

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS INDUCIDOS POR FLUJO
GRAVITACIONAL EN MINERÍA DE BLOCK/PANEL CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JUAN ANTONIO CANALES HERNÁNDEZ

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO PAREDES MORALES
MIGUEL FUENZALIDA NAVARRETE**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN

Los métodos de explotación de *block* y *panel caving* son formas de explotación por hundimiento en que el cuerpo mineralizado se derrumba naturalmente por efecto de la gravedad y de los esfuerzos locales generados luego de haber sido socavado en su base. La propagación del *caving* es un efecto de la inestabilidad interna del macizo rocoso, producto de la constante extracción del mineral desde el punto de extracción hacia los puntos de vaciado.

Actualmente, cada vez los yacimientos minerales se encuentran a mayores profundidades y la roca es sometida a mayores niveles de esfuerzos, tanto in-situ como inducidos por socavación o extracción. Esto implica que las minas tengan una mayor probabilidad de sufrir eventos geomecánicos que pongan en riesgo la vida de personas y al negocio. La mayor parte de la investigación llevada a cabo hasta la fecha ha sido enfocada en el esfuerzo inducido por la socavación mientras se propaga el hundimiento, conocido como *abutment stress*. Sin embargo, la experiencia en la operación de minas explotadas por *block/panel caving* ha demostrado que la estabilidad del nivel de producción también depende de la extracción y de las condiciones de flujo.

El objetivo de esta investigación es cuantificar los esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en un pilar corona del nivel de producción de una mina operada por *block/panel caving*, a través de experimentos en un modelo físico a escala (1:200).

Con el fin de cumplir el objetivo propuesto, se llevaron a cabo 12 experimentos para representar configuraciones de *block caving* (BC) y *panel caving* (PC). En el caso de BC, se realizaron experimentos para determinar la influencia de puntos de extracción cerrados (60 m y 30 m de ancho de zona sin extracción), del tiraje uniforme y del tiraje no ideal. Dos experimentos de PC se realizaron para cuantificar la distribución de los esfuerzos verticales en el pilar de producción a medida que se incorpora área a la producción. Se utilizó mineral fragmentado para la realización de los experimentos. Por lo cual, es asumido que a escala de mina, el hundimiento ya se ha propagado hasta la superficie.

Para medir los esfuerzos verticales inducidos por la extracción, seis celdas de carga fueron instaladas sobre el pilar corona del modelo físico. El material utilizado en los experimentos fue sulfuro de cobre chancado y escalado (1:200) a partir de una curva de fragmentación primaria típica de un BC. Los esfuerzos verticales inducidos fueron cuantificados en términos relativos de acuerdo al esfuerzo vertical inicial (previo a la extracción), σ_0 .

En general, los experimentos indican que los esfuerzos verticales sobre el pilar corona cambian debido a la extracción. Esto significa que dependiendo de la secuencia de tiraje, los esfuerzos se distribuyen entre las zonas de movimiento y no activas alcanzando valores mínimos y máximos en un período dependiendo de qué punto de extracción está siendo explotado. Si una celda de carga está ubicada por encima de un punto de extracción que se está explotando, obtiene un valor mínimo cercano a $0.4\sigma_0$. Si una celda está por encima de un punto que no está siendo extraído comienza a aumentar su carga hasta valores tan altos como $2.8\sigma_0$. La magnitud de los esfuerzos verticales inducidos en un lugar determinado del pilar corona depende de varias variables que incluyen: Masa extraída por punto de extracción, tamaño del área no incorporada a la producción y distancia desde el sector de interés del pilar corona hasta el punto de extracción explotado.

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. Also, block caves are subjected to stability challenges during its lifetime. There are many triggers that could influence production level stability. To date most of the research has been focused on the influence of the abutment stresses during undercutting. The experience on block/panel caving indicates that the stability of the production level also depends on the draw and flow conditions.

The objective in this study is to quantify the role of controlled draw on induced vertical stresses in block and panel caving environments through experiments.

In order to understand vertical stresses twelve tests were conducted to represent configurations of panel caving (PC) and block caving (BC) draw strategy. In the case of BC the influence of closed drawpoints (60 m and 30 m of unmoved zone), uniform draw and non-ideal draw experiments were conducted. A Panel Caving Draw experiment was also conducted to quantify the load distribution on the major apex as drawpoints are added into production.

In order to study induced loads due to draw, the Physical Model set up consider the location of six loads cells over the mayor apex for vertical stresses measurements. Model media was crushed sulphide ore with a particle size distribution that is representative of the primary fragmentation expected for a typical block cave at a 1:200 scale. Induced vertical loads were quantified in terms of the initial vertical load σ_0 .

In general, the experiments indicate that the vertical stresses could change due to draw. This means that depending on the draw sequence, the load could reaching minimum and maximum values in a given extraction period depending to which drawpoint is being extracted. If a cell is above a draw point that is being drawn, it gets its minimum value ($0.4\sigma_0$). If a cell is above a non-drawn drawpoint it starts to increase its load until as high as $2.8\sigma_0$. The magnitude of the induced vertical stresses in a given location of the crown pillar depends on several variables including: mass drawn per drawpoint, size of area under draw, size of unmoved area, distance to the extraction front and initial vertical stress.

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación de la investigación.....	2
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo general.....	3
1.2.2.	Objetivo específicos.....	3
1.3.	Alcances.....	4
1.4.	Contenidos de la memoria.....	5
2.	ANTECEDENTES.....	6
2.1.	Introducción.....	6
2.2.	Flujo Gravitacional.....	7
2.2.1.	Elipsoides de movimiento y de extracción.....	7
2.2.2.	Mecanismos de flujo en múltiples puntos de extracción.....	10
2.3.	Modelamiento Físico.....	13
2.3.1.	Modelos físicos con uso de celdas de carga.....	13
2.4.	Esfuerzos inducidos.....	15
2.4.1.	Esfuerzos iniciales.....	15
2.4.2.	Esfuerzos en IMZ.....	16
2.4.3.	Esfuerzos en zonas estancadas.....	17
2.5.	Conclusiones.....	18
3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.1.	Introducción.....	19
3.2.	Instrumentación de laboratorio.....	19
3.2.1.	Modelo Físico.....	19
3.2.2.	Medición de Esfuerzos Inducidos.....	21
3.2.3.	Mineral.....	23
3.2.4.	Marcadores para el estudio de IEZ e IMZ.....	24
3.3.	Plan Experimental.....	26
3.4.	Procedimiento Experimental.....	27
4.	MODELAMIENTO FÍSICO.....	29
4.1.	Introducción.....	29
4.2.	Modelamiento físico.....	29
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.....	32
5.1.	Introducción.....	32

5.2.	Experimento 0: Tiraje Aislado.....	32
5.2.1.	Resultados.....	34
5.3.	Experimento 1: Panel Caving	39
	Experimento 1 – A.....	40
5.3.1.	Resultados: Experimento 1 - A.....	42
	Experimento 1 – B.....	46
5.3.2.	Resultados: Experimento 1 - B.....	48
5.4.	Experimento 2: Block Caving con 60 m de zona de no extracción	52
5.4.1.	Resultados.....	53
5.5.	Experimento 3: Block Caving con 30 m de zona de no extracción	57
5.5.1.	Resultados.....	58
5.6.	Experimento 4: Block Caving con tiraje no uniforme, sobreextracción	62
5.6.1.	Resultados.....	63
5.7.	Experimento 5: <i>Block Caving</i> , influencia de la masa extraída	72
5.7.1.	Resultados.....	73
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
7.	BIBLIOGRAFÍA	85
8.	ANEXOS	87
	ANEXO A	87
	Caracterización del mineral	87
	ANEXO B	92
	Extracciones.....	92
	ANEXO C	95
	Distancia entre puntos de extracción y celdas de carga.....	95
	ANEXO D	96
	Celdas de carga.....	96
	ANEXO E.....	97
	Esfuerzos iniciales	97
	ANEXO F.....	98
	Gráficos de esfuerzos verticales inducidos máximos y mínimos con desviación estándar. Experimento 4.	98

Índice de Figuras

Figura 1-1: Ejemplo de mina de block caving (Lacasse and Legast, 1981).	1
Figura 1-2: Influencia del espaciamiento entre puntos de extracción en esfuerzos verticales.	2
Figura 2-1: Aproximación propuesta para el entendimiento de los esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en minería de <i>block/panel caving</i>	6
Figura 2-2: Desarrollo de una zona de movimiento aislada (IMZ) de ancho, W, y de altura, H, en un modelo físico de dos dimensiones. (Melo <i>et al.</i> 2008).	7
Figura 2-3: Esquema de la Zona de Movimiento (MZ) y Zona de Extracción (EZ) para un punto aislado (Kvapil, 2004).	8
Figura 2-4: Esquema del flujo en masa, caso $d < W_{IMZ}$ (Castro, 2006)	11
Figura 2-5: Interacción de esfuerzos en caso $W_{IMZ} < d$. (Laubscher, 2000).	11
Figura 2-6: “Flexión” de los ejes de IMZ observado por Kvapil (1965) en un modelo físico 2D cuando una extracción sucesiva es aplicada (desde izquierda a derecha).	12
Figura 2-7: Extracción simultánea e uniforme en puntos de extracción adyacentes, modelo físico 2D. (Melo, 2008)	12
Figura 2-8: Esquema del modelo físico utilizado por Castro (2006).	14
Figura 2-9: Modelo físico utilizado por Orellana (2012).	14
Figura 2-10: Esfuerzos verticales para distintas alturas de llenado. (Castro, 2006).	16
Figura 2-11: Fuerza de contacto entre partículas en PFC3D de Lorig y Cundall (2000).	17
Figura 3-1: Sector representado en el modelo físico.	19
Figura 3-2: Modelo físico a escala 1:200 utilizado en la fase experimental.	20
Figura 3-3: Base del modelo físico. Cotas en [cm]. A) Vista en planta y puntos de extracción. B) Dimensiones de un punto de extracción, vista frontal. C) Pilar corona, vista en perfil. D) Pilar de zanja entre dos puntos de extracción y sus dimensiones.	20
Figura 3-4: Servomotores para extracción de mineral.	21
Figura 3-5: Celda de carga instalada en pilar corona de la base del modelo físico. Vista en perfil.	22
Figura 3-6: Celdas de carga tipo “punto único” de capacidades de 30 kg (izquierda) y 20 kg (derecha).	22
Figura 3-7: Strainmeter TC-31 K (izquierda). Switching box (derecha)	22
Figura 3-8: Curva de fragmentación primaria de mina y a escala de laboratorio.	23
Figura 3-9: Muestra de la distribución de tamaños del mineral a escala de laboratorio.	23
Figura 3-10: Posición de los marcadores. Vista en planta (izquierda). Alturas a las que se posicionaron marcadores (derecha).	25
Figura 3-11: Esquema de la metodología experimental para esta investigación.	26
Figura 3-12: Esquema del procedimiento experimental para la realización de un experimento.	27
Figura 3-13: Altura las que se ubicaron marcadores enumerados (izquierda) y líneas de flujo (derecha) al interior del modelo.	28
Figura 5-1: Esquema de estrategia de tiraje aislado (vista frontal) – Experimento 0.	32
Figura 5-2: Celdas de carga sobre pilar corona (izquierda) y vista en perfil A-A’ (derecha) – Experimento 0.	32
Figura 5-3: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 0.	33
Figura 5-4: Ubicación de líneas de flujo (izquierda) y de marcadores (derecha) al interior del modelo físico – Experimento 0.	33
Figura 5-5: Evolución de la zona de movimiento aislada a medida que progresa la extracción – Experimento 0.	34
Figura 5-6: Radio de IMZ en función de la masa extraída – Experimento 0.	35

Figura 5-7: Altura de IMZ en función de la masa extraída – Experimento 0.....	35
Figura 5-8: Comparación de las mediciones de la forma de IMZ (ancho vs alto) de los experimentos. La línea sólida corresponde a la forma de IMZ predicha por la teoría cinemática de Nedderman (1995).....	36
Figura 5-9: Vista en planta de la disposición de marcadores para la medición de IEZ.....	36
Figura 5-10: Geometría de IEZ, plano XZ (Y=0) en la izquierda y plano YZ (X=0) en la derecha – Experimento 0 A.....	37
Figura 5-11: Geometría de IEZ, plano XZ (Y=0) en la izquierda y plano YZ (X=0) en la derecha – Experimento 0 B.....	37
Figura 5-12: Esfuerzos verticales normalizados por el esfuerzo inicial en función de la masa – Experimento 0.	38
Figura 5-13: Esquema de estrategia de extracción <i>panel caving</i> (vista frontal) – Experimento 1.	39
Figura 5-14: Ubicación de las celdas de carga en el modelo físico (vista en planta), medidas en mm - Experimento 1.	39
Figura 5-15: Puntos de extracción de la base del modelo físico. Vista en planta. – Experimento 1 – A.	40
Figura 5-16: Esquemas del progreso del Experimento 1 – A.....	41
Figura 5-17: Evolución de la zona de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 1 – A.....	42
Figura 5-18: Ancho de la zona de no movimiento en función de la masa extraída. Experimento 1 – A.	43
Figura 5-19: Zona de extracción. Experimento 1 – A.	43
Figura 5-20: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Experimento 1 – A.....	44
Figura 5-21: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Experimento 1 – A.....	44
Figura 5-22: Zanjales de la base del modelo físico. Vista en planta. – Experimento 1 – A.....	46
Figura 5-23: Esquemas del progreso del Experimento 1 – B.....	47
Figura 5-24: Evolución de la zona de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 1 – B.....	48
Figura 5-25: Ancho de la zona de no movimiento en función de la masa extraída. Experimento 1 – B.	49
Figura 5-26: Zona de extracción. Experimento 1 – B.	49
Figura 5-27: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Experimento 1 – B.....	50
Figura 5-28: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Experimento 1 – B.....	50
Figura 5-29: Esquema de estrategia <i>block caving</i> con zona de no movimiento (vista frontal) – Experimento 2.	52
Figura 5-30: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 2.	52
Figura 5-31: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 2 – A.....	53
Figura 5-32: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 2 - B.	54
Figura 5-33: Zonas de extracción de ambos experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 2.	54

Figura 5-34: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada - Experimento 2.	55
Figura 5-35: Esfuerzos verticales normalizados en función de la posición de las celdas de carga en el modelo físico – Experimento 2.....	55
Figura 5-36: Esquema de estrategia <i>block caving</i> con zona de no movimiento (vista frontal) – Experimento 3.	57
Figura 5-37: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4.	57
Figura 5-38: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 3 – A.....	58
Figura 5-39: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 3 – B.....	59
Figura 5-40: Zonas de extracción de experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 2.	60
Figura 5-41: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada - Experimento 3.	60
Figura 5-42: Esfuerzos verticales normalizados en función de la posición de las celdas de carga en el modelo físico – Experimento 3.....	61
Figura 5-43: Esquema de estrategia de <i>block caving</i> con tiraje no uniforme. Experimento 4.	62
Figura 5-44: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4.	62
Figura 5-45: Masa extraída promedio por período para puntos normales y sobreextraídos. Experimento 4.	63
Figura 5-46: Masa extraída al final de los experimentos. Experimento 4.....	64
Figura 5-47: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 4-A.	64
Figura 5-48: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 4-B.	65
Figura 5-49: Zonas de extracción de experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 4.	65
Figura 5-50: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Período 1. Experimentos 4-A y 4-B.	66
Figura 5-51: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Período 2. Experimentos 4-A y 4-B.	67
Figura 5-52: Esquema de los efectos que produce en las celdas de carga la extracción de mineral desde un punto de extracción de distintas zanjas. Las flechas rojas indican un aumento en el esfuerzo vertical inducido y las de color verde, un descenso.	68
Figura 5-53: Máximos esfuerzos normalizados (promedio entre experimentos 4-A y 4-b) para cada celda de carga. Experimento 4.....	68
Figura 5-54: Mínimos esfuerzos normalizados (promedio entre experimentos 4-A y 4-b) para cada celda de carga. Experimento 4.....	69
Figura 5-55: Zonas definidas para la base del modelo físico. Experimento 4.....	70
Figura 5-56: Esfuerzos inducidos normalizados. Zona 2 bajo extracción. Experimento 4.	70
Figura 5-57: Esfuerzos inducidos normalizados. Zona 1 y Zona 3 bajo extracción. Experimento 4.	71
Figura 5-58: Esquema de la primera etapa. Experimento 5.	72
Figura 5-59: Esquema de la primera etapa. Experimento 5.	72
Figura 5-60: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 5.	73
Figura 5-61: Masa extraída promedio para cada punto de extracción en cada período. Experimento 5.	73
Figura 5-62: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 5-A.	74

Figura 5-63: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 5-B.	75
Figura 5-64: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 1. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.	76
Figura 5-65: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 4. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.	76
Figura 5-66: Máximos esfuerzos inducidos para cada celda en función de la masa extraída. Experimento 5.	77
Figura 5-67: Mínimos esfuerzos inducidos para cada celda en función de la masa extraída. Experimento 5.	77
Figura 6-1: Resumen de los resultados de <i>panel caving</i> . Celeste: Condición; Amarillo: Máximo o mínimo esfuerzo vertical medio; Verde: Experimento; DE: Desviación Estándar.	78
Figura 6-2: Resumen de los resultados de <i>block caving</i> . Celeste: Condición; Amarillo: Máximo o mínimo esfuerzo vertical medio; Verde: Experimento; DE: Desviación Estándar.	79
Figura 6-3: Medidas de la porosidad tomadas en distintos momentos de crecimiento de IMZ. Rectángulos azules representan una celda de carga. Izquierda: Crecimiento temprano. Derecha: Crecimiento en momentos finales. (Hancock, 2013).	80
Figura 6-4: Esfuerzo vertical medio registrado en función de la cantidad de masa.....	81
Figura 6-5: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 4. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.	82
Figura 6-6: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4 y 5.	82
Figura 8-1: Ejemplo de cálculo de Factor de forma según Cho et al. (2006).....	87
Figura 8-2: Factor de forma para el material utilizado en los experimentos (Hoz, 2007).....	88
Figura 8-3: Volumen aparente de 1 kg de muestra.....	89
Figura 8-4: Cilindro utilizado para la estimación del ángulo de reposo del mineral.....	90
Figura 8-5: Puntos de extracción y celdas de carga. Experimento 4 y 5.....	95
Figura 8-6: Curva típica de calibración de celdas. Experimento 3.....	96
Figura 8-7: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 1.....	98
Figura 8-8: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 2.....	98
Figura 8-9: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 3.....	98
Figura 8-10: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 4.....	99
Figura 8-11: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 5.....	99
Figura 8-12: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 6.....	99

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Resumen de modelos físicos utilizados y sus principales resultados. Basada en Orellana (2011).	9
Tabla 2-2: Factores de escala.....	13
Tabla 3-1: Características del mineral utilizado.	24
Tabla 4-1: Factores de escala.....	29
Tabla 4-2: Plan experimental.....	30
Tabla 4-3: Plan experimental (continuación).	31
Tabla 5-1: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 0.....	33
Tabla 5-2: Esfuerzos Iniciales de cada celda [kPa]. Experimento 1 – A.....	40
Tabla 5-3: Masa extraída en cada punto de extracción por periodo. Experimento 1 – A.	40
Tabla 5-4: Esfuerzos Iniciales de cada celda [kPa]. Experimento 1 – B.....	46
Tabla 5-5: Masa extraída en cada punto de extracción por periodo. Experimento 1 – B.....	46
Tabla 5-6: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 2.....	53
Tabla 5-7: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 3.....	58
Tabla 5-8: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 4.....	63
Tabla 5-9: Masa acumulada por período. Experimento 4.	69
Tabla 5-10: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 4.....	73
Tabla 5-11: Masa extraída y acumulada [g] en cada período. Experimento 5.	74
Tabla 6-1: Recomendaciones basadas en la investigación.	83
Tabla 8-1: Resultados de factor de forma para el material a utilizar en la investigación.....	87
Tabla 8-2. Distribución granulométrica de 1 kg de material.	88
Tabla 8-3. Mediciones y Resultados para los cálculos del ángulo de reposo.....	90
Tabla 8-4: Resultados del cálculo del ángulo de fricción del mineral con las paredes del modelo físico.	91
Tabla 8-5: Características del mineral utilizado.	91
Tabla 8-6: Extracción del Experimento 0.....	92
Tabla 8-7: Extracción del Experimento 2.....	93
Tabla 8-8: Extracción del Experimento 3.....	94
Tabla 8-9: Distancia [cm] entre puntos de extracción y celdas de carga - Experimentos 4 y 5....	95
Tabla 8-10: Resumen de esfuerzos iniciales medidos en celdas de carga y su comparación con los obtenidos mediante la ecuación de Janssen.....	97

Agradecimientos

Quisiera dar gracias a todas las personas que han contribuido, de una u otra forma, a llegar al final de esta hermosa etapa que ha sido la universidad. La cual, pese a las vicisitudes, ha sido la mejor de mi vida.

En primer lugar, gracias a mi madre por su apoyo incondicional, por amarme y hacer de mí una persona de bien, gracias por sus consejos y ejemplos. Gracias a mi padre por su esfuerzo, por compartir su experiencia y por su confianza. Les admiro y amo. Gracias a mi hermana, Daniela, a quien siempre protegeré. La quiero con todo mi corazón.

Gracias a mi tía Geli, quien cuidó de mí en mi infancia y adolescencia mientras mi madre trabajaba, gracias por regalarme hasta el día de hoy. Gracias a mi tía Doris, por su cariño, apoyo y buen humor, por todos los bellos momentos que hemos pasado en su casa junto a la familia. Gracias a mi tía Lili, a quien recordamos con cariño frecuentemente. Después de su partida, la familia no volvió a ser lo mismo, gracias por ser motivo de lucha en los momentos más adversos de mi vida universitaria. Afortunadamente, creo que seré capaz de cumplir la promesa que hice al ingresar a la universidad. Gracias a mis tíos Leonel, Raúl, Anselmo, Vicente y Patricio, quienes siempre han compartido conmigo valiosos consejos y experiencias, además de su enorme disposición a ayudarme.

Gracias a mis primos Jacobo, Cristian, Leslie, Andrés, Lorena, Bastián y Denise por las inmensas alegrías vividas juntos, por las bellas celebraciones, las incontables bromas y por, sobretodo, hacer de mí una mejor persona.

Gracias a mi abuela Inés por su amor. Gracias a sus hermanos y a los primos de mi madre, por sus buenos deseos.

Gracias a mi familia paterna. A mis tías, a mis primos, a Isabel y Jaime. Gracias por los buenos momentos y por las enseñanzas.

Gracias a mis amigos Maximiliano y Álvaro, por su amistad en todo momento, por su incondicionalidad. Gracias a los integrantes del gremio: Edgardo, Ignacio, José, Lizandro, Mario, Pedro, Walter y Rachid, por ser grandes personas y excelentes amigos. Gracias a Francisco L por la gran amistad que compartimos desde la niñez. Gracias a mis amigos Patricio, Ignacio, Francisco V y Carol, por horas de estudio y por compartir alegrías y tristezas. Gracias a mis amigos de la generación 2006, todos muy buenos muchachos. Gracias a todos mis amigos por haber compartido conmigo anécdotas inolvidables y un sinnúmero de momentos alegres.

Gracias a mi polola Stephanie por su amor, amabilidad y paciencia. Gracias a su bella familia, por abrirme las puertas de sus casas y por permitir sentirme tan cómodo junto a ellos.

Gracias al profesor Raúl Castro, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo bajo su tutela, por su confianza y compartir su sabiduría. Gracias a Pablo Paredes y a Miguel Fuenzalida, por revisar esta memoria y ser un inmenso aporte a mejorar este trabajo. Gracias a las personas que componen BCLab y BCTEC, por los momentos amenos y por su disposición a ayudarme en todo momento. Gracias a René, Álvaro, Francisco A y David con quienes compartí gran parte del trabajo desarrollado. Gracias al profesor Aldo Casali, por creer en mí en uno de los momentos más difíciles de mi carrera. Gracias a toda la gente que compone el Departamento de Minas, por su enorme voluntad a ayudarnos y por crear una linda comunidad.

*“Si una persona no tiene sueños no tiene razón de vivir.
Soñar es necesario aun cuando el sueño va más allá de la realidad.
Para mí, soñar es uno de los principios de la vida.”*

AYRTON SENNA

Capítulo 1. Introducción

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de explotación de *block* y *panel caving* son formas de explotación por hundimiento (ver Figura 1-1) en que el cuerpo mineralizado se derrumba naturalmente por efecto de la gravedad y de los esfuerzos locales generados luego de haber sido socavado en su base. La propagación del caving es un efecto de la inestabilidad interna del macizo rocoso, producto de la constante extracción del mineral desde el punto de extracción hacia los puntos de vaciado (Brown, 2003).

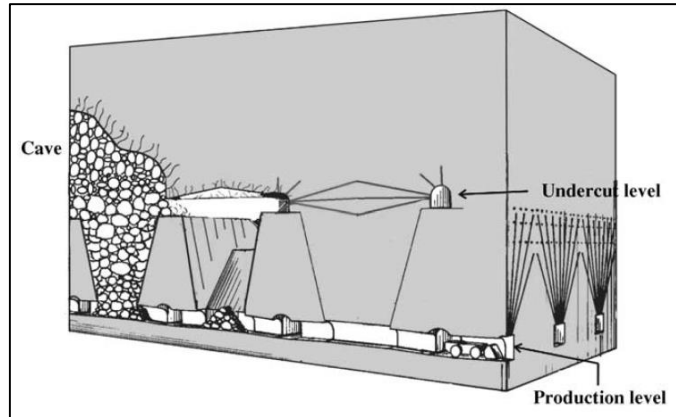


Figura 1-1: Ejemplo de mina de block caving (Lacasse and Legast, 1981).

Cuando se aplica el método de *block caving*, el área basal del cuerpo mineralizado se subdivide en bloques, y el área socavada se incrementa de manera discreta en función de las necesidades de incorporar nuevos bloques a la producción. En cambio, si se utiliza *panel caving*, la socavación del cuerpo mineral sigue un patrón relativamente continuo, típicamente dado por una tasa de área socavada por período, lo que hace que la estrategia de incorporación de área productiva sea mucho más flexible en este método que en *block caving* (Flores, 2005). Como resultado de lo anterior, en *panel caving* se tendrá una frente de hundimiento que se moverá atravesando el cuerpo mineralizado guiada por la dirección del avance de la socavación (Brown, 2007).

En la actualidad, muchas de las minas que utilizan estos métodos de explotación se encuentran en períodos de profundización o expansión. Esto, inevitablemente, somete a la roca a altos esfuerzos inducidos y surgen desafíos asociados a una mayor complejidad en el manejo de materiales y a enfrentar ambientes geotécnicos cada vez más hostiles. Por estos motivos, resulta fundamental comprender el comportamiento de los esfuerzos en áreas tan vitales como en el nivel de producción. La evidencia muestra que colapsos en el nivel de producción pueden producirse incluso después que el *cave back* ha alcanzado la superficie. (Sahupala, 2008).

El presente trabajo se enfoca en el estudio de los esfuerzos inducidos generados por las diferentes estrategias de extracción en el nivel de producción, en particular, en el pilar corona. Esto, con el propósito de mejorar el entendimiento en la relación entre flujo gravitacional y esfuerzos inducidos. De esta manera, se pueden entregar recomendaciones acerca de cómo beneficiar la estabilidad del nivel de producción mediante prácticas simples en la extracción evitando aumentar, aún más, los esfuerzos.

1.1. Motivación de la investigación

Actualmente, cada vez los yacimientos minerales se encuentran a mayores profundidades y la roca es sometida a mayores niveles de esfuerzos, tanto in-situ como inducidos por socavación o extracción. Esto implica que las minas tengan una mayor probabilidad de sufrir colapsos en sus niveles de producción. La mayor parte de la investigación llevada a cabo hasta la fecha ha sido enfocada en el esfuerzo inducido por la socavación mientras se propaga el hundimiento, conocido como *abutment stress* (Trueman *et al.*, 2002). Sin embargo, la experiencia en la operación de minas explotadas por *block/panel caving* ha demostrado que la estabilidad del nivel de producción también depende de la extracción y de las condiciones de flujo, tal como fue indicado por Richardson en 1981 (ver Figura 1-2). En su investigación, se sugiere que el espaciamiento entre puntos de extracción, lo cual está relacionado al ancho del de las zonas de flujo, pueden tener un impacto en los esfuerzos inducidos. Si el flujo de material ocasionado por puntos de extracción contiguos no interactúa, se tendrá un aumento de los esfuerzos verticales sobre el pilar que separa dichos puntos. Por el contrario, si la distancia entre los puntos de extracción se minimiza para maximizar la interacción entre zonas de flujo, se merma la resistencia del pilar.

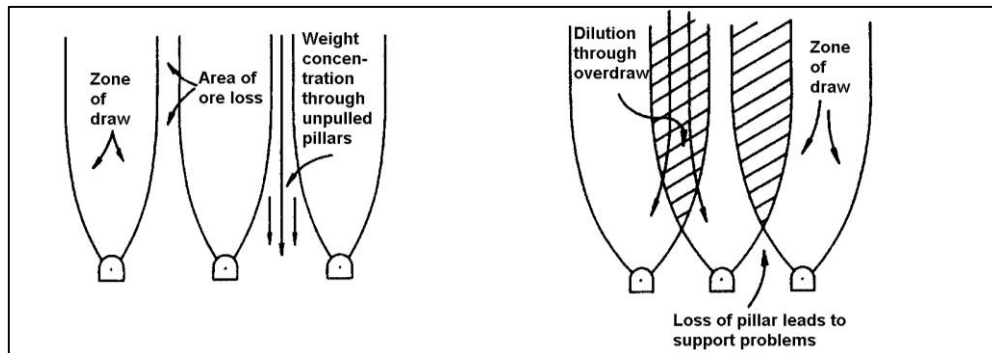


Figura 1-2: Influencia del espaciamiento entre puntos de extracción en esfuerzos verticales.

Por lo tanto, surgen interrogantes relacionadas al rol que cumple el flujo gravitacional en los esfuerzos verticales inducidos en el nivel de producción durante la extracción:

1. ¿Cuál es el impacto de la estrategia de extracción (*block/panel caving*) en los esfuerzos verticales inducidos?
2. ¿Cuáles son los efectos incorporar, o cerrar, puntos de extracción a la producción?
3. ¿Cuál es la influencia de prácticas como la sobreextracción de puntos de extracción?
4. ¿Cuál es la influencia de la cantidad de masa extraída por punto de extracción?

En esta investigación se busca responder las interrogantes expuestas recientemente.

1.2. Objetivos

Los objetivos de esta investigación, generales y específicos, son los que se describen a continuación.

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es cuantificar los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional producto de diferentes estrategias de tiraje, en un pilar corona del nivel de producción de una mina operada por *block/panel caving*, a través de experimentos en un modelo físico a escala.

1.2.2. Objetivo específicos

Para llevar a cabo el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Llevar a cabo experimentos para el estudio del tiraje aislado de un punto de extracción para determinar parámetros de la zona de movimiento aislada.
- ✓ Realizar experimentos utilizando extracción de múltiples puntos para cuantificar los esfuerzos inducidos en una estrategia de *panel caving*.
- ✓ Efectuar experimentos para determinar cómo se distribuyen los esfuerzos con una estrategia de extracción de *block caving* cuando existen zonas no incorporadas a la producción.
- ✓ Llevar a cabo experimentos para entender los efectos de la sobreextracción en los esfuerzos. La sobreextracción de puntos (de extracción) ocurre en aquellos cercanos a piques de traspaso.
- ✓ Realizar experimentos para cuantificar la influencia de la masa extraída por punto de extracción en los esfuerzos inducidos cuando se aplica una estrategia de extracción de *block caving*.
- ✓ Identificar y cuantificar la influencia de las principales variables y parámetros involucrados en la distribución de esfuerzos en el pilar de producción.
- ✓ Entregar recomendaciones preliminares para la extracción de mineral para mantener la estabilidad del nivel de producción.

1.3. Alcances

Los sistemas físicos son construidos para cumplir dos tipos de funciones: La primera, modelar una situación específica de alguna mina; la segunda, modelar situaciones genéricas con el propósito de investigar las reglas físicas que gobiernan fenómenos específicos (Fuenzalida, 2012). Este trabajo se apega a la segunda función de los modelos físicos. Por lo tanto, no se intenta reproducir o emular, a escala de laboratorio, una mina en particular o condiciones que representen a una localidad de algún país o continente, sino observar el comportamiento del fenómeno en estudio bajo distintas condiciones genéricas y controladas.

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó un modelo físico (escala 1:200) construido en base al diseño de una mina explotada por *block/panel caving*. Dicho modelo posee tres calles de producción, un pilar corona, treinta y seis puntos de extracción ubicados en nueve zanjas. Debido a la existencia de sólo un pilar corona, se considera que se trata de un modelo físico de dos dimensiones (2D) ya que no se puede estudiar la influencia del flujo gravitacional en otros pilares corona. Por lo tanto, los alcances de esta investigación están relacionados al modelo físico utilizado.

Las limitaciones del modelo físico y del estudio, se mencionan a continuación:

- Se utilizó mineral fragmentado para la realización de los experimentos. Por lo cual, es asumido que a escala de mina, el hundimiento ya se ha propagado hasta la superficie. Esto, inevitablemente, conlleva a la incapacidad de estudiar efectos de sismicidad, tronadura y tipo de socavación en el pilar corona.
- Una tasa de extracción de $0.5 \text{ t/m}^2/\text{d}$, la cual no es elevada a escala de mina, al ser llevada a escala de laboratorio implica una extracción de 14 g por punto de extracción cada 102 minutos. Es decir, para emular la producción de un año, a la misma tasa, cada experimento tardaría 13 semanas ininterrumpidas de trabajo. Esto hace impracticable el escalamiento del tiempo en el modelo físico. Por lo tanto, en este sentido se decidió escalar sólo la cantidad de masa extraída por punto de extracción. Por ejemplo, se extrajo una cantidad de masa desde un punto, esta cifra es llevada a escala de mina e indirectamente se sabe a cuántos días de producción equivale.
- No se considera fragmentación secundaria del mineral al ser extraído.
- No se considera el efecto de la humedad ni de material fino. Se utilizó mineral previamente secado y clasificado en harneros para la eliminación de material fino.
- Se omite el estudio del efecto de la composición (mineralogía) y forma de los materiales.
- Las colgaduras no son estudiadas en los experimentos. En los casos que hubo, se removieron y se continuó el experimento.

1.4. Contenidos de la memoria

Los capítulos que componen la memoria, con sus respectivos contenidos se presentan a continuación:

Capítulo 1: Introducción. Introducción, objetivos, motivación de la investigación y alcances.

Capítulo 2: Antecedentes. Revisión de los conceptos fundamentales del flujo gravitacional, modelamiento físico y de los esfuerzos inducidos por flujo de material granular.

Capítulo 3: Metodología Experimental. Se define la metodología de la investigación, se explica en detalle el *set* experimental usado, incluyendo una descripción del equipo de laboratorio utilizado en la investigación.

Capítulo 4: Modelamiento Físico. Se muestra el uso del modelamiento físico como herramienta de estudio en el caso de esta investigación.

Capítulo 5: Resultados y Análisis de la Etapa Experimental. Se muestran los experimentos realizados. Se detalla la extracción realizada, los resultados y sus análisis.

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

Capítulo 2: Antecedentes

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

En este capítulo, se muestran los antecedentes que son relevantes para esta investigación. El autor ha estructurado una revisión de los mismos según se muestra en la Figura 2-1. En ésta se presentan las principales áreas a abordar para el entendimiento de los fenómenos en cuestión.

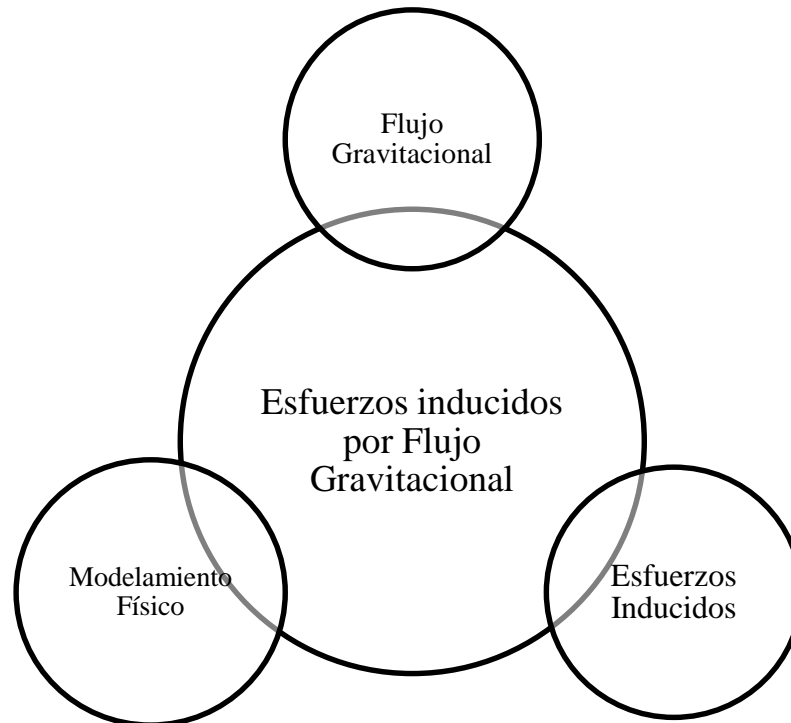


Figura 2-1: Aproximación propuesta para el entendimiento de los esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en minería de *block/panel caving*.

La importancia de conocer estos aspectos se describe a continuación:

- *Flujo Gravitacional*: Se debe conocer y comprender el comportamiento del flujo gravitacional, principales variables y parámetros involucrados, forma y tamaño de la envolvente del flujo.
- *Modelamiento Físico*: Gracias al modelamiento físico se pueden estudiar diversas variables y parámetros en un amplio rango, las cuales serían más difíciles de observar en una mina. Su principal desventaja es que los resultados del modelo deben ser extrapolados para ser aplicados a escala de mina.
- *Esfuerzos Inducidos*: Es importante comprender el comportamiento y distribución de los esfuerzos inducidos con respecto al flujo gravitacional. Estos esfuerzos inducidos no deben ser confundidos con los ocasionados por socavación.

2.2. Flujo Gravitacional

El flujo por gravedad, o gravitacional, de los materiales granulares es el proceso por el cual el material se desplaza desde su posición inicial por la acción de la gravedad. (Castro, 2006). En este fenómeno se basan los métodos de extracción por hundimiento como *block/panel caving*, donde la roca fragmentada se mueve de su ubicación *in situ* hacia los puntos de extracción del nivel de producción. La forma en que se mueven los fragmentos dentro de la zona de extracción de una mina tiene impacto en la recuperación de mineral y en la dilución, por lo tanto su estudio ha sido de gran interés.

Para el estudio del flujo gravitacional, se han utilizado modelos físicos utilizando arena, grava y roca fragmentada en pruebas de laboratorio, pruebas a escala mina utilizando marcadores naturales (materiales como maderas y aceros provenientes de niveles superiores) y modelos matemáticos basados en predicción estocástica y en el análisis de ecuaciones de balance de masa y esfuerzos. (Paredes, 2012).

2.2.1. Elipsoides de movimiento y de extracción

Por años los investigadores han notado que cuando se extrae material granular a través de un orificio, un volumen elipsoidal de material se mueve hacia abajo por encima de los orificios. Este volumen de material en movimiento se denomina la zona de movimiento aislada, abreviado como IMZ por sus letras iniciales en inglés (*Isolated Movement Zone*); el material estacionario que rodea a la zona de movimiento se conoce como zona estancada, zona inactiva o zona sin movimiento (Pierce, 2009). Cuando el material es extraído a partir de dos o más puntos de extracción, se denomina, simplemente, zona de movimiento (MZ).

La forma de IMZ puede ser caracterizada por sus dimensiones, es decir, por su altura (H) y su ancho (W) o su radio (r). La forma de la zona de movimiento es importante en minas explotadas por métodos de hundimiento, ya que el ancho incide en el espaciamiento de los puntos de extracción para lograr el traslape de zonas de movimiento.

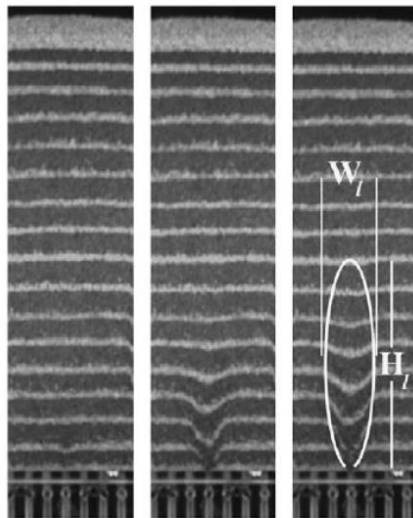


Figura 2-2: Desarrollo de una zona de movimiento aislada (IMZ) de ancho, W , y de altura, H , en un modelo físico de dos dimensiones. (Melo *et al.* 2008).

Determinar la forma de la zona de movimiento aislada radica en el ejercicio de poder medir la altura y el ancho de IMZ, y como se muestra en la Figura 2-2, el límite entre la zona de movimiento y la zona estancada puede ser difuso. Por lo tanto, se trata de un ejercicio con errores asociados y depende de quien realiza el análisis (Nedderman, 1995). Esta complicación debe ser tomada en cuenta, ya que al analizar las imágenes de los experimentos realizados para esta investigación, se sufrió la complicación descrita.

Por otro lado, la 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 cantidad de masa dada. Si el material se extrae desde sólo un punto de extracción, dicho volumen se denomina zona de extracción aislada (Isolated Extracted Zone, IEZ).

En la Figura 2-3, se muestra la zona de movimiento (MZ) y la zona de extracción (EZ) para un punto de extracción aislado.

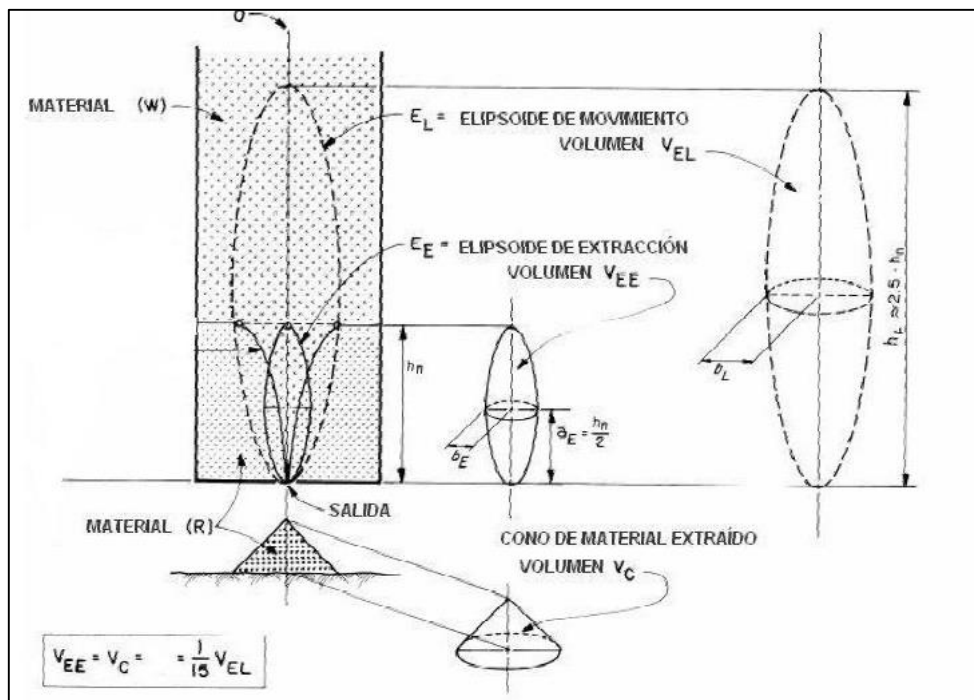


Figura 2-3: Esquema de la Zona de Movimiento (MZ) y Zona de Extracción (EZ) para un punto aislado (Kvapil, 2004).

Kvapil (1965) encontró que el volumen del elipsoide de movimiento era aproximadamente quince veces mayor que el elipsoide de extracción. Además, 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. Sin embargo, debe notarse que para sus experimentos Kvapil utilizó arena en sus experimentos, lo cual difiere del material utilizado en esta investigación cuya granulometría es más gruesa y la forma de las partículas es más angulosa. Estas diferencias conllevan a que los elipsoides de movimiento obtenidos por Kvapil posean una excentricidad mayor, es decir, su relación entre altura y diámetro es mayor que la de los elipsoides observados a lo largo de esta investigación. Vale la pena recordar que, la excentricidad de una elipse es mayor que cero y menor que uno, donde cero representa una circunferencia y uno, una parábola.

En la siguiente Tabla 2-1, se muestra un resumen de los resultados de varios autores que han utilizado modelos físicos para el estudio de flujo gravitacional y que son pertinentes para esta investigación.

Tabla 2-1: Resumen de modelos físicos utilizados y sus principales resultados. Basada en Orellana (2011).

Autor	Año	Dimensiones modelo físico	Material	Tipo de modelo	Resultados
Kvapil	1965 - 1992	-	Arena	2D	- Forma de zonas de flujo elipsoidales - Proporciona las relaciones matemáticas asociadas al flujo de material granular en silos
McCormick	1968	Altura: 1.2 m	Arena	2D	- Forma de elipsoide de movimiento cilíndrica - El ancho del cilindro no depende del ancho del punto de extracción
Marano	1980	Altura: 2.4. m Escala 1:80	Arena	3D	- La similitud no puede ser alcanzada a través de modelos con arena - Resultados de experimentos con un único punto de extracción no son válidos cuando existen múltiples puntos de extracción
Peters	1984	Altura:4.6 m Largo: 6 m Ancho: 0.5 m	Grava	2D	- No hay efecto del tamaño de partícula sobre la geometría de flujo - El ancho del tiraje depende del porcentaje de finos y las dimensiones del punto de extracción
Power	2004	Altura:3.5 m Largo: 2.2 m Ancho: 2.1 m Escala 1:30	Grava	3D	- El tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el alto y ancho de la zona de extracción y de movimiento - Los modelos físicos 2D no son válidos para el estudio de flujo gravitacional
Castro	2006	Altura:3.4 m Largo: 3.3 m Ancho: 2.4 m	Grava	3D	- Los puntos de extracción deben estar espaciados a los menos el ancho de IMZ para que exista interacción - El ancho de la zona de extracción y movimiento en función de la masa extraída y su altura
Orellana	2011	Altura: 1 m Largo: 0.52 m Ancho: 0.34 m Escala: 1:50	Grava	3D	- Un modelo 3D resulta más adecuado pues es capaz de representar de mejor manera la geometría involucrada. - Modelos 2D resultan menos complejos a la hora de la operación y requieren menor inversión, por lo cual debieran utilizarse en la evaluación preliminar cuando se tiene poca información del fenómeno en estudio.
Pineda	2012	Altura: 1.5 m Largo: 1 m Ancho: 0.28 m Escala: 1:200	Grava	2D	- Los resultados del modelo a escala se comparan con los datos proporcionados por minas. Lo que permitió cuantificar y calificar el rol del modelamiento físico. - Los resultados indican que para fines de ingeniería, el modelamiento físico es una herramienta que puede ser utilizada con confianza para tomar decisiones.

En la Tabla 2-1, se puede ver que Power (2004) cuestiona los resultados de Peters (1984) y el uso de modelos físicos de dos dimensiones. En la actualidad, se reconoce la influencia del tamaño de partícula sobre el ancho de las zonas de movimiento. Sin embargo, con respecto al uso de modelos físicos de dos dimensiones se debe profundizar: Power, en su tesis de doctorado, establece que la similitud geométrica no puede ser alcanzada en dichos modelos, ya que la zona de movimiento crece a una altura mayor de lo que debería, para cierta cantidad de masa extraída, debido a que el

aumento de tamaño en una de sus dimensiones está limitado por las paredes del modelo. Por lo tanto, puntos homólogos del modelo físico y de la mina emulada, no tendrán como relación un factor de escala constante, dadas las diferencias entre las formas de sus respectivas zonas de movimiento. En relación a esta investigación, lo que establece Power debe ser considerado en el caso de los resultados del flujo gravitacional, ya sea en las formas y tamaños de las zonas de movimiento y de extracción. No obstante, el objetivo principal de esta investigación es cuantificar los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional en zonas de movimiento y en zonas de no extracción. Por lo tanto, el tamaño de las zonas de movimiento cumple un rol secundario mientras sea posible identificar en qué zona se encuentra una celda de carga.

2.2.2. Mecanismos de flujo en múltiples puntos de extracción

Castro (2006) plantea que los mecanismos de flujo involucrados, cuando existe tiraje de múltiples puntos de extracción, dependen de la distancia entre puntos (d) y de las dimensiones de las zonas de flujo (ancho y alto). Dichos mecanismos pueden ser clasificados como sigue, donde w_{IMZ} representa el ancho de la zona de movimiento aislado:

- Caso 1: $d < w_{IMZ}$
En este escenario, el material que se encuentra entre puntos de extracción se mueve hacia los mismos “en masa”. La columna entre puntos de extracción desciende verticalmente a una velocidad constante por sobre la altura de interacción (HIZ) entre IMZs. Cabe hacer mención que, el concepto de flujo en masa fue establecido por Laubscher (2000) y se define como: mecanismo de flujo que ocurre en la parte superior del hundimiento, donde la subsidencia es uniforme. Las partículas describen trayectorias verticales y no existe mezcla vertical ni horizontal.

- Caso 2: $w_{IMZ} < d$
Cuando los puntos de extracción están lo suficientemente alejados, zonas de no movimiento quedan entre ellos (es decir, el espaciamiento es mayor que el ancho de IMZ para un valor d de altura). Esto resulta en un incremento en los esfuerzos verticales en el volumen sin movimiento. Se postula que este aumento es producto de la redistribución de cargas verticales dentro del flujo granular. El IMZ se considera una zona de alta porosidad y no es capaz de transmitir todos los esfuerzos desde arriba y parte de ellos se redistribuye a los volúmenes adyacentes más densos.

En la Figura 2-4 y Figura 2-5, se pueden observar esquemas que ilustran los tres mecanismos descritos recientemente.

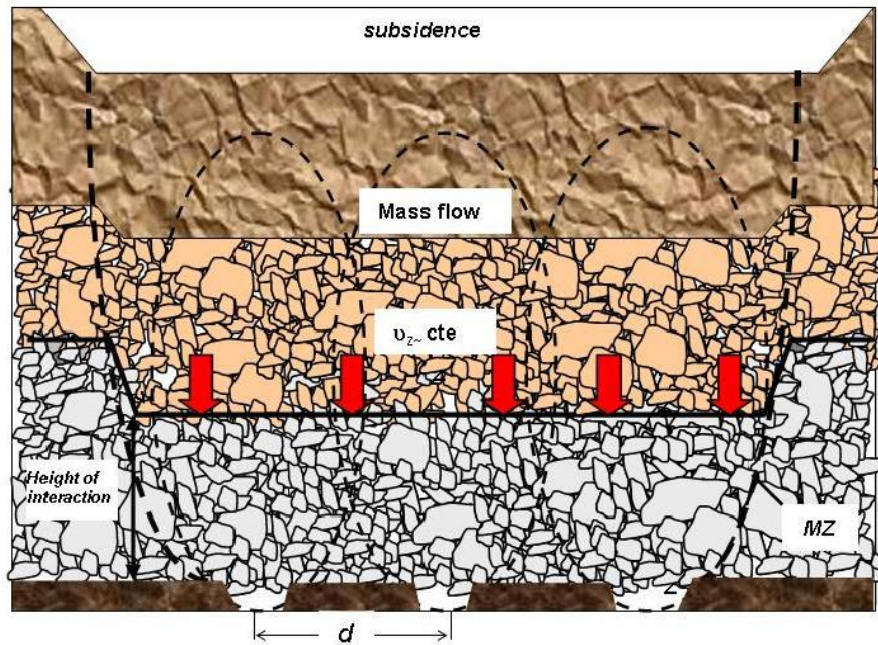


Figura 2-4: Esquema del flujo en masa, caso $d < W_{IMZ}$ (Castro, 2006)

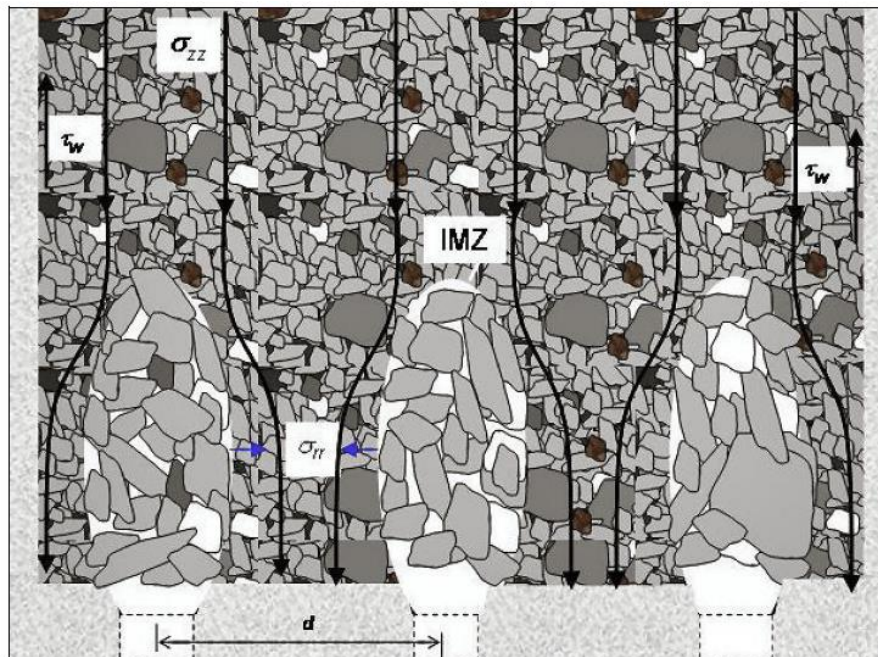


Figura 2-5: Interacción de esfuerzos en caso $W_{IMZ} < d$. (Laubscher, 2000).

Para esta investigación, se espera observar un comportamiento como el descrito en el flujo granular, debido al material que se utiliza, descrito en el capítulo siguiente.

Los resultados de los experimentos bidimensionales realizados por Kvapil (1965) sugieren que cuando puntos de extracción son explotados sucesivamente (en lugar de forma simultánea), el IMZ crecerá

preferentemente en la dirección de superposición, en donde el aumento de porosidad es más bajo. Esto resulta en una “flexión” de los ejes de los IMZ, tal como se muestra en la figura siguiente:

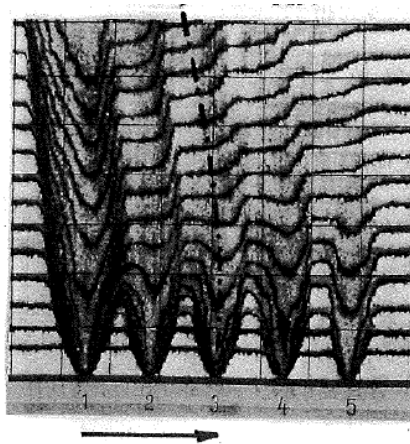


Figura 2-6: “Flexión” de los ejes de IMZ observado por Kvapil (1965) en un modelo físico 2D cuando una extracción sucesiva es aplicada (desde izquierda a derecha).

El fenómeno mostrado en la Figura 2-6 es atribuido al menor aumento de la porosidad al lado izquierdo de cada IMZ en comparación al lado derecho. En cambio, cuando se extrae de forma simultánea en puntos de extracción, el aumento de porosidad es igual en ambos lados, tal como se muestra en la siguiente figura:

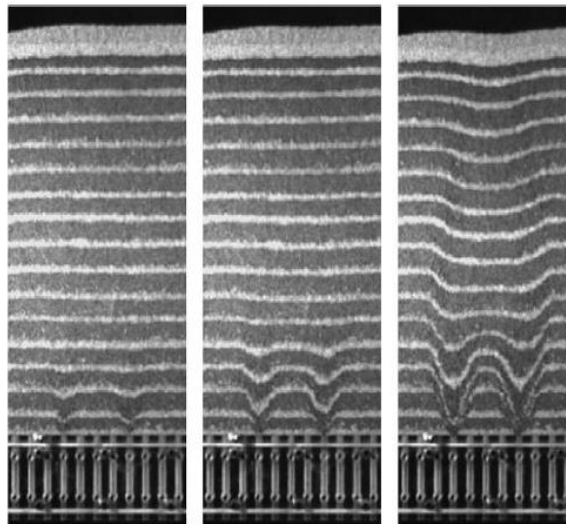


Figura 2-7: Extracción simultánea e uniforme en puntos de extracción adyacentes, modelo físico 2D. (Melo, 2008)

Ambos fenómenos ilustrados en las figuras anteriores pueden ser observados en esta investigación.

2.3. Modelamiento Físico

Para representar un problema real a través de una prueba en laboratorio con modelos a escala, es necesario cuestionar la representatividad del ejercicio. El objetivo buscado es que los efectos que ocurren u ocurrirían en un sistema a escala real se manifiesten de igual manera en el modelo a escala laboratorio a fin de que la experimentación arroje resultados comparables, no sólo a niveles cualitativos, sino que también cuantitativos (Orellana, 2012). Por lo tanto, al utilizar modelos físicos para el estudio de fenómenos que ocurren a escala real, un aspecto de relevancia corresponde a la similitud entre el modelo físico y el sector real que se intenta representar, denominado como prototipo. Existen tres tipos de similitud: la geométrica, cuando la distancia entre puntos homólogos es dada por un factor de escala de longitud constante λ_L ; la cinética, cuando dos eventos homólogos ocurren a un factor de escala de tiempo constante λ_T ; y la dinámica, cuando la relación entre la inercia y cualquier fuerza externa es constante entre el modelo y el prototipo. (Pineda, 2012).

Halim (2004) establece que la similitud dinámica resulta imposible de ser replicada en los modelos físicos a baja escala de laboratorio. En esta investigación se utiliza la similitud geométrica para alcanzar los objetivos.

La escala geométrica a utilizar en el modelo físico debe permitir emular el fenómeno a estudiar. Al tratarse de flujo gravitacional en material granular, la fuerza de gravedad debe preponderar frente a otras fuerzas entre partículas tales como fuerzas magnéticas, capilares, electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, etc.

En la Tabla 2-2, se muestran los factores de escala.

Tabla 2-2: Factores de escala.

Variable	Factor	Factor de escala
<i>Longitud</i>	λ_L	λ_L
<i>Área</i>	λ_A	λ_L^2
<i>Volumen</i>	λ_{Vol}	λ_L^3
<i>Velocidad</i>	λ_V	$\lambda_L^{1/2}$
<i>Tiempo</i>	λ_T	$\lambda_L^{1/2}$
<i>Masa</i>	λ_W	λ_L^3
<i>Ángulo de fricción</i>	$\lambda_{\tan(\theta)}$	1
<i>Densidad</i>	λ_ρ	1

2.3.1. Modelos físicos con uso de celdas de carga

En el caso de la minería, la instalación de instrumentación a escala de mina puede ser un procedimiento riesgoso, engorroso y caro. Por lo tanto, en los modelos físicos es habitual el uso de instrumentación para poder obtener mediciones que en el prototipo pueden ser difíciles de conseguir. Dado que en esta investigación se requiere cuantificar los esfuerzos inducidos por la extracción, se debió recabar información acerca de precedentes en el uso de herramientas para la medición de esfuerzos en materiales granulares. Castro (2006) y Orellana (2012) utilizaron modelos físicos que contaron con celdas de carga para la medición de esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en materiales granulares. En la Figura 2-8 y Figura 2-9, se muestran los modelos físicos de ambos autores citados y la ubicación de las celdas de carga.

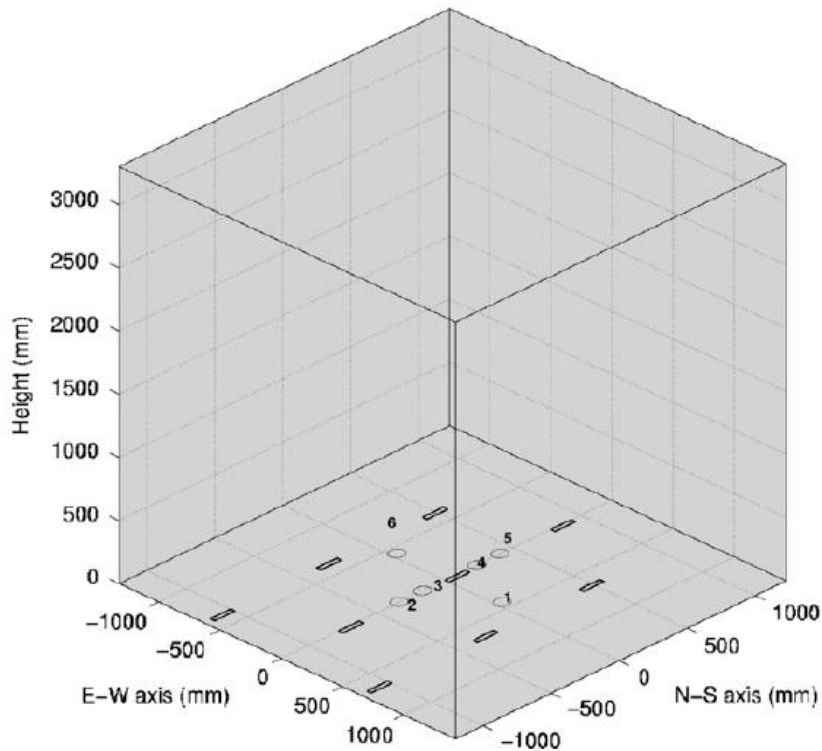


Figura 2-8: Esquema del modelo físico utilizado por Castro (2006).

En el modelo de Castro (2006), las celdas de carga fueron instaladas en la base del modelo (señaladas con números del 1 al 6 en la figura anterior) con el propósito de obtener mediciones de esfuerzos verticales tanto en zonas de extracción y en zonas estancadas bajo la interacción de zonas de movimiento.

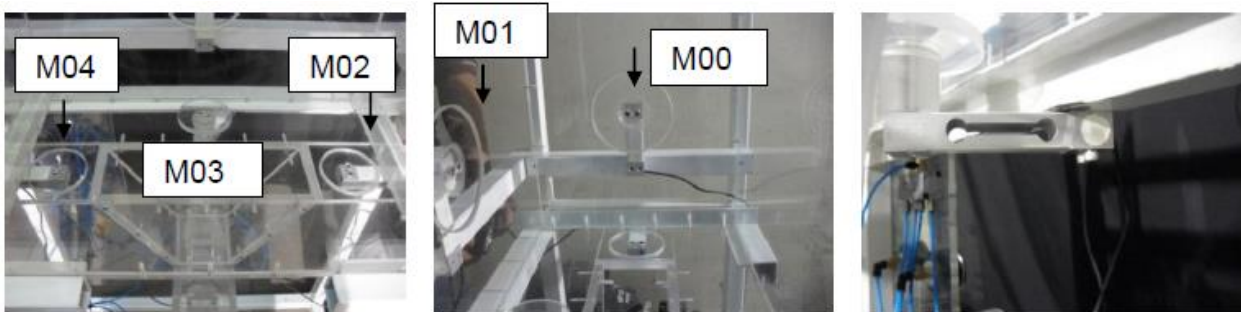


Figura 2-9: Modelo físico utilizado por Orellana (2012).

Orellana (2012) dispuso de 5 celdas de carga en ubicaciones determinadas: 3 ubicadas en la base del sistema identificadas por M02, M03 Y M04; y 2 en las paredes del modelo identificadas como M00 y M01. El objetivo de estas es medir los esfuerzos verticales y horizontales durante el llenado y extracción del material.

Un aspecto relevante en el uso de celdas de carga para medir esfuerzos está relacionado al área de medición que poseen las celdas. Se deben evitar cargas puntuales. Castro (2006) eligió un diámetro del área de medición del orden de 6 a 8 veces más grande que el tamaño de una partícula de 8 mm (d_{50}) basado en las recomendaciones hechas por Marachi *et al.* (1972) para los ensayos de corte en suelos gruesos.

2.4. Esfuerzos inducidos

En esta investigación se hace referencia a los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional, los cuales no deben ser confundidos con los esfuerzos generados por la socavación en minería de *block/panel caving*.

En roca fragmentada sin cohesión, la relación entre los esfuerzos y la resistencia de dicha roca puede ser descrita mediante el criterio de Mohr-Coulomb (Pierce, 2009):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} = K_\phi \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde σ_1 : Esfuerzo Principal mayor, σ_3 : Esfuerzo principal menor, ϕ : ángulo de fricción interna del mineral.

2.4.1. Esfuerzos iniciales

Lorig (2000) demostró que los esfuerzos verticales iniciales, previos a la extracción, en el nivel de producción son significativamente menores que el peso total del material que está sobre dicho nivel. La cantidad de efecto arco depende del radio hidráulico, la altura y de resistencia friccional en la periferia del hundimiento, tal como se sugiere en la teoría de *bin* de Janssen (1985). La ecuación de Janssen para los esfuerzos verticales a una profundidad, z , bajo la superficie está dada por:

$$\sigma_v = \frac{R_h \rho_b g}{\tan(\phi_w) k} \left(1 - e^{-\frac{k \tan(\phi_w) z}{R_h}} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde R_h es el radio hidráulico (área dividida por el perímetro), ρ_b es la densidad aparente, g es la constante gravitacional, k es la razón entre los esfuerzos horizontales y verticales, y ϕ_w es el ángulo de fricción en las paredes del *bin*. A menudo, la ecuación de Kedzi (1962) es utilizada para estimar k :

$k = 1 - \sin\phi$, donde ϕ es el ángulo de fricción interna del material.

Castro (2006), mediante la instalación y uso de celdas de carga, mostró evidencia de que existió efecto arco durante la carga de su modelo físico, resultando en que el esfuerzo vertical inicial fue sólo un 70% del peso total sobre la base del modelo. Pierce (2009), utilizó los datos del modelo físico de Castro y los introdujo en la ecuación de Janssen, sus resultados predijeron que los esfuerzos verticales serían aproximadamente 67-79% del peso del material sobre la base del modelo. Estos resultados concordaron con las mediciones obtenidas por Castro.

Los resultados obtenidos por Castro y Pierce sugieren que la ecuación de Janssen entrega un punto de partida razonable para la estimación los esfuerzos iniciales (promedio) en la base del hundimiento. Si se ignora el efecto arco, se obtendrían esfuerzos verticales más altos que no son realistas.

En la Figura 2-10 se muestran las mediciones obtenidas por Castro, mediante las celdas de carga, para los esfuerzos iniciales. En el eje vertical es posible apreciar los esfuerzos verticales medidos y en el eje horizontal, las alturas de llenado [mm] a los que se registraron mediciones.

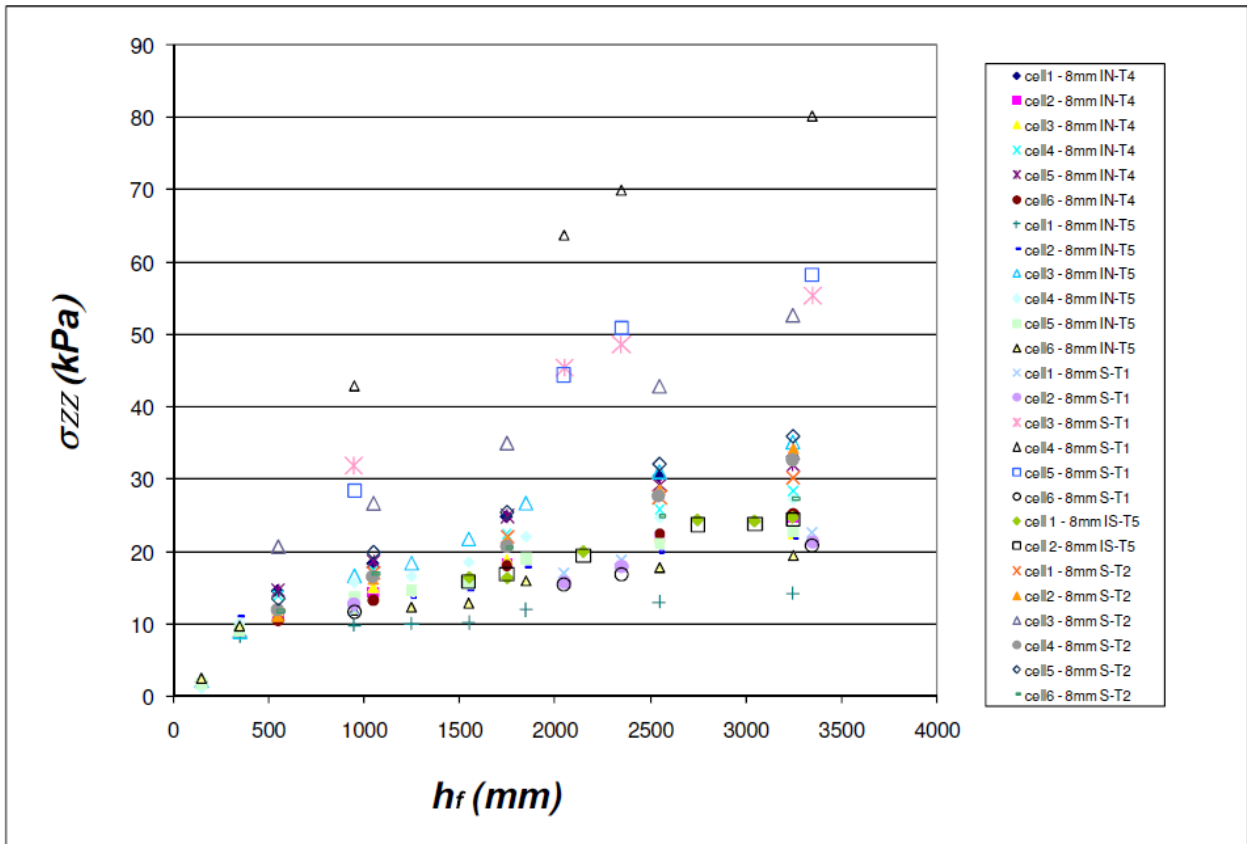


Figura 2-10: Esfuerzos verticales para distintas alturas de llenado. (Castro, 2006).

Para esta investigación, la Figura 2-10 adquiere relevancia porque se deduce que para un mismo experimento, las celdas registran distintos valores de esfuerzos iniciales. Esto ocurre debido a que las partículas no son idénticas entre sí y en cada experimento se obtiene un reordenamiento distinto de las mismas, esto implica que el efecto arco no sea igual en la base del modelo físico en cada experimento, a pesar de aplicar una rigurosa metodología de carguío del mineral en dicho modelo.

2.4.2. Esfuerzos en IMZ

Los esfuerzos en las zonas de movimiento tienden a ser menores en comparación al material estancado que las rodea. Esto es atribuido a la transferencia de esfuerzos a través de fuerzas de corte que se desarrollan en los bordes entre el material que fluye y el estancado. Los bajos esfuerzos dentro del IMZ, relativo al material estancado, puede se ven vistos en la Figura 2-11, donde el grosor de las líneas es proporcional a la magnitud de las fuerzas entre partículas:

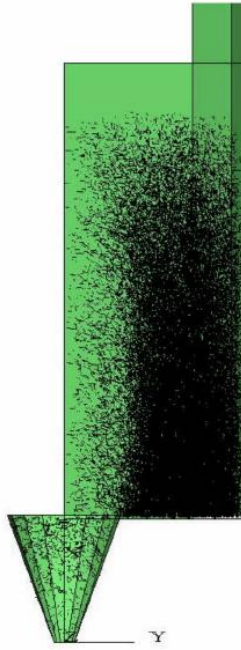


Figura 2-11: Fuerza de contacto entre partículas en PFC3D de Lorig y Cundall (2000).

Lorig y Cundall descubrieron que la magnitud media de las fuerzas al interior de IMZ es independiente de la profundidad. Esto adquiere relevancia ya que, esta afirmación implica que las fuerzas dentro de la zona de movimiento no dependen de la altitud que alcanzó el mineral cargado dentro del modelo físico.

2.4.3. Esfuerzos en zonas estancadas

Pierce (2009) postula que la teoría de área tributaria puede ser aplicada para un mejor entendimiento de la redistribución de los esfuerzos verticales alrededor de IMZ y en la zona estancada. Esta teoría sugiere que los esfuerzos verticales en la zona estancada, σ_v^s , es igual a los esfuerzos verticales iniciales (antes de la extracción) más un esfuerzo inducido, tal como se ve en la siguiente ecuación:

$$\sigma_v^s = \sigma_{v0} + \left(\frac{A_{IMZ}}{A_s} \right) (\sigma_{v0} - \sigma_v^{IMZ}) \quad \text{Ecuación 3}$$

En esta ecuación, el esfuerzo inducido es proporcional a la razón entre el área de IMZ, A_{IMZ} , y el área de la zona estancada, A_s . Al analizar con mayor profundidad la Ecuación 3, el autor de esta investigación identifica que está basada en el equilibrio de fuerzas. Si la Ecuación 3 es multiplicada por el área de la zona estancada, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sigma_v^s A_s &= \sigma_{v0} A_s + \sigma_{v0} A_{IMZ} - \sigma_v^{IMZ} A_{IMZ} \\ \sigma_v^s A_s + \sigma_v^{IMZ} A_{IMZ} &= \sigma_{v0} A_s + \sigma_{v0} A_{IMZ} = \sigma_{v0} (A_s + A_{IMZ}) = \sigma_{v0} A_T \\ F_v^s + F_v^{IMZ} &= F_{v0} \end{aligned}$$

Este equilibrio de fuerzas depende de la conservación de la masa en el sistema, por lo tanto su uso es cuestionable en modelos físicos en los cuales demasiada masa sea extraída. Este hecho debe ser considerado en caso de querer estimar los esfuerzos en la zona estancada a partir de la Ecuación 3.

Castro (2006) utilizó, en su modelo físico, celdas de carga para medir esfuerzos en las zonas estancadas entre zonas de flujo generadas por el tiraje de múltiples puntos de extracción. Los esfuerzos verticales aumentaron entre zonas de flujo a medida que se incrementaba el ancho de IMZ y se acercaba a la posición de las celdas. El esfuerzo vertical más alto alcanzó, en promedio, un valor de 1.3 ± 0.11 veces el esfuerzo inicial, cuando la distancia entre zonas de flujo fue 1.4 veces el ancho del IMZ.

Para el propósito de esta investigación, se espera obtener comportamientos similares a los obtenidos por Castro, es decir, que en zonas estancadas los esfuerzos verticales aumenten y que en zonas de flujo, disminuyan. Sin embargo, no es esperable obtener la misma magnitud ya que Castro utilizó un modelo físico 3D, cuya una escala fue de 1:100 (donde se representa un área basal de 239 x 275 m), el cual era rellenado a medida que se extraía material desde los puntos de extracción.

2.5. Conclusiones

De acuerdo a la revisión realizada de antecedentes pertinentes para el desarrollo de esta investigación, las principales conclusiones son:

- El flujo gravitacional ha sido estudiado a través de diversos modelamientos, ya sea físicos, numéricos o empíricos. Las investigaciones en el ámbito del modelamiento físico han utilizado como medio arena y grava, siendo esta última considerada como el material más apropiado para el estudio del flujo de material granular en minería de *block/panel caving* ya que la forma angulosa de las partículas permite representar la geometría de los elipsoides de movimiento, y de extracción, con mayor realismo.
- Los modelos físicos permiten simular diferentes estrategias de extracción y operación sin incurrir en grandes costos respecto de la realización de pruebas a escala de mina. Esta técnica junto con el uso de instrumentación, ha sido validada en distintas áreas de la ingeniería y permite aumentar el conocimiento de fenómenos que ha escalas mayores serían difíciles de observar.
- La escala geométrica a utilizar en el modelo físico debe permitir emular el fenómeno a estudiar. Al tratarse de flujo gravitacional en material granular, la fuerza de gravedad debe preponderar frente a otras fuerzas entre partículas tales como fuerzas magnéticas, capilares, electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, etc.
- Los resultados obtenidos por Castro y Pierce sugieren que la ecuación de Janssen entrega un punto de partida razonable para la estimación los esfuerzos iniciales (promedio) en la base del hundimiento. Si se ignora el efecto arco, se obtendrían esfuerzos verticales más altos que no son realistas.
- Los esfuerzos en las zonas de movimiento tienden a ser menores en comparación al material estancado que las rodea. Esto es atribuido a la transferencia de esfuerzos a través de fuerzas de corte que se desarrollan en los bordes entre el material que fluye y el estancado.
- Para el propósito de esta investigación, se esperan obtener comportamientos similares a los obtenidos por Castro, es decir, que en zonas estancadas los esfuerzos verticales aumenten y que en zonas de flujo, disminuyan. Sin embargo, no es esperable obtener los mismos resultados ya que Castro utilizó un modelo físico 3D y de una escala de 1:100, donde se representa un área basal de 239 x 275 m.

Capítulo 3: Metodología Experimental

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

Este capítulo describe la metodología de la investigación de la modelación a escala laboratorio. Se describe en detalle el diseño experimental, incluyendo los principales componentes del equipo de laboratorio destinados a la medición de esfuerzos verticales inducidos por flujo gravitacional. Finalmente, se estructura el plan experimental de toda la investigación describiendo el procedimiento de preparación de los experimentos.

3.2. Instrumentación de laboratorio

3.2.1. Modelo Físico

El modelo físico representa un sector de una mina subterránea explotada por una estrategia de *block/panel caving*. Se simula un sector, con una escala de 1:200, cuyas dimensiones son 140 m de longitud y 44.6 m de ancho, y que se encuentra a 480 m de profundidad desde la superficie. La malla de extracción es tipo Teniente de 30 m x 15 m, es decir, se tienen 30 m de distancia entre calles de producción y 15 m entre zanjas. Tal como se puede observar en la Figura 3-1, el sector representado en el modelo tiene tres calles de producción, nueve zanjas y treinta y seis puntos de extracción. El modelo físico es de carácter axisimétrico al representar el mismo fenómeno de extracción en calles de producción colindantes, es decir, las dos paredes laterales más largas del modelo representan planos de simetría.

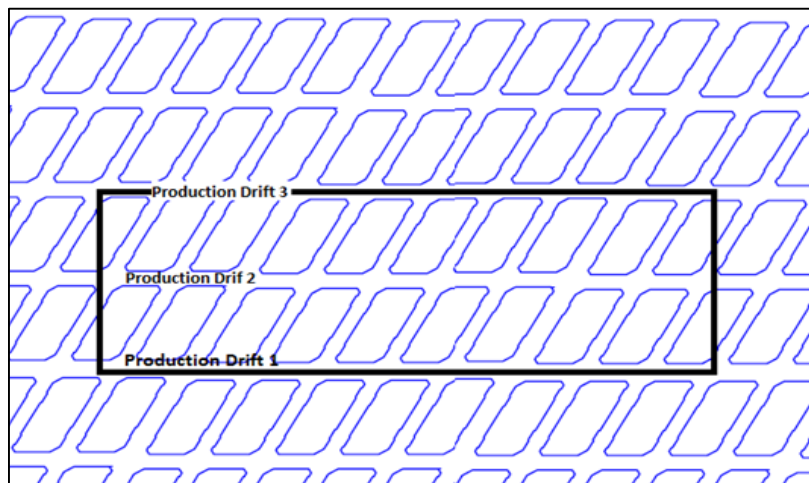


Figura 3-1: Sector representado en el modelo físico.

En la Figura 3-2, se muestra modelo físico utilizado para llevar a cabo la fase experimental. Éste, se compone de tres piezas principales, señaladas como 1, 2 y 3 en la figura. La primera, es la estructura metálica (de color rojo) que soporta y da estabilidad a las estructuras restantes; la segunda, es la base del modelo que representa el diseño del nivel de producción de la mina simulada; y la tercera, corresponde a las paredes del modelo que son instaladas en la base. Tanto la base como las paredes del modelo fueron construidas en plexiglás. En el caso de las paredes, gracias a este material se puede observar el flujo del mineral que escurre al extraerlo por los puntos de extracción de la base.

Las dimensiones del modelo, sin considerar la estructura metálica, son 250 cm de altura, 70 cm de longitud y 22.3 cm de ancho (escala de 1:200). Esta dimensiones describen un radio hidráulico de 8.6 cm.

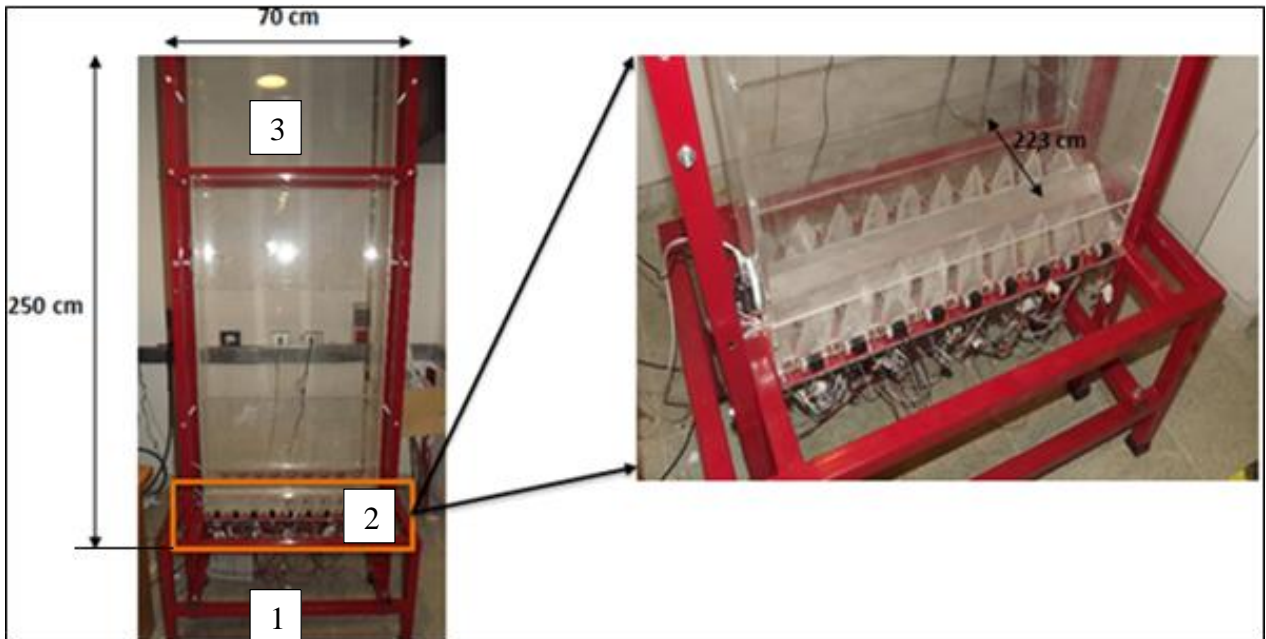


Figura 3-2: Modelo físico a escala 1:200 utilizado en la fase experimental.

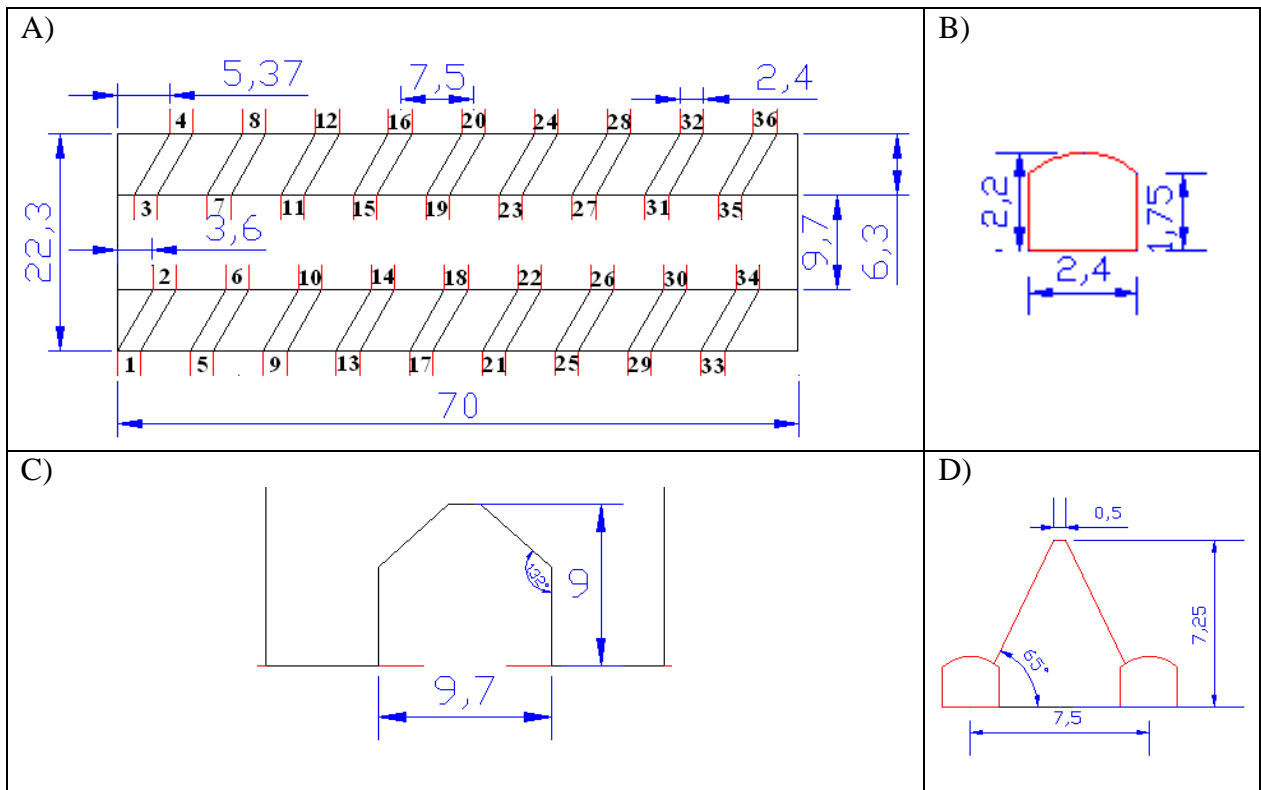


Figura 3-3: Base del modelo físico. Cotas en [cm]. A) Vista en planta y puntos de extracción. B) Dimensiones de un punto de extracción, vista frontal. C) Pilar corona, vista en perfil. D) Pilar de zanja entre dos puntos de extracción y sus dimensiones.

En la Figura 3-3, es posible apreciar las dimensiones de la base del modelo físico. Cabe destacar que, a la base se le agregó gravilla para simular el contacto roca-roca.

En cada punto de extracción de la base del modelo físico, se instaló un servomotor para extraer el mineral. Estos motores eléctricos pueden ser controlados mediante una interfaz, donde se seleccionan los puntos de extracción del modelo que estarán activos. Además, se puede controlar el ángulo de giro y el tiempo que le toma al servomotor realizar dicho giro. Con esto, es posible controlar la extracción en cada punto. En la Figura 3-4, se muestran dos servomotores ubicados en puntos de extracción contiguos.

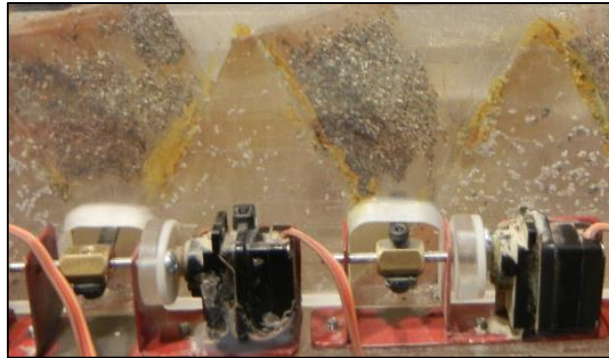


Figura 3-4: Servomotores para extracción de mineral.

3.2.2. Medición de Esfuerzos Inducidos

Para medir los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional de mineral dentro del modelo físico, se contó con celdas de carga tipo “punto único” de dos capacidades máximas; seis unidades de celdas de 20 kg y tres unidades de 30 kg de capacidad. Las celdas de carga consisten en un metal que sufre una deformación conforme se le aplica una fuerza. Este metal se calcula para soportar un rango de fuerza (que va desde cero fuerza hasta la capacidad máxima) ya sea a tensión, compresión o ambos. La deformación se realiza en la "parte elástica", esto es lo que limita la capacidad de una celda de carga. Al metal, se le adhieren galgas extensométricas. Las galgas extensométricas consisten en un metal que al flexionarse varía su resistencia. Las galgas se conectan en un arreglo de puente de Wheatstone, de tal forma que al alimentarse con un voltaje entregan una señal de voltaje proporcional a la fuerza aplicada. La señal de voltaje entregada es en el orden de milivolts.

Las celdas fueron instaladas sobre el pilar corona de la base del modelo, tal como se muestra en la Figura 3-5. Las posiciones específicas y la cantidad de celdas instaladas, dependen del experimento en curso.

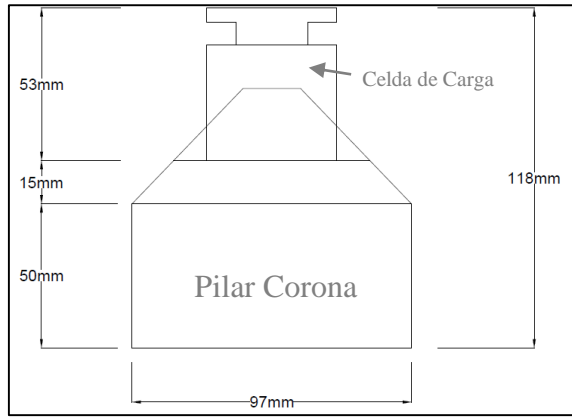


Figura 3-5: Celda de carga instalada en pilar corona de la base del modelo físico. Vista en perfil.

Las dimensiones de las celdas de carga de 30 kg son 14 cm de largo, 4 cm de ancho y 4 cm de altura, su área de medición es circular y de 5 cm de diámetro. Por otro lado, las celdas de carga de 20 kg tienen una longitud de 11.5 cm, 4 de cm de ancho y 4 cm de altura, su área de medición es rectangular de 4 cm x 5 cm. En la siguiente figura, se pueden ver ambas celdas.

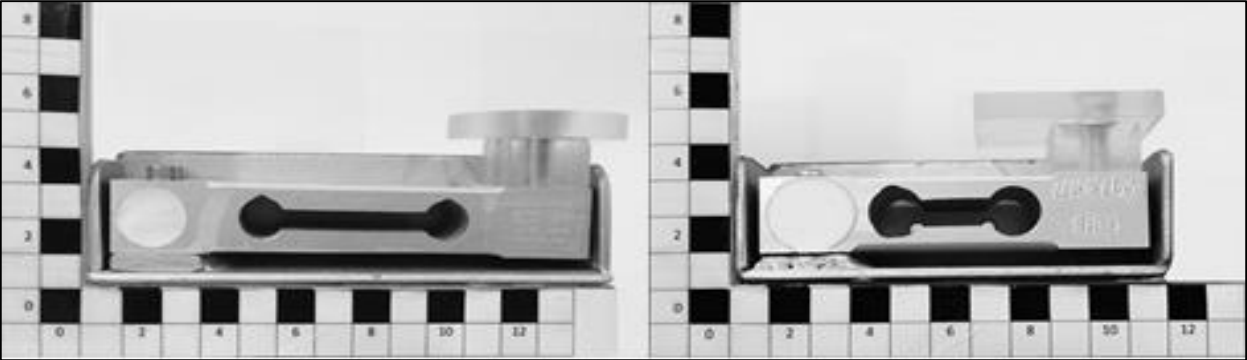


Figura 3-6: Celdas de carga tipo “punto único” de capacidades de 30 kg (izquierda) y 20 kg (derecha).

Se utiliza como sistema de colección de datos un strainmeter modelo TC-31K sumado a un Switching Box de 5 canales marca TML.



Figura 3-7: Strainmeter TC-31 K (izquierda). Switching box (derecha)

3.2.3. Mineral

El material utilizado en la realización de los experimentos, fue sulfuro de cobre proveniente de proyecto de Chuquicamata subterráneo. El mineral fue chancado y escalado desde la curva de distribución de tamaños de fragmentación primaria de dicho proyecto. En la Figura 3-8, se pueden ver las curvas de distribución de tamaños a escala de mina y a escala de laboratorio.

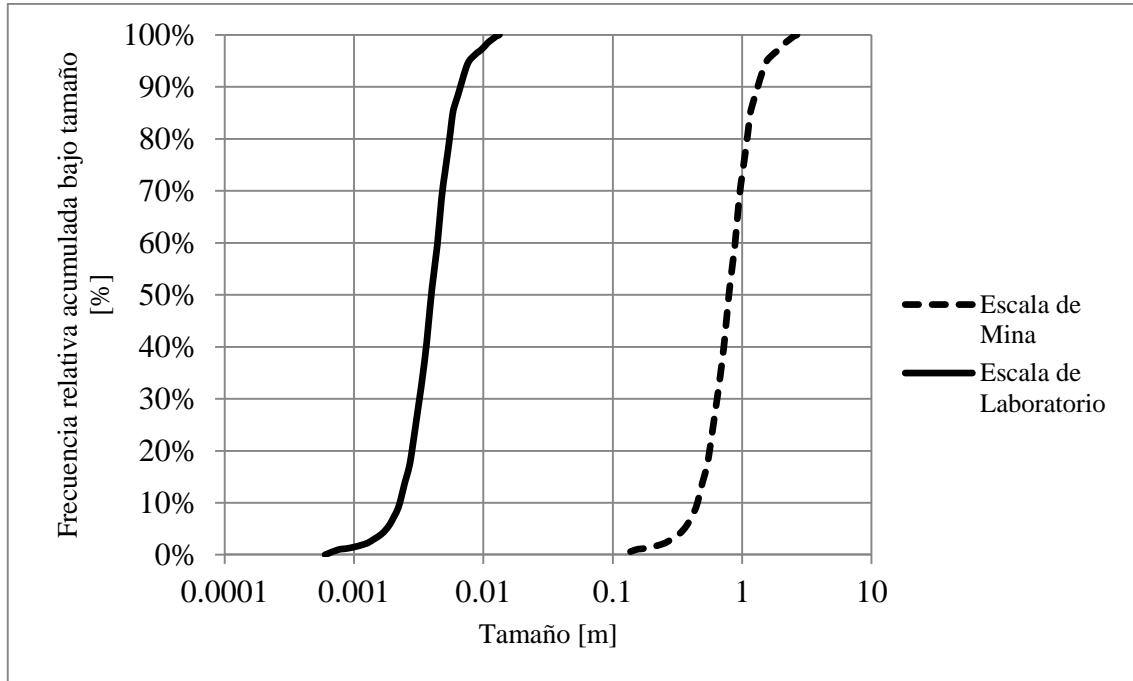


Figura 3-8: Curva de fragmentación primaria de mina y a escala de laboratorio.

En la Figura 3-9, se puede apreciar una muestra de la distribución de tamaños del mineral a escala de laboratorio.



Figura 3-9: Muestra de la distribución de tamaños del mineral a escala de laboratorio.

En la Tabla 3-1, se resumen las características del mineral utilizado para llevar a cabo los experimentos. En la sección ANEXO A, se detallan los procedimientos efectuados para determinar dichas características.

Tabla 3-1: Características del mineral utilizado.

Factor	Valor	Unidad	Comentarios
Esfericidad	0.58	-	Metodología de Barret (1980) explicada por Cho et al. (2006).
Redondez	0.25	-	
Densidad de mineral	2600	kg/m ³	-
Densidad aparente	1420	kg/m ³	Calculada por autor en laboratorio.
Factor de Esponjamiento	0.55	-	Calculada por autor en laboratorio.
Porosidad	44	%	Calculada por autor en laboratorio.
d ₅₀	4.0	mm	Ver Figura 3-8
Coefficiente de Uniformidad (C _u)	2.0	-	Calculado como d ₆₀ /d ₁₀ . Ver Figura 3-8.
Ángulo de reposo del mineral	29.31 ± 1.22	°	Calculada por autor en laboratorio.
Ángulo de fricción con las paredes del modelo	27.67 ± 2.26	°	Calculada según procedimiento sugerido por Nedderman (1992).

3.2.4. Marcadores para el estudio de IEZ e IMZ

La zona de extracción aislada de mineral es la que envuelve el material que ha sido extraído a cierto progreso de la extracción. Esta zona puede ser determinada mediante el uso de marcadores rotulados. Dichos marcadores fueron hechos a partir de mineral pintado, de diversos colores, en función de la altura a la que fueron posicionados al interior del modelo. Cada marcador fue ubicado sobre cada punto de extracción y rotulado con el número del punto correspondiente. Además, esto se hizo a diferentes alturas diferenciando los marcadores por color. En la Figura 3-10, se puede ver la posición de los marcadores.

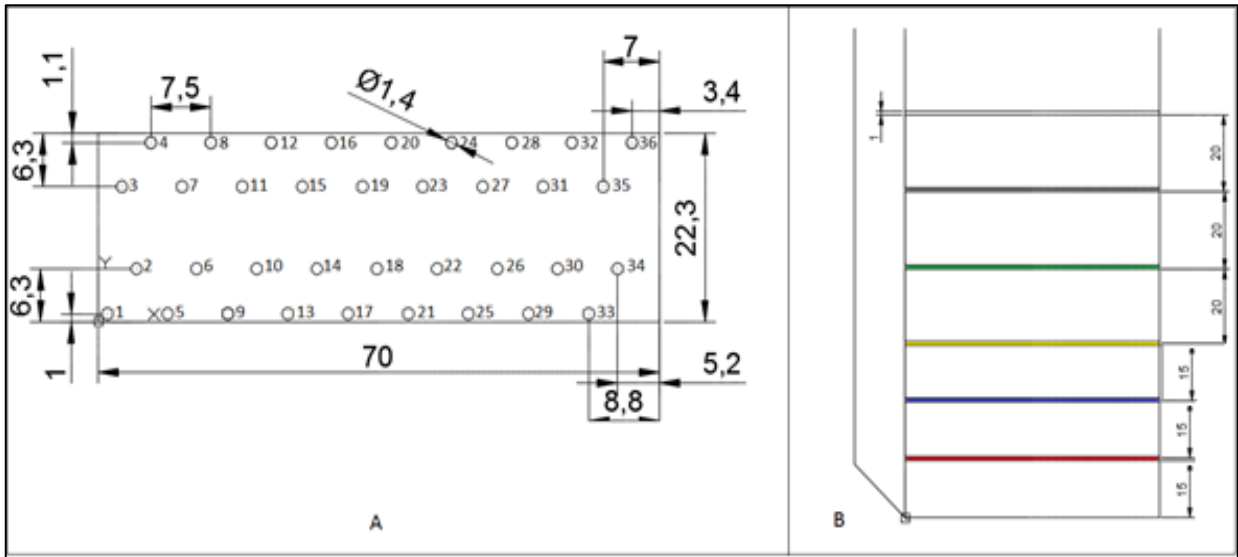


Figura 3-10: Posición de los marcadores. Vista en planta (izquierda). Alturas a las que se posicionaron marcadores (derecha).

Cabe destacar que todos los experimentos realizados, exceptuando el Experimento 0 de tiraje aislado, tuvieron el mismo posicionamiento de los marcadores enumerados. La posición de éstos para el Experimento 0 será expuesta en el Capítulo 5.

Gracias a la individualización de cada marcador, fue posible reconocer visualmente en qué momento y a qué cantidad de masa extraída, salió cada marcador desde el modelo físico. A partir del conocimiento de las posiciones iniciales de los marcadores, fue posible estimar la forma (ancho y alto) de las zonas de extracción en cada experimento. Determinar esto último es relevante ya que a partir del tamaño de las zonas de extracción es posible estimar las zonas de movimiento y, así, se puede saber si una celda de carga se encuentra bajo una zona de movimiento, intermedia o estancada.

Adicionalmente, se coloreó mineral (distinto a los colores utilizados en los marcadores enumerados) para ubicarlo horizontalmente dentro del modelo físico en la cercanía de las paredes frontales. Así fue posible poder apreciar el progreso de las zonas de movimiento. El mineral coloreado que una vez ubicado dentro del modelo es llamado “línea de flujo”, se puede ver en la Figura 3-13.

Con el propósito de evitar un flujo preferencial en los marcadores, éstos fueron hechos a partir de mineral cuyo tamaño es cercano al d_{50} de la distribución de tamaños del mismo.

3.3. Plan Experimental

La metodología experimental se ilustra en el esquema explicativo que se muestra a continuación:

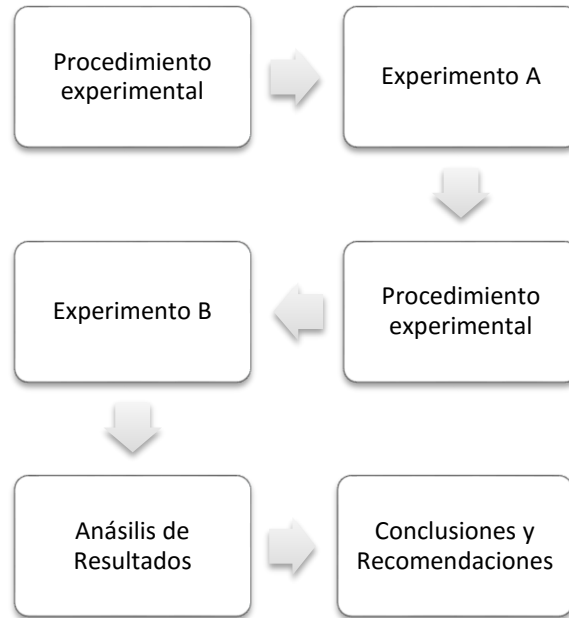


Figura 3-11: Esquema de la metodología experimental para esta investigación.

Las etapas expuestas en el esquema anterior se detallan como sigue:

- **Procedimiento experimental:** Consiste en la preparación de los materiales e instrumentación necesaria para llevar a cabo el experimento. En la sección 3.4 se detalla el procedimiento experimental.
- **Experimento A:** Es el primer experimento llevado a cabo bajo una configuración dada en función de los objetivos planteados.
- **Experimento B:** Es la réplica del Experimento A. De este modo, es posible comparar ambos experimentos y sus resultados.
- **Análisis de resultados:** Se estudian los datos registrados de los experimentos A y B. Se transforman en información de interés.
- **Conclusiones y recomendaciones:** A partir del análisis de resultados de las conclusiones de los experimentos y, en lo posible, recomendaciones preliminares.

3.4. Procedimiento Experimental

Los experimentos de flujo gravitacional se llevan a cabo en el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile. Los pasos a seguir en el desarrollo de los experimentos se detallan a continuación.

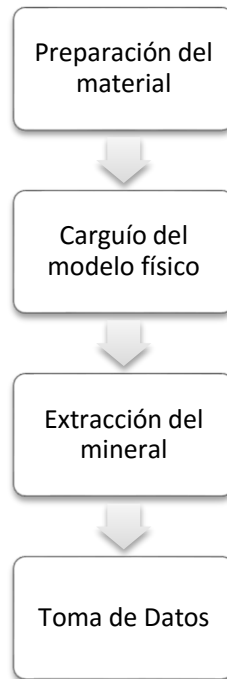


Figura 3-12: Esquema del procedimiento experimental para la realización de un experimento.

1. **Preparación del Material:** Se realiza en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad de Chile. El material es chancado y clasificado para poder construir las curvas granulométricas requeridas. Si se trata de mineral reutilizado de experimentos ya realizados, se somete a clasificación y homogeneización.
2. **Carguío del modelo físico:** Para el carguío del modelo físico y la posterior realización de los experimentos, se siguieron los siguientes pasos:
 - a) Instalación de celdas de carga, verificación de sus posiciones en base a objetivos del experimento. Chequeo de cableados y configuración de Strainmeter.
 - b) Calibración de Celdas. Las celdas de carga deben ser calibradas para obtener la función que entregará la relación entre datos leídos y datos reales debido al error de lectura asociado a dichas celdas.
 - c) Crear conexión entre strainmeter y PC. Confirmar lectura de datos y grabación de los mismos en archivos.
 - d) Carguío del modelo físico con mineral preparado. Además, se posicionan las líneas de flujo y los trazadores. En la siguiente se muestra la altura de los trazadores (izquierda) y líneas de flujo (derecha):

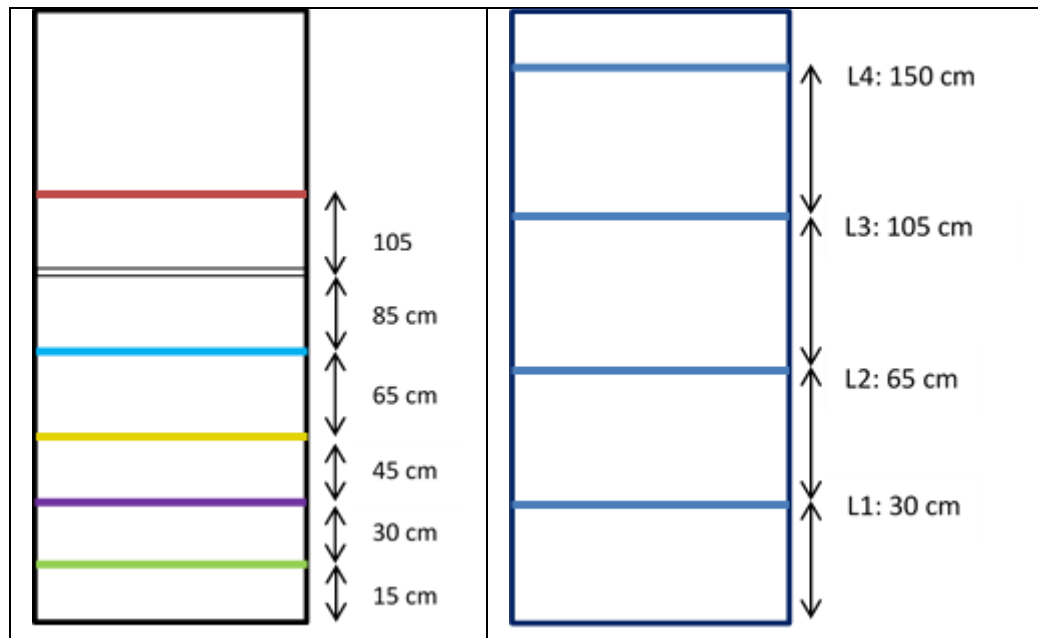


Figura 3-13: Altura las que se ubicaron marcadores enumerados (izquierda) y líneas de flujo (derecha) al interior del modelo.

3. **Extracción del mineral:** la extracción es realizada conforme a los objetivos de cada experimento y por períodos de tiempo. Se extrae una cantidad de mineral desde cada punto de extracción activo. Cuando finaliza la extracción en el último punto se finaliza un período. El mineral extraído, almacenado en recipientes enumerados, es pesado e ingresado a una planilla. Así, se cuenta con los datos de la extracción en cada punto explotado, en cada período.
4. **Toma y Registro de datos:** La toma de datos de las celdas de carga es realizada mediante un software que registra las mediciones cada cinco segundos. Asimismo, las almacena en archivos. Con respecto a los marcadores enumerados, al finalizar un período se revisan los recipientes asociados a cada punto de extracción para verificar su presencia. En caso de que hayan marcadores, se registra la masa a al cual fueron extraídos. Adicionalmente, al término de un período se sacan fotografías frontales del modelo físico, con el propósito de comparar la posición de las líneas de flujo en función del avance del experimento.

Capítulo 4: Modelamiento Físico

4. MODELAMIENTO FÍSICO

4.1. Introducción

Tal como se expuso en el Capítulo 2, el modelamiento físico a escala ha sido una herramienta útil para el estudio de fenómenos que a escala real serían difíciles de estudiar. En este capítulo se muestra cómo esta herramienta se utiliza en esta investigación.

4.2. Modelamiento físico

La escala geométrica a utilizar en el modelo físico debe permitir emular el fenómeno a estudiar. Al tratarse de flujo gravitacional en material granular, la fuerza de gravedad debe preponderar frente a otras fuerzas entre partículas tales como fuerzas magnéticas, capilares, electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, etc. La escala del modelo físico a utilizar, la cual es 1:200, cumple el requisito expuesto.

En la Tabla 4-1, se muestran los factores de similitud en base al modelo físico con el cual se dispone, cuya escala es de 1:200. A esta escala y con un material no cohesivo, prepondera la fuerza gravitacional.

Tabla 4-1: Factores de escala.

Variable	Factor	Factor de escala	Valor
<i>Longitud</i>	λ_L	λ_L	1:200
<i>Área</i>	λ_A	λ_L^2	1:40000
<i>Volumen</i>	λ_{Vol}	λ_L^3	1:8,000,000
<i>Velocidad</i>	λ_V	$\lambda_L^{1/2}$	1:14.1
<i>Tiempo</i>	λ_T	$\lambda_L^{1/2}$	1:14.1
<i>Masa</i>	λ_W	λ_L^3	1:8,000,000
<i>Ángulo de fricción</i>	$\lambda_{tan(\phi)}$	1	1:1
<i>Densidad</i>	λ_ρ	1	1:1

Uno de los aspectos más importantes en el estudio de un fenómeno de interés mediante el uso de un modelo físico, es ser capaz de identificar claramente cuáles son los efectos de las perturbaciones hechas en el sistema. Por lo tanto, para poder cumplir los objetivos de esta investigación varios experimentos distintos debieron ser realizados. De esta manera, se observó qué perturbación al sistema ocasionó cada efecto.

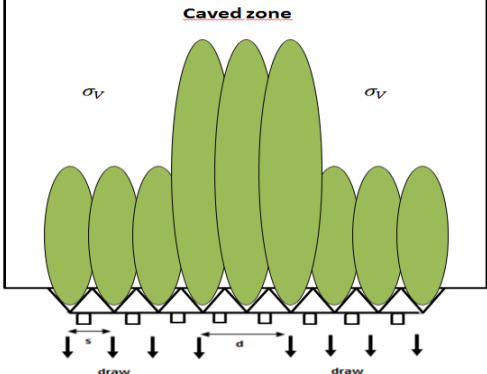
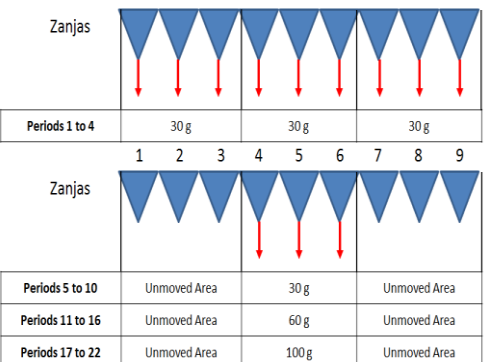
En base a la revisión de antecedentes llevada a cabo, se decidió que el primer experimento a ser realizado debía ser en el que se emulara el tiraje aislado de un punto de extracción. Así, se pudo caracterizar el IMZ en sus dimensiones. Gracias a este experimento, y su réplica, se pudo estimar *a priori* la ubicación de las celdas de carga en los experimentos restantes con el propósito de registrar mediciones en zonas de flujo como en zonas estancadas.

En la Tabla 4-2, se muestran los experimentos realizados en esta investigación. Se describen los objetivos de cada uno y el tipo de extracción llevada a cabo.

Tabla 4-2: Plan experimental.

Experimento	Estrategia de extracción	Objetivos	Esquema
0	Tiraje aislado	<ul style="list-style-type: none"> - medir la zona de movimiento aislada generada por un punto de extracción. - determinar la ubicación idónea de las celdas de carga en los experimentos venideros 	
1	<i>Panel caving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - comprender cómo se distribuyen los esfuerzos verticales inducidos bajo esta configuración en el pilar corona - Identificar el efecto de la incorporación de puntos de extracción paulatina a la producción. 	
2	<i>Block caving</i> con 60 m de no extracción	<ul style="list-style-type: none"> - Cuantificar los esfuerzos inducidos en zonas de no movimiento considerando una zona no incorporada a la producción. 	
3	<i>Block caving</i> con 30 m de no extracción	<ul style="list-style-type: none"> - Observar la influencia del tamaño de la zona no incorporada a la producción en la magnitud de los esfuerzos verticales en el pilar corona. 	

Tabla 4-3: Plan experimental (continuación).

Experimento	Estrategia de extracción	Objetivos	Esquema
4	<i>Block caving</i> con Sobreextracción	<ul style="list-style-type: none"> - Comprender el rol de la sobreextracción en los esfuerzos que actúan sobre el pilar corona. La sobreextracción ocurre en puntos de extracción cercanos a piques de traspaso. 	
5	<i>Block caving</i> , Influencia de la masa extraída	<ul style="list-style-type: none"> - Cuantificar los esfuerzos verticales inducidos sobre el pilar corona del nivel de producción para diferentes cantidades de masa extraída por punto de extracción. 	

Capítulo 5: Resultados y Análisis

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

5.1. Introducción

En este capítulo, se muestran los experimentos descritos en el capítulo anterior, se señalan sus particularidades y sus resultados. Los análisis de cada uno se realizaron en forma separada y las conclusiones generales se exhiben en el Capítulo 6.

5.2. Experimento 0: Tiraje Aislado

El objetivo de este experimento es medir la zona de movimiento aislada generada por un punto de extracción y, a partir de esto, determinar la ubicación idónea de las celdas de carga en los experimentos venideros, es decir, poder identificar si una celda será instalada en una zona de movimiento o en una inactiva. Con tal propósito, la extracción fue llevada cabo en el punto de extracción 19, ubicado en la zanja 5 (ver Figura 5-2). La Figura 5-1 muestra un esquema de este experimento y sus principales parámetros.

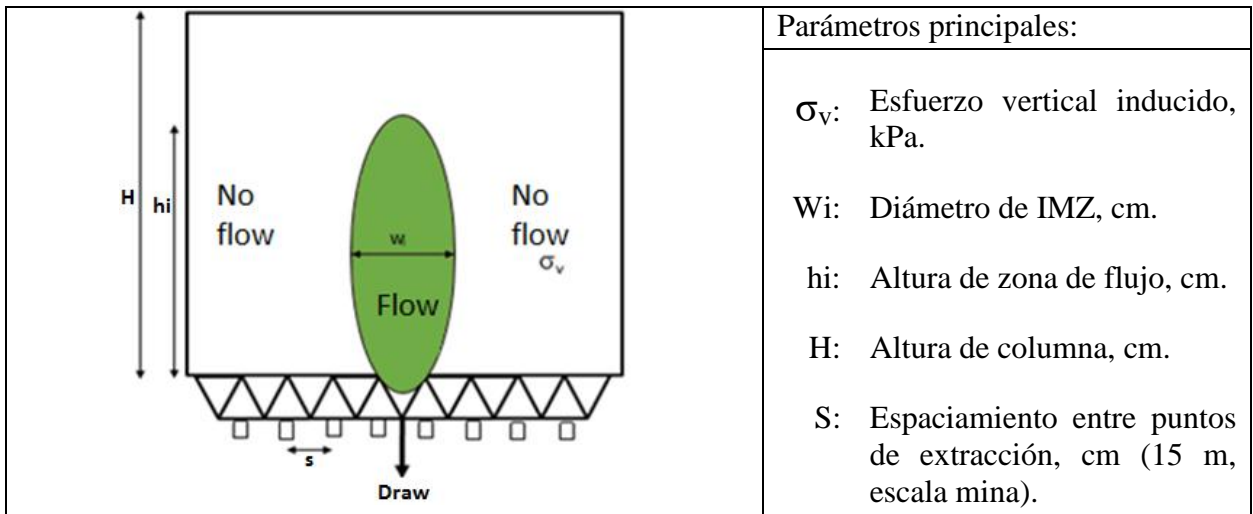


Figura 5-1: Esquema de estrategia de tiraje aislado (vista frontal) – Experimento 0.

Las celdas de carga utilizadas para la medición de esfuerzos verticales sobre el pilar corona, se pueden ver en la Figura 5-2.

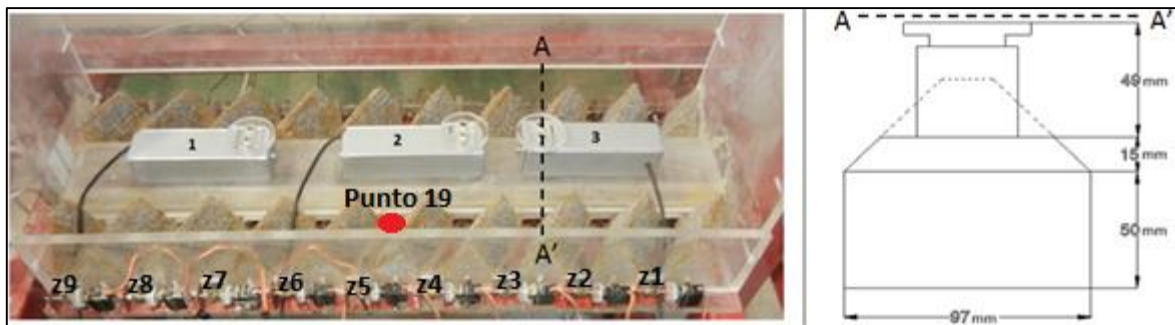


Figura 5-2: Celdas de carga sobre pilar corona (izquierda) y vista en perfil A-A' (derecha) – Experimento 0.

En la Figura 5-3, se muestra la ubicación de las celdas de carga sobre el pilar corona. El punto de color rojo indica la posición del punto de extracción 19. La línea punteada describe una circunferencia de radio 15.8 cm, la cual corresponde a la distancia desde la celda de carga 1 hasta el punto 19.

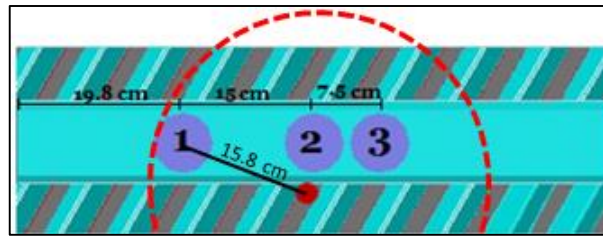


Figura 5-3: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 0.

Para determinar la zona de movimiento aislada (IMZ), se sitúan líneas horizontales de marcadores (líneas de flujo) al interior del modelo físico. A su vez, se incorporan marcadores enumerados para determinar la zona de extracción aislada (IEZ), tal como se puede ver en la Figura 5-4. Las alturas a las cuales fueron posicionados los marcadores son las siguientes: 15, 25, 35 y 55 cm medidos desde la base.

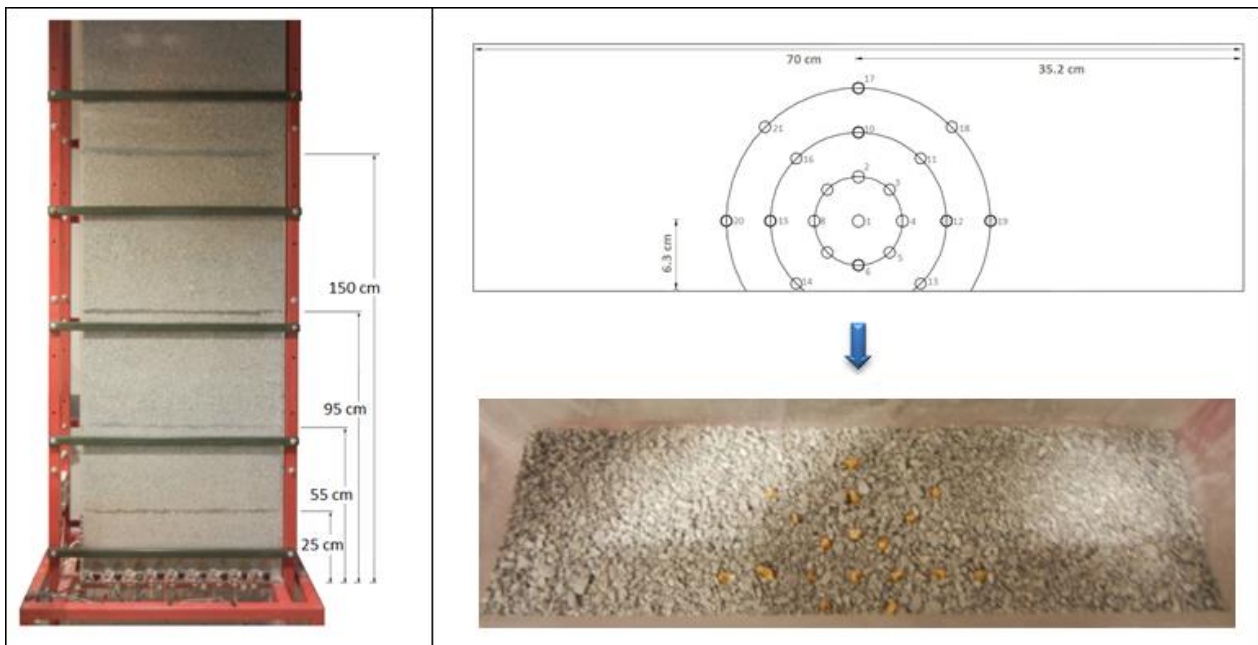


Figura 5-4: Ubicación de líneas de flujo (izquierda) y de marcadores (derecha) al interior del modelo físico – Experimento 0.

Los esfuerzos verticales medidos con las celdas de carga, una vez que el modelo ha sido cargado en su totalidad (500 kg, aproximadamente) y previamente a iniciar la extracción, se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 5-1: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 0.

Experimento 0	Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Media [kPa]	Desviación estándar [kPa]
A	12.72	19.21	15.21	14.83	3.22
B	10.65	13.42	17.76		

5.2.1. Resultados

5.2.1.1. Zona de Movimiento

La extracción de mineral fue llevada a cabo hasta completar la extracción de, aproximadamente, 20 kg en el punto de extracción 19, en ambos experimentos. En la sección 0 se pueden ver los detalles de dicha extracción. En la Figura 5-5, se puede observar la evolución de la zona de movimiento conforme progresa la extracción, donde una masa extraída de 20 kg equivale al 100% de cada experimento.

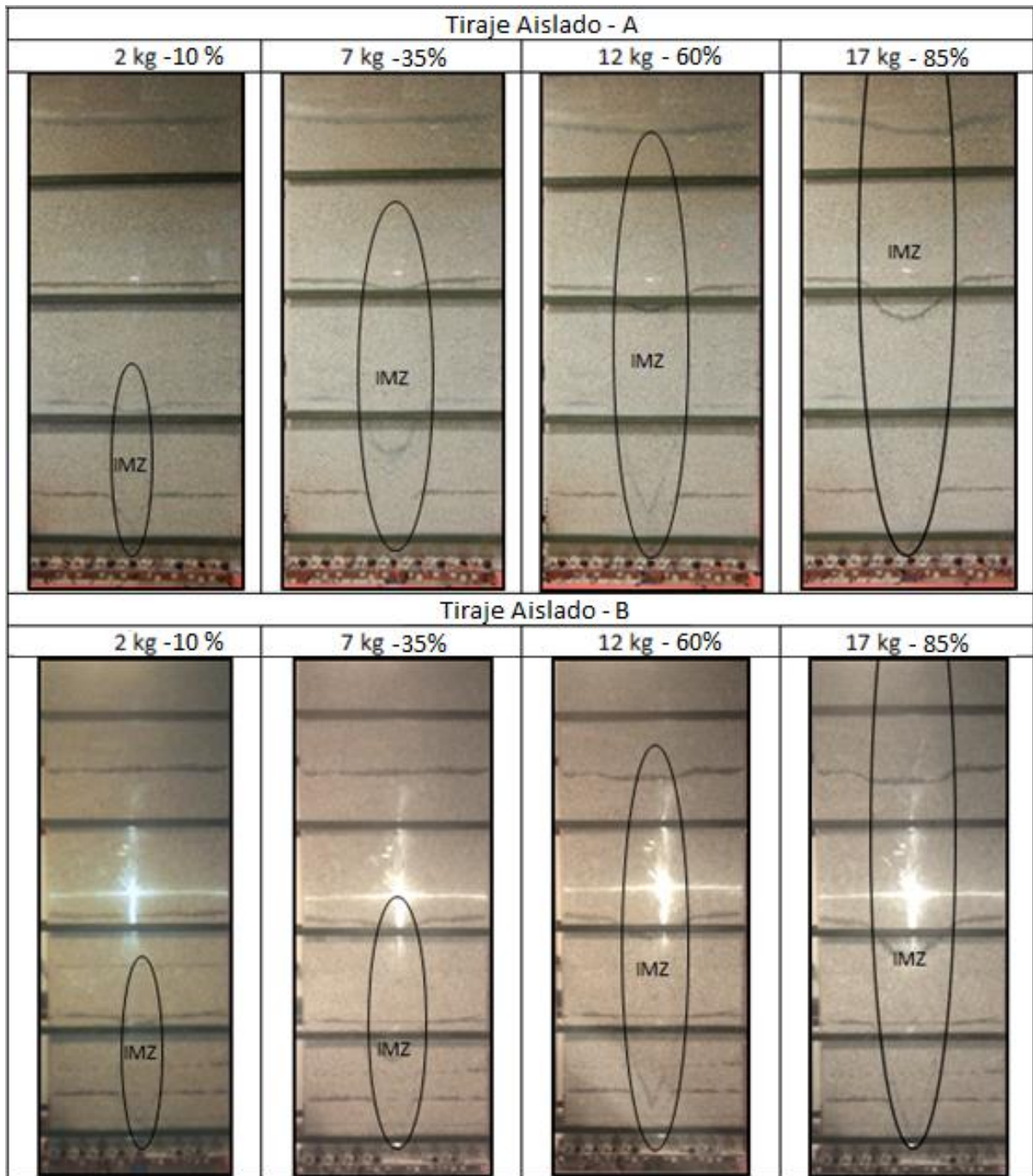


Figura 5-5: Evolución de la zona de movimiento aislada a medida que progresa la extracción – Experimento 0.

A partir del análisis de las fotografías tomadas en los experimentos, tales como las expuestas en la figura anterior, es posible calcular el radio y la altura del IMZ en función de la masa extraída acumulada. Los resultados se muestran en la Figura 5-6 y Figura 5-7.

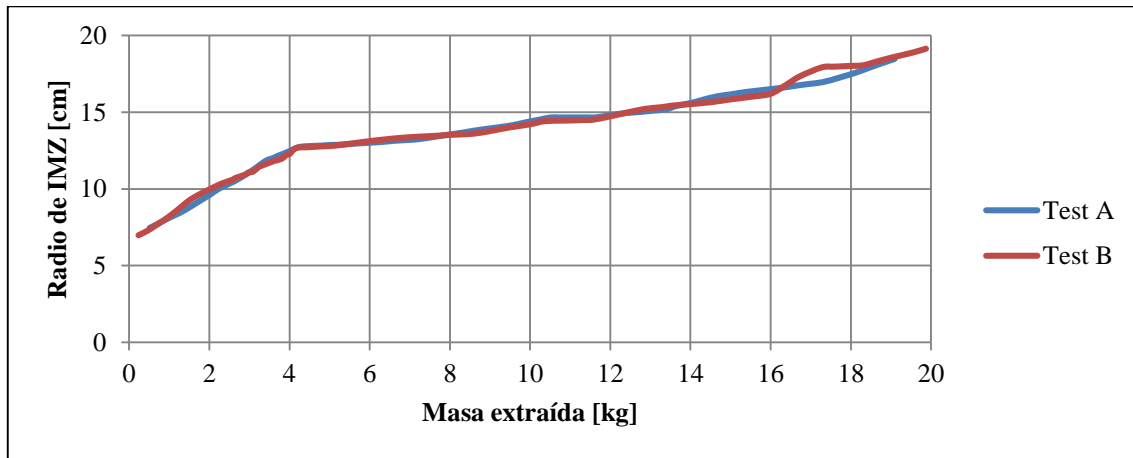


Figura 5-6: Radio de IMZ en función de la masa extraída – Experimento 0.

La Figura 5-6 muestra que la tasa de crecimiento del ancho de IMZ (considerado como el diámetro de IMZ) es mayor para los primeros 4 kg de masa extraída y que, a partir de este valor, decrece.

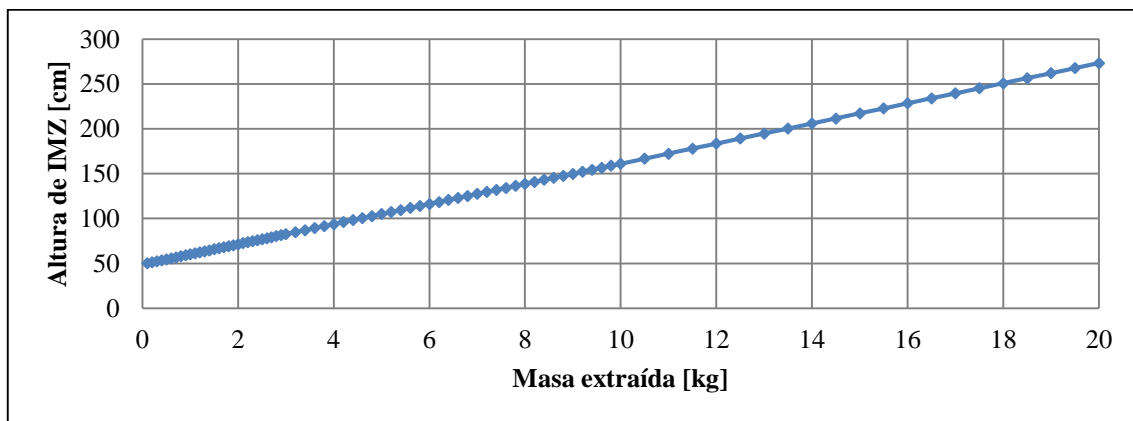


Figura 5-7: Altura de IMZ en función de la masa extraída – Experimento 0.

La Figura 5-7 fue construida a partir de la ecuación de la línea de tendencia obtenida al graficar las observaciones de altura de IMZ, en función de la masa extraída en ambos experimentos. Esta metodología explica que sólo se tenga una componente lineal para la curva, y no una curva compuesta por una región exponencial seguida por una lineal, como se muestra en la siguiente ecuación, que relaciona la altura de IMZ (h_{imz}) con de la masa extraída (m):

$$h_{IMZ}(m) = h_0 \left(1 - e^{-\frac{m}{m_k}} \right) + cm \quad (\text{Castro, 2006})$$

Donde h_0 y m_k representan la altura y la masa a la que la h_{imz} crece exponencialmente con la masa; y c es la tasa de crecimiento final cuando la altura crece linealmente con la masa extraída.

Uno de los modelos predictivos de flujo en materiales granulares es el modelo cinemático (Nedderman, 1995), en el cual se relacionan el ancho (w) y la altura (h), ambos normalizados por el d_{50} del material empleado, de IMZ con la siguiente ecuación:

$$w = 3.42 \sqrt{h} \quad (\text{Pierce, 2009})$$

Mediante el uso de la ecuación anterior y considerando un tamaño d_{50} de 4 mm, se compararon gráficamente los datos experimentales a los teóricos predichos por el modelo cinemático. Los resultados pueden ser vistos en la Figura 5-8.

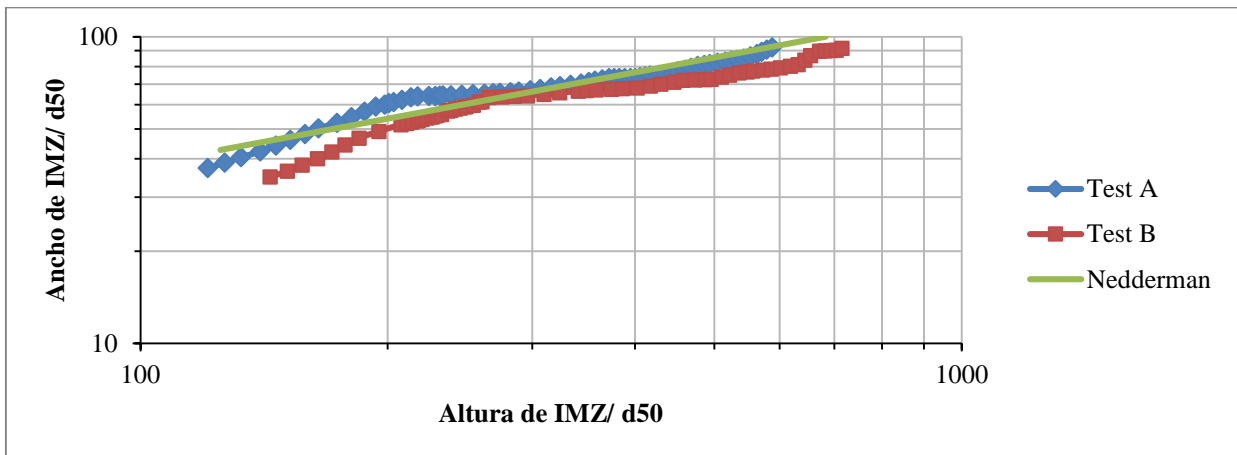


Figura 5-8: Comparación de las mediciones de la forma de IMZ (ancho vs alto) de los experimentos. La línea sólida corresponde a la forma de IMZ predicha por la teoría cinemática de Nedderman (1995).

Las mediciones obtenidas para la forma de IMZ, ya sea el ancho o su altura, son hechas mediante la exportación de las fotografías a un *software* CAD (*computer aided design*), y escalándolas a las medidas del modelo físico. Este procedimiento depende de quién analiza las fotografías de los experimentos y de cómo son interpretados los contornos de las zonas de movimiento. Esto inevitablemente conlleva un error asociado. A pesar de esta limitación, los datos experimentales no están alejados en demasía a la teoría de Nedderman.

5.2.1.2. Zona de Extracción

En la Figura 5-9, se observa una vista en planta de la posición de los marcadores destinados a medir la zona de extracción aislada. El origen del gráfico corresponde a la ubicación del punto de extracción 19.

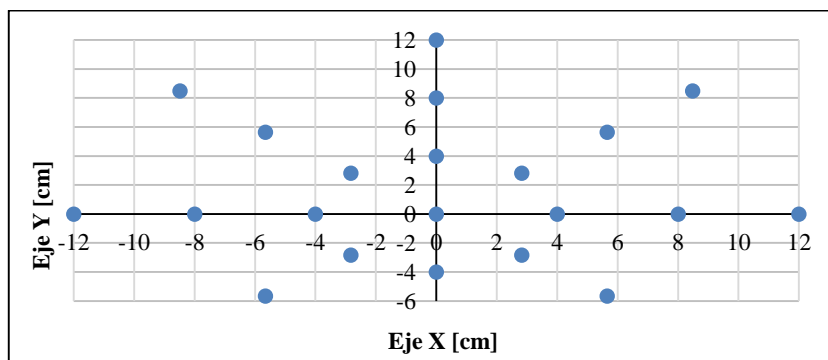


Figura 5-9: Vista en planta de la disposición de marcadores para la medición de IEZ.

En la Figura 5-10 y Figura 5-11, se muestran las zonas de extracción en dos secciones, una para el plano XZ y otra para el plano YZ, a través de los marcadores extraídos en función de la masa extraída. Las líneas punteadas esquematizan la forma de IEZ.

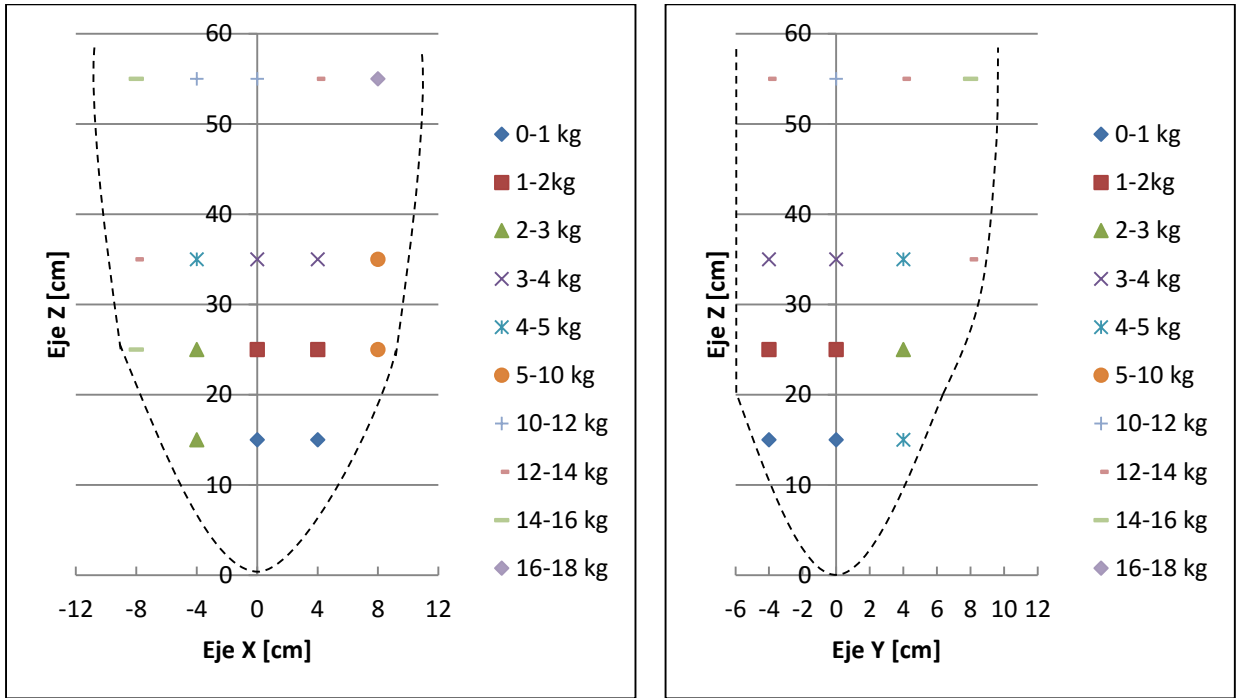


Figura 5-10: Geometría de IEZ, plano XZ (Y=0) en la izquierda y plano YZ (X=0) en la derecha – Experimento 0 A.

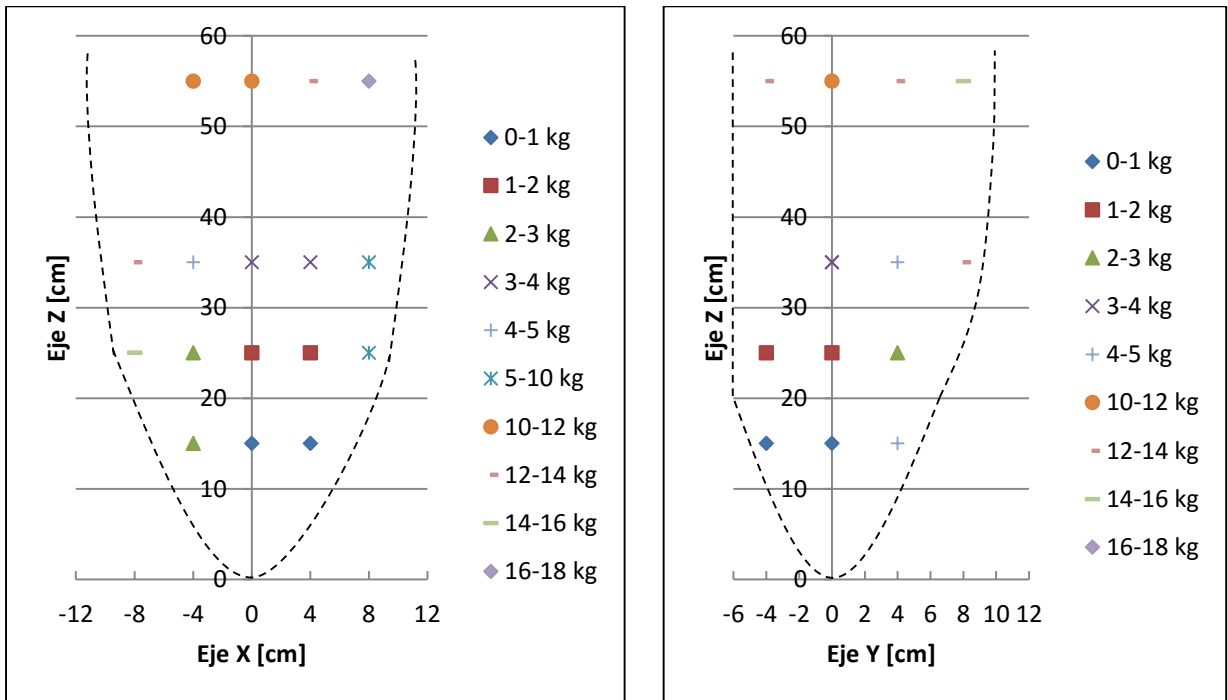


Figura 5-11: Geometría de IEZ, plano XZ (Y=0) en la izquierda y plano YZ (X=0) en la derecha – Experimento 0 B.

En la Figura 5-10 y Figura 5-11, se puede observar que se respeta una geometría elipsoidal y los marcadores van siendo extraídos de menor a mayor altura a medida que la masa extraída es mayor.

5.2.1.3. Esfuerzos Inducidos

En la Figura 5-6 se puede ver que el radio de IMZ alcanza 10 cm cuando se ha extraído una masa cercana a 2 kg. Por lo tanto, y considerando las ubicaciones de las celdas detalladas en la Figura 5-3, las celdas de carga 2 y 3 están bajo la zona de movimiento tempranamente en el experimento. En el caso de la celda 1, que se encuentra a 15.8 cm desde el punto de extracción 19, la zona de movimiento queda sobre ella una vez que se extraen 16 kg de mineral.

La Figura 5-12, se muestra los esfuerzos verticales medios entre ambos experimentos por período, medidos en cada celda, normalizados por su esfuerzo inicial respectivo (mostrados en Tabla 5-1) en función de la masa extraída acumulada. Además, se muestra la desviación estándar entre los experimentos A y B.

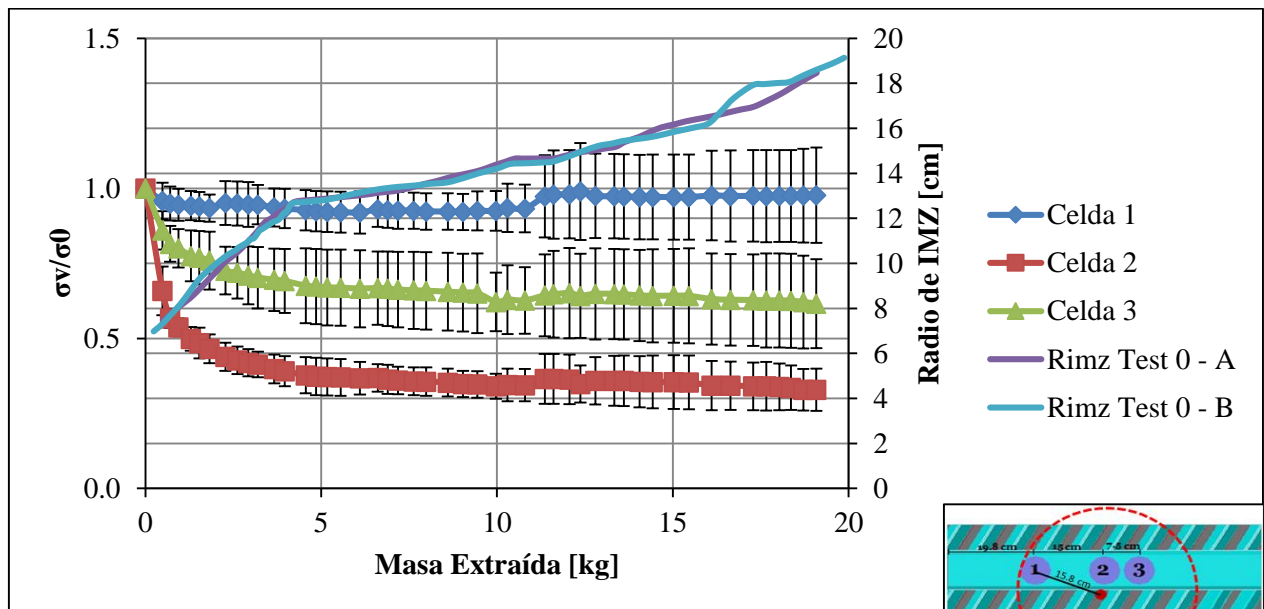


Figura 5-12: Esfuerzos verticales normalizados por el esfuerzo inicial en función de la masa – Experimento 0.

En general, las celdas de carga más cercanas al punto de extracción mostraron una disminución del esfuerzo vertical. Por ejemplo, la celda 2 (que es la más cercana al punto de extracción) exhibe una disminución de 60% del esfuerzo inicial mientras que en la celda 3, el esfuerzo inicial decrece un 40%. La celda 1, que es la más alejada al punto de extracción, mostró una diferencia pequeña desde su condición inicial de esfuerzos. Estos resultados confirman que los esfuerzos dentro de IMZ son bajos en comparación a los esfuerzos en el material estancado que rodea a la zona de movimiento, tal como se postula en estudios previos (como los de Pierce, 2009)

5.3. Experimento 1: Panel Caving

En este experimento, la extracción fue realizada incorporando puntos de extracción a la producción paulatina y secuencialmente a medida que el experimento progresa. Esta secuencia intenta replicar una estrategia de extracción de *panel caving*, con el propósito de comprender cómo se distribuyen los esfuerzos inducidos bajo esta configuración. Se debe notar que sólo se puede emular la forma en que el material es extraído y no el método, en el cual la propagación del hundimiento es paulatina, ya que al incorporar material granular en el modelo físico se asume que el hundimiento ya se ha propagado en su totalidad. La Figura 5-13 muestra un esquema de esta estrategia de extracción y sus principales parámetros.

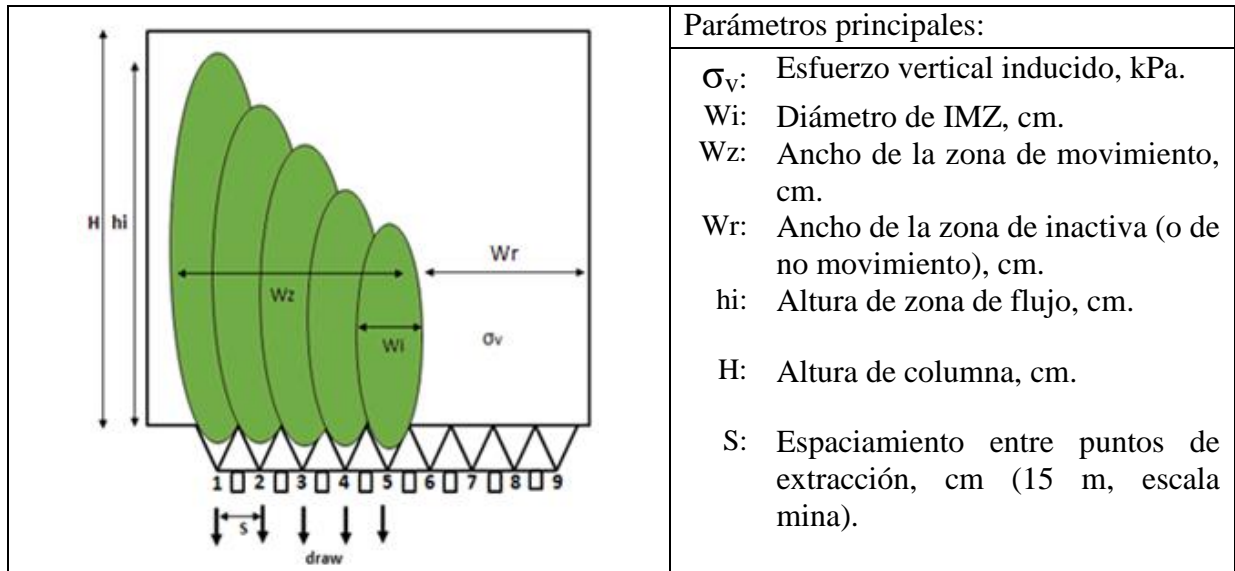


Figura 5-13: Esquema de estrategia de extracción *panel caving* (vista frontal) – Experimento 1.

Para llevar a cabo el estudio de los esfuerzos inducidos bajo este tipo de extracción, dos experimentos fueron realizados: Experimento 1 – A y Experimento 1 – B. En ambos, seis celdas de carga fueron ubicadas sobre el pilar corona del modelo físico. La Figura 5-14 muestra la ubicación de las celdas de carga destinadas a medir los esfuerzos verticales.

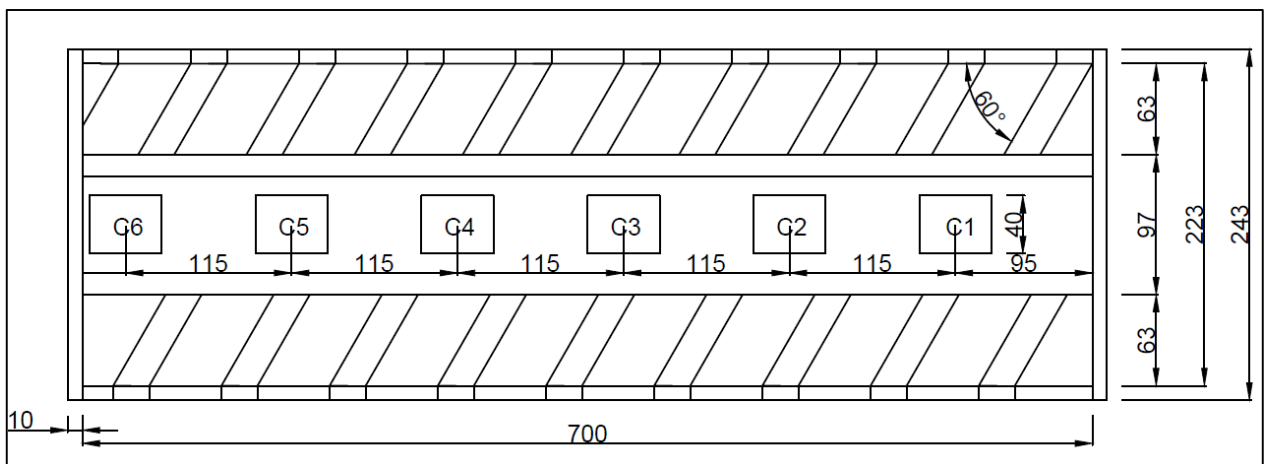


Figura 5-14: Ubicación de las celdas de carga en el modelo físico (vista en planta), medidas en mm - Experimento 1.

Experimento 1 – A

El modelo físico fue cargado con 500 kg de mineral y se alcanzó una altura de columna de 240 cm, medidos desde su base. En la siguiente tabla, se puede ver los esfuerzos iniciales antes de comenzar la extracción de masa.

Tabla 5-2: Esfuerzos Iniciales de cada celda [kPa]. Experimento 1 – A.

Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Celda 6 [kPa]	Media [kPa]	Desviación Estándar [kPa]
15.46	16.08	18.84	19.85	16.84	16.14	17.20	1.75

En la Figura 5-15, se pueden ver los 36 puntos de extracción existentes en el modelo. Los rectángulos rojos indican la posición de las celdas de carga. La extracción fue realizada añadiendo puntos de extracción, comenzando desde el punto 1 y en el orden que el número de cada punto indica.

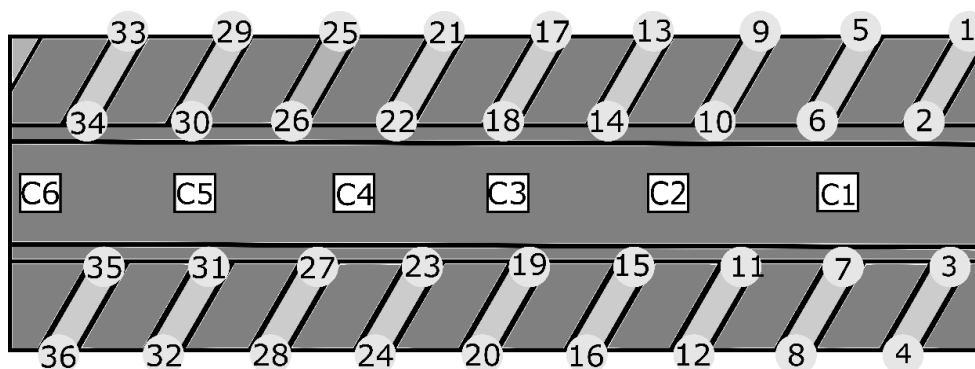


Figura 5-15: Puntos de extracción de la base del modelo físico. Vista en planta. – Experimento 1 – A.

En la Tabla 5-3, es posible observar cómo fue realizada la extracción de mineral desde cada punto. Cada período es completado una vez que cada punto de extracción abierto en el mismo, alcanza la producción definida en el plan de extracción para el experimento. Se destaca que en períodos finales, puntos de extracción son cerrados.

Tabla 5-3: Masa extraída en cada punto de extracción por periodo. Experimento 1 – A.

Período	Masa extraída [kg]	Puntos de extracción abiertos	Masa extraída promedio por punto de extracción [kg]	Período	Masa extraída [kg]	Puntos de extracción abiertos	Masa extraída promedio por punto de extracción [kg]
0	0	0	0	11	27.46	1 al 12	0.38
1	1.01	1 al 4	0.25	12	32.48	1 al 16	0.31
2	2.26	1 al 4	0.31	13	38.18	1 al 16	0.36
3	3.96	1 al 4	0.42	14	44.09	1 al 16	0.37
4	5.03	1 al 4	0.27	15	54.36	1 al 20	0.51
5	6.38	1 al 4	0.34	16	62.72	5 al 20	0.52
6	8.83	1 al 8	0.31	17	72.84	5 al 24	0.51
7	11.52	1 al 8	0.34	18	82.91	5 al 24	0.50
8	14.86	1 al 8	0.42	19	93.36	9 al 28	0.52
9	18.75	1 al 12	0.32	20	103.56	9 al 28	0.51
10	22.86	1 al 12	0.34				

En la Figura 5-16, se esquematiza el progreso del experimento y como se crearon zonas de movimiento e inactivas a medida que se incorporaron y cerraron puntos de extracción, respectivamente. En otras palabras, se ilustra la información entregada en la Tabla 5-3.

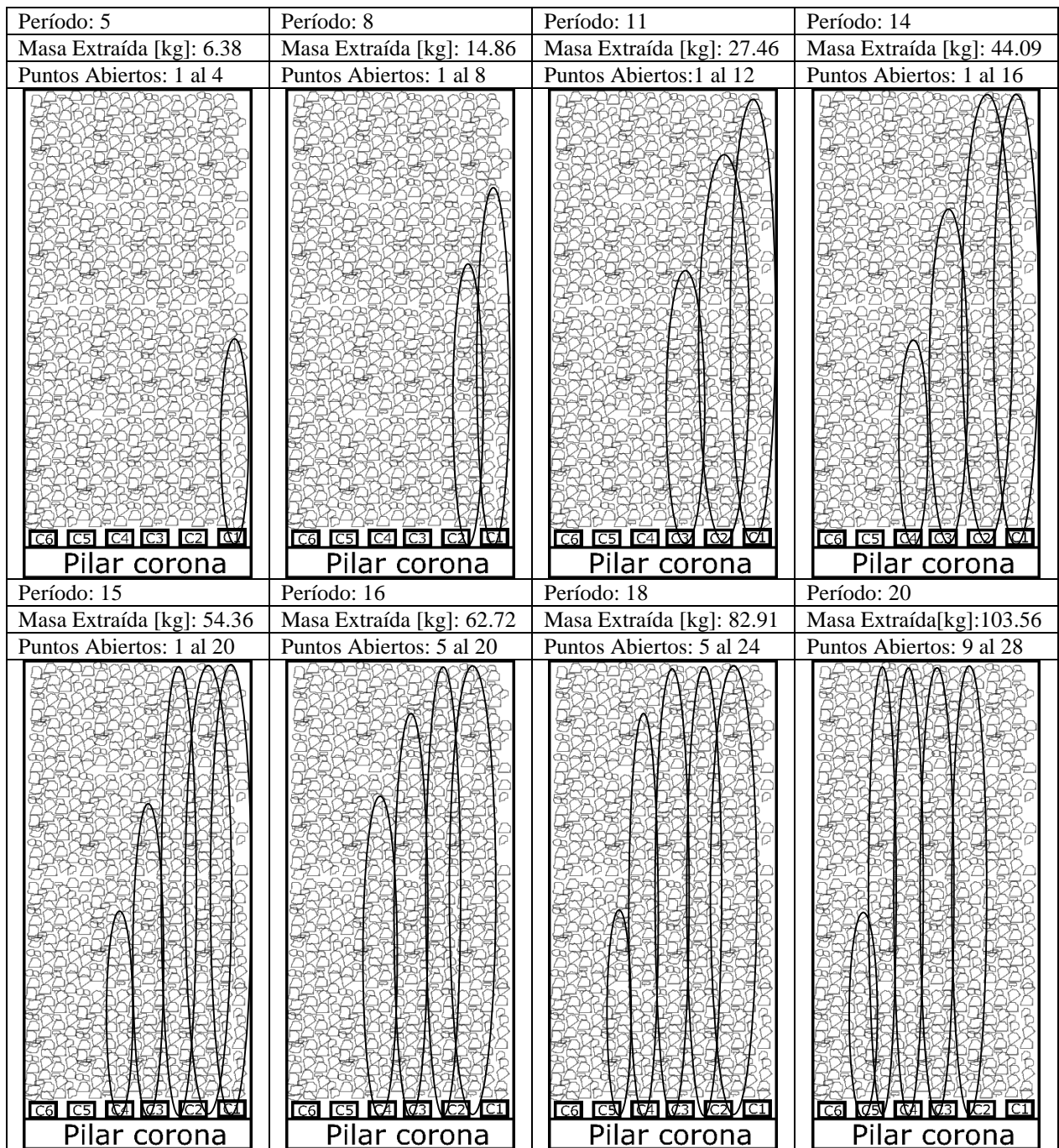


Figura 5-16: Esquemas del progreso del Experimento 1 – A.

5.3.1. Resultados: Experimento 1 - A

5.3.1.1. Zona de Movimiento

Las zonas de movimiento, generadas por la extracción de masa en cada punto, crean una zona de movimiento que crece hacia la izquierda. La evolución del experimento es mostrada en la Figura 5-17. En la parte superior de cada fotografía, se indica la cantidad de masa extraída (acumulada) desde el modelo y el porcentaje de avance del experimento.

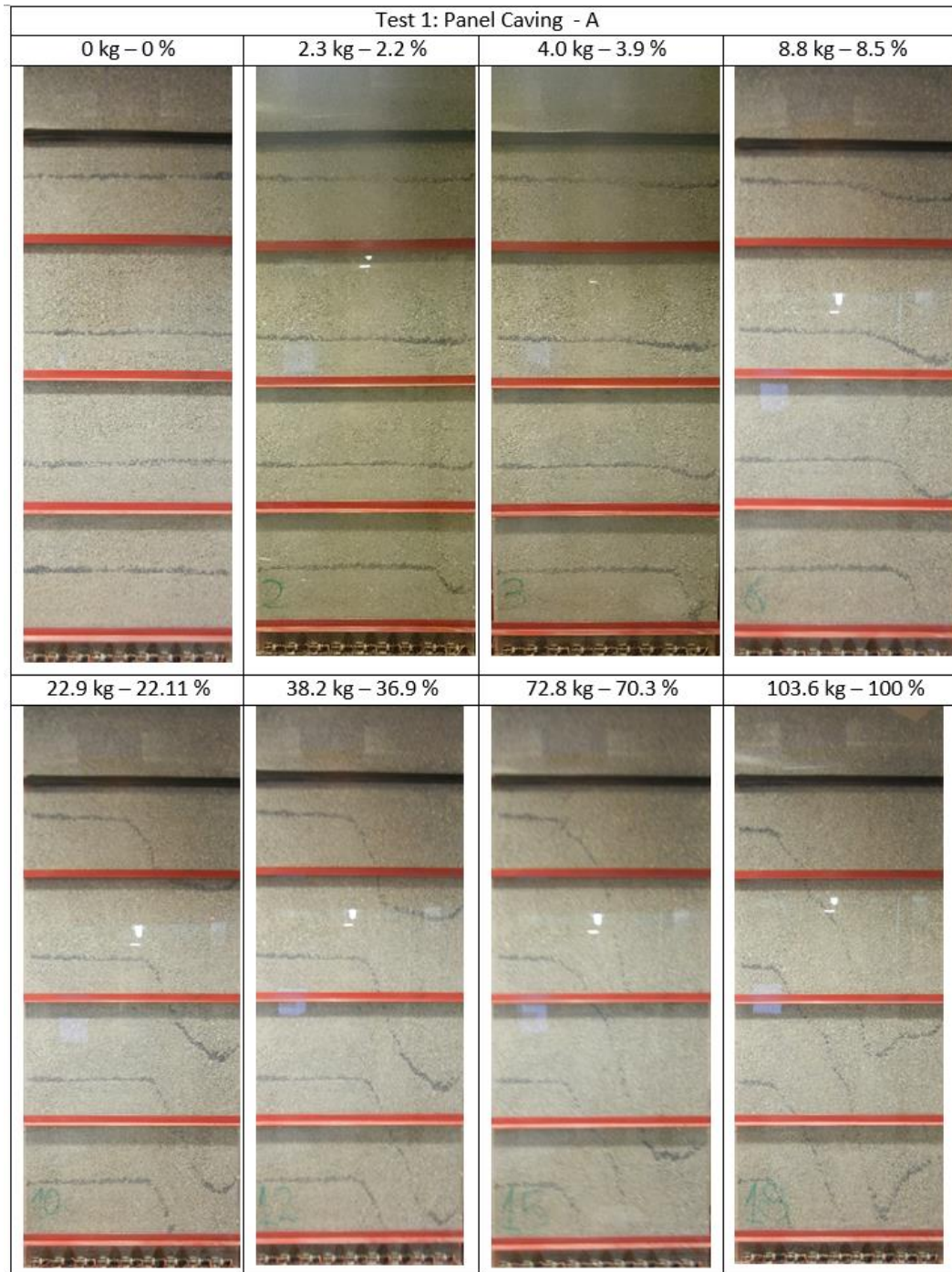


Figura 5-17: Evolución de la zona de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 1 - A.

Tal como se indicó en el esquema de la Figura 5-13, la adición progresiva de puntos de extracción a la producción genera una zona de movimiento creciente y una zona de no movimiento que disminuye su ancho a medida que el experimento progresa. Esta última, es caracterizada mediante su ancho, W_r , y su relación con la masa extraída es mostrada en la Figura 5-18. Cabe destacar que, W_r fue medido a partir de la primera línea de flujo, si son enumeradas en orden ascendente.

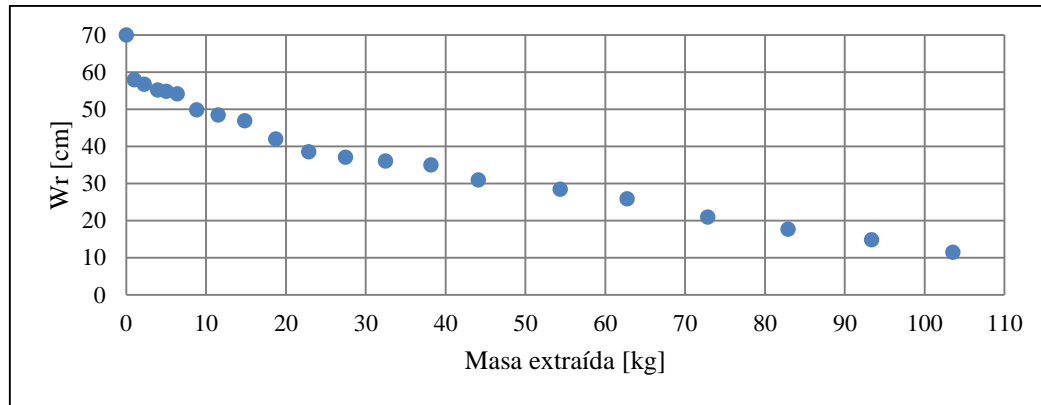


Figura 5-18: Ancho de la zona de no movimiento en función de la masa extraída. Experimento 1 – A.

Este gráfico se relaciona a los esfuerzos inducidos, ya que se deduce a que a medida que la el ancho de la zona de no movimiento decrece, los esfuerzos inducidos aumentan en magnitud.

5.3.1.2. Zona de Extracción

Al conocer la posición inicial de los marcadores enumerados y la masa a la cual fueron extraídos, es posible, mediante el uso de un interpolador lineal, representar la zona de extracción y su crecimiento a lo largo del experimento, tal como puede ser observado en la Figura 5-19. En el eje horizontal se muestra el ancho del modelo físico (cm) y en el vertical, la altura (cm). La escala de colores indica la masa extraída (kg).

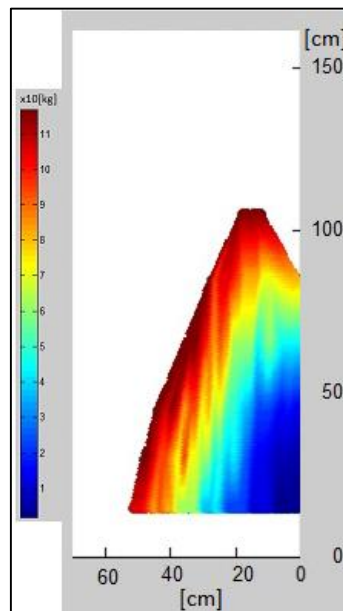


Figura 5-19: Zona de extracción. Experimento 1 – A.

En la Figura 5-19, se aprecia que la recuperación de marcadores es consecuente a la extracción realizada ya que se fueron recolectando a medida que se incorporaron puntos de extracción a producción. La zona de extracción tiene un tamaño menor que la zona de movimiento. Además, es posible observar que sólo la celda de carga 6 queda en una zona de no extracción.

5.3.1.3. Esfuerzos Inducidos

La Figura 5-20 y Figura 5-21 muestran los esfuerzos verticales medios para cada período, medidos en cada celda, normalizados por su esfuerzo inicial respectivo (mostrados en la Tabla 5-2) en función de la masa extraída desde el modelo físico. Las líneas verticales punteadas de color rojo indican la incorporación de puntos de extracción a la producción, tal como se señaló en la Tabla 5-3.

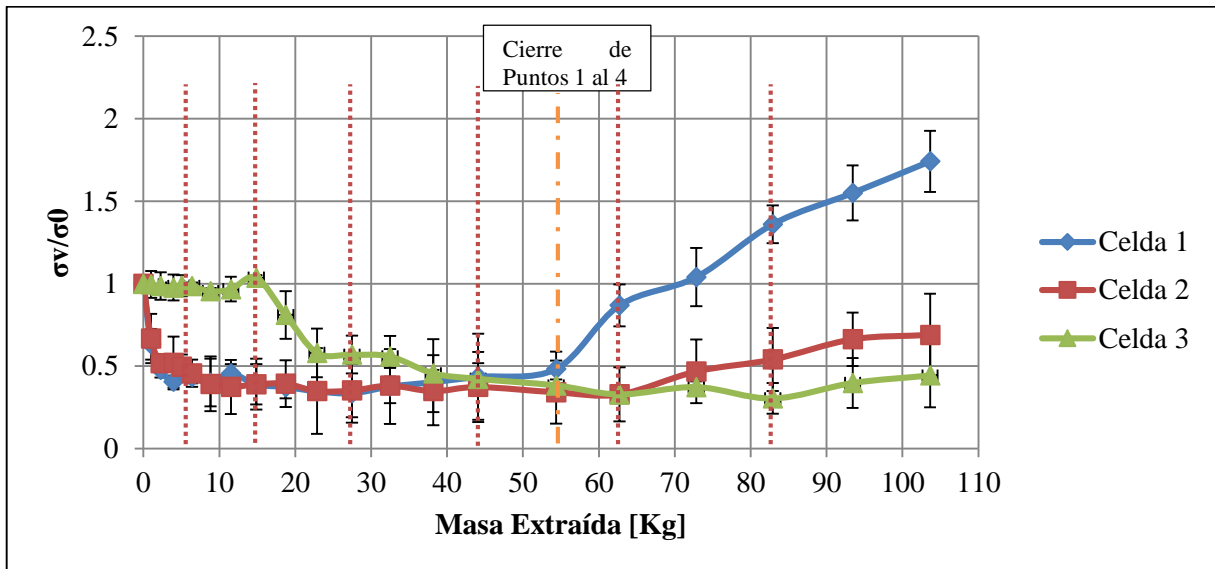


Figura 5-20: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Experimento 1 – A.

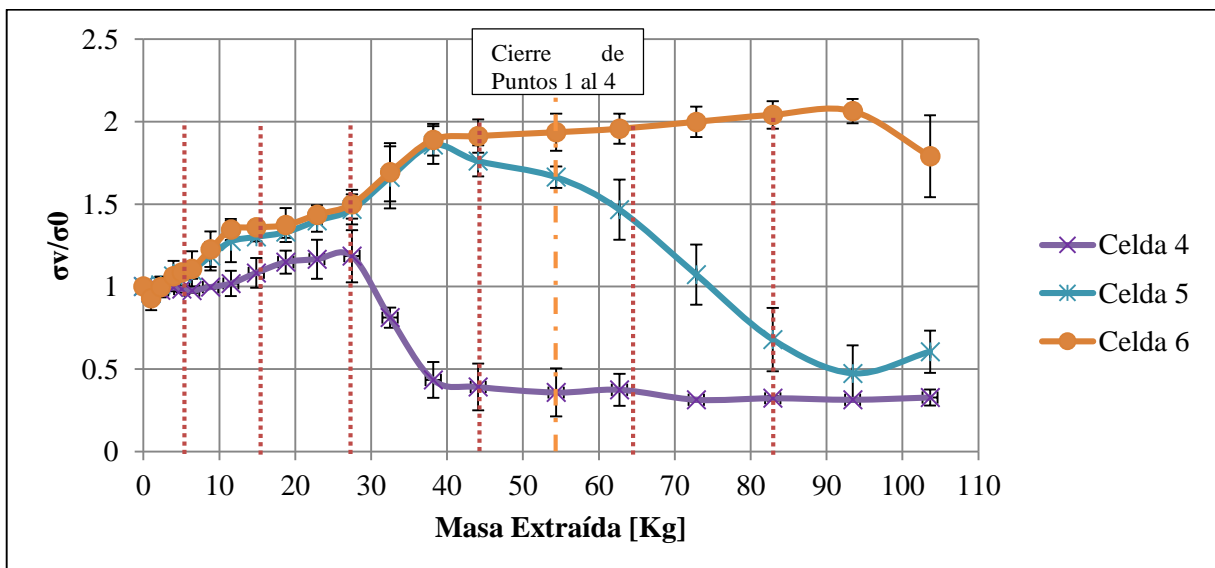


Figura 5-21: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Experimento 1 – A.

En base a los resultados obtenidos, con respecto a los esfuerzos inducidos por el flujo de mineral, se puede afirmar lo siguiente:

- El esfuerzo vertical decrece hasta $0.4\sigma_0$ rápidamente en la celda de carga 1, una vez que la extracción comienza. Esto es debido a que esta celda se encuentra bajo una zona de flujo. Sin embargo, cuando puntos de extracción son cerrados (cerca de los 54 kg de masa extraída) el esfuerzo vertical empieza a aumentar hasta un límite 1.6 veces el esfuerzo inicial de la celda 1.
- La celda de carga 2 también exhibe un descenso de hasta un 60% en los esfuerzos verticales. No obstante, cuando los puntos de extracción 1, 2, 3 y 4 son cerrados se aprecia una leve alza en los esfuerzos aunque no lo suficiente para llegar al esfuerzo inicial.
- En la celda de carga 3 se mantiene constante el esfuerzo inicial hasta que incorporan a la producción los puntos de extracción 9, 10, 11 y 12. En este momento, la celda comienza a mostrar una disminución del esfuerzo inicial en hasta un 60% su esfuerzo inicial. El posterior cierre de puntos de extracción no afecta el comportamiento de esta celda.
- La celda de carga 4 estuvo ubicada inicialmente en una zona de no movimiento y se mostró un incremento en los esfuerzos verticales, no obstante cuando la extracción (apertura de los puntos 9, 10, 11 y 12) se acerca a su posición, dichos esfuerzos decrecen rápidamente hasta $0.4\sigma_0$ y se mantuvieron entorno a ese valor hasta finalizar el experimento.
- La celda de carga 5 sufre un alza en el esfuerzo vertical ya que se encuentra en una zona de no movimiento. Alcanza un valor más alto que la celda 4 debido a su mayor lejanía a la zona de extracción. Se apreció que los esfuerzos comenzaron a descender una vez que los puntos de extracción 17, 18, 19 y 20 fueron añadidos a la producción, y esta tendencia se mantuvo mientras más puntos de extracción se incorporaron.
- La celda de carga 6 se mantuvo en una zona de no movimiento (y de no extracción, ver Figura 5-17 y Figura 5-19) a lo largo de todo el experimento y, consecuentemente, los esfuerzos verticales se mantuvieron elevados.

Experimento 1 – B

Análogamente al experimento 1 – A, el modelo físico fue cargado con 500 kg de mineral y se obtuvo una altura de columna de 240 cm. Los esfuerzos iniciales para cada celda de carga se pueden en la Tabla 5-4:

Tabla 5-4: Esfuerzos Iniciales de cada celda [kPa]. Experimento 1 – B.

Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Celda 6 [kPa]	Media [kPa]	Desviación Estándar [kPa]
19.44	18.49	21.30	16.61	18.55	16.28	18.45	1.85

En este experimento, a diferencia de su predecesor, la extracción se realiza mediante la incorporación de los puntos de extracción que comparten una misma zanja. Este procedimiento crea un frente de extracción que forma un ángulo de 60° con las paredes frontales del modelo físico. En la Figura 5-22, se muestran las zanjas del modelo. Las flechas negras indican en qué orden se explotan los puntos de extracción dentro de una misma zanja.

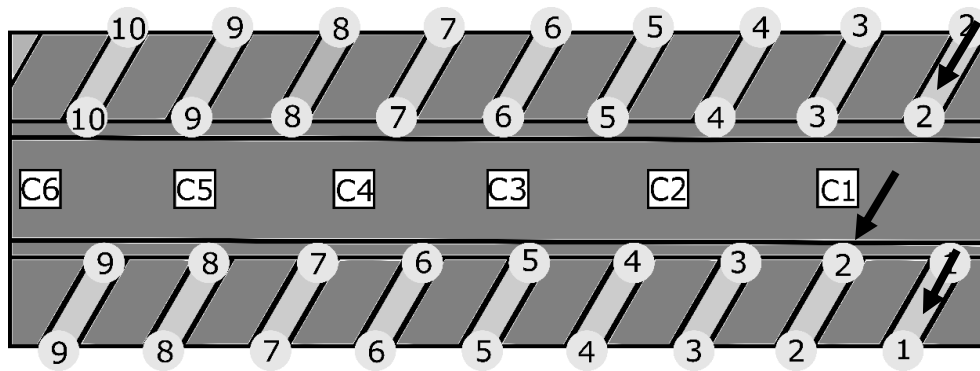


Figura 5-22: Zanjas de la base del modelo físico. Vista en planta. – Experimento 1 – A.

En la Tabla 5-5, es posible observar cómo fue realizada la extracción de mineral desde el modelo físico. La producción comienza en la zanja 1 y en el punto más cercano al pilar corona. Cada período es completado una vez que el último punto de extracción abierto, en la última zanja añadida, alcanza la producción definida en el plan de extracción para el experimento. Notar que al finalizar el período 12 fueron cerradas las zanjas 1 y 2, y al final del período 15 se cerró la zanja 3.

Tabla 5-5: Masa extraída en cada punto de extracción por periodo. Experimento 1 – B.

Período	Masa extraída [kg]	Zanjas abiertas	Masa extraída promedio por punto de extracción [kg]	Período	Masa extraída [kg]	Zanjas abiertas	Masa extraída promedio por punto de extracción [kg]
0	0	0	0	9	33.6	1,2,3,4	0.42
1	1.9	1,2	0.31	10	41.7	1,2,3,4,5	0.45
2	3.9	1,2	0.34	11	49.2	1,2,3,4,5	0.42
3	6.0	1,2	0.36	12	56.8	1,2,3,4,5	0.42
4	9.4	1,2,3	0.34	13	63.3	3,4,5,6	0.32
5	13.2	1,2,3	0.38	14	69.8	3,4,5,6	0.32
6	16.5	1,2,3	0.33	15	76.8	3,4,5,6	0.35
7	22.2	1,2,3,4	0.41	16	83.9	4,5,6,7	0.35
8	27.7	1,2,3,4	0.39	17	90.3	4,5,6,7	0.32

En la Figura 5-23, se esquematiza el progreso del experimento y como se crearon zonas de movimiento e inactivas a medida que se incorporaron y cerraron zanjas, respectivamente. En otras palabras, se ilustra la información entregada en la Tabla 5-5.

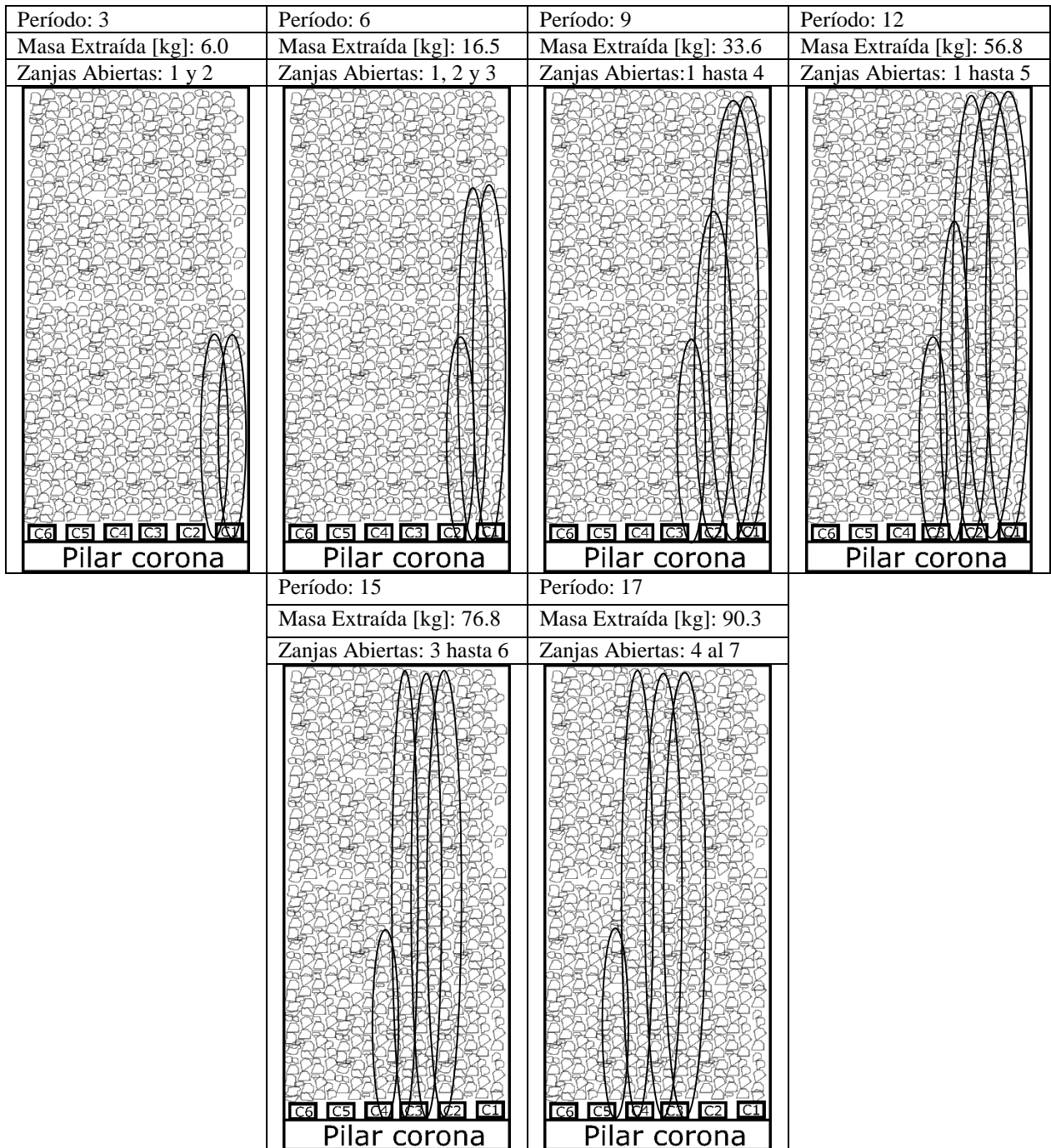


Figura 5-23: Esquemas del progreso del Experimento 1 – B.

5.3.2. Resultados: Experimento 1 - B

5.3.2.1. Zona de Movimiento

En la Figura 5-24, se aprecia la evolución del experimento. En la parte superior de cada fotografía, se indica la cantidad de masa extraída (acumulada) del modelo y el porcentaje de avance del experimento.

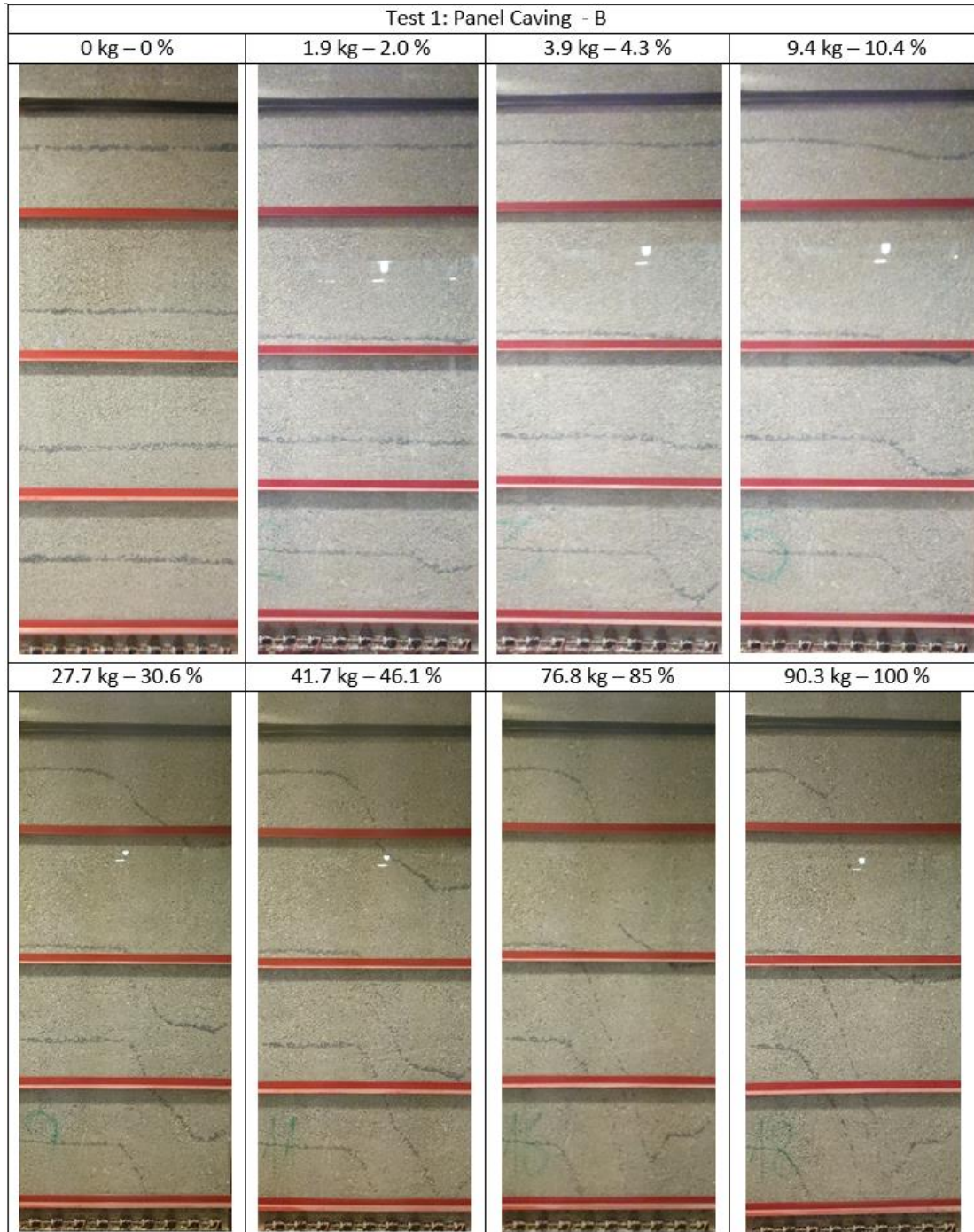


Figura 5-24: Evolución de la zona de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 1 - B.

Para este experimento, también se midió el ancho de la zona de no movimiento (W_r). Los resultados se pueden apreciar en la Figura 5-25.

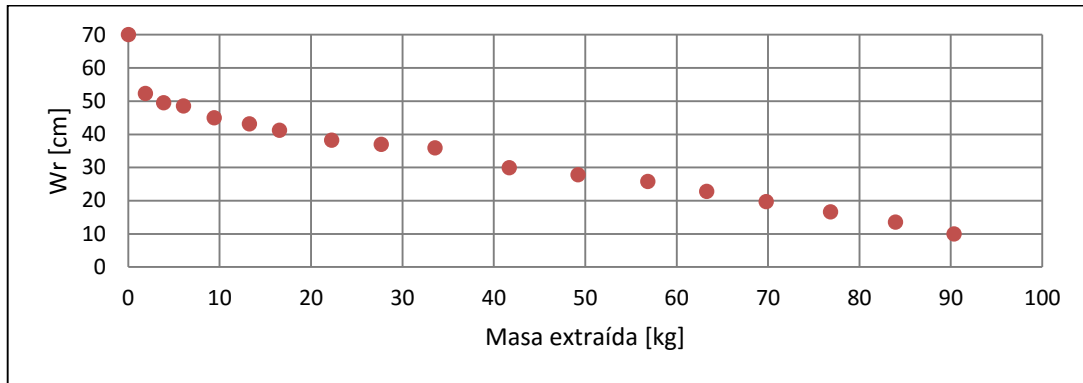


Figura 5-25: Ancho de la zona de no movimiento en función de la masa extraída. Experimento 1 – B.

Este gráfico se relaciona a los esfuerzos inducidos, ya que se deduce a que a medida que la el ancho de la zona de no movimiento decrece, los esfuerzos inducidos aumentan en magnitud.

5.3.2.2. Zona de Extracción

Al igual que en el experimento 1 – A, se estimó la zona de extracción para el experimento 1 – B y se exhibe en la Figura 5-26.

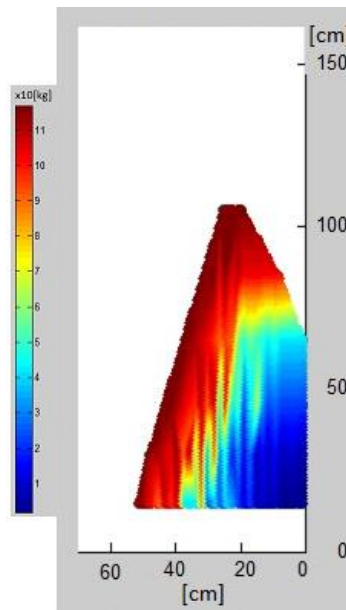


Figura 5-26: Zona de extracción. Experimento 1 – B.

En la figura anterior, se aprecia que la recuperación de marcadores es consecuente a la extracción realizada y, tal como se esperaba, la zona de extracción tiene un tamaño menor que la zona de movimiento. Además, es posible observar que sólo la celda de carga 6 queda en una zona de no extracción.

5.3.2.3. Esfuerzos Inducidos

La Figura 5-27 y Figura 5-28 muestran los esfuerzos verticales medios para cada período, medidos en cada celda, normalizados por su esfuerzo inicial respectivo (mostrados en la Tabla 5-4Tabla 5-2) en función de la masa extraída. Las líneas verticales punteadas de color rojo indican la incorporación de puntos de extracción a la producción, tal como se señaló en la Tabla 5-5.

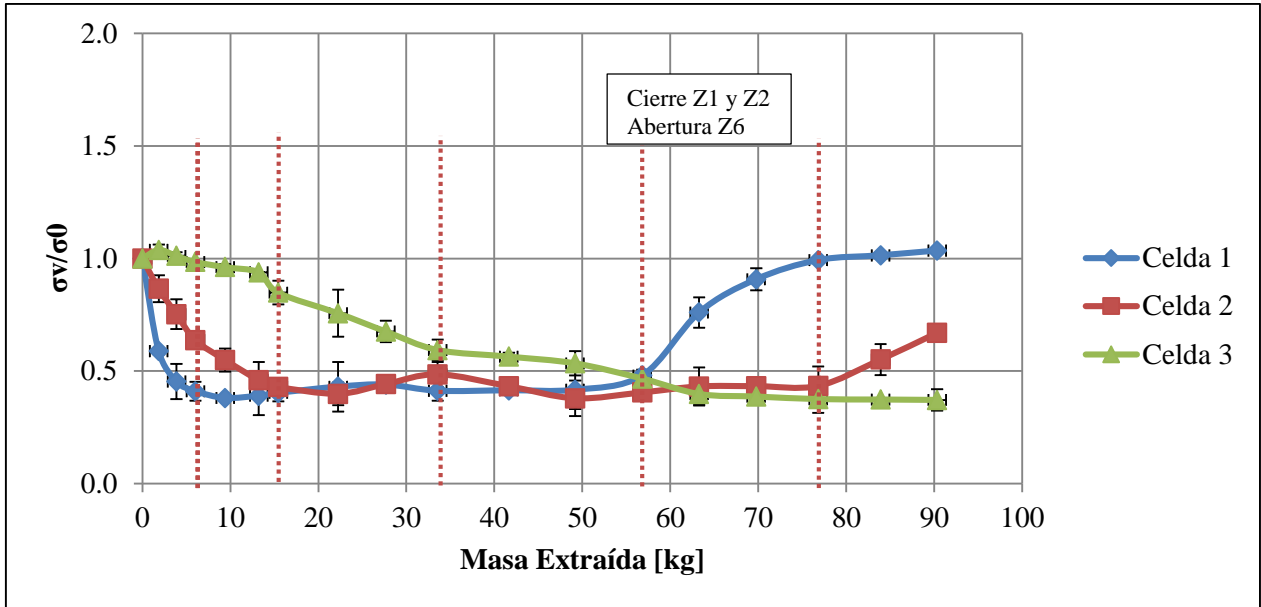


Figura 5-27: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Experimento 1 – B.

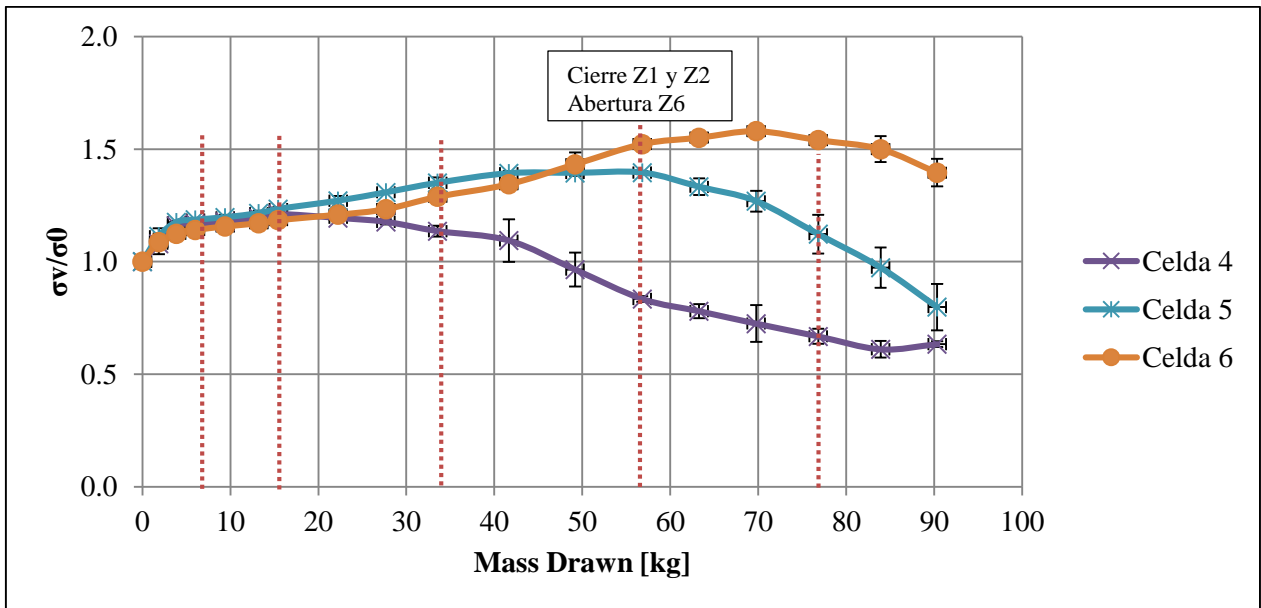


Figura 5-28: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Experimento 1 – B.

Con respecto a los esfuerzos inducidos, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- El experimento comienza con las zanjás 1 y 2 abiertas. Esto produce un descenso abrupto en los esfuerzos registrados por las celdas de carga 1 y 2, aunque más lento en esta última. La celda 1 se mantuvo en un valor cercano a $0.4\sigma_0$ hasta que z1 y z2 fueron cerradas. A partir de este hecho, los esfuerzos aumentaron hasta llegar al valor inicial. Por otro lado, la celda 2 no se ve influenciada por el cierre de z1 y z2, y el esfuerzo registrado se mantuvo casi un 60% más bajo que el valor inicial hasta que la zanja 3 fue cerrada, a los 77 kg de masa extraída. En este momento, se observó una leve alza en los esfuerzos inducidos.
- La celda de carga 3, no registra un cambio en los esfuerzos sino hasta la incorporación de la zanja 3 a la producción. A contar de esto, los esfuerzos tendieron a la baja y el decrecimiento se aceleró cuando se abrió la z4. Tal como se vio en otras celdas, el valor mínimo fue cercano a $0.4\sigma_0$.
- El comportamiento de las celdas 4, 5 y 6 son análogos a los vistos en el experimento 1 – A. Las celdas de carga sufren un aumento en el esfuerzo debido a que se encuentran en una zona de no movimiento, sin embargo comienzan a descargarse a medida que la zona de movimiento creció debido a la incorporación de zanjás a la producción y al ensanchamiento que tuvo la misma gracias a la masa extraída en cada punto de extracción.
- Finalmente, se concluye que los esfuerzos inducidos en el pilar corona descienden en las zonas en que hay extracción y aumentan en las zonas que no se incorporan a la producción. este aumento es cada vez mayor a medida que se reduce el tamaño de las zonas donde no hay extracción (Wr).

5.4. Experimento 2: Block Caving con 60 m de zona de no extracción

El objetivo de este experimento fue comprender la distribución de los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional, cuando se aplica una estrategia de *block caving* con una zona intermedia en la que sus puntos de extracción no son incorporados a la producción. Se llevaron a cabo dos experimentos con una zona de no extracción, cuyo ancho es de 60 m a escala de mina. De este modo, se emula un sector de una mina en la cual tres zanjas consecutivas han sido cerradas. La extracción de mineral fue realizada en las zanjas 1, 2, 3, 7, 8 y 9 a una misma cantidad de masa por período para todos los puntos de extracción activos. Finalmente, cuando se alcanzó una masa acumulada de 97 kg (cerca del 90 % de la masa extraída del modelo físico) se incorporaron a la producción las zanjas 4, 5 y 6 y se cerraron las restantes. La Figura 5-29 muestra un esquema de esta estrategia de extracción y sus principales parámetros.

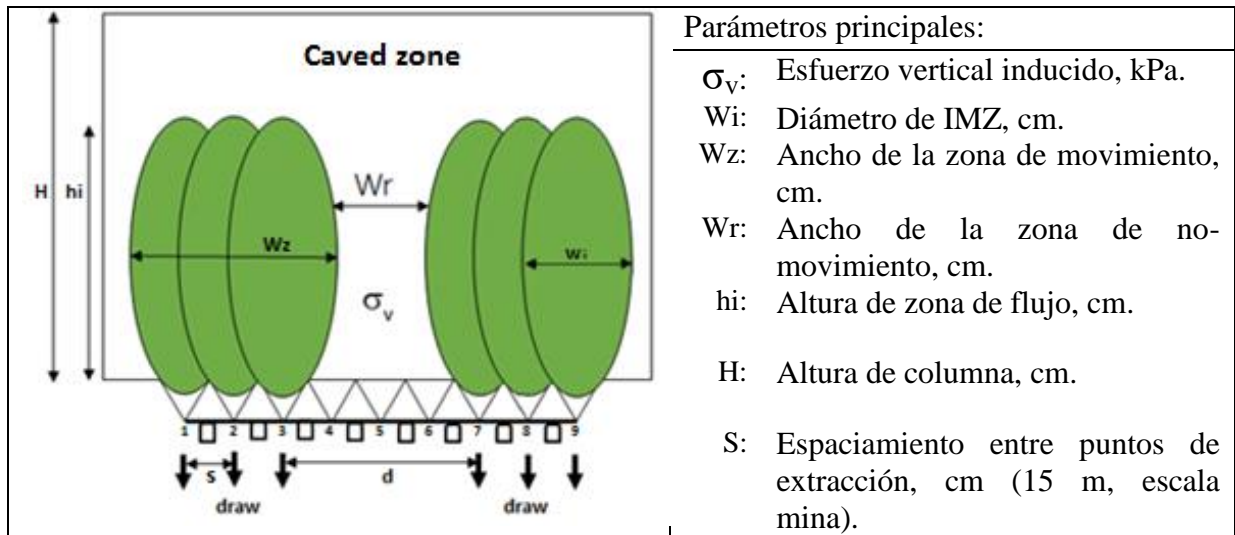


Figura 5-29: Esquema de estrategia *block caving* con zona de no movimiento (vista frontal) – Experimento 2.

En la Figura 5-30, se muestra las ubicaciones de las celdas de carga y, además, se señalan los puntos de extracción activos (marcados con un número 1) y los que están permanentemente cerrados a lo largo de casi todo el experimento (marcados con un número 2), exceptuando períodos finales. Cabe destacar que, las posiciones de las celdas fueron levemente modificadas en comparación al experimento 1. Esto se hizo para obtener mediciones en las zonas de flujo (Z1 a Z3 y Z7 a Z9) y de no movimiento (Z4 a Z6).

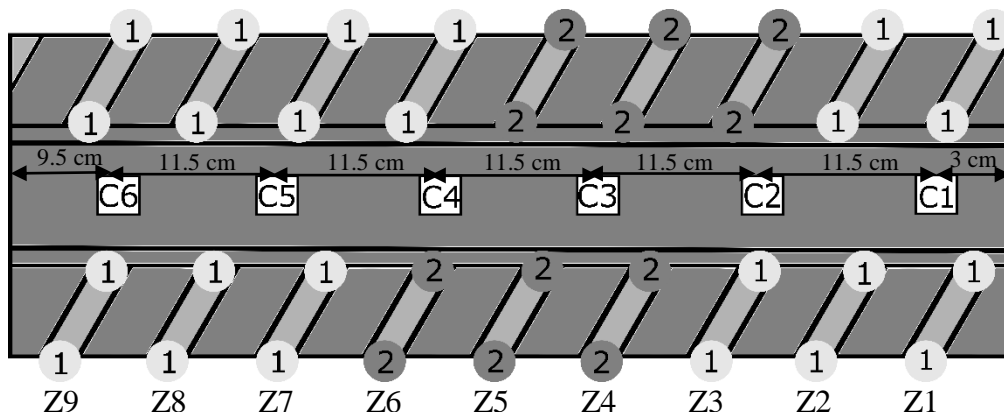


Figura 5-30: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 2.

Los esfuerzos verticales medidos con las celdas de carga, una vez que el modelo ha sido cargado en su totalidad y previamente a iniciar la extracción, se pueden ver en la Tabla 5-6:

Tabla 5-6: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 2.

Test 2	Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Celda 6 [kPa]	Media [kPa]	Desv. [kPa]
A	23.23	31.47	32.92	26.20	29.63	29.53	28.92	5.61
B	22.77	24.66	26.91	32.40	33.19	24.12		

5.4.1. Resultados

5.4.1.1. Zona de Movimiento

En los experimentos realizados, la extracción de mineral desde puntos activos crea dos zonas de movimiento que están separadas por un pilar de mineral, el cual no es extraído sino hasta alcanzar una masa extraída cercana a los 97 kg. El pilar, que es originado por la no extracción de las zanjas 4, 5 y 6, disminuye su ancho conforme progresa el experimento debido al crecimiento de las zonas de movimiento. En la Figura 5-31 y Figura 5-32, es posible apreciar la evolución de las zonas de flujo y del pilar, el cual queda visible gracias a la primera línea de marcadores (L1). El detalle de la extracción llevada a cabo, para ambos experimentos, puede ser vista en la sección ANEXO B.

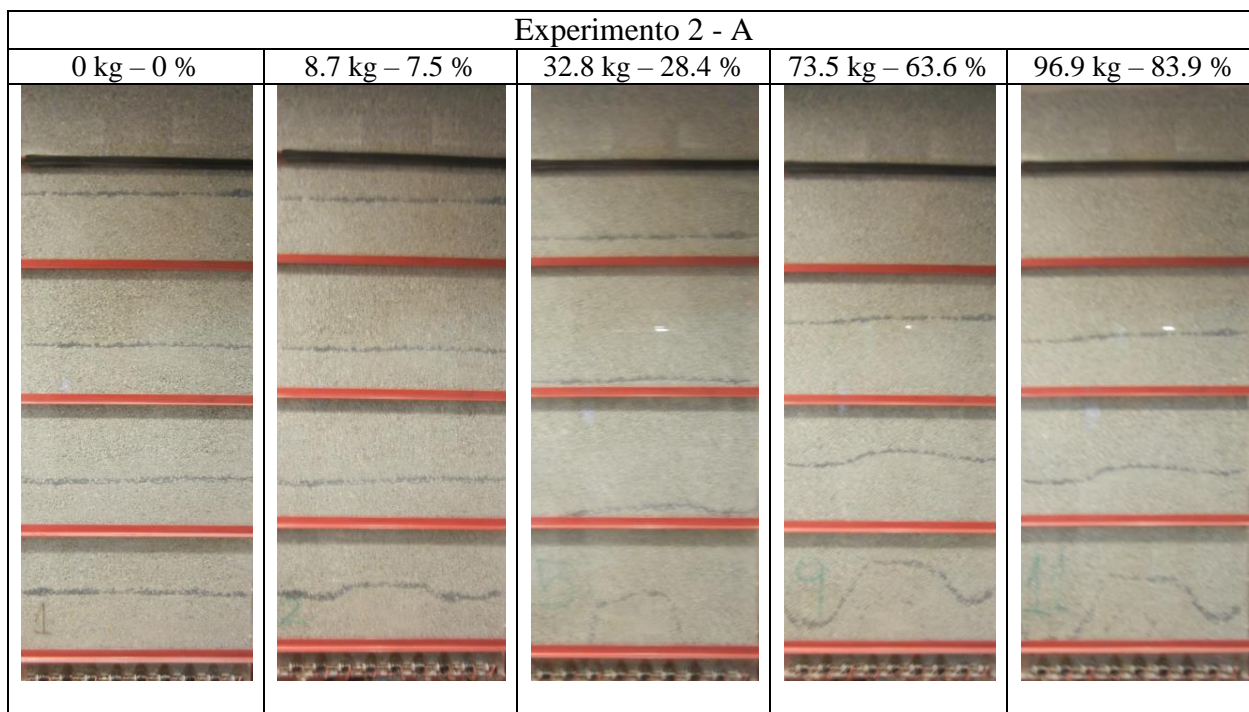


Figura 5-31: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 2 – A.

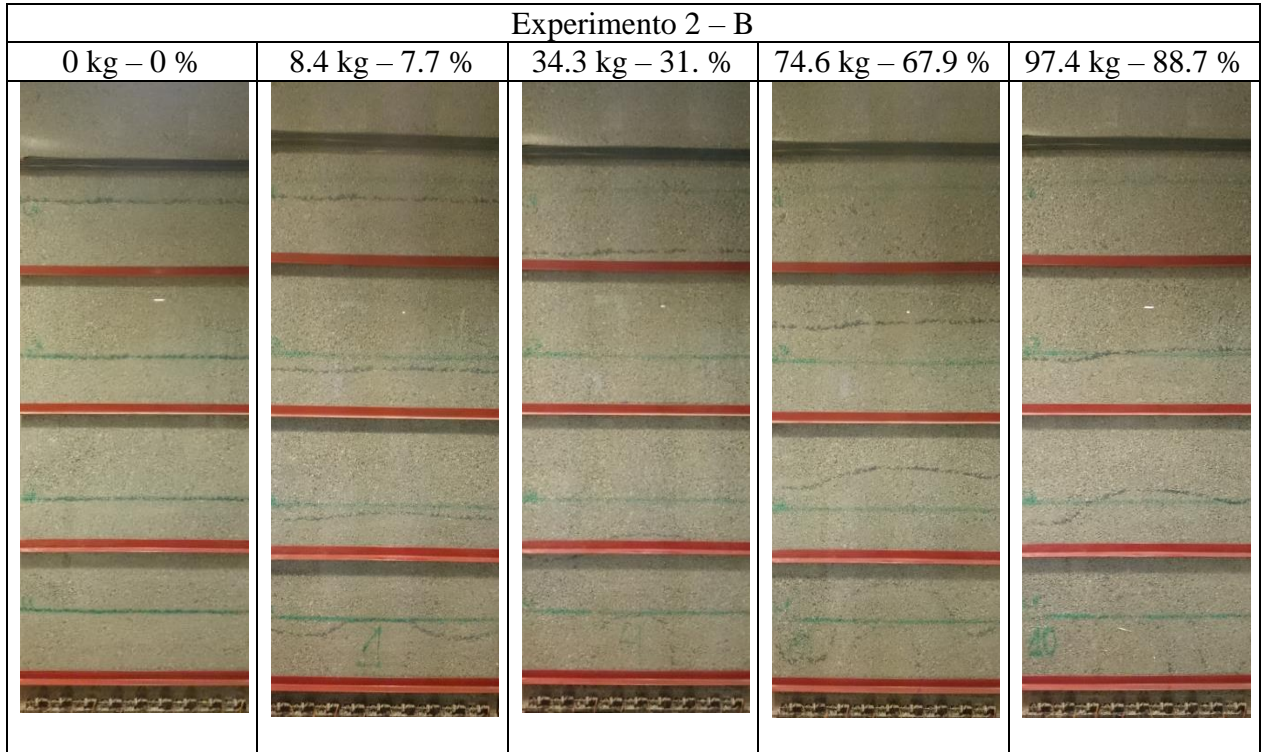


Figura 5-32: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 2 - B.

5.4.1.2. Zona de Extracción

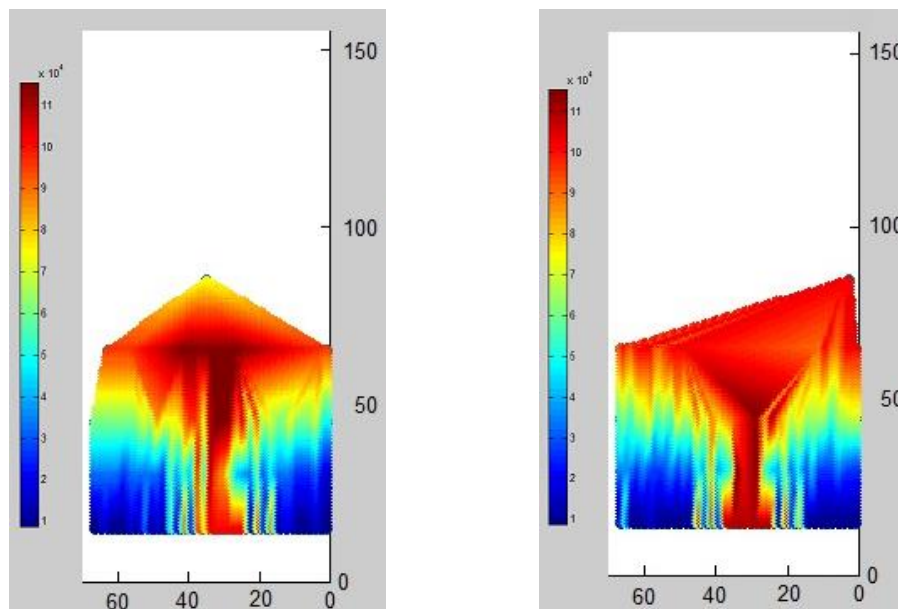


Figura 5-33: Zonas de extracción de ambos experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 2.

En la figura anterior, se muestran las zonas de extracción de los experimentos realizados. Tal como la extracción lo sugiere, se recuperaron marcadores tempranamente en las zanjas 1, 2, 3, 7, 8 y 9.

En cambio, en las zanjas restantes se recuperaron marcadores casi al final de los experimentos cuando se abrieron las zanjas centrales.

5.4.1.3. Esfuerzos Inducidos

En la Figura 5-34, se puede ver los esfuerzos inducidos normalizados por los esfuerzos iniciales respectivos en cada celda. Dichos esfuerzos, son el promedio entre los obtenidos de los experimentos A y B. Las barras de error indican la desviación estándar entre ambos experimentos.

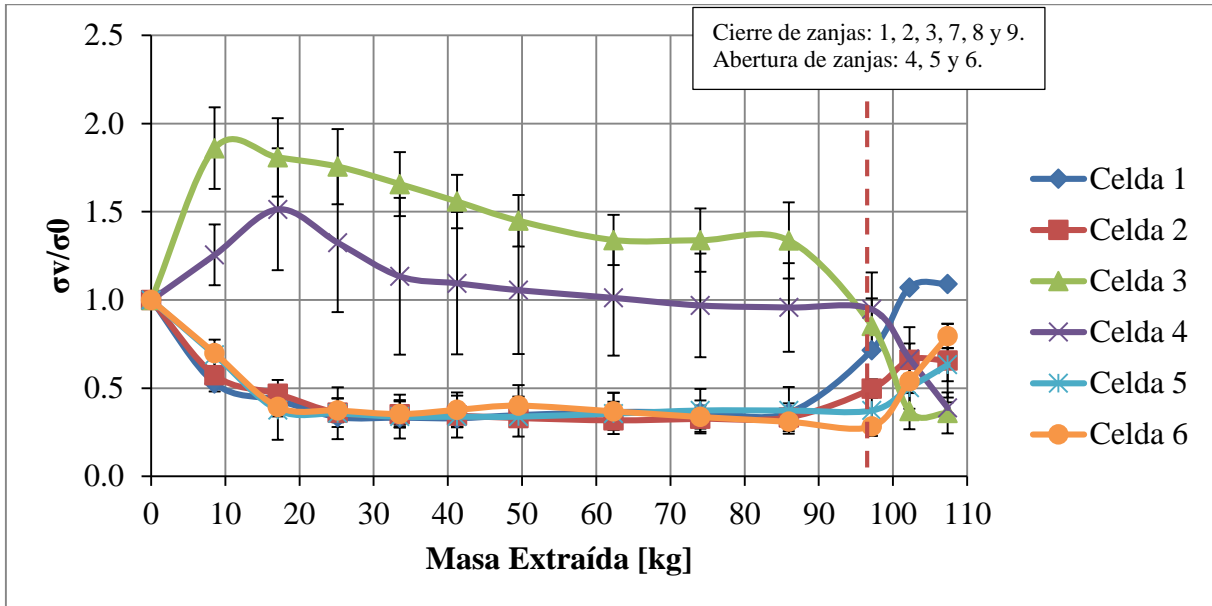


Figura 5-34: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada - Experimento 2.

Con el propósito de mejorar la comprensión de los resultados, se graficaron los esfuerzos inducidos en función de la posición de las celdas de carga para diferentes cantidades de masas extraída acumuladas. (Ver Figura 5-30)

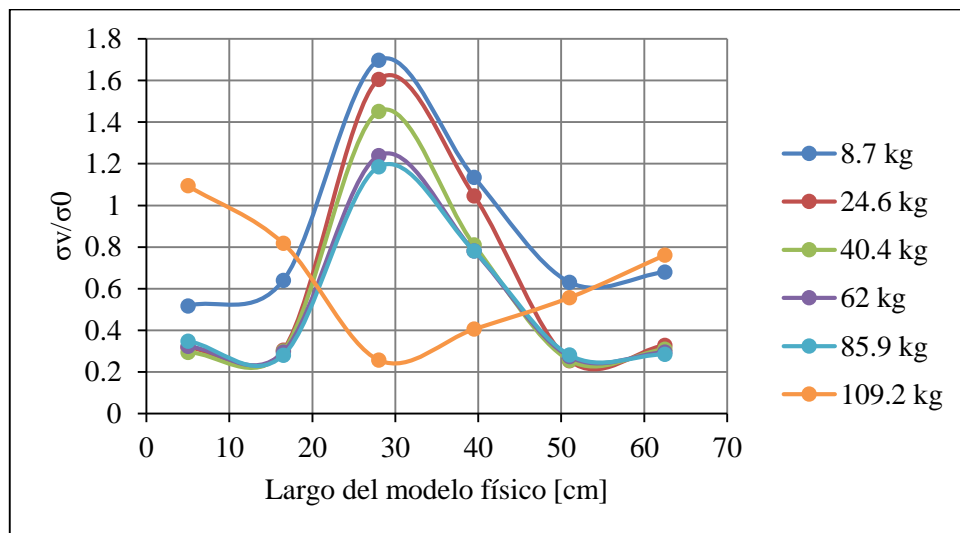


Figura 5-35: Esfuerzos verticales normalizados en función de la posición de las celdas de carga en el modelo físico - Experimento 2.

Con respecto a los esfuerzos inducidos, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- Las celdas de carga 1, 2, 5 y 6 están ubicadas dentro de zonas de movimiento. Los esfuerzos inducidos decrecieron hasta un 40 % de su valor inicial y se mantuvieron así hasta que los puntos de extracción pertenecientes a las zanjas 1, 2, 3, 7, 8 y 9 fueron cerrados. En este momento, los esfuerzos registrados en dichas celdas aumentaron debido a que dichas celdas quedan en una zona de no movimiento.
- La celda de carga 3 fue ubicada en el centro de la zona de no movimiento generada por la no extracción de las tres zanjas centrales del modelo físico. En este caso, el esfuerzo vertical aumentó hasta 1.86 veces el esfuerzo inicial registrado por la celda. Sin embargo, a partir de dicho valor el esfuerzo inducido es decreciente hasta un valor de $1.34\sigma_0$. Este fenómeno se atribuye a la pérdida de masa (y por consiguiente de carga sobre la celda) que tiene el modelo al progresar los experimentos y al ensanchamiento de las zonas de movimiento a ambos lados de la zona inactiva, que está sobre las zanjas centrales. Estas hipótesis deben ser corroboradas en experimentos donde exista relleno del material que se extrae. Los esfuerzos inducidos decrecieron rápidamente y hasta valores de $0.4\sigma_0$ cuando las zanjas centrales se incorporaron a la producción.
- La celda de carga 4 fue ubicada en la zona de no movimiento pero más cercana a la zona de movimiento que la celda 3. El esfuerzo vertical aumentó en 1.5 veces el esfuerzo inicial y decreció a medida que la zona de movimiento aumentó su ancho. Al igual que las otras celdas, cuando hubo extracción bajo ella el esfuerzo inducido decreció hasta $0.4\sigma_0$.

5.5. Experimento 3: Block Caving con 30 m de zona de no extracción

En este experimento, el objetivo fue comprender cómo se redistribuyen los esfuerzos inducidos en una zona intermedia de no extracción, más pequeña que la que se tuvo en el Experimento 2. En este caso, los puntos de extracción de sólo una zanja (zanja 5) no fueron incorporados a la producción sino hasta períodos finales del experimento. La Figura 5-36 muestra un esquema de esta estrategia de extracción y sus principales parámetros.

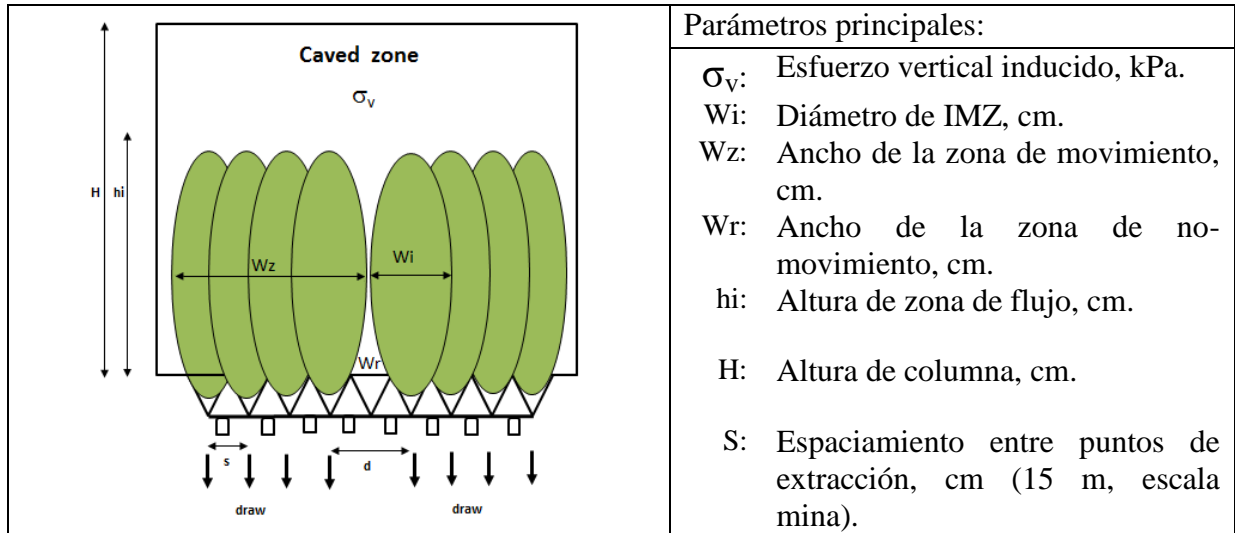


Figura 5-36: Esquema de estrategia *block caving* con zona de no movimiento (vista frontal) – Experimento 3.

En el pilar corona del modelo físico se posicionaron cinco celdas de carga debido a que, de este modo, una celda pudo estar sobre la zanja 5. Luego, se tuvieron cuatro celdas en las zonas de flujo y una, en la de no movimiento. En la Figura 5-37, se muestran las ubicaciones de las celdas de carga y, además, se señalan los puntos de extracción activos (marcados con un número 1) y los que están permanentemente cerrados a lo largo de casi todo el experimento (marcados con un número 2), exceptuando períodos finales.

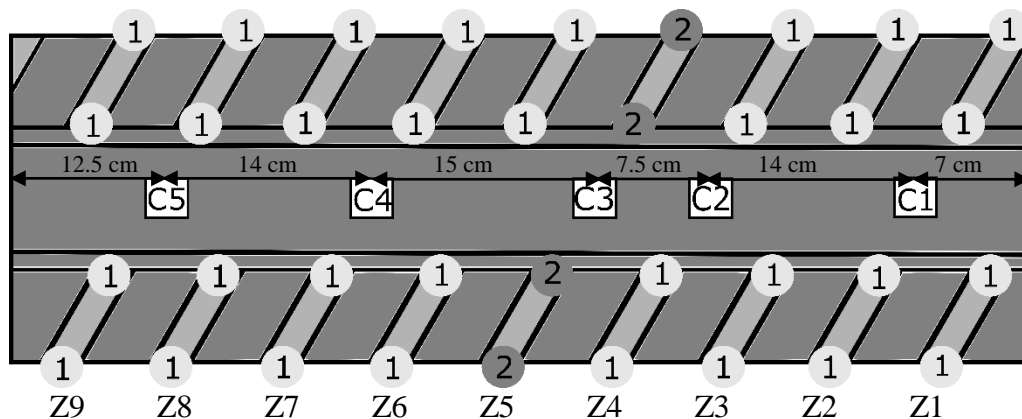


Figura 5-37: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4.

En la Tabla 5-7, se puede ver los esfuerzos verticales medidos con las celdas de carga, una vez que el modelo ha sido cargado con, aproximadamente, 500 kg de mineral y previamente a iniciar la extracción.

Tabla 5-7: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 3.

Test 3	Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Media [kPa]	Desv. [kPa]
A	22.45	18.56	16.42	23.18	23.24	17.70	3.65
B	13.12	17.68	13.87	16.28	17.81		

5.5.1. Resultados

5.5.1.1. Zona de Movimiento

En la Figura 5-38 y Figura 5-39, es posible observar el progreso de los experimentos 3-A y 3-B, respectivamente. En ambas figuras se aprecian líneas de flujo de color azul, que descienden desde su posición inicial (señalada con una línea verde pintada en el modelo) a medida que los períodos y la extracción avanzan. En ambos experimentos, se puede ver que la exclusión de una zanja a la producción genera una pequeña zona donde no hay movimiento entre las zonas de flujo generadas por la extracción de las zanjas restantes. También, se ve que hay interacción de las zonas de movimiento por sobre la zanja 5, debido al descenso casi parejo de las líneas de flujo 2, 3 y 4.

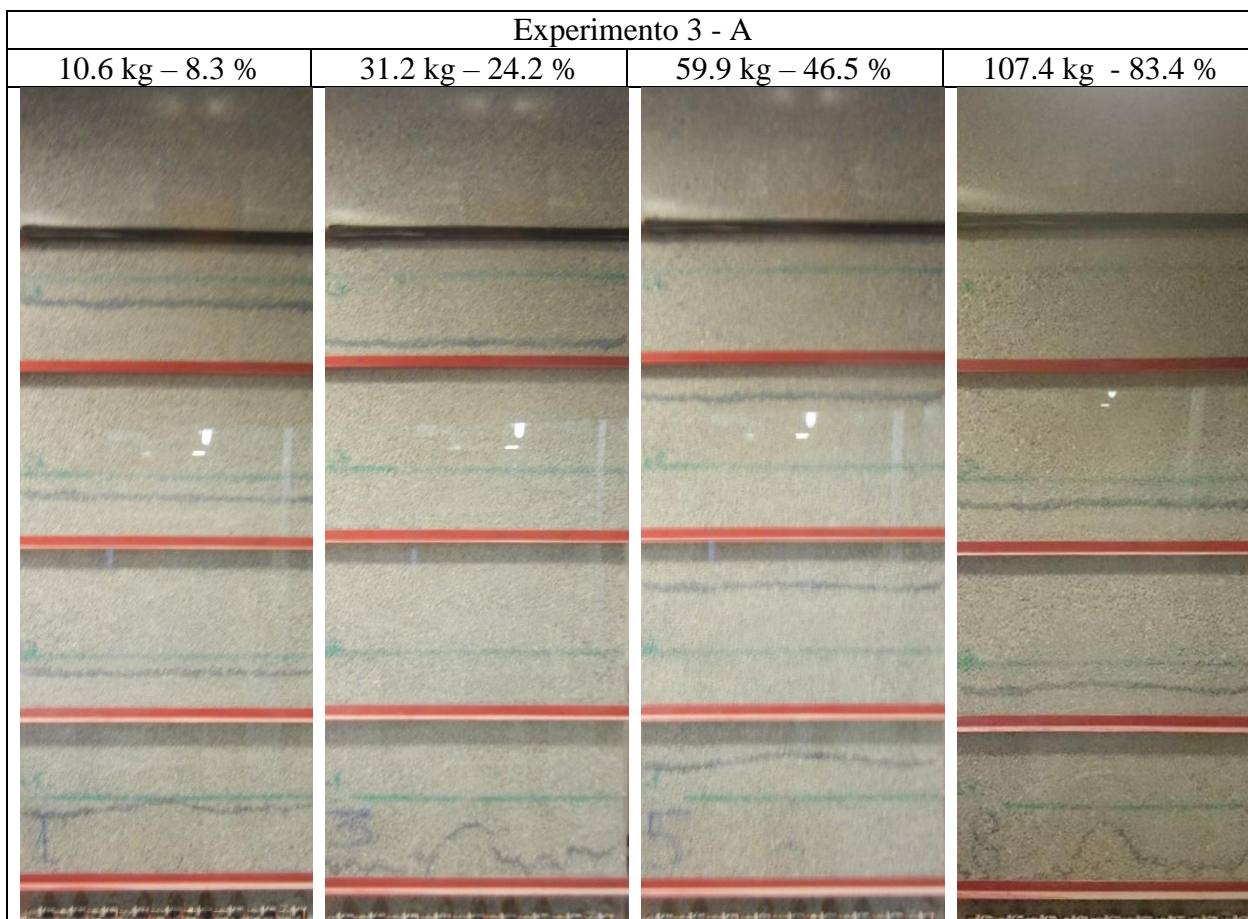


Figura 5-38: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 3 – A.

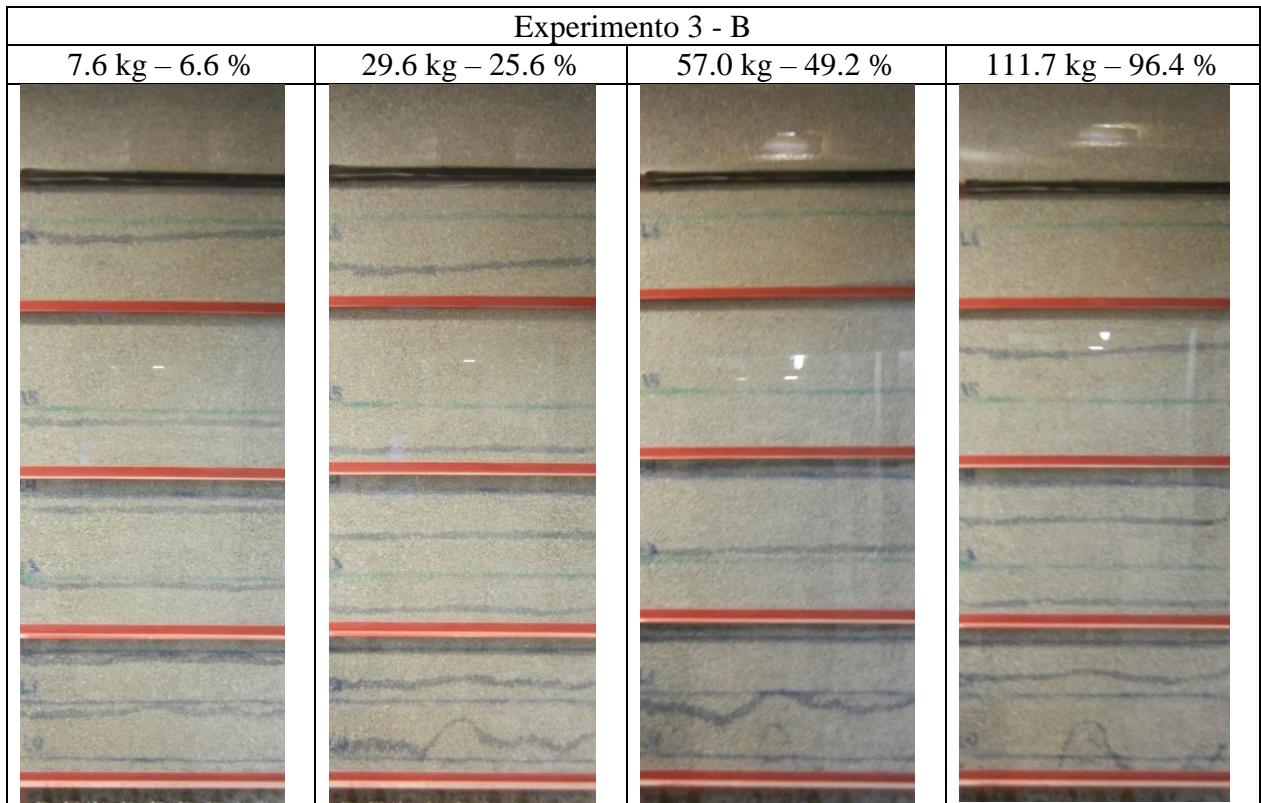


Figura 5-39: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 3 – B.

5.5.1.2. Zona de Extracción

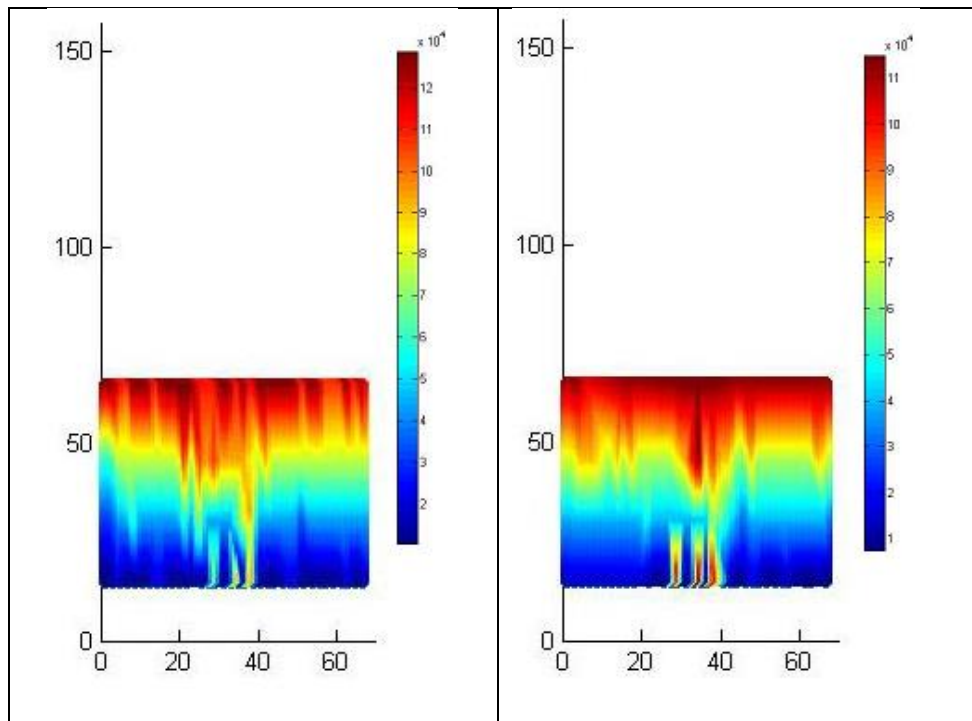


Figura 5-40: Zonas de extracción de experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 2.

En la Figura 5-40, se pueden las zonas de extracción estimadas a partir de la recuperación de los marcadores ubicados al interior del modelo físico. Tanto en el experimento A como en su réplica, experimento B, se puede ver que en la parte central del modelo hubo una recuperación posterior de marcadores. Esto se condice con la extracción de la zanja 5, la cual fue al final de cada experimento. También es posible observar, aunque más claramente para el experimento B, que hay interacción entre las zonas de extracción por sobre la zanja 5.

5.5.1.3. Esfuerzos Inducidos

En la Figura 5-41, se pueden ver los esfuerzos inducidos normalizados por los esfuerzos iniciales respectivos en cada celda. Dichos esfuerzos, son el promedio entre los obtenidos de los experimentos A y B. Las barras de error indican la desviación estándar entre ambos experimentos.

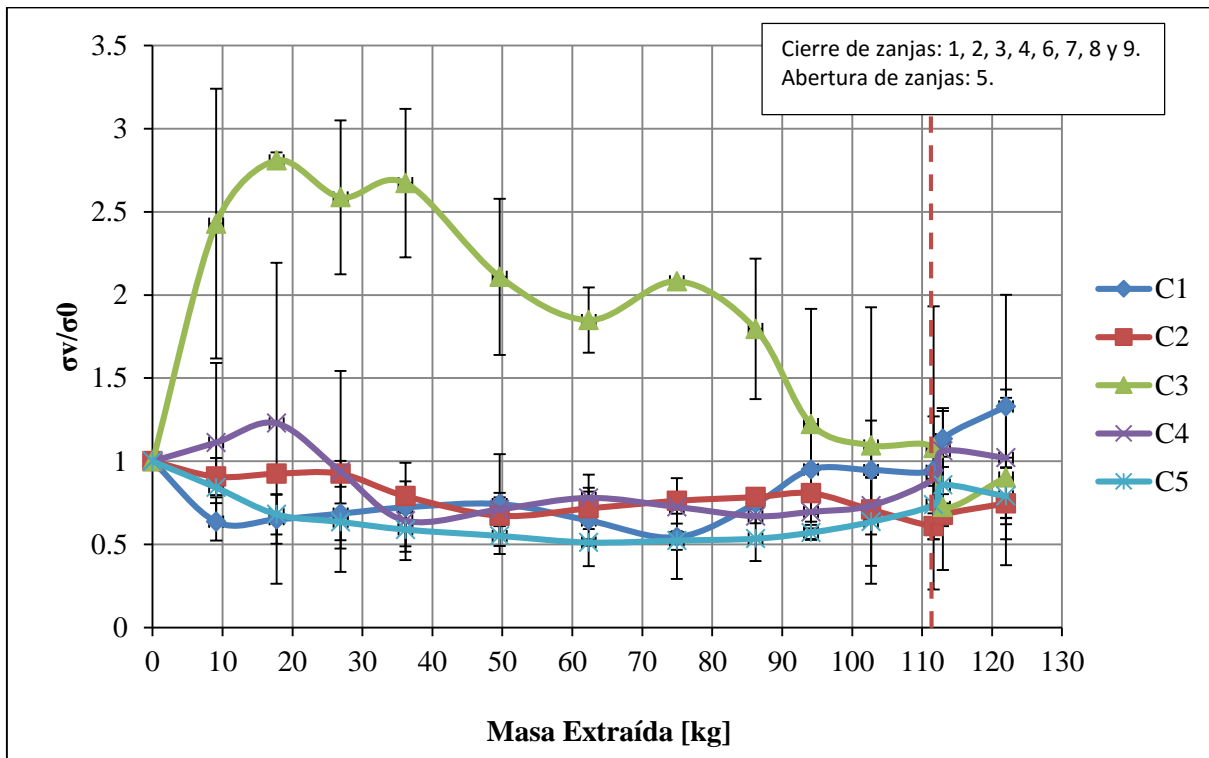


Figura 5-41: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada - Experimento 3.

En la Figura 5-42, se muestran los esfuerzos inducidos en función de la posición de las celdas de carga a lo largo del modelo físico. De este modo, se pueden ver más claramente los efectos de la extracción y no inclusión de puntos de extracción a la producción.

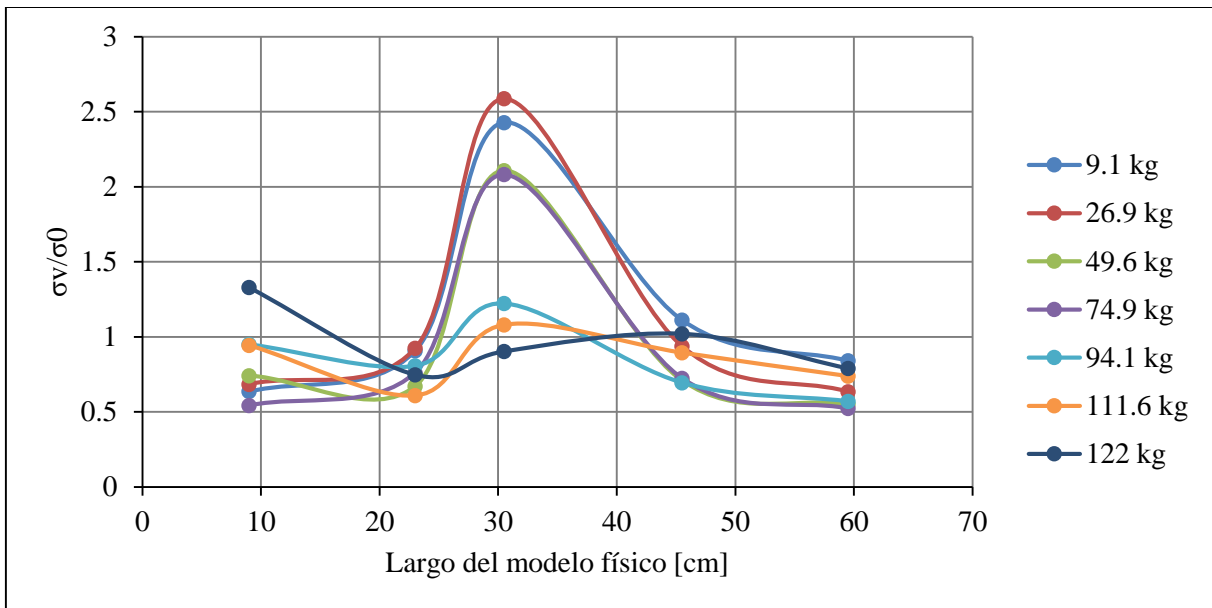


Figura 5-42: Esfuerzos verticales normalizados en función de la posición de las celdas de carga en el modelo físico – Experimento 3.

Con respecto a los esfuerzos inducidos, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- Las celdas de carga 1, 2, 4 y 5 fueron ubicadas bajo zonas de flujo y estas celdas registraron un descenso en los esfuerzos inducidos de hasta un 45 % de su valor inicial. Cuando la producción se detuvo en los puntos de extracción activos y se incorporó la zanja 5, los esfuerzos aumentaron en dichas celdas.
- La celda de carga 3, ubicada sobre la zanja 5 que no es incorporada a la producción sino hasta períodos finales de los experimentos, registró un aumento en el esfuerzo de hasta tres veces su esfuerzo inicial. Después de 20 kg de material extraído, las zonas de movimiento se traslapan sobre la zona de no movimiento en la que se encuentra la celda 3. A pesar de esto, el esfuerzo inducido es alto aunque decreciente. Al igual que en el experimento anterior, este descenso se atribuye a la pérdida de masa del modelo y al continuo crecimiento de las zonas de movimiento. Cuando la zanja 5 se incorporó a la producción, la celda 3 registró un descenso del esfuerzo de hasta un 55 % el esfuerzo inicial.

Finalmente, los resultados obtenidos en este experimento son similares a los expuestos para el experimento 2, en el caso de las celdas de carga ubicadas bajo zonas de movimiento. Sin embargo, en este experimento el esfuerzo inducido registrado en la zona de no movimiento fue bastante mayor debido a que el área de no extracción fue menor. Con esto se concluye que a medida que el área de no extracción es menor los esfuerzos inducidos en el pilar corona son mayores. Esto es válido en zonas estancadas rodeadas por zonas de movimiento que no hacen un efecto sombra sobre el material inactivo (Aros, 2008).

5.6. Experimento 4: Block Caving con tiraje no uniforme, sobreextracción

Una práctica común en minas explotadas por *block/panel caving*, para alcanzar las metas de producción propuestas en un período de tiempo (ya sea en un turno, una semana, etcétera), es sobreextraer mineral de puntos de extracción cercanos a piques de traspaso. Ya que así, el operador del equipo LHD puede acarrear más mineral por unidad de tiempo debido a que reduce la distancia de recorrido. En este experimento, y su réplica, se emuló dicha práctica para una estrategia de *block caving*, con el propósito de comprender el rol de un tiraje no uniforme, debido a la presencia de una sobreextracción de mineral en los esfuerzos inducidos en el pilar corona del nivel de producción. En la Figura 5-43, se puede ver un esquema de la estrategia de extracción que fue llevada a cabo en este experimento y sus principales parámetros.

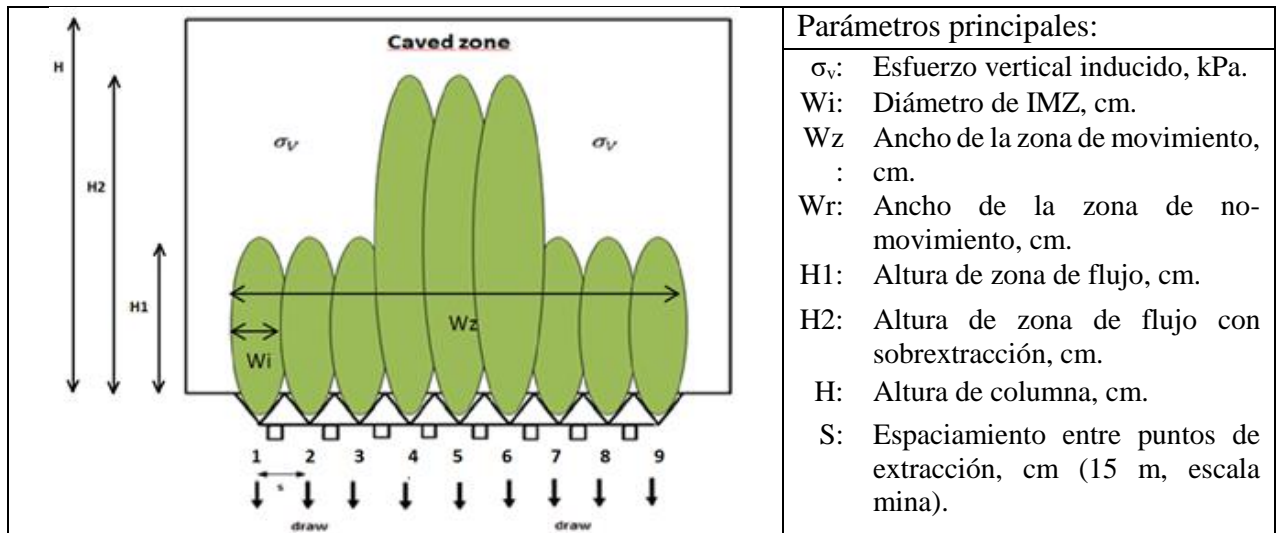


Figura 5-43: Esquema de estrategia de *block caving* con tiraje no uniforme. Experimento 4.

El tiraje no uniforme fue logrado mediante dos condiciones: la primera; en cada período se extrajo un 50% más de mineral desde los puntos de extracción pertenecientes a las zanjas 4, 5 y 6 que los de las zanjas restantes. La segunda, al finalizar el experimento los puntos sobreextraídos tuvieron un 20% más de masa extraída que los demás.

En la Figura 5-44, se pueden ver las ubicaciones de las celdas de carga y los puntos de extracción que fueron sobreextraídos, señalados con un número 2, y los puntos que fueron extraídos normalmente, identificados con un número 1.

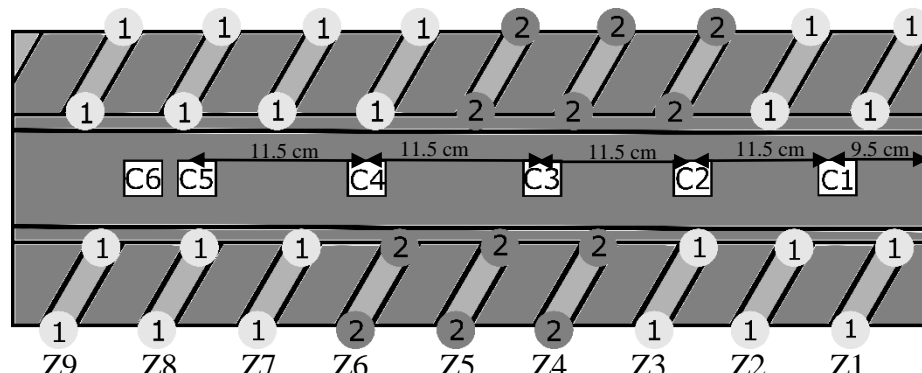


Figura 5-44: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4.

El modelo físico fue cargado con 500 kg de mineral y se alcanzó una altura de columna de 240 cm, medidos desde su base. En la siguiente tabla, se puede ver los esfuerzos iniciales antes de comenzar la extracción de masa.

Tabla 5-8: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 4.

Test 4	Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Celda 6 [kPa]	Media [kPa]	Desv. [kPa]
A	13.59	19.44	19.26	17.88	17.35	13.59	16.09	2.89
B	18.19	16.10	12.88	12.34	12.89	18.19		

5.6.1. Resultados

5.6.1.1. Extracción

La extracción fue llevada a cabo considerando un equipo LHD por calle de producción. Por lo tanto, sólo un punto de extracción puede ser explotado a la vez por cada calle. La extracción en un período fue empezada desde la zanja 1 hasta la zanja 9 secuencialmente. Es decir, una zanja fue abierta cuando el último punto de extracción de la zanja anterior completó su producción.

Para los cinco primeros períodos, la extracción fue realizada a un ritmo de producción menor para todos los puntos de extracción, aunque manteniendo la diferencia de un 50% entre puntos sobreextraídos y puntos normales. Después de estos períodos, se aceleró la producción al doble. Así, se pudo observar la implicancia de la sobreextracción para dos tasas de extracción. En la Figura 5-45, se muestra la masa extraída promedio por período para los puntos de extracción que fueron sobreextraídos y los que no.

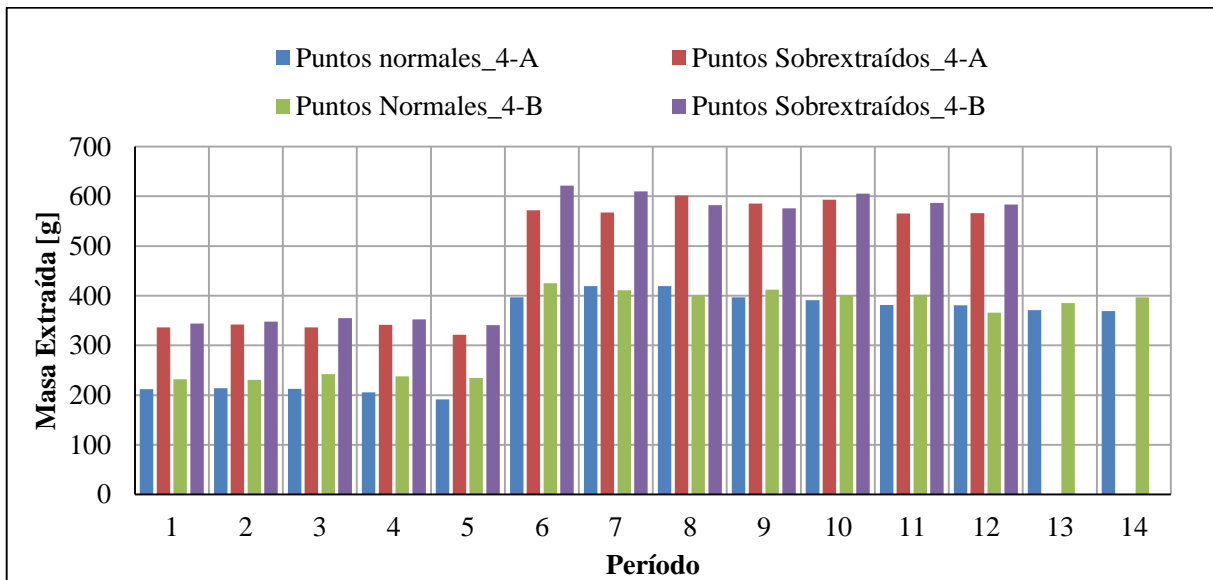


Figura 5-45: Masa extraída promedio por período para puntos normales y sobreextraídos. Experimento 4.

Tal como se impuso, al final del experimento se tuvo una diferencia del 20% de masa extraída entre los puntos con sobreextracción y los normales. Esto se puede ver en la Figura 5-46.

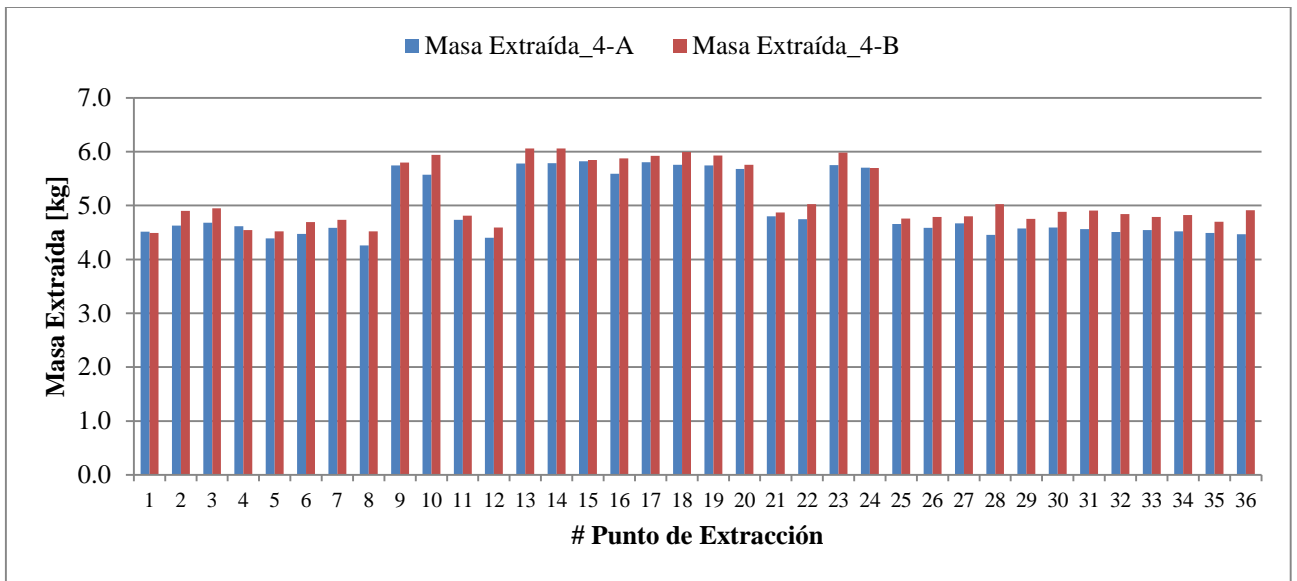


Figura 5-46: Masa extraída al final de los experimentos. Experimento 4.

En la Figura 5-47 y Figura 5-48, es posible observar el progreso de los experimentos. En la parte superior de cada fotografía, se indica la cantidad de masa extraída (acumulada) del modelo y el porcentaje de avance del experimento.

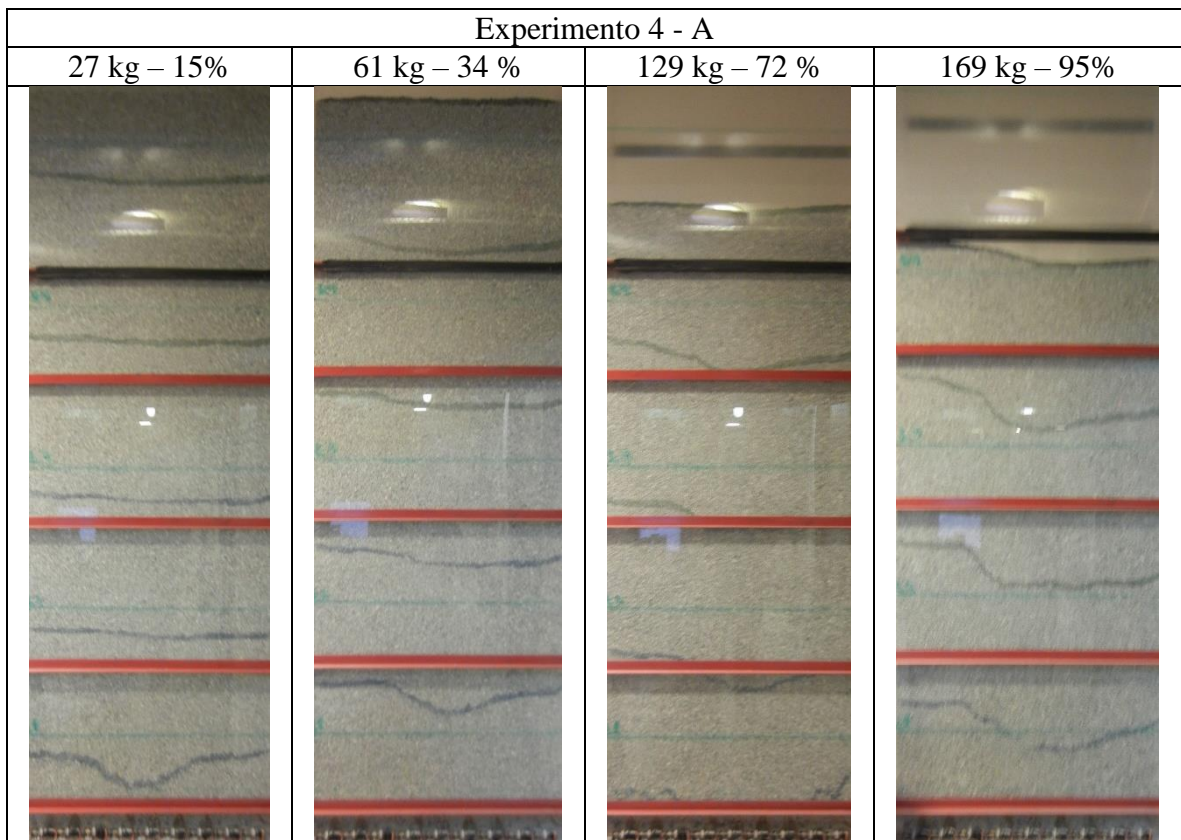


Figura 5-47: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 4-A.

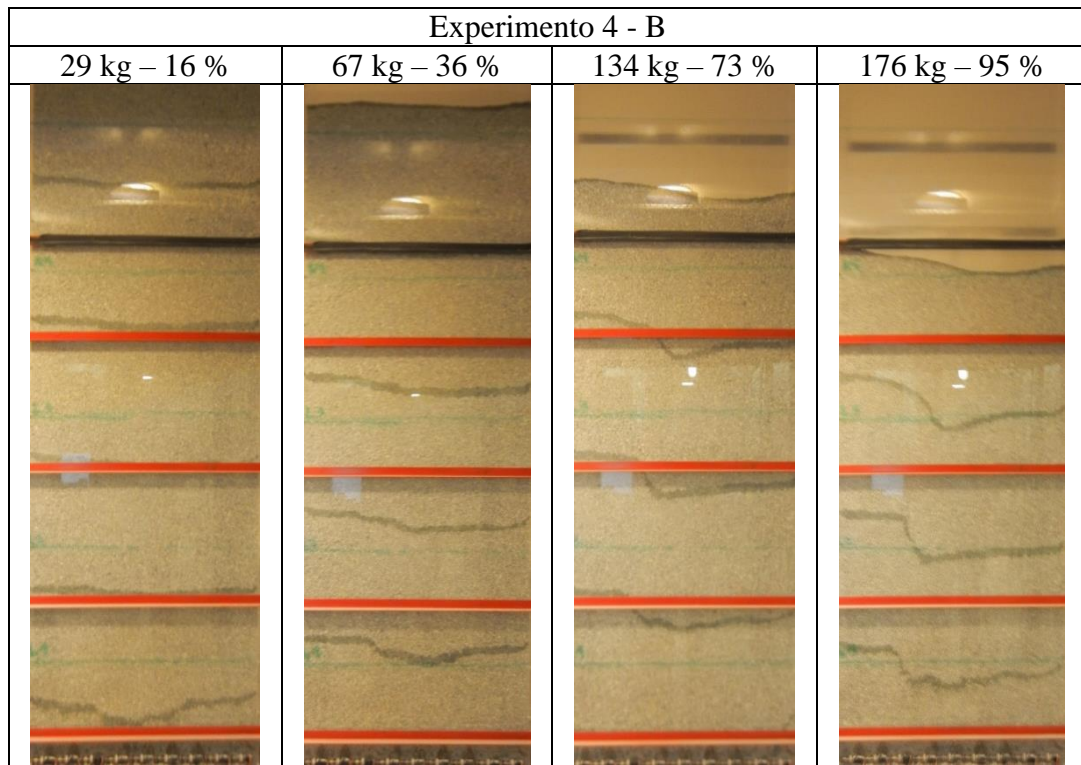


Figura 5-48: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 4-B.

En la Figura 5-47 y Figura 5-48, se puede ver que la zona de movimiento que está por sobre las tres zanjás centrales del modelo físico, desciende más rápido. Esto es causado por la sobreextracción de los puntos de extracción de las zanjás referidas. Este efecto, tal como se espera, puede verse en las zonas de extracción generadas por la incorporación de puntos en los cuales se extrae más rápidamente que el resto. En la Figura 5-49 pueden ser vistas las zonas de extracción de los experimentos A y B.

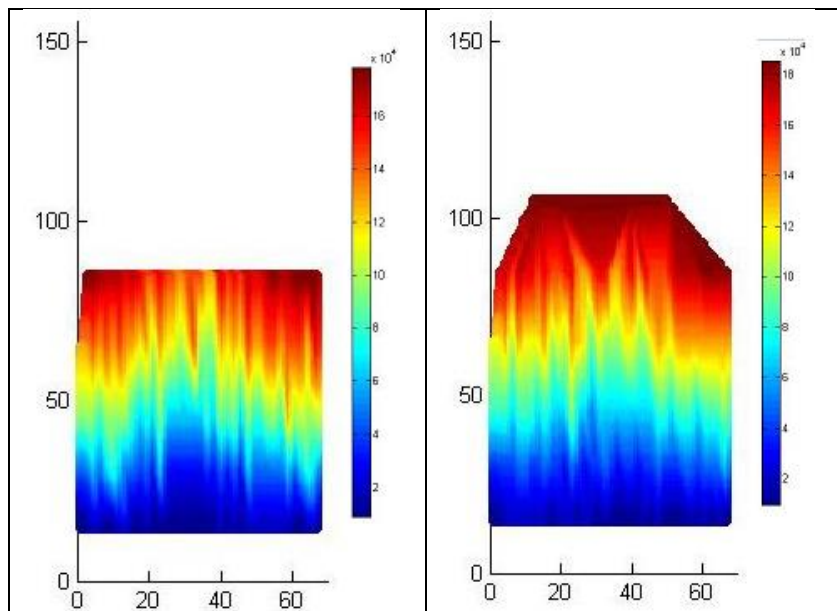


Figura 5-49: Zonas de extracción de experimentos A (izquierda) y B (derecha). Experimento 4.

En la figura anterior, se observa que los marcadores ubicados sobre las tres zanjas centrales del modelo descenden más rápidamente que los ubicados sobre las zanjas restantes. En particular, en el experimento A este efecto puede advertirse más fácilmente, ya que una menor cantidad de masa extraída se tuvo una mayor altura, tal como lo insinúan los colores celeste, verde y amarillo de la figura en la parte central. Sin embargo, este hecho queda poco claro en el experimento B exceptuando en el color amarillo que sí indica una mayor altura a una menor masa sobre las zanjas centrales.

5.6.1.2. Esfuerzos Inducidos

Debido a la extracción realizada, consistente en considerar sólo un equipo LHD por calle de producción, se observó un comportamiento cíclico en la distribución de los esfuerzos. Por ejemplo, cuando un punto de extracción de la zanja 1 está siendo extraído, los esfuerzos aumentan en el sector del pilar corona que intersecta a las zanjas más alejadas, mientras que en los sectores más cercanos existe un descenso en los esfuerzos inducidos. Las siguientes figuras ilustran este comportamiento. Cabe admitir que, sólo se tienen todas las mediciones de tres celdas carga por período por limitaciones técnicas del equipo de medición (*strainmeter*). Por lo tanto, para los períodos de número impar, se registraron las mediciones de las celdas de carga 1, 2 y 3, y para los períodos pares, se registraron las celdas 4, 5 y 6.

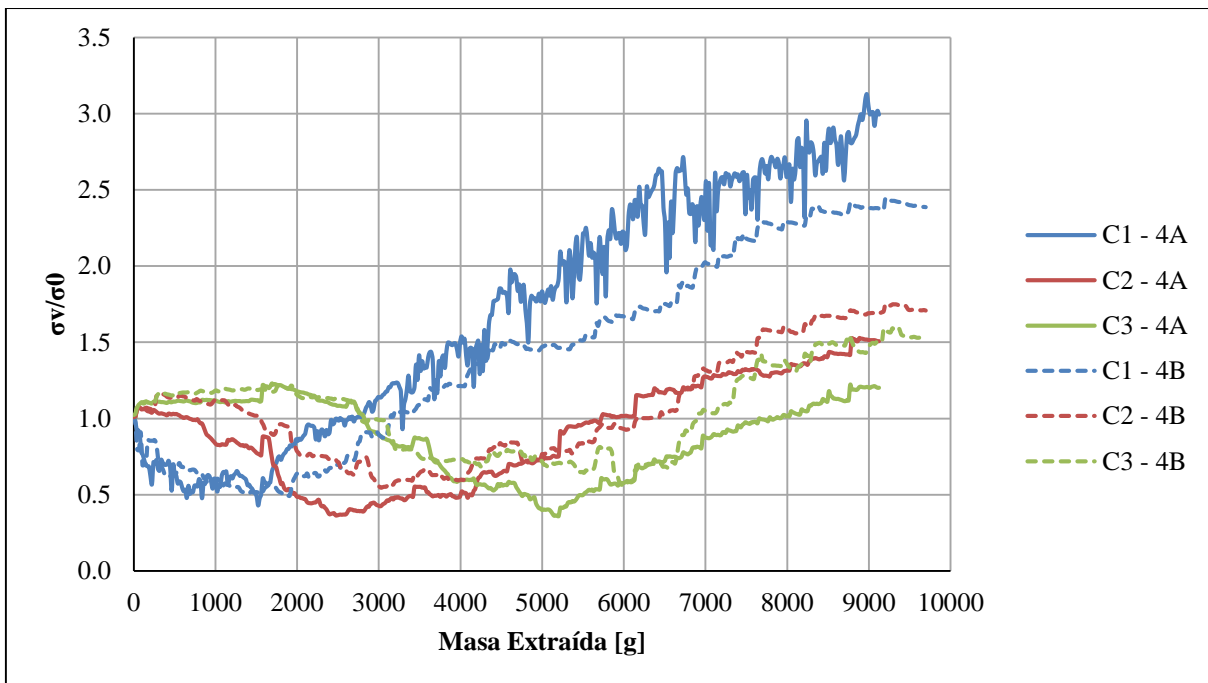


Figura 5-50: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 1, 2 y 3. Período 1. Experimentos 4-A y 4-B.

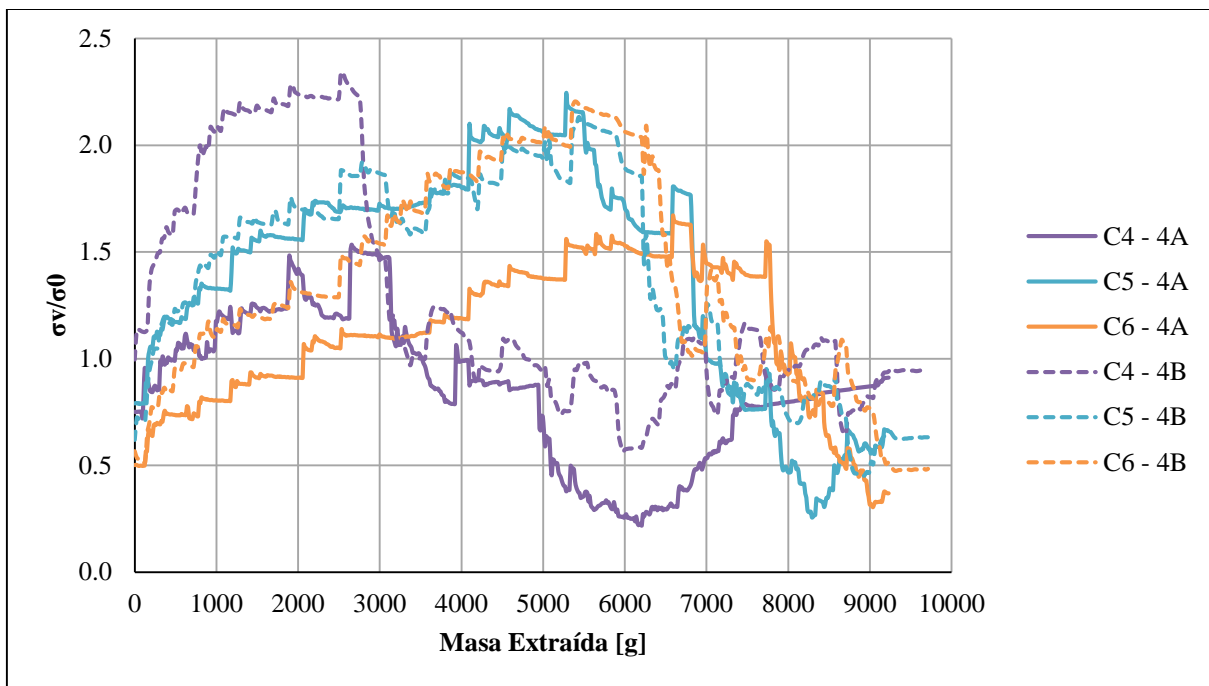


Figura 5-51: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada. Celdas 4, 5 y 6. Período 2. Experimentos 4-A y 4-B.

La Figura 5-50 y Figura 5-51 muestran los esfuerzos normalizados en función de la masa extraída total del período 1 y 2, respectivamente. Es decir, cuando todos los puntos de extracción ya fueron explotados en cada período. La forma de las curvas es similar entre las de las mismas celdas para cada experimento, y se aprecia que mientras algunas se descargan otras se cargan.

Gracias a que se sabe la cantidad masa extraída de cada punto por período (expuesto en la Figura 5-45), es posible identificar qué punto estaba siendo extraído en el eje horizontal de las Figura 5-50 y Figura 5-51. Si con esta información, se observa los valores de los esfuerzos inducidos, se verifica si la extracción del punto de extracción provoca la carga o descarga de las celdas. Por ejemplo, para saber cuáles son los esfuerzos verticales inducidos producto de la extracción de un n ésimo punto, bastaría considerar el rango $[\sum_{i=1}^{n-1} m_i, \sum_{i=1}^n m_i]$, donde m_i es la masa extraída en el i ésimo punto, en el eje horizontal de la Figura 5-50 y Figura 5-51 y luego observar los esfuerzos verticales para dicho rango. A partir de este procedimiento es posible observar los efectos que produce la extracción de cada uno de los puntos en los esfuerzos inducidos, dentro de un período.

Otro aspecto a destacar es que antes de finalizar un período se extrajo la zanja 9 y esto ocasiona la descarga de las celdas 5 y 6. Por lo tanto, al comenzar el siguiente período se espera que las celdas 5 y 6 comiencen a cargarse debido a la apertura de la zanja 1. En otras palabras, se observó que para períodos seguidos, los valores de esfuerzos (normalizados) finales cada celda son parecidos a los iniciales de las mismas en el período siguiente.

Para facilitar la lectura, se presentan tres esquemas en la Figura 5-52, en los cuales se ilustra la extracción de mineral desde puntos pertenecientes a tres zanjas distintas dentro de un mismo período. La zanja 5 genera una zona de movimiento más grande ya que es sobreextraída un 50 % en comparación a la zanja 1 y zanja 9. La masa extraída corresponde a la suma del material obtenido desde los puntos de extracción que pertenecen a la zanja. La masa acumulada muestra la cantidad de masa que se ha extraído del modelo al terminar la extracción de mineral desde todos los puntos

de la zanja indicada. Las flechas de color verde indican un descenso en el esfuerzo registrado por las celdas de carga y las flechas rojas muestran un aumento.

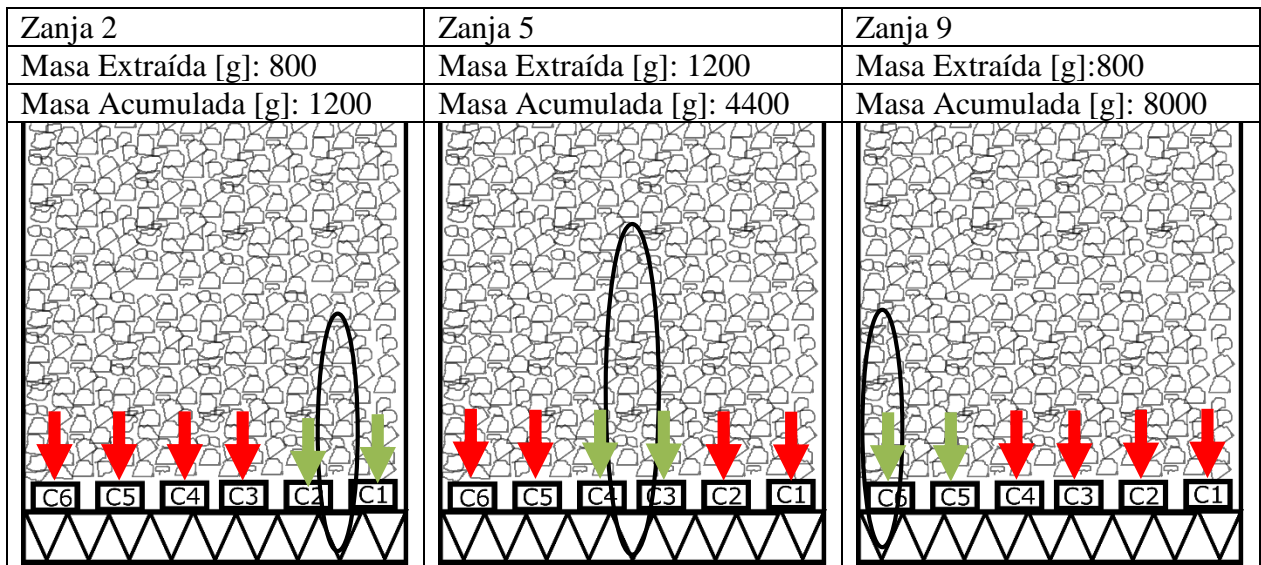


Figura 5-52: Esquema de los efectos que produce en las celdas de carga la extracción de mineral desde un punto de extracción de distintas zanjas. Las flechas rojas indican un aumento en el esfuerzo vertical inducido y las de color verde, un descenso.

Al estudiar cada período y cada celda, es posible darse cuenta que existen valores máximos y mínimos dependiendo de qué zanja está siendo extraída. En general, se observa que mientras más cerca se encuentre la celda de carga a la zanja que está siendo explotada, menores son los esfuerzos registrados. Mientras que las celdas más alejadas exhiben los mayores esfuerzos. Los valores máximos y mínimos alcanzados por las celdas de carga son mostrados en la Figura 5-53 y Figura 5-54. La línea punteada vertical de color rojo indica el cierre de las zanjas 4, 5 y 6. Los gráficos con las desviaciones estándar de cada celda de carga, se muestran en la sección ANEXO F.

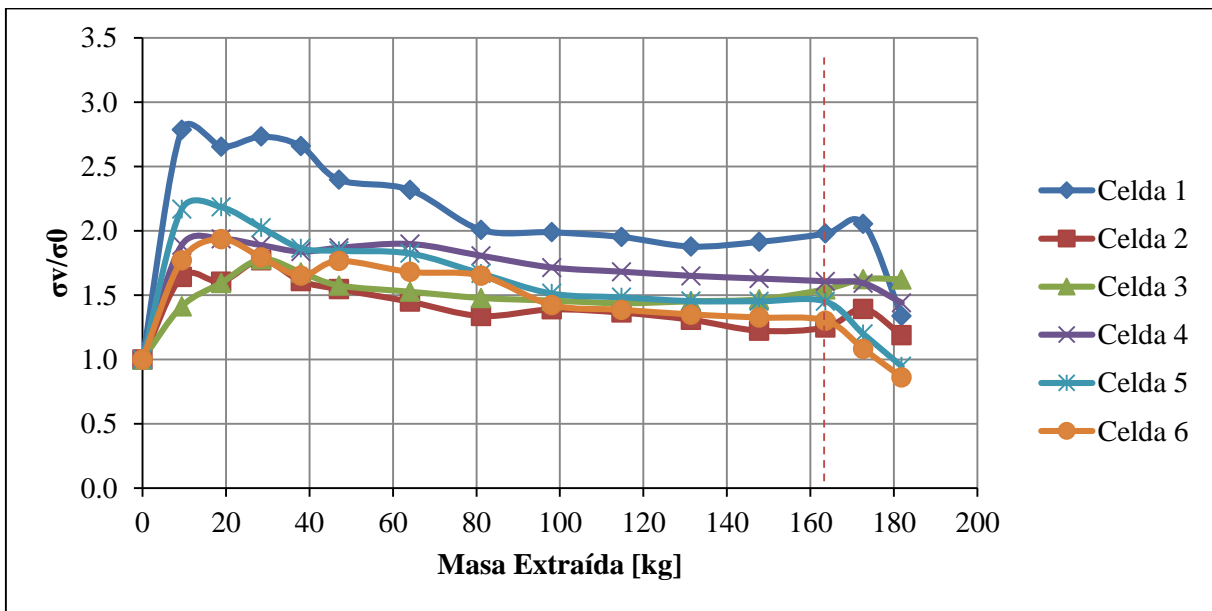


Figura 5-53: Máximos esfuerzos normalizados (promedio entre experimentos 4-A y 4-b) para cada celda de carga. Experimento 4.

Al igual que en experimentos anteriores, a medida que progresa la extracción, los esfuerzos máximos alcanzados son decrecientes. Esto se atribuye a la pérdida de masa en el modelo físico.

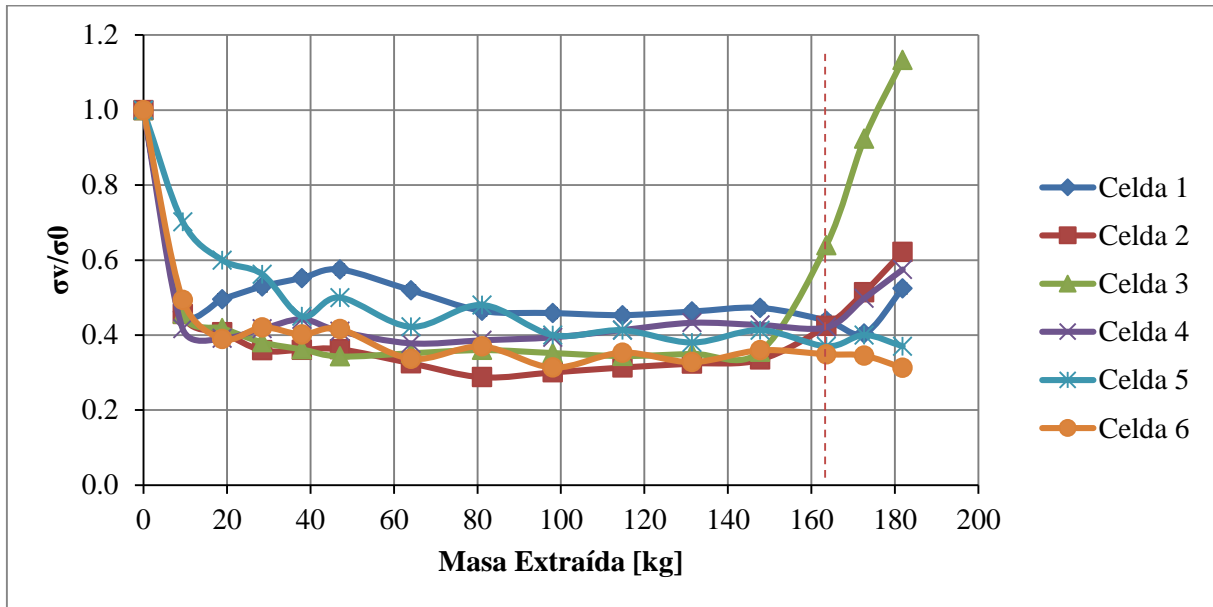


Figura 5-54: Mínimos esfuerzos normalizados (promedio entre experimentos 4-A y 4-b) para cada celda de carga. Experimento 4.

En la figura anterior, se aprecia que los esfuerzos mínimos llegan a valores entre un 50 % y 60 %, aproximadamente, más bajos que los valores iniciales antes de comenzar el experimento y se mantienen dentro de ese orden de magnitud a pesar de la descarga del modelo y el constante crecimiento de las zonas de movimiento. La celda 3 muestra un ascenso considerable en los últimos dos períodos, esto es debido al cierre los puntos de extracción de las zanjas 4, 5 y 6. Las celdas 2 y 4, muestran un leve aumento en los esfuerzos para los mismos períodos, sin embargo no es tan alto ya que dichas celdas se encuentran en zonas de intermedias entre movimiento y no flujo.

En la Tabla 5-9, se puede ver la masa acumulada por período (promedio entre ambos experimentos), así es posible relacionar cada esfuerzo máximo y mínimo a cada período, a partir de las Figura 5-53 y Figura 5-54:

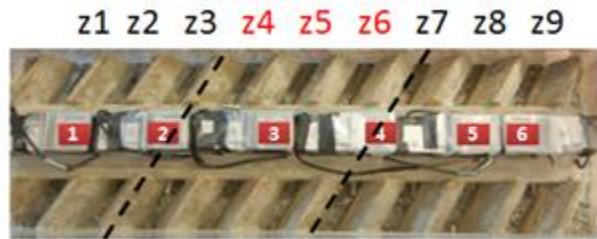
Tabla 5-9: Masa acumulada por período. Experimento 4.

Período	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Masa Extraída Acumulada [kg]	0	9.4	18.9	28.5	38.0	47.1	64.1	81.1	98.0	114.7	131.4	147.7	163.6	172.6	181.8

Con los resultados expuestos, aún no es posible responder cuál es el efecto de la sobreextracción de puntos en los esfuerzos inducidos que sufre el pilar corona. Sin embargo, esta pregunta se resolvió mediante el siguiente análisis:

- Se observó que dentro de un período, la extracción desde un punto aumenta o disminuye la cantidad de esfuerzos en el pilar corona en función de la distancia a la cual se está extrayendo. Por lo tanto, la extracción provoca que cada celda registre un valor máximo y un valor mínimo dependiendo de qué punto está siendo extraído.

- Gracias a lo anterior y a gráficos análogos a los de las Figura 5-50 y Figura 5-51 pero construidos para todos los períodos, en la base del modelo físico se pueden identificar tres zonas:



Zona 1 es representada por Celda 1
Zona 2 es representada por Celda 3
Zona 3 es representada por Celda 6

Zona 1 Zona 2 Zona 3

Figura 5-55: Zonas definidas para la base del modelo físico. Experimento 4.

- Cuando un punto de extracción perteneciente a una zona del modelo está siendo explotado, se asume que las otras dos zonas restantes están bajo una zona inactiva. Por lo tanto, los esfuerzos inducidos serán altos (o al menos sobre el esfuerzo inicial) en las zonas donde no hay extracción y serán bajos dentro de la zona que está siendo extraída. Para cada zona se eligió una celda de carga que representa el comportamiento del área del pilar que se encuentra dentro de las mismas zonas. Se eligió la celda más alejada a la zona contigua.
- En la Figura 5-56, se muestra qué ocurrió con los esfuerzos inducidos en las zonas 1 y 3 mientras la zona 2 estuvo en producción. Por el contrario, en la Figura 5-57 se exhiben los esfuerzos verticales inducidos en función de la masa extraída del modelo cuando la zona 1 o la zona 3 está en producción y la zona 2 está inactiva.

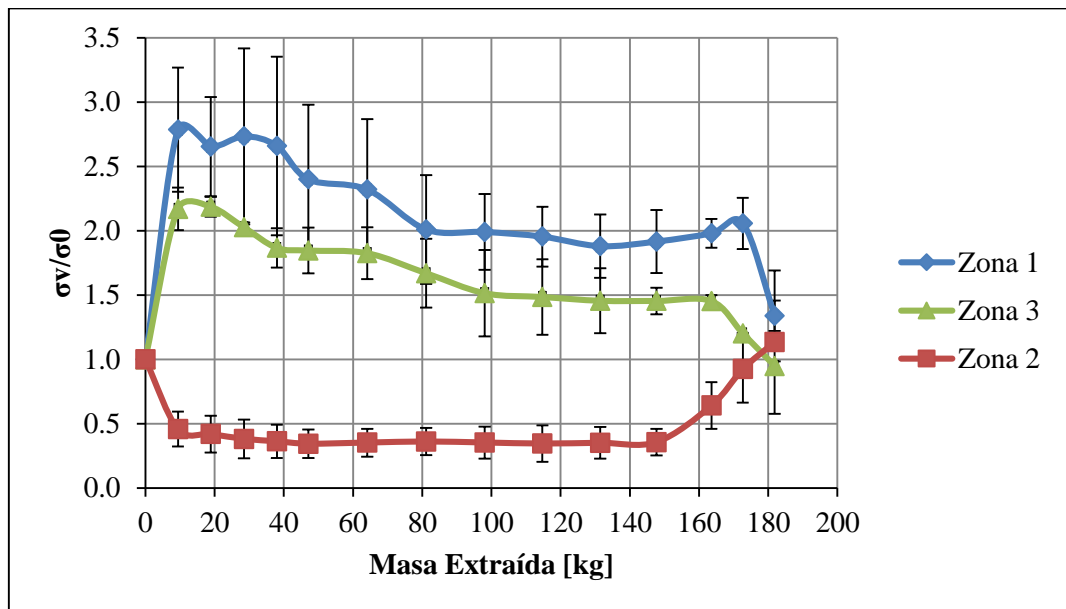


Figura 5-56: Esfuerzos inducidos normalizados. Zona 2 bajo extracción. Experimento 4.

- En la figura anterior, se muestra que los máximos valores alcanzados en la zona 1 son mayores que los valores obtenidos en la zona 3. Esto puede ser explicado debido a que la zona 1, que está compuesta por las z1, z2 y z3, tiene una menor cantidad de puntos de extracción. Por lo tanto, la zona 1 tiene una menor área. Por otro lado, la zona 3 tiene un

área mayor y, entonces, los máximos alcanzados son menores que los obtenidos en la zona 1.

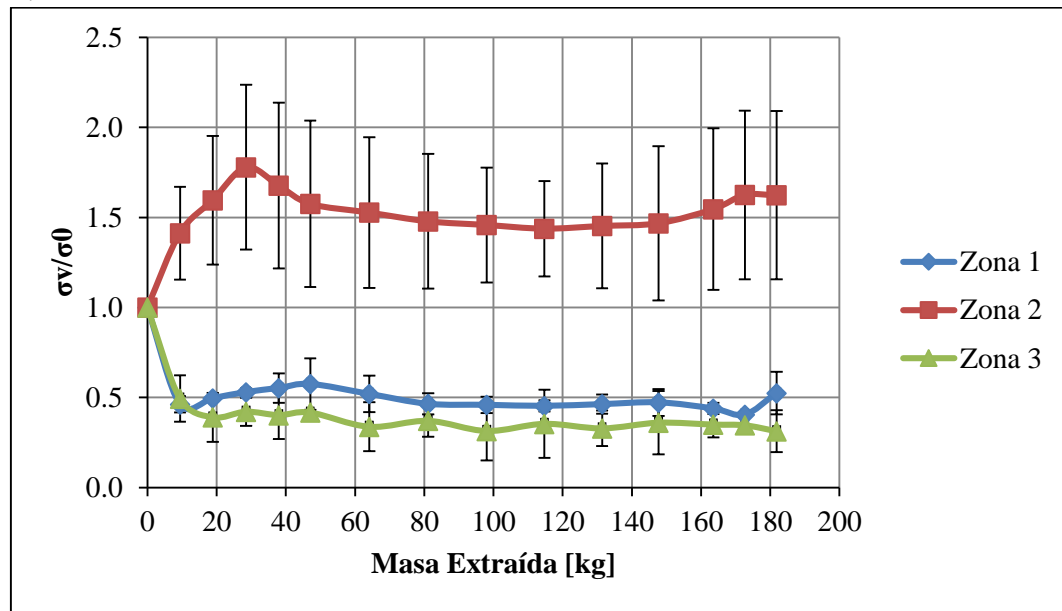


Figura 5-57: Esfuerzos inducidos normalizados. Zona 1 y Zona 3 bajo extracción. Experimento 4.

- La Figura 5-57 muestra los máximos valores alcanzados en la zona 2 cuando la zona 1 o la zona 3 está siendo extraída. En este caso, los esfuerzos máximos alcanzados son menores que los obtenidos en las zonas 1 y 3. Este comportamiento es atribuido a que la zona 2 es explotada a un ritmo 50 % más rápido que las zonas adyacentes. El efecto de la sobreextracción, sólo fue percibido para los esfuerzos máximos ya que en los mínimos no pudo verse una influencia.
- Los esfuerzos máximos de las zonas 1, 2 y 3 debieron ser decrecientes a medida que progresó la extracción de mineral del modelo físico, esto atribuido a la pérdida de masa. Sin embargo, esto sólo se aprecia claramente para las zonas 1 y 3. En cambio, en la zona 2 el esfuerzo se mantiene en torno a $1.5\sigma_0$, hasta los 163 kg en que se cierran las zanjas que componen dicha zona, pero con una desviación estándar bastante mayor que los esfuerzos máximos en las zonas 1 y 3. Esta alta desviación no permite dilucidar claramente si hay un descenso en los máximos conforme progresa la extracción.

Estos experimentos demuestran que los esfuerzos se van redistribuyendo de zonas donde hay a extracción a zonas que están momentáneamente inactivas. Es decir, zonas que están en movimiento pueden concentrar esfuerzos si se deja de extraer mineral desde ellas.

Finalmente, la sobreextracción provoca diferencias en los esfuerzos inducidos sobre el pilar corona. Si una zona de no extracción temporal es adyacente a una zona de sobreextracción, puede alcanzar valores tan altos como más del doble del esfuerzo inicial. Por el contrario, cuando la zona de sobreextracción se encuentra en una zona temporal de no extracción, el esfuerzo inducido puede llegar a 1.8 veces el esfuerzo inicial.

5.7. Experimento 5: *Block Caving*, influencia de la masa extraída

El objetivo de este experimento fue cuantificar los esfuerzos verticales inducidos sobre el pilar corona del nivel de producción para diferentes cantidades de masas extraídas por puntos de extracción. Con tal propósito, este experimento fue dividido en dos etapas. La primera consistió en los cuatro períodos iniciales, para los cuales todos los puntos de extracción fueron explotados uniformemente y a una cantidad de 30 g de mineral extraídos por cada punto. Al comenzar el quinto período se inició la segunda etapa, en la cual sólo los puntos de extracción pertenecientes a las tres zanjas centrales del modelo (z4, z5 y z6) fueron explotados. Adicionalmente, transcurridos seis períodos de extracción se incrementó la cantidad de masa extraída por punto, desde 30 g a 60 g en el período 10 y desde 60 g a 100 g, en el período 16. En el período 22, el experimento de dio por concluido. Esta segunda etapa fue realizada con la intención de medir esfuerzos inducidos en zonas de no movimiento creadas por la no extracción de los puntos de las zanjas 1, 2, 3, 7, 8 y 9. Al igual que en experimentos anteriores, se realizó una réplica de éste. En la Figura 5-58 y Figura 5-59, se muestran las etapas recién descritas.

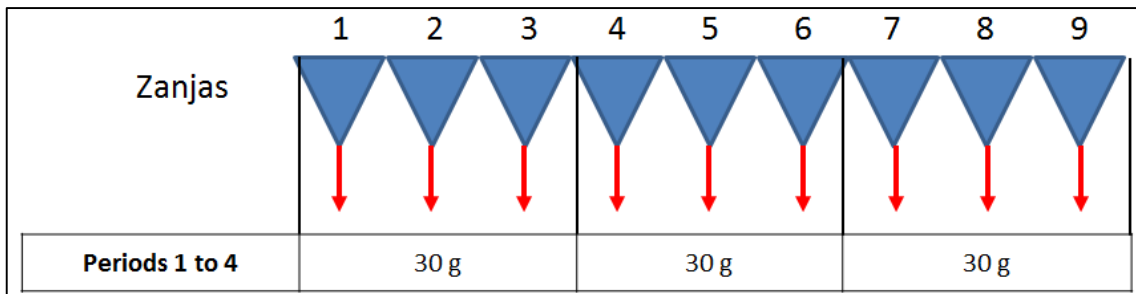


Figura 5-58: Esquema de la primera etapa. Experimento 5.

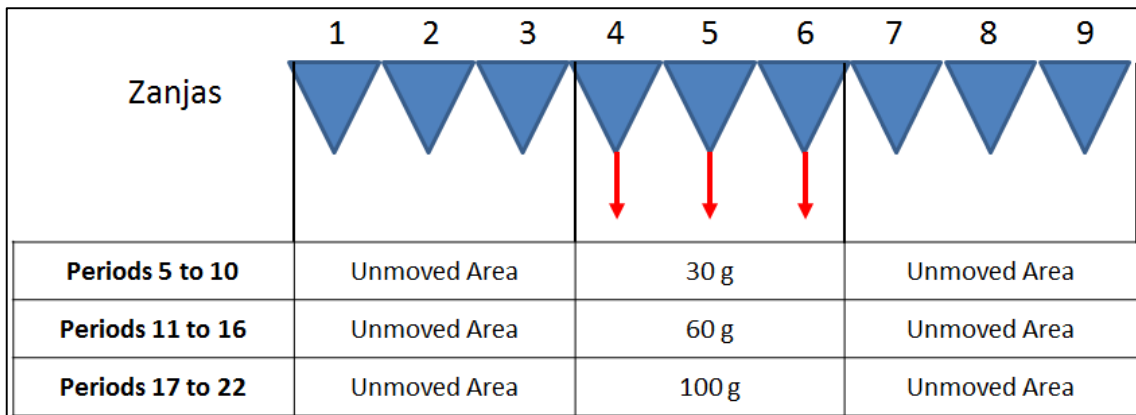


Figura 5-59: Esquema de la primera etapa. Experimento 5.

En la Figura 5-60, se pueden ver las ubicaciones de las celdas de carga. Los puntos de extracción que fueron explotados en la segunda etapa son señalados con un número 2, y los puntos que fueron cerrados permanentemente, identificados con un número 1.

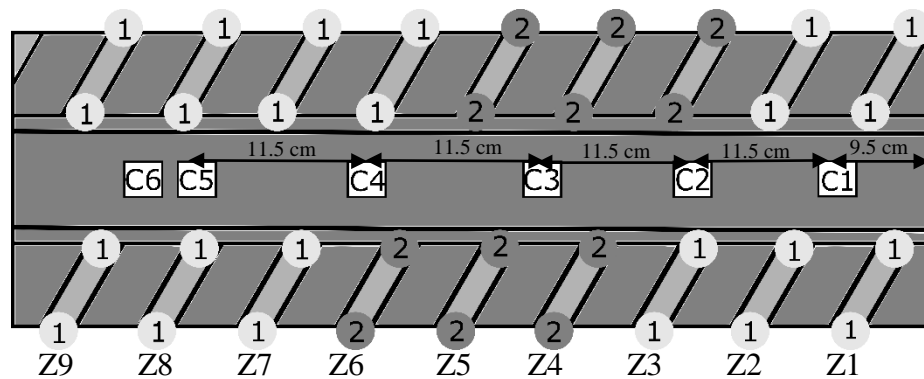


Figura 5-60: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 5.

Los esfuerzos verticales medidos con las celdas de carga, una vez que el modelo ha sido cargado en su totalidad y previamente a iniciar la primera etapa del experimento, se pueden ver en la Tabla 5-10:

Tabla 5-10: Esfuerzos verticales iniciales – Experimento 4.

Test 5	Celda 1 [kPa]	Celda 2 [kPa]	Celda 3 [kPa]	Celda 4 [kPa]	Celda 5 [kPa]	Celda 6 [kPa]	Media [kPa]	Desv. [kPa]
A	17.65	16.29	15.17	14.18	20.23	15.05	17.00	1.96
B	18.49	17.41	19.11	18.03	19.45	15.42		

5.7.1. Resultados

5.7.1.1. Extracción

Al igual que en el Experimento 4, la extracción fue llevada a cabo considerando un equipo LHD por calle de producción. Por lo tanto, sólo un punto de extracción puede ser explotado a la vez por cada calle. La extracción en un período fue empezada desde la zanja 1 hasta la zanja 9 secuencialmente. Es decir, una zanja fue abierta cuando el último punto de extracción de la zanja anterior completó su producción. Esta extracción fue mantenida en los primeros cuatro períodos (primera etapa). A partir del quinto período, la forma de extracción no cambia, sino que se reduce la cantidad de puntos explotados. En Figura 5-61, se puede ver la masa promedio extraída por punto.

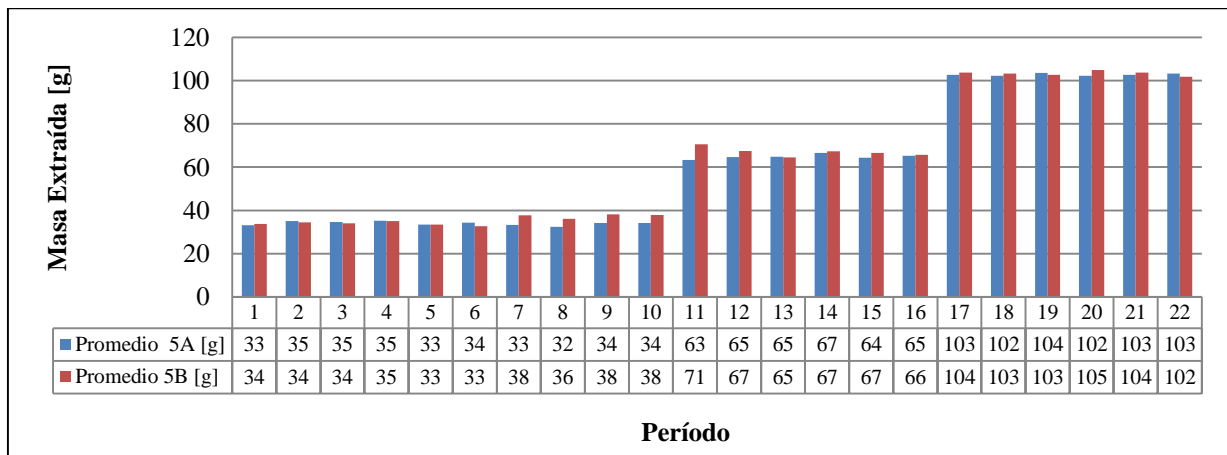


Figura 5-61: Masa extraída promedio para cada punto de extracción en cada período. Experimento 5.

En la Tabla 5-11, se puede apreciar la masa extraída desde el modelo en cada período, es decir, la suma de la masa sacada del modelo a partir de todos los puntos activos en el período, para cada experimento. Además, se muestra la masa acumulada extraída del modelo conforme progresan los períodos.

Tabla 5-11: Masa extraída y acumulada [g] en cada período. Experimento 5.

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Masa Extr. 5A	1194	1260	1245	1265	400.6	410.8	398.4	388	410	409.6	760.8
Masa Extr. 5B	1212	1240	1223	1263	401.9	392.5	452.1	433.1	458.2	454.5	847
Masa Ac. 5A	1194	2454	3699	4964	5364	5775	6173	6561	6971	7381	8142
Masa Ac. 5B	1212	2452	3675	4937	5339	5732	6184	6617	7075	7530	8377
Período	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Masa Extr. 5A	775.4	778.4	798.4	773	783.4	1233	1227	1244	1227	1233	1239
Masa Extr. 5B	809.6	774.2	807.3	799.8	789.2	1245	1240	1233	1260	1245	1222
Masa Ac. 5A	8917	9696	10494	11267	12050	13284	14511	15754	16982	18214	19453
Masa Ac. 5B	9186	9960	10768	11568	12357	13601	14842	16074	17334	18579	19801

En la Figura 5-62 y Figura 5-63, es posible observar el progreso de los experimentos. En la parte superior de cada fotografía, se indica la cantidad de masa extraída (acumulada) del modelo y el porcentaje de avance del experimento.

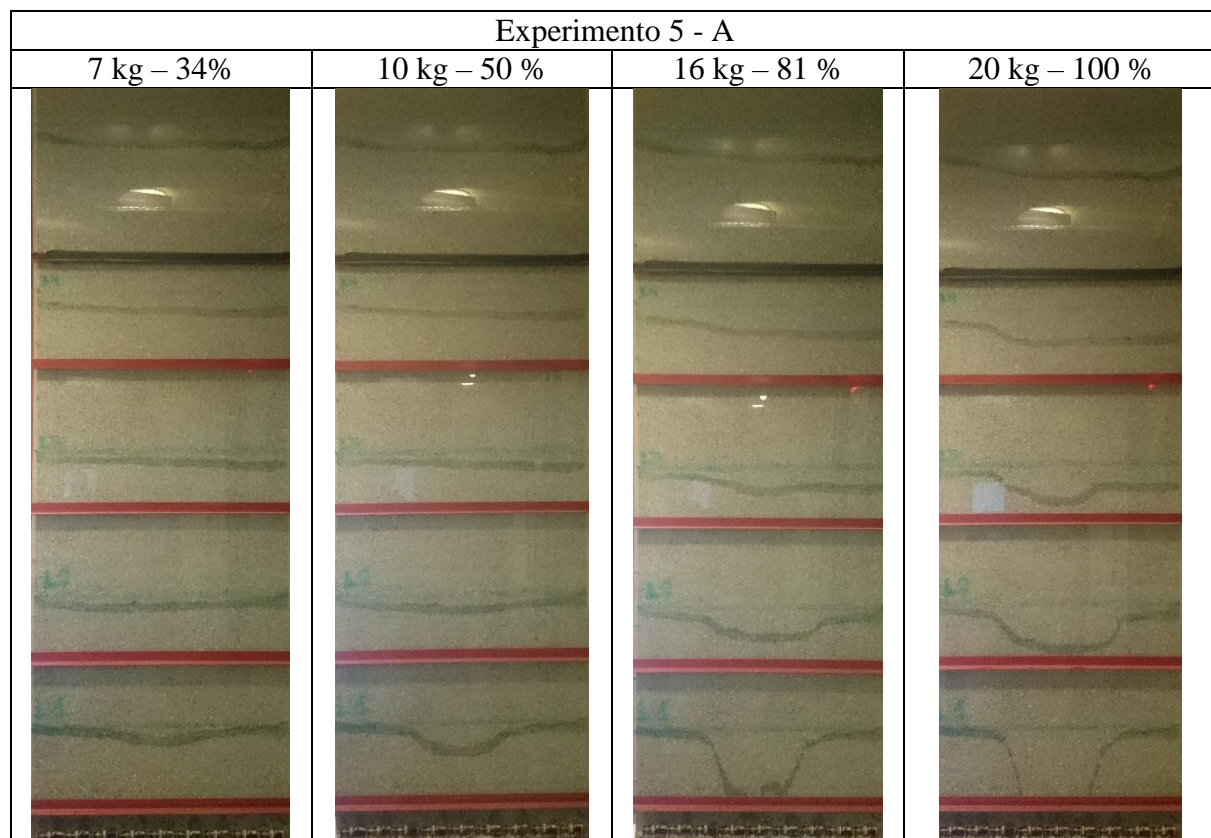


Figura 5-62: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 5-A.

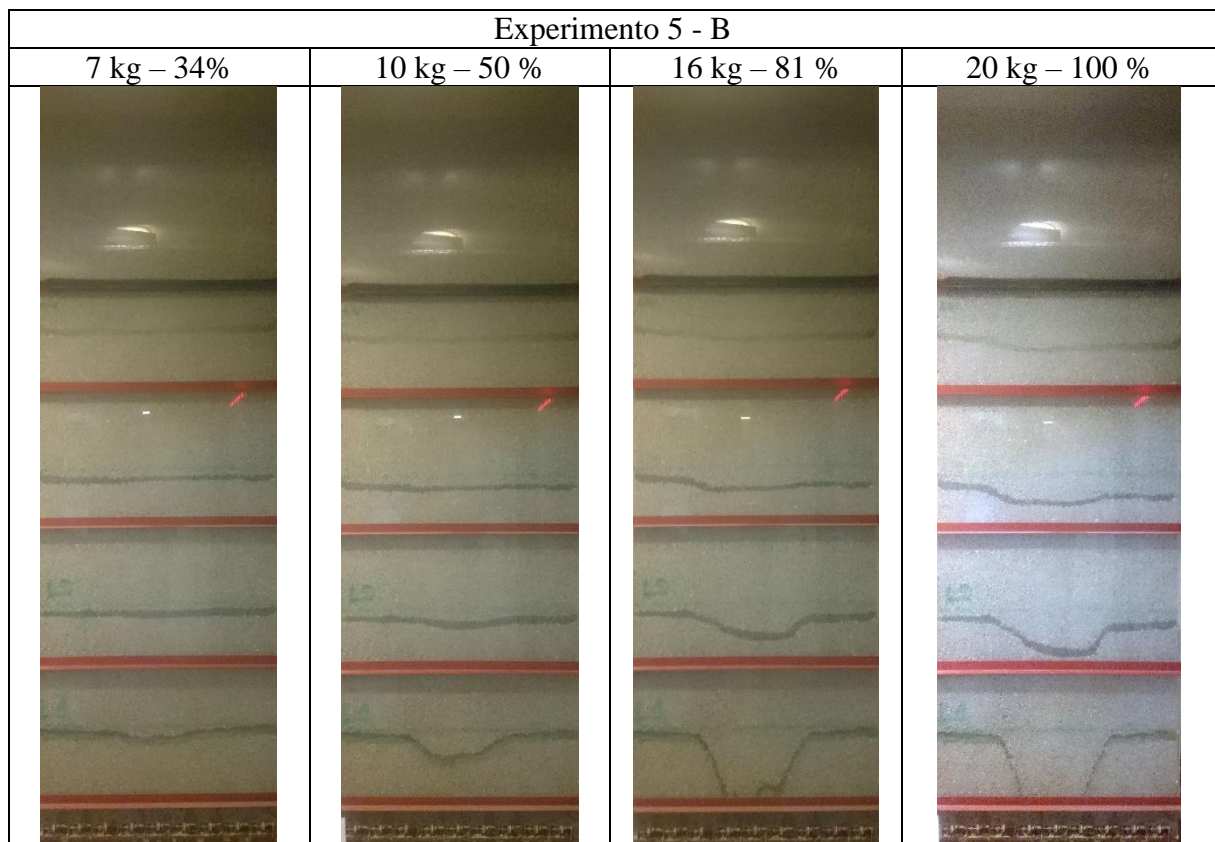


Figura 5-63: Evolución de las zonas de movimiento a medida que progresa la extracción. Experimento 5-B.

En las figuras recientemente expuestas, se puede ver que la primera etapa de cada experimento ocasionó un descenso parejo de las líneas de flujo. Sin embargo, una vez comenzada la etapa dos, comienzan a distinguirse las zona de movimiento (sobre las tres zanjas centrales) de las de no flujo (sobre zanjas 1, 2, 3, 7, 8 y 9).

5.7.1.2. Esfuerzos Inducidos

En la Figura 5-64 y Figura 5-65, se muestran los esfuerzos inducidos normalizados por el esfuerzo inicial en función de la masa extraída para los períodos 1 y 4, respectivamente. En ambos períodos, se aprecia que los esfuerzos se redistribuyen en función de la extracción secuencial que es llevada a cabo. Cuando los resultados para ambos períodos son comparados, se observa que en el período 4, para las celdas 1, 2 y 3 se tuvo un alto esfuerzo al comenzar dicho período. Esto es ocasionado por la extracción de las zanjas 7, 8 y 9 en el período anterior.

Otro aspecto a destacar es que los esfuerzos inducidos (mínimos) en las celdas de carga descienden hasta un $0.8 \sigma_0$ dentro de un período. Esto es un valor bastante mayor al obtenido en los experimentos anteriores (alrededor de $0.4 \sigma_0$) donde se extrajo una mayor cantidad de masa por punto. Por otro lado, los esfuerzos máximos pueden llegar a ser tan altos como los obtenidos en experimentos anteriores.

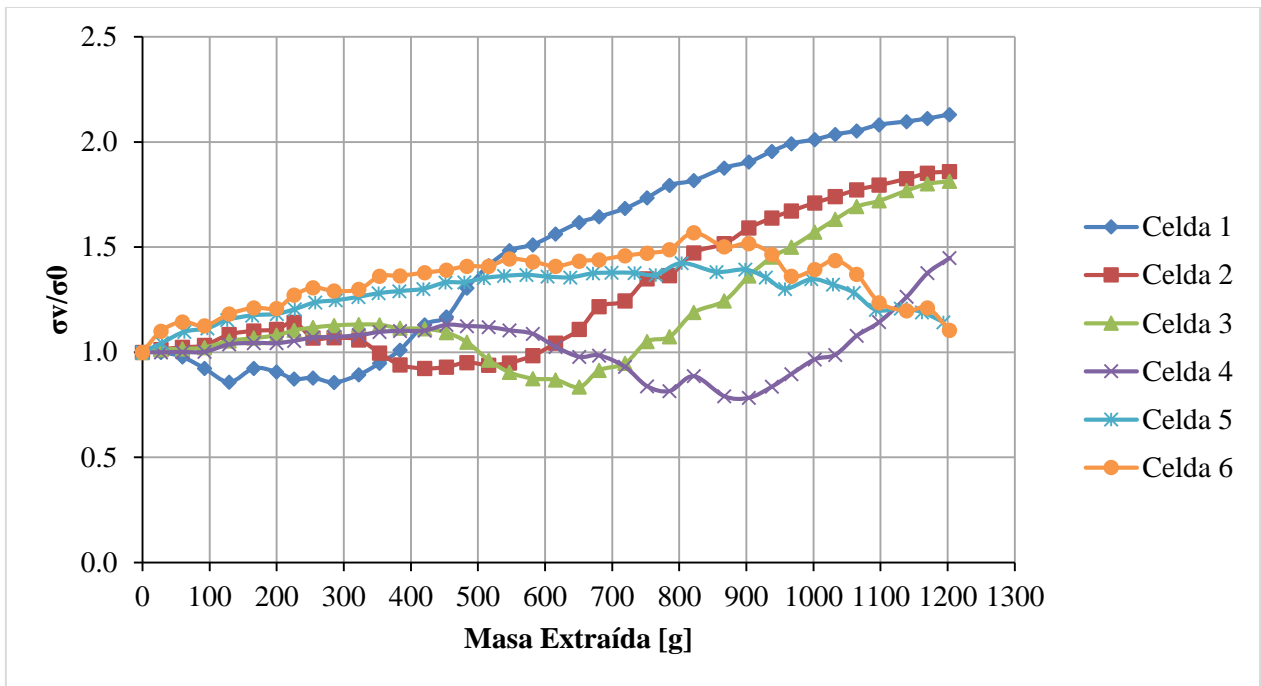


Figura 5-64: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 1. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.

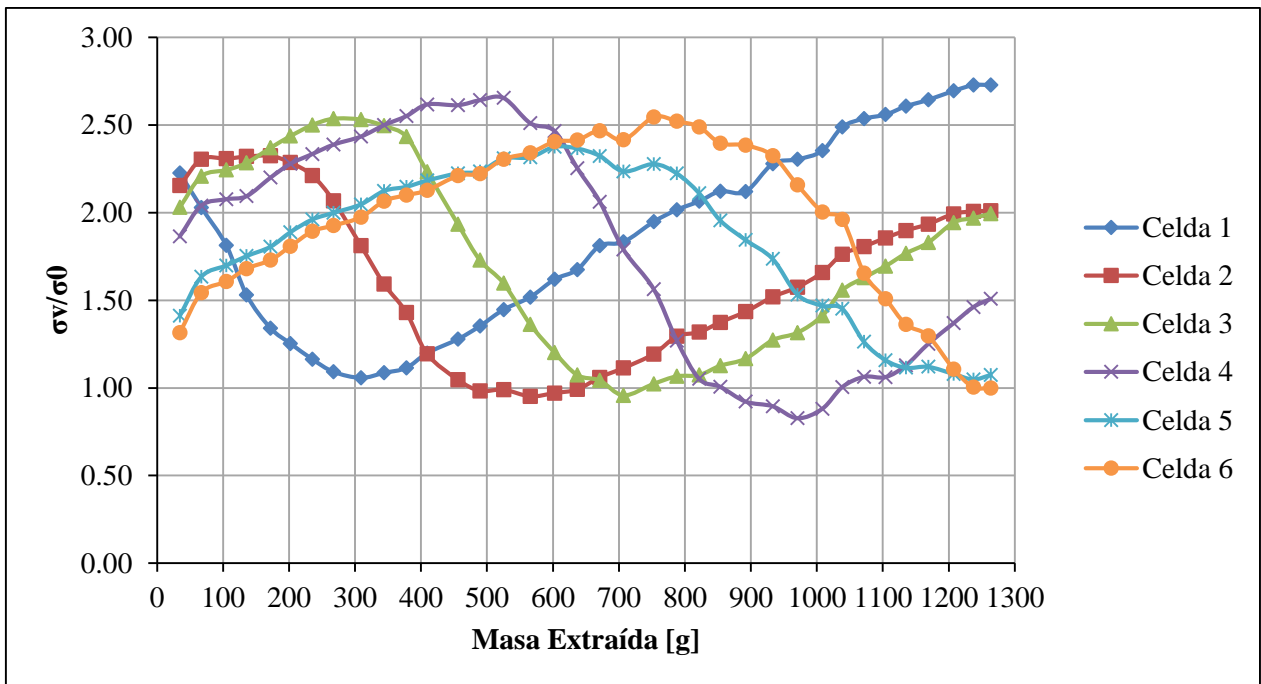


Figura 5-65: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 4. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.

Las Figura 5-66 y Figura 5-67 muestran los valores máximos y mínimos observados en cada período. Los resultados indicaron que los esfuerzos inducidos en las zonas de no extracción son altos independientemente de la cantidad de masa extraída en la zona de extracción (z4, z5 y z6 a partir de los 5 kg de masa extraída).

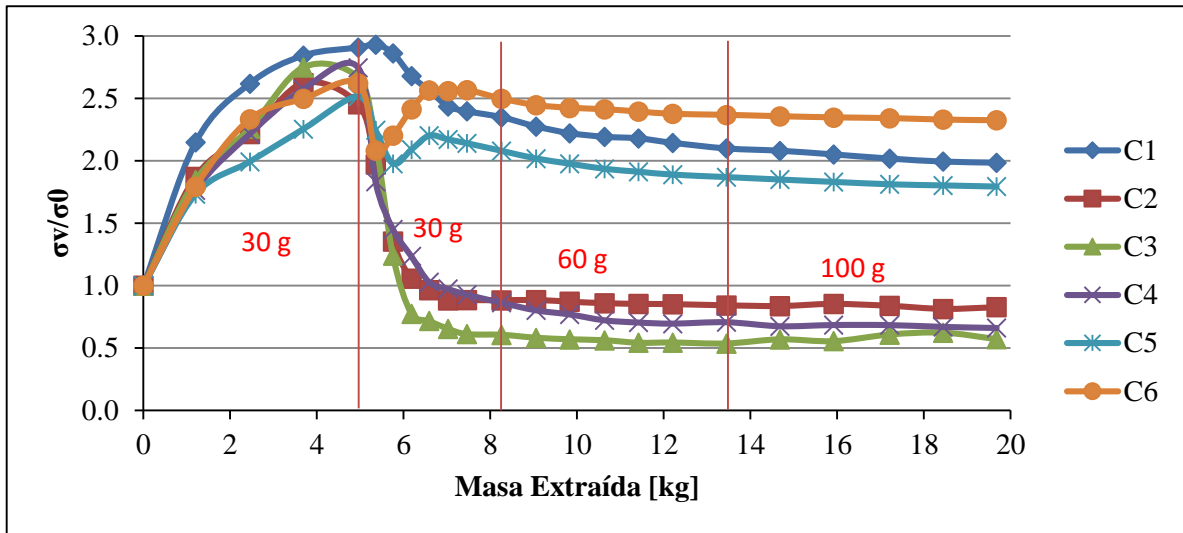


Figura 5-66: Máximos esfuerzos inducidos para cada celda en función de la masa extraída. Experimento 5.

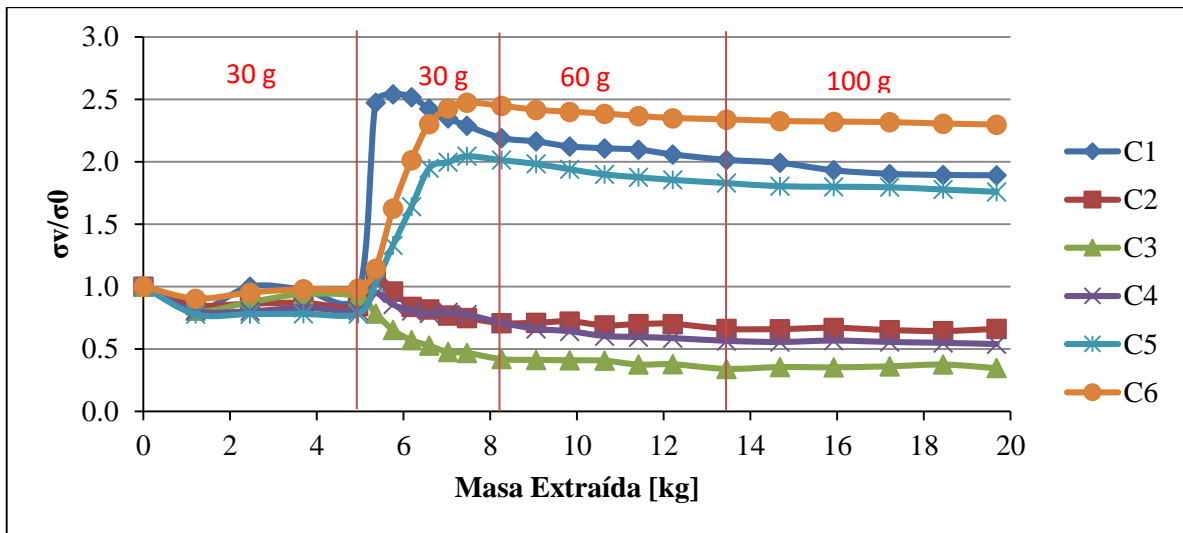


Figura 5-67: Mínimos esfuerzos inducidos para cada celda en función de la masa extraída. Experimento 5.

Las celdas de carga 1, 5 y 6, a partir del quinto período (aproximadamente a los 5 kg de masa extraída) se encontraron dentro de una zona de no extracción. Por lo tanto, se mantuvieron registrando un esfuerzo inducido alto independientemente de la cantidad de masa que se extrajo en las zanjas centrales del modelo. Por el contrario, las celdas de carga 2, 3 y 4 se ubicaron en zonas de movimiento a partir del quinto período y el esfuerzo inducido disminuyó a medida que el experimento progresó. Sin embargo, se vio que el descenso en los esfuerzos inducidos fue mayor en la celda de carga 3, posicionada en el centro de la zona de extracción. En cambio sus celdas vecinas se descargaron una menor cantidad. Esto es atribuido a que ambas celdas (C2 y C4) estuvieron dentro de las zonas de movimiento más cercanas a las zonas de no flujo.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la Figura 6-1 y Figura 6-2, se muestran resúmenes de los resultados obtenidos en los experimentos realizados, aunque separados en función de si se trató de una estrategia de extracción de *panel* o *block caving*. Además, se consideran las siguientes definiciones:

- Tiraje no ideal: En este caso no todos los puntos de extracción se incorporaron a la producción o fueron explotados a diferentes cantidades de masa por período.
- Tiraje uniforme: Todos los puntos de extracción fueron explotados a la misma cantidad de masa por período.
- Área permanente sin extracción: Es el área compuesta por puntos de extracción que no fueron incorporados a la producción.
- Zona temporal de extracción: Es la zona que está siendo extraída dentro de un período.
- Zona temporal de no extracción: Es la zona que temporalmente no está siendo extraída en un período.
- Área de tiraje rápido/lento: Son las zonas temporales de extracción que están sobre puntos sobreextraídos (Área rápida) o sobre puntos extraídos a una tasa normal (Área lenta).

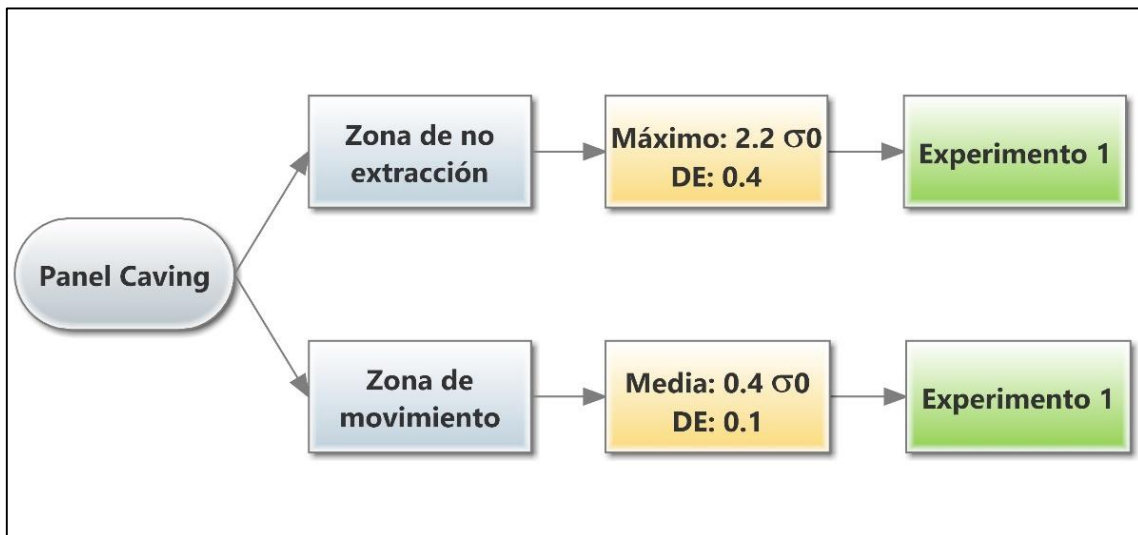


Figura 6-1: Resumen de los resultados de *panel caving*. Celeste: Condición; Amarillo: Máximo o mínimo esfuerzo vertical medio; Verde: Experimento; DE: Desviación Estándar.

En *panel caving*, el flujo gravitacional de material genera un bajo esfuerzo inducido en el área del pilar corona contigua a los puntos de extracción que están siendo explotados y un alto esfuerzo en las zonas que no son incorporadas a la producción. A medida que la zona de no extracción decrece en términos de área, debido a la adicción de nuevos puntos de extracción, los esfuerzos verticales inducidos se incrementan desde su valor inicial hasta valores tan altos como 2.2 veces σ_0 .

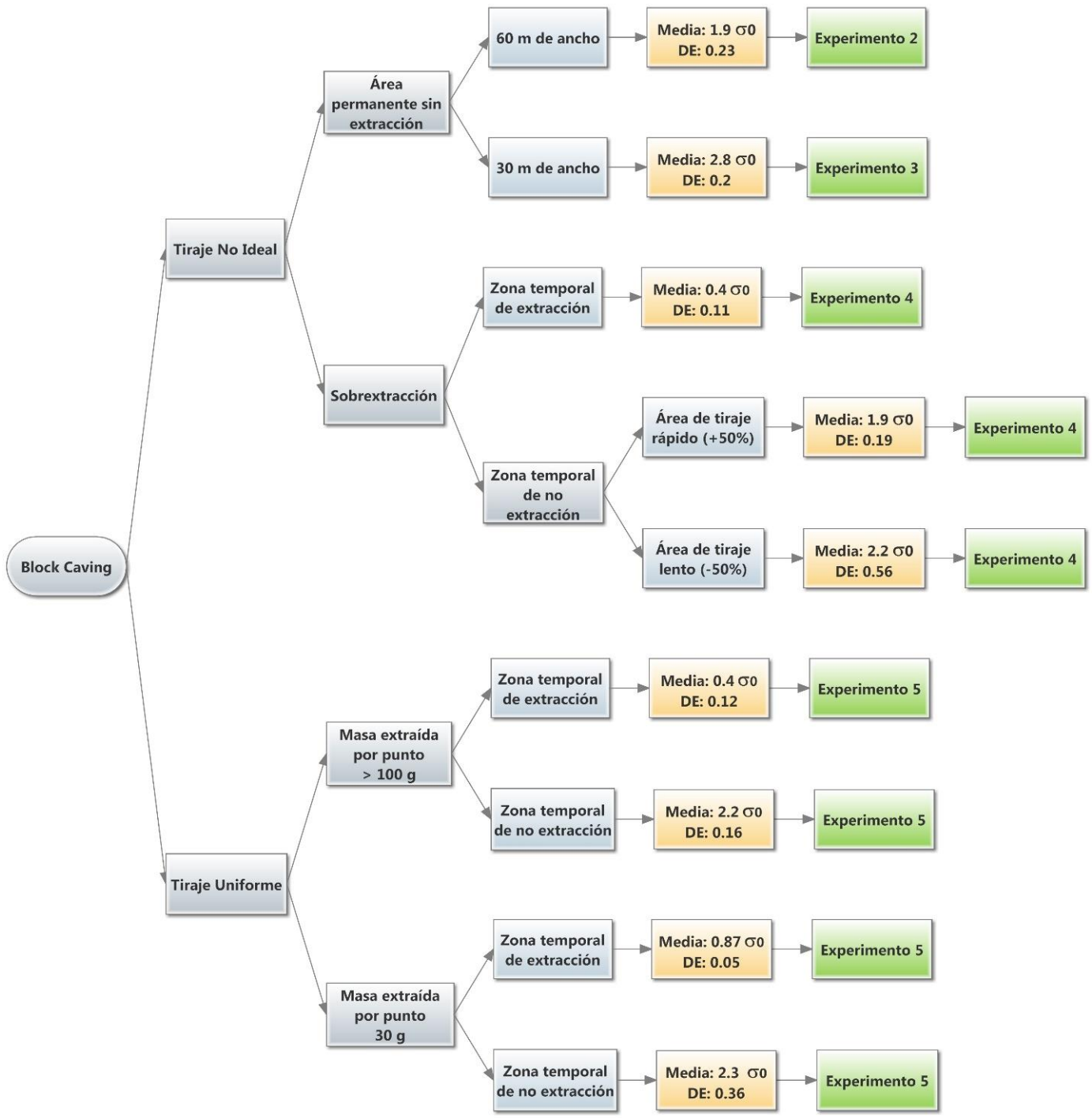


Figura 6-2: Resumen de los resultados de *block caving*. Celeste: Condición; Amarillo: Máximo o mínimo esfuerzo vertical medio; Verde: Experimento; DE: Desviación Estándar.

En *block caving*, en las zonas del pilar corona que están bajo extracción o movimiento de material, se reduce el esfuerzo vertical inducido. La magnitud de la caída en los esfuerzos depende de la cantidad de masa extraída desde cada punto de extracción. A medida que la masa extraída desde un punto de extracción aumenta, la caída en los esfuerzos es mayor. Esto es debido a que mientras más masa se extrae desde un punto, el tamaño de la zona de movimiento es más grande y por ende, las celdas más cercanas son influenciadas por dicha zona. Sin embargo, la caída en los esfuerzos tuvo como cota inferior el valor $0.4\sigma_0$ a partir de los 100 g extraídos por punto de extracción. Este valor fue observado en todos los experimentos realizados, a pesar de que cada celda de carga tuvo distintos esfuerzos iniciales en cada uno de ellos. Una explicación para este valor ($0.4\sigma_0$) es que dentro de las zonas de movimiento existe un aumento en la porosidad que es acotado y dependiente de la granulometría del mineral y de su forma (Hancock, 2013). En esta investigación, se utilizó la misma granulometría y mineral para todos los experimentos, por lo tanto el comportamiento de la porosidad debió ser similar en los experimentos. Si a este hecho se añade que las fuerzas al interior dentro del IMZ son independientes de la altitud que alcanzó el mineral al ser cargado en el modelo físico (Lorig y Cundall, 2000), los esfuerzos inducidos en zonas de movimiento pueden reducirse en una magnitud similar en cada experimento. En la Figura 6-3, se muestra el crecimiento de una zona de movimiento aislado y las mediciones de porosidad que registró Hancock (2013) utilizando un modelo de métodos de elementos discretos (DEM). El interior del IMZ se puede interpretar como dos elipsoides concéntricos de porosidad creciente desde el interior hacia el exterior. Si una celda de carga se instalara al interior de este modelo, se aprecia que sus lecturas estarían al interior del elipsoide más poroso.

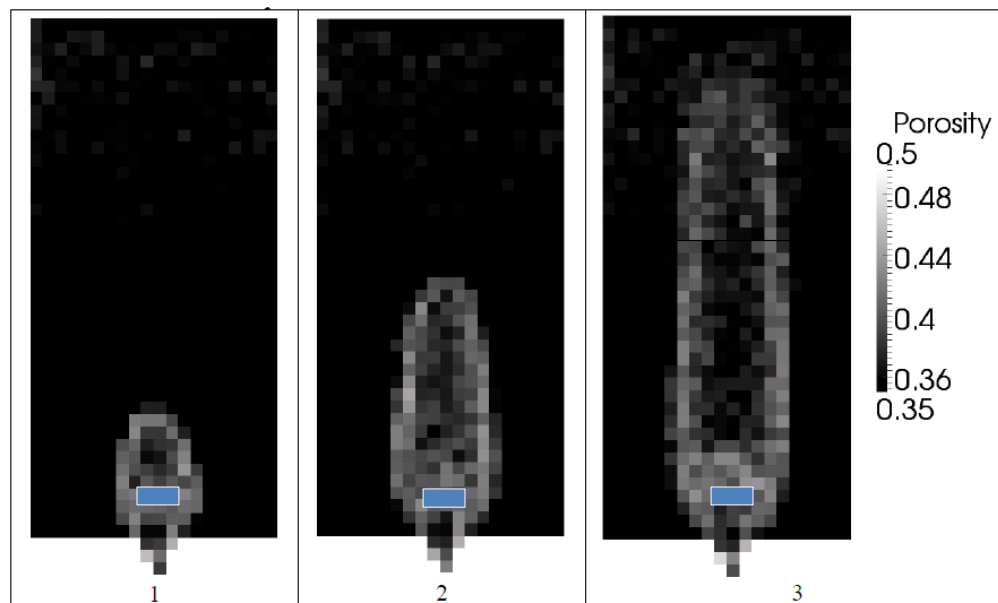


Figura 6-3: Medidas de la porosidad tomadas en distintos momentos de crecimiento de IMZ. Rectángulos azules representan una celda de carga. Izquierda: Crecimiento temprano. Derecha: Crecimiento en momentos finales. (Hancock, 2013).

Por otro lado, cuando se realizó una extracción uniforme en todos los puntos, se observó que los esfuerzos se van redistribuyendo desde las zonas que están siendo explotadas hacia las zonas que momentáneamente están sin extracción. La magnitud de los esfuerzos llegó a ser alta independiente de la cantidad de masa extraída por cada punto de extracción. Por ejemplo, cuando se extrajeron 30 g por punto de extracción se obtuvo que las zonas temporales de no extracción sufrieron, en promedio, cerca de 2.3 veces el esfuerzo inicial y las mismas zonas para puntos con extracción

superior a los 100 g promediaron $2.2\sigma_0$. En la Figura 6-4, se muestran los esfuerzos inducidos alcanzados en zonas temporales de no extracción (curva superior) y en zonas temporales de extracción, en función de distintas cantidades de masa extraída por punto de extracción.

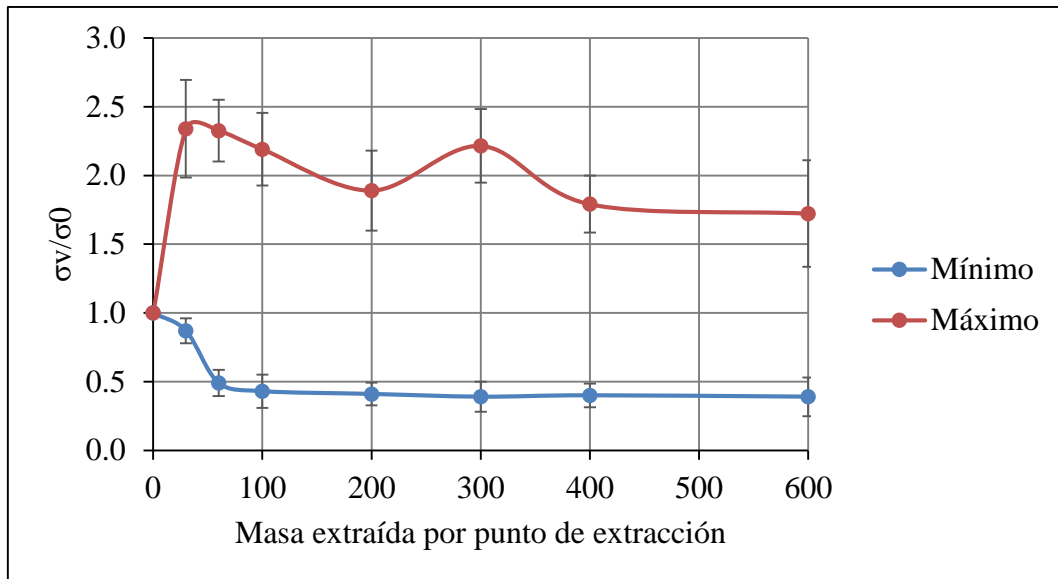


Figura 6-4: Esfuerzo vertical medio registrado en función de la cantidad de masa

Para los experimentos en que hubo áreas permanentes sin extracción, en estas áreas se concentraron los esfuerzos mientras se descargaron las zonas en que hubo extracción de mineral. La magnitud de los esfuerzos inducidos depende del tamaño del área permanentemente cerrada (o no incorporada a la producción) y su relación es inversamente proporcional. Tal como se verificó en los experimentos 2 y 3, para el caso en que tres zanjas no se incorporaron a la producción, el esfuerzo registrado en esta zona ($1.9 \sigma_0$) fue menor que el registrado en la zona compuesta por sólo una zanja ($2.8\sigma_0$).

En los experimentos 4 y 5, se observó que dentro de un período cada celda de carga registró un valor máximo y un mínimo, dependiendo de qué punto de extracción (o zanja) estuvo siendo extraído. Por ejemplo, en el experimento 5 - período 4, cuando un punto de extracción de la zanja 5 estuvo siendo extraído, la celda de carga 2 registró el valor mínimo mientras que la celda 4 obtuvo un valor máximo, en la celda 3 el esfuerzo descendió y en las celdas restantes el esfuerzo aumentó. El comportamiento de las celdas cuando la zanja 5 se explotaba, dependió de la distancia que hubo entre el punto extraído y cada celda de carga. En las celdas más alejadas de la extracción, se incrementa el esfuerzo vertical registrado. Mientras que en las más cercanas disminuyó el esfuerzo inducido. En la siguiente figura se ilustra el ejemplo descrito. En ANEXO C, se muestran las distancias entre puntos de extracción y celdas de carga.

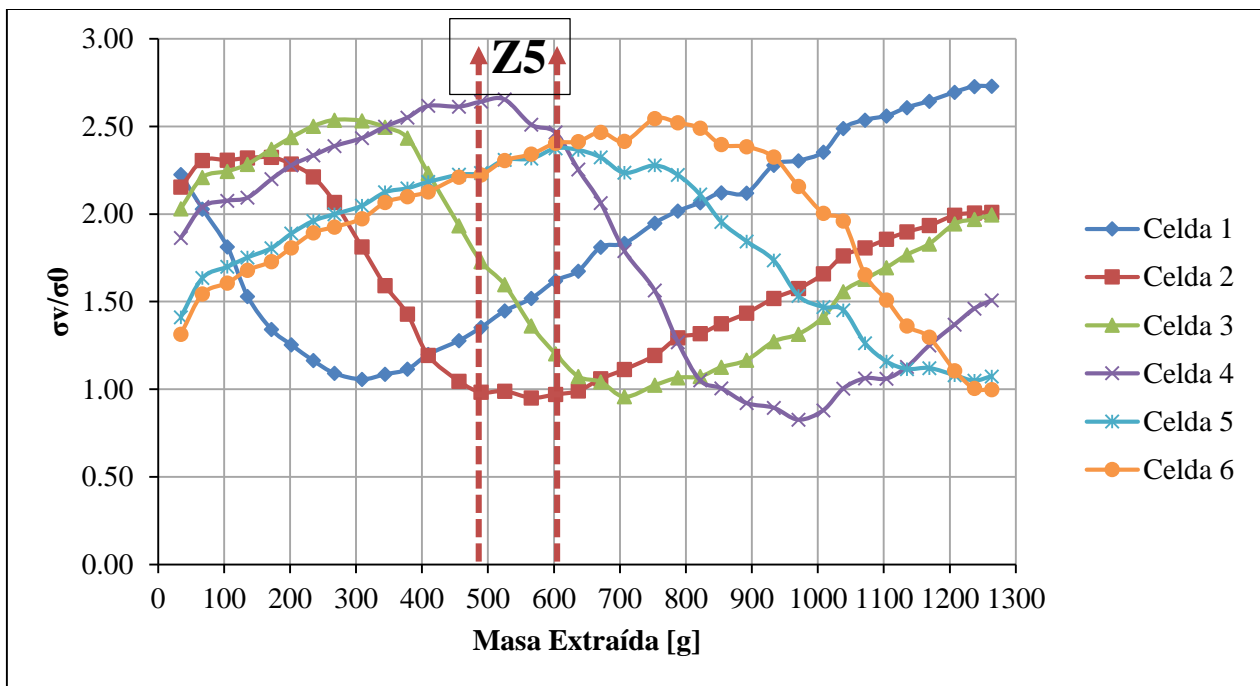


Figura 6-5: Esfuerzos verticales normalizados en función de la masa extraída acumulada del Período 4. Promedios entre Experimentos 5-A y 5-B.

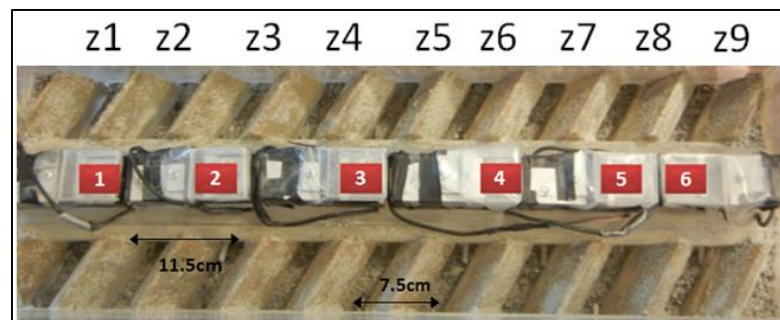


Figura 6-6: Ubicación de las celdas de carga, vista en planta – Experimento 4 y 5.

El comportamiento anteriormente ejemplificado fue observado en todos los períodos donde hubo extracción uniforme e incluso donde hubo sobreextracción. En otras palabras, el comportamiento se vio en los experimentos en que todos los puntos de extracción estuvieron activos. En promedio, a partir de 24 cm de distancia desde un punto de extracción hasta una celda de carga los esfuerzos verticales aumentaron. A una distancia menor, los esfuerzos disminuyeron.

Un fenómeno observado en las zonas de no extracción es que los esfuerzos verticales inducidos son decrecientes a medida que progresaron los experimentos. Esto pudo verse en los experimentos 2, 3 y 4. La explicación a este comportamiento se atribuye a la pérdida de masa del modelo y al aumento del tamaño de las zonas de movimiento. Para establecer cuál es el motivo preponderante se sugiere realizar experimentos adicionales en que se repitan las mismas estrategias de extracción y en que se rellene el modelo físico con el mineral extraído desde cada punto explotado.

Con lo todo anterior, se identificó que las principales variables que influyen en los esfuerzos inducidos por el tiraje, o flujo gravitacional de material, en el pilar corona son: Masa extraída por punto de extracción, tamaño del área no incorporada a la producción y distancia desde el sector de

interés del pilar corona hasta el punto de extracción explotado. Un rol secundario cumple la masa acumulada extraída ya que su principal influencia está relacionada al tamaño de las zonas de movimiento. Una cantidad mayor de masa acumulada por punto de extracción implica un tamaño mayor de la zona de movimiento y por ende un área de influencia más grande en el pilar corona.

Los resultados y conclusiones expuestas anteriormente fueron utilizados para definir recomendaciones preliminares para disminuir los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional de material. En la siguiente tabla se muestran escenarios potenciales y las recomendaciones basadas en este estudio.

Tabla 6-1: Recomendaciones basadas en la investigación.

Escenario potencialmente observable	Recomendación basada en este estudio
<p>Área con altos esfuerzos verticales siendo extraída uniformemente a una baja cantidad de masa por punto de extracción.</p> <p>Este caso podría darse en una mina donde puntos de extracción se explotan a una baja tasa debido a que el hundimiento se está propagando.</p>	<p>Continuar extrayendo uniformemente pero a una cantidad mayor de masa por punto de extracción.</p>
<p>Área permanente de no extracción (adyacente a una zona de extracción) sometida a un alto esfuerzo vertical.</p>	<p>Incorporar a la producción el área de no extracción para disminuir los esfuerzos verticales o,</p> <p>En caso de poner en riesgo la seguridad de los trabajadores, aumentar el tamaño del área sin extracción mediante el cierre de puntos de extracción.</p>
<p>Área de extracción, adyacente a zona de sobreextracción, con altos esfuerzos.</p>	<p>Reducir la cantidad de masa extraída en zona de sobreextracción para lograr una extracción más uniforme.</p>

La utilización del modelamiento físico a escala ha sido una herramienta de innegable utilidad para mejorar la comprensión de fenómenos que a escala de mina son difíciles de estudiar, tal como es la relación entre el flujo gravitacional y los esfuerzos inducidos en el nivel de producción. Sin embargo, esta herramienta posee limitaciones que, en el caso de esta investigación, no pueden dejar de mencionarse. A juicio del autor, la mayor debilidad del modelo físico utilizado es que se cuenta sólo con un pilar corona, es decir, se trata de un modelo 2D. Por lo tanto, se carece de información para afirmar qué ocurre en los otros pilares de producción cuando más de tres calles están activas. A pesar de esto, la experiencia obtenida en el desarrollo de esta investigación permite deducir que la utilización de un modelo 3D para un análisis experimental como éste, sin precedentes directos, habría sido de una dificultad bastante mayor. La principal virtud del modelo 2D fue que se pudieron

identificar y observar los efectos de cada fenómeno de interés como, por ejemplo, la extracción de un punto de extracción en específico, la adicción de una zanja a la producción o el cierre permanente de puntos. Identificar los efectos de dichos fenómenos en un modelo 3D habría sido más difícil por tener que manejar una cantidad mayor de puntos de extracción (sus servomotores) y de celdas de cargas.

En el modelo físico se asume que el hundimiento se ha propagado hasta la superficie y todo el mineral está fragmentado, lo cual limita la aplicación de los resultados. Sin embargo, en esta investigación se observó que en las zonas de movimiento los esfuerzos decrecen. Esto implicaría, que aunque no se haya propagado el hundimiento en su totalidad, la incorporación de puntos de extracción a la producción permitiría relajar zonas del pilar corona beneficiando la estabilidad del nivel de producción.

Otro aspecto a admitir es que la extracción debió hacerse de una forma ideal y poco representativa de una mina de *block/panel caving*, ya que se procuró extraer la misma cantidad de masa por punto de extracción activos (exceptuando el Experimento 4) y en un orden secuencial que se respetó en todos los experimentos realizados. De esta forma, se pudieron asociar los esfuerzos inducidos a la extracción. En caso de haber representado con mayor realismo la casi aleatoriedad en que los puntos de extracción se explotan a escala de mina, en un período de tiempo como una semana o un mes, se habría hecho confuso asociar la extracción de un punto, o de una zanja, a los esfuerzos que dicha extracción induce en el pilar corona.

Final y consecuentemente a lo expuesto, se dan las siguientes sugerencias para trabajos futuros relacionados con esta investigación:

- Llevar a cabo experimentos para cuantificar la influencia de colgaduras en un período de tiempo. Esto es relevante ya que en el presente estudio no se consideraron las influencias de estas interrupciones operacionales que son frecuentes a escala mina. Es de importancia analizar su influencia ya que una colgadura representa una zona temporal de no extracción capaz de concentrar esfuerzos.
- Realizar experimentos para estimar la influencia de la humedad y de la roca fina en los esfuerzos verticales.
- Construir un modelo físico más grande, no en términos de escala necesariamente, que incluya más de un pilar para estudiar la distribución de los esfuerzos cuando se extrae en más de una calle de producción simultáneamente.
- Recabar datos de mediciones de esfuerzos inducidos por flujo a escala de mina para validar los resultados obtenidos en esta investigación. Para esto se propone continuar las mediciones de esfuerzos que se realizan para determinar el *abutment stress* hasta que la propagación del hundimiento sea alcanzada y puntos de extracción sean abiertos en el nivel de producción.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Aros, M. 2008. Estabilidad del Nivel de Producción en Minería Continua. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
2. B. H. G. Brady. E. T. Brown. Rock Mechanics for underground mining, third edition. Chapters 1 – 6.
3. Barrett, P. J. 1980. The shape of rock particles, a critical review, *Sedimentology*, 27, 291–303.
4. Brown E.T., 2003. Block Caving Geomechanics, second edition. JKMRMC, The University of Queensland.
5. Brown E.T., 2007. Block Caving Geomechanics, second edition. The International Caving Study 1997-2004, JKMRMC University of Queensland. Chapters 1, 5-7.
6. Castro R. 2001. Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
7. Castro R. 2006. Study of mechanism of gravity flow for block caving. The University of Queensland. Australia.
8. 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.
9. Flores G. 2005. Rock mass response to the transition from open pit to underground cave mining. PhD Thesis, JKMRMC School of Engineering the University of Queensland, pp 1-15.
10. Fuenzalida. 2012. Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a minería de caving. Tesis de Magíster en minería. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
11. Halim, A. 2004. 3D large scale physical modelling for studying interactive drawing and drawpoint spacing in block caving mines. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.
12. Janssen, HA. 1895. Experiments regarding grain pressure in soils', *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 39, no. 35, pp.1045-1049, Translated from German by W Hustrulid and N Krauland. in *Proud to be miners (Proceedings, MassMin 2004, Santiago, August 2004)*, eds A Karzulovic and MA Alfaro, Minería Chilena, Santiago, pp. 201-214.
13. Kézdi, A. 1962. *Erddrucktheorien*, Springer Verlag, Berlin.
14. Kvapil, R 1965, 'Gravity flow of granular materials in hoppers and bins', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vol. 2, pp. 35-41.
15. Kvapil, R. 2004. Gravity flow in sublevel and panel caving: A common sense approach.
16. Lacasse M, Legast P. Change from grizzly to LHD extraction system. In: Dan Stewart, editor. Design and operation of caving and sublevel stoping mines. Society of Mining Engineers, AIME, 1981. p. 107–18.
17. Laubscher, D., 2000. Block Cave Manual. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
18. Lorig, LJ. 2000. Relation between caved column height and vertical stress at the cave base', Final Report, International Caving Study, ed. ET Brown, JKMRMC and Itasca Consulting Group, Inc.
19. Marachi, N. D., C. K. Chan, and H. B. Seed. Evaluation of Properties of Rockfill Materials. *J. Soil Mechan. Foundation Div.*, vol. 98, no. SM1, Jan. 1972.
20. Melo, F, Vivanco, F. Fuentes, C and Apablaza, V. 2008. Kinematic model for quasi static granular displacements in block caving: Dilatancy effects on drawbody shapes, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, no. 2, pp. 248-259 (February).
21. Nedderman, R.M.1992. Statics and Kinematics of Granular Materials. Cambridge University Press: Cambridge.

22. Nedderman, RM. 1995. The use of the kinematic model to predict the development of the stagnant zone boundary in the batch discharge of a bunker', *Chemical Engineering Science*, vol. 50, pp. 959-965.
23. Orellana, L. 2012. Estudio de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio. Tesis de Magíster en minería. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
24. Orellana, M. 2011. Modelación numérica de la minería continua. Tesis de Magíster en minería. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
25. Paredes. 2012. Mecanismos de entrada de dilución en minas de block/panel Caving. Tesis de Magíster en minería. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
26. Pierce M, 2010. Flow above multiple drawpoints: Interactive draw and the role of stress. In A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. The University of Queensland.
27. Pineda, M. 2012. Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model. Tesis de magíster en minería. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
28. Power G, 2004. Large Scale Physical Modelling and Full Scale Experiments. The University of Queensland.
29. R. Trueman^a, M. Pierce^b, R. Wattimena^a. 2002. Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines. ^aJulius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Queensland, Australia. ^b Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
30. Richardson, M.P., 1981. "Area of draw influence and drawpoint spacing for block caving mines", in Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, pp 149-156. Ed. D.R. Stewart. SME-AIME, New York.
31. Sahupala H, Brannon C, Annavarapu S and Osborne K, 2008. Recovery of extraction level pillars in the Deep Ore Zone (DOZ) block cave, PT Freeport Indonesia. In: Massmin2008, 5th International Conference & Exhibition on Mass Mining Luleå. Sweden, 9-11 June.

8. ANEXOS

ANEXO A

Caracterización del mineral

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 8-1, se muestran un ejemplo del procedimiento:



Figura 8-1: Ejemplo de cálculo de Factor de forma según Cho et al. (2006).

Los resultados del factor de forma aplicada a las muestras de grava chancada se presentan en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1: Resultados de factor de forma para el material a utilizar en la investigación.

Factor	Grava
Esfericidad	0.58
Redondez	0.25

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 8-2. A partir de los valores de esfericidad y redondez se determina que el material a utilizar en los experimentos presenta fragmentos angulosos y redondeados.

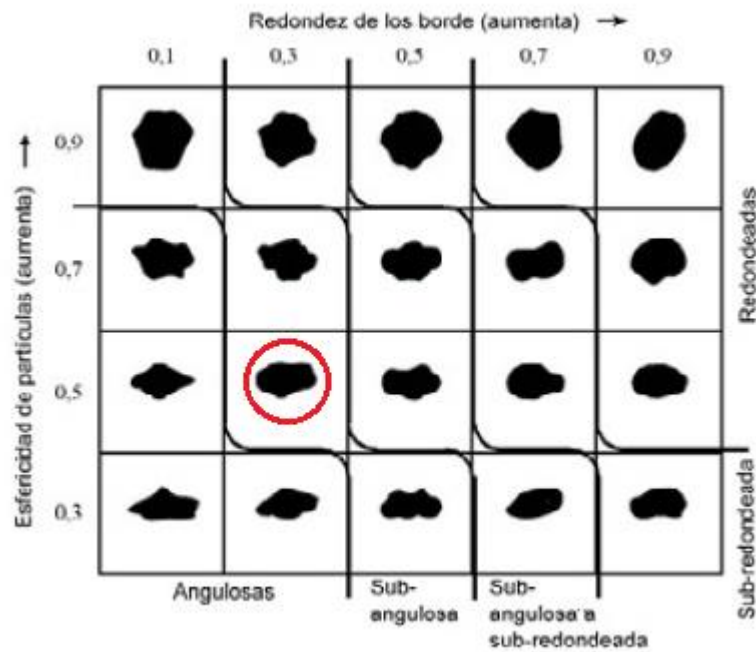


Figura 8-2: Factor de forma para el material utilizado en los experimentos (Hoz, 2007).

Densidad aparente, Factor de esponjamiento y Porosidad

Considerando una densidad in situ del material, ρ_{is} , de $2.6 \text{ [t/m}^3\text{]}$, se deduce que el volumen in situ, V_{is} , para un 1 kg de material corresponde a 385 cm^3 , es decir, $V_{is}=385 \text{ cm}^3$.

El material de muestra utilizado para el cálculo de densidad aparente posee la distribución granulométrica mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 8-2. Distribución granulométrica de 1 kg de material.

Malla	Masa [g]
-1/2" + 3/8"	30
-3/8" + 1/4"	86
-1/4" + #4	200
-#4 + #6	315
-#6 + #8	254
-#8 + #16	95
-#16 + #20	20
Total	1000

Un kilogramo de muestra extraída, tiene un volumen aproximado de 700 cm^3 (ver Figura 8-3). Por lo tanto, su densidad aparente, ρ_{Ap} , es de 1.42 t/m^3 .

Utilizando la expresión: $F_W = \frac{V_{is}}{V_E} = \frac{\rho_{Ap}}{\rho_{is}}$, se obtiene un factor de esponjamiento, F_W , igual a 0.55.



Figura 8-3: Volumen aparente de 1 kg de muestra.

Finalmente la porosidad calculó con los resultados anteriores y su valor fue de un 45%.

Coefficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad de la distribución C_u se calculó como:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.0044}{0.0022} = 2.0$$

Ángulo de reposo del mineral

Se dispuso de una muestra de la curva granulométrica de los experimentos en el interior de un cilindro destapado por las dos caras y situado de manera vertical. El ensayo consistió en sacar el cilindro en sentido vertical con el fin de que la muestra de mineral quede dispuesta en la mesa como un cono. Se hace en total seis veces a una velocidad relativamente lenta y constante entre cada vez que se realiza el retiro del cono. Luego, se procedió a medir con una regla la altura desde la mesa hacia la punta del cono, y la extensión horizontal promedio (diámetro) que alcanza la base del cono para cada caso. Finalmente, se pudo encontrar el ángulo en reposo utilizando geometría. Las mediciones y resultados del ángulo en reposo se muestran en la Tabla 8-3:

Tabla 8-3. Mediciones y Resultados para los cálculos del ángulo de reposo.

Masa Muestra [g]	2230						
Procedimiento	H Cilindro [cm]	H Montículo [cm]	D1 [cm]	D2 [cm]	D3 [cm]	Dprom [cm]	Angulo de Reposo [°]
1	20	8.1	26.5	27	27.1	26.87	31.09
2	20	7.8	27.5	26.5	25.6	26.53	30.45
3	20	7.7	26.6	27	28.1	27.23	29.49
4	20	7.5	26.7	26.8	27.7	27.07	28.99
5	20	7.3	27.2	28.8	28.3	28.10	27.46
6	20	7.4	26.7	27.5	28.2	27.47	28.32
7	20	7.6	27.2	27.1	26.8	27.03	29.35
Promedios	20	7.63	26.91	27.24	27.40	27.19	29.31
Desviación	0	0.25	0.35	0.69	0.90	0.46	1.13

Finalmente, el ángulo de reposo del mineral se estimó en $29.31^{\circ} \pm 1.13^{\circ}$.

El cilindro utilizado para el desarrollo de los experimentos se describe a continuación:



Altura [cm]	32.5
Diámetro Interno [cm]	10.16
Material	PVC

Figura 8-4: Cilindro utilizado para la estimación del ángulo de reposo del mineral.

Ángulo de fricción con las paredes del modelo físico

Utilizando la metodología por Nedderman (1992), se calculó el ángulo de fricción con las paredes de acrílico del modelo físico para 10 muestras de mineral. Los resultados se muestra en la Tabla 8-4:

Tabla 8-4: Resultados del cálculo del ángulo de fricción del mineral con las paredes del modelo físico.

Muestra	Masa [g]	Altura Observada [cm]	Ángulo de Deslizamiento [°]
1	1.6	38	31.76
2	1.2	36	29.91
3	2.7	32	26.31
4	2.4	32	26.31
5	4.1	32	26.31
6	1.4	31	25.43
7	2.2	32	26.31
8	3.1	31	25.43
9	2.6	35	29.00
10	0.7	36	29.91
		Mínimo	25.43
		Máximo	31.76
		Media	27.67
		Desviación	2.26

Finalmente, el ángulo de fricción del mineral con las paredes del modelo se estimó en $27.67^{\circ} \pm 2.26^{\circ}$.

Resumen de resultados de propiedades del mineral:

En la Tabla 8-5, se muestran las propiedades del mineral.

Tabla 8-5: Características del mineral utilizado.

Factor	Valor	Unidad
Esfericidad	0.58	-
Redondez	0.25	-
Densidad de mineral	2600	kg/m ³
Densidad aparente	1420	kg/m ³
Factor de Esponjamiento	0.55	-
Porosidad	44	%
d ₅₀	4.0	mm
Coficiente de Uniformidad (C _u)	2.0	-
Ángulo de reposo del mineral	29.31 ± 1.22	°
Ángulo de fricción con las paredes del modelo	27.67 ± 2.26	°

ANEXO B

Extracciones

En esta sección, se pueden ver los detalles de la extracción llevada a cabo en los experimentos realizados.

Tabla 8-6: Extracción del Experimento 0.

Período	Punto de Extracción	Experimento 0 - A		Experimento 0 - B		Período	Punto de Extracción	Experimento 0 - A		Experimento 0 - B	
		Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]	Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]			Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]	Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]
1	19	0.51	0.51	0.23	0.23	32	19	0.29	9.7	0.44	11.31
2	19	0.23	0.74	0.23	0.46	33	19	0.25	9.94	0.28	11.59
3	19	0.24	0.98	0.20	0.67	34	19	0.29	10.23	0.46	12.04
4	19	0.29	1.27	0.23	0.89	35	19	0.28	10.51	0.39	12.43
5	19	0.25	1.52	0.22	1.11	36	19	0.22	10.73	0.44	12.88
6	19	0.24	1.76	0.21	1.32	37	19	0.22	10.95	0.41	13.28
7	19	0.25	2.01	0.23	1.55	38	19	0.22	11.17	0.29	13.57
8	19	0.24	2.26	0.34	1.89	39	19	0.25	11.42	0.51	14.08
9	19	0.35	2.61	0.40	2.29	40	19	0.22	11.64	0.44	14.52
10	19	0.29	2.89	0.34	2.63	41	19	0.23	11.87	0.5	15.02
11	19	0.27	3.16	0.33	2.96	42	19	0.23	12.09	0.55	15.57
12	19	0.24	3.4	0.27	3.24	43	19	0.41	12.5	0.44	16.01
13	19	0.29	3.69	0.40	3.64	44	19	0.33	12.83	0.37	16.38
14	19	0.3	3.99	0.30	3.94	45	19	0.34	13.17	0.35	16.74
15	19	0.37	4.36	0.23	4.17	46	19	0.26	13.43	0.54	17.28
16	19	0.28	4.64	0.31	4.48	47	19	0.39	13.82	0.32	17.6
17	19	0.28	4.91	0.32	4.80	48	19	0.3	14.12	0.37	17.97
18	19	0.3	5.21	0.35	5.15	49	19	0.34	14.46	0.34	18.31
19	19	0.29	5.5	0.46	5.60	50	19	0.36	14.82	0.37	18.68
20	19	0.32	5.82	0.45	6.05	51	19	0.31	15.13	0.39	19.08
21	19	0.33	6.15	0.55	6.61	52	19	0.43	15.56	0.44	19.52
22	19	0.26	6.41	0.25	6.86	53	19	0.43	15.99	0.36	19.88
23	19	0.2	6.61	0.32	7.18	54	19	0.34	16.33	0.64	20.51
24	19	0.32	6.93	0.51	7.69	55	19	0.36	16.7		
25	19	0.27	7.2	0.38	8.06	56	19	0.39	17.08		
26	19	0.38	7.58	0.53	8.59	57	19	0.42	17.51		
27	19	0.33	7.91	0.48	9.07	58	19	0.38	17.89		
28	19	0.38	8.29	0.42	9.49	59	19	0.32	18.21		
29	19	0.32	8.61	0.51	10.00	60	19	0.32	18.53		
30	19	0.38	8.99	0.37	10.37	61	19	0.35	18.88		
31	19	0.41	9.4	0.49	10.87	62	19	0.24	19.11		

Tabla 8-7: Extracción del Experimento 2.

Período	Zanja	Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]	Promedio por punto de extracción [kg]
Experimento 2 - A				
1	1,2,3,7,8,9	8.7	8.7	0.36
2	1,2,3,7,8,9	8.4	17.2	0.35
3	1,2,3,7,8,9	7.5	24.6	0.31
4	1,2,3,7,8,9	8.1	32.8	0.34
5	1,2,3,7,8,9	7.6	40.4	0.32
6	1,2,3,7,8,9	8.9	49.4	0.37
7	1,2,3,7,8,9	12.6	62.0	0.53
8	1,2,3,7,8,9	11.6	73.5	0.48
9	1,2,3,7,8,9	12.4	85.9	0.52
10	1,2,3,7,8,9	11.0	96.9	0.46
11	4,5,6	3.9	100.8	0.33
12	4,5,6	4.2	105.0	0.35
13	4,5,6	4.3	109.2	0.36
14	4,5,6	6.2	115.5	0.52
Experimento 2 - B				
1	1,2,3,7,8,9	8.38	8.38	0.35
2	1,2,3,7,8,9	8.59	16.97	0.36
3	1,2,3,7,8,9	8.71	25.68	0.36
4	1,2,3,7,8,9	8.57	34.25	0.36
5	1,2,3,7,8,9	7.82	42.07	0.33
6	1,2,3,7,8,9	7.62	49.69	0.32
7	1,2,3,7,8,9	12.99	62.68	0.54
8	1,2,3,7,8,9	11.88	74.56	0.49
9	1,2,3,7,8,9	11.43	85.99	0.48
10	1,2,3,7,8,9	11.41	97.39	0.48
11	4,5,6	6.22	103.61	0.52
12	4,5,6	6.16	109.77	0.51

Tabla 8-8: Extracción del Experimento 3.

Período	Zanjas	Masa Extraída [kg]	Masa Acumulada [kg]	Masa Promedio por punto de extracción [kg]
Experimento 3 - A				
1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	10.62	10.62	0.33
2	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	9.70	20.32	0.30
3	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	10.83	31.15	0.34
4	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	11.52	42.67	0.36
5	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	17.24	59.91	0.54
6	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	15.94	75.86	0.50
7	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	17.00	92.86	0.53
8	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	14.51	107.37	0.45
9	5	1.26	108.64	0.32
10	5	1.34	109.98	0.34
11	5	1.56	111.54	0.39
12	5	1.39	112.93	0.35
Experimento 3 - B				
1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	7.56	7.56	0.24
2	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	7.56	15.12	0.24
3	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	7.46	22.59	0.23
4	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	7.04	29.62	0.22
5	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	9.70	39.32	0.30
6	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	9.52	48.84	0.30
7	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	8.16	57.01	0.26
8	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	8.00	65.00	0.25
9	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	14.59	79.59	0.46
10	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	15.82	95.41	0.49
11	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	16.32	111.73	0.51
12	5	1.25	112.98	0.31
13	5	1.03	114.02	0.26
14	5	0.93	114.95	0.23
15	5	0.92	115.86	0.23

ANEXO D

Celdas de carga

Las celdas de carga utilizadas en los experimentos fueron del tipo “punto único” de dos capacidades máximas; seis unidades de celdas de 20 kg y tres unidades de 30 kg de capacidad. Con el propósito de obtener la medición de los esfuerzos verticales, la siguiente relación fue usada:

$$\sigma_{zz} = \frac{\alpha_1 \cdot (\text{masa leída}) + \alpha_2 + \varepsilon}{\text{Área de medición}_{\text{celda}}} \cdot g$$

Donde α_1 y α_2 son las constantes obtenidas a partir de la calibración de cada celda con respecto a la masa, ε es el factor de corrección por temperatura en cada celda y g es la aceleración de gravedad, considerada como 9.8 m/s^2 .

La calibración de las celdas de carga fue realizada ubicando una serie de pesos conocidos en las celdas de carga y registrando los valores observados. Este procedimiento fue llevado a cabo para cada celda y antes de cada experimento. Una curva típica de calibración para la relación entre valores teóricos y leídos en cada celda es mostrada en la Figura 8-6:

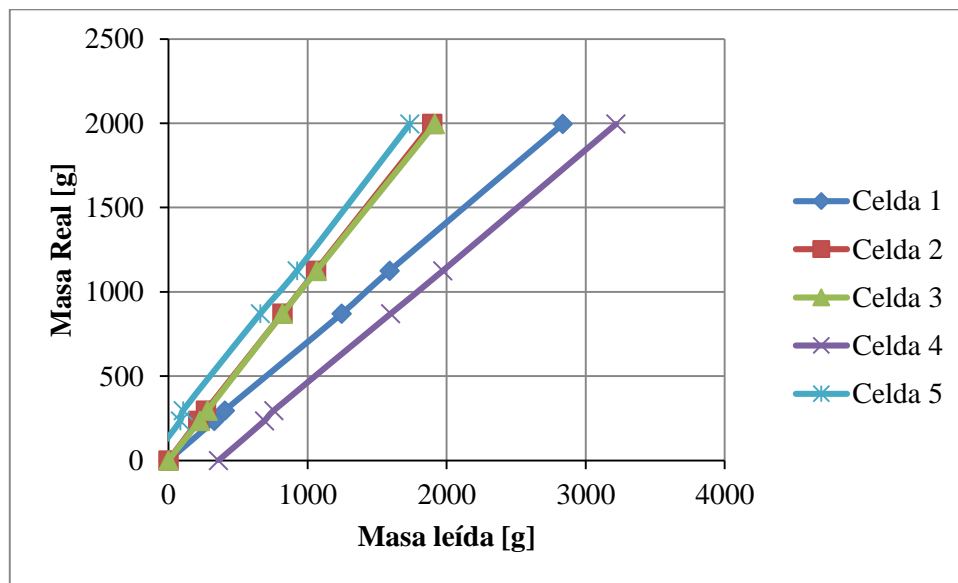


Figura 8-6: Curva típica de calibración de celdas. Experimento 3.

Mediante la ecuación de la recta de cada serie del gráfico anterior, fue posible calcular las constantes α_1 y α_2 de cada celda.

Para determinar el factor de corrección por temperatura, se registraron mediciones en las celdas de carga por 72 horas seguidas. De este modo, se verificó cuánto fue la influencia del cambio de temperatura entre diferentes momentos del día. Finalmente, se concluyó que las celdas de carga no se vieron influenciadas por los cambios de temperatura, con lo cual se estableció que $\varepsilon = 0$.

ANEXO E

Esfuerzos iniciales

En la Tabla 8-10, se muestran los esfuerzos iniciales medidos en las celdas de carga una vez que el modelo físico fue cargado en su totalidad y previamente a iniciar la extracción. Además, se muestra el promedio y desviación estándar de las mediciones y el esfuerzo inicial calculado con la ecuación de Janssen.

Tabla 8-10: Resumen de esfuerzos iniciales medidos en celdas de carga y su comparación con los obtenidos mediante la ecuación de Janssen.

Experimento	Esfuerzos Iniciales [kPa]					
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Celda 5	Celda 6
0-A	12.72	19.21	15.21	-	-	-
0-B	10.65	13.42	17.76	-	-	-
1-A	15.46	16.08	18.84	19.85	16.84	16.14
1-B	19.44	18.49	21.30	16.61	18.55	16.28
2-A	23.23	31.47	32.92	26.20	29.63	29.53
2-B	22.77	24.66	26.91	32.40	33.19	24.12
3-A	22.45	18.56	16.42	23.18	23.24	-
3-B	13.12	17.68	13.87	16.28	17.81	-
4-A	13.59	19.44	19.26	17.88	17.35	13.59
4-B	18.19	16.10	12.88	12.34	12.89	18.19
5-A	17.65	16.29	15.17	14.18	20.23	15.05
5-B	18.49	17.41	19.11	18.03	19.45	15.42
Promedio [kPa]	19.07	Desviación Estándar [kPa]	5.30	Esfuerzo inicial estimado con Ecuación de Janssen [kPa]		21.4

ANEXO F

Gráficos de esfuerzos verticales inducidos máximos y mínimos con desviación estándar. Experimento 4.

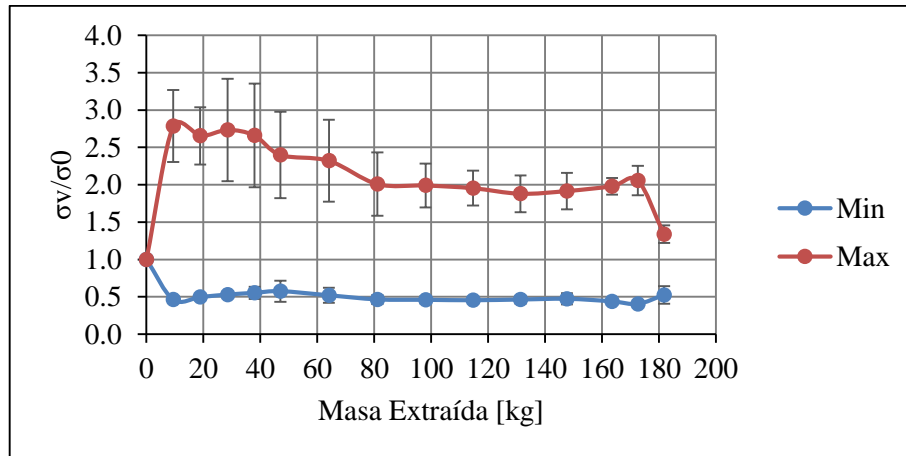


Figura 8-7: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 1.

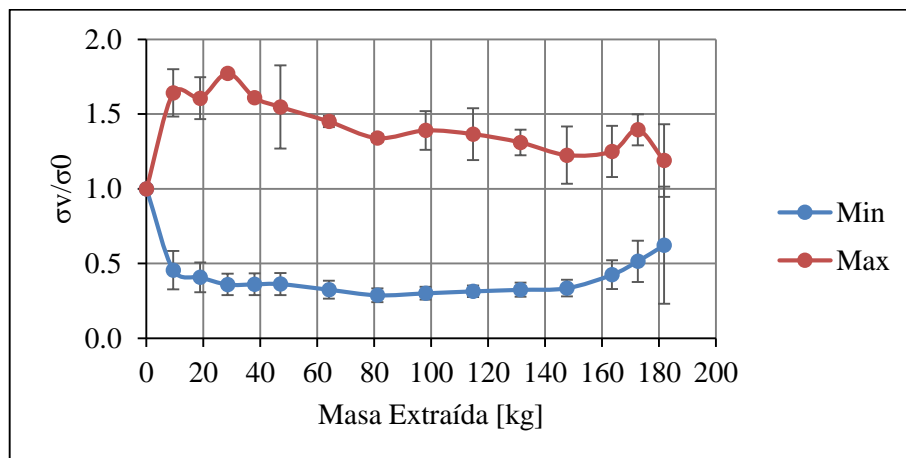


Figura 8-8: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 2.

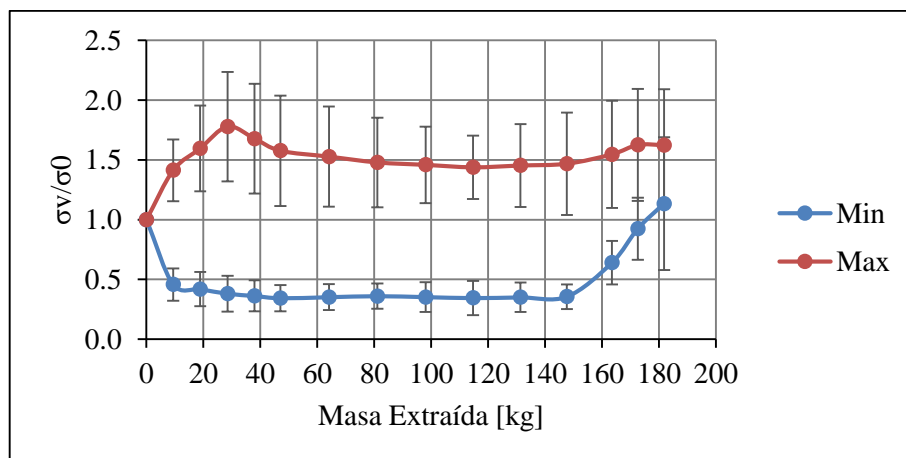


Figura 8-9: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 3.

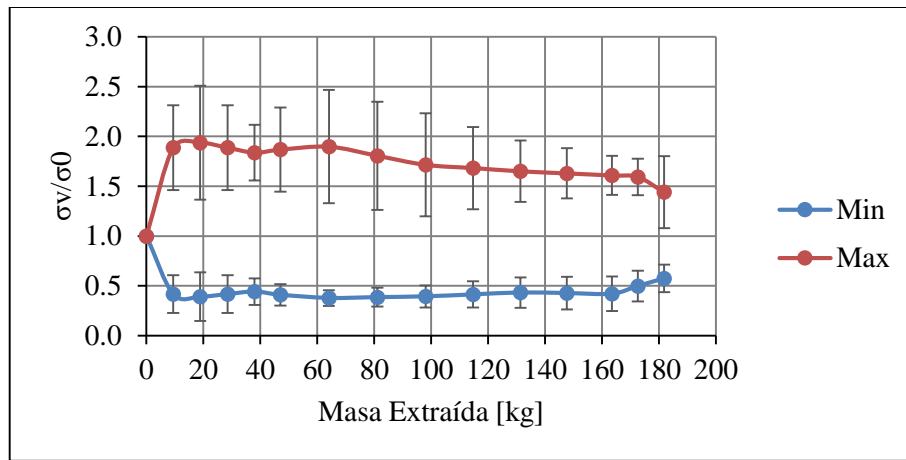


Figura 8-10: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 4.

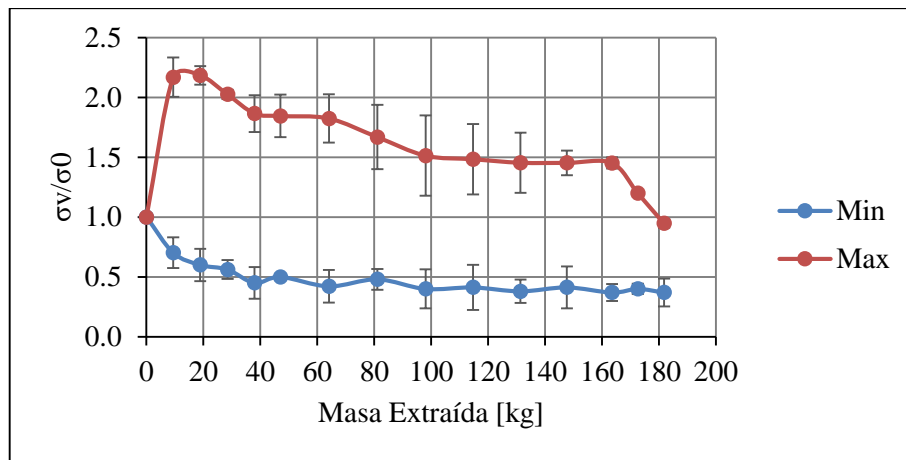


Figura 8-11: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 5.

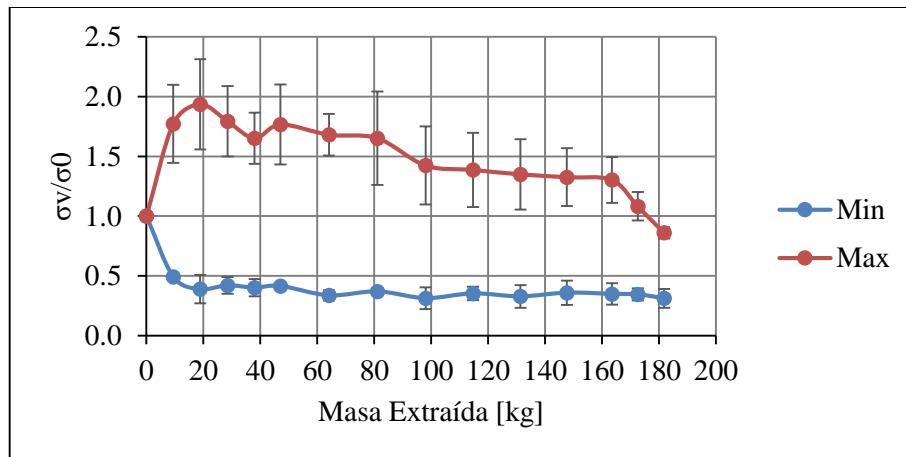


Figura 8-12: Valores máximos y mínimos alcanzados por Celda 6.

