



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**ESTUDIO DEL FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO Y SU APLICACIÓN A
MINERÍA DE CAVING**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

MIGUEL ÁNGEL FUENZALIDA NAVARRETE

PROFESOR GUÍA:

RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JAVIER VALLEJOS MASSA

FERNANDO LUND PLANTAT

ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2012

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN MINERÍA

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

POR: MIGUEL ÁNGEL FUENZALIDA NAVARRETE

PROF. GUÍA: RAÚL CASTRO R.

La aplicación de métodos de caving en minas de gran profundidad se ha vuelto cada vez más frecuente, lo que se traduce en un incremento en las alturas de columna de mineral a explotar. Por este motivo, el material que fluye hacia los puntos de extracción se encontrará bajo un alto régimen de esfuerzos. El flujo gravitacional tiene un impacto sobre la recuperación de las reservas del yacimiento, por lo que resulta trascendental estudiar los mecanismos físicos que permitan comprender el proceso por el que un material hundido se mueve desde su posición inicial hasta los puntos de extracción bajo estas condiciones.

El objetivo de esta tesis es mejorar el entendimiento sobre los mecanismos físicos en un flujo gravitacional confinado aplicado a minería de caving, a través de un set experimental. Para ello se diseña y construye un equipo de laboratorio capaz de replicar aproximadamente la magnitud los esfuerzos verticales existentes en la mina, para estudiar el efecto de la sobrecarga aplicada en la capacidad de fluir del material, medir la fragmentación y compactación del material durante los ensayos y medir el efecto del esfuerzo vertical en las zonas de flujo del material. A partir de diferentes ensayos se determinan las propiedades de corte, propiedades de resistencia, tamaños y forma del material. Los parámetros a variar en los ensayos corresponden al esfuerzo aplicado por la prensa hidráulica y el tamaño del material a utilizar.

Los experimentos realizados muestran una clara influencia de la carga vertical aplicada en el comportamiento del flujo material granular. Entre mayor es la carga vertical, mayor es el grado de compactación, a su vez existe una mayor reducción de los tamaños de los fragmentos. Además existe una reducción en las características de flujo lo que resulta en colgaduras o arcos mecánicos donde el flujo no es posible a pesar de tener razones entre ancho del punto de extracción y tamaño de partículas mayores a 5 veces.

Respecto al efecto del tamaño de partícula, éste no tiene un efecto significativo en la geometría de las zonas de flujo de extracción y movimiento bajo las condiciones establecidas en los experimentos realizados.

El mecanismo físico que está principalmente presente en los experimentos que estudian el flujo gravitacional confinado, es el colapso de arcos donde la geometría de IEZ está controlada por la cantidad de masa extraída y los esfuerzos verticales aplicados. Por otro lado, el mecanismo de erosión no se observa a medida que el material es extraído desde el punto de extracción de manera aislada.

Finalmente, a partir de los resultados experimentales, se desarrolla una aplicación en minería de caving que relaciona el régimen de esfuerzos a escala mina con los esfuerzos aplicados en los experimentos. La aplicación se enfoca en la capacidad de fluir del material variando de acuerdo al tamaño característico del material, diámetro del punto de extracción y los esfuerzos verticales aplicados.

ABSTRACT

Caving methods rely on gravity to break and transport large amounts of ore and waste. The application of massive underground mining is becoming ever more prevalent, specifically caving mines at deeper levels, mainly due to the depletion of mining reserves. It is thus relevant to study mechanisms that occur at deeper levels. Despite the importance of gravity flow, there is little information in the literature about the influence that the confinement (weight of the ore column) has on the geometry of extraction and movement zones.

This thesis work aims to improve the knowledge regarding physical mechanisms through an experimental set up in confined gravity flow applied to caving. To achieve these objectives this work presents the design and the methodology of the experimental set up and the additional tests to characterize the material properties.

The main results of this work show that isolated draw zones are mainly influenced by the mass drawn and the vertical load applied. Particle size was found to have no significant effect upon the movement and extraction zones.

The conclusions are based upon empirical data to define parameters thought to be relevant in controlling isolated draw under confinement. The greater the vertical load, the greater the degree of compaction of the material, as in turn there is a greater reduction of the sizes of the fragments. Furthermore there is a reduction in flow characteristics resulting in hang ups where the flow of the material is not possible despite having ratios between the drawpoint diameter and the particle size greater than 5 times.

The main physical mechanism observed in the experiments was the arc collapse where the geometry of IEZ is controlled by the amount of mass extracted and the vertical load applied. Furthermore, the erosion mechanism is not observed as the material is extracted from the drawpoint.

Finally, according to the experimental results, it was developed a caving mining application that relates the stress regime at mine with the stresses applied in the experiments. The application focuses on the flowability of the material that varies according to the size of the material, diameter of the drawpoint and the vertical load applied.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Hipótesis de la investigación	2
1.3. Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4. Justificación de la investigación	3
1.5. Alcances.....	4
1.6. Metodología	5
1.7. Contenido de la tesis	8
FLUJO GRAVITACIONAL Y FRAGMENTACIÓN EN MINERÍA DE CAVING	9
2.1. Introducción	9
2.2. Flujo gravitacional	10
2.2.1 Modelamiento físico en flujo gravitacional.....	10
2.2.2 Modelos empíricos	14
2.2.3 Experimentos a escala mina	15
2.2.4 Fluidez del material	16
2.2.5 Esfuerzos en materiales granulares.....	21
2.3. Fragmentación	23
2.3.1 Tipos de Fragmentación	23
2.3.2 Metodologías para medir ruptura de partículas	24
2.3.3 Factores que afectan la fragmentación	32
2.3.4 Comportamiento de las propiedades de corte en arenas.....	36
2.4. Conclusiones	39
2.4.1 Flujo gravitacional.....	39
2.4.2 Fragmentación	40
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	42
3.1. Introducción	42

3.2	Diseño del equipo de laboratorio	42
3.3	Instrumentación	46
3.3.1	Caracterización del material	46
3.3.2	Carga vertical.....	51
3.3.3	Desplazamiento del pistón.....	53
3.3.4	Deformación cilindro.....	54
3.3.5	Marcadores para el estudio de IEZ e IMZ.....	57
3.4	Fluidez del material	59
3.5	Procedimiento del ensayo	60
3.6	Conclusiones	62
EXPERIMENTO: FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO		63
4.1	Introducción	63
4.2	Material.....	63
4.2.1	Distribución de tamaño.....	63
4.2.2	Factor de forma.....	64
4.2.3	Propiedades de corte	66
4.2.4	Propiedades de resistencia a la compresión.....	68
4.3	Experimentos	69
4.3.1	Experimento 1 y 2	70
4.3.2	Experimento 3 y 4	70
4.3.3	Experimento 5 y 6	71
4.3.4	Experimento 7 y 8	71
4.3.5	Experimento 9 y 10	71
4.3.6	Experimento 11	71
4.3.7	Experimento 12 y 13	71
4.3.8	Experimento 14	71
4.3.9	Experimento 15 y 16	72
4.3.10	Experimento 17 y 18	72
4.3.11	Experimento 19 y 20	72

4.4	Resultados	74
4.4.1	Experimentos con material $d_{50} = 6\text{mm}$	74
4.4.2	Experimentos con material $d_{50} = 11\text{ mm}$	78
4.5	Discusion General	82
4.5.1	Fragmentación y compactación del material	82
4.5.2	Estimación del confinamiento	85
4.5.3	Zonas de Flujo	87
4.5.4	Fluidez del material	90
4.6	Conclusiones	91
4.6.1	Fragmentación y compactación del material	91
4.6.2	Estimación del confinamiento	91
4.6.3	Zonas de flujo	91
4.6.4	Fluidez del material	92
	MECANISMOS Y APLICACIÓN A MINERÍA DE CAVING.....	93
5.1	Introducción	93
5.2	Mecanismos del flujo gravitacional confinado	93
5.2.1	Antecedentes.....	93
5.2.2	Mecanismos observados en el flujo gravitacional confinado.....	94
5.3	Aplicación a minería de caving	97
5.4	Conclusiones	102
5.4.1	Mecanismos de flujo gravitacional confinado.....	102
5.4.2	Aplicación a minería de caving	103
	CONCLUSIONES.....	104
6.1	Conclusiones generales.....	104
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro	105
	REFERENCIAS	107
	INFORME DE CALIBRACION DE LA PRENSA	111
	PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	114
	EXPERIMENTOS DE FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO.....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Aproximaciones para desarrollar el conocimiento en minería de caving.	5
Figura 2: Esquema de la metodología de la investigación.	7
Figura 3: Esquema de la Zona de Movimiento (MZ) y Zona de Extracción (EZ) para un punto aislado (Kvapil, 2004).	11
Figura 4: Espaciamiento máximo/mínimo de zonas de tiraje (Laubscher, 1994).	14
Figura 5: Guía de diseño para piques de traspaso considerando el diámetro del pique (D) y el tamaño mayor de la partícula de roca (Hadjigeorgiou, 2006).	16
Figura 6: Arco mecánico en el flujo gravitacional (Kvapil, 2004).	18
Figura 7: Diagrama de fuerzas en un arco mecánico alto de material grueso (Kvapil, 2004).	19
Figura 8 : Diagrama de fuerzas en un arco mecánico bajo de material grueso (Kvapil, 2004).	20
Figura 9: Esfuerzos en elemento cilíndrico (Nedderman, 1992).	21
Figura 10: Cambio en la distribución de tamaño de arena sujeto a esfuerzos de compresión (Fukumoto, 1992).	25
Figura 11: Definición de potencial de rotura, B_p (a) y rotura total, B_t (b), (Hardin, 1985).	26
Figura 12: Definición de Hardin de número de forma (Powers, 1953).	27
Figura 13: Comportamiento tensión-deformación a grandes presiones (Lee y Seed, 1967).	28
Figura 14: Metodología para la determinación del parámetro B_g (Hoz, 2007).	29
Figura 15: Resumen de metodologías para medir rotura de partículas (Lade et al. 1986). ...	30
Figura 16: Influencia del confinamiento en el índice de ruptura para agregados de lutita (Indraratna, 2002).	31
Figura 17: Perfil de velocidad observados en silos (Pierce, 2009).	32
Figura 18: Deformación volumétrica para diferentes forma de partícula (Lee & Farhoomand, 1967).	33
Figura 19: Efecto de la escala en UCS de una roca intacta (Hoek and Brown, 1980).	34
Figura 20: Efecto de la escala UCS en roca intacta (Yoshinaka, 2007).	34
Figura 21: Efecto de la distribución granulométrica en la ruptura de partículas (Lee and Farhoomand, 1967).	35
Figura 22: Esfuerzos en la zona de movimiento (IMZ) (Pierce, 2009).	36

Figura 23: Curva esfuerzo-deformación para arenas densas y sueltas(a). Curva esfuerzo normal versus esfuerzo de corte (b), (Craig, 2006).	37
Figura 24: Deformación volumétrica versus deformación por corte (c). Razón de vacíos versus deformación por corte (d), (Craig, 2006).	37
Figura 25: Planos de deslizamiento inclinados en diferentes ángulos con respecto a la horizontal, (Bolton, 1986).	38
Figura 26: Variación de la tasa de dilatancia en la falla en función de la presión de confinamiento (Bishop, 1966).	39
Figura 27: Dimensiones específicas del cilindro de acero.	43
Figura 28: Prensa hidráulica y cilindro de acero (izq.) y pistón de acero (der.).....	44
Figura 29: Dimensiones específicas del sistema de extracción.....	44
Figura 30: Sistema de extracción del cilindro de acero.....	45
Figura 31: Tecla para colocar el cilindro de acero en la prensa hidráulica.	45
Figura 32: Material $d_{50} = 11$ mm (izq.) y $d_{50}=6$ mm (der.).	46
Figura 33: Matriz de la forma de partícula en esfericidad y redondez, (Hoz, 2007).....	48
Figura 34 : Ejemplo de aplicación de círculos inscritos y circunscritos para determinar la esfericidad y la redondez, (Cho et al., 2006).	48
Figura 35: Diagrama del ensayo de corte directo (Craig, 2005).	49
Figura 36: Equipo de corte directo para determinar propiedades de corte del material granular.....	49
Figura 37: Equipo de carga puntual para determinar propiedades de resistencia a la compresión del material granular.	51
Figura 38: Transductor de presión y strainmeter para medir carga vertical que aplica la prensa hidráulica.....	52
Figura 39 : Efecto del radio hidráulico en los esfuerzos verticales.	52
Figura 40: Dial de deformación para medir el desplazamiento del pistón.	54
Figura 41: Coordenadas polares en un cilindro hueco.	54
Figura 42: Aplicación de <i>strain gauge</i> en el cilindro de acero.....	57
Figura 43: Marcadores pintados y rotulados numéricamente para medir las zonas de extracción (IEZ).....	58
Figura 44: Marcadores pintados para observar las zonas de movimiento (IMZ).....	58
Figura 45: Carga axial aplicada en el ensayo.	61
Figura 46: Distribución granulométrica del material $d_{50} = 6$ mm y 11 mm.	64
Figura 47: Factor de forma según Cho et al. (2006) de grava chancada de 20 mm.	65
Figura 48: Factor de forma para el material utilizado en los experimentos (Hoz, 2007).	66

Figura 49: Resistencia al corte peak y residual del material.	67
Figura 50: Desplazamiento horizontal y vertical del material.....	67
Figura 51: Ensayo de carga puntual antes y después del test donde las muestras fallan por matriz.	68
Figura 52: Vista en planta de la disposición de marcadores para IEZ.	69
Figura 53: Perfil de la disposición de marcadores para IEZ.....	70
Figura 54: Geometría IMZ para un esfuerzo vertical = 0 MPa (izq.) y un esfuerzo vertical = 5.8 MPa (der.) para $d_{50} = 6$ mm.	74
Figura 55: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 0 MPa para $d_{50} = 6$ mm.	75
Figura 56: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 2 MPa para $d_{50} = 6$ mm.	76
Figura 57: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 3 MPa para $d_{50} = 6$ mm.	76
Figura 58: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 5.8 MPa para $d_{50} = 6$ mm.	77
Figura 59: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 13.2 MPa para $d_{50} = 6$ mm.	77
Figura 60: Geometría IMZ para un esfuerzo vertical = 0 MPa (izq.) y un esfuerzo vertical = 13.2 MPa (der.) para $d_{50} = 11$ mm.	78
Figura 61: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 0 MPa para $d_{50} = 11$ mm.	80
Figura 62: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 2 MPa para $d_{50} = 11$ mm.	80
Figura 63: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 3 MPa para $d_{50} = 11$ mm.	81
Figura 64: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 5.8 MPa para $d_{50} = 11$ mm.	81
Figura 65: Efecto de la carga vertical en las curvas de granulometría para el material $d_{50} = 6$ mm.	82
Figura 66: Efecto de la carga vertical en las curvas de granulometría para el material $d_{50} = 11$ mm.	83
Figura 67: Efecto de la carga vertical en el grado de compactación para $d_{50} = 6$ mm y $d_{50} = 11$ mm.	84
Figura 68: Efecto de la carga vertical en el índice de ruptura Bg para el material $d_{50} = 6$ mm y $d_{50} = 11$ mm.	84
Figura 69: Comportamiento del confinamiento P_i [MPa] versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50} = 11$ mm.	85

Figura 70: Comportamiento del confinamiento P_i [MPa] versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50}= 6$ mm.....	86
Figura 71: Comportamiento de la razón de esfuerzos K versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50}= 11$ mm.	86
Figura 72: Comportamiento de la razón de esfuerzos K versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50}= 6$ mm.	87
Figura 73: Efecto de la carga vertical en la geometría de IEZ para $d_{50} = 6$ mm paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción.	88
Figura 74: Efecto de la carga vertical en la geometría de IEZ para $d_{50} = 11$ mm paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción.	89
Figura 75: Efecto de la carga vertical en la fluidez del material.	90
Figura 76: Mecanismos para un tiraje aislado para un material sin cohesión, Castro (2006).	94
Figura 77: Efecto del esfuerzo vertical en la altura de la zona de extracción en función de la masa extraída para $d_{50} = 6$ mm.	96
Figura 78: Efecto del esfuerzo vertical en la altura de la zona de extracción en función de la masa extraída para $d_{50} = 11$ mm.	96
Figura 79: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 1.000 m.....	98
Figura 80: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 500 m.....	98
Figura 81: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 300 m.....	99
Figura 82: Aplicación de la fluidez del material en función del esfuerzo vertical y la razón entre el ancho del punto de extracción y el tamaño característico d_{50}	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de modelos físicos y sus principales resultados. (Orellana, 2011)	13
Tabla 2: Relación entre el ancho del punto de extracción (D) y el tamaño mayor de partícula (d) y su frecuencia de colgadura relativa. Engineers International, Inc. (1983). (Hustrulid and Sun, 2004)	17
Tabla 3: Resumen de las características principales del cilindro de acero y la prensa hidráulica.	46
Tabla 4 : Rango de las cargas verticales a aplicar de acuerdo Janssen	53
Tabla 5: Propiedades elásticas del acero. (Chaudhry, 1987).....	55
Tabla 6 : Resultados de factor de forma para el material a utilizar en la investigación.	65
Tabla 7: Resultados ensayo carga puntual grava chancada.....	68
Tabla 8: Resumen de las propiedades del material ($d_{50} = 11\text{mm}$) utilizado durante los ensayos.	69
Tabla 9: Resumen de los experimentos realizados en la investigación.....	73
Tabla 11: Resumen tamaños característicos por zonificación y sector de estudio mina El Teniente (Montecino, 2011)	100
Tabla 12: Razón entre el diámetro del punto de extracción y el tamaño característico d_{50}	100
Tabla 13: Ejemplo de aplicación de la fluidez del material en minería en caving.....	101

GLOSARIO

<i>IEZ</i>	Isolated Extraction Zone (Zona de extracción aislada)
<i>IMZ</i>	Isolated Movement Zone (Zona de movimiento aislada)
σ_{zz}	Esfuerzo vertical.
σ_{rr}	Esfuerzo radial.
γ	Peso unitario
R_h	Radio hidráulico
\emptyset	Ángulo de fricción
z	Profundidad
μ	Coefficiente de fricción
K	Razón de esfuerzo horizontal y vertical
K_0	Razón de esfuerzos caso en reposo
K_A	Razón de esfuerzos caso activo
K_P	Razón de esfuerzos caso pasivo
σ_θ	Esfuerzo tangencial
p_i	Esfuerzo radial ejercido en las paredes del cilindro
r_0	Radio interno del cilindro hueco
p_0	Presión externa ejercida a las paredes del cilindro hueco
E	Módulo de Young
ν	Módulo de Poisson
ψ	Ángulo de dilatación

H_{IEZ}	Altura de la zona de extracción aislada
B_g	Índice de ruptura de Marsal
W_k	Diferencia en porcentaje de peso para fracción de tamaño antes y después del procedimiento de carga.
W_i	Porcentaje en peso para la fracción de tamaño antes del procedimiento de carga.
W_f	Porcentaje en peso para la fracción de tamaño después del procedimiento de carga.
D_w	Diámetro del punto de extracción o abertura.
d_{50}	Tamaño característico de la partícula que representa el 50% bajo el tamaño de la frecuencia relativa acumulada.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, “Guatón”, “Mamá”, “Pepe” y “Lore” por su infinito apoyo y amor durante toda mi vida.

A mi amor, “Pali” por ser la gran compañera de mi vida, gracias por el cariño que me entregas día a día.

A todos mis amigos del colegio y universidad por su gran cariño y amistad.

A mi profesor guía y los profesores miembros de la comisión por haber leído esta tesis.

A mi familia, lo demás no tiene importancia.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Se entenderá por *block/panel caving* a un método de extracción masivo de mineral basado en la acción de la gravedad, donde el bloque mineralizado se hunde de forma natural una vez generada en su base un área que permita que el material colapse. Realizado el corte en la parte inferior, producto de la redistribución de esfuerzos alrededor del corte inicial, la columna colapsará gradualmente. La diferencia de densidad del material, el peso y los esfuerzos inducidos sobre el techo del bloque socavado, provocan que el hundimiento se propague hacia niveles superiores a medida que se realiza la extracción del mineral, a través de zanjas y puntos de extracción especialmente acondicionados para esto. El hundimiento, a medida que se realiza la extracción, continuará propagándose hasta llegar a la superficie (Castro, 2006).

El éxito del método dependerá de la recuperación del mineral, estabilidad del nivel y la productividad en relación al diseño del nivel productivo; parámetros que dependerán directa o indirectamente de las características del material quebrado que está fluyendo hacia los puntos de extracción y de las condiciones de esfuerzo presentes.

La aplicación de métodos de caving en minas de gran profundidad se ha vuelto cada vez más frecuente (Brown, 2007), lo que se traduce en un incremento en las alturas de columna de mineral a explotar (Flores et al., 2004), por esto, el material que fluirá hacia los puntos de extracción estará bajo un alto régimen de esfuerzos. Al tener un impacto el flujo gravitacional sobre la recuperación de las reservas del yacimiento, resulta trascendental caracterizar los parámetros que permitan comprender el proceso por el que un material fragmentado o hundido se mueve desde su posición inicial, debido a la gravedad, hacia los puntos de extracción y cómo el flujo gravitacional puede impactar en el diseño del nivel de producción cuando se presenta en tales condiciones.

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo está basado en las siguientes hipótesis:

1. El flujo de roca en minería de caving ocurre bajo altos niveles de carga vertical (del orden de los MPa), lo que causa que a escala mina, la roca hundida se fragmente a medida que fluye. Esta reducción de tamaño ocurre luego de una compactación de los fragmentos, por lo que existe una disminución de la porosidad entre las sucesivas extracciones. Debido a lo anterior, la ruptura y la compactación influyen en los mecanismos de flujo
2. Los mecanismos del flujo gravitacional de roca hundida en una mina de caving una vez que éste ya se ha propagado (bajo un nivel de esfuerzos relativamente alto), pueden estudiarse considerando un modelo físico a una escala reducida. Por lo tanto, para una combinación de esfuerzos y materiales, es posible investigar la ruptura y la compactación que ocurre durante el flujo de roca hundida a escala mina.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

El principal objetivo de esta tesis es mejorar el entendimiento sobre los mecanismos físicos en un flujo gravitacional confinado aplicado a minería de caving a través de un set experimental.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un equipo con el fin de entender los mecanismos que ocurren durante el flujo confinado de roca hundida.
- Mejorar el entendimiento sobre la relación entre esfuerzo y propiedades del material en la fragmentación del material durante el flujo gravitacional confinado.
- Estudiar el efecto de la sobrecarga aplicada en la capacidad de fluir del material.
- Desarrollar una aplicación a minería de *caving* que relacione el régimen de esfuerzos a escala mina, con los esfuerzos aplicados en los experimentos.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El proceso de fragmentación continúa siendo uno de los procesos menos entendidos dentro de los fundamentos del *caving*. La habilidad de poder predecir la generación de finos y su migración se ha vuelto cada vez más importante dado que las alturas de columna son cada vez mayores y la extracción ocurre bajo regímenes de alto esfuerzo. (Chitombo, 2010)

Con respecto a la naturaleza y al grado de fragmentación secundaria, es esperable que varíen de acuerdo a los esfuerzos sometidos dentro de la columna de extracción, la composición y propiedades mecánicas de la roca a hundir, la tasa de extracción, altura a la que el material está siendo extraído y el tiempo de residencia del material dentro del *caving* (Brown, 2007).

Hasta la fecha, el entendimiento que se tiene del flujo gravitacional aplicado a minería de *caving* se ha realizado a través del modelamiento físico, pruebas a escala mina y modelamiento numérico. Los modelos físicos realizados se han hecho a pequeña escala y se han realizado pruebas a escala mina, siendo estos últimos experimentos escasamente interpretables dados el pequeño número de marcadores recuperados y las dificultades propias de llevarse a cabo experimentos de esa naturaleza. Con respecto a los modelos físicos de pequeña escala, éstos se han realizado bajo condiciones de esfuerzos verticales relativamente bajos (~50 KPa) por lo que la ruptura y la compactación del material ha sido leve, por lo que estas variables no han tenido un impacto directo en el flujo.

Se ha observado que a altas presiones de confinamiento (~6 MPa) los materiales granulares presentan modificaciones en su comportamiento que se asocia principalmente al cambio de dilatancia, a mayor confinamiento se vuelven netamente contractivas, asociado a un fenómeno de rotura de partículas indicado por diversos autores, entre los que destacan Bishop (1966), Lade y Yamamuro (1996) y Vesic y Clough (1968).

Los métodos de hundimiento son usados actualmente para un amplio rango de macizos rocosos competentes y de diferentes geometrías. Por ejemplo, las alturas de columna (incluyendo el overburden) varían entre 200 y 1000 metros. Esto implica que el flujo de roca hundida ocurre bajo altos niveles carga vertical. Se sabe que los modelos físicos y numéricos pasados han sido útiles para entender el flujo gravitacional para niveles de esfuerzos relativamente bajos, un entendimiento de las características del flujo gravitacional para la minería de *caving* actual y futura, requiere estudiar los mecanismos que ocurren bajo altos niveles de esfuerzo vertical del orden de los MPa.

1.5 ALCANCES

Los sistemas físicos son construidos para cumplir con dos tipos de funciones:

1. Modelar una situación escalada específica de alguna mina.
2. Modelar situaciones genéricas para investigar las reglas físicas que gobiernan fenómenos específicos.

Esta tesis de investigación se centra en el segundo punto, por lo que el objetivo no es realizar un análisis de similitud propiamente tal, sino entender el efecto que tiene la sobrecarga o carga vertical sobre el flujo gravitacional considerando sus diversas aristas: zonas de flujo, fragmentación y compactación y la capacidad de fluir del material.

El diseño del equipo de laboratorio contempla una configuración 3D axisimétrica, siendo la extracción del material confinado mediante un tiraje aislado, es decir, existe un único punto de extracción mediante el cual el material va a ser extraído. A su vez el equipo también fue diseñado con el objetivo de estudiar las dos zonas de flujo presentes en un flujo gravitacional: zona de extracción aislada (*IEZ*) y zona de movimiento aislada (*IMZ*).

La prensa hidráulica utilizada en los ensayos es manejada manualmente y no es servoasistida, por lo que la precisión de presiones aplicadas en cada experimento va a estar sujeto al operador del equipo y no a un equipo computacional.

El efecto de los siguientes parámetros se estudiará en esta tesis de investigación:

- Tamaño de las partículas.
- Magnitud de la carga aplicada por la prensa.

Por el momento no está dentro de los objetivos estudiar el efecto que tiene el tiempo de los ensayos (tiempo de residencia del material) en la fragmentación y compactación del material.

1.6 METODOLOGÍA

El autor sugiere que el planteamiento de la Figura 1 deba ser considerado para entender completamente los mecanismos involucrados en minería de *caving*,

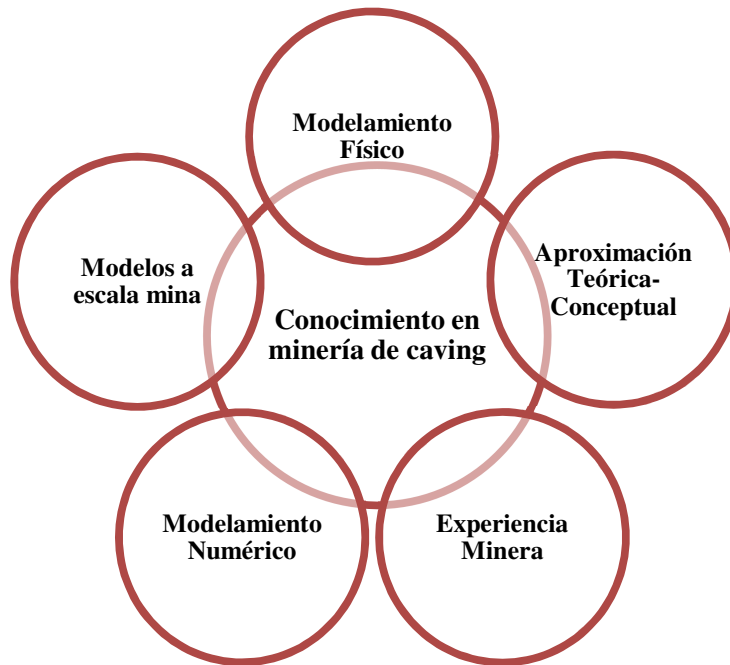


Figura 1: Aproximaciones para desarrollar el conocimiento en minería de *caving*.

Modelamiento físico: El modelamiento físico tiene la ventaja que permite estudiar diversas variables y parámetros en un amplio rango en el modelo. Su principal desventaja es que generalmente se realiza el modelamiento a una escala más pequeña que en la mina, por lo que los resultados del modelo deben ser extrapolados para ser aplicados.

Modelamiento a escala mina: El modelamiento a escala mina tiene la ventaja que los resultados obtenidos del modelo estudiado son directamente aplicados al problema existente en la mina. Su principal desventaja es que no existe un amplio rango de variables ni parámetros del modelo que se puedan estudiar.

Modelamiento Numérico: El modelamiento numérico tiene la ventaja que permite estudiar diversas variables y parámetros en un amplio rango, en un tiempo considerable, comparándolo con el modelamiento físico. Su principal desventaja es que los resultados del modelo deben ser calibrados y validados con otros modelos, ya sean modelos físicos o modelos a escala mina.

Aproximación Teórica-Conceptual: La aproximación teórica-conceptual tiene la ventaja que permite abordar el problema desde un punto de vista teórico, por lo que simplifica y

hace el problema más abordable. Su principal desventaja es que puede no considerar variables y parámetros que podrían ser relevantes para el problema.

Experiencia Minera: La experiencia minera se considera importante, porque la mayor parte del conocimiento actual en *caving* se ha obtenido desde el empirismo u observación *in situ* de las variables y parámetros de los problemas o desafíos en la minería.

La metodología planteada en esta tesis de investigación está enfocada en el modelamiento físico y está dirigida a cumplir con los objetivos generales y específicos de la investigación. Se proponen los siguientes pasos para alcanzar dichos objetivos trazados:

1. *Diseño y construcción del equipo de laboratorio:* Dado que no existe un equipo experimental estándar para estudiar el flujo gravitacional confinado, el set experimental a utilizar en esta investigación debe ser diseñado y construido.
2. *Caracterización y determinación de las propiedades del material:* Es relevante caracterizar las propiedades del material que tienen un rol importante en el comportamiento del flujo gravitacional confinado. Se determinan la distribución de tamaño y factor de forma del material, así como también las propiedades de resistencia al corte y resistencia a la compresión del material a ensayar.
3. *Determinación del rango de cargas verticales:* Para determinar el rango de cargas verticales a aplicar en los distintos experimentos, se estudia una aproximación teórica que estima los esfuerzos verticales en materiales granulares.
4. *Análisis de resultados experimentales:* Una vez obtenidos los resultados experimentales, éstos se analizan y se obtienen deducciones acerca del efecto que tienen las variables estudiadas en cada experimento realizado.
5. *Mecanismos y aplicación a minería de caving:* Mediante el análisis de los resultados experimentales se pretende mejorar el entendimiento de los mecanismos asociados al flujo gravitacional confinado. A su vez, se plantea que los resultados experimentales determinen una aplicación para la minería de *caving* que se encuentre bajo tales condiciones.

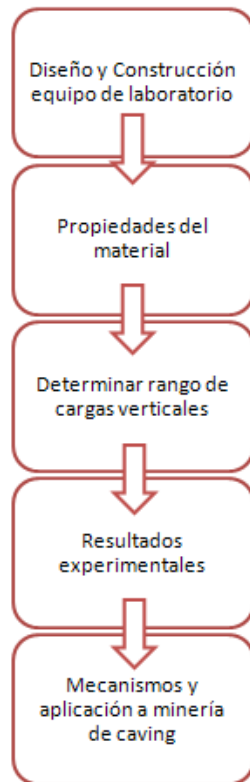


Figura 2: Esquema de la metodología de la investigación.

1.7 CONTENIDO DE LA TESIS

Capítulo 1: Introducción del tema de investigación desarrollado en la tesis. Se presentan los objetivos, hipótesis, alcances y la justificación de la investigación.

Capítulo 2: Se define el estado del arte de los temas a tratar, principalmente: el modelamiento físico del flujo gravitacional y la fragmentación de roca aplicado a minería por hundimiento.

Capítulo 3: Se define la metodología de la investigación, se explica en detalle el set experimental usado, incluyendo una descripción de los equipos para determinar las propiedades del material a ensayar y el equipo de laboratorio utilizado en la investigación. Además se definen los conceptos y se describen las fórmulas que serán aplicadas en el Capítulo 4.

Capítulo 4: Se presentan los resultados de la caracterización y determinación de las propiedades del material utilizado basado en los conceptos y ecuaciones descritas en el Capítulo 3. Se presentan los resultados y análisis de los experimentos realizados del estudio del flujo gravitacional confinado bajo un tiraje aislado. Las geometrías de las zonas de extracción para diferentes tamaños de fragmentos y diferentes rangos de carga vertical son presentadas. También son presentados los índices de ruptura y grados de confinamiento de los fragmentos bajo diferentes rangos de carga vertical.

Capítulo 5: Se muestran los mecanismos presentes en el flujo gravitacional confinado y se detalla cómo los resultados de los experimentos determinan una aplicación a minería de *caving*.

Capítulo 6: Conclusiones finales de la investigación y recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO 2

FLUJO GRAVITACIONAL Y FRAGMENTACIÓN EN MINERÍA DE CAVING

2.1 INTRODUCCIÓN

Se entenderá por flujo gravitacional de roca como un método de hundimiento al proceso, a través del que el material se mueve desde su posición inicial hasta los puntos de extracción, a medida que va siendo extraído debido a la gravedad (Castro, 2006).

El éxito y la rentabilidad de una operación mediante *block caving* dependen significativamente de la fragmentación ocurrida durante el proceso de *caving*. Los parámetros de operación y diseño que se ven influenciados por la fragmentación son (Laubscher, 1994):

- Espaciamiento y tamaños de los puntos de extracción.
- Selección del equipo.
- Procedimientos de control de tiraje.
- Tasas de producción.
- Punto de entrada de dilución en la columna de extracción.
- Colgaduras y la necesidad de reducción secundaria con sus costos asociados y daños.
- Costos de los procesos de conminución posteriores.

El siguiente capítulo se divide en dos principales secciones. La primera consiste en una revisión a los diferentes estudios sobre flujo granular a una escala reducida, estimaciones empíricas y estudios a escala mina. Los estudios se basan en observaciones realizadas en modelos físicos que intentan simular el proceso de *caving* y experiencia en las minas. La segunda parte consiste en una revisión de los tipos de fragmentación que existen dentro del proceso de *caving* y de los diferentes estudios sobre fragmentación en materiales granulares y arenas a través de diversos experimentos, considerando diferentes variables: forma de los fragmentos, distribución de tamaño de los fragmentos, porosidad, resistencia del material, esfuerzos y deformaciones aplicadas, cuyos resultados se establecen en los índices de fragmentación postulados.

2.2 FLUJO GRAVITACIONAL

2.2.1 Modelamiento físico en flujo gravitacional

Se define como material granular a un conglomerado de partículas individuales sólidas (Nedderman, 1992). Dentro de las propiedades de los materiales granulares se consideran:

- Si no existe cohesión entre los granos, todas las fuerzas que aparecen son repulsivas, de modo que cualquier forma que adopte el material está determinado por las condiciones de borde impuestas y la gravedad (Jaeger et al.,1996).
- La movilidad de los fragmentos está determinado por el ángulo de fricción a lo largo de los puntos de contacto entre las partículas (Yenge,1981).
- La distribución de fuerzas que actúan sobre la superficie de contacto cambia con la geometría del empaquetamiento de los granos (Yenge,1981).
- A medida que fluye el material, existe una sucesiva formación de arcos (estables o inestables), donde todo el peso que se apoye sobre éstos es repartido en sus apoyos laterales, dejando el área bajo el arco libre de esfuerzos. Estas estructuras de fuerzas tienen la característica de ser muy inestables y cualquier perturbación puede producir una redistribución total de fuerzas (Jaeger et al.,1996).

El estudio sobre flujo granular se ha desarrollado de gran manera basado en observaciones y mediciones hechas en modelos físicos reducidos en escala, utilizando materiales granulares para intentar simular el proceso de *caving* (Kvapil, 1965; McCormick, 1968; Peters, 1984; McNearny and Abel, 1993; Power, 2004, Castro, 2006).

Kvapil (1965) postuló que existen dos volúmenes que describen un flujo granular. El primero denominado zona de extracción (EZ) se define como el volumen que determina la posición original del material que ha sido extraído desde un punto de extracción, para una masa dada. El segundo denominado zona de movimiento (MZ), es el volumen que define el límite entre el material estacionario y el material que se ha movido desde su posición original. Cuando ambas zonas son extraídas a través de un solo punto de extracción, se denomina a los volúmenes zona de extracción aislada (IEZ) y zona de movimiento aislada (IMZ). El límite de ambas zonas se representa utilizando en casos 2D elipses y en casos 3D elipsoides. Kvapil (1965) encontró que ambas zonas pueden ser bien representadas por un elipsoide caracterizado por su excentricidad. Se encontró que el volumen del elipsoide de movimiento era aproximadamente quince veces mayor que el elipsoide de extracción. Kvapil señaló que la excentricidad del elipsoide está influenciada por un número de variables, incluyendo el tamaño de partícula y la cantidad de material extraída por un punto de extracción aislado.

En la Figura 3 se muestra la zona de movimiento (MZ) y la zona de extracción (EZ) para un punto de extracción aislado.

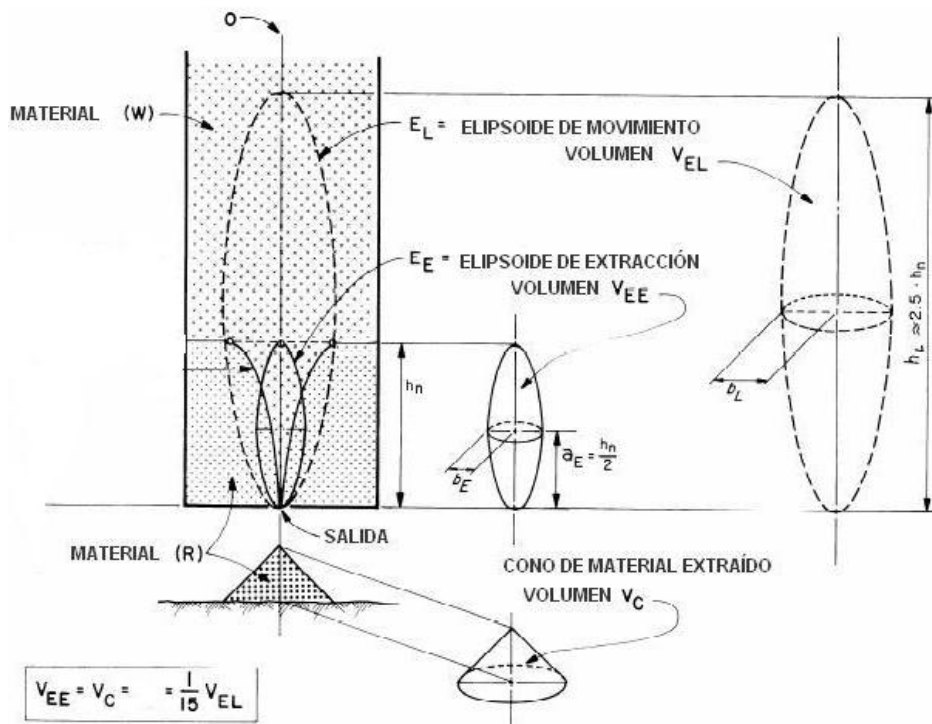


Figura 3: Esquema de la Zona de Movimiento (MZ) y Zona de Extracción (EZ) para un punto aislado (Kvapil, 2004).

La investigación hecha en modelamiento físico se puede dividir en dos principales categorías: modelos físicos de gran escala y modelos físicos de pequeña escala.

El modelamiento físico a pequeña escala se ha utilizado para entender los principios que gobiernan el flujo granular (McCormick, 1968; Castro 2001). Este alcance utiliza una instalación pequeña de no más de un metro de alto, donde el flujo extraído puede ser observado a través de plexiglás. El tamaño de partícula que puede ser estudiado es relativamente pequeño utilizándose generalmente arena de río. El material se vierte dentro del modelo, con marcadores horizontales localizados cerca de la pared de plexiglás. Después de que el modelo está cargado, el material es descargado a través de una abertura en el fondo que simula un punto de extracción (Castro, 2001). Este procedimiento generalmente no considera un confinamiento extra además del que ejerce el propio material sobre las paredes del modelo y que es del orden de pocos KPa, así, dado el poco confinamiento, el material no presenta rotura ni se compacta.

Generalmente, el material utilizado para los experimentos es arena o gravilla redondeada, lo que presenta ciertas desventajas al momento de simular el flujo para roca hundida, ya que al ser la partícula redondeada y ser una roca sedimentaria, sus propiedades no se asemejan la roca hundida en *block caving*, porque éstas son angulosas, además de ser generalmente rocas ígneas.

Los modelos físicos a gran escala, ya sea en 2D o 3D, son más apropiados para simular el flujo de roca hundida (Peters, 1984; Power, 2004; Castro, 2006). Esto se debe a que estos modelos permiten estudiar materiales más gruesos como por ejemplo grava, cuyas partículas tienen características más parecidas a las de la roca hundida en un *block caving*.

Los modelos físicos de dos dimensiones fueron realizados por Peters (1984) usando grava y por McNearny (1993) utilizando ladrillos. Peters (1984) observó las zonas de movimiento y obtuvo las zonas de extracción, considerando puntos de extracción aislados y múltiples, utilizando roca chancada para diferentes tamaños. Él observó que el ancho de la zona de extracción depende principalmente del ancho del punto de extracción más que el tamaño de la partícula o la altura del modelo. Estos resultados contradicen lo que se entendía a la fecha sobre el efecto que tenía el tamaño de la partícula y la altura del modelo en el comportamiento del flujo.

McNearney (1993) utilizó ladrillos para simular el proceso de *caving* y el flujo. El objetivo del estudio fue comparar los resultados del modelo físico con modelos de elementos discretos. Mientras que estos estudios mejoraron el entendimiento sobre el flujo granular, el uso de modelos en dos dimensiones todavía no estaba muy justificado. Es más, experimentos y estimaciones teóricas indican que modelos de dos dimensiones no son lo suficientemente apropiados, ya que crean estados tensionales que distorsionan al flujo (Power, 2004; Castro, 2006).

En los últimos años se han realizado modelos a gran escala en tres dimensiones con el objetivo de obtener un flujo para extrapolar a escala mina. Con este propósito, se construyó una instalación a gran escala para investigar el flujo de roca gruesa hundida en un modelo 3D (Power, 2004; Castro, 2006; Castro et al., 2007). Los experimentos realizados usaron roca chancada en una configuración de tres dimensiones, por lo tanto no se podía observar el comportamiento del flujo. Se desarrolló instrumentación para obtener las zonas de flujo utilizando sensores en las zonas de extracción y medidores de esfuerzos durante la extracción. La carga vertical medida fue relativamente baja (50 KPa aprox.) considerando la resistencia de las fragmentos ensayados (100-150 MPa) (Castro, 2006). Los resultados indicaron que el ancho de las zonas de flujo aumenta con la altura y no estaban influenciados en gran parte por el tamaño de la partícula para el rango de tamaños investigados (8 a 20 mm).

El principal impedimento con el uso de modelos a escala mayor, es el número de experimentos que pueden ser estudiados en un tiempo razonable. Además, con las instalaciones construidas hasta hoy, el nivel de esfuerzo al ser comparados con la resistencia del material es bajo (~50 KPa), por esto la ruptura y el proceso de compactación no pueden ser observados en los experimentos.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los principales modelos físicos y sus principales resultados.

Tabla 1: Resumen de modelos físicos y sus principales resultados (Orellana, 2011).

	Kvapil 1965-1992	McCormick 1968	Marano 1980	Peters 1984	Power 2004	Castro 2006
Dimensiones modelo	-	Altura: 1.2 m	Altura: 2.4 m Escala 1:80	Altura:4.6 m Largo: 6 m Ancho: 0.5 m	Altura: 3.5 m Largo: 2.2 m Ancho: 2.1 m Escala 1:30	Altura: 3.4 m Largo: 3.3 m Ancho: 2.4 m
Material	Arena	Arena	Arena	Grava	Grava	Grava
Tipo de modelo (2D-3D)	2D	2D	3D	2D	3D	3D
Sistema de extracción	-	-	Scraper	LHD	LHD	LHD
Algunos de los resultados de estudio	Forma de zonas de flujo, elipsoidales	Forma de elipsoide de movimiento cilíndrica	La similitud total no puede ser alcanzada a través de modelos utilizando arena	No hay efecto del tamaño de partícula sobre la geometría de flujo	El tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el alto y ancho de la zona de extracción y movimiento	Los puntos de extracción deben estar espaciados a menos del ancho del IMZ, para que exista interacción entre las zonas de flujo y el material entre puntos pueda ser extraído
	Proporciona las relaciones matemáticas relacionados con el flujo de material granular en silos	El ancho del cilindro no depende del ancho del punto de extracción	Los resultados de los estudios derivados de los experimentos con un único punto de extracción no son válidos cuando existen múltiples puntos de extracción	El ancho del tiraje depende del porcentaje de finos incluidos y las dimensiones del punto de extracción	Los modelos físicos en 2D no son válidos para el estudio de flujo gravitacional	El ancho de la zona de extracción y movimiento aislado en función de la masa extraída y su altura

2.2.2 Modelos empíricos

El modelo empírico descrito por Laubscher (1994) es, por el momento, la herramienta ingenieril de diseño más usada para determinar el espaciamiento entre los puntos de extracción y establecer estrategias de control de tiraje en *block/panel caving*. Este modelo incorpora mecanismos de interacción de múltiples puntos de extracción observados en modelos de arena en conjunto con reglas empíricas de Laubscher. Ellos proponen una guía de diseño del espaciamiento entre puntos de extracción como se muestra en la Figura 4, donde se ve que el diámetro del punto de extracción se refiere al ancho del IMZ, cuando un punto es extraído aisladamente. La figura indica que el diámetro del IMZ es controlado por el tamaño de la roca y el ancho del punto.

Los diámetros mostrados en la Figura 4 fueron obtenidos de interpolaciones lineales entre material grueso y fino (Laubscher, 1994). Los valores del ancho máximo de IMZ para fragmentos de roca finos (< 0.3 m) fueron estimados en 6 m, mientras que para fragmentos de rocas gruesos fueron estimados en 15 m de observaciones de colgaduras. Heslop (1983) señala que para un tamaño de roca dado, el ancho de la zona de flujo es determinado calculando el diámetro al que ocurren arcos mecánicos intermitentes, y concluyó que el diámetro de la zona de flujo debiese ser 3 a 4.5 veces el tamaño máximo de la partícula, para una distribución ancha y angosta respectivamente.

Heslop (1983) pudo haber usado un criterio de diseño equivalente para el diseño de *ore pass* (Hustrulid and Sun, 2004) para determinar el diámetro de arcos mecánicos intermedios.

De todos modos, no se ha demostrado completamente que el diámetro de los arcos mecánicos intermedios en piques de traspaso pueda ser usado para calcular el ancho de las zonas de movimiento, debido a las diferentes condiciones de borde presentes.

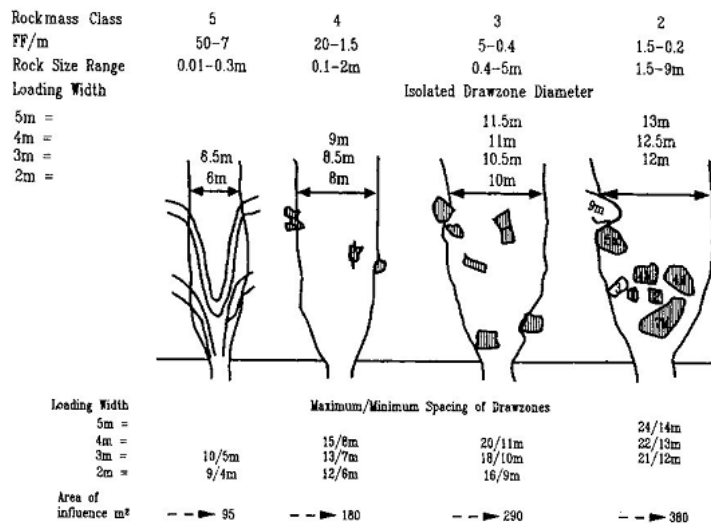


Figura 4: Espaciamiento máximo/mínimo de zonas de tiraje (Laubscher, 1994).

2.2.3 Experimentos a escala mina

En la literatura existen pocos estudios a escala mina para estudiar el flujo de material granular en minería de *sublevel caving* (Castro, 2006). El objetivo detrás de estas pruebas fue colocar marcadores identificables e individuales entre los tiros de producción. Las coordenadas iniciales de cada marcador fueron registradas, como también el tonelaje que había sido extraído, de esta forma se podía graficar la zona de flujo de extracción. El comportamiento del flujo de roca fue caótico en comparación al flujo granular, sin cohesión observado en experimentos a escala reducida. La causa se asoció al proceso de tronadura que ocurre antes de que el material fluya.

Se han hecho intentos para entender el comportamiento del flujo granular a través del modelamiento numérico (Pierce et al. 2004). Pierce et al. (2004) indicaron que la compactación durante el flujo debido al nivel de esfuerzos y finos podría ser la causa del patrón de flujo caótico observado en *sublevel caving*.

Todas estas pruebas fueron realizadas para geometrías específicas cuyos resultados no son aplicables en minas de *block/panel caving*.

De los experimentos realizados en minería de *block caving*, se destacan los realizados por Alvia (1992), Laubscher (2000) y el trabajo más reciente realizado por Brunton et al. (2012).

Alvia intentó realizar parcialmente una prueba a escala mina en una geometría de *block caving*. Él colocó marcadores (neumáticos viejos) en el nivel de extracción de un sector antiguo sobre el sector Teniente 4 Sur, de la mina El Teniente. Debido a la baja cantidad de marcadores recuperados (19 marcadores han sido recuperados en 10 años), no se ha podido definir objetivamente los mecanismos asociados al flujo a escala mina. Laubscher en la mina King recuperó una menor cantidad de marcadores y los resultados son menos concluyentes.

Brunton et al. (2012) diseñaron e implementaron experimentos a escala mina en Ridgeway Deeps entre los años 2008 a 2010, colocando marcadores metálicos y electrónicos mediante la metodología de Smart Marker System (Whiteman, 2010). El objetivo de los experimentos fue cuantificar y evaluar la geometría de la zona de extracción, desarrollo de la zona de extracción con el tiempo, variabilidad del comportamiento del flujo y analizar los factores que afectan el comportamiento del flujo en el campo cercano y lejano de la columna hundida de material. La recuperación de los marcadores del campo cercano hasta la fecha indican un comportamiento del flujo caótico y alterado, apuntando a un comportamiento de flujo alejado de la teoría convencional basado en modelos numéricos y modelos físicos a escala, utilizando distribuciones homogéneas de partículas idealizadas o fragmentos chancados.

La ventaja principal de los ensayos a escala mina sobre los modelos físicos a escala reducida, es que la escalabilidad de los resultados es directa. Las desventajas de los experimentos a escala mina están vinculadas a obtener las mediciones *in situ*, la variación

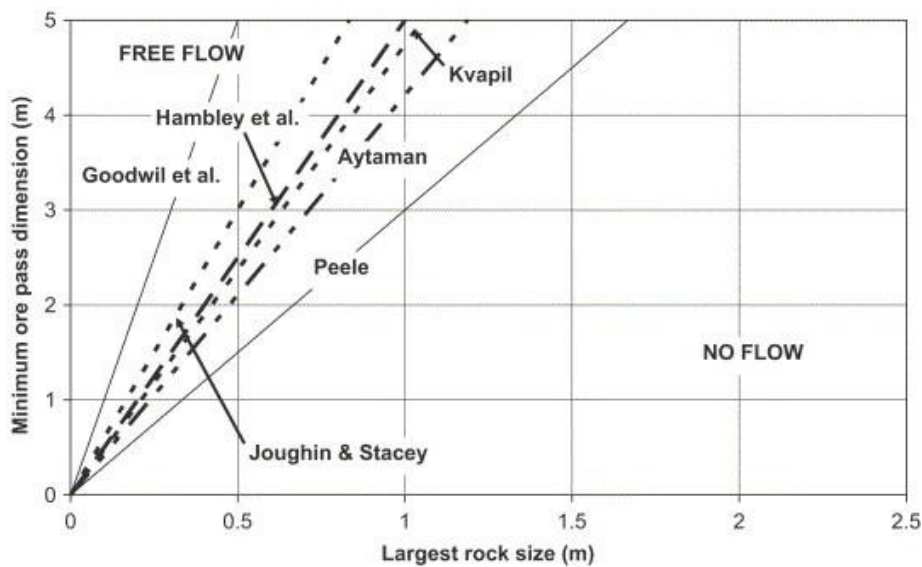
de parámetros en orden de cuantificar el efecto de ellos (como por ejemplo: fragmentación, ángulo de fricción, espaciamiento de los puntos de extracción y alturas de columna) y los costos asociados a realizar pruebas a esa escala.

2.2.4 Fluidez del material

Pocos han sido los autores (Kvapil, 2004; Hustrulid and Sun, 2004; Hadjigeorgiou, 2006, entre otros) que han hecho observaciones acerca de la capacidad de fluir del material en el flujo gravitacional aplicado a minería de *caving*.

La ocurrencia de irregularidades en el flujo, como la creación de arcos o colgaduras sobre la cavidad, es producida por el movimiento de material grueso en el flujo gravitacional (Kvapil, 2004)

La Figura 5 muestra una guía de diseño de piques de traspaso obtenido por Hadjigeorgiou (2006). A partir de la relación entre el diámetro de abertura (D) y el tamaño máximo de partículas (d) se establecen zonas en las cuales el material fluye libremente, una zona de posibles colgaduras y una zona donde no existe flujo.



Reference:	Freeflow
Peele	$(D/d) > 3$
Aytaman	$(D/d) > 4.21$
Kvapil	$(D/d) > 4.74$
Hambley et al.	$(D/d) > 5$
Goodwill et al.	$(D/d) > 10$
Joughin & Stacey	$(D/d) > 6$

Figura 5: Guía de diseño para piques de traspaso considerando el diámetro del pique (D) y el tamaño mayor de la partícula de roca (Hadjigeorgiou, 2006).

De la Tabla 2 se observa que para determinar el ancho del punto de extracción o el diámetro de un pique de traspaso, como *regla de dedo*, se considera solamente el tamaño de la partícula que fluiría, sin considerar ni la forma de la partícula, distribución de tamaños, humedad ni esfuerzos internos entre las partículas.

Tabla 2: Relación entre el ancho del punto de extracción (D) y el tamaño mayor de partícula (d) y su frecuencia de colgadura relativa. Engineers International, Inc. (1983). (Hustrulid and Sun, 2004)

Razón de dimensión	Frecuencia de colgadura relativa
$D/d > 5$	Muy baja, casi flujo seguro
$3 < D/d < 5$	Probable, flujo incierto
$D/d < 3$	Muy alta, casi seguro que no hay flujo

Se debe destacar que la movilidad del material no depende solo del tamaño de las partículas y la cantidad de material extraído, sino también de otros factores entre los que destacan:

- Forma de los fragmentos.
- Rugosidad de la superficie de las partículas.
- Fricción entre las partículas.
- Bloque interno de las partículas.
- Presencia de finos.
- Contenido de humedad.
- Compresibilidad.
- Compactación.
- Resistencia de los fragmentos.
- Magnitud, distribución y dirección de fuerzas y cargas externas.
- Tasa de extracción.

Formación de Arcos (Kvapil, 2004)

Es importante entender que la formación de arcos es el resultado del material tratando de restablecer el equilibrio de las partículas dentro de la cavidad.

Hay dos tipos de arcos: los que se forman en un continuo y los que se forman en material grueso.

Los arcos formados en continuo ocurren como resultado de un aumento en la compresión en los pilares y una reducción de la compresión (relajación) debajo del arco.

Eventualmente, los esfuerzos de corte entre la parte inferior del arco y el arco comprimido resultan en la separación del material subyacente.

En la Figura 6 se muestra el instante en que la zona subyacente se separa del arco. En esta figura (A) son los pilares, (1) es el arco, y (2) es la grieta de separación debajo de la zona del arco y (3) es la zona separada debajo del arco.

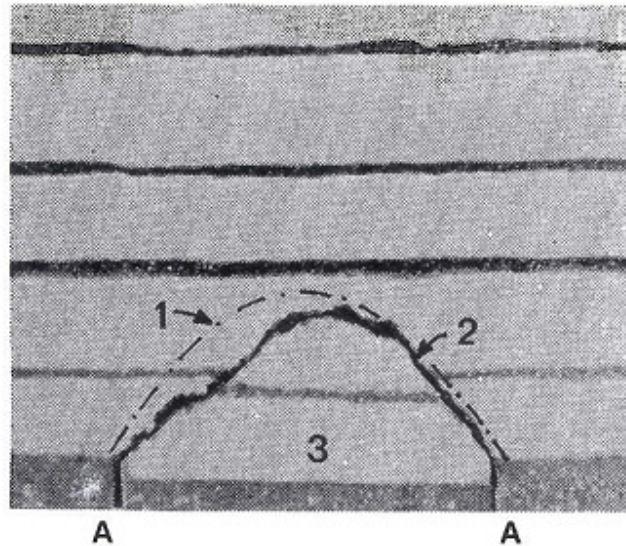


Figura 6: Arco mecánico en el flujo gravitacional (Kvapil, 2004).

Las dimensiones del arco dependen de las propiedades del material. La principal propiedad está caracterizada por el ángulo de fricción del material, que es directamente proporcional a la resistencia del material. Para la altura (h) del arco se consideran dos situaciones extremas:

- Si el ángulo de fricción converge a 90° , entonces la altura del arco h converge a cero (materiales extremadamente resistentes)
- Si el ángulo de fricción converge a 0° , entonces la altura del arco h converge a infinito (materiales extremadamente débiles)

Uno de los factores importantes relacionados con la forma del arco, es la profundidad y por ende, la carga vertical aplicada. Esta carga (esfuerzo vertical) es calculada usando el peso del material multiplicado por la altura. Al aumentar la profundidad debajo de la superficie, el ángulo de fricción va disminuyendo.

La formación de arcos en materiales gruesos, como en el caso de mineral y estéril, puede resultar en problemas operacionales para las operaciones mineras. Los arcos pueden desarrollarse en cualquier lugar sobre la zona de extracción. Información de silos y operaciones mineras indican que los arcos en materiales gruesos tienen una forma convexa.

La parte inferior del punto de extracción tiene las paredes inclinadas a un ángulo α . Generalmente la altura del arco h será menor si las paredes del punto de extracción son más empinadas. Además, el ángulo α puede afectar los esfuerzos en los pilares (abutments). Si las paredes son empinadas, los esfuerzos en los pilares (abutments) desarrollados por un arco bajo pueden ser muy altos. (Figura 7)

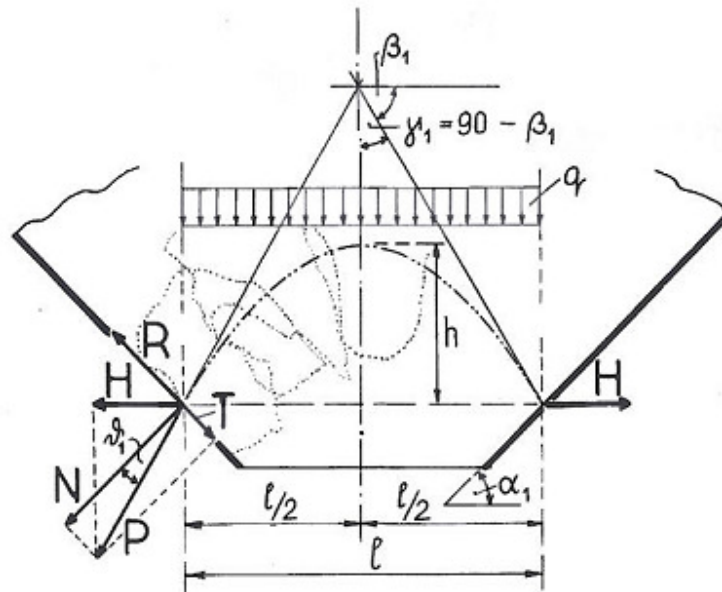


Figura 7: Diagrama de fuerzas en un arco mecánico alto de material grueso (Kvapil, 2004).

Los bloques de material grueso pueden montarse en una configuración aleatoria, por lo que la altura del arco h variará con la misma inclinación, α , de las paredes de salida. Las características del arco pueden expresarse en términos de β . La altura del arco variará dentro de ciertos límites, que corresponden a $\beta_{max} > \beta > \beta_{min}$ sin perturbar el equilibrio.

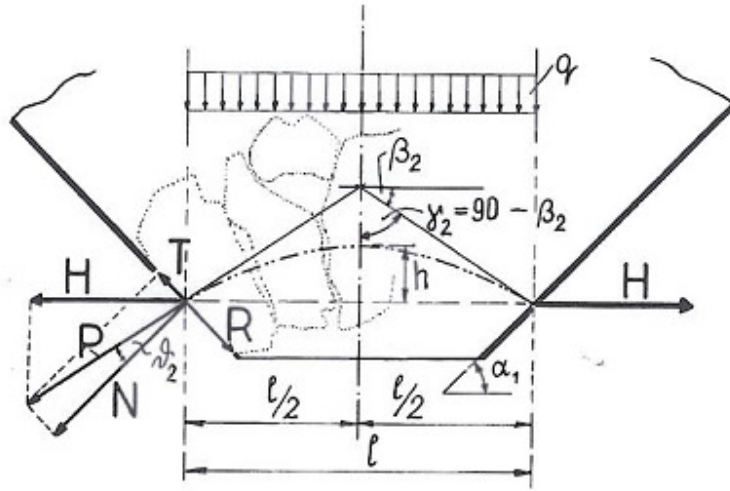


Figura 8 : Diagrama de fuerzas en un arco mecánico bajo de material grueso (Kvapil, 2004).

Se puede resumir en la formación de arcos mecánicos para materiales gruesos:

1. La altura del arco para materiales gruesos depende de la inclinación de las paredes del punto de extracción. La altura del arco es menor si las paredes son más empinadas.
2. Una disminución de la altura del arco en materiales gruesos aumenta los esfuerzos en la estructura de las paredes del punto de extracción.
3. El arco se forma más fácilmente si la fluidez de la mezcla del material grueso es pequeña.
4. Arcos de baja altura se forman más fácilmente si las partículas son más irregulares y resistentes. Materiales que presentan humedad ayudan a la formación de arcos.
5. Arcos de material grueso se forman más fácilmente si los bloques individuales de roca son más grandes.
6. Una apertura de salida menor en tamaño facilita la formación de arcos versus a una salida mayor.

2.2.5 Esfuerzos en materiales granulares

Los esfuerzos verticales en materiales granulares, no son iguales al esfuerzo litoestático (proporcional a la profundidad), si no, más bien, provocan una carga asintótica con un valor máximo acotado, como lo refleja la solución de Janssen (2004) para modelación de esfuerzos en silos.

El estudio de los esfuerzos en medios granulares comenzó con Janssen, quien considera las fuerzas actuando sobre un corte infinitesimal para calcular el esfuerzo promedio actuando sobre el material granular. El análisis se basó en un contenedor cilíndrico (silo) lleno de un material no cohesivo para encontrar los esfuerzos normales y tangenciales en coordenadas cilíndricas como muestra la Figura 9.

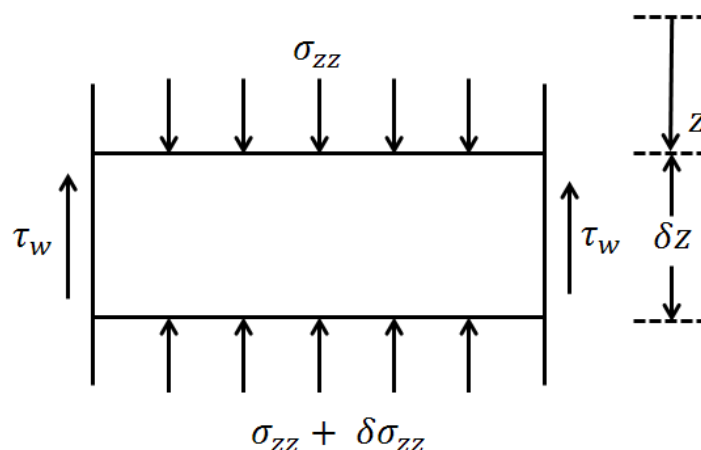


Figura 9: Esfuerzos en elemento cilíndrico (Nedderman, 1992).

Mediante un equilibrio de fuerzas se obtienen las siguientes expresiones para esfuerzos verticales y horizontales (Nedderman, 1992):

$$\sigma_{zz}(z) = \frac{\gamma R_h}{\mu k} \left[1 - \exp\left(\frac{-z k}{R_h}\right) \right] + Q_0 \exp\left(\frac{-z k}{R_h}\right)$$

Ecuación 1: Esfuerzo vertical medio determinado por Janssen. (Nedderman, 1992)

$$\sigma_{rr} = k \cdot \sigma_{zz}$$

Ecuación 2: Esfuerzo radial medio. (Nedderman, 1992)

Donde γ es el peso específico del material, μ es el coeficiente de fricción entre el material y las paredes del silo, y k es el coeficiente entre esfuerzos horizontales y verticales. El coeficiente k tiene valores máximos y mínimos, dependiendo de la condición de falla del material (pasivo o activo). Q_0 es el valor del esfuerzo vertical para $z=0$. R_h es el radio hidráulico de la base de la geometría a considerar, en el caso de un cilindro se definiría como:

$$R_h = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{r}{2}$$

Ecuación 3: Definición de radio hidráulico en el caso de un cilindro.

El análisis de Janssen considera dos supuestos que limitan su aplicación: que el esfuerzo vertical y horizontal son principales y que el esfuerzo es uniforme en cualquier sección horizontal transversal (Nedderman, 1992). Por esta razón Walker (1966) propone mejoras para el análisis de Janssen, considerando que el esfuerzo vertical y horizontal no son principales, añadiendo un factor de corrección a través de la utilización del círculo de Mohr.

2.3 FRAGMENTACIÓN

Como se comentó al comienzo del Capítulo, en minería de *caving* el proceso de fragmentación es de gran relevancia, como lo indican Van As y Van Hout (2008):

“El parámetro más importante que involucra el rendimiento y el éxito de una operación de caving es la fragmentación de la roca dentro de la columna. La fragmentación determina el tamaño de las zonas de flujo y afecta el comportamiento del flujo de material dentro de la columna, que a su vez controla la tasa de propagación, la entrada de dilución y la recuperación de recursos”

2.3.1 Tipos de Fragmentación

Generalmente se consideran tres tipos de fragmentación (Brown, 2007):

2.3.1.1 Fragmentación *in-situ*

Los bloques *in-situ* están completamente determinados por una red de discontinuidades preexistentes en el macizo rocoso. El tamaño y las formas de estos bloques son un resultado directo de la geometría de las discontinuidades abiertas presentes en el macizo rocoso. Las discontinuidades que no están completamente abiertas y que tiene resistencia a la tracción y al corte, no presentan caras libres de bloques *in situ*, pero representan planos de debilidad cuya separación podría incurrir en estados de fragmentación primaria o secundaria.

2.3.1.2 Fragmentación primaria

Una vez que el proceso de *caving* se ha iniciado, la fragmentación primaria resultará de las condiciones de esfuerzos dadas por el macizo rocoso en la vecindad del *cave back*. Se define *cave back* como la superficie de la roca *in situ* que está sobre la pila de material hundido (Brown, 2007) La mayoría de las fallas en esta etapa pueden esperarse en los planos de debilidad, sin embargo, bajo un régimen de altos esfuerzos se puede esperar que exista fracturamiento de roca intacta. La extensión de las fallas dependerá de la resistencia, tanto de las discontinuidades como la roca encajante, relativos a la magnitud y la orientación de los esfuerzos presentes. Considerando un macizo rocoso similar, si se presenta un estado tensional de esfuerzos inducidos de compresión en el *cave back*, la fragmentación primaria será más fina que en un caso de estado tensional de esfuerzos de tracción donde la gravedad causa el desprendimiento de los bloques del *cave back*. En gran medida, la red de discontinuidades pre existentes será la principal causante de la formación de bloques durante la fragmentación primaria. Sin embargo, no todas las discontinuidades existentes definirán bloques primarios.

2.3.1.3 Fragmentación secundaria

La fragmentación secundaria se obtendrá durante el tiempo de residencia de la roca hundida en la columna de extracción. La naturaleza y el grado de fragmentación secundaria pueden esperarse que varíen de acuerdo al régimen de esfuerzos presentes en el *caving*, la composición y propiedades mecánicas de la roca, la tasa de extracción, la altura a la que el material está siendo extraído y el tiempo de residencia en la columna de extracción.

En general, los mecanismos de la fragmentación secundaria pueden esperarse que incluyan algunos de los siguientes (Brown, 2007):

- Extensión y abertura de discontinuidades pre existentes.
- Falla por corte de bloques bajo la influencia de esfuerzos arco.
- Falla por flexión de bloques alargados.
- Abrasión de las esquinas de los bloques y bordes reduciendo su tamaño y genera finos.

A estos mecanismos se debe agregar el mecanismo de impacto del material que se propaga contra la pila de material fragmentado en un *air gap*. *Air gap* se define como la distancia libre vertical entre la parte superior de la pila de material hundido y el *cave back* (Brown, 2007).

La fragmentación secundaria produce una gran cantidad de material fino. El material fino puede viajar más rápido a través de la columna de extracción que los materiales más gruesos. Además, el material fino puede impactar negativamente la eficiencia del proceso aguas abajo. El material fino puede tener diferente ley que el material grueso, causando un impacto en las curvas de tonelaje-ley (Pierce, 2009).

Montecino (2011) corrobora que existe una disminución de tamaños de los fragmentos a medida que aumenta la extracción de un punto, asociándolo a la fragmentación secundaria.

2.3.2 Metodologías para medir ruptura de partículas

Pierce (2010) señala que el proceso de fragmentación secundaria en minas de block y panel *caving* ocurre vía tres principales mecanismos de fragmentación:

- Fragmentación por impacto en el caso de un *air gap* desde el *cave back*.
- Fragmentación por compresión dentro de las zonas estáticas.
- Fragmentación por abrasión en las zonas de movimiento.

Asociados a dos modos de ruptura:

- Fracturamiento de bloques, debido a altos esfuerzos normales y bajos esfuerzos de corte.
- Redondeo de las esquinas de los bloques, debido a bajos esfuerzos normales y altos esfuerzos de corte.

Para entender la ruptura de materiales granulares al estar sujetos a esfuerzos y deformación, se revisaron experimentos realizados considerando diferentes variables relacionadas a las propiedades del material utilizado.

2.3.2.1 Fragmentación bajo compresión

Los resultados de una serie de ensayos experimentales (Lee y Farhoomand, 1967, Fukumoto 1992) han demostrado que la ruptura sujeta a esfuerzos de compresión es el principal modo de fragmentación de un material granular. La ruptura resulta de la tensión inducida a un fragmento vía compresión

Los resultados de ensayos de compresión en arena y grava indican que ocurre una rotación en la distribución de tamaños alrededor del máximo tamaño de partícula, como se observa en la Figura 10.

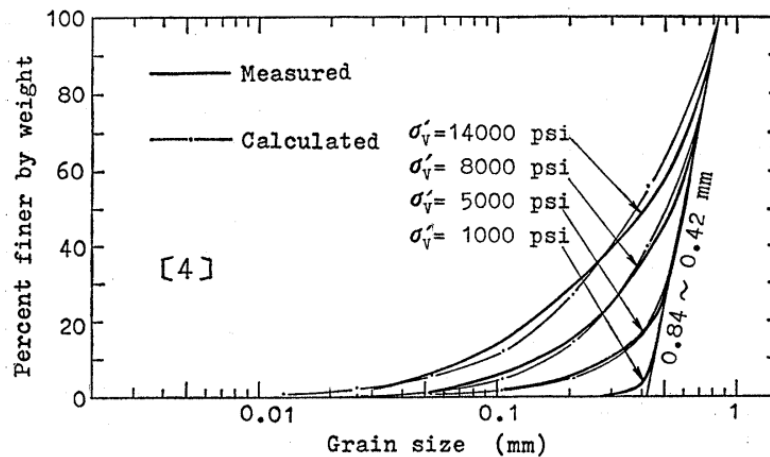


Figura 10: Cambio en la distribución de tamaño de arena sujeto a esfuerzos de compresión (Fukumoto, 1992).

Esto sugiere que los fragmentos mayores son los menos probables a romperse. Mientras esto puede ser incoherente, ya que generalmente los fragmentos mayores son más débiles, esto se debe a que los fragmentos mayores tienen mayor contacto con los fragmentos vecinos, donde efectivamente se confina y estabilizan estos fragmentos, reduciendo el esfuerzo inducido sobre ellos. Por otro lado, los fragmentos pequeños tienen menor cantidad de contactos de fragmentos vecinos, luego presentan una mayor probabilidad de romperse.

2.3.2.2 Modelo de fragmentación de Hardin

Hardin (1985) estudió la fragmentación en un test de compresión con treinta suelos diferentes, desde arenas de cuarzo redondeadas hasta granito chancado anguloso. Estudió un amplio rango de parámetros, incluyendo la distribución de tamaños, angularidad, esfuerzos, porosidad y resistencia de la partícula.

En el modelo de Hardin, un suelo tiene un cierto potencial a la rotura B_p , que es igual al área entre el valor inicial de la distribución de tamaño y límite máximo de un tamaño de limo (diámetro = 0.074 mm), en un gráfico de porcentaje finos versus diámetro (Figura 11). El potencial de rotura disminuye a medida que el tamaño de partícula disminuye, es por ello que es difícil romper partículas bajo el tamaño de limo. Hardin también sugiere que todo tamaño bajo el tamaño de limo no es relevante para el comportamiento del suelo.

En la Figura 11 se observa la rotura total de una partícula, B_t que se define como el área entre las curvas de distribución de tamaños antes y después de haber aplicado carga.

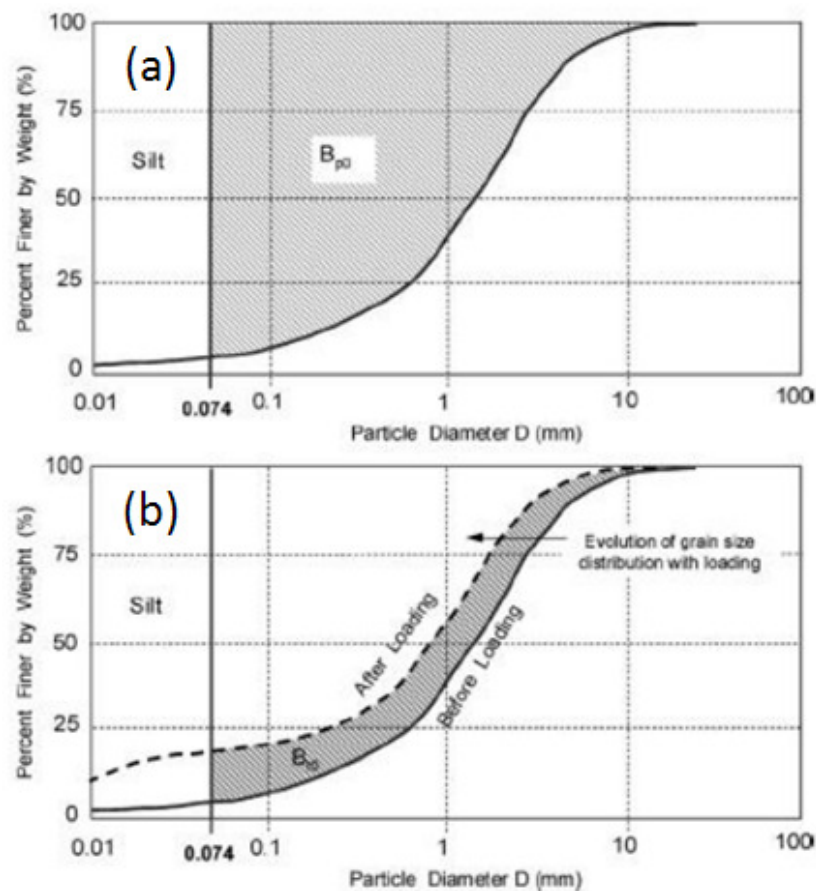


Figura 11: Definición de potencial de rotura, B_p (a) y rotura total, B_t (b), (Hardin, 1985).

Hardin encontró que la rotura total para un material dado es directamente proporcional al potencial de rotura. Además encontró que el factor de forma de la partícula también impactaba en la ruptura de las partículas.

En la Figura 12 se define el número de forma utilizado en la metodología de Hardin (1985).





	Angular	Subangular	Subround	Round
Particle shape				
Value of n_s	25	20	17	15

Figura 12: Definición de Hardin de número de forma (Powers, 1953).

2.3.2.3 Fragmentación bajo deformación por corte

Existe una cantidad considerable de investigaciones realizadas en mecánica de suelos para entender la influencia que tiene el confinamiento sobre las propiedades de los materiales, como son las características de resistencia al corte. Los experimentos realizados consideran el uso de equipos de ensayos triaxiales. Los equipos triaxiales son instrumentos especialmente diseñados para medir los parámetros de resistencia de corte para materiales granulares bajo condiciones de esfuerzo triaxial. Un espécimen es sujeto a un nivel de confinamiento y luego, este espécimen es deformado verticalmente hasta que falla, midiendo la carga a la que fue sometido el espécimen. Este procedimiento se repite para diferentes niveles de confinamiento, los que van siendo registrados. De estos datos, el ángulo de fricción del material se puede determinar como una medida de la resistencia al corte.

Una variable importante en la resistencia al corte es la presión de confinamiento, que al aumentar lo suficiente anula toda dilatación, transformando hasta el estado más denso en contractivo. De la Figura 13 se observa que la razón de tensiones máxima disminuye al aumentar la presión de confinamiento, demostrándose con esto que el ángulo de fricción máximo es dependiente de la presión confinante.

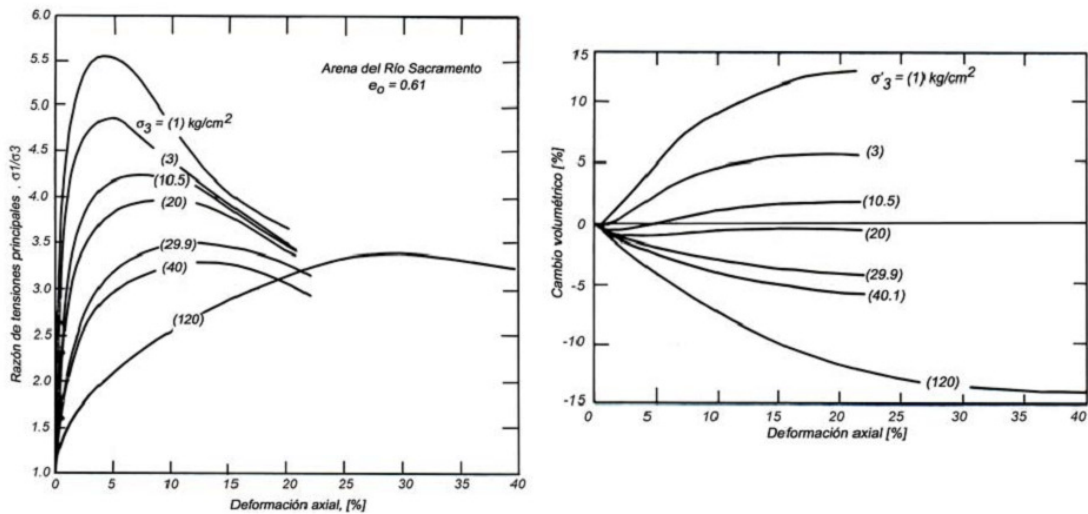


Figura 13: Comportamiento tensión-deformación a grandes presiones (Lee y Seed, 1967).

2.3.2.4 Modelo de fragmentación de Bridgwater

Bridgwater (2003) estudió el desgaste del material a través de *cizalle*, considerando como variables el esfuerzo normal, deformación de corte, tamaño de partícula y resistencia de la partícula. Como resultado desarrolló un modelo empírico para la fragmentación de las partículas que puede ser relevante para el estudio de fragmentación secundaria, considera el *cizalle* dentro de un *block caving*.

Basado en los resultados de sus experimentos, Bridgwater obtuvo que los mecanismos de desgaste para una distribución inicial de mono-tamaño, al analizar un amplio rango de esfuerzos y deformaciones, pueden ser explicados a través de una ley de desgaste empírica.

Lo que indica que la fragmentación secundaria bajo *cizalle* está fuertemente controlada por el esfuerzo y la deformación por corte relativo a la resistencia de las partículas.

2.3.2.5 Rotura de partículas de Marsal

La fragmentación de fragmentos cambia la distribución de tamaño de las partículas y afecta las características de deformación de los materiales.

Ensayos triaxiales bajo altos niveles de confinamiento en grava (Leslie, 1963), enrocado (Marsal, 1967) y arenas (Lee and Seed, 1967; Vesic y Clough, 1968) han mostrado que la distribución de tamaños del material cambia durante el proceso de carga debido a la rotura de las partículas. El grado de rotura de las partículas depende principalmente de la distribución de tamaños, la resistencia de los fragmentos y el nivel de esfuerzo aplicado.

Un material granular está conformado normalmente por varios tamaños de partícula. Una distribución de tamaños de partículas puede ser obtenido para k clases (k es un entero).

Cuando un material granular es cargado con una fuerza hasta cierto nivel, este material comenzará a romperse, lo que significará que la cantidad de material en cada clase cambia.

Una alternativa para cuantificar el grado de rotura es considerar la diferencia en porcentaje de peso para cada fracción (ΔW_k) de tamaño antes y después del procedimiento de carga.

El grado de rotura durante los tests de compresión pueden ser definidos como (Marsal, 1973):

$$\Delta W_k = W_i - W_f$$

Ecuación 4: Diferencia en porcentaje de peso para cada fracción de material. (Marsal, 1973)

$$B_g[\%] = \sum_k \Delta W_k; \Delta W_k > 0$$

Ecuación 5: Índice de ruptura definido por Marsal (1973).

En la Figura 14 se esquematiza la determinación de este parámetro, que es definido como la sumatoria de las diferencias positivas entre los porcentajes de material retenido en la malla, antes y después de un ensayo de resistencia.

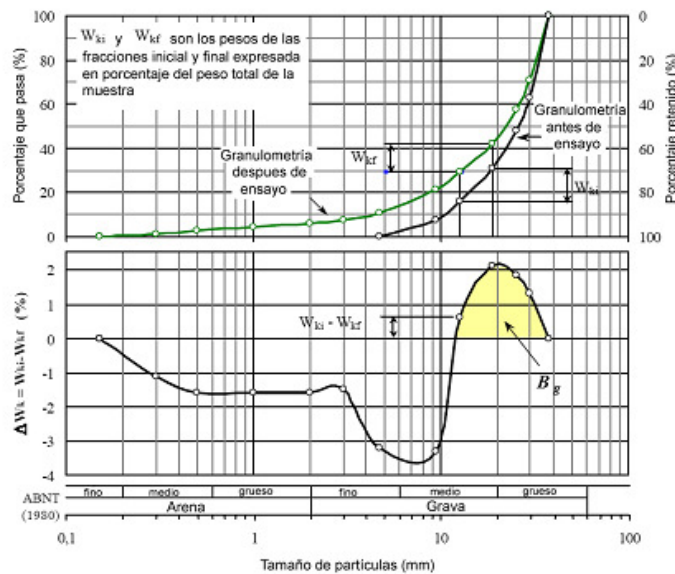


Figura 14: Metodología para la determinación del parámetro B_g (Hoz, 2007).

En la Figura 15 se observa que los fragmentos de granulometría uniforme presentan una mayor rotura de partículas que los fragmentos bien graduados, lo que concuerda con lo expuesto por Lee y Farhoomand (1967).

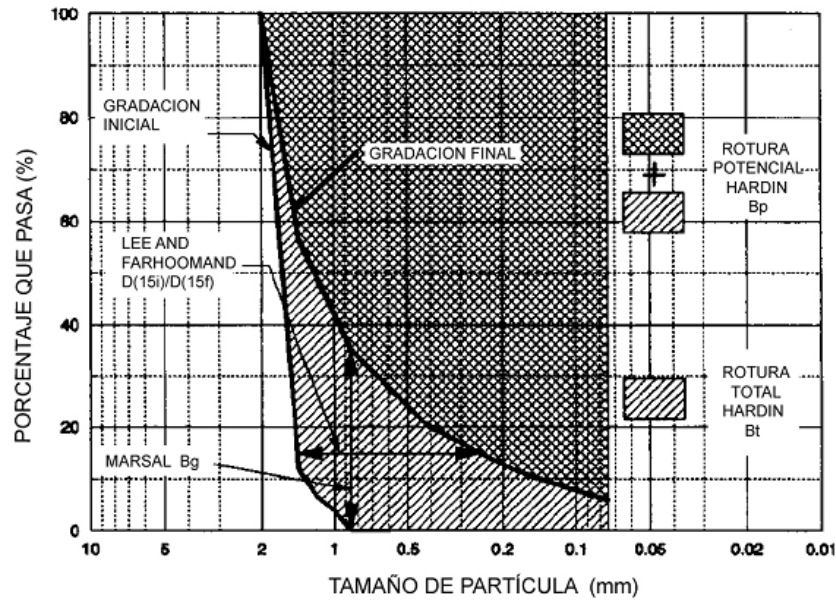


Figura 15: Resumen de metodologías para medir rotura de partículas (Lade et al. 1986).

Indraratna y Salim (2002) realizaron tests en un gran equipo triaxial para altos confinamientos. Ellos cuantificaron la rotura con el objetivo de entender el efecto que tiene la degradación de material quebrado en la estabilidad en los rieles de los trenes. La Figura 16 muestra los resultados de los tests realizados por el equipo triaxial. El gráfico muestra que el índice de rotura B_g depende del nivel de confinamiento y la deformación.

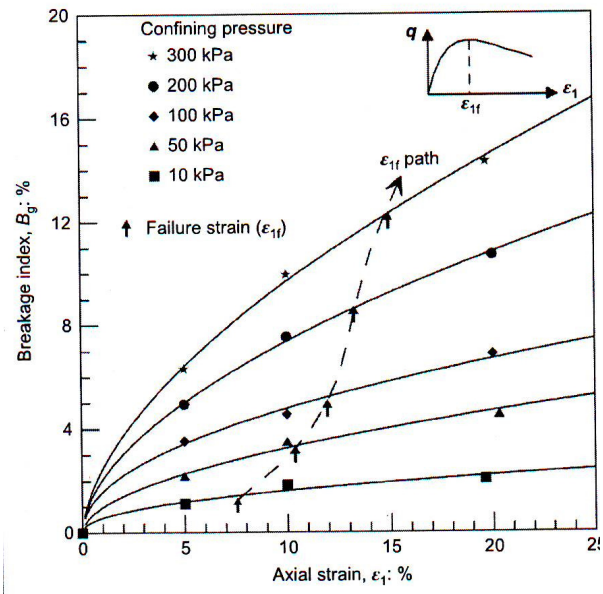


Figura 16: Influencia del confinamiento en el índice de ruptura para agregados de lutita (Indraratna, 2002).

2.3.3 Factores que afectan la fragmentación

Pierce (2009) denota que los factores principales que afectan la fragmentación de partículas son:

- Deformación por corte.
- Forma de los fragmentos.
- Resistencia de los fragmentos.
- Distribución de tamaños de los fragmentos.
- Presencia de esfuerzos.
- Porosidad inicial de los fragmentos.

A continuación se describe cada factor en detalle.

2.3.3.1 Deformación por corte

El trabajo experimental realizado por Bridgwater (2003) sugiere que la deformación por corte (además de los esfuerzos) es el parámetro relevante que controla la fragmentación. Este mecanismo actúa dentro del IMZ, donde las deformaciones por corte son las más altas. La cantidad de deformación por corte que experimente un fragmento dentro del IMZ, dependerá en la posición relativa al centro del IMZ. El perfil de velocidad dentro del IMZ considera zonas de corte en las periferias cercanas a las paredes y zonas de flujo pistón en el centro del IMZ, donde un fragmento que reside en la zona de flujo pistón está sujeto a casi una nula deformación por corte.

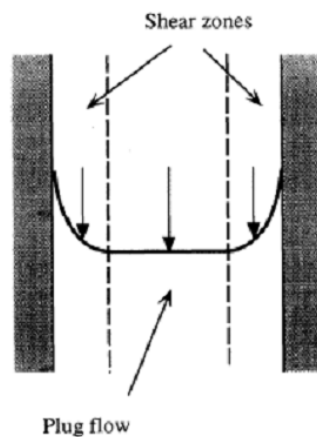


Figura 17: Perfil de velocidad observados en silos (Pierce, 2009).

2.3.3.2 Forma de los fragmentos

La forma de un fragmento puede ser caracterizada por dos diferentes medidas:

- **Esfericidad (o Razón de aspecto)**

Los resultados de laboratorio en ensayos de compresión muestran evidencias en el efecto que tienen la razón de aspecto en una potencial ruptura de fragmentos bajo compresión. Fragmentos con una alta razón de aspecto son más susceptibles a cargas por flexión. (Pierce, 2009)

- **Redondez (o Angularidad)**

Evidencia experimental (Lee y Seed, 1967; Lee y Farhoomand, 1967; Hardin, 1985) muestran que a medida que aumenta la angularidad de los fragmentos, éstos, al someterlos a compresión, su potencial ruptura y redondamiento se incrementa.

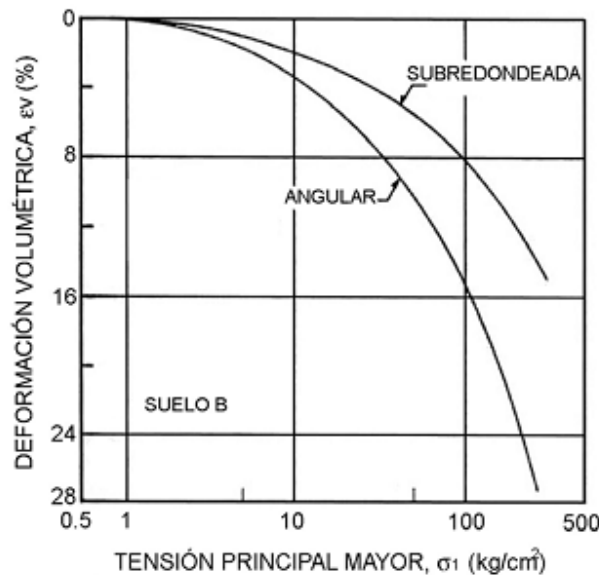


Figura 18: Deformación volumétrica para diferentes forma de partícula (Lee & Farhoomand, 1967).

2.3.3.3 Resistencia

Existe evidencia de ensayos realizados en una gran cantidad de materiales que sugieren que la resistencia influye tanto en el redondamiento como en la ruptura de los fragmentos, bajo esfuerzos de compresión y corte. Los modelos de Hardin y Bridgwater incluyen la resistencia como un parámetro relevante. Es también importante considerar, que la resistencia de un fragmento de roca disminuye con el aumento del tamaño debido a la mayor posibilidad de que existan fallas presentes en el fragmento. Hardin explícitamente da cuenta del impacto en la escala de los fragmentos considerando que entre más grande es el tamaño del material mayor es su potencial ruptura.

La Figura 19, presenta la ley de escala empírica que relaciona la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el diámetro del espécimen para distintos tipos de roca dura desarrollada por Hoek y Brown (1980).

En la Figura 20, Yoshinaka (2007) pudo comparar los resultados de ensayos realizados en laboratorio y en terreno en diversos tipos de roca, resistencias, formas y tamaños de las muestras.

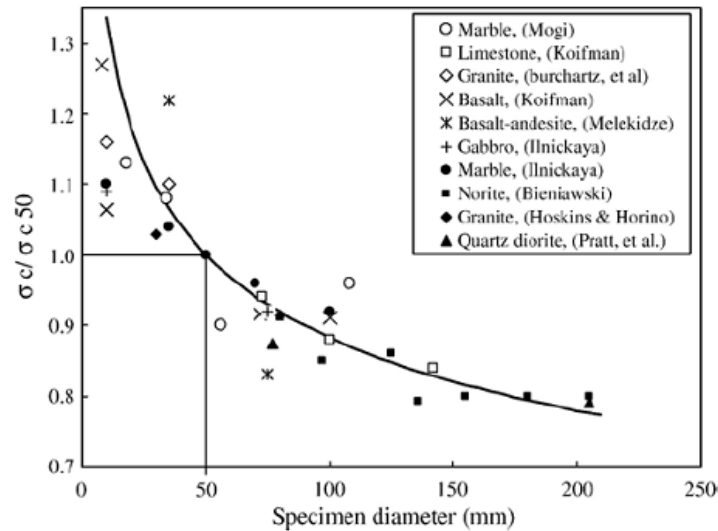


Figura 19: Efecto de la escala en UCS de una roca intacta (Hoek and Brown, 1980).

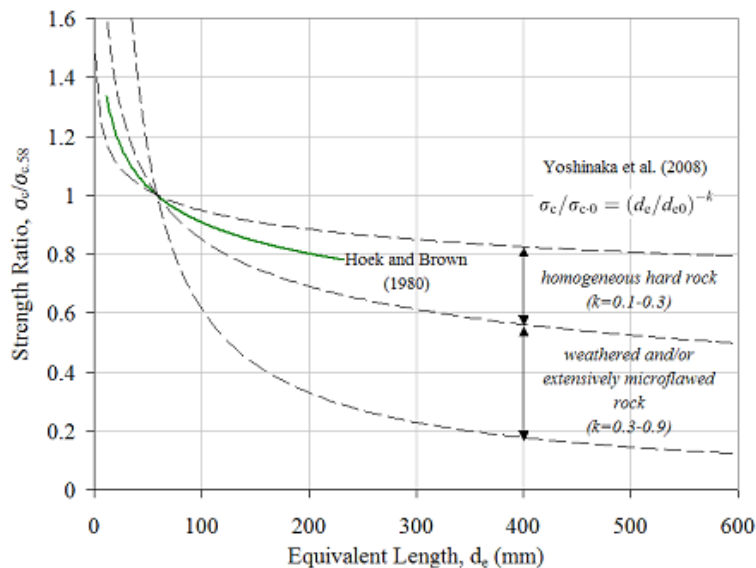


Figura 20: Efecto de la escala UCS en roca intacta (Yoshinaka, 2007).

2.3.3.4 Distribución de tamaño

Los resultados de laboratorio en ensayos de compresión en arena y gravas realizados por Lee y Farhoomand (1967), sugieren que en materiales bien distribuidos los fragmentos más grandes son los menos probables a romperse, lo que resulta después de realizar la compresión en una rotación de la distribución del tamaño de partícula alrededor del tamaño máximo de ésta. En cambio, en distribuciones de tamaño más homogéneas, los fragmentos son más susceptibles a ruptura bajo esfuerzos de compresión y de corte. Esto se debe a la influencia del número de coordinación (número de contactos): mientras mayor es el número de coordinación, más estable se vuelve la partícula y tiene una menor probabilidad de romperse.

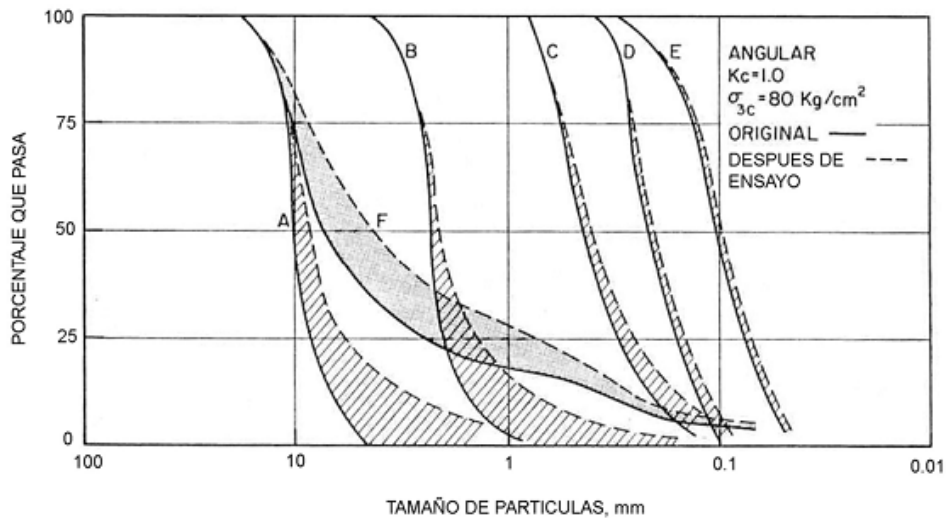


Figura 21: Efecto de la distribución granulométrica en la ruptura de partículas (Lee and Farhoomand, 1967).

2.3.3.5 Esfuerzo

Existe vasta evidencia de ensayos de una gran cantidad de materiales que sugieren que los esfuerzos impactan el redondamiento y la ruptura bajo compresión y corte, con altos regímenes de esfuerzo, resultando en una mayor fragmentación. Los esfuerzos varían en las zonas móviles y estacionarias dentro del hundimiento. Los esfuerzos en la zona de movimiento (IMZ) tienden a ser menores, en cambio, los esfuerzos en las zonas estacionarias en los alrededores de IMZ tienden a ser mayores, con una orientación del esfuerzo principal mayor en la dirección vertical, como se observa en la Figura 22.

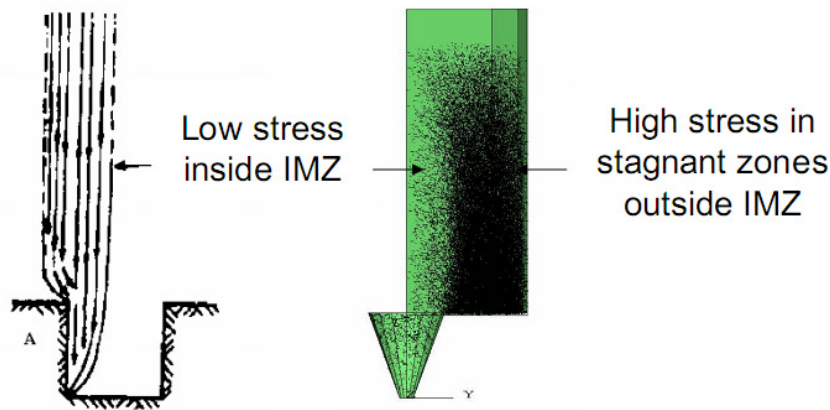


Figura 22: Esfuerzos en la zona de movimiento (IMZ) (Pierce, 2009).

2.3.3.6 Porosidad Inicial

La porosidad inicial no es considerada en la fragmentación inducida por corte, debido a que los materiales granulares, bajo condiciones de cizalle, se dilatan rápidamente y alcanzan una porosidad máxima que es función del esfuerzo normal y las propiedades del material. En cambio, es relevante en la fragmentación bajo compresión. Hardin (1985) encontró que materiales con una baja porosidad sufren de menor rotura, esto se atribuye a que en una matriz más compacta, las fuerzas se distribuyen entre un mayor número de partículas, luego disminuyen los esfuerzos que siente cada partícula.

2.3.4 Comportamiento de las propiedades de corte en arenas

El ángulo de fricción máximo es una sumatoria de varios procesos ocurridos durante la aplicación del corte, que incluyen la resistencia al deslizamiento en los contactos entre granos, dilatación, reordenamiento de los granos y rotura de partículas, esta última aumenta en importancia con el incremento de la presión de confinamiento y disminución del índice de vacíos. (Hoz, 2007)

Los resultados de las propiedades de corte de arenas pueden ser determinados a partir de ensayos de corte. En la Figura 23 se muestra una típica curva de esfuerzo-deformación para arenas densas y sueltas como muestras en un ensayo de corte directo.

Las arenas densas presentan un mayor grado de *interlocking* (bloqueo interno) entre las partículas, mientras que las arenas sueltas el grado de bloqueo interno es menor. Al someterlas a un ensayo de corte y antes que exista falla por corte, este bloqueo interno tiene que ser superado junto con la resistencia a la fricción en los puntos de contacto. En general el grado de bloqueo interno es mayor en arenas densas, bien distribuidas con partículas angulosas. La curva de esfuerzo-deformación para una arena densa muestra un *peak* de esfuerzo para un esfuerzo relativamente bajo, luego, a medida que el bloqueo interno va progresivamente cediendo, la curva de esfuerzo decrece a medida que aumenta la deformación. Dado que para una arena suelta no existe un grado de bloqueo interno

significativo que sobrepasar, el esfuerzo de corte aumenta gradualmente, lo que conlleva a una disminución del volumen, por ende sólo se observa compactación (Figura 24).

La disminución en el grado de bloqueo interno produce un aumento en el volumen del espécimen durante el corte, caracterizado por la relación entre la deformación volumétrica y la deformación por corte en el ensayo de corte directo.

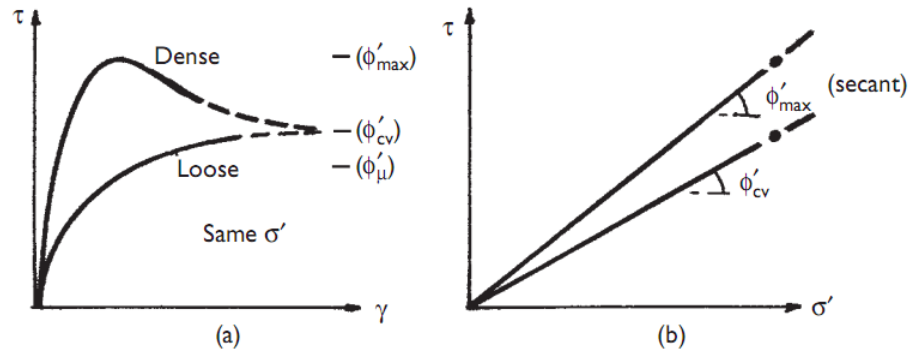


Figura 23: Curva esfuerzo-deformación para arenas densas y sueltas(a). Curva esfuerzo normal versus esfuerzo de corte (b), (Craig, 2006).

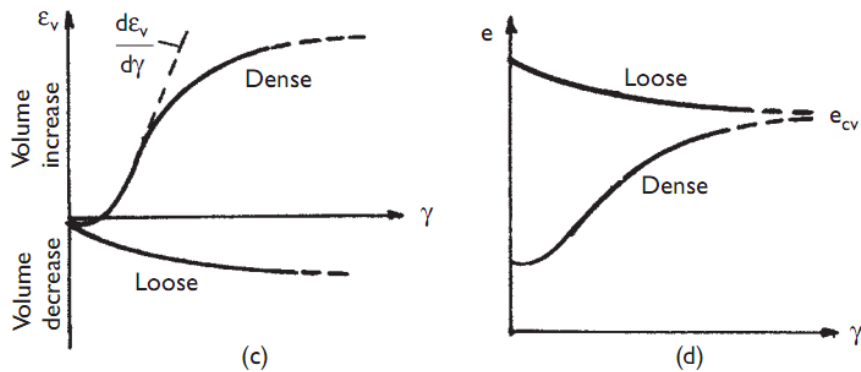


Figura 24: Deformación volumétrica versus deformación por corte (c). Razón de vacíos versus deformación por corte (d), (Craig, 2006).

El aumento en volumen de una arena densa bajo *cizalle* y la tasa de dilatancia puede ser representado por el gradiente $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_\gamma}$, la máxima tasa correspondiente al peak de esfuerzo.

Durante el *cizalle* sobre un arena densa el plano de corte es horizontal, pero microscópicamente, como las partículas individuales se mueven hacia arriba y pasan sobre sus partículas vecinas, los planos de deslizamiento están inclinados en diferentes ángulos con respecto a la horizontal (Figura 25).

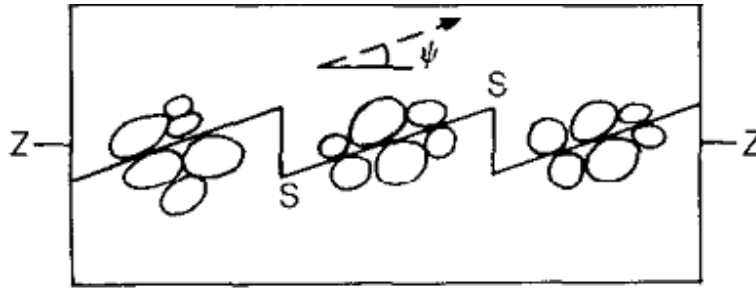


Figura 25: Planos de deslizamiento inclinados en diferentes ángulos con respecto a la horizontal, (Bolton, 1986).

El ángulo de dilatación representa un valor promedio de los ángulos descritos anteriormente tomando la muestra como un todo y no como partículas individuales,

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_\gamma} \right)$$

Para una arena densa el máximo ángulo de fricción (ϕ'_{max}), determinado a partir del peak de esfuerzo, es mucho mayor que el ángulo real de fricción entre las superficies de las partículas individuales (ϕ'_μ), la diferencia entre estos dos ángulos representa el trabajo que se requiere para superar el bloqueo interno y el reacomodo de las partículas.

El ángulo de fricción en el estado final, en el cual el esfuerzo de corte aplicado ocurre a un volumen constante se denota como ϕ'_{cv} .

Además, para niveles de esfuerzos altos puede ocurrir fracturamiento o ruptura de las partículas, lo que implicaría que la dilatación fuera disminuyendo hasta suprimirse por completo, como lo señala Bishop (1966) en la Figura 26.

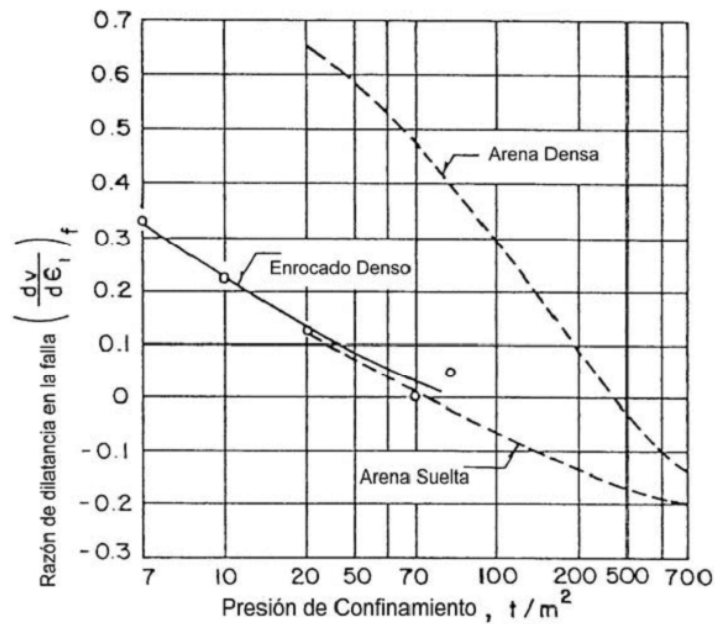


Figura 26: Variación de la tasa de dilatación en la falla en función de la presión de confinamiento (Bishop, 1966).

2.4 CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas de la revisión del estudio del estado del arte del conocimiento del flujo gravitacional y fragmentación de material se describen a continuación.

2.4.1 Flujo gravitacional

El flujo gravitacional en minería de *caving* es el proceso a través del cual el material fluye hacia los puntos de extracción una vez hundido producto de la gravedad. Una revisión bibliográfica se realizó con el objetivo de definir el estado del arte del conocimiento del flujo gravitacional, el que se ha obtenido a través del uso del modelamiento físico, experimentos a escala mina y del modelamiento numérico.

Los modelos físicos y numéricos que se han llevado a cabo consideran niveles bajos de carga vertical, por lo que no se han observado procesos de compactación ni ruptura en los materiales estudiados. Así, los mecanismos observados consideran principalmente una leve fragmentación y compactación. En las condiciones actuales de minería, las alturas de columna son sobre los 200 m y consideran un overburden (cantidad de material sobre los puntos de extracción) que va desde los 400 m hasta los 1000 m. (Flores et al, 2004; Castro, 2007), por lo tanto, un alto nivel de esfuerzos verticales puede ser esperado considerando las condiciones anteriores, esperando la ocurrencia de un alto grado de compactación y ruptura.

Se presentó una metodología para estimar los esfuerzos verticales en materiales granulares contenidos en un silo aplicable a minería de *caving*. De la solución de Janssen se observa

que los esfuerzos verticales dependen de la profundidad y del radio hidráulico o, en este caso, del área que esté en producción en una mina de *caving*.

Se presentaron los estudios relacionados a la capacidad de fluir del material. Se observó que las guías de diseño actuales para determinar la frecuencia de colgaduras solamente consideran la razón entre el diámetro del punto de extracción y el tamaño del material que fluye.

2.4.2 Fragmentación

Se presentaron los distintos tipos de fragmentación que se consideran en la minería de *caving*, que son: fragmentación *in situ*, fragmentación primaria y fragmentación secundaria.

La fragmentación secundaria en minería de *caving* es atribuida a una combinación de mecanismos: fracturamiento y abrasión (redondamiento). El fracturamiento se refiere a la rotura del fragmento completo en dos o más piezas; redondamiento se refiere a la remoción de pequeños fragmentos (o finos) de la superficie del bloque. Una revisión de la condición de los esfuerzos y deformaciones dentro del flujo indica que es lógico considerar para la fragmentación secundaria que ocurren condiciones de compresión y corte atribuidas a las zonas estáticas fuera del IMZ y en el contorno del IMZ, respectivamente. La fragmentación secundaria también podría resultar del impacto de los bloques en un *air gap*.

Se presentaron distintas metodologías para medir la ruptura de partículas atribuidas a una fragmentación bajo compresión y una fragmentación bajo deformación por corte. Para la metodología experimental presentada en el siguiente capítulo se escogió el índice de ruptura de Marsal debido a la simplicidad de aplicación en los experimentos a realizar.

Además, se presentaron los principales factores que afectan la fragmentación en minería de *caving*, deformación por corte, forma de los fragmentos, resistencia de los fragmentos, distribución de los fragmentos, presencia de esfuerzos y porosidad inicial de los fragmentos.

El trabajo experimental realizado por Bridgwater (2003) sugiere que la deformación por corte además de los esfuerzos, es un parámetro relevante que controla la fragmentación. Este mecanismo actúa dentro en los contornos del IMZ, donde las deformaciones por corte son más altas.

Los experimentos realizados por Lee y Farhoomand (1967), Lee y Seed (1967) y Hardin (1985) muestran que la forma de los fragmentos caracterizados por la esfericidad o razón de aspecto y por la redondez o angularidad influye en la fragmentación, ya sea por ruptura de fragmentos o redondamiento.

Existe evidencia que la resistencia de las partículas influye tanto en el redondamiento como en la ruptura de los fragmentos bajo esfuerzos de compresión y de corte. De esta forma es lógico que a mayor resistencia del material es menos probable que se fragmente. Es importante considerar que la resistencia de un fragmento disminuye con el aumento del

tamaño, debido a la mayor posibilidad de que existan fallas presentes en el fragmento, como lo indican Hoek y Brown (1980) y Yoshinaka (2007).

Los resultados de los experimentos realizados por Lee y Farhoomand (1967) sugieren que en los materiales bien distribuidos, los fragmentos mayores tienen menos probabilidad de romperse, debido a la influencia en el número de contactos que presentarían esos fragmentos, que los harían más estables.

Existe evidencia que los esfuerzos impactan en el redondamiento y la ruptura del material. Los esfuerzos van a variar entre las zonas estacionarias y las zonas móviles dentro de la columna de material. Los esfuerzos dentro de las zonas de movimiento tienden a ser menores, en cambio fuera de las zonas de movimiento, en las zonas estacionarias, tienden a ser mayores.

Los experimentos realizados por Hardin (1985) sugieren que la porosidad influye en la fragmentación bajo compresión. Para materiales con una porosidad baja sufren de menor ruptura, esto se atribuye a que en una matriz más compacta, las fuerzas se distribuyen entre un mayor número de partículas, luego disminuyen los esfuerzos que siente cada partícula.

Los estudios relacionados con el comportamiento de las propiedades de corte en arenas, establecen que las arenas densas presentan un mayor grado de *interlocking* (bloqueo interno) entre las partículas, mientras que las arenas sueltas presentan un grado menor de bloqueo interno. Al someterlas a un ensayo de corte directo, las arenas densas presentan un aumento de volumen representado por la dilatancia, debido a que las partículas deben sobrepasar el bloque interno. Para niveles de esfuerzos altos puede ocurrir fracturamiento o ruptura de las partículas, lo que implicaría que la dilatancia fuera disminuyendo hasta suprimirse por completo (Bishop, 1966). En cambio las arenas sueltas, al ensayarlas, presentan una disminución de volumen, debido a que presentan compactación.

En el próximo capítulo se presenta la metodología experimental detallando el material, instrumentación y el diseño del equipo utilizado en los experimentos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se discutió en el Capítulo 2, los estudios realizados sobre flujo gravitacional aplicado a minería de *caving* han utilizado diferentes metodologías, considerando diferentes materiales y diversas condiciones de borde al usar modelos físicos de pequeña escala. Debido a que no existe un equipo de laboratorio estándar para estudiar el flujo gravitacional de material confinado, éste se debe diseñar y construir para cumplir con los objetivos propuestos.

Este capítulo describe y justifica la metodología de la investigación usada en el presente trabajo, de acuerdo a los objetivos establecidos inicialmente. Se definen los conceptos y se describen las ecuaciones para caracterizar y determinar las propiedades del material a utilizar en los experimentos. Se describe en detalle el diseño experimental, incluyendo los principales componentes del equipo de laboratorio y el rango de carga a aplicar en los ensayos. Finalmente se define el procedimiento del ensayo y las correspondientes conclusiones.

3.2 DISEÑO DEL EQUIPO DE LABORATORIO

El equipo de laboratorio para estudiar el flujo gravitacional confinado bajo un tiraje aislado, considerando una configuración 3D, utilizado en esta investigación, fue construido y diseñado en el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile. Los componentes principales del equipo son los siguientes:

- *Prensa hidráulica.* Consiste en una prensa hidráulica convencional que no es servoasistida, ya que se opera manualmente, por lo que el operador del equipo regula manualmente la carga bajo la cual la prensa debe operar de acuerdo al experimento que se realice. La máxima carga que puede aplicar la prensa es de 1800 KN (Figura 28). El sistema para medir la carga de la prensa consiste en un sensor de presión con un lector digital portátil. (Figura 38)
- *Cilindro de acero.* Con el fin de evitar la concentración de esfuerzos locales en singularidades del contenedor del material, el equipo se diseñó manteniendo una forma cilíndrica. El cilindro de acero se diseñó para resistir una presión máxima aplicada de 30 MPa y que sus dimensiones fueran coherentes con los de la prensa hidráulica. Las dimensiones del cilindro consideran un diámetro interno de 340 [mm] y una altura de 700 [mm]. Además, contempla un pistón de acero mediante el cual la prensa ejerce la presión sobre el material granular dentro del cilindro (Figura 27). La cantidad de material con la que puede llenarse el cilindro es de 75-80 kg. En la base del cilindro existe un punto de extracción de ancho de 100 [mm] localizado

en el centro, de tal manera que las zonas de flujo no intersecten con las paredes del cilindro.

Observaciones llevadas a cabo por Nedderman et al. (1982) consideran que:

- La altura H del material granular no modifica el flujo a través del orificio, siempre que se cumpla que dicha altura sea mayor a 2.5 veces el diámetro del silo. La justificación a esta condición radica en el efecto Janssen explicado en el Capítulo 2.
- El flujo es independiente del diámetro del silo si se cumplen las siguientes condiciones: que el diámetro del silo sea mayor que 2.5 veces el tamaño del orificio y que el diámetro del silo sea mayor que 30 veces el diámetro de las partículas más el diámetro del orificio.

La primera condición se cumple con el diseño del cilindro. Con respecto a la segunda condición, ésta se cumple para el material más pequeño. El diámetro del cilindro estaba restringido por el ancho máximo de la prensa.

El diámetro del pistón es mayor a 10 veces al tamaño máximo de los fragmentos ensayados.

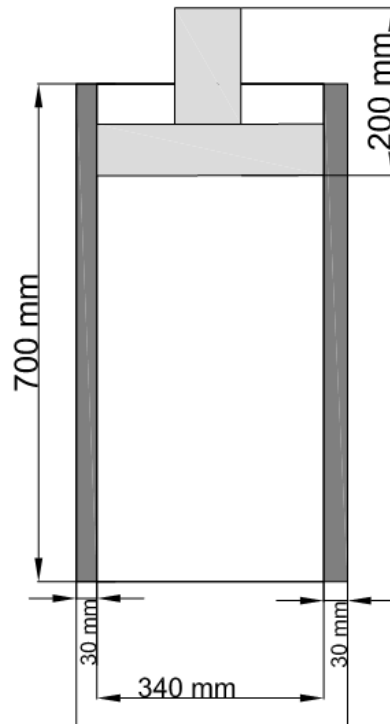


Figura 27: Dimensiones específicas del cilindro de acero.



Figura 28: Prensa hidráulica y cilindro de acero (izq.) y pistón de acero (der.)

- *Sistema de extracción del material.* El sistema de extracción se diseñó con el objetivo de extraer el material del cilindro y desplazarlo hacia un recipiente con el fin de pesar cada ciclo de extracción y así determinar cuándo finalizar cada experimento. También se debe considerar que cada vez que la cuña de extracción vuelve al punto inicial, la abertura por donde el material fluía debía cerrarse por completo para controlar el material extraído y así estudiar las zonas de flujo (Figura 29 y Figura 30).

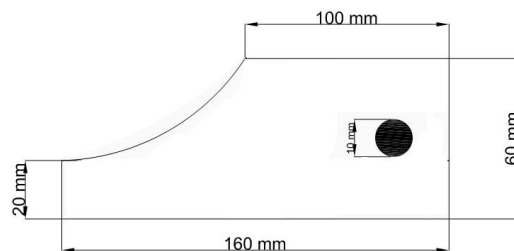


Figura 29: Dimensiones específicas del sistema de extracción.



Figura 30: Sistema de extracción del cilindro de acero.

- *Tecla*. Para trasladar y colocar el cilindro con el material en la prensa hidráulica es necesario utilizar un tecla, debido al gran peso del cilindro una vez lleno (Figura 31).



Figura 31: Tecla para colocar el cilindro de acero en la prensa hidráulica.

Las características del cilindro y de la prensa hidráulica son resumidas en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de las características principales del cilindro de acero y la prensa hidráulica.

Ítem	Valor
Altura [mm]	700
Diámetro interno [mm]	340
Diámetro punto de extracción [mm]	100
Capacidad máxima de carga [KN]	1800
Densidad inicial del material [g/cc]	1,5
Peso del material [kg]	75

3.3 INSTRUMENTACIÓN

3.3.1 Caracterización del material

El material granular (Figura 32) utilizado en los experimentos fue caracterizado con respecto al tamaño de partícula, factor de forma de los fragmentos, propiedades de resistencia al corte que incluyen, ángulo de fricción interna, ángulo de dilatancia y cohesión y propiedades de resistencia de las partículas a la compresión a través del índice de carga puntual.



Figura 32: Material $d_{50} = 11$ mm (izq.) y $d_{50} = 6$ mm (der.).

Índice de Uniformidad

El índice de uniformidad de la distribución C_u se define como (Craig, 2005),

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Donde d_{10} y d_{60} son el tamaño correspondiente al 10% y 60 % pasante de la muestra respectivamente.

Los respectivos tamaños de la muestra d_{10} y d_{60} se estiman a partir de la curva granulométrica.

Factor de Forma

El factor de forma queda definido de acuerdo a Barret (1980) explicado por Cho et al. (2006) a través de dos características: esfericidad y redondez, las que se definen como:

- *Esfericidad*: se refiere a la forma global de la partícula y refleja la similaridad entre la altura, ancho y alto de la partícula. Se cuantifica como:

$$\text{esfericidad: } S = \frac{r_{max-in}}{r_{max-cir}}$$

Ecuación 6: Definición de esfericidad, S. (Cho et al, 2006).

Donde r_{max-in} se refiere al radio del círculo mayor inscrito y $r_{max-cir}$ se refiere al radio del círculo menor circunscrito.

- *Redondez o angularidad*: describe las principales características de la superficie que son típicamente un orden de magnitud menor que el tamaño de la partícula.

$$\text{redondez: } R = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-in}}$$

Ecuación 7: Definición de redondez, R. (Cho et al, 2006).

Donde r_{max-in} se refiere al radio del círculo mayor inscrito y $\sum r_i / N$ es el promedio de los radios de curvatura de la superficie.

En la Figura 33 se muestra la matriz de clasificación del factor de forma, donde se especifica la esfericidad y la redondez de las partículas.

En la Figura 34 se muestra un ejemplo de aplicación de los círculos circunscritos e inscritos para determinar la esfericidad y la redondez de las partículas.

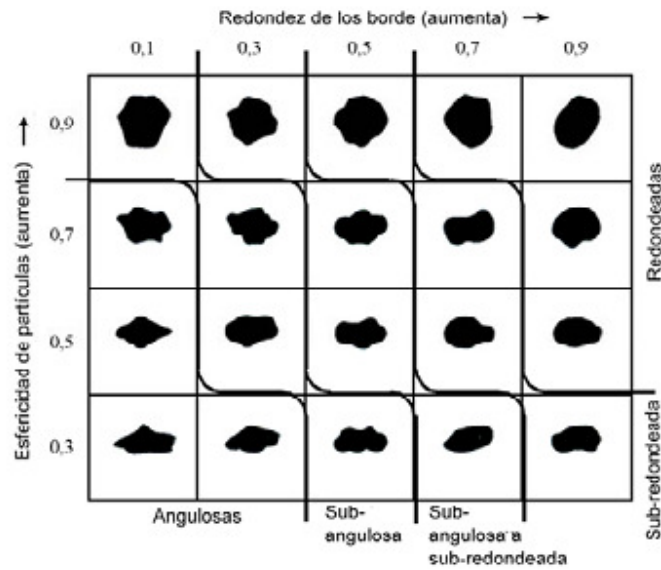


Figura 33: Matriz de la forma de partícula en esfericidad y redondez, (Hoz, 2007).

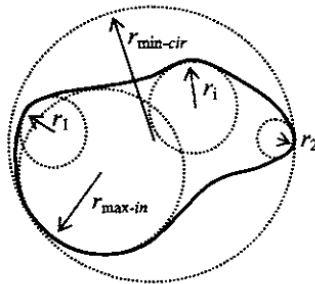


Figura 34 : Ejemplo de aplicación de círculos inscritos y circunscritos para determinar la esfericidad y la redondez, (Cho et al., 2006).

Propiedades de resistencia al corte

Las propiedades de resistencia al corte de los fragmentos se obtienen de mediciones realizadas de un equipo de corte directo. El procedimiento experimental se realizó mediante los estándares utilizados en mecánica de suelos (Craig, 2005).

Una carga vertical (N) es aplicada al espécimen a través a de una placa y el esfuerzo de corte es gradualmente aplicado en una placa colocada horizontalmente, causando que las dos partes de la caja se muevan relativamente una a la otra. La fuerza de corte (T) es medida en conjunto con el desplazamiento de corte (Δl) y el desplazamiento en altura de la caja (Δh) (Figura 35).

Si la altura original del espécimen es h_0 y el largo original es l_0 , entonces la deformación por corte (ϵ_γ) y la deformación volumétrica (ϵ_v) se definen como:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta h}{h_0} \quad \varepsilon_\gamma = \frac{\Delta l}{h_0}$$

Ecuación 8: Definición de la deformación volumétrica ε_v y de corte ε_γ . (Craig, 2005).

Los ensayos se realizan para varias muestras con distintas cargas verticales, luego el esfuerzo de corte es graficado versus el esfuerzo normal de cada test, con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia al corte de la mejor línea ajustada para los puntos graficados.

El material utilizado fue el de tamaño $d_{50} = 10$ mm.

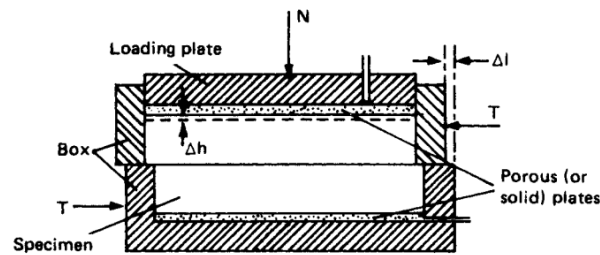


Figura 35: Diagrama del ensayo de corte directo (Craig, 2005).

En la Figura 36 se muestra el equipo de corte directo utilizado para determinar las propiedades de corte del material usado en la investigación.



Figura 36: Equipo de corte directo para determinar propiedades de corte del material granular.

El cambio de volumen durante los ensayos fue registrado para determinar el ángulo de dilatación del material. El ángulo de dilatación se define como la medición del incremento de la deformación por volumen ε_v por la deformación de corte ε_γ ,

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_\gamma} \right) = \tan \left(\frac{\Delta h/h}{\Delta l/l} \right)$$

Ecuación 9: Definición del ángulo de dilatación, (Craig, 2005).

Donde Δh y Δl son los desplazamientos horizontales y verticales durante el ensayo, y h y l son las medidas originales de longitud y altura de la muestra.

Propiedades de resistencia a la compresión

El ensayo de carga puntual consiste en que las muestras, ya sean testigos o fragmentos irregulares, son fragmentadas por la aplicación de una carga concentrada usando un par de punzones cónicos truncados de forma esférica. El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D5731-08. (ISRM: Point Load Test, 1985)

La resistencia de carga de puntual se define como:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

Ecuación 10: Definición de la resistencia de carga puntual. (ISRM: Point Load Test, 1985).

Donde P es el valor de la carga al momento de la ruptura y D_e se define como:

$$D_e^2 = \frac{4 \cdot A}{\pi}, \quad A = W \cdot D$$

Ecuación 11: Definición de D_e y A . (ISRM: Point Load Test, 1985).

Donde D es la distancia entre los dos punzones cónicos y W es el ancho promedio de cada fragmento.

Para muestras que no son regulares, la norma ASTM D5731-08 establece que al índice I_s se le debe aplicar un factor de corrección para llevar la muestra a un diámetro de 50 mm. equivalente, que está dado por:

$$F = (D_e/50)^{0.45}$$

Ecuación 12: Definición del factor de corrección para llevar la muestra a un diámetro de 50mm. (ISRM: Point Load Test, 1985).

Finalmente, el índice de carga puntual para diámetro de 50 mm viene dado por:

$$I_{s50} = I_s \cdot F$$

Ecuación 13: Definición del índice de carga puntual para un diámetro de 50 mm. (ISRM: Point Load Test, 1985).

En la Figura 37 se muestra el equipo con el cual fueron ensayadas las muestras.

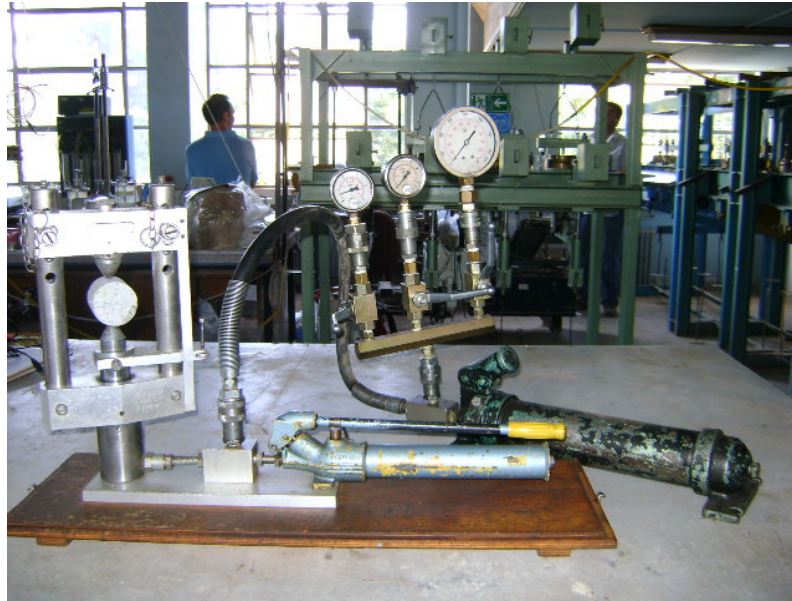


Figura 37: Equipo de carga puntual para determinar propiedades de resistencia a la compresión del material granular.

3.3.2 Carga vertical

La carga vertical a aplicar durante los experimentos varía desde [0,1800] KN que es la capacidad máxima de carga de la prensa hidráulica. El pistón se coloca contra la superficie de los fragmentos, la prensa se prende y cuando se llega a la carga vertical requerida el proceso de extracción comienza con la carga manteniéndose constante. La carga vertical es medida a través de un sensor de presión y un strainmeter (Figura 38).



Figura 38: Transductor de presión y strainmeter para medir carga vertical que aplica la prensa hidráulica.

La Figura 39 muestra el esfuerzo vertical a partir de la ecuación de Janssen (Ecuación 1), normalizado por el esfuerzo vertical máximo ($\sigma_{max} = \rho \cdot g \cdot h$) que indica que para una pequeña razón de aspecto (z/Rh) el esfuerzo vertical se asemeja al esfuerzo litoestático. Sin embargo, a medida que la razón de aspecto aumenta, la carga vertical se aleja del esfuerzo litoestático, producto de la distribución de esfuerzos hacia las paredes.

En términos prácticos, se puede afirmar que los esfuerzos verticales son también función del área productiva.

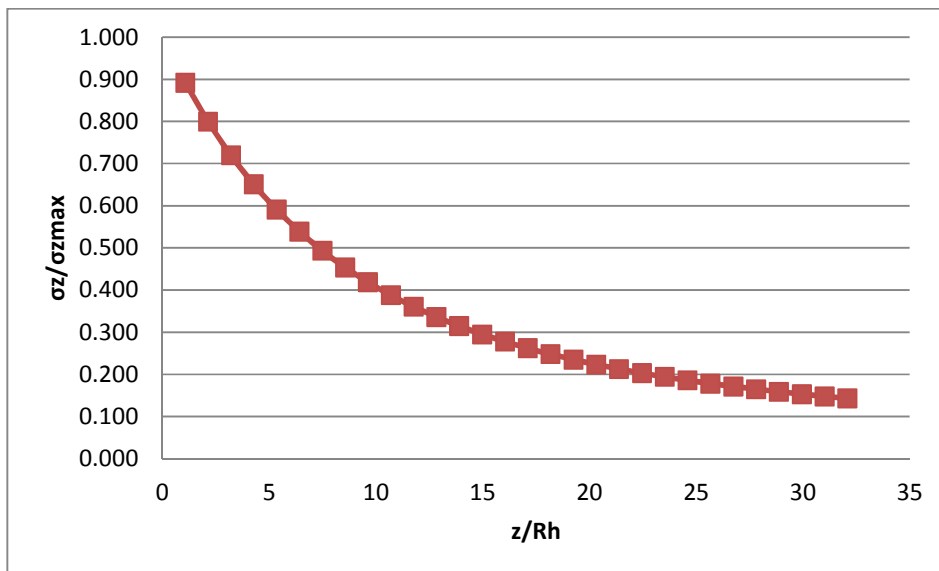


Figura 39 : Efecto del radio hidráulico en los esfuerzos verticales.

Como ejemplo, se considera una mina de *block caving* con el objetivo de producir 35.000 tpd usando una tasa de extracción de 0,5 ton/m²-día. Para alcanzar esto, se requiere un área productiva de 70.000 m². Si el área se considerase cuadrada, el radio hidráulico a utilizar sería de 66 m. Si se considera una altura de columna de 1.000 m de roca hundida (esponjamiento de 30%), el esfuerzo vertical medio sería de 6.48 MPa.

La Tabla 3.2 considera el esfuerzo vertical medio a partir de la ecuación de Janssen para diferentes profundidades considerando un radio hidráulico de 66 m.

De acuerdo a la calibración realizada por IDIEM (Anexo A) se relaciona la presión medida por el transductor de presión y la carga de la prensa.

Tabla 4 : Rango de las cargas verticales a aplicar, de acuerdo con Janssen (Ecuación 1)

Profundidad [m] Rh=66m,	Esfuerzo vertical medio [MPa]	Carga Prensa [KN]
100	1.63	115
200	2.87	203
300	3.83	271
500	5.12	362
700	5.88	416
1000	6.48	458
1500	6.84	483

3.3.3 Desplazamiento del pistón

A medida que la prensa comienza a ejercer la carga sobre el material, el pistón se comienza a desplazar, movimiento que es medido mediante un dial de deformación (Figura 40). De esta forma se puede medir el grado de compactación final del material como la diferencia entre la densidad inicial de llenado del cilindro y la densidad final dada por el desplazamiento del pistón.

$$\text{Grado de compactación} : \Delta\rho[\%] = \left(\frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_i} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{h_f}{h_i} \right) \cdot 100$$

Ecuación 14: Definición del grado de compactación.



Figura 40: Dial de deformación para medir el desplazamiento del pistón.

3.3.4 Deformación del cilindro

Para poder estimar los esfuerzos radiales como consecuencia de la carga vertical aplicada al material, se colocan 2 *strain gauge* en cada lado del cilindro de acero con el fin de medir la deformación axial y transversal (Figura 42).

Para determinar los esfuerzos radiales se utiliza la Ley de Hooke, que indica que la deformación es función de los componentes de esfuerzo mediante las constantes elásticas: módulo de Young E y la razón de Poisson ν .

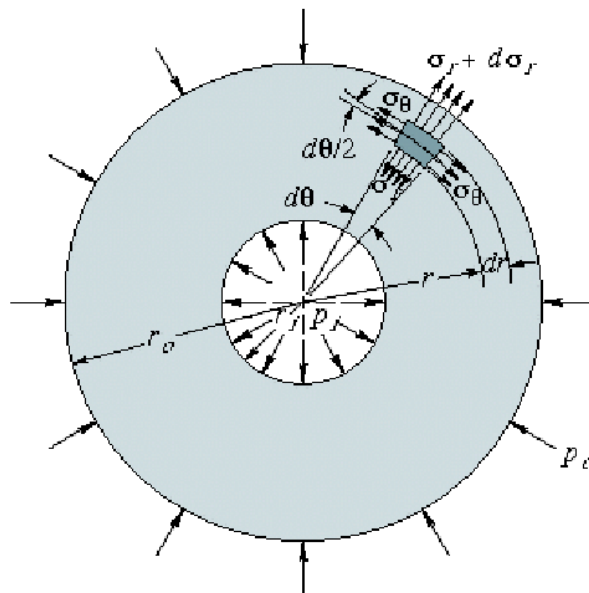


Figura 41: Coordenadas polares en un cilindro hueco.

$$\sigma_{\theta}(r) = \frac{p_i r_i^2 - p_0 r_0^2 - (p_0 - p_i) \left(\frac{r_0 r_i}{r}\right)^2}{r_0^2 - r_i^2}$$

Ecuación 15: Esfuerzo tangencial en un cilindro hueco.

$$\sigma_r(r) = \frac{p_i r_i^2 - p_0 r_0^2 + (p_0 - p_i) \left(\frac{r_0 r_i}{r}\right)^2}{r_0^2 - r_i^2}$$

Ecuación 16: Esfuerzo radial en un cilindro hueco.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta} - \nu \cdot \sigma_r}{E}$$

Ecuación 17: Ley de Hooke que relaciona la deformación con las componentes de esfuerzo y las constantes elásticas.

$$\text{Si } p_0 = 0, r = r_0$$

$$\sigma_{\theta}(r = r_0, p_0 = 0) = \frac{2p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}$$

Ecuación 18: Esfuerzo tangencial en la condición $p_0 = 0, r = r_0$.

$$\sigma_r(r = r_0, p_0 = 0) = 0$$

Ecuación 19: Esfuerzo radial en la condición $p_0 = 0, r = r_0$.

Reemplazando la Ecuación 18 y la Ecuación 19, en la Ecuación 17 y reordenando, se establece que:

$$p_i = \frac{E \cdot \varepsilon_{\theta} (r_0^2 - r_i^2)}{2r_i^2}$$

Ecuación 20: Esfuerzo radial ejercido sobre las paredes del cilindro.

El cilindro tiene dimensiones de $r_0 = 200[mm]$ y $r_i = 170[mm]$.

Las propiedades elásticas del acero se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades elásticas del acero, (Chaudhry, 1987).

Módulo de Young: E [GPa]	Módulo de Poisson: ν
210	0.27

Dado los datos anteriores, la Ecuación 20 queda expresada como:

$$p_i = 29,137.5 \cdot \varepsilon_\theta [MPa]$$

Ecuación 21: Esfuerzo radial ejercido a las paredes del cilindro en función de la deformación tangencial.

De esta forma se puede relacionar los esfuerzos verticales aplicados con los esfuerzos radiales ejercidos por el material contra las paredes del cilindro, y verificar el tipo de empuje dentro de las siguientes ecuaciones, donde se especifica el caso en reposo (K_0), caso pasivo (K_P) y caso activo (K_A).

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$$

Ecuación 22: Razón entre el esfuerzo horizontal y el esfuerzo vertical.

$$K_0 = 1 - \text{sen } \varphi$$

Ecuación 23: Razón de esfuerzos para un caso en reposo, (Craig, 2005).

$$K_P = \frac{1 + \text{sen } \varphi}{1 - \text{sen } \varphi}$$

Ecuación 24: Razón de esfuerzos para un caso pasivo, (Craig, 2005).

$$K_A = \frac{1 - \text{sen } \varphi}{1 + \text{sen } \varphi}$$

Ecuación 25: Razón de esfuerzos para un caso activo, (Craig, 2005).



Figura 42: Aplicación de *strain gauge* en el cilindro de acero.

3.3.5 Marcadores para el estudio de IEZ e IMZ

El uso de marcadores rotulados utilizando el mismo material es una técnica que ha sido probada y ha resultado exitosa al momento de realizar los experimentos en modelos físicos para medir la geometría de las zonas de flujo (Castro, 2006).

Para determinar la geometría de la zona de extracción aislada se colocan marcadores rotulados numéricamente a diferentes alturas dentro del cilindro. De esta forma al conocer la posición inicial y al registrar la masa extraída a la que sale cada marcador se puede realizar una extrapolación y estimar así la geometría de la zona de extracción (Figura 43).

Para determinar la geometría de la zona de movimiento aislada después de cada experimento, el cilindro tiene la posibilidad de ser abierto y así acceder al espécimen una vez realizado el ensayo. El IMZ es medido colocando distintas capas horizontales de marcadores de colores a diferentes alturas dentro del cilindro. Después de realizado el experimento, el cilindro se retira de la prensa hidráulica y se coloca en un posición horizontal para luego, la muestra sea cortado por la mitad y poder observar el plano central del cilindro y así observar el la geometría final del flujo. Esta técnica es necesaria, porque el modelo presenta una configuración en 3D (Figura 44).



Figura 43: Marcadores pintados y rotulados numéricamente para medir las zonas de extracción (IEZ).

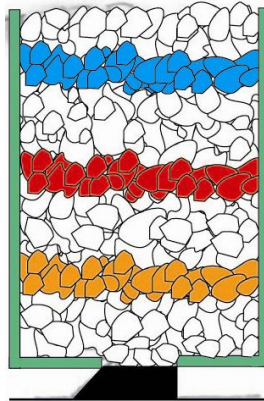


Figura 44: Marcadores pintados para observar las zonas de movimiento (IMZ).

3.4 FLUIDEZ DEL MATERIAL

Otra de las variables que se estudia durante los experimentos realizados, es la capacidad de fluir del material bajo diferentes cargas verticales. Con el objetivo de caracterizar los diferentes estados que presenta el material al fluir por la acción de la gravedad.

El material, al incurrir en compactación y ruptura al momento de fluir, puede presentar 4 estados descritos a continuación:

- *Free flow (flujo libre)*: El material fluye libremente sin interrupción debido a la acción de la gravedad a través del punto de extracción.
- *Intermittent flow (flujo intermitente)*: El material fluye con interrupciones intermitentes debido a los arcos mecánicos formados por la compactación del material. Éstos se desmoronan por el esfuerzo vertical aplicado por la prensa hidráulica.
- *Assisted flow (flujo asistido)*: Para que el material pueda fluir, es necesario perturbar los arcos mecánicos interviniéndolos manualmente.
- *No flow (sin flujo)*: El material no fluye de ningún modo, inclusive perturbándolo manualmente.

3.5 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

El procedimiento del ensayo se compone de las siguientes etapas:

1. *Preparación del material.* Antes de comenzar el experimento, el material a utilizar, en este caso grava chancada, debe ser clasificada por tamaño a través de tamices. De esta forma se obtiene la curva granulométrica pre-test.
2. *Llenado del cilindro.* En esta etapa, el material es colocado dentro del cilindro teniendo en consideración el peso del material y el volumen ocupado por el mismo, de modo de medir la densidad aparente inicial del material dentro del cilindro. Cuando se alcanza una cierta altura, se coloca una capa de marcadores rotulados con números para medir la zona de extracción. Si el objetivo del experimento fuera medir la zona de movimiento, junto con los marcadores rotulados con números se coloca una capa de marcadores diferenciados por colores.
3. *Prensa hidráulica.* Una vez que el cilindro es llenado a una cierta densidad aparente con material granular, se coloca el pistón y se procede a levantar el cilindro con un tecla y colocarlo en la prensa hidráulica. Luego se verifica que el pistón esté correctamente nivelado y se comienza el proceso de compresión hasta el rango de carga vertical estipulado por cada experimento.
4. *Carga vertical del cilindro.* El procedimiento mostrado en la Figura 45 consiste en aplicar una carga axial constante durante el test hasta que una determinada cantidad de material ha sido extraída desde el punto de extracción. Los marcadores están representados mediante la línea punteada roja y la carga aplicada está representada en azul. A su vez el desplazamiento del pistón de la prensa se mide con un dial de deformación.
5. *Proceso de extracción.* En el proceso de extracción el material es removido a través del punto de extracción con un sistema que permite cerrar la salida de material por cada ciclo de extracción. En cada ciclo de extracción el material se pesa y se revisa si hay marcadores rotulados. La cantidad de material extraído es pesado con una balanza digital, siendo éste el indicador para continuar o finalizar el proceso.
6. *Medición IMZ.* Si el objetivo del experimento fuera medir la zona de movimiento, el cilindro se llenaría con una capa marcadores diferenciados por colores a diferentes alturas, de modo que al finalizar el experimento, el cilindro se rotaría y abriría de tal forma que se observe la sección media del cilindro con la posición final de los marcadores.
7. *Capacidad de fluir del material.* Dado que el material utilizado en los experimentos está sometido a un alto nivel de esfuerzos, es probable que para niveles altos de carga vertical, el material presente colgaduras o interrupción del flujo debido a una alta compactación del mismo. En este caso, como procedimiento se plantea descolgar o intervenir la interrupción del flujo mediante un aparato que perturbe (interrumpa el equilibrio) el arco mecánico.

8. *Medición de fragmentación y compactación.* Una vez terminado el proceso de extracción del material, se registra hasta qué nivel (altura) llegó el pistón dentro del cilindro, para medir el grado de compactación del material. Para medir el grado de ruptura, se toman muestras representativas del material ensayado y se hacen pasar por tamices para así obtener la curva de granulometría post-test.

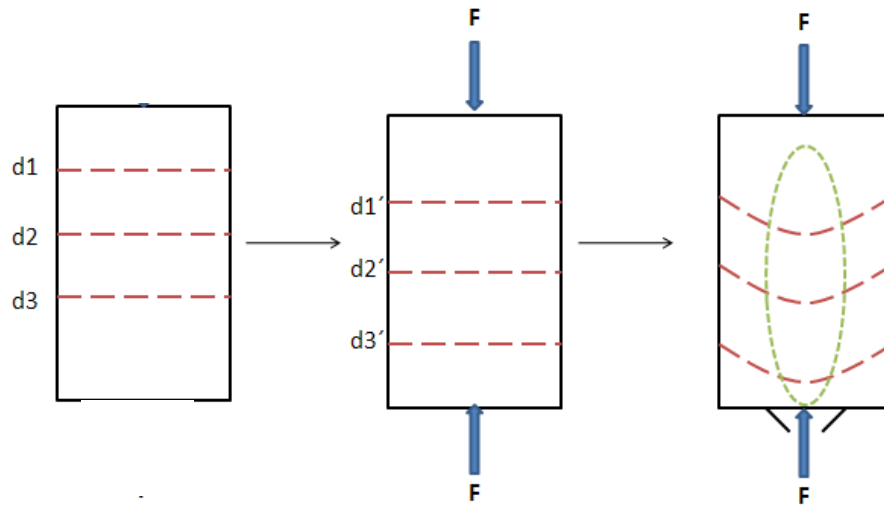


Figura 45: Carga axial aplicada en el ensayo.

3.6 CONCLUSIONES

Debido a la compleja naturaleza del flujo granular y los próximos desafíos que enfrentará la minería de *caving*, se propone estudiar el efecto de la carga vertical tanto en la geometría del flujo granular como también sobre el grado de compactación, fragmentación y la fluidez del material. Es por ello que se creó un nuevo equipo de laboratorio diseñado y construido con el objetivo estudiar el flujo gravitacional confinado, donde se puedan replicar los esfuerzos verticales existentes en la mina.

En este capítulo se describió la metodología para caracterizar cada propiedad del material a utilizar en los experimentos. Las características del material cuya metodología se describió, están:

- Granulometría, Factor de Forma e Índice de uniformidad para el material.
- Propiedades de corte a través de ensayos de corte directo.
- Propiedades de resistencia a través de ensayos de carga puntual.

Además se presenta la metodología para determinar el rango de carga vertical a aplicar en los experimentos, a través de la solución Janssen para esfuerzos verticales en silos.

Se detalla la metodología para medir las siguientes variables que se presentan en los experimentos del flujo granular confinado:

- Geometría de la zona de movimiento y extracción.
- Grado de compactación del material.
- Ruptura del material.
- Fluidez del material.

Dado que no existen estudios donde se explique un procedimiento establecido para estudiar el efecto de la carga vertical en el flujo granular, se estableció el procedimiento para realizar los experimentos de flujo granular confinado.

En el próximo capítulo se presentan y analizan los resultados de los experimentos realizados bajo un tiraje aislado, considerando un rango amplio de carga vertical aplicada al flujo granular, utilizando la metodología recién planteada.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTO: FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirán los experimentos de flujo gravitacional de material granular confinado realizados en esta investigación para un tiraje de extracción aislada. Este capítulo se divide en dos secciones. En la primera sección se describen las propiedades principales del material utilizado y se detalla cada experimento realizado junto con sus objetivos. En la segunda sección se muestra el análisis de los resultados de cada experimento, tomando en cuenta el efecto que tienen las distintas variables que se consideran relevantes en el estudio del flujo gravitacional de material confinado.

4.2 MATERIAL

4.2.1 Distribución de tamaño

Los experimentos realizados en esta investigación utilizan como material grava chancada comprada en una tienda local. Durante la etapa experimental, dos tipos de material fueron utilizados con distintas distribuciones de tamaño de fragmentos ($d_{50} = 6$ mm y 11 mm). La relación entre el tamaño medio de la partícula y el diámetro del punto de extracción fue de 16.7 y 9.1 respectivamente. Los índices de uniformidad son de 1.74 para el material $d_{50} = 6$ mm y de 1.17 para el material $d_{50} = 11$ mm. Las distribuciones granulométricas del material son presentadas en la Figura 46.

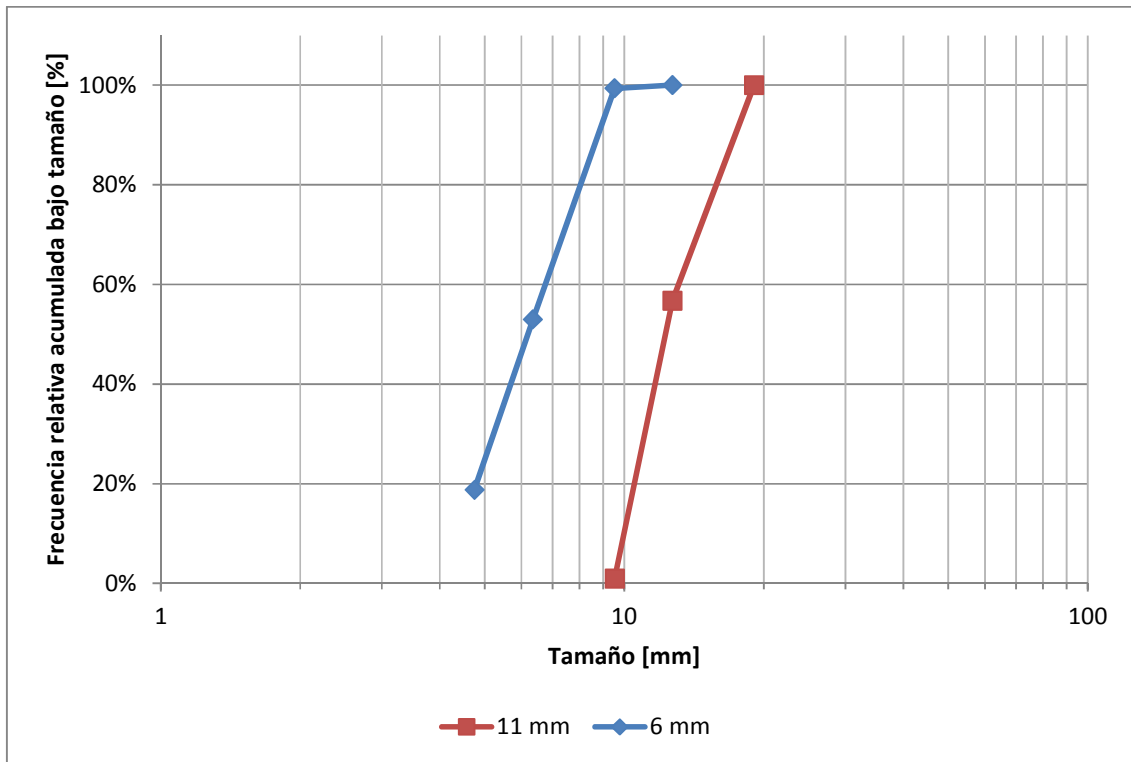


Figura 46: Distribución granulométrica del material $d_{50} = 6$ mm y 11 mm.

4.2.2 Factor de forma

Para obtener el factor de forma se utiliza la metodología de Barret (1980) explicada por Cho et al. (2006) en el que se toman 33 muestras aleatorias del material a ensayar, en este caso, grava chancada. Para determinar la esfericidad de la muestra se circunscribe el círculo menor y se inscribe el círculo mayor. Para determinar la redondez se inscriben círculos en cada curvatura de la muestra. En la Figura 1 se muestran los círculos descritos aplicados a una muestra.

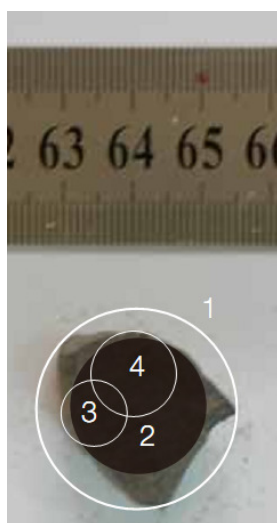


Figura 47: Factor de forma según Cho et al. (2006) de grava chancada de 20 mm.

Los resultados del factor de forma aplicada a las muestras de grava chancada se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 : Resultados de factor de forma para el material a utilizar en la investigación.

Factor	Grava
Esfericidad	0.66
Redondez	0.48

De acuerdo a Barret (1980) el factor de forma sería independiente del tamaño característico (d_{50}) de la muestra.

Los resultados de esfericidad y redondez se aplican en la matriz de factor de forma modificada por Hoz (2007) que se muestra en la Figura 48.

A partir de los valores de esfericidad y redondez se determina que el material a utilizar en los experimentos presenta fragmentos *subangulosos* y *redondeados*.

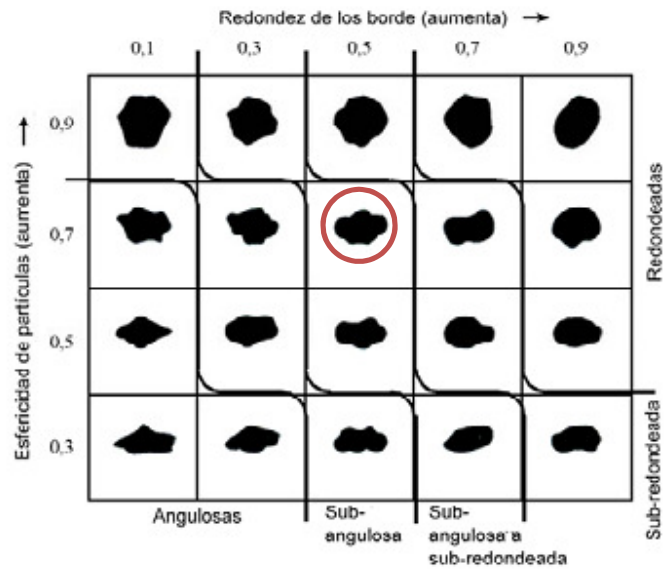


Figura 48: Factor de forma para el material utilizado en los experimentos (Hoz, 2007).

4.2.3 Propiedades de corte

Las propiedades de resistencia al corte del material ($d_{50} = 11$ mm) fueron determinadas a partir de un ensayo de corte directo utilizando una caja de corte de 300 mm x 300 mm. Las muestras fueron sometidas a diferentes fuerzas normales variando desde 0.5 a 10 kg/cm². De los resultados presentados en la Figura 49 se puede apreciar que el material granular no presenta cohesión y que se ajusta bien usando la función lineal del criterio de corte de Mohr-Coulomb. Considerando este criterio, el ángulo de fricción interno residual y peak del material ($d_{50} = 11$ mm) fue de 42° y 48° respectivamente.

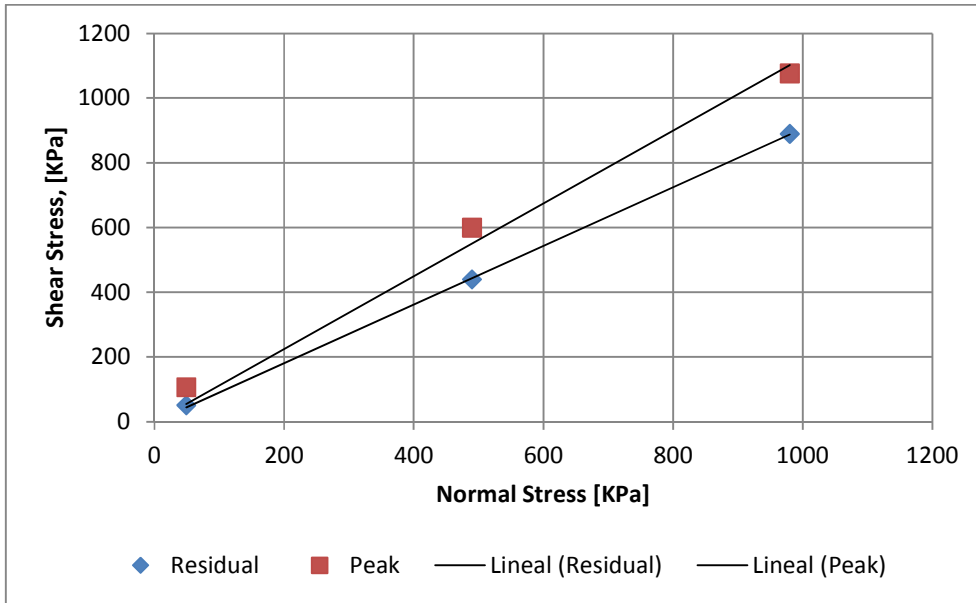


Figura 49: Resistencia al corte peak y residual del material.

El criterio falla por corte de Mohr-Coulomb entrega una buena estimación del ángulo de fricción residual para un rango de esfuerzos normales altos, pero no entrega información del efecto de la dilatancia sobre la resistencia al corte para bajos confinamientos (Castro, 2006).

La Figura 50 muestra los desplazamientos horizontales y verticales para diferentes confinamientos.

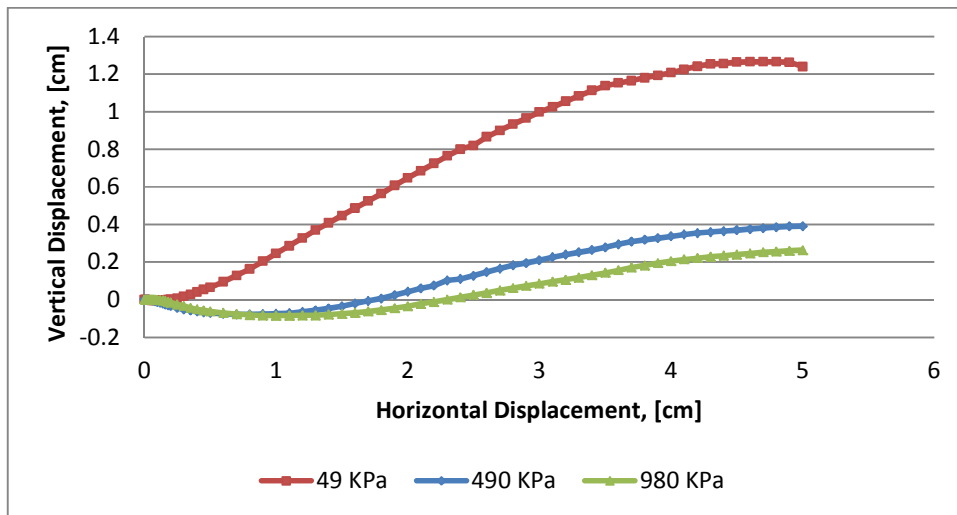


Figura 50: Desplazamiento horizontal y vertical del material.

Se puede apreciar que entre mayor es el esfuerzo normal aplicado, el material presenta mayor compactación implicando un ángulo de dilatancia menor. Esto se debe a que los fragmentos, al estar bajo un mayor confinamiento, no tienen la capacidad de dilatar, por lo

que pueden sobreponer el bloque interno entre sus vecinos e inclusive pueden llegar a fragmentarse.

De esto se desprende que el comportamiento del material va a depender directamente del nivel de esfuerzos en el que se encuentre.

4.2.4 Propiedades de resistencia a la compresión

En la Tabla 7 se muestran los resultados para los fragmentos ensayados mediante el test de carga puntual realizados por Orellana (2012).

Tabla 7: Resultados ensayo carga puntual grava chancada.

Distancia entre puntas [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De ² [mm]	De [mm]	Is [Mpa]	Factor de corrección	Is 50 [Mpa]	Muestra falla por
15.7	27.28	9.2	545.32	23.35	16.87	0.71	11.98	Matriz
20.4	24.87	10.61	645.98	25.42	16.42	0.74	12.11	Matriz
21.5	21.54	9.9	589.65	24.28	16.79	0.72	12.13	Matriz
14.5	25.43	8.49	469.49	21.67	18.08	0.69	12.41	Matriz
18.1	21.34	12.03	491.79	22.18	24.46	0.69	16.97	Matriz
20.5	21.43	14.15	559.35	23.65	25.30	0.71	18.06	Matriz

En la Figura 51 se muestran los fragmentos del material que fueron ensayados y de qué forma fallaron.



Figura 51: Ensayo de carga puntual antes y después del test donde las muestras fallan por matriz.

En la Tabla 8 se resumen las propiedades del material ($d_{50} = 11\text{mm}$) utilizado en los experimentos.

El ángulo de dilatancia se determinó a partir de la metodología descrita en el Capítulo 3, a través de un ensayo de corte directo. (Anexo B)

Tabla 8: Resumen de las propiedades del material ($d_{50} = 11\text{mm}$) utilizado durante los ensayos.

Material	d_{50} [mm]	Cu	Resistencia a la carga puntual, I_s [MPa]	Esfuerzo vertical inicial [KPa]	Ángulo de fricción, ϕ_{peak}	Ángulo de fricción, ϕ_{residual}	Ángulo de dilatancia, ψ
				49			20
11mm	11	1.17	13.9	490	48	42	10
				980			7

4.3 EXPERIMENTOS

Esta sección describe en detalle el montaje de los experimentos realizados en la investigación, con el fin de cumplir los objetivos propuestos en el Capítulo 1.

En la Figura 52 y Figura 53, se observa una vista en planta y un perfil de la posición de los marcadores para medir la geometría de IEZ respectivamente.

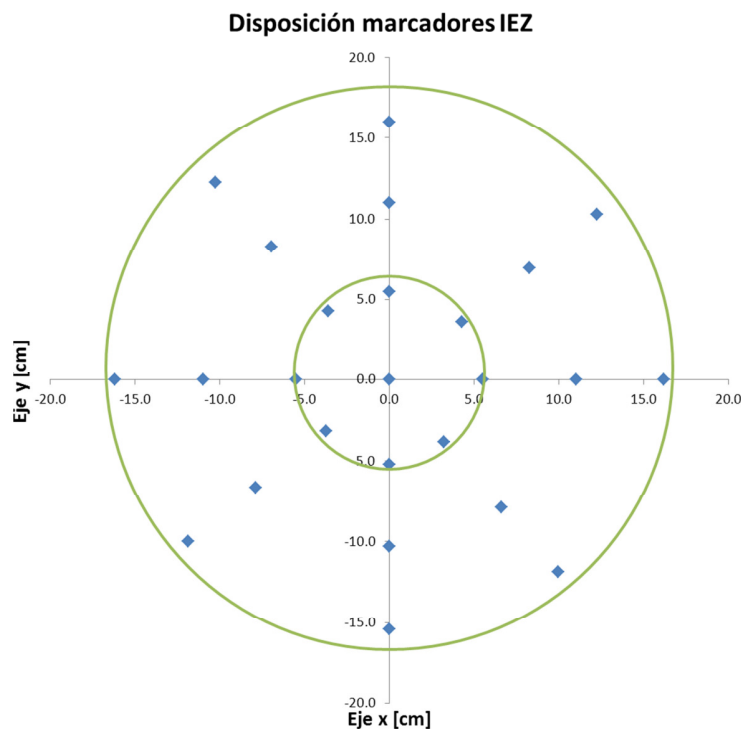


Figura 52: Vista en planta de la disposición de marcadores para IEZ.

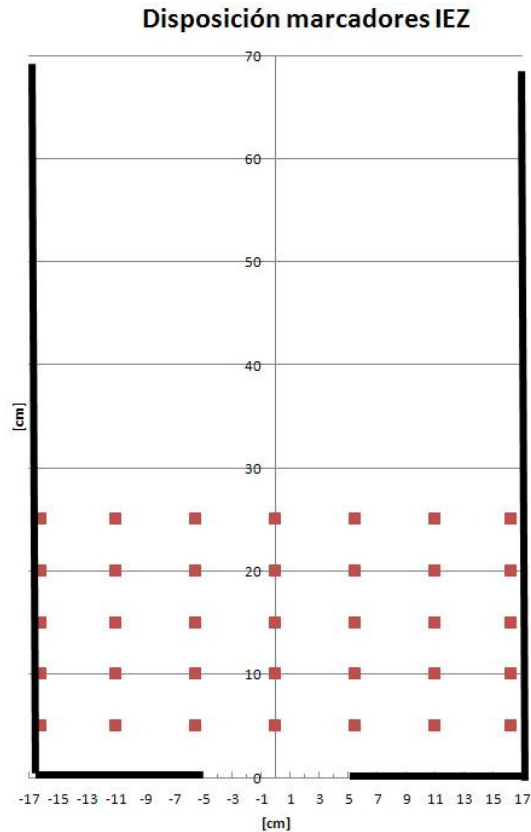


Figura 53: Perfil de la disposición de marcadores para IEZ.

4.3.1 Experimento 1 y 2

El experimento 1 fue el primero realizado con el equipo de laboratorio, por lo que se trató de un experimento de prueba. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³]. En el experimento no se aplicó carga vertical y se utilizó el tamaño de material $d_{50} = 6\text{mm}$. El objetivo fue estudiar la zona de movimiento IMZ. El experimento 2 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 1, estudiando solamente la zona de extracción IEZ.

4.3.2 Experimento 3 y 4

El experimento 3 se realizó con el tamaño de material $d_{50} = 6\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ, considerando una carga vertical aplicada por la prensa de 180 KN. Si se considera que la fuerza aplicada por la prensa se distribuye completamente en el pistón, la presión ejercida por la prensa es equivalente a 2.5 MPa. El experimento 4 se realizó con el objetivo de replicar el experimento 3 estudiando la capacidad de fluir, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.3 Experimento 5 y 6

El experimento 5 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=6\text{mm}$ con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ considerando una carga vertical de 270 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 3.8 MPa. El experimento 6 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 5 estudiando la capacidad de fluir, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que se llenó el cilindro con material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.4 Experimento 7 y 8

El experimento 7 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=6\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de movimiento IMZ y la zona de extracción IEZ considerando una carga vertical de 530 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 7.5 MPa. El experimento 8 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 7, estudiando la capacidad de fluir, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que el cilindro se llenó del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.5 Experimento 9 y 10

El experimento 9 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=6\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ considerando una carga vertical de 1200 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 17 MPa. El experimento 10 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 9, estudiando la capacidad de fluir, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.6 Experimento 11

El experimento 11 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=6\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la movilidad del material y determinar la presión donde el material ya no podía fluir. El esfuerzo vertical aplicado para tal condición fue de 17.4 MPa. Dado que el material no fluía, no hubo registro de marcadores extraídos. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.7 Experimento 12 y 13

El experimento 12 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=11\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de movimiento IMZ y la zona de extracción IEZ considerando una carga vertical de 0 KN. El experimento 13 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 12, estudiando la capacidad de fluir del material, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.8 Experimento 14

El experimento 14 se realizó con el tamaño de material $d_{50}=11\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ, fragmentación, capacidad de fluir del material y grado de compactación, considerando una carga vertical aplicada por la prensa de 180 KN. Si se considera que la fuerza aplicada por la prensa se distribuye completamente en el pistón, la

presión ejercida por la prensa es equivalente a 2.5 MPa. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.9 Experimento 15 y 16

El experimento 15 se realizó con el tamaño de material $d_{50}= 11\text{mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ considerando una carga vertical de 270 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 3.8 MPa. El experimento 16 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 15, estudiando la capacidad de fluir del material, fragmentación y grado de compactación. La densidad con la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.10 Experimento 17 y 18

El experimento 17 se realizó con el tamaño de material $d_{50}= 11 \text{ mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de extracción IEZ, considerando una carga vertical de 530 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 7.5 MPa. El experimento 18 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 17, estudiando la capacidad de fluir del material, fragmentación y grado de compactación. La densidad de llenado del cilindro con material fue de 1.5 [g/cm³].

4.3.11 Experimento 19 y 20

El experimento 19 se realizó con el tamaño de material $d_{50}= 11 \text{ mm}$, con el objetivo de estudiar la zona de movimiento IMZ, considerando una carga vertical de 1200 KN y una presión equivalente ejercida por la prensa de 17 MPa. El experimento 20 fue realizado con el objetivo de replicar el experimento 19, estudiando solamente la zona de extracción IEZ, capacidad de fluir del material, fragmentación y grado de compactación. La densidad a la que el cilindro fue llenado del material fue de 1.5 [g/cm³].

La Tabla 9 muestra un resumen de las variables utilizadas y objetivos planteados en cada uno los experimentos realizados.

Tabla 9: Resumen de los experimentos realizados en la investigación.

Experimento	Material, d_{50} [mm]	Carga Prensa [KN]	Esfuerzo vertical aplicado [MPa]	$\frac{d_w}{d_{50}}$	Densidad aparente, ρ [Kg/m ³]	Condición de flujo	Objetivo
1,2	6	0	0	16.7	1.5	Fácil de fluir	Experimento de prueba. Medir IMZ e IEZ y la Fluidez.
3,4	6	180	2	16.7	1.5	Fácil de fluir	Medir IEZ, Fragmentación y Grado de Confinamiento y Fluidez
5,6	6	270	3	16.7	1.5	Flujo intermitente	Medir IEZ, Fragmentación, Grado de confinamiento y Fluidez.
7,8	6	530	5.8	16.7	1.5	Flujo intermitente	Medir IEZ e IMZ Fragmentación, Fluidez y Grado de confinamiento y deformación del cilindro.
9,10	6	1200	13.2	16.7	1.5	Colgaduras, flujo intermitente	Medir IEZ, Fragmentación, Grado de confinamiento, Capacidad de fluir del material y Deformación del cilindro.
11	6	1580	17.4	16.7	1.5	No hubo extracción posible	Estudiar la capacidad de fluir del material.
12,13	11	0	0	9.1	1.5	Fácil de fluir	Estudiar el efecto de un tamaño mayor en IEZ e IMZ y la Fluidez.
14	11	180	2	9.1	1.5	Flujo intermitente	Estudiar el efecto de un tamaño mayor en IEZ. Estudiar la Fragmentación, Fluidez y Grado de confinamiento.
15,16	11	270	3	9.1	1.5	Colgaduras, flujo intermitente	Estudiar el efecto de un tamaño mayor en IEZ. Medir Fragmentación, Fluidez, Grado de confinamiento y Deformación cilindro.
17,18	11	530	5.8	9.1	1.5	Colgaduras, flujo intermitente	Estudiar el efecto de un tamaño mayor en IEZ. Medir Fragmentación, Fluidez, Grado de confinamiento y Deformación cilindro.
19,20	6	1200	13.2	16.7	1.5	No hubo extracción posible	Estudiar el efecto de un tamaño mayor en IMZ e IEZ. Medir la fragmentación, Grado de confinamiento, Capacidad de fluir del material y deformación del cilindro.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Experimentos con material $d_{50} = 6\text{ mm}$.

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos realizados con el material $d_{50} = 6\text{ mm}$. Los resultados muestran las geometrías de las zonas de movimiento en los experimentos donde se estudió esta variable y se muestran las zonas de extracción a través de los marcadores extraídos, en función de la masa extraída para diferentes esfuerzos verticales aplicados.

Zona de movimiento

La Figura 54 muestra la zona de movimiento para el material $d_{50} = 6\text{ mm}$ para flujo granular sin efecto del esfuerzos vertical aplicado y para un esfuerzo vertical de 5.8 [MPa] . Para el caso sin aplicación de la carga vertical, se puede observar una geometría de forma elipsoidal de la zona de movimiento donde el ancho de la zona de movimiento no alcanza a tocar las paredes del cilindro, por lo que no existe un efecto de la condición de borde del cilindro en la geometría de la zona de flujo. Para el caso donde se aplicó un esfuerzo vertical de 5.8 [MPa] no se alcanza a apreciar una geometría de forma elipsoidal, es más, se presenta un flujo caótico que no llega a desarrollarse hasta la parte superior del cilindro. Este efecto se puede deber en parte a que la fluidez del material presenta un estado de flujo intermitente debido a los arcos mecánicos formados por la compactación del material, que se desmoronan debido al esfuerzo vertical aplicado por la prensa hidráulica.



Figura 54: Geometría IMZ para un esfuerzo vertical = 0 MPa (izq.) y un esfuerzo vertical = 5.8 MPa (der.) para $d_{50} = 6\text{ mm}$.

Zona de extracción

A continuación se muestran las zonas de extracción en dos secciones, una paralela y otra perpendicular a la dirección de extracción, a través de los marcadores extraídos en función de la masa extraída, para diferentes esfuerzos verticales aplicados.

En la Figura 55 se puede observar que, para el caso donde no hay un esfuerzo vertical aplicado, se respeta una geometría elipsoidal en la sección paralela a la dirección de extracción donde los marcadores van siendo extraídos de menor a mayor altura a medida que la masa extraída es mayor.

En la Figura 56, Figura 57 y Figura 58 se muestra la ubicación de los marcadores extraídos en función de la masa extraída para los casos en que la carga vertical fue de 2,3 y 5.8 [MPa], respectivamente. En este caso no se logra observar un efecto significativo en la geometría final de la zona de extracción producto del esfuerzo vertical aplicado. Sin embargo se puede observar que existe una cierta aleatoriedad en el orden que los marcadores fueron extraídos, en función de la masa extraída.

En la Figura 59, que muestra la geometría de la zona de extracción con un esfuerzo vertical aplicado de 13.8 [MPa], se puede observar que la mayor altura de marcadores extraídos es 20 cm. y no 25 cm. como en los casos anteriores. Este efecto se puede deber a la compactación que logra el material una vez aplicada la carga y el que a medida que fluye no alcanza la dilatancia suficiente para que los marcadores superiores alcancen a ser extraídos.

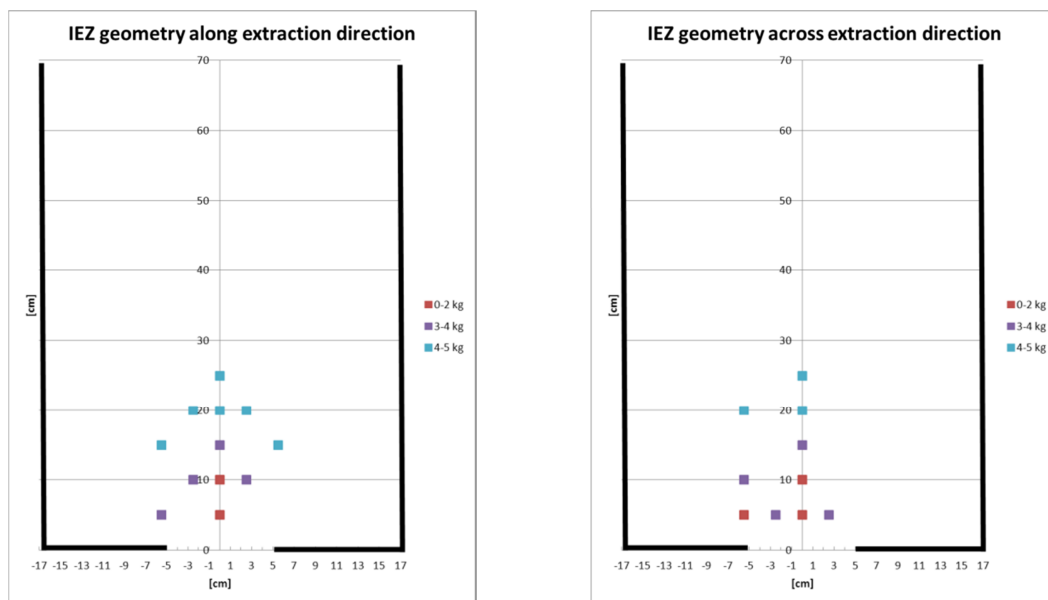


Figura 55: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 0 MPa para $d_{50} = 6$ mm.

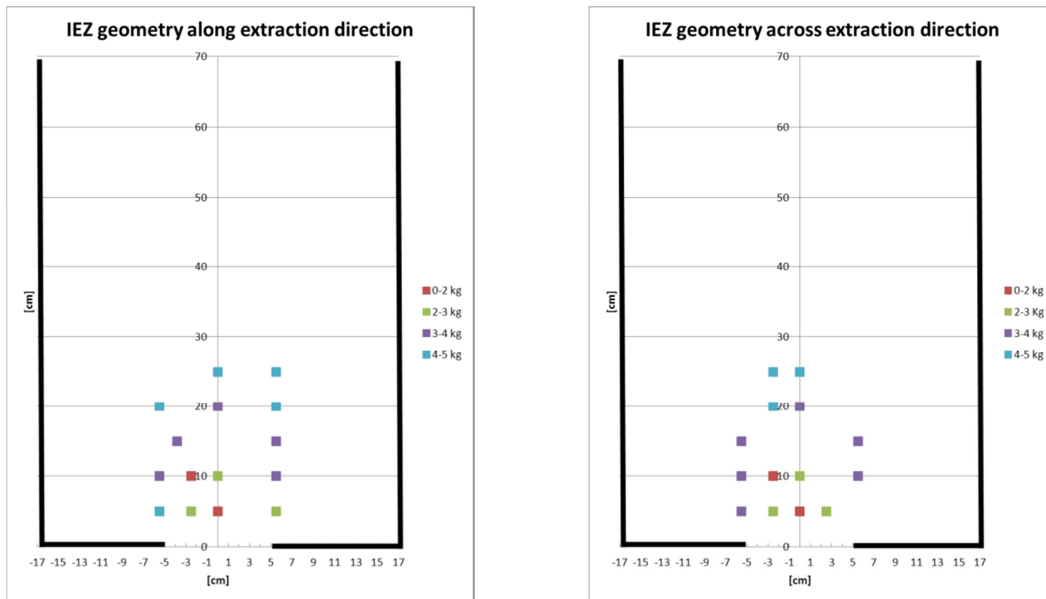


Figura 56: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 2 MPa para $d_{50} = 6$ mm.

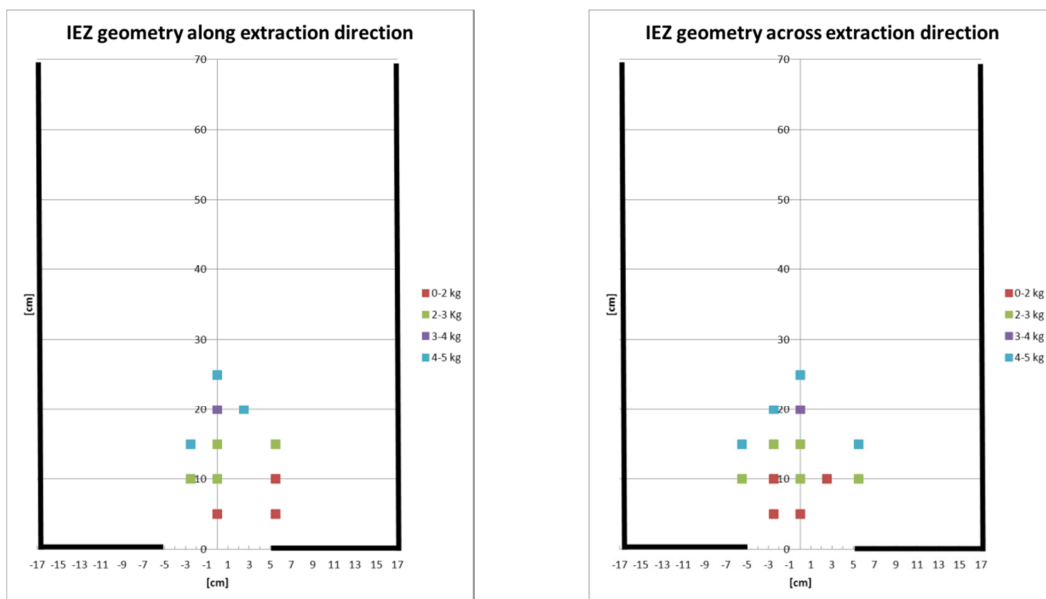


Figura 57: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 3 MPa para $d_{50} = 6$ mm.

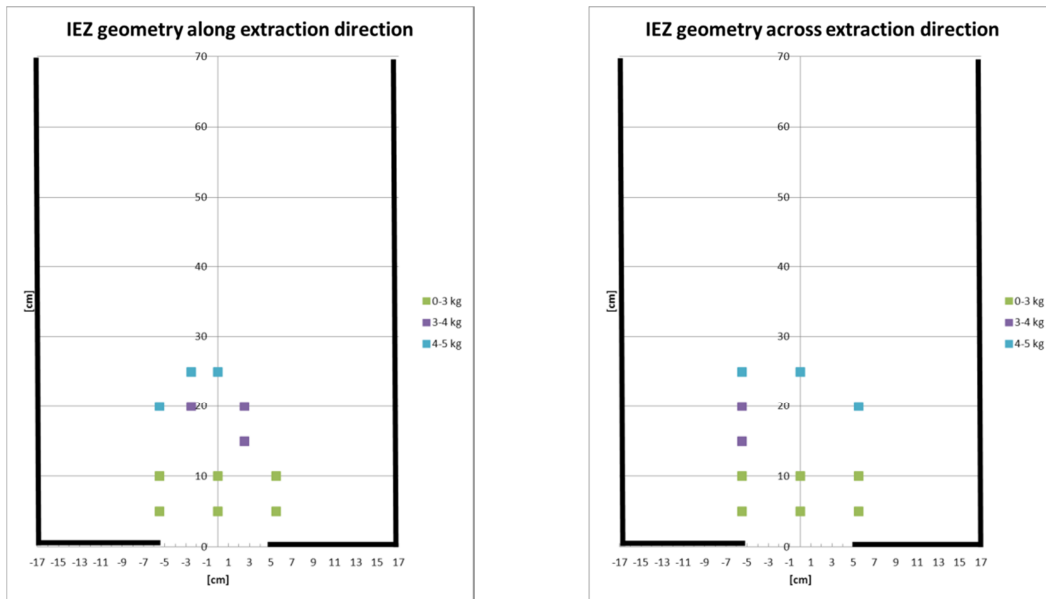


Figura 58: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 5.8 MPa para $d_{50} = 6$ mm.

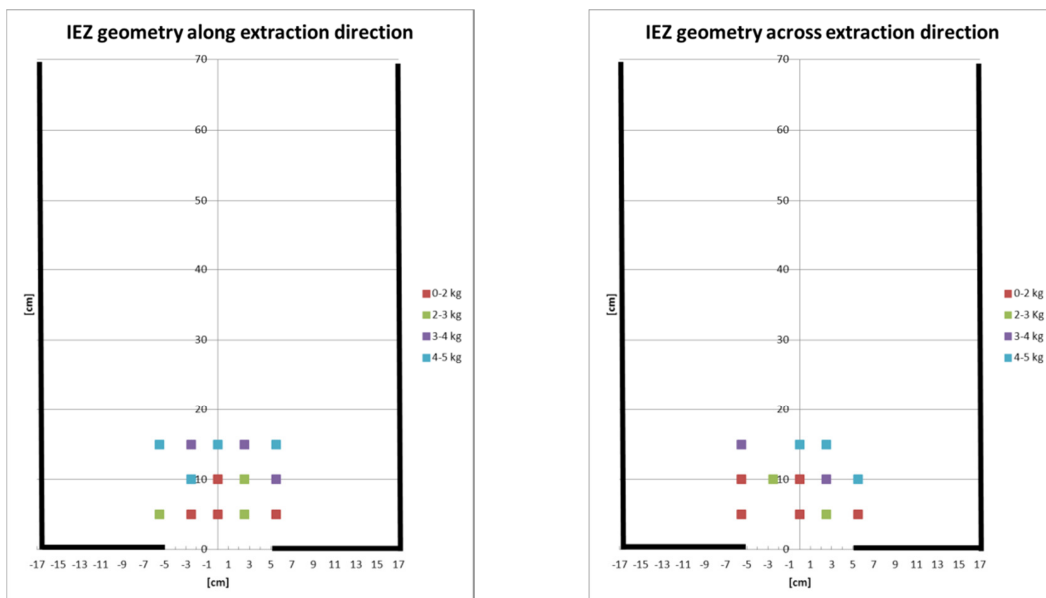


Figura 59: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 13.2 MPa para $d_{50} = 6$ mm.

4.4.2 Experimentos con material $d_{50} = 11$ mm.

En esta parte se muestran los resultados de los experimentos realizados con el material $d_{50} = 11$ mm. Los resultados muestran las geometrías de las zonas de movimiento en los experimentos donde se estudió esta variable y se muestran las zonas de extracción a través de los marcadores extraídos en función de la masa extraída para diferentes esfuerzos verticales aplicados.

Zona de movimiento

La Figura 60 muestra la zona de movimiento para el material $d_{50} = 11$ mm para flujo granular sin efecto del esfuerzo vertical aplicado y para un esfuerzo vertical de 13.2 [MPa]. Para el caso sin aplicación de la carga vertical, se puede observar una geometría de forma elipsoidal de la zona de movimiento donde el ancho de la zona de movimiento no alcanza a tocar las paredes del cilindro, por lo que no existe un efecto de la condición de borde del cilindro en la geometría de la zona de flujo. Para el caso donde se aplicó un esfuerzo vertical de 13.2 [MPa] se puede observar cualitativamente el grado de compactación alcanzado por el material a ese nivel de carga. En este caso no se alcanza a apreciar ninguna geometría de la zona de movimiento porque no fue posible la extracción de material, esto debido a que la fluidez del material presenta un estado de “no flujo”, donde los arcos mecánicos no son posibles de intervenir, debido a la alta compactación por el esfuerzo vertical aplicado por la prensa hidráulica.



Figura 60: Geometría IMZ para un esfuerzo vertical = 0 MPa (izq.) y un esfuerzo vertical = 13.2 MPa (der.) para $d_{50} = 11$ mm.

Zona de extracción

A continuación se muestran las zonas de extracción en dos secciones, una paralela y otra perpendicular a la dirección de extracción, a través de los marcadores extraídos en función de la masa extraída para diferentes esfuerzos verticales aplicados.

En la Figura 61 se puede observar que para el caso donde no hay un esfuerzo vertical aplicado, se respeta una geometría elipsoidal en la sección paralela a la dirección de extracción, donde los marcadores van siendo extraídos de menor a mayor altura a medida que la masa extraída es mayor.

En la Figura 62 se presenta el caso donde el esfuerzo vertical aplicado es de 2 [MPa], donde existe un efecto leve de la carga aplicada en la geometría final de la zona de extracción, donde ésta alcanza una altura final de 20 cm. con respecto a los marcadores extraídos.

Este efecto es similar para los casos donde el esfuerzo vertical aplicado es de 3 y 5.8 [MPa] representados en la Figura 63 y Figura 64 respectivamente, se puede observar un efecto mayor en la geometría final de la zona de extracción en la que la altura llega a alcanzar los 15 cm con respecto a los marcadores extraídos.

El efecto de la carga vertical en las geometrías finales de la zona de extracción es consistente con la compactación y fragmentación que sufre el material una vez aplicada la carga y el comienzo de la extracción, donde el material, a medida que fluye, se encuentra confinado, por lo que no tiene la capacidad suficiente para dilatar, lo que en definitiva se demuestra en una zona de extracción menor.

Con respecto a la secuencia en que van siendo extraídos los marcadores a medida que aumenta la masa extraída, existe una cierta aleatoriedad a medida que aumenta el esfuerzo vertical aplicado en cada experimento. Esta característica de flujo caótico se ha apreciado en las últimas observaciones al campo cercano realizadas en los experimentos hechos a escala mina analizados por Brunton et al. (2012), ellos atribuyen esta característica a la interacción que existiría entre los fragmentos más gruesos y más pequeños durante el flujo de material, donde podría existir migración de finos y así los fragmentos más pequeños fluir más rápido y alrededor de los fragmentos más grandes.

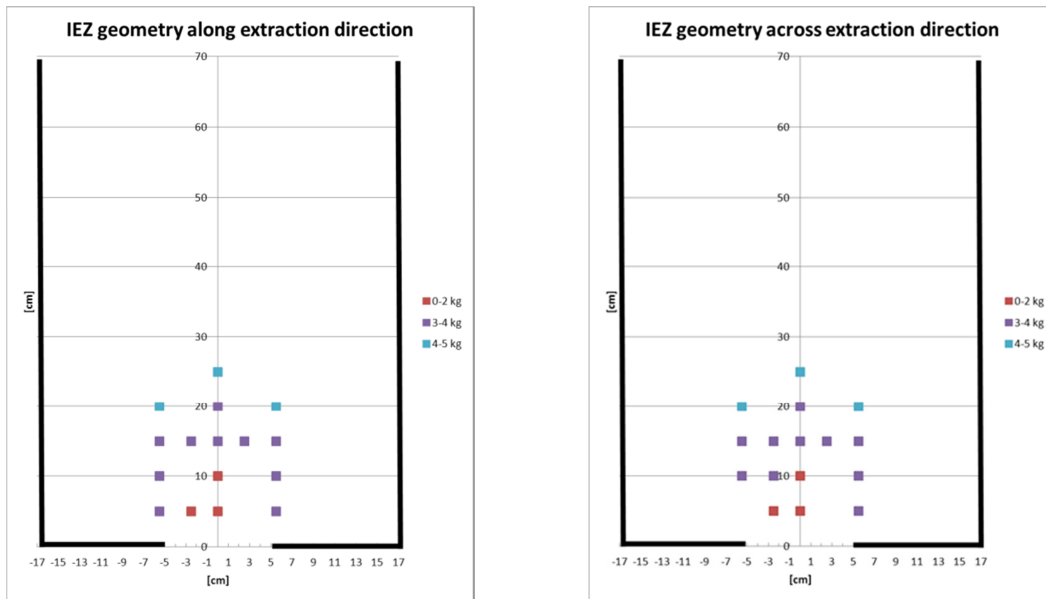


Figura 61: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 0 MPa para $d_{50} = 11$ mm.

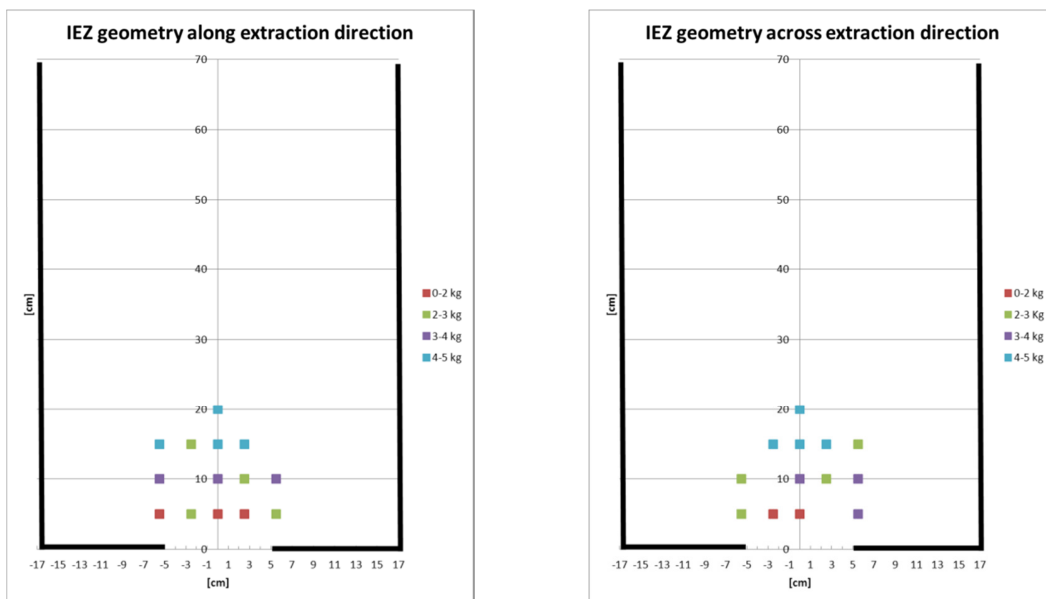


Figura 62: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 2 MPa para $d_{50} = 11$ mm.

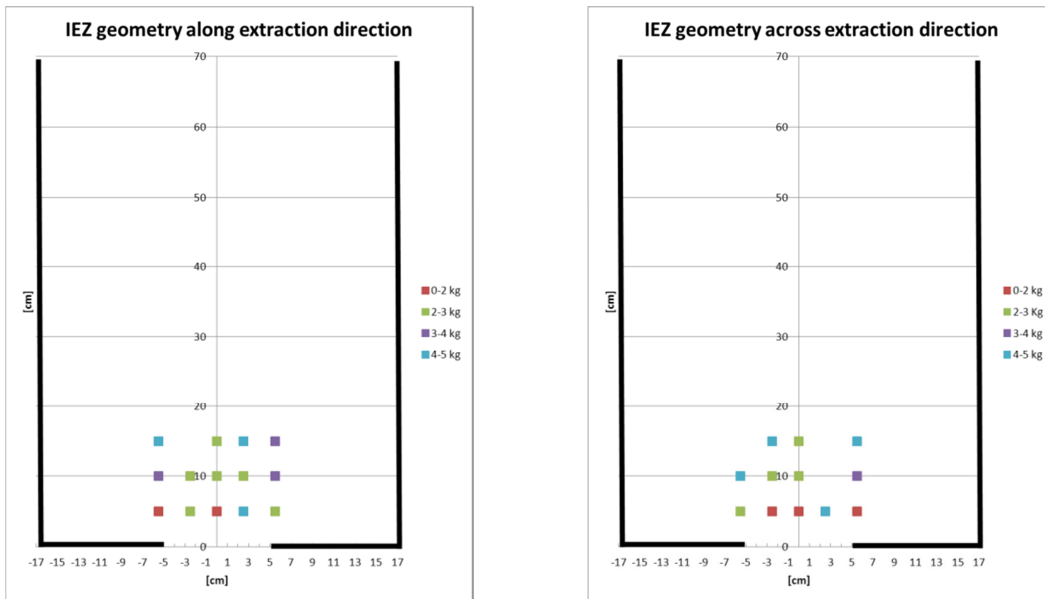


Figura 63: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 3 MPa para $d_{50} = 11$ mm.

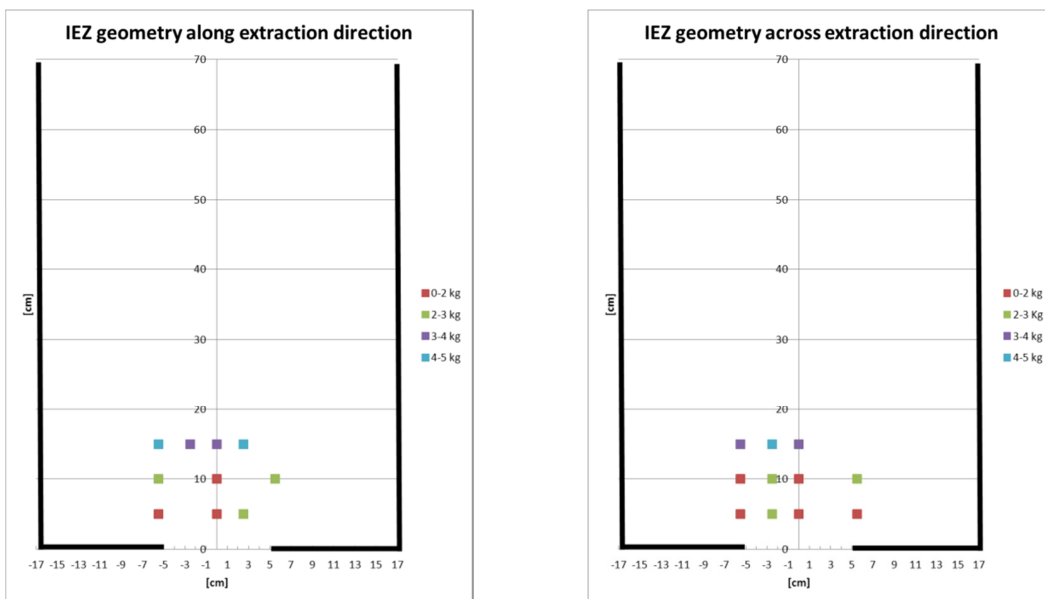


Figura 64: Geometría IEZ paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción con un esfuerzo vertical = 5.8 MPa para $d_{50} = 11$ mm.

4.5 DISCUSION GENERAL

En esta sección se discuten los resultados en los efectos que tienen el tamaño de los fragmentos y la carga vertical en la fragmentación y compactación, zonas de flujo y la fluidez del material.

4.5.1 Fragmentación y compactación del material

En la Figura 65 y la Figura 66 se muestra el efecto del aumento de la carga vertical aplicada en los experimentos en las curvas granulométricas para el material $d_{50} = 6$ mm. y $d_{50} = 11$ mm, respectivamente.

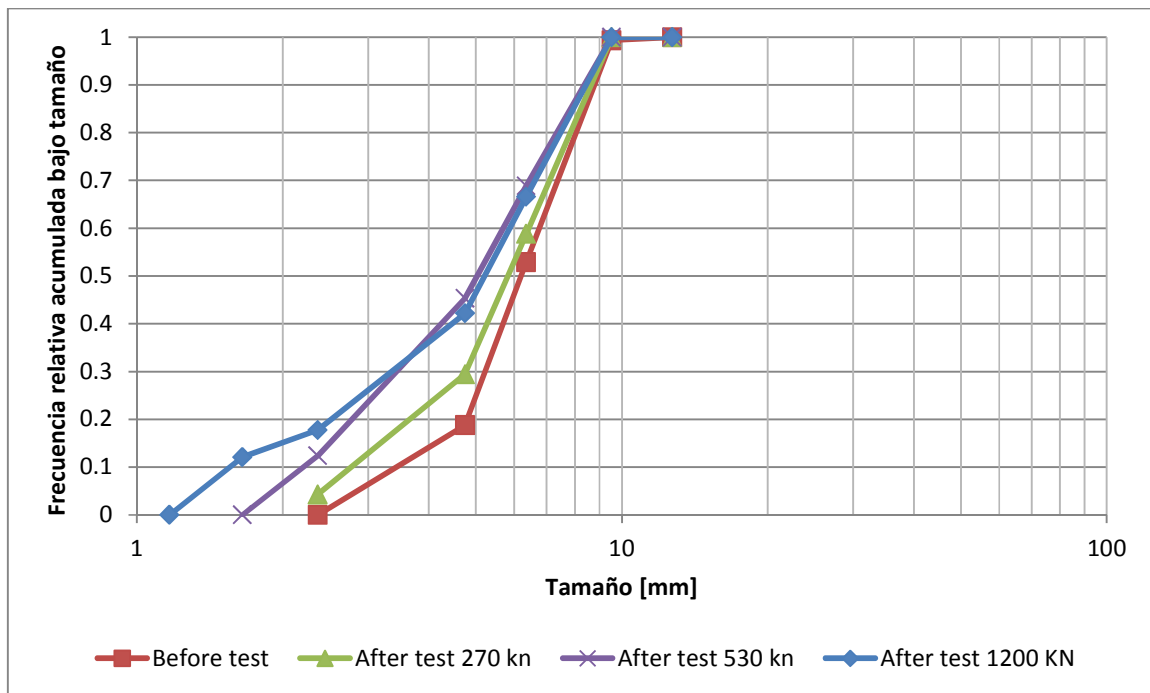


Figura 65: Efecto de la carga vertical en las curvas de granulometría para el material $d_{50} = 6$ mm.

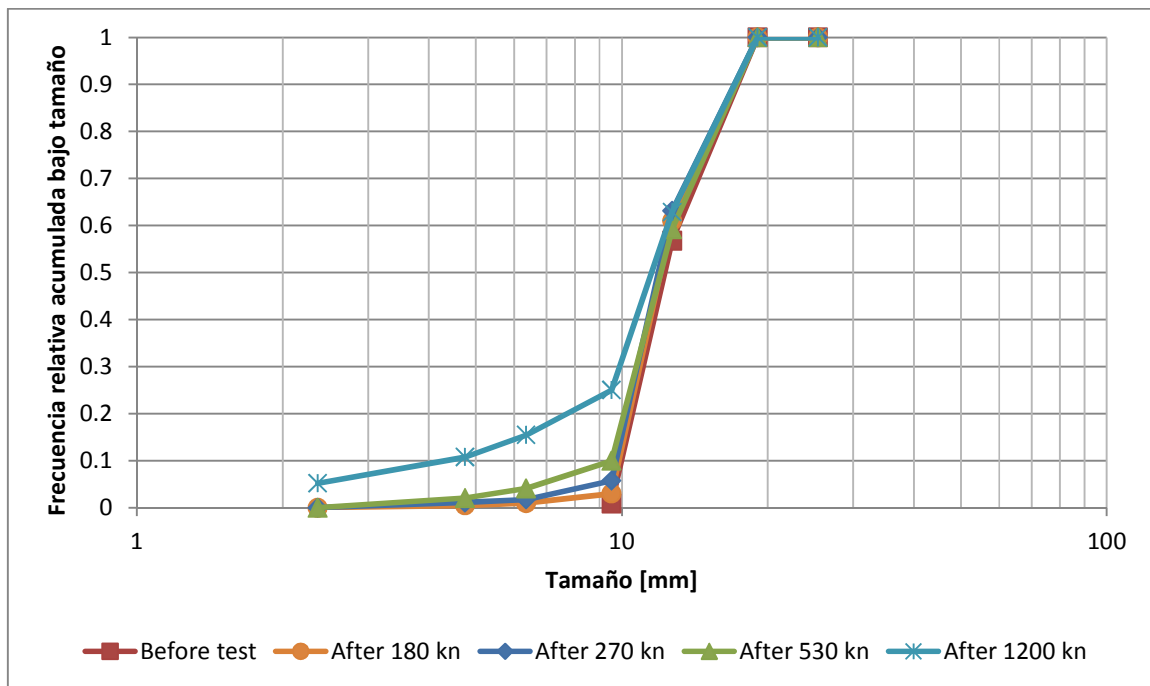


Figura 66: Efecto de la carga vertical en las curvas de granulometría para el material $d_{50} = 11\text{mm}$.

De las curvas granulométricas se puede comprobar lo que observa Fukumoto (1992). La fragmentación que ocurre afecta principalmente a las partículas medias y pequeñas de las partículas, mientras que las partículas mayores no se ven afectadas. Esto se debe a que los fragmentos mayores tienen mayor probabilidad de contacto con partículas vecinas, lo que estabilizaría a estos fragmentos reduciendo el esfuerzo inducido sobre ellos. Es por ello que las partículas medianas y pequeñas tienen menor contacto con sus partículas vecinas, lo que implicaría una mayor probabilidad de romperse.

En la Figura 67 se muestra el grado de compactación que alcanza el material $d_{50} = 6\text{ mm}$ y $d_{50} = 11\text{ mm}$ para los distintos esfuerzos verticales aplicados en los experimentos.

En la Figura 68 se muestra el índice de ruptura, descrito en el Capítulo 2, que sufre el material $d_{50} = 6\text{ mm}$ y $d_{50} = 11\text{ mm}$ para los distintos esfuerzos verticales aplicados en los experimentos.

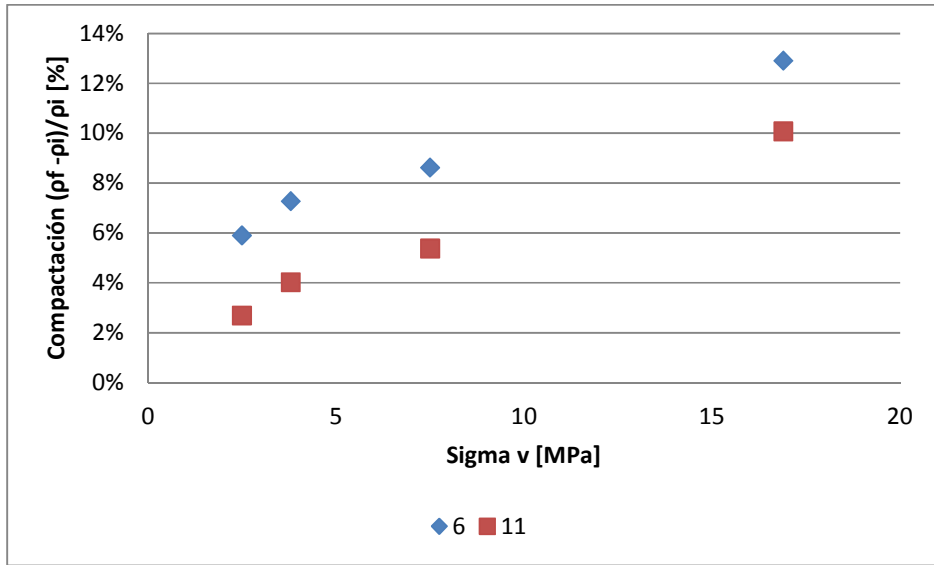


Figura 67: Efecto de la carga vertical en el grado de compactación para $d_{50} = 6\text{mm}$ y $d_{50} = 11\text{mm}$.

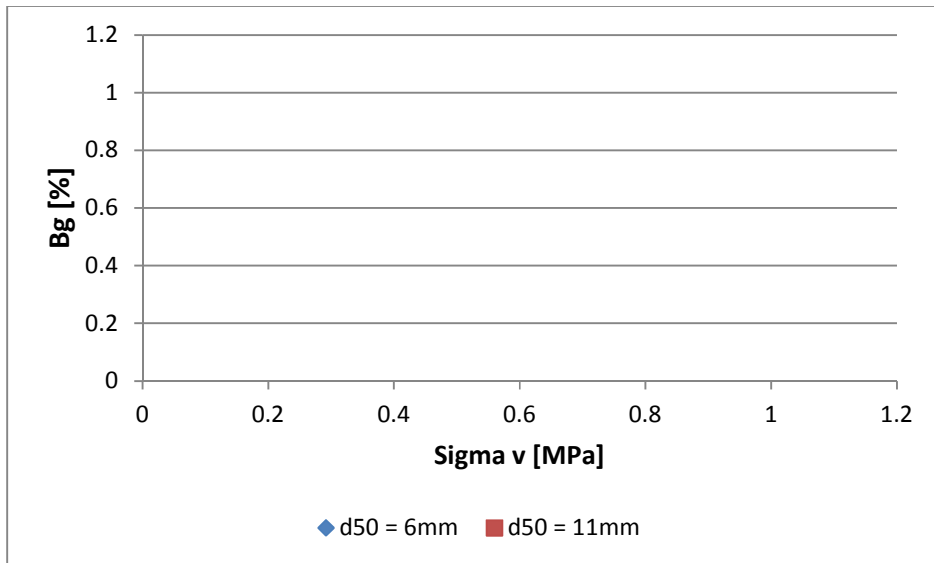


Figura 68: Efecto de la carga vertical en el índice de ruptura Bg para el material $d_{50} = 6\text{mm}$ y $d_{50} = 11\text{mm}$.

Efecto del tamaño de partícula

De la Figura 67 se puede observar, respecto al grado de compactación del material, que existe una mayor compactación para los fragmentos más pequeños que para los más grandes. Esto se debe a que los tamaños más pequeños tienen mayor posibilidad de acomodarse al tener menor número de contactos con sus vecinos.

De la Figura 68 se puede observar, respecto a la fragmentación del material, que existe un mayor grado de rotura para los fragmentos más pequeños que los más grandes. Si bien la diferencia no es tan apreciable, existe una mayor fragmentación de las partículas más pequeñas debido al menor número de contactos entre sus vecinos, lo que haría que fuesen más inestables que las partículas mayores.

Efecto de la carga vertical

De la Figura 67 se puede observar, respecto al grado de compactación del material, que a mayor carga vertical, mayor es el grado de compactación, que alcanzó un 12% de compactación para el esfuerzo vertical aplicado.

De la Figura 68 se puede observar, respecto a la fragmentación del material, que a mayor carga vertical, mayor es la ruptura que sufre el material.

4.5.2 Estimación del confinamiento

Como se discutió en el Capítulo 3, a partir de la deformación tangencial del cilindro de acero, se puede estimar la presión que ejerce el material contenido en las paredes del cilindro, así se puede establecer la relación que existe entre el esfuerzo vertical aplicado y el esfuerzo radial ejercido por la grava chancada para un $d_{50} = 6$ mm y 11 mm, como muestran la Figura 70 y la Figura 69, respectivamente.

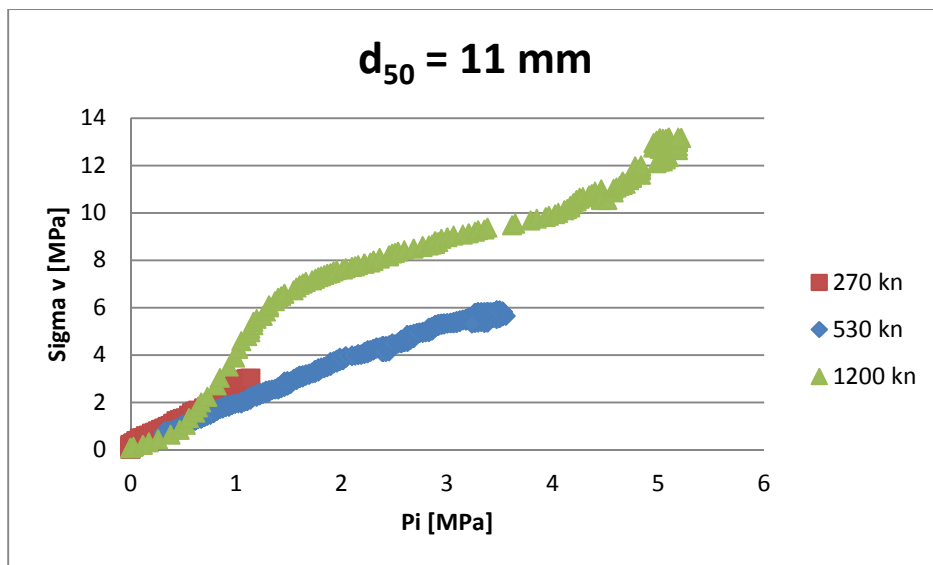


Figura 69: Comportamiento del confinamiento P_i [MPa] versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50} = 11$ mm.

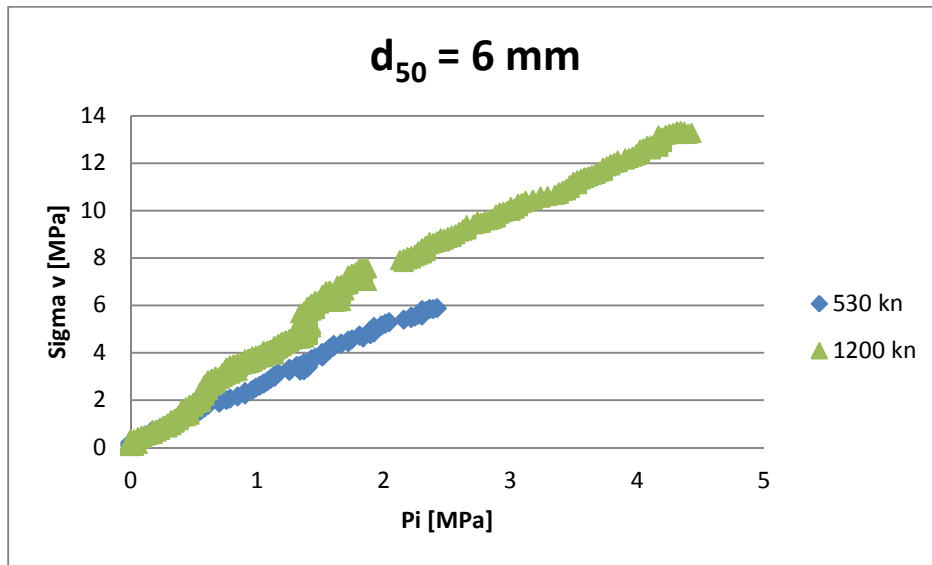


Figura 70: Comportamiento del confinamiento P_i [MPa] versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50} = 6$ mm.

De los resultados se observa que a mayor esfuerzo vertical, mayor es el esfuerzo radial que ejerce el material contra las paredes del cilindro, para ambos tamaños de fragmento.

En la Figura 71 y la Figura 72 muestran cómo varía la razón de esfuerzos K en función del esfuerzo vertical aplicado en MPa, para ambos tamaños ensayados.

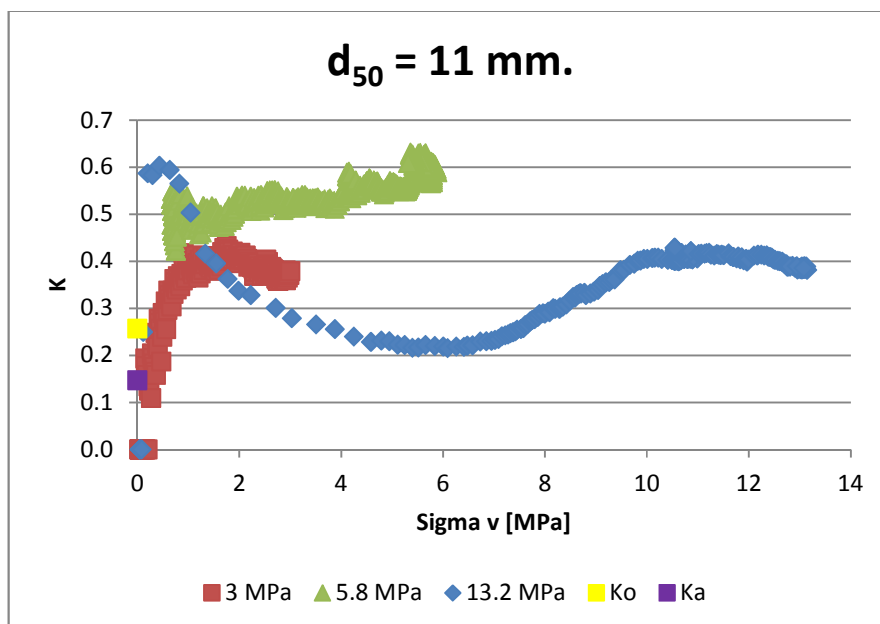


Figura 71: Comportamiento de la razón de esfuerzos K versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50} = 11$ mm.

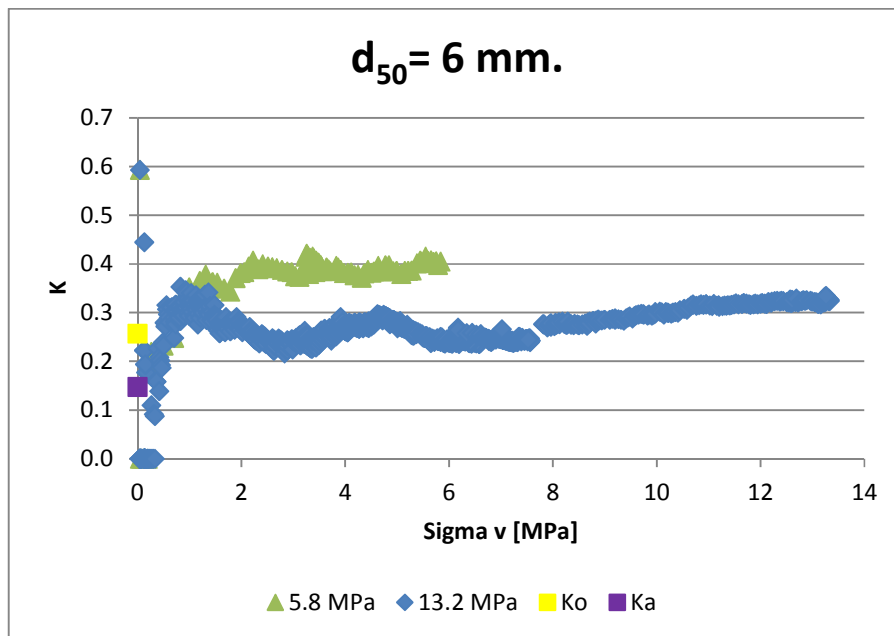


Figura 72: Comportamiento de la razón de esfuerzos K versus el esfuerzo vertical aplicado en [MPa] para el material $d_{50} = 6 \text{ mm}$.

En las Figuras anteriores se observa que para ambos tamaños el valor de K está en un rango estable entre 0.3 y 0.5. Además se observa que se pasa de un caso en reposo a un caso activo, caso en que el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal. Esto considerando que un mayor confinamiento resulta en un menor ángulo de fricción de las partículas.

4.5.3 Zonas de Flujo

En la Figura 73 y la Figura 74 se muestra el efecto de los esfuerzos verticales aplicado en las geometrías finales de las zonas de extracción para el material $d_{50} = 6 \text{ mm}$ y $d_{50} = 11 \text{ mm}$ a través de los marcadores extraídos.

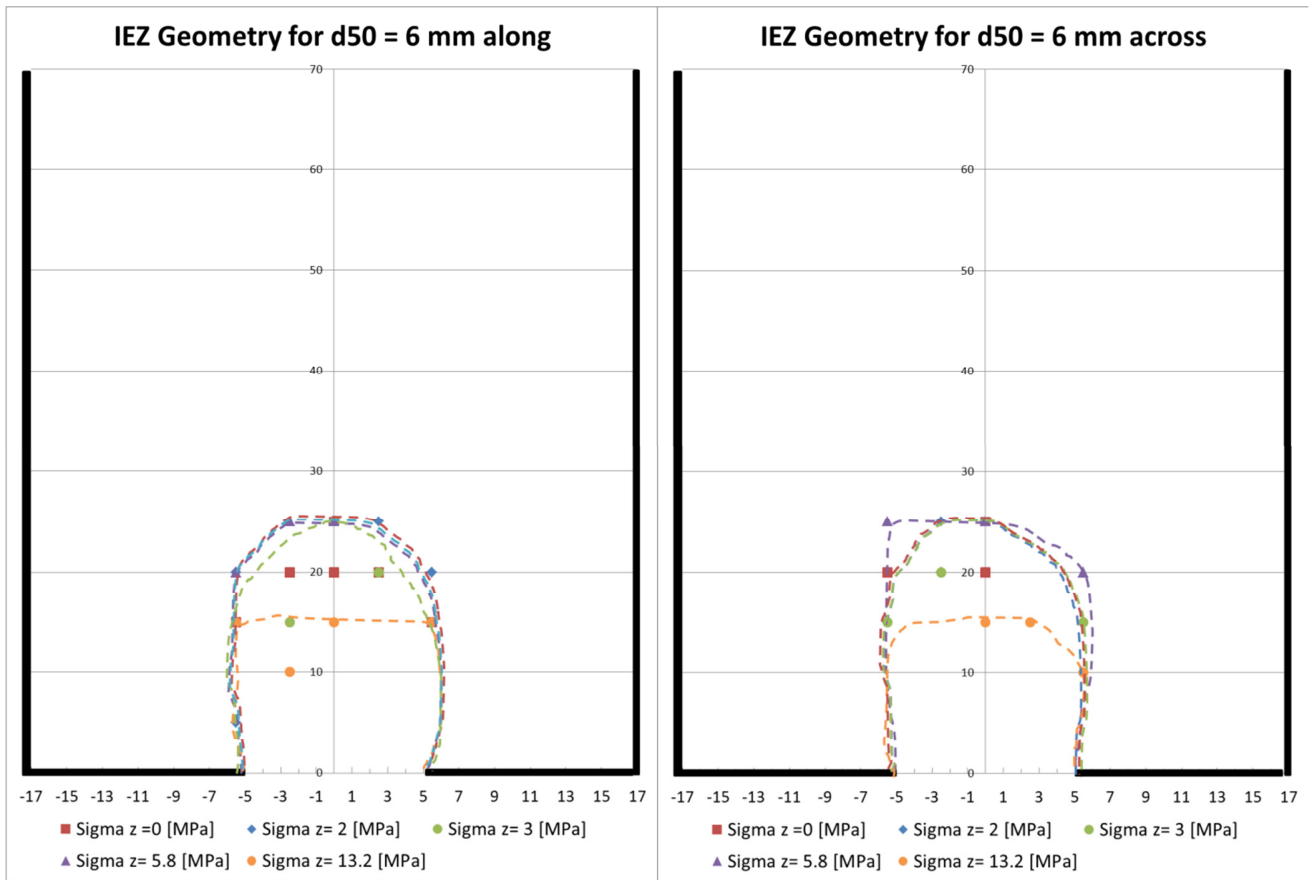


Figura 73: Efecto de la carga vertical en la geometría de IEZ para $d_{50} = 6$ mm paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción.

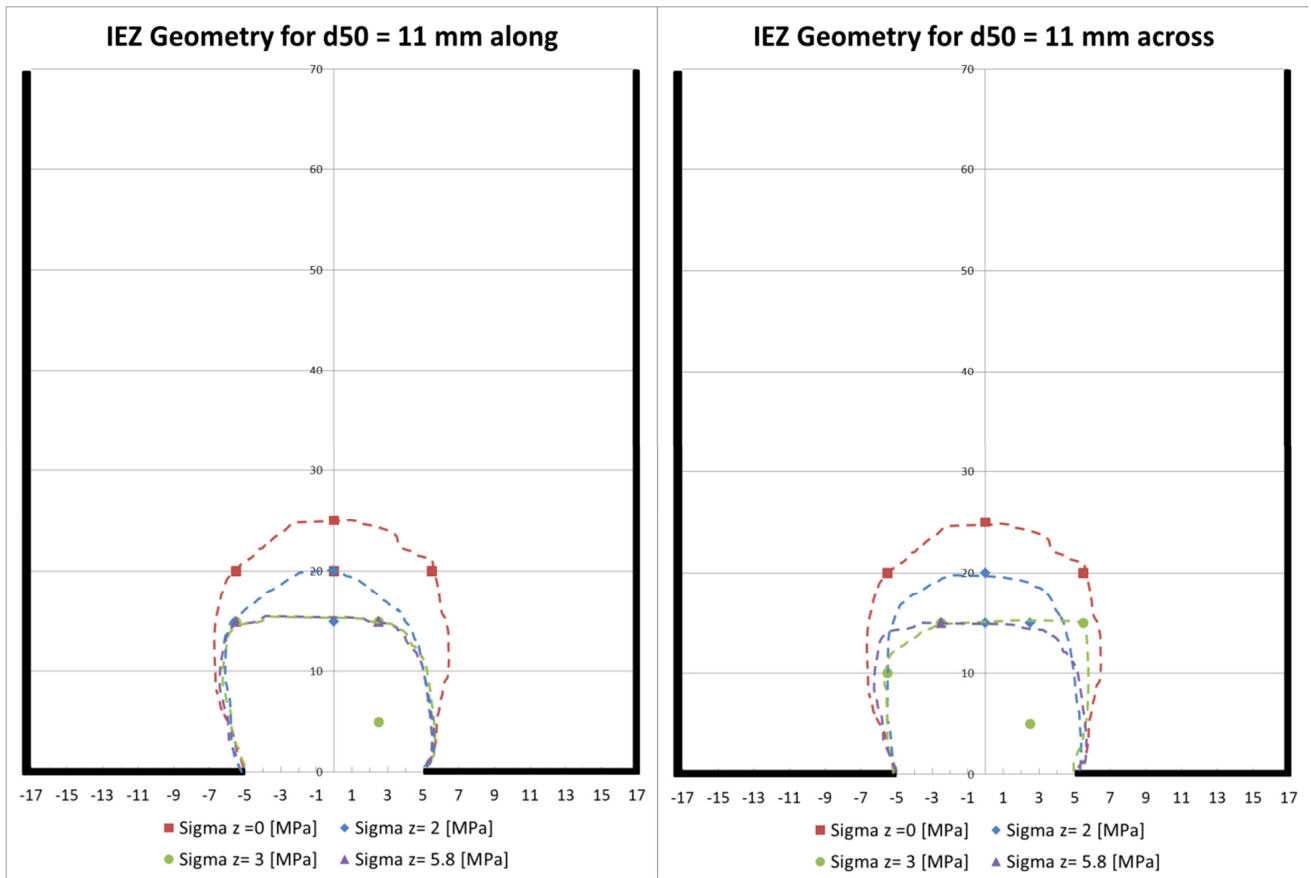


Figura 74: Efecto de la carga vertical en la geometría de IEZ para $d_{50} = 11$ mm paralelo (izq.) y perpendicular (der.) a la dirección de extracción.

Efecto del tamaño de partícula

De las geometrías finales de las zonas de extracción se puede observar que no existe un efecto significativo del tamaño de partícula en la geometría de IEZ, ni en la geometría de la IMZ en los casos estudiados. Para la masa extraída se observa que el diámetro de la IEZ se mantiene constante, tanto para el tamaño mayor como el tamaño menor de los materiales, siendo parecido al diámetro de la abertura del cilindro.

Efecto de la carga vertical

De las geometrías finales de las zonas de extracción se puede observar que existe un efecto de la carga vertical a medida que aumenta. Se aprecia que el efecto del esfuerzo vertical es mayor en el caso del material $d_{50} = 11$ mm que para el caso $d_{50} = 6$ mm lo que se traduce en una disminución de la altura de la zona de extracción aislada. En el caso del material $d_{50} = 6$ mm, ésta disminuye 5 cm y en el caso del material $d_{50} = 11$ mm disminuye 10 cm para un esfuerzo vertical de 13.2 [MPa] y 5.8 [MPa] respectivamente. No existe un efecto significativo del esfuerzo vertical en el diámetro de la zona de IEZ.

4.5.4 Fluidez del material

En la Figura 75 se muestra un gráfico que representa el efecto de la carga vertical y el efecto del tamaño de la partícula en la fluidez del material para los experimentos realizados. Se muestra en los puntos amarillos el número de cada experimento realizado.

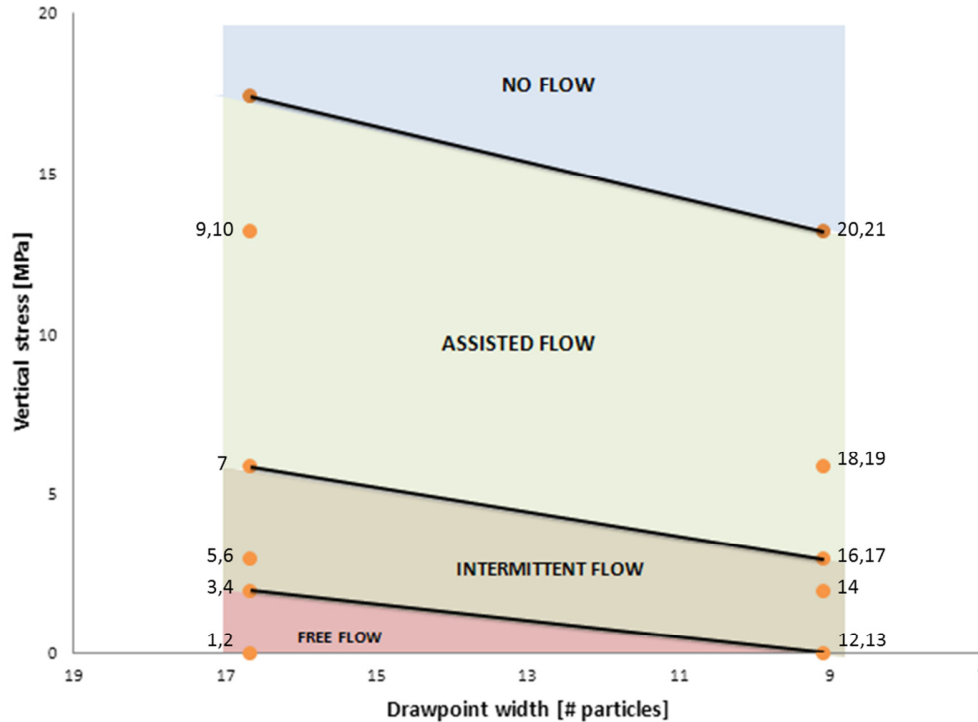


Figura 75: Efecto de la carga vertical en la fluidez del material.

Efecto del tamaño de partícula

En el Capítulo 2 se estudió el efecto que tiene el tamaño de partícula en la capacidad de fluir del material. Las variables importantes a considerar son dos:

- Diámetro de la abertura o el punto de extracción.
- Tamaño característico del fragmento.

Se sabe que la relación entre el diámetro de la abertura () y el tamaño característico de los fragmentos (), son influyentes en la fluidez del material. Para la frecuencia de colgaduras o interrupciones de flujo son altas y la posibilidad de que no fluya el material es alta.

De la Figura 75 se puede observar que para la granulometría menor es más fácil fluir por el punto de extracción al compararse con la granulometría mayor. En este caso la razón entre el diámetro de abertura y el tamaño característico d_{50} para la granulometría menor es de 17 y para la granulometría mayor es de 9.

Efecto de la carga vertical

De la Figura 75 se puede observar que la fluidez del material no sólo se verá afectada por el diámetro de la abertura y el tamaño característico de los fragmentos, sino que también el esfuerzo vertical va a tener un efecto directo en la capacidad de fluir del material, a través del punto de extracción.

Este efecto se debe principalmente a la creación de arcos mecánicos, debido a la compactación generada por la carga vertical aplicada.

4.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron los resultados experimentales con respecto al flujo gravitacional confinado bajo un tiraje aislado. Se analizó el efecto que tiene el tamaño de los fragmentos y la carga vertical aplicada en la fragmentación y compactación del material, en las zonas de flujo y en la fluidez del material.

4.6.1 Fragmentación y compactación del material

Para el material más pequeño se observó que tuvo un mayor grado de compactación que el material mayor (Figura 67). Este efecto es consistente considerando que el material más pequeño tiene una mayor probabilidad de reacomodo de sus partículas, dado que tiene un menor número de contactos entre sus vecinos. Además, el material de menor tamaño tiene un mayor índice de ruptura que el material de mayor tamaño, lo que también se explicaría debido a que al tener un menor número de coordinación, cada partícula es menos estable, por lo que es más propensa a fragmentarse (Figura 68).

A mayor esfuerzo vertical aplicado en los experimentos, ambos materiales tienen un mayor grado de compactación y presentan un mayor índice de ruptura, lo que se puede observar a través de las curvas granulométricas de cada material antes y después de los ensayos (Figura 65 y Figura 66).

4.6.2 Estimación del confinamiento

Para ambos tamaños de material estudiado se observa que a mayor esfuerzo vertical aplicado, mayor es el esfuerzo radial ejercido por el material hacia las paredes del cilindro (Figura 69 y Figura 70). Además se observa que en ambos tamaños el valor de la razón de esfuerzos K está en un rango estable entre 0.3 y 0.5 (Figura 71 y Figura 72). A medida que comienza a ejercerse la carga vertical al material se pasa de un caso en reposo a un caso activo, caso en que el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal.

4.6.3 Zonas de flujo

El tamaño de partícula no tiene un efecto significativo en la geometría de las zonas de extracción, ni tampoco en las zonas de movimiento estudiadas.

Los esfuerzos verticales aplicados tienen un efecto en la geometría de las zonas de extracción estudiadas en los experimentos. Para ambos materiales estudiados se observó

que para el mayor esfuerzo vertical aplicado, la altura de la zona de extracción H_{iez} , disminuye en altura (Figura 73 y Figura 74). Este efecto es consistente considerando la compactación que sufre el material a medida que se aplica la carga.

4.6.4 Fluidez del material

En el Capítulo 2 se estudió el efecto que tenía el tamaño de las partículas y el diámetro de abertura en la capacidad de fluir del material. Para una razón D_w/d_{50} mayor a 5 es más probable un flujo continuo sin interrupciones o *colgaduras*.

De los experimentos realizados se concluye que otra variable relevante para determinar la fluidez del material, es el esfuerzo vertical aplicado al material. Dado que a medida que aumentan los esfuerzos verticales aplicados menor es la probabilidad de un flujo continuo y libre, ya que aumenta la posibilidad de colgaduras y arcos mecánicos debido a la compactación del material (Figura 75).

En el próximo capítulo se estudian los mecanismos principales que se presentan en el flujo gravitacional confinado bajo tiraje aislado y también se propone una aplicación con respecto a la fluidez del material en minería de *caving*.

CAPÍTULO 5

MECANISMOS Y APLICACIÓN A MINERÍA DE CAVING

5.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo anterior se mostraron y analizaron los resultados de los experimentos para investigar los mecanismos relacionados al flujo gravitacional confinado al extraer material desde un punto de extracción aislado. De acuerdo a la información publicada hasta la fecha, estos experimentos constituyen una importante base de datos, dado que en la literatura existe escasa información acerca del efecto que tiene la carga vertical en las características del flujo, fragmentación y compactación del material granular.

En este Capítulo se presentan los principales mecanismos que controlan las características del flujo gravitacional confinado aislado. Además, se propone una aplicación a minería de *caving* basado en los resultados experimentales obtenidos.

5.2 MECANISMOS DEL FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

5.2.1 Antecedentes

Los estudios publicados sobre el flujo gravitacional muestra que los mecanismos que controlan el flujo granular están influenciados por diferentes factores que incluyen: las características del material, los esfuerzos *in situ*, los esfuerzos inducidos durante el flujo y las condiciones de borde. (Castro, 2006)

- Las características del material como: el factor de forma, las propiedades de corte y las propiedades de resistencia, van a influir en el comportamiento del flujo.
- Los esfuerzos *in situ* determinan las propiedades del material granular como la densidad aparente y el grado de compactación que influye en la resistencia del material bajo *cizalle*.
- A medida que el material fluye, se generan esfuerzos inducidos que influyen en las características del material como es la porosidad, fragmentación y la resistencia al corte.
- Las condiciones de borde son relevantes debido a la posible formación de arcos mecánicos y cómo los esfuerzos se pueden dirigir hacia las paredes.

Castro (2006) estableció los mecanismos de flujo durante una extracción aislada observando los cambios que ocurrían durante el flujo para la zona de extracción y movimiento y los esfuerzos en los bordes. Como se observa en la Figura 76, cuando un punto de extracción está aislado, el comportamiento del flujo está definido por la cantidad de masa extraída y los esfuerzos dados por dos principales mecanismos: erosión de los lados de la zona de flujo y el colapso del arco superior de la zona de flujo.

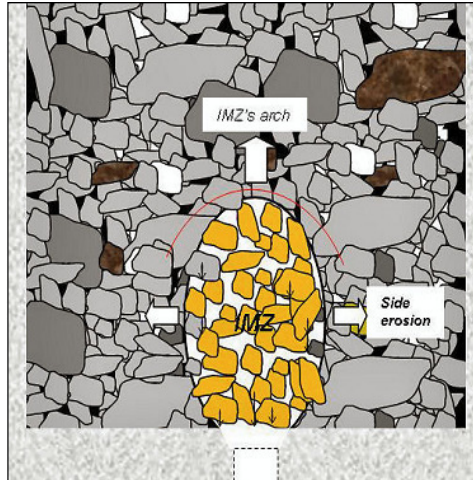


Figura 76: Mecanismos para un tiraje aislado para un material sin cohesión, Castro (2006).

Estos mecanismos pueden ser bien representados a través de dos ecuaciones que definen la geometría de la zona de flujo (Castro et al, 2007):

$$h_{IMZ}(m) = h_o (1 - e^{-m/m_h}) + c \cdot m$$

Donde h_o y m_h son constantes que representan la altura y la masa, cuando la altura de IMZ se incrementa exponencialmente con la masa y c es la tasa final de colapso del ancho del arco.

$$w_{IMZ}(m) = w_o (1 - \beta \cdot e^{-m/m_1} - (1 - \beta) \cdot e^{-m/m_2})$$

Donde w_o es el máximo ancho que alcanza una vez que alcanza la superficie, beta es una constante de ajuste (adimensional) y m_1, m_2 son las masas que identifican dos etapas de expansión (erosión) del elipsoide IMZ durante la extracción.

5.2.2 Mecanismos observados en el flujo gravitacional confinado

Dada la cantidad de material extraído de los experimentos realizados, se puede decir que los análisis corresponden a un enfoque de campo cercano y no a un campo lejano, lo que a escala mina significaría para el campo cercano (<30 m. respecto del nivel de producción) y el campo lejano (>30 m. respecto del nivel de producción (Brunton et al. , 2012).

Para los experimentos realizados de flujo gravitacional confinado se encontró que el mecanismo que está principalmente presente es el colapso de los arcos superiores que va a estar influenciado principalmente por dos factores:

- Cantidad de masa extraída.
- Esfuerzo vertical inducido.

A diferencia de los experimentos realizados por Castro (2006), en este caso el mecanismo de erosión no está significativamente presente. Esto podría deberse a que la cantidad de masa extraída no fue la suficiente para observar erosión de los costados de IEZ, para los experimentos en los que se aplicó una carga vertical.

En la Figura 77 se observa el efecto del esfuerzo vertical aplicado en la altura de la zona de extracción en función de la masa extraída para el material con $d_{50} = 6$ mm. Del gráfico se puede observar que la altura H_{iez} aumenta con la masa extraída y no se ve afectada significativamente por el esfuerzo vertical aplicado, salvo para el rango de esfuerzo mayor correspondiente a 13.2 [MPa].

En la Figura 78 se observa el efecto del esfuerzo vertical aplicado en la altura de la zona de extracción, en función de la masa extraída para el material con $d_{50} = 11$ mm. Del gráfico se puede observar que también la altura H_{iez} aumenta con la masa extraída. En este caso se ve un efecto más significativo del esfuerzo vertical en la altura H_{iez} que para el tamaño menor. A mayor esfuerzo vertical aplicado es menor la altura de la zona de extracción para la misma cantidad de material extraído. Este efecto es consistente con la compactación y la ruptura del material, debido al efecto de la carga vertical aplicada.

Se sabe que el material, a medida que fluye, experimenta dilatación representada en un aumento del volumen, por ende también existiría un aumento de la porosidad. Al estar el material confinado se esperaría un menor grado de dilatación e inclusive la desaparición de la dilatación cuando existe ruptura de material, dado que se superaría el bloque interno de las partículas. A pesar de no haber estudiado el IMZ en todos los experimentos realizados, se espera que el comportamiento de la geometría del IMZ sea similar al del IEZ, existiendo una disminución del volumen, debido a la compactación y fragmentación del material.

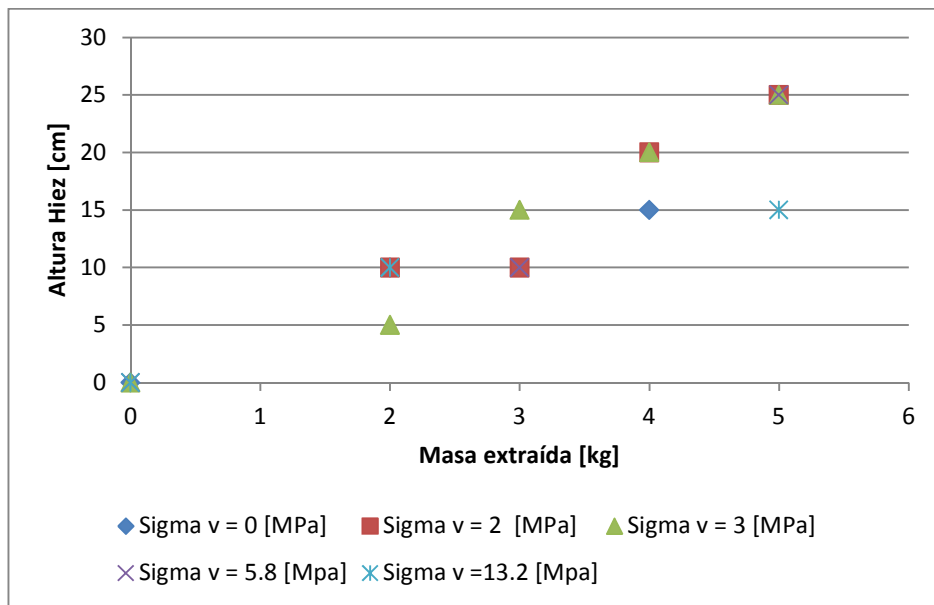


Figura 77: Efecto del esfuerzo vertical en la altura de la zona de extracción en función de la masa extraída para $d_{50} = 6\text{mm}$.

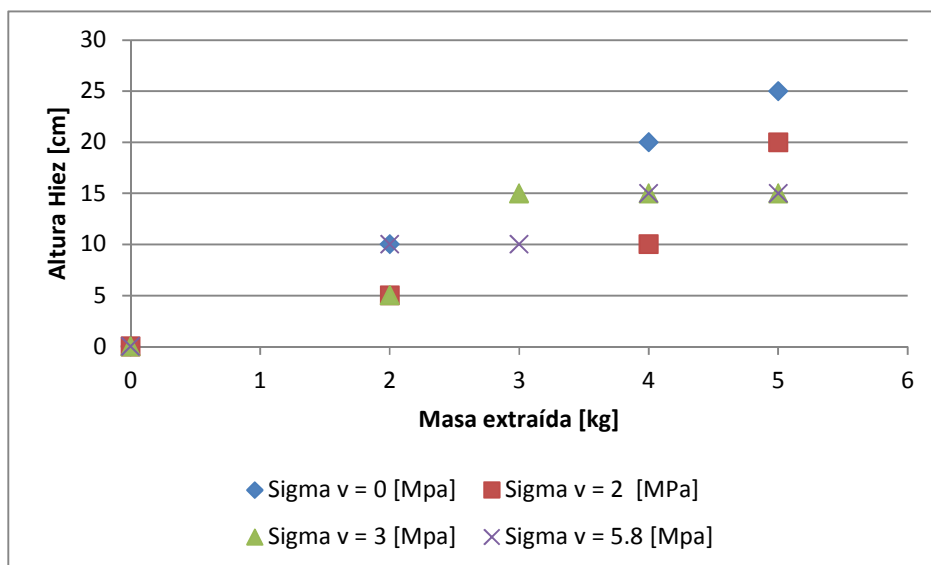


Figura 78: Efecto del esfuerzo vertical en la altura de la zona de extracción en función de la masa extraída para $d_{50} = 11\text{mm}$.

5.3 APLICACIÓN A MINERÍA DE CAVING

Como se discutió en los capítulos anteriores, los depósitos someros de mineral de alta ley se van agotando rápidamente, por lo que la industria minera se va a ver enfrentada a diversos desafíos como por ejemplo, la aplicación de minería subterránea masiva a grandes profundidades y una disminución de ley en los minerales. (Baez, 2012)

Debido a lo anterior es que esta investigación pretende seguir en esa línea y propone una aplicación en minería de *caving*, en un estado correspondiente a un alto nivel de esfuerzos.

De la solución de Janssen descrita en el Capítulo 2, se desglosa que los esfuerzos verticales no solamente dependen de la profundidad a la que se encuentre el nivel de producción y las demás infraestructuras, si no que también, los esfuerzos verticales van a depender del radio hidráulico, es decir, del área de producción activa de extracción.

El área de producción activa se define como:

$$\text{Área de producción activa [m}^2\text{]} = \frac{\text{Ritmo de producción } \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]}{\text{Velocidad de tiraje } \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]}$$

Entre mayor es el área activa, mayor son los esfuerzos verticales inducidos en el nivel de producción. Por lo tanto los esfuerzos verticales inducidos además de ser función de la profundidad, van a depender del ritmo de producción y la velocidad de tiraje. La velocidad de tiraje va a estar restringida por el sistema de manejo de minerales utilizado en el nivel de producción.

La Figura 79, Figura 80 y Figura 81 muestran cómo los esfuerzos verticales, determinados con el método de Janssen, van a depender de la profundidad del nivel de producción, del ritmo de producción que desee explotar el yacimiento y la velocidad de tiraje.

Para estimar el perímetro del área de producción, ésta se asume como cuadrada. Para determinar los valores de las Figuras mencionadas anteriormente, se utilizaron los siguientes parámetros:

- Ángulo de fricción, $\phi = 45$ [°].
- K (caso activo) = 0.17 [.]
- Peso específico, $\gamma = 18.522$ [N/m³].

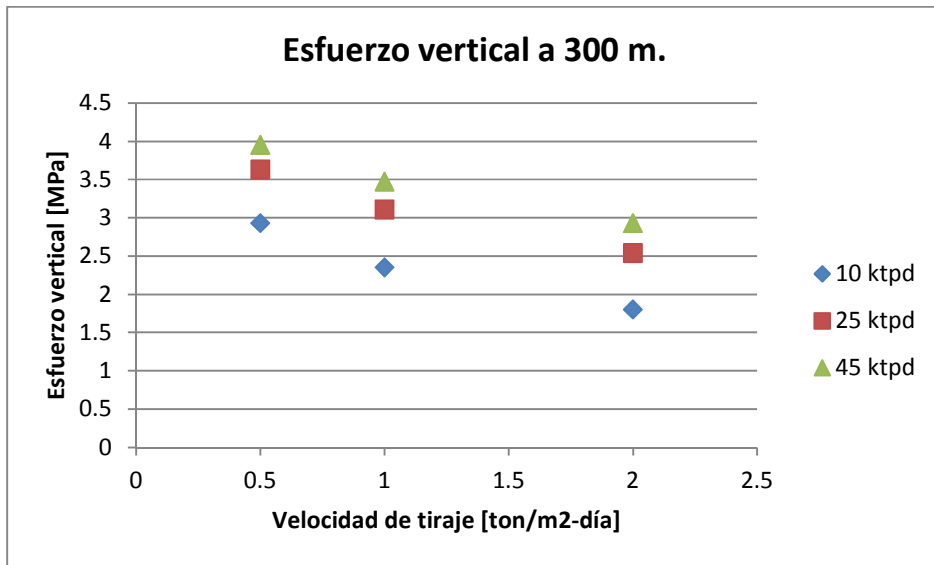


Figura 79: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 1.000 m.

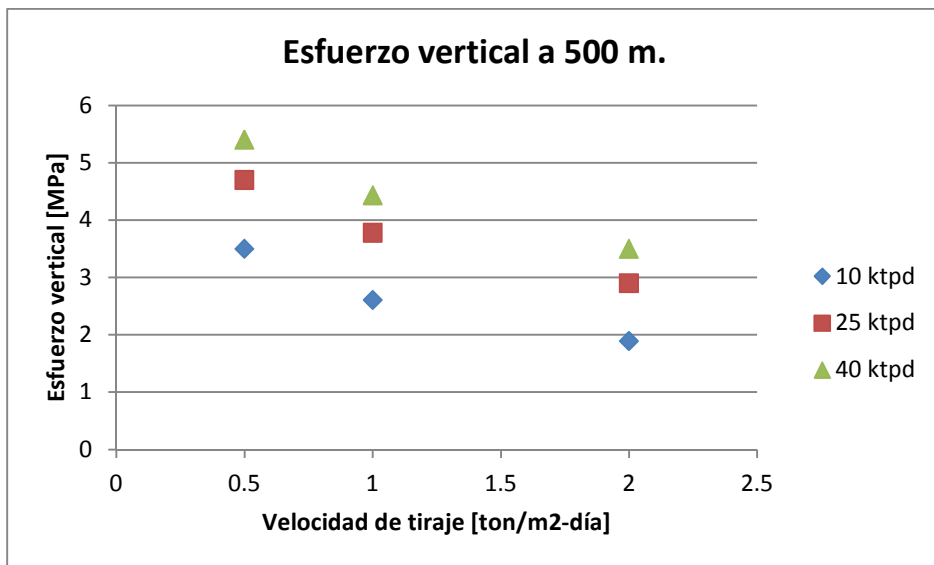


Figura 80: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 500 m.

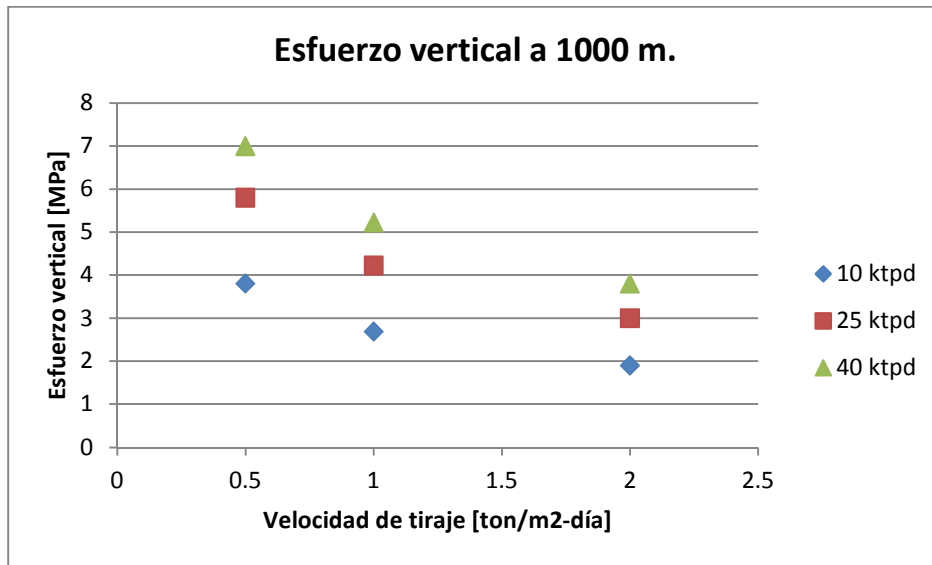


Figura 81: Esfuerzo vertical en función del ritmo de producción y la velocidad de tiraje por punto de extracción a una profundidad de 300 m.

En el Capítulo 4 se determinó que la otra variable que debe ser considerada en la fluidez del material es la relación entre el diámetro del orificio o el punto de extracción por donde el material fluye y el tamaño característico de la partícula d_{50} .

Con el objetivo de asociar los resultados experimentales a la información que se posee en la mina, se muestra la Tabla 10 que indica el estudio realizado por Montecino (2011) para la mina El Teniente donde se muestran los tamaños característicos medios asociados al tonelaje extraído de los sectores Diablo Regimiento, Reservas Norte Zona 1 y Reservas Norte Zona 2.

Tabla 10: Resumen tamaños característicos por zonificación y sector de estudio mina El Teniente (Montecino, 2011).

Sector	Rangos tonelajes		Rangos porcentajes respecto a columna <i>in situ</i>		Tamaños característicos medios [m]		
	Menor tonelaje	Mayor tonelaje	Menor porcentaje	Mayor porcentaje	d80 medio	d50 medio	d25 medio
Diablo Regimiento	1,170	26,170	1%	14%	1.2	0.6	0.4
	26,170	56,170	14%	29%	1	0.5	0.3
	56,170	131,762	29%	68%	0.9	0.4	0.2
Reservas Norte Zona 1	4,492	34,492	3%	23%	1	0.5	0.3
	34,492	210,618	23%	138%	0.9	0.4	0.2
Reservas Norte Zona 2	4,180	69,180	2%	36%	1	0.5	0.3
	69,180	159,205	36%	82%	0.9	0.4	0.2

Utilizando el rango de los d_{50} de la Tabla 10, en la Tabla 11 se muestra la razón entre diámetros de puntos de extracción y tamaños característicos d_{50} típicos en minería de *caving*.

Tabla 11: Razón entre el diámetro del punto de extracción y el tamaño característico d_{50} .

Diámetro de punto de extracción [m]	Tamaño característico d_{50} [m]		
	0.4	0.6	0.8
5	12.5	8.3	6.3
4.5	11.3	7.5	5.6
4	10.0	6.7	5.0
3.5	8.8	5.8	4.4
3	7.5	5.0	3.8

Por lo tanto se puede concluir que si se denota a la fluidez del material como Φ , al diámetro del punto de extracción como D_w y el diámetro característico del material como d_{50} , se obtiene la siguiente relación:

$$\Phi = f(\sigma_v, D_w, d_{50})$$

La información descrita por Hadjigeorgiou (2006) con respecto a la guía de diseño de piques de traspaso donde se establece que la condición *free flow* (flujo libre) está dada por la razón D_w/d debe ser mayor a 3 o 10, dependiendo de diferentes autores. En este caso d representa al tamaño máximo de la partícula.

Si se toman como supuestos que la condición anterior ocurre bajo un esfuerzo vertical aplicado cercano a 0 MPa y que la condición de *free flow* (flujo libre) se obtiene para una razón D_w/d_{50} mayor a 5 y éstos se aplican al gráfico de fluidez del material obtenido del Capítulo 4 (Figura 75) se determina una aplicación completa a minería de *caving* que estudia la fluidez del material incorporando la variable del esfuerzo vertical aplicado y las dimensiones de abertura y el tamaño característico del material (Figura 82).

Luego, si se consideran los parámetros de la Tabla 12:

Tabla 12: Ejemplo de aplicación de la fluidez del material en minería en *caving*.

Variable	Valor
d_{50} [m]	0.4
D_w [m]	4
Ritmo de producción [tpd]	25,000
Velocidad de tiraje [ton/m ² día]	0.5
Profundidad [m]	1000

Dada esta configuración, la razón D_w/d_{50} es igual a 10 y considerando la Figura 81, los esfuerzos verticales serían de 5.8 [MPa].

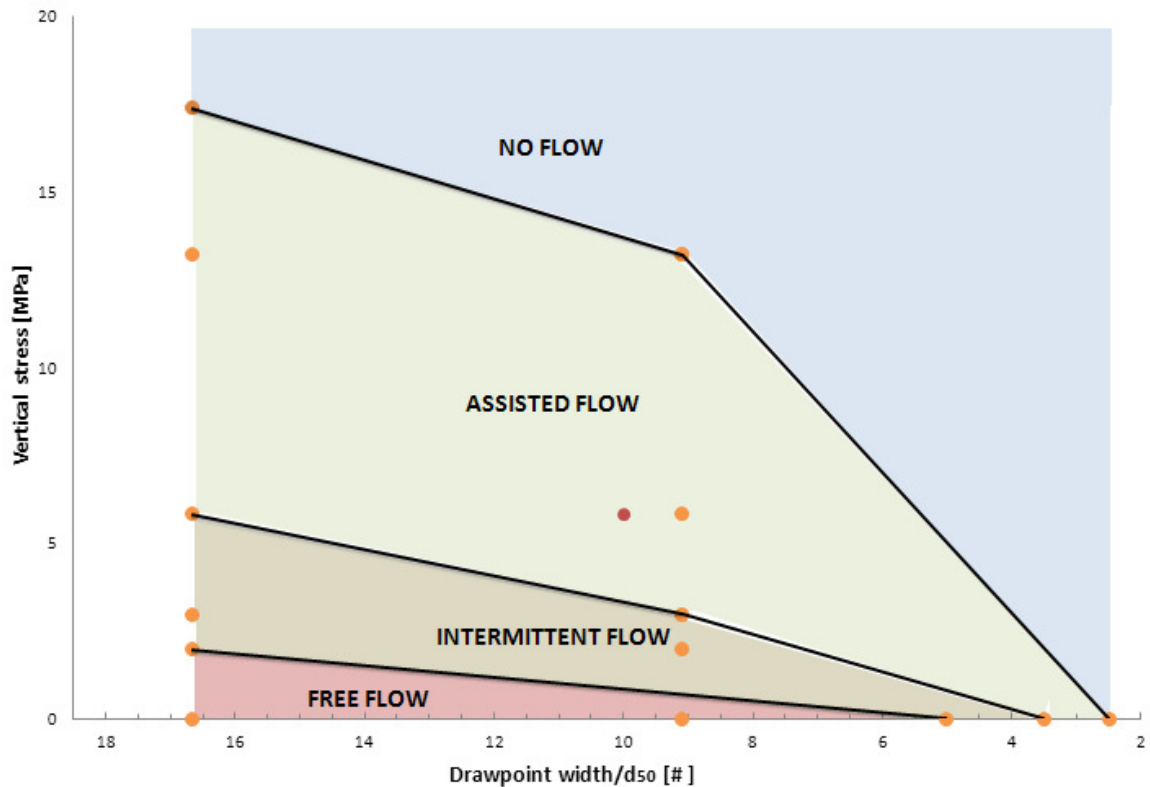


Figura 82: Aplicación de la fluidez del material en función del esfuerzo vertical y la razón entre el ancho del punto de extracción y el tamaño característico d_{50} .

En este caso, representado por el punto de color rojo en el gráfico, la capacidad de fluir del material estaría en un estado de “flujo asistido”, por lo que se esperaría que se desarrollasen arcos mecánicos, debido a la compactación del material. Para que el material fluya libremente sería necesario intervenir las colgaduras manualmente o con algún otro mecanismo, como por ejemplo mediante explosivos.

5.4 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados experimentales se pudo encontrar el mecanismo que influye en el flujo gravitacional confinado bajo tiraje aislado. Además, a partir de los resultados experimentales, se propone una aplicación a minería de *caving* respecto a la capacidad de fluir del material.

5.4.1 Mecanismos de flujo gravitacional confinado

El mecanismo encontrado que está presente en el flujo aislado de flujo granular bajo la presencia de una carga vertical aplicada es el de colapso de arcos. La geometría de IEZ está controlada principalmente por la cantidad de masa extraída y los esfuerzos verticales aplicados.

El mecanismo de erosión de los lados de IEZ, no se encontró que se desarrollara a medida que el material era extraído desde el punto de extracción.

5.4.2 Aplicación a minería de caving

Se propone una aplicación en minería de *caving* a partir de los resultados experimentales enfocada en la capacidad de fluir del material. Así se establece que en la fluidez del material van a existir dos variables relevantes:

1. Razón entre diámetro de abertura o punto de extracción y el tamaño característico de los fragmentos.
2. Esfuerzo vertical aplicado.

Donde la primera variable había sido estudiada con anterioridad por otros autores, pero la segunda variable no se había considerado como relevante en la fluidez del material. El esfuerzo vertical aplicado, como se discutió en el Capítulo 2, no depende solamente de la profundidad, sino que también depende del área activa en producción, que es función del ritmo de producción de la mina y la velocidad de tiraje de cada punto de extracción.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el objetivo de determinar el estado del arte en el conocimiento de los mecanismos de flujo gravitacional, como también los estudios relacionados a fragmentación aplicados en minería de *caving*. Existe escasa información sobre el efecto de la carga vertical en las características del flujo gravitacional, específicamente en las áreas de zonas de flujo (IEZ e IMZ), compactación y fragmentación y la capacidad de fluir del material. Basado en esta revisión se concluye lo siguiente:

- El conocimiento actual de los mecanismos en flujo gravitacional aplicado a minería de *caving* se ha determinado a través de la experiencia minera, modelos físicos, pruebas a escala mina y modelos numéricos. Los modelos físicos y numéricos se han realizado bajo niveles bajos de carga vertical, por lo que no se ha observado el efecto de la compactación ni la fragmentación en los mecanismos físicos.
- Se presentó una metodología para estimar los esfuerzos verticales en materiales granulares contenidos en un silo aplicable a minería de *caving*, los que van a depender principalmente de la profundidad y el radio hidráulico.
- Del conocimiento actual relacionado a la fluidez del material se determinó que hasta el momento las variables que se consideran son: el tamaño característico de los fragmentos y el diámetro de la abertura de salida del material.
- Se describieron los tipos de fragmentación que existen en la minería de *caving*. Se identificaron y se especificó de qué forma los principales factores influyen en la fragmentación de material en minería de *caving*.

Con el objetivo de mejorar el entendimiento de los mecanismos físicos en el flujo gravitacional confinado se diseñó y construyó un nuevo equipo de laboratorio, donde se puede replicar aproximadamente la magnitud de los esfuerzos verticales existentes en la mina. Además de la construcción se especifica la metodología y el procedimiento para realizar los experimentos. Para caracterizar el material en cuanto a sus propiedades de corte, resistencia, tamaño y forma se describe la metodología de los ensayos que se realizaron.

De los resultados de los ensayos de corte directo se comprueba que, para diferentes cargas verticales, el ángulo de dilatación va a cambiar. Entre mayor es la carga vertical, menor es el ángulo de dilatación por lo que las propiedades del material van a depender del nivel de esfuerzo aplicado.

A su vez, se determinó, a partir de *strain gauge* colocados en las paredes del cilindro de acero, cómo variaba la presión que ejercía el material hacia el cilindro en función del esfuerzo vertical aplicado por la prensa. A mayor carga vertical aplicada mayor es el

esfuerzo radial ejercido por el material hacia las paredes del cilindro, determinándose una razón de esfuerzos estable en un rango de 0.3 a 0.5, para ambos tamaños estudiados.

Los experimentos realizados muestran una clara influencia de la carga vertical aplicada en el comportamiento del flujo material granular. Entre mayor es la carga vertical, mayor es el grado de compactación, y existe una mayor reducción de los tamaños de los fragmentos. Además existe una reducción en las características de flujo, lo que resulta en colgaduras o arcos mecánicos debido a la acumulación de esfuerzos, donde el flujo no es posible a pesar de tener razones entre ancho del punto de extracción y tamaño de partículas mayores a 5 veces.

Con respecto al efecto del tamaño de partícula, no existe un efecto significativo del tamaño de partícula en la geometría de las zonas de flujo de extracción y movimiento bajo las condiciones de los experimentos realizados.

El mecanismo que está principalmente presente en los experimentos que estudian el flujo gravitacional confinado, es el colapso de arcos donde la geometría de IEZ va a estar controlada por la cantidad de masa extraída y los esfuerzos verticales aplicados. Mientras que el mecanismo de erosión no se encontró que se desarrollara a medida que el material era extraído desde el punto de extracción de manera aislada.

Se desarrolló (Figura 82) una aplicación en minería de *caving* que relaciona el régimen de esfuerzos a escala mina con los esfuerzos aplicados en los experimentos. La aplicación se enfoca principalmente en la capacidad de fluir del material y cómo está va a estar afectada por el tamaño de los fragmentos, el diámetro del punto de extracción y de los esfuerzos verticales aplicados. Esto se realizó considerando la solución de Janssen y los resultados experimentales.

6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Dado que el equipo de laboratorio utilizado en los experimentos fue diseñado y construido en el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile, y considerando que se realizaron 20 experimentos, todavía existen aspectos que se deben recomendar y trabajo futuro:

- *Medición esfuerzos en la base del cilindro:* Dado que las mediciones actuales que se tienen de los esfuerzos verticales en los experimentos se calcularon con respecto a la carga vertical aplicada por la prensa hidráulica, sería relevante medir los esfuerzos verticales en la base del cilindro a través de mayor instrumentación, ya sea a través de celdas de carga u otro instrumento equivalente.
- *Incorporar batea al cilindro:* Dado que hasta el momento el equipo de laboratorio considera como punto de extracción una abertura en la base del cilindro, sería conveniente diseñar e implementar una batea al sistema de extracción. De esta forma se podrían estudiar diferentes mecanismos utilizando este sistema de extracción comparado al sistema actual de minería en *caving*.

- *Realizar más experimentos:* Con el fin de tener una base de datos mayor para determinar los distintos errores experimentales asociados y considerando un amplio rango de parámetros, es necesario realizar más experimentos con este equipo de laboratorio. El autor recomienda considerar una distribución más heterogénea a la que se utilizó en los experimentos realizados en esta investigación y también considerar experimentos con diferente razón entre diámetro de orificio y el diámetro característico de los fragmentos.
- *Determinar IMZ e IEZ:* Se debe crear una nueva metodología para determinar de forma más simple y directa la geometría de las zonas de flujo. Si bien el método de colocar marcadores y extrapolarlos de acuerdo a la masa extraída es exitoso, éste resulta engorroso y demanda una cantidad significativa de tiempo. Una idea podría ser la de aplicar la tecnología RFID utilizada en las pruebas a escala mina (Whiteman, 2012) a los experimentos, de esta forma el proceso de medición de las zonas de flujo sería más fácil y consumiría menos tiempo.
- *Múltiples puntos de extracción:* El próximo desafío sería analizar el efecto de la carga vertical aplicada a múltiples puntos de extracción. Para ello se deberá diseñar y construir otro equipo de laboratorio con determinadas características, para que pueda complementarse con un sistema de prensa que pueda ejercer la carga vertical al material contenido en el recipiente.
- *Modelación Numérica:* Finalmente, el próximo paso para mejorar el entendimiento sobre los mecanismos en el flujo gravitacional confinado, es realizar modelos numéricos calibrándolos con los datos experimentales determinados en esta tesis de investigación. De esta forma se pueden estudiar con más detalle los esfuerzos dentro del cilindro y a nivel de escala de partícula, para así entender de mejor forma el rol de la compactación y la fragmentación en el flujo gravitacional aplicado a minería de *caving*.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

1. Alvial, J. 1992. Analysis of Extraction at El Teniente 4 Sur LHD. Proceedings of MassMin 92, Johannesburg, (Ed(s): H.W. Glen), 233-244. The South African Institute of Mining and Metallurgy.
2. Báez, F. 2012. Presentación Tendencias tecnológicas en minería subterránea. Worskhop Minería Subterránea. Expomin 2012, Santiago, Chile.
3. Barrett, P. J. 1980. The shape of rock particles, a critical review, *Sedimentology*, 27, 291-303.
4. Bishop, A. W. 1966. The strength of soil as engineering materials, *Geotechnique*, 16(2), 91-130.
5. Bolton, M D. 1986. The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 36:65-78.
6. Bridgwater, J., Zhang, Z., and Tuladhar, T. 2003. Particle attrition due to shearing – the effects of stress, strain and particle shape, *Chemical Engineering Science*, Vol 58, pp. 4649-4665.
7. Brady, B G H and Brown, E T. 2004. *Rock Mechanics for Underground Mining*, 628. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Netherlands.
8. Brown, E T, 2007. *Block caving geomechanics*, 2nd edn., Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, The University of Queensland: Brisbane.
9. Brunton, I, Sharrock, G and Lett, J. 2012. Full scale near field flow behavior at the Ridgeway Deeps Block Cave Mine. *Proceedings of MassMin 2012*, Sudbury, Canada.
10. Castro, R and Whitten, W. 2007. A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observations. In *Proceedings of the 33th APCOM Conference*, Santiago, Chile.
11. Castro, R. 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
12. Castro, R. 2001. *Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional*. Tesis de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
13. Craig, R. F. 2004. *Soil Mechanics*, 7th, Spon Press: New York.
14. Chaudhry M.H. 1987. *Applied Hydraulic Transients*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold.
15. Chacon, J, Gopfert, H and Ovalle, A. 2004. Thirty years evolution of block caving in Chile. *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, (Ed(s): A. Karzulovic and M. Alfaro), 387-392.
16. Chitombo, G.P. 2010. Cave mining-16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining-state of the art'. *Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving*, Y.Potvin (Ed), 20-22 April 2010, Perth, Australia.

17. Cho, G., Dodds, D. and Santamarina, J. C. 2006. Particle shape effects on Packing Density, Stiffness and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, 5, pp. 591-602.
18. Coop, M.R., Sorensen, K.K, Bodas Freitas, T. and Georgoutsos, G. 2004. Particle breakage during shearing of a carbonate sand, *Geotechnique*, Vol. 54, No 3, pp. 157-163.
19. Esterhuizen, G.S. 1999. A Program to Predict Block Cave Fragmentation, Technical Reference and User's Guide Version 3.0.
20. Flores, G, Karzulovic, A. and Brown, E T, 2004. Current practices and trends in cave mining. *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, Chile, (Ed(s): A. Karzulovic and M. A. Alfaro), The Chilean Engineers Institute.
21. Fuenzalida, M and Castro, R. 2012. How does a caved rock mass behave under confined gravity flow? *Proceedings of the Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Y.Potvin (Eds) 20-22 Abril, Perth, Australia pp 431-441
22. Fukumoto, T. 1992. Particle breakage characteristics in granular soils, *Soils Foundation*, Vol. 32, No 1, pp.26-40.
23. Kwapil, R. 1965. Gravity flow of Granular Materials in Hoppers and Bins". Part I and II. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* Vol 2, 35-41.
24. Kwapil, R. 1989. Block Caving at El Teniente mine, Chile. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A*, 43-56.
25. Kwapil, R. 2004. Gravity flow in sublevel and panel caving: A common sense approach.
26. Hadjigeorgiou, J. , Lessard, J.F. 2007. Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 44, pp 820-834.
27. Hardin, B.O. 1985. Crushing of soil particles, *Journal of Geotechnical, Engineering ASCE*, Vol. 111(10), pp. 1177-1192.
28. Heslop, T G, 1983. The application of the interactive draw theory to draw control practice in large chrysotile asbestos mines. *Mining and Metallurgical Operations in Zimbabwe*, 3: 290-313.
29. Heslop, T G and Laubscher, D. 1981 Draw control in caving operations on Southern African Crysotile Asbestos Mines. In D.R. Stewart (Ed.), *Design and operation of caving and sublevel stoping mines: Society of Mining Engineers-AIME*, New York, pp.715-728.
30. Hoek, E and Brown, E.T. 1980. Underground excavations in rock. *Institution of Mining and Metallurgy*, London.
31. Hoz, K. 2007. Estimación de los parámetros al corte en suelos granulares. Tesis de Magister. Universidad de Chile, Chile.
32. Hoz, K. Verdugo, R. 2006. Caracterización geomecánica de suelos granulares grueso. *Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2) 199
33. Hustrulid, W. and Sun, C.2004. Some remarks on ore pass design guidelines. *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, Chile. (Ed(s): A.Karzulovic and M.Alfaro), 301-308. Chilean Engineers Institute.
34. ISRM: Point Load Test, 1985.Suggested method for determining point load strength. Vol 22, 2, pp. 51-60.

35. Indraratna, B, Salim, W. 2002. Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy. *Geotechnical Engineering*, vol 155, 4: 243-252.
36. Jaeger, H M, Nagel S R and Behringer, R P, 1996. The physics of Granular Materials. *Physics Today*, Abril 1996: 32-38.
37. Janssen, H. 2004. Experiments regarding grain pressure in silos realizado en 1895. *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, Chile. pp 293-300.
38. Laubscher, D. 2000. Block Caving Manual. International Caving Study Report. JKMRRC and Itasca Consulting Group, Brisbane, Australia.
39. Laubscher, D. 1994. Cave Mining- the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp.279-293.
40. Lee, K. y Seed, H. 1967. Drained strength characteristics of sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93, No 6, pp. 1159-1170.
41. Lade, P. V., Yamamuro, J A and Bopp, P. 1986. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (4): 309-316.
42. Lee, K.J. and Farhoomand, I. 1967. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression, *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, Vol. 4(1), pp. 68-86.
43. Marano, G, 1980. The interaction between adjacent draw points in free flowing materials and it application to mining. *Chamber of Mines Journal*, 22: 25-32.
44. Marsal, R. 1967. Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
45. Marsal, R. 1973. Mechanical properties of backfill. *Embankment Dam Engineering* (Ed(s): Hirshfield R.C and Paulus S.J.), 109-200. Wiley: New York.
46. McCormick, R J, 1968. How does a drawpoint draw? *Engineering & Mining Journal*, June, 106-116.
47. Mcdowell, G.R., Bolton, M.D. and Robertson, D. 1996. The fractal crushing of granular materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 44(12), pp. 2079-2102.
48. McNearney, R L and Abel, J F .1993. Large Scale Two-Dimensional Block Caving Model Tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomechan*, 30:90-109.
49. Montecino, N. 2011. Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de block/panel caving. Tesis de Magister. Universidad de Chile, Chile.
50. Nedderman, R.M.1992. *Statics and Kinematics of Granular Materials*, 1,351 pp. Cambridge University Press: Cambridge.
51. Nedderman, R.M. et al. 1982. The flow of granular materials, *Chemical Engineering Science*, 37, (11), pp. 1597.
52. Orellana, M. 2011. Modelación numérica de la minería continua. Tesis de Magister. Universidad de Chile, Chile.
53. Orellana, L. 2012. Diseño de la tecnología de minería continua a partir de experimentos en laboratorio. Tesis de Magister. Universidad de Chile, Chile.
54. Peters, D, 1984. Physical modeling of the draw behavior of broken rock in Caving. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 79:1-48.
55. Pierce, M E and Hakan, S. 2004. PFC3D modelling of flow behavior in sublevel caving. *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, Chile, (Ed(s): A. Karzulovic and M. A. Alfaro), The Chilean Engineers Institute.

56. Pierce, M. 2010. A hybrid methodology for secondary fragmentation prediction in cave mines. *Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving*, Y.Potvin (Ed), 20-22 April 2010, Perth, Australia.
57. Pierce, M. 2009. A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. PhD Thesis. University of Brisbane, Australia.
58. Power, G. 2004. Modelling Granular Flow in Caving Mines: Large Scale Physical Models and Full Scale Experiments. PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane.
59. Powers, M. C.1953. A new roundness scale for sedimentary particles', *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 23, pp.117-119.
60. Shi, F. and Kojovic, T. 2007. Validation of a Model for Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 82, pp. 156-163.
61. Van As, A and Van Hout, G.J. (2008) A study of Isolated Drawzones in Block Caving Mines by means of a Large 3D Physical Model. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol 45, pp 1044-1051.
62. Vesic, A and Clough, W. 1968. Behaviour of granular materials under high stresses. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. Vol 94, pp 661-688.
63. Whiteman, D.S. 2010. Smart Marker system — A new tool for measuring underground ore body flow in block and sub-level mines. *Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving*, Y.Potvin (Ed), 20-22 April 2010, Perth, Australia.
64. Yenge, L I, 1981. Analysis of Bulk Flow of Materials Under Gravity Caving Proceedings. Part 2: Theoretical and physical modeling of gravity flow of broken rock. *Quart. Col. Sch.Min*, 76.
65. Yoshinaka, R. 2007. Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect.

ANEXO A

INFORME DE CALIBRACION DE LA PRENSA



CERTIFICADO DE CALIBRACION LABORATORIO DE CALIBRACION DE FUERZA



IDENTIFICACION DEL CLIENTE	
Nombre del cliente	DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS U.DE CHILE
Dirección	Av. Tupper 2069, Santiago
Responsable	Raúl Castro

IDENTIFICACION DEL CERTIFICADO	
Nº de Certificado	INT.2011.50-491
Fecha de Calibración	24/06/2011
Fecha de emisión del certificado	17/08/2011

IDENTIFICACION DEL ITEM CALIBRADO	
Instrumento	Maquina de ensayo compresión
Marca	Maurice Perrer
Modelo	126 M
Nº de serie	1020780-0
Código interno	---
Capacidad de carga máxima	1800 kN
Capacidad de carga contrastada	1579.84 kN
Modo de aplicación de la carga	Compresión
Sistema indicador de carga	Sensor de presión con lector digital portátil
Marca	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. (TML)
Modelo	Sensor de presión: PWH - 700 / Lector portátil : TC-31K
Nº de serie	Sensor de presión: HT 9921 / Lector portátil :0221116
División menor	0.01 MPa

IDENTIFICACION DEL (OS) PATRON (ES)	
Patrón utilizado	Celda de carga, capacidad de 3000 kN
Marca	Controls
Nº de serie	06042328
Certificado de Calibración Nº / Vigencia	LCPN-F016.10 - 017.10 / Mayo 2012
Tipo	82-E0100/FS / Clase: 2
Trazabilidad del certificado	Laboratorio Custodio Patrones Nac. - Fuerza (LCPN-F)

RESULTADO DE LA CALIBRACION	
Lugar donde se efectuó la calibración	Laboratorio Block Caving
Dirección	Av. Tupper 2069, Santiago
Temperatura media durante la calibración	Tº= 20.1 ± 0.5 °C
Procedimiento utilizado	SEE-PP-108
Desviación al procedimiento utilizado	Ninguna
Calibración efectuada por	Cristián Jiménez R.
El resultado de la calibración se entrega en las tablas siguientes. Se entrega una curva de ajuste lineal para el instrumento. Los valores expresados en porcentaje están referidos a la lectura del patrón. Unidades: 1 kN = 101.972 kgf = 224.809 lbf	

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Nº INT.2011.50-491
RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN

Lectura instrumento	Lectura Patrón				
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Promedio	
(MPa)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kgf)
2	90.37	90.38	90.03	90.26	9204
4	180.95	179.95	179.83	180.25	18380
8	355.80	354.12	354.08	354.67	36166
12	531.07	529.20	529.74	530.01	54045
16	706.90	705.00	705.36	705.75	71966
20	881.99	879.97	880.63	880.87	89823
24	1056.74	1054.53	1053.63	1054.97	107576
28	1230.73	1229.25	1229.27	1229.75	125399
32	1406.14	1404.27	1403.90	1404.77	143246
36	1582.07	1579.00	1578.46	1579.84	161098

Lectura instrumento	Lectura patrón	Lectura ajustada	Error Ajuste	Incert. Expandida, k = 2	
				sin Ajuste	con Ajuste
(MPa)	(kN)	(kN)	(%)	(%)	(%)
2	90.26	92.01	-1.94	0.72	3.91
4	180.25	179.55	0.39	0.72	0.92
8	354.67	354.64	0.01	0.72	0.72
12	530.01	529.73	0.05	0.72	0.72
16	705.75	704.81	0.13	0.72	0.72
20	880.87	879.90	0.11	0.72	0.72
24	1054.97	1054.99	0.00	0.72	0.72
28	1229.75	1230.08	-0.03	0.72	0.72
32	1404.77	1405.17	-0.03	0.72	0.72
36	1579.84	1580.25	-0.03	0.72	0.72



PABLO CÁRCAMO MUÑOZ
Ingeniero Revisor
Sección Estructuras - Ensayos




GUILLERMO SIERRA RUBILAR
Jefe Laboratorio de Calibración de Fuerza
Sección Estructuras - Ensayos

Este certificado de calibración no debe ser reproducido en forma parcial ni modificado sin la autorización del laboratorio otorgante. Certificados sin firma y sello no tienen validez.

Anexo 1: Curva de ajuste

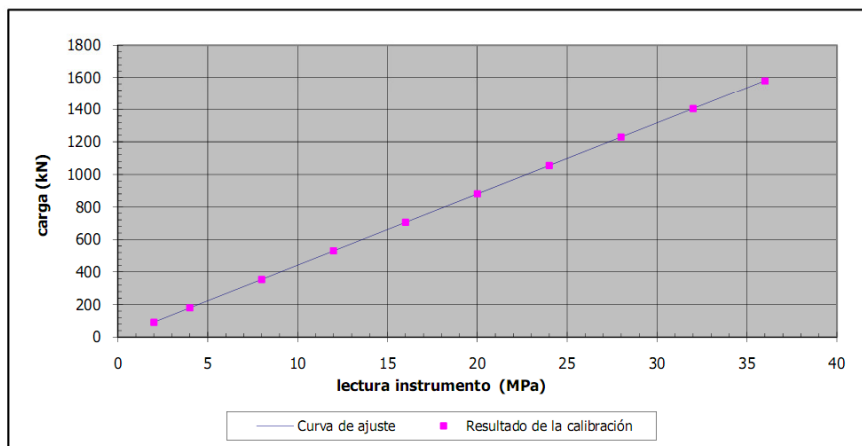
Ecuación de ajuste: $Y = A X + B$

Y = Lectura ajustada, carga o fuerza (kN o kgf)

X = Lectura del instrumento (div)

A = 43.7719 (kN/div) = 4463.47 (kgf/div)

B = 4.4638 (kN) = 455.18 (kgf)



ANEXO B

PROPIEDADES DEL MATERIAL

Ensayo de corte directo

Tabla B.1: Ensayo de corte directo para una carga vertical de 0.5 [kg/cm²]

Probeta 1								
Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical	Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical	Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical
0	0	0	600	106	95	2800	108	934
10	11	0	700	111	129	2900	108	965
20	18	-1	800	115	163	3000	105	998
30	24	-2	900	119	204	3100	102	1025
40	28	-3	1000	120	246	3200	101	1055
50	32	-4	1100	123	286	3300	101	1084
60	36	-4	1200	125	328	3400	101	1113
70	39	-4.5	1300	125	370	3500	99	1138
80	41	-5	1400	126	408	3600	91	1153
90	43	-5	1500	126	447	3700	91	1165
100	46	-5	1600	127	486	3800	89	1180
120	50	-5	1700	126	525	3900	86	1193
140	54	-4	1800	126	564	4000	86	1207
160	58	-2	1900	126	607	4100	86	1225
180	62	0	2000	126	648	4200	86	1241
200	65	2	2100	122	686	4300	85	1254
250	71	8	2200	122	725	4400	81	1256
300	78	17	2300	122	765	4500	78	1264
350	83	28	2400	119	800	4600	78	1265
400	88	40	2500	112	820	4700	77	1265
450	93	53	2600	112	866	4800	76	1265
500	97	65	2700	108	900	4900	75	1263
-	-	-	-	-	-	5000	60	1240

Tabla B.2: Ensayo de corte directo para una carga vertical de 5 [kg/cm²].

Probeta 2					
Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical	Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical
0	0	0	1900	706	24
10	8	0	2000	715	42
20	19	0	2100	715	60
30	35	0	2200	709	75
40	48	-1	2300	710	102
50	65	-2	2400	710	110
60	81	-3	2500	707	127
70	95	-5	2600	699	147
80	107	-8	2700	698	165
90	119	-10	2800	691	183
100	132	-12	2900	677	195
120	152	-16	3000	677	210
140	170	-21	3100	671	226
160	186	-25	3200	666	239
180	201	-31	3300	663	252
200	217	-34	3400	655	264
250	247	-44	3500	650	278
300	275	-53	3600	635	295
350	302	-58	3700	629	309
400	324	-63	3800	612	319
450	344	-67	3900	603	327
500	360	-70	4000	599	337
600	397	-76	4100	588	347
700	441	-78	4200	584	354
800	481	-78	4300	567	359
900	522	-77	4400	565	364
1000	550	-75	4500	559	370
1100	581	-73	4600	552	376
1200	605	-65	4700	548	381
1300	628	-57	4800	543	386
1400	647	-47	4900	531	390
1500	654	-35	5000	525	391
1600	672	-20			
1700	683	-7			
1800	693	6			

Tabla B.3: Ensayo de corte directo para una carga vertical de 10 [kg/cm²].

Probeta 3					
Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical	Desplaz. Horizontal	Fuerza de Corte	Desplaz. Vertical
0	0	0	1900	1230	-45
10	3	0	2000	1245	-35
20	9	0	2100	1265	-22
30	24	0	2200	1262	-12
40	41	0	2300	1267	0
50	56	0	2400	1277	12
60	73	0	2500	1275	25
70	90	0	2600	1279	36
80	109	0	2700	1282	49
90	128	-1	2800	1284	62
100	152	-2	2900	1282	73
120	186	-3	3000	1270	85
140	222	-5	3100	1262	96
160	255	-8	3200	1255	106
180	287	-12	3300	1255	117
200	317	-15	3400	1247	130
250	384	-25	3500	1248	143
300	437	-34	3600	1246	156
350	481	-44	3700	1233	171
400	528	-51	3800	1214	182
450	568	-57	3900	1200	194
500	608	-63	4000	1194	205
600	684	-71	4100	1172	214
700	745	-77	4200	1149	221
800	803	-82	4300	1145	228
900	856	-84	4400	1139	234
1000	904	-85	4500	1138	240
1100	955	-85	4600	1136	246
1200	1005	-83	4700	1120	252
1300	1048	-83	4800	1092	256
1400	1090	-79	4900	1085	260
1500	1126	-75	5000	1061	263
1600	1158	-70			
1700	1185	-63			
1800	1205	-55			

Ensayo de carga puntual

Tabla B.4: Resultados ensayo de carga puntual para material de grava.

Distancia entre puntas [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De ² [mm]	De [mm]	Is [Mpa]	Factor de corrección	Is 50 [Mpa]	Muestra falla por
15.7	27.28	9.2	545.32	23.35	16.87	0.71	11.98	Matriz
20.4	24.87	10.61	645.98	25.42	16.42	0.74	12.11	Matriz
21.5	21.54	9.9	589.65	24.28	16.79	0.72	12.13	Matriz
14.5	25.43	8.49	469.49	21.67	18.08	0.69	12.41	Matriz
18.1	21.34	12.03	491.79	22.18	24.46	0.69	16.97	Matriz
20.5	21.43	14.15	559.35	23.65	25.30	0.71	18.06	Matriz

Factor de forma

Tabla B.5: Diámetros de círculos inscritos y circunscritos para material de grava.

Muestra	d1	d2	d3	d4	d5	d6	Rmin-cir	Rmax-in	Esfericidad	Promedio	Redondez
1484	31.7	23.3	5.7	15.6	12.8		31.7	23.3	0.7	11.37	0.49
1485	35.7	25.3	8.4	4.2	7.6	8.8	35.7	25.3	0.7	7.25	0.29
1486	30.1	24.8	9.8				30.1	24.8	0.8	9.80	0.40
1487	36.4	21.5	5.7	6.4	7.9	9.8	36.4	21.5	0.6	7.45	0.35
1488	29.8	16.3	8.4	7.2	7.5	3.2	29.8	16.3	0.5	6.58	0.40
1489	35.2	21.4	8.5	15.1	19.11		35.2	21.4	0.6	14.24	0.67
1490	33.8	24.2	11.5	16.1			33.8	24.2	0.7	13.80	0.57
1491	31	20.7	7.8	9.2	13.1		31	20.7	0.7	10.03	0.48
1492	29.4	19.8	9.6	12.7			29.4	19.8	0.7	11.15	0.56
1493	31.3	22.6	6.7	10.1	7.3	10.4	31.3	22.6	0.7	8.63	0.38
1494	28.6	19.4					28.6	19.4	0.7	0.00	
1495	27.1	20.3	14.7	12.4	10		27.1	20.3	0.7	12.37	0.61
1496	33.3	25.3	20.6	25.1			33.3	25.3	0.8	22.85	0.90
1497	32	24	16.2	11.1	8.9	6.2	32	24	0.8	10.60	0.44
1498	29.3	18.7	5.3	10.1	13.3		29.3	18.7	0.6	9.57	0.51
1499	50.8	15.4	6.8	15.5			50.8	15.4	0.3	11.15	0.72
1500	33.7	22.5	10.8	8.3	7.2	7	33.7	22.5	0.7	8.33	0.37
1501	35.4	21.8	8.8	14.6	9.4		35.4	21.8	0.6	10.93	0.50
1502	29.3	20	8.6	9.9			29.3	20	0.7	9.25	0.46
1503	39.3	24.2	6.9	8	6.8	12.8	39.3	24.2	0.6	8.63	0.36
1504	37.1	22.9	8.7	9.2			37.1	22.9	0.6	8.95	0.39
1505	34.9	23.6	13.1	16.6			34.9	23.6	0.7	14.85	0.63
1506	35.3	22.3	11.1	23.1	16.8		35.3	22.3	0.6	17.00	0.76
1507	30	21.6					30	21.6	0.7	0.00	
1508	33.5	19	13.2				33.5	19	0.6	13.20	0.69
1509	42.7	24.8					42.7	24.8	0.6	0.00	
1510	31.9	22.9	20.3				31.9	22.9	0.7	20.30	0.89
1511	40	22.9	17	7.8			40	22.9	0.6	12.40	0.54
1512	36.3	24.6					36.3	24.6	0.7	0.00	
1513	32.3	21.4	9.1	7.6			32.3	21.4	0.7	8.35	0.39
1514	40.5	22.6	8.7				40.5	22.6	0.6	8.70	0.38
1515	34.6	26.3	16.5				34.6	26.3	0.8	16.50	0.63
1516	29.8	20.8	13.6	8.2			29.8	20.8	0.7	10.90	0.52

ANEXO C

EXPERIMENTOS DE FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Secuencias de extracción

Experimento 1 y 2

Tabla C.1: Secuencia de extracción para $d_{50}=6\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 0 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa Puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0						0	0
1	C	1	0.0	0.0	5	1665	1665
1	C	9	-5.5	0.0	5	1665	1665
1	P	1	0.0	0.0	10	1665	1665
2	P	8	-3.8	-3.1	10	2036	3701
2	P	2	-3.6	4.3	10	2036	3701
2	P	9	-5.5	0.0	10	2036	3701
2	C	2	-3.6	4.3	5	2036	3701
3	C	8	-3.8	-3.1	5	195	3896
3	C	6	3.2	-3.8	5	195	3896
3	C	7	0.0	-5.2	5	195	3896
3	D	1	0.0	0.0	15	195	3896
3	D	7	0.0	-5.2	15	195	3896
4	C	5	5.5	0.0	5	1035	4931
4	D	6	3.2	-3.8	15	1035	4931
4	D	9	-5.5	0.0	15	1035	4931
4	D	5	5.5	0.0	15	1035	4931
4	D	8	-3.8	-3.1	10	1035	4931
4	D	4	4.3	3.6	15	1035	4931
4	D	3	0.0	5.5	15	1035	4931
4	P	6	3.2	-3.8	10	1035	4931
4	P	7	0.0	-5.2	10	1035	4931
4	P	4	4.3	3.6	10	1035	4931
4	P	5	5.5	0.0	10	1035	4931
4	A	9	-5.5	0.0	20	1035	4931
4	A	8	-3.8	-3.1	20	1035	4931
4	A	1	0.0	0.0	20	1035	4931
4	B	1	0.0	0.0	25	1035	4931

Experimento 3 y 4

Tabla C.2: Secuencia de extracción para $d_{50}= 6\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 180 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
			0	0	0		0
1	C	1	0.0	0.0	5	590	590
2	P	8	-3.8	-3.1	10	530	1120
3	C	2	-3.6	4.3	5	975	2095
3	C	3	0.0	5.5	5	975	2095
3	C	6	3.2	-3.8	5	975	2095
3	C	4	4.3	3.6	5	975	2095
3	P	1	0.0	0.0	10	975	2095
3	D	4	4.3	3.6	15	975	2095
4	C	9	-5.5	0.0	5	1115	3210
4	P	4	4.3	3.6	10	1115	3210
4	P	5	5.5	0.0	10	1115	3210
4	P	2	-3.6	4.3	10	1115	3210
4	D	3	0.0	5.5	15	1115	3210
4	D	2	-3.6	4.3	15	1115	3210
5	C	8	-3.8	-3.1	5	1115	3210
5	P	9	-5.5	0.0	10	1115	3210
5	P	7	0.0	-5.2	10	1115	3210
5	P	6	3.2	-3.8	10	1115	3210
5	D	5	5.5	0.0	15	1115	3210
5	D	6	3.2	-3.8	15	1115	3210
5	D	9	-5.5	0.0	15	1115	3210
5	A	2	-3.6	4.3	20	1115	3210
5	A	1	0.0	0.0	20	1115	3210
6	C	7	0.0	-5.2	5	1350	4560
6	A	8	-3.8	-3.1	20	1350	4560
6	A	3	0.0	5.5	20	1350	4560
6	A	14	6.6	-7.9	20	1350	4560
6	B	2	-3.6	4.3	25	1350	4560
6	B	3	0.0	5.5	25	1350	4560
6	B	1	0.0	0.0	25	1350	4560
7	D	7	0.0	-5.2	15	1125	5685
7	A	9	-5.5	0.0	20	1125	5685
7	A	7	0.0	-5.2	20	1125	5685
7	B	5	5.5	0.0	25	1125	5685
7	B	4	4.3	3.6	25	1125	5685

Experimento 5 y 6

Tabla C.3: Secuencia de extracción para $d_{50}= 6\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 270 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0						0	0
0						625	625
1						95	720
2	C	1	0.0	0.0	5	705	1425
2	C	2	-3.6	4.3	5	705	1425
2	C	3	0.0	5.5	5	705	1425
2	P	2	-3.6	4.3	10	705	1425
2	P	4	4.3	3.6	10	705	1425
2	P	3	0.0	5.5	10	705	1425
3	C	4	4.3	3.6	5	845	2270
3	C	5	5.5	0.0	5	845	2270
3	C	6	3.2	-3.8	5	845	2270
3	C	9	-5.5	0.0	5	845	2270
3	P	1	0.0	0.0	10	845	2270
3	P	8	-3.8	-3.1	10	845	2270
3	P	9	-5.5	0.0	10	845	2270
4	P	5	5.5	0.0	10	845	3115
4	D	1	0.0	0.0	15	845	3115
4	D	2	-3.6	4.3	15	845	3115
4	D	3	0.0	5.5	15	845	3115
4	A	1	0.0	0.0	20	845	3115
5	C	7	0.0	-5.2	5	1175	4290
5	D	5	5.5	0.0	15	1175	4290
5	D	9	-5.5	0.0	15	1175	4290
5	D	8	-3.8	-3.1	15	1175	4290
5	A	2	-3.6	4.3	20	1175	4290
5	B	1	0.0	0.0	25	1175	4290

Experimento 7 y 8

Tabla C.4: Secuencia de extracción para $d_{50}= 6\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 530 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
0			0	0	0	530	530
1	C	1	0.0	0.0	5	1615	2145
1	C	2	-3.6	4.3	5	1615	2145
1	C	5	5.5	0.0	5	1615	2145
1	C	8	-3.8	-3.1	5	1615	2145
1	C	7	0.0	-5.2	5	1615	2145
1	C	6	3.2	-3.8	5	1615	2145
1	C	9	-5.5	0.0	5	1615	2145
1	C	4	4.3	3.6	5	1615	2145
1	P	1	0.0	0.0	10	1615	2145
1	P	3	0.0	5.5	10	1615	2145
1	P	4	4.3	3.6	10	1615	2145
2	C	3	0.0	5.5	5	1615	2145
2	P	6	3.2	-3.8	10	530	2675
2	P	2	-3.6	4.3	10	530	2675
4	P	9	-5.5	0.0	5	1040	2675
4	P	8	-3.8	-3.1	5	1040	2675
4	P	7	0.0	-5.2	10	1040	2675
4	D	3	0.0	5.5	5	1040	2675
4	D	5	5.5	0.0	10	1040	2675
5	P	11	0.0	11.0	10	735	3410
5	D	9	-5.5	0.0	10	735	3410
5	A	8	-3.8	-3.1	15	735	3410
5	A	2	-3.6	4.3	15	735	3410
5	A	9	-5.5	0.0	5	735	3410
6	A	7	0.0	-5.2	10	830	4240
6	A	5	5.5	0.0	10	830	4240
6	B	8	-3.8	-3.1	10	830	4240
6	B	9	-5.5	0.0	15	830	4240
6	B	1	0.0	0.0	15	830	4240

Tabla C.5: Resultados de la presión interior del cilindro con el esfuerzo vertical para d50 = 6mm y 530 KN.

Sigma v [MPa]	Pi [Mpa]	Sigma v [MPa]	Pi [Mpa]	Sigma v [MPa]	Pi [Mpa]
0.049	0.000	3.033	1.136	3.829	1.515
0.049	0.029	3.120	1.166	3.863	1.515
0.083	0.000	3.221	1.253	3.911	1.515
0.131	0.000	3.303	1.253	3.978	1.515
0.199	0.000	3.424	1.311	4.046	1.544
0.266	0.058	3.559	1.369	4.113	1.573
0.334	0.058	3.371	1.399	4.181	1.573
0.420	0.087	3.371	1.369	4.248	1.603
0.502	0.117	3.323	1.369	4.316	1.603
0.604	0.175	3.289	1.369	4.369	1.661
0.705	0.175	3.289	1.340	4.436	1.719
0.772	0.233	3.255	1.369	4.504	1.719
0.874	0.291	3.236	1.340	4.552	1.748
0.994	0.350	3.337	1.369	4.639	1.836
1.095	0.350	3.390	1.399	4.706	1.807
1.197	0.437	3.424	1.340	4.774	1.894
1.312	0.495	3.424	1.369	4.841	1.923
1.447	0.524	3.438	1.340	4.923	1.894
1.534	0.554	3.438	1.399	4.991	1.923
1.669	0.583	3.458	1.369	5.078	1.923
1.785	0.612	3.458	1.369	5.145	1.981
1.886	0.699	3.491	1.369	5.213	2.010
1.987	0.758	3.472	1.399	5.280	2.040
2.055	0.787	3.491	1.399	5.381	2.156
2.142	0.845	3.491	1.399	5.449	2.214
2.223	0.903	3.506	1.369	5.516	2.214
2.325	0.903	3.525	1.399	5.516	2.244
2.412	0.962	3.525	1.399	5.550	2.302
2.513	0.991	3.525	1.369	5.598	2.273
2.595	1.020	3.540	1.399	5.651	2.302
2.681	1.049	3.540	1.399	5.700	2.302
2.783	1.078	3.641	1.428	5.753	2.331
2.884	1.107	3.675	1.428	5.786	2.302
2.966	1.136	3.708	1.428	5.835	2.360

Experimento 9 y 10

Tabla C.6: Secuencia de extracción para $d_{50}= 6\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 1200 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
0			0	0	0	560	560
1	C	1	0.0	0.0	5	530	1090
2	C	2	-3.6	4.3	5	390	1480
2	C	9	-5.5	0.0	5	390	1480
3	C	5	5.5	0.0	5	190	1670
3	P	1	0.0	0.0	10	190	1670
4	C	3	0.0	5.5	5	160	1830
4	P	9	-5.5	0.0	10	160	1830
5	C	8	-3.8	-3.1	5	165	1995
6	C	4	4.3	3.6	5	65	2060
7	P	2	-3.6	4.3	10	150	2210
8	P	8	-3.8	-3.1	10	415	2625
9	C	7	0.0	-5.2	5	165	2790
10	C	6	3.2	-3.8	10	295	3085
11	D	9	-5.5	0.0	15	255	3340
12	D	2	-3.6	4.3	15	155	3495
12	P	3	0.0	5.5	10	155	3495
13	P	4	4.3	3.6	10	415	3910
13	D	8	-3.8	-3.1	15	415	3910
14	P	5	5.5	0.0	10	780	4690
14	P	6	3.2	-3.8	10	780	4690
14	D	1	0.0	0.0	15	780	4690
14	D	4	4.3	3.6	15	780	4690
15	D	6	3.2	-3.8	15	540	5230
15	D	3	0.0	5.5	15	540	5230

Experimento 11

En este caso no hubo extracción de material dado que no hubo flujo, debido a que el objetivo del experimento era determinar la carga vertical aplicada en la que no había flujo.

Experimento 12 y 13

Tabla C.7: Secuencia de extracción para $d_{50}= 11\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 0 KN

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
1	C	1	0.0	0.0	5	1210	1210
1	C	8	-3.8	-3.1	5	1210	1210
1	P	1	0.0	0.0	10	1210	1210
1	P	9	-5.5	0.0	10	1210	1210
2	C	4	4.3	3.6	5	2115	3325
2	C	6	3.2	-3.8	5	2115	3325
2	C	2	-3.6	4.3	5	2115	3325
2	C	3	0.0	5.5	5	2115	3325
2	C	5	5.5	0.0	5	2115	3325
2	C	7	0.0	-5.2	5	2115	3325
2	P	2	-3.6	4.3	10	2115	3325
2	P	7	0.0	-5.2	10	2115	3325
2	P	3	0.0	5.5	10	2115	3325
2	P	8	-3.8	-3.1	10	2115	3325
2	P	5	5.5	0.0	10	2115	3325
2	D	9	-5.5	0.0	15	2115	3325
2	D	3	0.0	5.5	15	2115	3325
2	D	8	-3.8	-3.1	15	2115	3325
2	D	1	0.0	0.0	15	2115	3325
2	D	6	3.2	-3.8	15	2115	3325
2	D	5	5.5	0.0	15	2115	3325
2	D	7	0.0	-5.2	15	2115	3325
2	D	2	-3.6	4.3	15	2115	3325
2	A	1	0.0	0.0	20	2115	3325
3	C	9	-5.5	0.0	5	1670	4995
3	D	4	4.3	3.6	15	1670	4995
3	A	9	-5.5	0.0	20	1670	4995
3	A	8	-3.8	-3.1	20	1670	4995
3	A	5	5.5	0.0	20	1670	4995
3	A	7	0.0	-5.2	20	1670	4995
3	A	2	-3.6	4.3	20	1670	4995
3	A	3	0.0	5.5	20	1670	4995
3	A	6	3.2	-3.8	20	1670	4995
3	B	1	0.0	0.0	25	1670	4995

Experimento 14

Tabla C.8: Secuencia de extracción para $d_{50}= 11\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 180 KN

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
1	-				5	680	680
2	C	1	0.0	0.0	5	725	1405
2	C	9	-5.5	0.0	5	725	1405
2	C	2	-3.6	4.3	5	725	1405
2	C	7	0.0	-5.2	5	725	1405
3	C	8	-3.8	-3.1	5	930	2335
3	C	3	0.0	5.5	5	930	2335
3	P	4	4.3	3.6	10	930	2335
3	P	2	-3.6	4.3	10	930	2335
3	P	9	-5.5	0.0	10	930	2335
3	D	9	-5.5	0.0	15	930	2335
3	D	8	-3.8	-3.1	15	930	2335
4	C	5	5.5	0.0	5	1285	3620
4	C	6	3.2	-3.8	5	1285	3620
4	C	4	4.3	3.6	5	1285	3620
4	P	3	0.0	5.5	10	1285	3620
4	P	5	5.5	0.0	10	1285	3620
4	P	1	0.0	0.0	10	1285	3620
4	P	7	0.0	-5.2	10	1285	3620
5	D	1	0.0	0.0	15	1030	4650
5	D	7	0.0	-5.2	15	1030	4650
5	D	2	-3.6	4.3	15	1030	4650
5	D	4	4.3	3.6	15	1030	4650
5	A	1	0.0	0.0	20	1030	4650

Experimento 15 y 16

Tabla C.9: Secuencia de extracción para d50= 6mm y una carga vertical aplicada de 270 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
1	-				5	770	770
2	C	1	0.0	0.0	5	140	910
3	C	8	-3.8	-3.1	5	480	1390
4	C	7	0.0	-5.2	5	210	1600
5	C	5	5.5	0.0	5	310	1910
6	C	2	-3.6	4.3	5	385	2295
6	C	3	0.0	5.5	5	385	2295
6	C	6	3.2	-3.8	5	385	2295
6	P	1	0.0	0.0	10	385	2295
6	P	8	-3.8	-3.1	10	255	2295
7	C	9	-5.5	0.0	5	600	2895
7	P	2	-3.6	4.3	10	600	2895
7	D	1	0.0	0.0	15	600	2895
8	P	3	0.0	5.5	10	415	3310
8	P	7	0.0	-5.2	10	415	3310
9	D	3	0.0	5.5	15	230	3540
10	P	5	5.5	0.0	10	130	3670
10	P	6	3.2	-3.8	10	130	3670
11	C	4	4.3	3.6	5	1055	4825
11	P	9	-5.5	0.0	10	1055	4825
11	D	4	4.3	3.6	15	1055	4825
11	D	7	0.0	-5.2	15	1055	4825
11	D	5	5.5	0.0	15	1055	4825
11	D	8	-3.8	-3.1	15	1055	4825

Experimento 17 y 18

Tabla C.10: Secuencia de extracción para $d_{50} = 11\text{mm}$ y una carga vertical aplicada de 530 KN.

Ciclo	Color	Marcador	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Masa puntual (g)	Masa Acumulada (g)
0			0	0	0		0
1						570	570
2	C	1	0.0	0.0	5	460	1030
2	C	2	-3.6	4.3	5	460	1030
3	C	9	-5.5	0.0	5	440	1030
4	C	8	-3.8	-3.1	5	275	1305
5	P	1	0.0	0.0	10	185	1490
5	P	8	-3.8	-3.1	10	185	1490
6	P	2	-3.6	4.3	10	255	1745
6	P	9	-5.5	0.0	10	255	1745
7	C	3	0.0	5.5	5	95	1840
8	P	3	0.0	5.5	10	220	2060
9	C	4	4.3	3.6	5	330	2390
9	C	6	3.2	-3.8	5	330	2390
9	D	1	0.0	0.0	15	330	2390
10	D	9	-5.5	0.0	15	120	2510
10	D	8	-3.8	-3.1	15	120	2510
11	C	5	5.5	0.0	5	370	2880
11	P	5	5.5	0.0	10	370	2880
11	D	2	-3.6	4.3	15	370	2880
12	P	7	0.0	-5.2	10	365	3245
12	P	6	3.2	-3.8	10	365	3245
12	D	7	0.0	-5.2	15	365	3245
13	C	7	0.0	-5.2	5	70	3315
14	D	3	0.0	5.5	15	560	3875
15	P	4	4.3	3.6	10	935	4810
15	D	6	3.2	-3.8	15	935	4810
15	D	4	4.3	3.6	15	935	4810
15	D	5	5.5	0.0	15	935	4810
16	A	1	0.0	0.0	20	215	5025
16	A	3	0.0	5.5	20	215	5025

Experimento 19 y 20

En este caso no fue posible la extracción de material, considerando una carga vertical de 1200 KN y un material $d_{50} = 11$ mm.

Grado de Compactación

Tabla C.11: Grado de compactación del material en función del esfuerzo vertical aplicado.

d50 [mm]	Sigma v	Grado de compactación: $\rho_f - \rho_i / \rho_i$
6	2.5	6%
6	3.8	7%
6	7.5	9%
6	16.9	13%
11	2.5	3%
11	3.8	4%
11	7.5	5%
11	16.9	10%

Ruptura de material

Tabla C.12: Índice de ruptura de material en función del esfuerzo vertical aplicado.

Experimento	d50 [mm]	Sigma v [MPa]	Bg [%]
4	6	2.5	6
6	6	3.8	11
8	6	7.5	23
10	6	17	27
14	11	2.5	4
16	11	3.8	6
18	11	7.5	11
20	11	17	24

Fluidez de material

Tabla C.13: Fluidez del material en función del esfuerzo vertical aplicado.

Experimento	Material, d50 [mm]	Carga Prensa [KN]	Esfuerzo vertical aplicado [MPa]	Condición de flujo
2	6	0	0	Fácil de fluir
4	6	180	2	Fácil de fluir
6	6	270	3	Flujo intermitente
8	6	530	5.8	Flujo intermitente
10	6	1200	13.2	Colgaduras, flujo intermitente
11	6	1580	17.4	No hubo extracción posible
13	11	0	0	Fácil de fluir
14	11	180	2	Flujo intermitente
16	11	270	3	Colgaduras, flujo intermitente
18	11	530	5.8	Colgaduras, flujo intermitente
20	6	1200	13.2	No hubo extracción posible