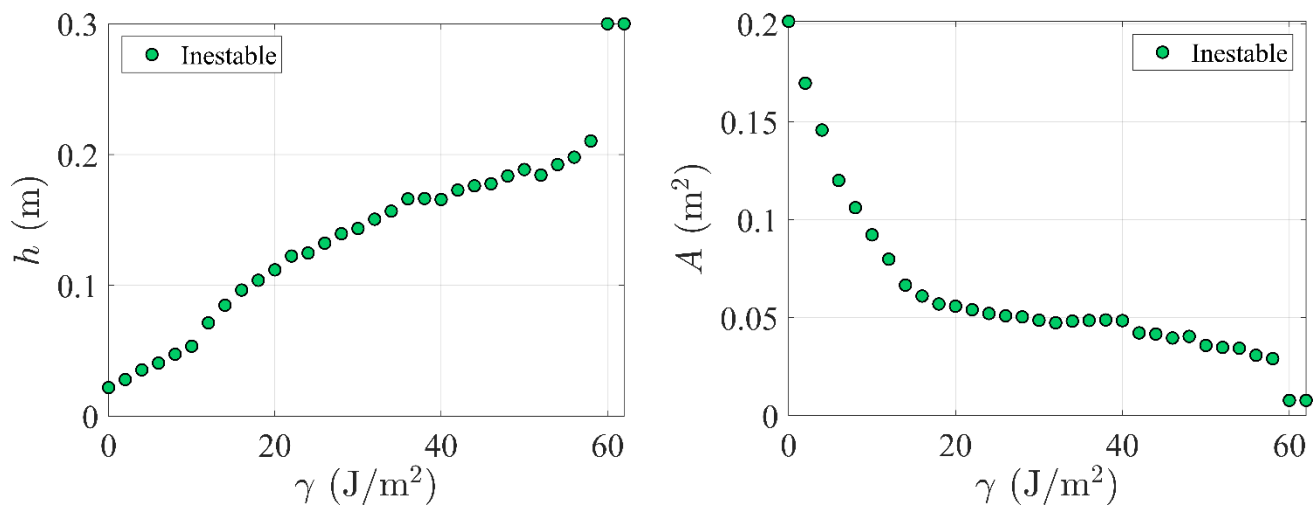


Figura 44: Altura y área en función de la cohesión del material (caso estable).

En la figura 45, se muestra la secuencia de los resultados obtenidos en las simulaciones del estado inestable. Se observa el comportamiento del material a medida que aumenta la cohesión de las partículas en una vista en planta y lateral.

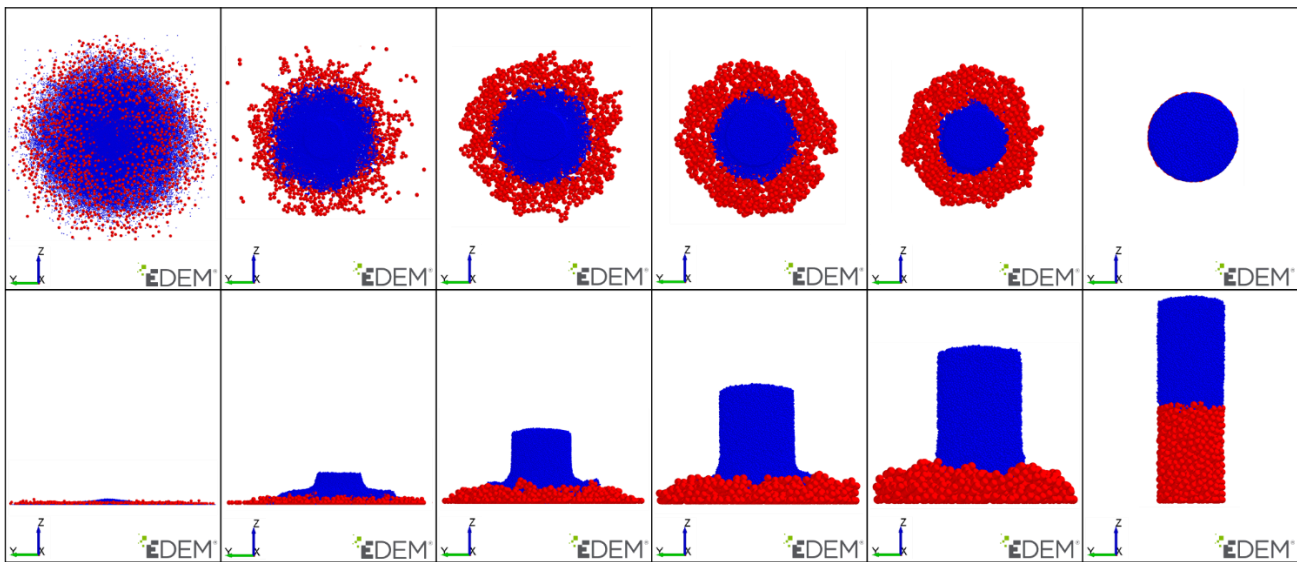


Figura 45: Secuencia de resultados de simulaciones en un estado inestable, vista planta (parte superior) y vista lateral (parte inferior).

En el estado inestable con las partículas pequeñas en la parte superior del cilindro y las partículas grandes en la parte inferior, se utilizó el mismo criterio en relación con la velocidad en que se levantaba el cilindro de $0,7 \text{ m/s}^2$.

En la figura 45 se observa la secuencia del comportamiento del material cohesivo a medida que se aumenta la energía superficial. En la primera imagen se muestra el material con cohesión cero. Las partículas se desplazaron de una forma homogénea hacia los bordes. Las partículas grandes abarcaron gran parte de la superficie y las partículas pequeñas se intercalaron entre los espacios como se observa en los resultados de Caplan (2018). Al aumentar el valor de la cohesión, las partículas pequeñas presentaron una mayor adherencia a bajos valores de la energía superficial a diferencia de las partículas grandes. A medida que aumenta la energía superficial las partículas pequeñas están cohesionadas mientras que las partículas grandes lo hacen con mayor lentitud, hasta que alcanzaron un estado completamente cohesivo a los 60 J/m^2 .

En este estado también se presentó el mismo problema que en el estado estable, el material se adhiere al cilindro mientras este es levantado. Por lo tanto, se tuvo que llevar el coeficiente de fricción estática, así como el coeficiente de rodadura a un valor nulo. Esto se realizó en cuanto la cohesión tomó un valor de 18 J/m^2 . A partir de estas modificaciones en las propiedades físicas el material de las geometrías, no se presentaron mayores dificultades y se pudo continuar con el experimento.

En el gráfico de altura en la figura 44 se ve que esta presenta un valor bajo en el estado de cohesión cero. Luego, la curva aumenta en forma lineal ascendente hasta que las partículas de pila de material presentan la suficiente adhesión entre ellas para lograr la compactación completa.

También se ve en el gráfico área que comienza con un desplazamiento amplio, ya que las partículas presentan una distribución homogénea al mezclarse. Luego el área comienza a disminuir, pues el material comienza a compactarse y las partículas se adhieren entre sí. La curva presenta una forma exponencial decreciente hasta llegar al punto de la compactación completa, alcanzando un área igual a la base del cilindro, generando así que la curva se vuelva constante.

4.5.3 Comparación caso estable e inestable

En la figura 46, se muestra el resultado comparativo de los gráficos entre el caso estable e inestable. Se muestra el comportamiento de la altura y área de la pila en función de la cohesión de partículas, utilizando el modelo de cohesión JKR. El estado cohesivo como se muestra en la gráfica se alcanza en distintos niveles.

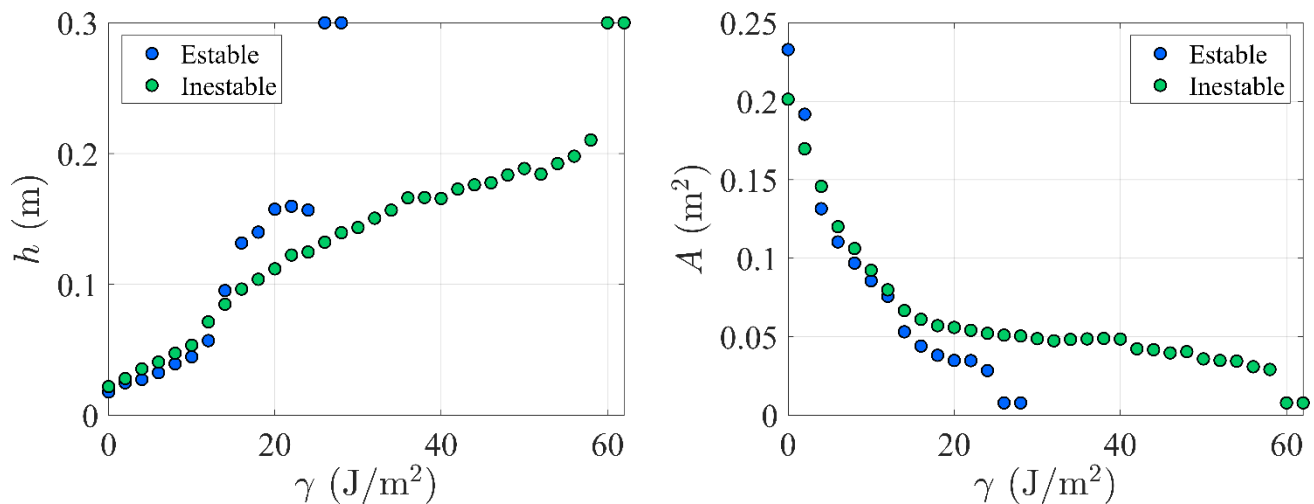


Figura 46: Comparación de altura y área en función de la cohesión del material.

En el gráfico de altura de la figura 46 se observa en las comparativas que tanto el estado estable como el inestable comienzan con un valor similar. Luego la curva de ambos comienza a ascender en forma lineal hasta los puntos 12 J/m² y 14 J/m². En este punto el estado estable presenta aumento acelerado en la altura de la pila. En cambio, el estado inestable mantiene el mismo comportamiento lineal ascendente.

Cabe destacar que el estado estable logra un estado completamente cohesivo con la mitad aproximada de la energía superficial (26 J/m^2) que el estado inestable (60 J/m^2).

Esta diferencia en el punto de compactación entre los estados estable e inestable puede deberse a la diferencia de tamaño de las partículas. Las partículas pequeñas son más numerosas y susceptibles a la energía superficial, puesto que presentan una menor cantidad de espacios vacíos, mostrando una adherencia más fuerte entre ellas. Además, al encontrarse en la parte inferior como sucede en el estado estable, estas partículas funcionan como una base sólida en la configuración, sosteniendo a las partículas grandes.

A diferencia de lo que ocurre en el estado estable, en el estado inestable las partículas pequeñas se encuentran en la parte superior. Esta posición además de su característica de mayor adherencia a bajos niveles de energía superficial que las lleva a compactarse con mayor rapidez, hacen que ejerzan una presión, debido a su propio peso sobre las partículas grandes. Esta presión tiene una influencia sobre las partículas grandes que al presentar una mayor cantidad de espacios vacíos logran la compactación con mayor energía superficial. Entonces, la influencia del peso de las partículas pequeñas más la dificultad de compactación de las partículas grandes, hacen que su compactación requiera de un valor mayor de energía en la cohesión.

Para el gráfico de área en la figura 46 se observa que al inicio presentan un valor similar en el área de desplazamiento de la pila. Conforme aumenta la energía superficial ambas curvas comienzan a mostrar una tendencia descendente como una función exponencial decreciente, hasta alcanzar la compactación completa con un área de $0,0079 \text{ m}^2$, este valor corresponde al área basal del cilindro, volviéndose constante en este punto.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo computacional contribuye a los trabajos de Castro 2017 y Vallejos 2017 con nuevos datos respecto de la caracterización de un material granular cohesivo a través de modelaciones computacionales mediante al software EDEM.

Los resultados del análisis de los gráficos obtenidos después de las modelaciones computacionales para cada condición trabajada en esta investigación representando un material granular con diferentes distribuciones de tamaño de partículas, complementan con nuevos datos al estudio realizado por Vallejos 2017, quien postula que el comportamiento del flujo del material depende de sus propiedades físicas, pero de acuerdo con los resultados, también dependen de su distribución de tamaños. Los experimentos desarrollados indican que el comportamiento del material presenta una gran dependencia con respecto a la granulometría de dichas partículas. A medida que las partículas presentan un mismo tamaño, necesitarán mayor cohesión para unirse y compactarse, debido a la presencia de espacios vacíos. Por el contrario, frente a una distribución granulométrica con una variación de tamaños considerable, los espacios vacíos serán menores y se requerirá un menor nivel de cohesión, llegando a una compactación completa.

En relación con la distribución de tamaños de partículas, cuando la granulometría es variada, las partículas forman mayores contactos entre sí, ya que el modelo JKR utilizado modela materiales donde la adhesión es causada por fuerzas capilares o de puente líquido (Coetzee 2020), por lo que basta con bajos niveles de cohesión para que se adhieran con gran fuerza. Por el contrario, cuando las partículas presentan un solo tamaño, el contacto entre ellas requiere de una mayor fuerza de cohesión para que las partículas se adhieran y puedan dejar de fluir.

En el último caso de distribución polidispersa, se utilizó una granulometría adaptada, tomando como base la publicación de Castro 2017. Esta publicación describe una caracterización geotécnica de un material mineral de barro en un punto del sector Diablo Regimiento de Minera El Teniente. Esta problemática del barro abordada por Castro 2017 tiene una similitud mayormente a la realidad que viven algunas mineras en Chile que utilizan el método de Block Caving. Este método utiliza la gravedad para fracturar y desplazar el mineral hacia los puntos de extracción. Al presentar un mayor contenido de agua el material comienza a colgarse. Estando mucho tiempo en esta fase y cambiando su estado por efecto de algún movimiento, perturbación o la extracción, este mineral puede salir de los puntos abruptamente produciendo un bombeo de agua-barro con consecuencias graves.

Al llegar a su último periodo de vida, los puntos de extracción presentan una granulometría mucho menor muy similar a la distribución polidispersa. En esta condición se encuentran más expuestos a un posible bombeo de agua-barro debido a la presencia de agua, la cual facilita la formación de barro. Al dejar de

fluir el mineral desde los puntos de extracción existe la posibilidad de una acumulación de barro que entorpece el flujo, por lo que una leve perturbación puede producir un bombeo de agua-barro.

De acuerdo con los experimentos desarrollados en este estudio, los que indican que al existir una distribución polidispersa, similar a la realidad de la minería chilena, se puede hacer un pronóstico con respecto a lo que podría ocurrir en una situación real de extracción. Al existir partículas pequeñas que llenan los espacios vacíos en el material, la cohesión necesaria para alcanzar un estado completamente cohesivo es muy bajo. La adherencia entre partículas es tan fuerte a niveles pequeños de energía superficial que aumentarla un poco más la humedad del material podría dar paso a la sobresaturación produciendo un material líquido. Debido a esto hay que tener especial cuidado de alcanzar la compactación completa del material. Si bien el material se mantiene estable y cómo se ve en los resultados experimentales es moldeable hay que prestar atención en caso de aumentar nivel en su contenido de agua porque perderá firmeza convirtiéndose en un líquido.

Lo anteriormente explicado es muy relevante, si se considera que la presencia de agua es innegable a causa de los deshielos y el flujo del agua constante dentro de las minas subterráneas. Al existir un material cohesivo en una batea, la acumulación de agua es inevitable, por lo que prontamente un material colgado por motivos de compactación a causa de la cohesión se comenzará a saturar de agua convirtiéndose en un peligro.

En la segunda parte de los experimentos se puede observar que no existen mayores complicaciones entre realizar las pruebas en un cono o en un cilindro. Se puede concluir, por lo tanto, que la geometría no afecta mayormente en el comportamiento del material. Una geometría de cilindro presenta muchas ventajas en términos de llenado en comparación con el cono de Abrams. El llenado del cono es mucho más complejo y demoroso a medida que el material se vuelve más cohesivo. Por esto, un cilindro ahorraría varias horas, simplificando los cálculos y optimizando el tiempo de las simulaciones. Ya que se disminuye en un 50% el tiempo de llenado cambiando el cono por un cilindro.

En la última parte de estos experimentos, en el estudio de la segregación se puede visualizar que se tienen dos estados, el estado estable y el estado inestable, definidos por Pouliquen y Vallance 1999. Los autores postularon que, en un flujo de material las partículas pequeñas tendían a irse hacia abajo y las partículas grandes migraban hacia la superficie. Consideraron, entonces que el estado estable era la configuración natural para dichas partículas.

En la presente investigación se observó que el estado estable necesita un menor nivel de cohesión, casi la mitad que el estado inestable para lograr la compactación completa. Cabe destacar que el estado estable logra un estado completamente cohesivo con la mitad aproximada de la energía superficial (26 J/m^2) que el estado inestable (60 J/m^2). Lo cual se debe a los espacios vacíos entre el material, puesto que las partículas pequeñas que se encuentran en la parte inferior son más susceptibles al efecto de la cohesión, producto de que existe una mayor superficie de contacto. Por lo tanto, la tensión superficial entre las partículas es mucho más fuerte, de modo que se encuentran más compactadas y unidas presentando mayor adhesión, lo que produce una base más sólida para que las partículas grandes puedan compactarse con mayor facilidad en la parte superior sin importar la diferencia de tamaño.

Ahora bien, respecto del estado inestable se puede señalar que ocurre algo diferente. Esto se debe a que la configuración de las partículas es inversa. Las partículas grandes se encuentran abajo y las partículas pequeñas arriba, tomando una configuración no natural. Esta configuración se da en las minas de Block/Panel Caving cuando la propagación de las fracturas se propaga y alcanzan a conectar con niveles superiores o la superficie. Al presentar esta configuración las partículas grandes presentan dificultades a la hora de compactarse estando en la base, ya que necesitan altos niveles de energía superficial para lograr la cohesión, siendo este valor un 56% más que el estado estable para lograr la compactación.

6. RECOMENDACIONES

Luego de haber revisado los antecedentes existentes sobre el fenómeno de bombeos de agua-barro y estudiar el comportamiento de un material cohesivo mediante la modelación computacional a través del software EDEM se entregan las siguientes recomendaciones.

El trabajar con materiales granulares es muy complejo dentro de la minería, debido a que es difícil entender y describir su comportamiento con relación a la ingeniería. Estos están compuestos por una gran cantidad de partículas por lo que es muy difícil generar una descripción continua del movimiento de cada una de las partículas (Andreotti et al. 2013). El método de elementos discretos (DEM) son herramientas muy confiables y cada vez son más utilizadas para estudiar y predecir el comportamiento de materiales granulares (Grima y Wypych 2011). Aunque para realizar estas simulaciones computacionales para procesos de partículas finas y cohesivas se necesitan equipos con tecnología de un alto costo. Por lo que

sólo se pueden realizar simulaciones a pequeña escala y con una limitada cantidad de partículas. Debido a estas limitaciones se han desarrollado varios modelos DEM de grano grueso, los cuales utilizan un número menor de partículas de mayor tamaño, reduciendo el costo computacional. Por lo que se necesitan una gran inversión en equipos que puedan realizar modelaciones más complejas generando resultados más confiables.

Actualmente con herramientas DEM no es posible modelar perfectamente un medio con un alto contenido de agua o sobresaturado. Estas herramientas modelan el comportamiento de cada una de las partículas y no de un conjunto de partículas. Es por lo anterior que se sugiere buscar continuamente herramientas complementarias que permitan representar de forma similar a la realidad el efecto del agua sobre un material granular, entregándoles mayor movilidad a las partículas para lograr estudiar de mejor manera este fenómeno.

Además, se recomienda continuar investigando y estudiando el comportamiento de un medio granular cohesivo por medio de simulaciones y experimentos de laboratorio que permitan lograr determinar la equivalencia entre la energía superficial del modelo de cohesión JKR y el porcentaje del contenido de agua de un material granular.

En cuanto a los casos de segregación por tamaño estudiados aquí, se puede decir que son solo una aproximación de lo que ocurre en un medio granular con cohesión en donde este va en aumento. Por lo que se propone estudiar la influencia de finos en los puntos de extracción, utilizando un modelo de extracción experimental, observando cómo influye el efecto de la segregación a medida que se extrae el mineral cohesivo. Estudiar, por ejemplo, cómo influye la presencia de partículas de menor tamaño (finos) que es lo que comúnmente ocurre en la minería subterránea.

Además de lo anteriormente dicho sería interesante que, para obtener conclusiones más contundentes de estos experimentos, pudieran replicarse a una mayor escala, con material granular extraído de una mina en donde se utilice el método de block/panel caving y que presenten problemas de percolación de agua. También, sería de sumo interés poder revisar el terreno in situ, los puntos de extracción y cómo es controlada el agua actualmente, por medio de la recopilación de muestras y material fotográfico.

La filtración de agua es un fenómeno que se presenta en la minería subterránea, por lo que este problema debe ser evitado por medio de la predicción de la ocurrencia de un bombeo de agua-barro. Utilizar

herramientas computacionales es de bastante ayuda, pero es bastante complejo construir un modelo que pueda predecir cuándo y en qué lugar se producirá un bombeo de agua-barro. Sin embargo, faltan investigaciones junto con mineras que ayuden a comprender el fenómeno y prevenir su ocurrencia, por ello se necesitan recursos que financien dichos estudios que permitan explotar completamente las incontables reservas, que quedaron atrapadas y obstruidas por la presencia de barro, cuidando la seguridad del personal, la producción y los equipos.

Por los motivos anteriormente señalados, es que en la minería se necesita realizar una gran inversión que permita financiar investigaciones, un mayor desarrollo de laboratorios y softwares más avanzados, que puedan simular de manera más realista y óptima, un material granular, su contenido de agua y su comportamiento dentro de un modelo de extracción basado en el método de block/panel caving. Los equipos adecuados que permiten realizar estas simulaciones más sofisticadas, en tiempos relativamente cortos resultan altamente costosos. Se reitera la importancia de generar mayores investigaciones y profundizar en el tema, si se quiere en un futuro predecir los bombeos de agua-barro y generar un sistema que permita llegar a estas reservas que se encuentran casi olvidadas, pero que son una gran fuente de riquezas que están detenidas producto de las grandes acumulaciones de agua y el riesgo que conlleva hoy en día extraerlas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Andreotti, Bruno, Yoel Forterre, y Olivier Pouliquen. 2013. *Granular Media: Between Fluid and Solid*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Avaria, Francisco Javier Vivanco. 2005. «FLUJOS EN MEDIOS GRANULARES SECOS». 120.
- Becerra, C. 2011. «Controlling draw points prone to pumping». en *Proceedings of the 2nd International Seminar on Geology for the Mining Industry (Geomin 2011)*. Antofagasta, Chile, 8–10 June: Session 7: Mine Production Geology / Geometallurgy. Gecamin, Santiago, Chile.
- Behjani, Mohammadreza Alizadeh, Ali Hassanpour, Mojtaba Ghadiri, y Andrew Bayly. 2017. «Numerical Analysis of the Effect of Particle Shape and Adhesion on the Segregation of Powder Mixtures». *EPJ Web of Conferences* 140:06024. doi: 10.1051/epjconf/201714006024.
- Behjani, Mohammadreza Alizadeh, Nejat Rahmanian, Nur Fardina bt Abdul Ghani, y Ali Hassanpour. 2017. «An Investigation on Process of Seeded Granulation in a Continuous Drum Granulator Using DEM». *Advanced Powder Technology* 28(10):2456-64. doi: 10.1016/j.apt.2017.02.011.

- Bond, W. N. 1935. «The Surface Tension of a Moving Water Sheet». *Proceedings of the Physical Society* 47(4):549-58. doi: 10.1088/0959-5309/47/4/303.
- Briceño, M., M. Adams, y R. Castro. 2016. «Estimación de la Humedad y Profundidad del Agua Barro en Block Caving». *UMining 2016, Santiago, Chile*.
- Butcher, R., T. Stacey, y W. Joughin. 2000. «Mud rushes and methods of combating them». *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Butcher, R., T. Stacey, y W. Joughin. 2005. «Mud rushes and methods of combating them». *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Call & Nicholas, Inc, Co Freeport McMoRan Copper and Gold, y Inc Hydrologic Consultants. 1998. «IOZ wet muck study». *PT. FI Internal Report*.
- Caplan, Joshua Sam. 2018. «Granular Collapses». Thesis, University of Cambridge.
- Carr, Michael J., Wei Chen, Kenneth Williams, y Andre Katterfeld. s. f. «Comparative Investigation on Modelling Wet and Sticky Material Behaviours with a Simplified JKR Cohesion Model and Liquid Bridging Cohesion Model in DEM». 11.
- Castro, R. L. 2017. «Geotechnical Characterization of Ore Related to Mudrushes in Block Caving Mining». *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 117(3):275-84. doi: 10.17159/2411-9717/2017/v117n3a9.
- Coetzee, C. J. 2020. *A Johnson-Kendall-Roberts (JKR) Contact Model - Implementation in PFC*.
- Departamento de Química Física. 2020. *Química Física III - Fenómenos de Superficie*. Universidad de Valencia.
- Domínguez, Orlando J., María A. Toro, y Emilio M. Serrano. 2014. «ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE FUERZAS INTERMOLECULARES EN INGENIERÍA QUÍMICA: SU RELACIÓN CON PROPIEDADES MEDIBLES». *Formación universitaria* 7(5):15-22. doi: 10.4067/S0718-50062014000500003.
- Douglas, J. 1992. «Block caving». en *SME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, CO.
- Garcés, D., R. Castro, M. E. Valencia, y F. Armijo. 2016. «Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo». *UMining 2016, Santiago, Chile*.
- Grima, Andrew Phillip, y Peter Wilhelm Wypych. 2011. «Development and Validation of Calibration Methods for Discrete Element Modelling». *Granular Matter* 13(2):127-32. doi: 10.1007/s10035-010-0197-4.
- Hærvig, Jakob, Ulrich Kleinhans, Christoph Wieland, Hartmut Spliethoff, Anna Lyhne Jensen, Kim Sørensen, y Thomas Joseph Condra. 2017. «On the Adhesive JKR Contact and Rolling Models

- for Reduced Particle Stiffness Discrete Element Simulations». *Powder Technology* 319:472-82. doi: 10.1016/j.powtec.2017.07.006.
- Heslop, T. 2000. «Block caving — controllable risks and fatal flaws». en *Proceedings of Massmin 2000, Brisbane, Australia, 29 October–2 November*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Hubert, G., S. Dirdjosuwondo, R. Plaisance, y L. Thomas. 2000. «Teleoperation at Freeport to reduce wet muck hazards». en *Proceedings of Massmin 2000, Brisbane, Australia, 29 October–2 November*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Hunt, G. F., y R. Daniel. 1952. «Water problems at Wesselton and Dutoitspan Mines, Ass». *Min. Managers S. Afr., Papers and Discussions* 297-313.
- Jakubec, J. 2012. «Mud rush risk evaluation». en *Proceedings of Massmin 2012*. Sudbury, Ontario, 10–14 June 2012: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal.
- Jakubec, J., R. Clayton, y A. R. Guest. 2016. «Mudrush Risk Evaluation». *CIM Journal* 7(1):7-12. doi: 10.15834/cimj.2016.1.
- Johnson, K. L., K. Kendall, y A. D. Roberts. 1971. «Surface Energy and the Contact of Elastic Solids». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 324(1558):301-13.
- Lambe, T. William, y Robert V. Whitman. 1991. *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Pouliquen, O., y J. W. Vallance. 1999. «Segregation Induced Instabilities of Granular Fronts». *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 9(3):621-30. doi: 10.1063/1.166435.
- Sánchez, Katherine, Sergio Palma, y Raúl Castro. 2016. «Modelamiento Numérico del Flujo de Agua y su aplicación en minería de Caving». *UMining 2016, Santiago, Chile*.
- Sánchez, Katherine, Sergio Palma, y Raúl L. Castro. 2019. «Numerical Modelling of Water Flow Through Granular Material for Isolated and Simultaneous Extractions in Block Caving». *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52(1):133-47. doi: 10.1007/s00603-018-1587-x.
- Thornton, Colin, y Zemin Ning. 1998. «A Theoretical Model for the Stick/Bounce Behaviour of Adhesive, Elastic-Plastic Spheres». *Powder Technology* 99(2):154-62. doi: 10.1016/S0032-5910(98)00099-0.
- Vallejos, J. 2017. «Methodology for Evaluation of Mud Rush Risk in Block Caving Mining». *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 117(5):491-97. doi: 10.17159/2411-9717/2017/v117n5a11.
- Yamamuro, J., y P. Lade. 1998. «Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands». en *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*. Vol. 124, n.º 9.

Yoshimine, M., y K. Ishihara. 1998. «Flow potential of sand during liquefaction». Pp. 189-98 en *Soils and Foundations*. Vol. 38, n.º 3.

8. ANEXOS

ANEXO A

Reología

La reología de los flujos granulares densos es muy importante a la hora de estudiar los medios granulares para el fenómeno de bombeos de agua-barro. Hay que destacar que el flujo de los medios granulares densos corresponden a la familia de los materiales viscoplásticos. El flujo del material depende tanto de la fricción como de la velocidad de deformación por corte.

A continuación, se muestra cómo se plantea una configuración simple para estudiar la reología de los flujos granulares. Utilizando la representación de un material confinado entre dos placas rugosas, en la cual se consideran partículas de diámetro d , una densidad ρ_p bajo una presión de confinamiento P en la placa superior.

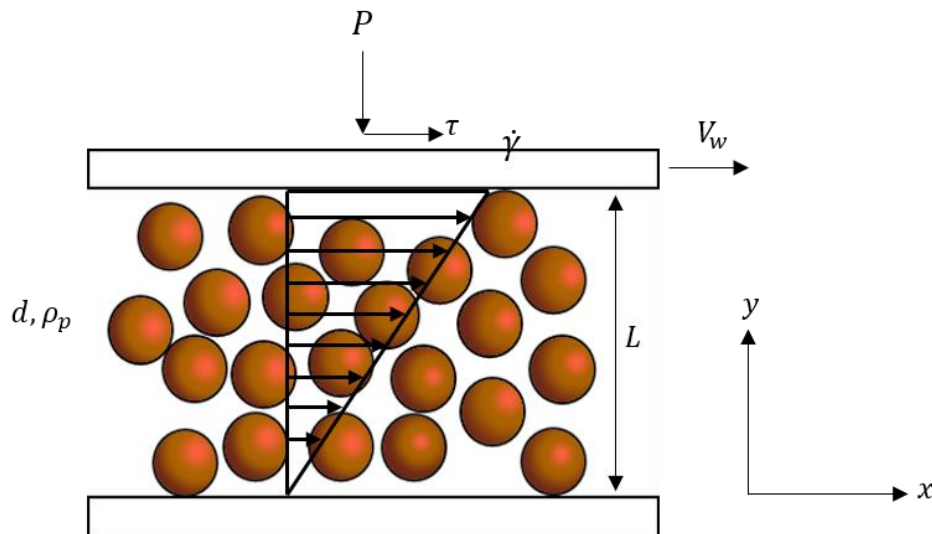


Figura 47: Plano de corte (Andreotti et al. 2013).

El material granular se ve afectado por una deformación de corte $\dot{\gamma}$, en la cual se muestra un desplazamiento relativo de la placa superior a una velocidad V_w , con una distancia L entre las placas.

$$\dot{\gamma} = \frac{V_w}{L} \quad (44)$$

Para este comportamiento del sistema existe un parámetro adimensional por el cual está controlado, el cual es llamado “número inercial”, el cual se describe en la siguiente ecuación.

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{\frac{P}{\rho_p}}} \quad (45)$$

Por consiguiente, el análisis dimensional puede expresarse mediante las ecuaciones constitutivas, las cuales muestran que el esfuerzo cortante τ tiene que ser proporcional al esfuerzo normal P , que la fracción de volumen ϕ es función de I y que $\mu(I)$ es un coeficiente de fricción que depende del número de inercia.

$$\tau = \mu(I)P \quad (46)$$

$$\phi = \phi(I) \quad (47)$$

Para esto se realizaron simulaciones numéricas utilizando modelos de elementos discretos y mediante mediciones experimentales para sistemas de dos dimensiones (discos) y tridimensionales (esferas).

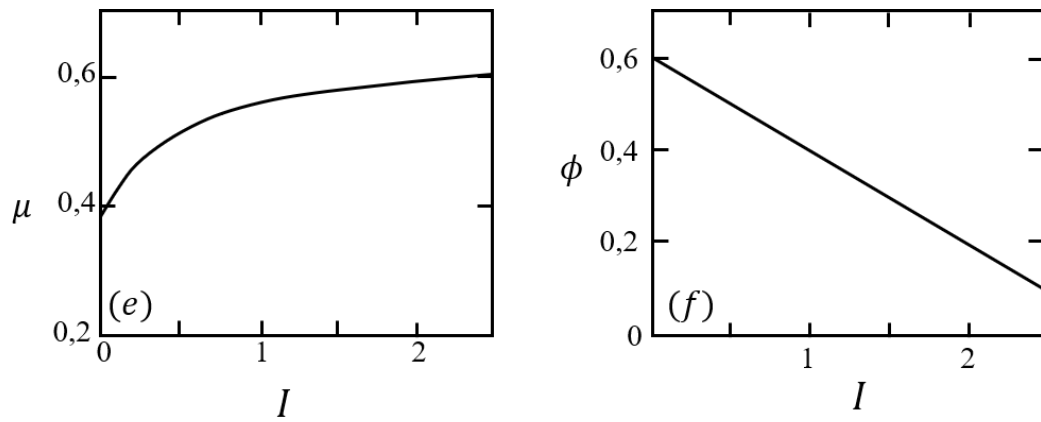


Figura 48: Resultados de simulaciones y medidas experimentales en discos y esferas (Andreotti et al. 2013).

Donde se observa que el coeficiente de fricción μ representa una función creciente del número inercial I . Por esta razón, al aumentar la velocidad de corte y/o disminuir la presión, la fricción aumenta. Por lo cual el número de inercia permite una clasificación de los regímenes de flujo cuasiestáticos, densos y diluidos. Para los flujos cuasiestáticos la inercia tiende a cero ($I \rightarrow 0$). Para los flujos densos el coeficiente de fricción tiende hacia un μ_1 constante ($\mu \rightarrow \mu_1$). Y para los flujos diluidos la fracción de volumen varía con la I , comienza con un valor máximo ($\phi = \phi_c$) cuando $I \rightarrow 0$ y disminuye más o menos linealmente al aumentar I .

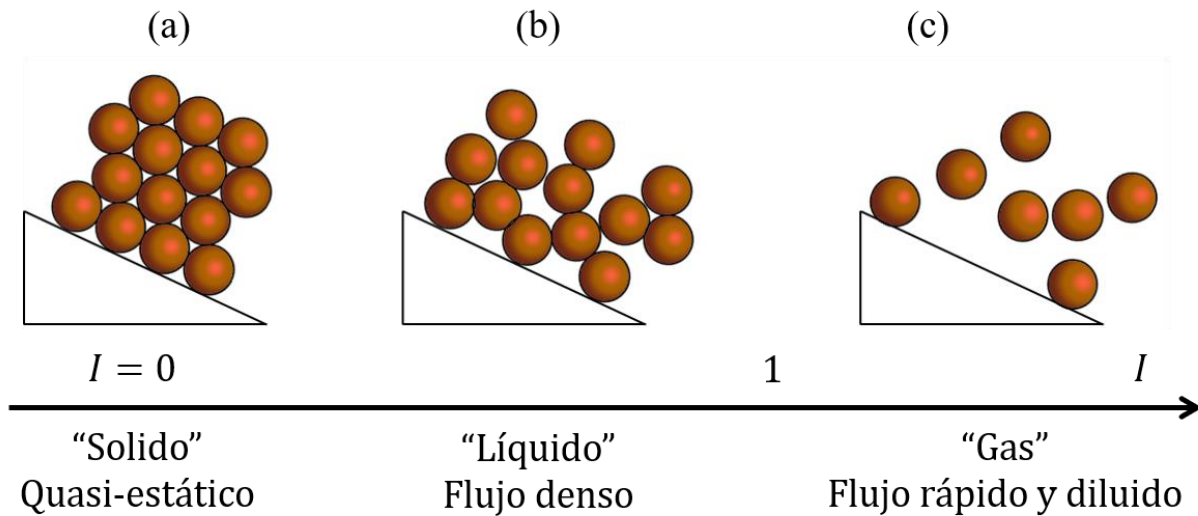


Figura 49: (a) Regímenes de flujo en función del número de inercia (Andreotti et al. 2013).

ANEXO B

Equivalencia en volumen para cono y cilindro

Se realiza una ecuación matemática para determinar un volumen de cilindro y cono iguales con la finalidad de obtener un radio equivalente para el cilindro. La altura se mantiene fija en 30 cm y ya que los diámetros del cono son conocidos (radio superior de 5 cm y radio inferior de 10 cm) solo falta encontrar el diámetro equivalente del cilindro. Así ambos tendrán la capacidad de contener el mismo volumen de partículas.

$$V_{cilindro} = V_{cono}$$

$$\pi \cdot r_{eq}^2 \cdot h = \frac{h \cdot \pi}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2)$$

$$\pi \cdot r_{eq}^2 \cdot 30 = \frac{30 \cdot \pi}{3} (10^2 + 5^2 + 10 \cdot 5)$$

$$\pi \cdot r_{eq}^2 \cdot 30 = \frac{30 \cdot \pi}{3} (10^2 + 5^2 + 10 \cdot 5)$$

$$r_{eq}^2 = \frac{175}{3}$$

$$r_{eq} \approx 7,64 \text{ cm}$$

$$d_{eq} \approx 15,28 \text{ cm}$$

Por lo tanto, el diámetro interior equivalente del cilindro queda con un valor de 15,28 cm. El cual será utilizado en las simulaciones para determinar si la geometría afecta en el comportamiento del material.

Distribución adaptada de Castro (2017)

Siguiendo el modelo de Castro (2017) se adaptará esta granulometría a las dimensiones que puedan garantizar un flujo continuo y similar a la realidad. En dichas tablas se observa la adaptación de la curva granulométrica original que se encuentra en dicha publicación. Se eligieron ciertos valores de forma

intercalada que se encuentran en azul. Estos puntos se escalaron y ajustaron al modelo a utilizar para llegar a la distribución final que fue utilizada en este experimento en el software EDEM.

Tabla 14: Distribución original de Castro 2017.

Tamaño original (mm)	Pasante (%)
150	100
75	100
50	98
37,5	94
25	82,8
19	74
9,5	55
4,75	39,8
2,36	29,8
0,6	19,1
0,3	15,9
0,15	13,5
0,075	11,5

Tabla 15: Tamaño de partículas elegidos de forma intercalada y ajustados al modelo utilizado en esta investigación.

Tamaño original (mm)	Tamaño Modelo adaptado (mm)
75	4,5
37,5	4
19	3,5
4,75	3
0,6	2,5
0,15	2

Tabla 16: Distribución final adaptada utilizada en esta investigación.

Tamaño original (mm)	Pasante (%)
4,5	100
4	94
3,5	74
3	40
2,5	19
2	13,5

ANEXO C

Resultados mediciones de altura y área para el Cono de Abrams

A continuación, se presentan las tablas con los resultados de cada uno de los casos utilizados para obtener los gráficos de altura y área en función de la energía superficial del modelo de cohesión JKR en experimento de asentamiento utilizando el Cono de Abrams.

En primer lugar, se presenta la tabla de la distribución monodispersa.

Tabla 17: Resultados de mediciones de área y altura para el caso monodisperso.

N° de Caso	Energía de superficie (J/m ²)	Área promedio (m ²)	Altura promedio (m)
Caso 1	0,0	0,339	0,037
Caso 2	2,5	0,322	0,044
Caso 3	5,0	0,299	0,047
Caso 4	7,5	0,252	0,048
Caso 5	10,0	0,227	0,053
Caso 6	12,5	0,195	0,058
Caso 7	15,0	0,166	0,064
Caso 8	17,5	0,141	0,073
Caso 9	20,0	0,129	0,097
Caso 10	22,5	0,110	0,116
Caso 11	25,0	0,101	0,133
Caso 12	27,5	0,089	0,162
Caso 13	30,0	0,079	0,178
Caso 14	32,5	0,031	0,300
Caso 15	35,0	0,031	0,300

En segundo lugar, se presenta la tabla con distribución bidispersa.

Tabla 18: Resultados de mediciones de área y altura para el caso bidisperso.

N° de Caso	Energía de superficie (J/m ²)	Área promedio (m ²)	Altura promedio (m)
Caso 1	0,0	0,380	0,037
Caso 2	2,5	0,346	0,041
Caso 3	5,0	0,286	0,046
Caso 4	7,5	0,237	0,051
Caso 5	10,0	0,195	0,062
Caso 6	12,5	0,162	0,067
Caso 7	15,0	0,137	0,088
Caso 8	17,5	0,119	0,111
Caso 9	20,0	0,103	0,134
Caso 10	22,5	0,088	0,161
Caso 11	25,0	0,079	0,184
Caso 12	27,5	0,031	0,300
Caso 13	30,0	0,031	0,300

Y, en tercer lugar, se presenta la tabla con distribución polidispersa.

Tabla 19: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso.

N° de Caso	Energía de superficie (J/m ²)	Área promedio (m ²)	Altura promedio (m)
Caso 1	0,0	0,448	0,040
Caso 2	2,5	0,317	0,051
Caso 3	5,0	0,192	0,061
Caso 4	7,5	0,135	0,102
Caso 5	10,0	0,100	0,150
Caso 6	12,5	0,075	0,197
Caso 7	15,0	0,031	0,300
Caso 8	17,5	0,031	0,300

Mediciones del error de las simulaciones

Para estos casos se realizó un análisis de error en donde se tomó un caso medio en cada una de las distribuciones, en donde se midieron 20 veces tanto la altura como el área. En donde se obtiene un error porcentual relativo porcentual que indica el error que puede presentar las mediciones dentro del software EDEM. Para el caso con distribución monodispersa se eligió el caso 7 y se realizó las mediciones correspondientes.

Tabla 20: Resultados de mediciones de área y altura para el caso monodisperso midiendo el error.

Caso 7		
N° Mediciones	Diámetro (cm)	Altura (cm)
1	44,62	6,55
2	45,32	6,49
3	47,23	6,35
4	46,74	6,28
5	45,71	6,32
6	47,03	6,13
7	46,20	6,48
8	46,52	6,43
9	45,08	6,56
10	47,12	6,28
11	45,37	6,43
12	45,89	6,48
13	46,47	6,37
14	45,71	6,53
15	45,84	6,09
16	46,23	6,10
17	46,38	6,08
18	47,54	6,11
19	45,4	6,63
20	45,76	6,29
Promedio (cm)	46,11	6,35
Promedio (m)	0,46	0,06
Desviación estándar	0,008	0,002
Error aleatorio	0,005	0,001
Error relativo porcentual (%)	1,13	1,85

Para el caso con distribución bidispersa se eligió el caso 7 y se realizó las mediciones correspondientes.

Tabla 21: Resultados de mediciones de área y altura para el caso bidisperso midiendo el error.

Caso 7		
N° Mediciones	Diámetro (cm)	Altura (cm)
1	42,20	8,85
2	42,12	8,93
3	41,66	8,76
4	41,34	8,63
5	41,90	8,75
6	41,47	8,63
7	42,30	8,87
8	41,91	9,04
9	41,34	9,18
10	41,51	8,72
11	41,34	8,76
12	41,22	8,64
13	41,28	8,71
14	41,40	8,91
15	41,72	8,85
16	41,68	8,91
17	41,59	8,41
18	41,74	8,57
19	41,19	8,86
20	41,80	8,91
Promedio (cm)	41,64	8,79
Promedio (m)	0,42	0,09
Desviación estándar	0,003	0,002
Error aleatorio	0,002	0,001
Error relativo porcentual (%)	0,79	1,98

Para el caso con distribución polidispersa se eligió el caso 4 y se realizó las mediciones correspondientes.

Tabla 22: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso midiendo el error.

Caso 4		
N° Mediciones	Diámetro (cm)	Altura (cm)
1	41,12	10,28
2	41,57	10,28
3	41,56	10,19
4	41,55	10,19
5	40,83	10,19
6	40,87	10,2
7	41,07	10,19
8	41,40	10,31
9	41,24	10,51
10	40,78	10,19
11	41,16	10,17
12	40,70	10,19
13	41,36	10,37
14	41,44	10,34
15	41,50	10,28
16	40,63	10,24
17	41,16	10,24
18	41,11	10,28
19	41,03	10,15
20	40,72	10,03
Promedio (cm)	41,14	10,24
Promedio (m)	0,41	0,10
Desviación estándar	0,003	0,001
Error aleatorio	0,002	0,001
Error relativo porcentual (%)	0,75	0,96

Resultados del error relativo porcentual promedio utilizando las mediciones de cada distribución para tener un error de medición utilizando las herramientas de medición en el software EDEM.

Tabla 23: Error relativo promedio para altura y área de la pila.

Error relativo porcentual promedio diámetro (%)	0,89
Error relativo porcentual promedio altura (%)	1,60

Luego, para el determinar la influencia de la geometría se replicó el caso polidisperso cambiando la geometría de cono por una de cilindro, donde los resultados se muestran a continuación.

Tabla 24: Resultados de mediciones de área y altura para el caso polidisperso en geometría de cilindro.

N° de Caso	Energía de superficie (J/m ²)	Área promedio (m ²)	Altura promedio (m)
Caso 1	0,0	0,441	0,037
Caso 2	2,5	0,354	0,057
Caso 3	5,0	0,234	0,065
Caso 4	7,5	0,162	0,076
Caso 5	10,0	0,126	0,107
Caso 6	12,5	0,098	0,137
Caso 7	15,0	0,018	0,300
Caso 8	17,5	0,018	0,300

En el último estudio, se tiene la segregación en dos casos uno en un estado estable y otro en un estado inestable en términos de segregación, en donde se mide tanto la altura como el área de la pila.

Tabla 25: Mediciones de altura y área del caso estable de segregación.

Estado Estable			
N° de simulaciones	Cohesión Energía Superficial (J/m ²)	Altura promedio (m)	Área promedio (m ²)
1	0	0,018	0,233
2	2	0,025	0,192
3	4	0,027	0,132
4	6	0,033	0,110
5	8	0,039	0,097
6	10	0,045	0,086
7	12	0,057	0,076
8	14	0,095	0,053
9	16	0,132	0,044
10	18	0,140	0,038
11	20	0,157	0,035
12	22	0,160	0,035
13	24	0,157	0,028
14	26	0,300	0,008
15	28	0,300	0,008

Tabla 26: Mediciones de altura y área del caso inestable de segregación

Estado Inestable			
N° de simulaciones	Cohesión Energía Superficial (J/m ²)	Altura promedio (m)	Área promedio (m ²)
1	0	0,022	0,805
2	2	0,028	0,679
3	4	0,035	0,583
4	6	0,041	0,480
5	8	0,047	0,425
6	10	0,054	0,369
7	12	0,071	0,320
8	14	0,085	0,267
9	16	0,096	0,244
10	18	0,104	0,228
11	20	0,112	0,224
12	22	0,122	0,216
13	24	0,125	0,209
14	26	0,132	0,204
15	28	0,140	0,202
16	30	0,143	0,195
17	32	0,151	0,190
18	34	0,157	0,193
19	36	0,166	0,195
20	38	0,166	0,196
21	40	0,166	0,194
22	42	0,173	0,169
23	44	0,176	0,167
24	46	0,178	0,159
25	48	0,184	0,162
26	50	0,189	0,144
27	52	0,184	0,140
28	54	0,192	0,138
29	56	0,198	0,124
30	58	0,210	0,117
31	60	0,300	0,031
32	62	0,300	0,031