



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

MODELACIÓN FÍSICA DE LA MINERÍA CONTINUA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PABLO ALVAREZ TORRES

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO R.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALDO TAMBURRINO T.
ERNESTO ARANCIBIA.

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2010

RESUMEN EJECUTIVO

Diversos conceptos se han implantado en el proceso de innovación tecnológica de la minería, siendo uno de ellos la Minería Continua, es así como IM2 Codelco, solicita estudiar el comportamiento del flujo gravitacional asociado a esta nueva forma de extracción.

Este trabajo tiene por objetivo analizar, cuantitativa y cualitativamente, los resultados obtenidos de los experimentos realizados relacionados con el de flujo gravitacional, que simulan la extracción continua, a través de un punto de extracción, por medio de un equipo extractor continuo frontal, y un extractor continuo que empuja desde la parte interior del punto de extracción, desarrollados en un modelo 2-D.

Los experimentos realizados arrojan como resultado lo siguiente:

	Descripción	d80 (mm)	d80/d10	Masa total extraída (Kg)	Masa (gr/ciclo)	Tiempo (s/ciclo)	Velocidad (mm/s)	Fuerza Empuje (KN)
Exp 3	P2-G1	19	5,6	30,3	36,9 (±44)	10,7 (±2,9)	5,9 (±1,6)	57
MC Mina	-	25	6,9	-	63 (± 37,6)	11	5,4 (±1,2)	16,6 -7,1

Comparación experimento y escala mina sistema dozer (los valores MC Mina están escalados a valores de modelo)

Donde se observa que la masa extraída en la experimentación es menor que la obtenida del prototipo.

Los experimentos logran emular la cinemática del sistema dozer, donde el sistema de extracción escalado y el sistema de extracción real arrojan resultados que están dentro del orden de magnitud del sistema de MC Mina. Donde se aprecia que los parámetros de mayor incidencia en el modulo experimental corresponde a la granulometría y a la ubicación espacial del sistema.

Por último se recomienda incluir nuevas variables de diseño a estudiar, como también realizar un estudio comparativo entre el flujo gravitacional asociado a un LHD contrarrestado con el generado por un extractor continuo.

ABSTRACT

Several concepts have been introduced in the process of technological innovation in mining, one of which mining will continue, therefore, IM2 Codelco, claims study the behavior of gravitational flow associated to this new form of extraction.

This paper has as objective, to analyze, quantitatively and qualitatively, the results of experiments related to gravity flow, to simulate the continuous extraction, through a draw point, by means of, a frontal equipment and an equipment that pushing from the inside of the draw point, developed in a 2-D model.

Experiments show the following results:

	Description	d80 (mm)	d80/d10	Total mass extracted (Kg)	Mass (gr/ciclo)	Time (s/ciclo)	Velocity (mm/s)	Pushing Force (KN)
Exp 3	P2-G1	19	5,6	30,3	36,9 (± 44)	10,7 ($\pm 2,9$)	5,9 ($\pm 1,6$)	57
MC Mina	-	25	6,9	-	63 ($\pm 37,6$)	11	5,4 ($\pm 1,2$)	16,6 -7,1

Comparison experiment and scale mining dozer system (Mina MC values are scaled to model values)

It is observed that the extracted mass in experiments is less than that obtained from the prototype.

The experiments are able to emulate the dozer system kinematics, where the scale extraction system and extraction system real yield results which are in the order of magnitude of the MC system. It is observed that the parameters of greatest influence in the experimental module corresponds to the particle size and spatial location of the system.

Finally it is recommended new design variables to consider, as a comparative study between gravity flow associated with a LHD countered with that generated by a continuous extractor.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradecer a mis padres, quienes son pilares fundamentales en la formación que recibí, por su incondicional apoyo cada vez que emprendo un nuevo proyecto. Así también a mi hermano Esteban, quien me permite tener un nuevo punto de vista de todo lo que me rodea y así dar un equilibrio a lo que vivo. A ti niña, por que estuviste cuando más lo necesite, ánimo y comprensión, paciencia y aliento, esas cosas que no todos logran comprender, pero que sin duda tu supiste regalar.

Quisiera agradecer también a todos quienes formaron parte de este proyecto, a David, Makarina, Luchito, Manuel quienes permitieron llevar a cabo y a buen puerto el desarrollo los experimentos, y también a la paciencia de Raúl, quien ha sido pilar y cable a tierra en el transcurso de este mismo proyecto, por su tiempo y por sus consejos, por la confianza y por los retos, que son el inicio de una larga, espero, carrera profesional.

También mencionar a todos aquellos amigos, compañeros, familiares, que me han acompañado a lo largo de toda una vida y que hoy están presentes en uno de mis más grandes proyectos, no es que no recuerde nombres, si no que han sido tantos que falta hoja para poder mencionar y dar el espacio que cada uno de ustedes merece.

Y claro, como dejar de agradecer a ese colegio, si a ese antiguo y gran colegio, que como un día lo leí, es verdad, hoy lo siento, pues aún resuena fuerte ese I-ene-ese-te-i.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	Planteamiento del Problema.....	2
1.2	Objetivos y Alcances.....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.1	Objetivos Específicos.....	3
1.3	Alcances.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Minería por Block-Panel Caving.....	4
2.1.1	Factores que impactan negativamente al método Block Panel Caving.....	6
2.2	Innovando hacia la Minería Continua.....	6
2.3	Minería Continua.....	8
2.3.1	Acondicionamiento del Macizo Rocoso.....	8
2.3.2	Extracción Continua Dozer Feeder.....	10
2.3.3	Transporte Continuo.....	11
2.3.4	Fragmentación Continua.....	11
2.4	¿Por qué Minería Continua?.....	12
2.5	Desarrollos del Proyecto Minería Continua.....	12
2.6	Flujo Gravitacional.....	13
2.6.1	Elipsoides de Extracción y de Movimiento.....	13
2.7	Modelos Físicos.....	14
2.8	Conclusiones.....	16
3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	17
3.1	Metodología de Estudio.....	17
3.2	Análisis de información disponible.....	18
3.3	Escalamiento de Variables.....	20

3.4	Escalabilidad del Modelo	23
3.4.1	Modelo Escalado 1:50	23
3.4.2	Dozer Escalado	24
3.5	Conceptos Experimentales	25
3.5.1	Galería de Servicio	25
3.5.2	Dintel	25
3.5.3	Placa Móvil.....	25
3.5.5	Zona de Movimiento	26
3.6	Colgaduras.....	26
4.	EXPERIMENTACIÓN	29
4.1	Instalación Experimental	29
4.1.1	Características asociadas al Modelo Físico	29
4.1.2	Consideraciones Experimentales.....	32
4.2	Instrumentación	34
	• Marcadores físicos.....	34
	• Celda de carga	34
	• Strainmeter	34
	• Medidor de presión.....	34
4.3	Distribuciones Granulométricas	34
4.4	Protocolo de preparación de muestras.....	36
4.4.1	Fabricación de Muestras.....	36
4.4.2	Homogenización de Muestras	36
4.5	Calibración celda de carga.....	36
4.6	Protocolo experimental.....	37
4.6.1	Carguío	37
4.6.2	Desarrollo de la Prueba	39
4.6.3	Análisis de Datos.....	39

5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	40
5.1	Experimento 1	40
5.2	Experimento 2	41
5.3	Experimento 3	43
5.4	Experimento 4	45
5.5	Experimento 5	47
5.6	Experimento 6	49
5.7	Experimento 7	51
5.8	Experimento 8	53
5.9	Experimentos 9, 10 y 11	55
5.10	Experimento 12	56
5.11	Experimentos 13, 14 y 15	58
5.12	Experimentos 16, 17, 18.....	60
5.13	Experimento 19	62
5.14	Experimento 20	64
6.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	65
6.1	Productividad del Sistema Dozer Feeder	65
6.2	Productividad del Sistema Cuña extractora.....	65
6.3	Productividad en el sistema Dozer Feeder (DF) y Cuña Extractora (CE).....	66
6.4	Colgaduras en los sistemas de extracción	67
6.5	Efecto sobre el elipsoide de extracción	68
6.6	Análisis cualitativo	69
6.6.1	Sistema extracción Dozer Feeder	69
6.6.2	Sistema extracción cuña extractora	69
6.7	Resumen resultados cualitativos experiencias dozer.....	70
6.8	Fortalezas y Debilidades del Modelo Físico	72
7.	CONCLUSIONES	73
8.	REFERENCIAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de métodos de explotación según sostenimiento (Brown, 2003).....	4
Figura 2 Esquema de explotación por Block Caving (Hamrin 2001)	5
Figura 3: Flujo de materiales en Block-Panel Caving Convencional (Brown, 2003)	7
Figura 4: Flujo de materiales en Block-Panel Caving Minería Continua (IM2)	7
Figura 5: Esquema de proceso de la Minería Continua (IM2, 2006a)	8
Figura 6 Plano de fractura, perpendicular al menor esfuerzo principal (Ingeniería de producción del petróleo, 2009)	9
Figura 7 Equipo de extracción continua, Dozer Feeder de Bucyrus	10
Figura 8 Equipo de transporte continuo, Panzer	11
Figura 9 Equipo de trituración continua, Sizer.....	12
Figura 10: Definición del elipsoide de movimiento y del elipsoide de extracción (Castro 2006)	14
Figura 11: Definición de Zona de Extracción y Zona de Movimiento (EZ, MZ), en el lado izquierdo se aprecia la existencia del IEZ ya que no ha interactuado con otras zonas, mientras en el lado derecho corresponde a un EZ debido a la interacción existente. (Fernandez 2009)	14
Figura 12 Experimentos en arena, estudio de flujo gravitacional (Kvapil, 1966).....	15
Figura 13 Etapas Modelación Física (Castro, 2001)	17
Figura 14 Histograma, Toneladas por Ciclo.....	20
Figura 14 Dimensiones del modelo a escala 1:50 de la columna, zanja, calle y galería de producción (dimensiones en milímetros)	23
Figura 15 Equipo Dozer Feeder a escala 1:50 (dimensiones en milímetros)	24
Figura 16 Se observa la ubicación de los conceptos dintel, placa móvil y galería de servicio	25
Figura 17 En rojo se aprecia la zona de flujo o movimiento, mientras que en azul la zona que no presenta mayor movilidad	26
Figura 18 Esquema de la colgadura tipo 1	26
Figura 19 Esquema de la colgadura tipo 2	27
Figura 20 Esquema de la colgadura tipo 3	27
Figura 21 Esquema de la colgadura tipo 4	28
Figura 22 Definición de variables geométricas de la zona de extracción.....	28
Figura 23 Modelo físico 2-D a escala 1:50.	29
Figura 24 Configuraciones para la extracción de material granular, placa móvil en la parte superior y la cuña en la parte inferior.....	30
Figura 25 Diseño esquemático del modelo para distintas distancias de la variable visera-calle.....	31
Figura 26 Diseño esquemático del Modelo Físico con ángulo de batea 75 °	31

Figura 27 Curva granulométrica mineral hundido sectores Inca Oeste (ICO) y Diablo Regimiento (DR)	35
Figura 28 Curva granulométricas utilizadas en el modelo (azul: G1, rojo:G2)	35
Figura 29 Vista en planta de la ubicación de los marcadores físicos	38
Figura 30 Elipsoide extracción experimento 2	42
Figura 31 Elipsoide de extracción experimento 3	44
Figura 32 Elipsoide de extracción experimento 4	46
Figura 33 Mecanismo de extracción del material durante la etapa de ingreso del dozer a la zanja	48
Figura 34 Mecanismo de extracción del material durante la etapa de salida del dozer a la zanja	48
Figura 35 Zona de No Flujo en Azul, lugar donde realiza el movimiento de vaivén el sistema dozer feeder	49
Figura 36 Elipsoide de extracción experimento 6	50
Figura 37 Elipsoide de extracción experimento 7	52
Figura 38 Elipsoide de extracción experimento 8	54
Figura 39 Dozer en sus dos versiones, a la izquierda el sistema de placa móvil acotada, a la derecha placa móvil continua	57
Figura 40 Esquema de la cuña móvil con sus dimensiones en [mm] “Dozer en posición de trabajo”; proyecto cuña móvil y transportador continuo; ingeniería de destalles; puntos de extracción, insertos, guías, vigas de reacción, IM2	58
Figura 41 Esquema que muestra la formación de trabaduras, en rojo el material que se compacta generando trabaduras	59
Figura 42 Esquema que muestra la formación de trabaduras, en rojo el material que no levanta la cuña extractora	61
Figura 43 Elipsoide de extracción experimento 19	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Presiones Operación Sistema Dozer.....	18
Tabla 2 Velocidades Operación Sistema Dozer	19
Tabla 3 Síntesis de las variables escaladas.....	22
Tabla 4 Configuración y objetivos de las experiencias desarrolladas	32
Tabla 5 Resultados del experimento 1.....	40
Tabla 6 Resultados del experimento 2.....	41
Tabla 7 Resultados del experimento 3.....	43
Tabla 8 Características de las colgaduras en el experimento	44
Tabla 9 Resultados del experimento 4.....	45
Tabla 10 Características colgaduras experimento 4	46
Tabla 11 Resultados del experimento 6.....	49
Tabla 12 Características de las colgaduras en el experimento 6	50
Tabla 13 Resultados del experimento 7.....	51
Tabla 14 Características de las colgaduras en el experimento 7	51
Tabla 15 Resultados del experimento 8.....	53
Tabla 16 Características de las colgaduras en el experimento 8	53
Tabla 17 Resultados de los experimentos 9, 10 y 11	55
Tabla 18 Resultados del experimento 12.....	56
Tabla 19 Resultados de los experimentos 13, 14 y 15	58
Tabla 20 Resultados de los experimentos 16, 17 y 18	60
Tabla 21 Resultados de tiempo y velocidad para los experimentos 16, 17 y 18.....	60
Tabla 22 Resultados del Experimento 19.....	62
Tabla 23 Características de las colgaduras en el experimento 19	62
Tabla 24 Resultados del Experimento 20.....	64
Tabla 25 Resumen de los resultados experimentales	66
Tabla 26 Resumen de las colgaduras de los experimentos.....	67
Tabla 27 Resumen características de elipsoides de extracción DF	68
Tabla 28 Comparación de geometría de elipse de extracción para Dozer y cuña extractora	68
Tabla 29 Resumen resultados cualitativos experiencias Dozer.....	71
Tabla 30 Comparación experimento y escala mina sistema Dozer (los valores MC Mina están escalados a valores de modelo)	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El dinamismo propio de la actividad minera, las restricciones que impone la extracción eficiente de los minerales y las condiciones de mercado con mayores exigencias ambientales, asignan nuevos desafíos para las empresas. Es así como un sinnúmero de nuevas tecnologías de proceso han ido difundiéndose a escala mundial. Lo mismo ocurre en lo que atañe a nuevos equipos de extracción, nuevas formas de organización del trabajo y nuevos modelos de cooperación entre firmas terminales (subcontratistas y proveedores de servicios a la producción).

Diversos conceptos se han implantado en este proceso de innovación, uno de ellos, es la Minería Continua, que es un sistema que busca el mejor aprovechamiento del área activa en minería de Block Caving. Este se logra a través de, la intensiva utilización de pre-acondicionamiento, extracción simultánea desde los puntos de una calle y con un sistema de manejo de materiales continuo.

En el horizonte más cercano se busca validar y conceptualizar esta nueva tecnología, para lo cual se han realizado una gama de experimentos que conforman la investigación. El uso de modelos físicos ha sido una de las herramientas más importantes para la comprensión del flujo gravitacional, sin embargo, no ha sido considerada como una herramienta válida para estudiar los diseños aplicados en la minería actual.

El estudio está enmarcado en la comprensión del flujo gravitacional, asociado a un mecanismo de extracción continua, donde se entenderá como extracción continua a la extracción cíclica que difiere del sistema de palas actual en el área basal de movimiento, para lo cual se realizan experimentaciones a escala reducida que permite representar un punto de extracción y su equipo dozer feeder correspondiente.

En este contexto Block Caving Laboratory realiza, a solicitud de IM2 CODELCO, el proyecto “Modelación Física de la Minería Continua”, investigación que da pie al desarrollo de la memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas.

1.2 Objetivos y Alcances

1.2.1 Objetivo General

El objetivo es realizar experimentos de flujo gravitacional que simulan la extracción continua, a través de un punto de extracción y un equipo extractor continuo, desarrollados en un modelo 2-D.

1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos destacan:

- Establecer un modelo minero de comportamiento del sistema de extracción continuo, dozer feeder, que ayude a la determinación de los principales parámetros de diseño.
- Estimar los principales parámetros que inciden en la minería continua asociadas al sistema de extracción, como también estimar la geometría del flujo gravitacional resultante de este método de extracción.
- Introducir el concepto de “maqueta física” o “modelo físico” como una herramienta válida para el diseño minero, tal y como lo es en otras ramas de la Ingeniería.
- Adicionalmente se busca estudiar un nuevo sistema, también propuesto por IM2, del cual se indicarán las ventajas y desventajas comparadas al sistema dozer feeder.

1.3 Alcances

La investigación se restringe al estudio del comportamiento cinemático, ya que, se analizaron esos aspectos del proceso de extracción del material granular, es decir, velocidades del dozer feeder y el patrón de movimiento del material, identificando zonas muertas, formación de colgaduras, y la masa extraída.

Para llevar a cabo los experimentos, se cuenta con información entregada por profesionales de IM2, entre los cuales destacan planos e informes técnicos, sumado a las entrevistas personales que se sucedieron a lo largo del estudio.

Los datos analizados, presión, tonelaje, tiempo, para cada ciclo, son los correspondientes a la operación del equipo de extracción continua en la prueba realizada en el Salvador, esta información compone una base de datos. Para manejar bien la información, se realiza un proceso de identificación de ciclos, donde sólo ingresarán al análisis estadístico, aquellos que sean considerados como ciclos válidos o completos.

Para realizar los experimentos se utilizarán tres granulometrías, una emula la granulometría de Inca Central Oeste (ICO), El Salvador; una segunda emula la granulometría de Diablo Regimiento (DR), El Teniente, y la tercera corresponde a una granulometría que permite estudiar el comportamiento del sistema de extracción, denominada “monotamaño”.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El capítulo a continuación hace una revisión del estado actual de la minería, abarcando pasado, presente y futuro de las herramientas utilizadas en el método de explotación. Como también se centra en las publicaciones que tienen relación con el flujo gravitacional, haciendo referencia a los modelos físicos que se han desarrollado para comprender las leyes físicas que los dominan.

Los métodos de explotación subterránea se puede clasificar basándose en la forma que se sostienen las excavaciones, en la figura 1 se observa las tres formas de sostenimiento, natural, artificial y no soportada, esto en relación a pilares, relleno y hundimiento respectivamente. Y su selección radica en las propiedades del macizo rocoso, (Brown, 2003), nos centraremos brevemente en la minería por hundimiento, Block Panel Caving.

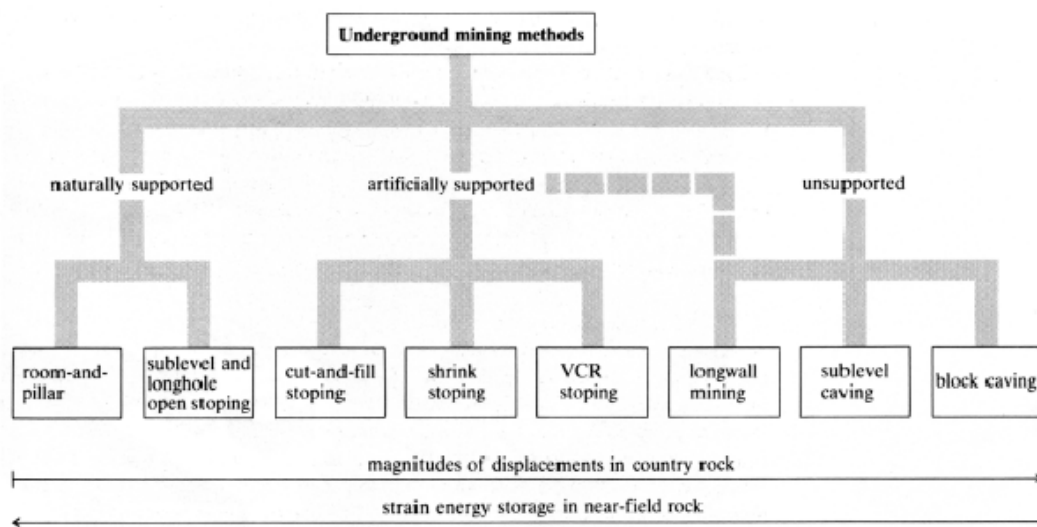


Figura 1: Clasificación de métodos de explotación según sostenimiento (Brown, 2003)

2.1 Minería por Block-Panel Caving

Block-Panel Caving o Hundimiento de Bloques-Paneles es un método de explotación que puede ser aplicado a yacimientos masivos y profundos, suficientemente voluminosos como para justificar los costos de desarrollo de túneles y hundimiento (Behn & Göpfert, 1974). Donde las características de

la roca constituyen el factor esencial del comportamiento del mineral frente al hundimiento (Laubsher 1994).

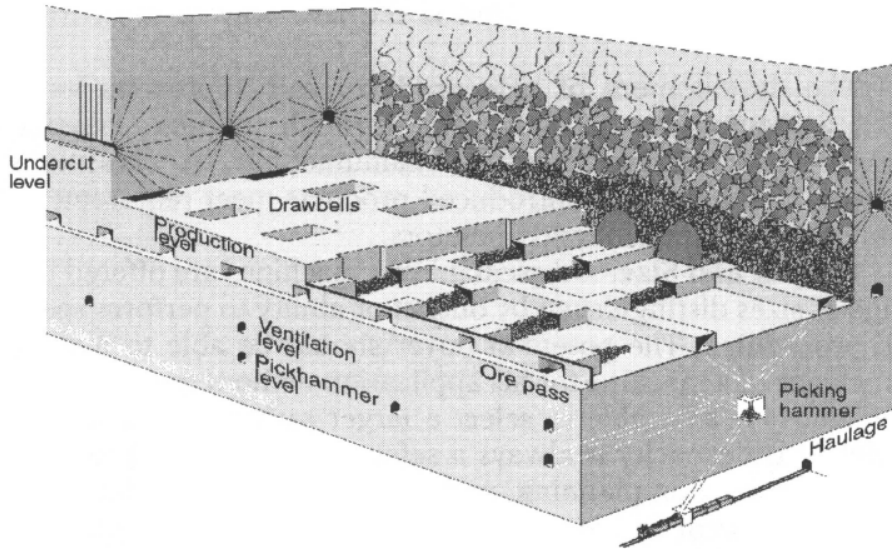


Figura 2 Esquema de explotación por Block Caving (Hamrin 2001)

El manejo de materiales de las minas de Block-Panel Caving se ha realizado mediante procesos discretos, es decir, procesos no continuos (Chacón, 1990) lo que conlleva a que exista un límite productivo asociado a la capacidad de extracción del sistema utilizado (Bravo G, 2005.).

El desarrollo del Block o Panel Caving requiere de un largo tiempo, pero una vez establecido, la cantidad de perforaciones y voladuras necesarias para la producción es mínima, dando lugar a un bajo costo por tonelada debido al alto volumen productivo. El método de Hundimiento causa subsidencia de superficie, por ende la técnica sólo puede utilizarse cuando esto no sea un problema.

Para llevar a cabo su aplicación es necesario desarrollar niveles bajo la zona de interés, con el fin de preparar la extracción, estos son: el nivel de producción, el nivel de transporte y el nivel de hundimiento. Luego se generan bateas - excavaciones en forma de embudo – que se crean para conectar los niveles de hundimiento con el de producción, lugar en el cual está ubicado el punto de extracción. A continuación, se perfora y quema. Esto hace que el caving comience a propagarse por el cuerpo del mineral, siendo extraído por el punto de extracción ubicado en las bateas en el nivel de producción.

El método convencional que se muestra en la figura 2, ha sufrido considerables modificaciones a lo largo del tiempo, dado que los yacimientos actuales están emplazados en roca primaria con una

frecuencia de fractura baja en comparación a lo que ocurría años atrás, sin olvidar la disminución de las leyes que ha ocurrido mientras se ha ido explotando.

Los principales cambios están asociados a la mecanización, al espaciamiento existente entre las calles, a la capacidad productiva de los equipos, los layout utilizados. Lo que ha conllevado a un aumento en la productividad, sin embargo, estos cambios sólo han permitido un aumento gradual.

El concepto Layout está relacionado con la disposición de las galerías de producción, cruzados y zanjas. Entre los cuales destacan Herringbone, Herringbone desplazado, Henderson y Teniente.

2.1.1 Factores que impactan negativamente al método Block Panel Caving

Los factores que inciden negativamente en el desarrollo del método tienen que ver la fragmentación y la tecnología aplicada.

La granulometría ocasiona interferencias operacionales, debido a la formación de colgaduras, lo que se traduce en el cierre de las galerías y puntos de extracción. Además existe un traspaso ineficiente, se deben instalar parrillas, debido al tamaño de las colpas de mineral, dado que si se eliminan las parrillas existe un riesgo alto de existencia de colgaduras en los piques de traspaso, luego la instalación de parrillas se transforma en una nueva interferencia, reducción secundaria.

La tecnología aplicada en el método actual posee características que no permiten pensar en posibilidades futuras de crecimiento, ya que posee una extracción intermitente y una capacidad productiva limitada, sin embargo un quiebre tecnológico que libere estas restricciones, puede permitir articular un nuevo sistema de extracción más eficiente (Lara, 2008).

2.2 Innovando hacia la Minería Continua

Han surgido nuevas tecnologías y conceptos, uno de ellos es la Minería Continua que representa un cambio radical a los procesos mineros actuales, pues su objetivo es transformar la minería subterránea masiva, en una extracción continua o “underground rock factory”.

Previo a su aplicación, se realizan estudios de ingeniería que permitan definir los diseños y modos de operación del sistema continuo; y así dar un salto en la historia de la minería, debido, nuevamente, al ingreso de tecnología a la industria, tal y como lo ocasionó el ingreso de equipos LHD a la minería subterránea masiva, o la aparición del concepto de Flotación en los tratamientos de mineral en la planta.

Dada la productividad asociada al método de Block-Panel Caving y su costo por tonelada, es que este ha sido utilizado de amplia manera en la minería subterránea, sin embargo, la productividad está sujeta a restricciones que son propias del método, tales como: flujo gravitacional, velocidad de propagación

de caving, fragmentación, migración de finos, por mencionar, y también cuenta con otras restricciones, denominadas parámetros de diseño, Laubsher en su manual (Laubsher, 2000) definió 25 parámetros, destacando el diseño de las mallas, espaciamiento, tasa de extracción, dilución, entre otros.

Convencionalmente, la extracción de mineral de los puntos de extracción se ha realizado por medio de LHD (load/haul/dump), que es un proceso discreto, en el cual el material que es extraído, es cargado y transportado en ciclos. Inclusive utilizando las flotas más productivas de LHD, la manipulación del mineral sigue siendo el cuello de botella en la producción hasta el día de hoy, logrando tasas de extracción menores de $0.5 \text{ [t/m}^2\text{-día]}$ (Bravo G, 2005), lo anterior es un problema que tiene su símil en la densidad del tráfico vehicular de las carreteras, sólo se puede aumentar hasta un cierto punto sin causar congestión, y los posibles nuevos aumentos en la capacidad de carga de los vehículos LHD, sólo resultarían en un incremento gradual de la capacidad de manejo de materiales.

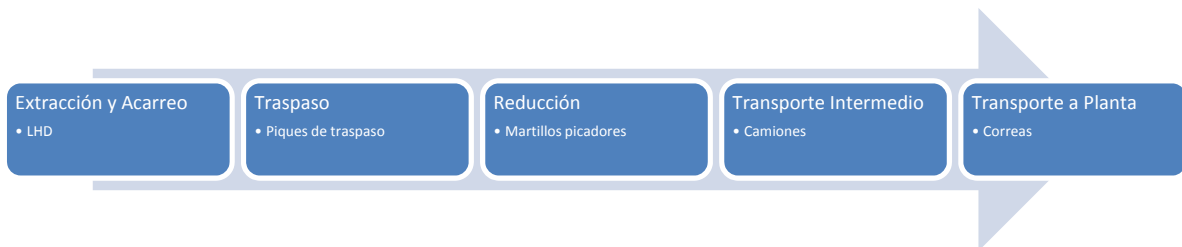


Figura 3: Flujo de materiales en Block-Panel Caving Convencional (Brown, 2003)

Para superar estas restricciones en las operaciones de LHD, se ha pensado en un sistema de transporte continuo, el cual fue desarrollado específicamente para las necesidades del Block y Panel Caving. Cuyo objetivo radica en aumentar la velocidad de extracción de material, de manera de alcanzar mayores productividades, $3 - 5 \text{ [t/m}^2\text{-día]}$ (Orellana, 2010). Ensayos subterráneos iniciales ya han probado que la producción aumenta debido a la aplicación de la Minería Continua (Salvador ICO).

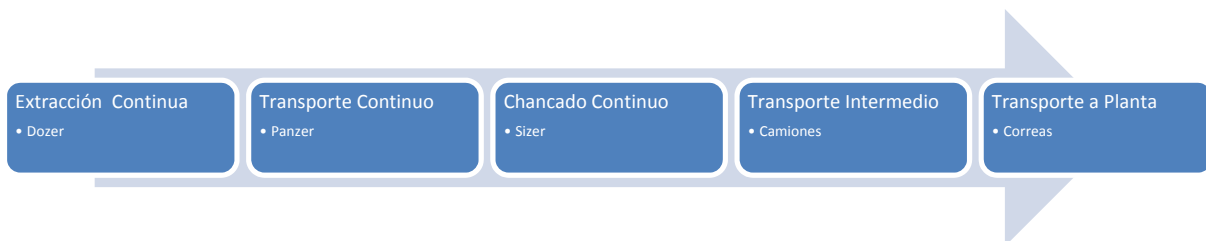


Figura 4: Flujo de materiales en Block-Panel Caving Minería Continua (IM2)

2.3 Minería Continua

El concepto que se asocia a la minería continua es la extracción simultánea del mineral de los puntos de extracción (IM2, 2006b). Lo que en conjunto a un acondicionamiento, un sistema de manejo de materiales continuo y un sistema de transporte, en superficie, adecuado, permitirían tener una mayor capacidad productiva.

La minería continua está compuesta por etapas con sus respectivos equipos tecnológicos asociados:

- Acondicionamiento del macizo rocoso, mediante el fracturamiento hidráulico.
- La extracción continua, equipo dozer feeder
- El transporte continuo, equipo panzer
- Trituración continua, chancador sizer



Figura 5: Esquema de proceso de la Minería Continua (IM2, 2006a)

2.3.1 Acondicionamiento del Macizo Rocoso

La finalidad de este proceso es mejorar los resultados de explotación del mineral que se encuentra en condiciones extremas, de ese modo aumentar los niveles de productividad y disminuir los costos del método actual. El Preacondicionamiento es una etapa que debe ser implementada antes de que se inicie el caving, donde esta tecnología busca tratar in-situ los macizos rocosos competentes, a modo de mejorar la hundibilidad y fragmentación (Brown, 2003).

Para llevar a cabo el acondicionamiento existen tres alternativas: Preacondicionamiento con Fracturamiento Hidráulico (PAFH), Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE) y una combinación de las alternativas mencionadas, Preacondicionamiento Mixto (PAM) (Fuenzalida, 2009)

El fracturamiento hidráulico es una herramienta utilizada en la industria del petróleo, que se ha introducido en la minería del cobre buscando la generación de fracturas que faciliten la operación del Block Panel Caving, que en estos últimos tiempos han dado resultados satisfactorios, donde un selectivo fracturamiento optimiza la recuperación de reservas y el control de producción en los yacimientos de hidrocarburos, tanto de petróleo como de gas, lo que ha promovido su uso a los yacimientos de cobre emplazados en material primario.

El esfuerzo mínimo de los tres principales esfuerzos ortogonales de un punto en la formación productora, es el parámetro determinante que controla la geometría de la fractura. Este esfuerzo se encuentra en el plano horizontal para la mayoría de los casos (debido a la profundidad que se encuentran las formaciones).

Una fractura se desarrolla perpendicular al mínimo esfuerzo y para el caso del fracturamiento hidráulico, si el mínimo esfuerzo esta en el plano horizontal, entonces el desarrollo de la fractura será en el plano vertical (figura 6).

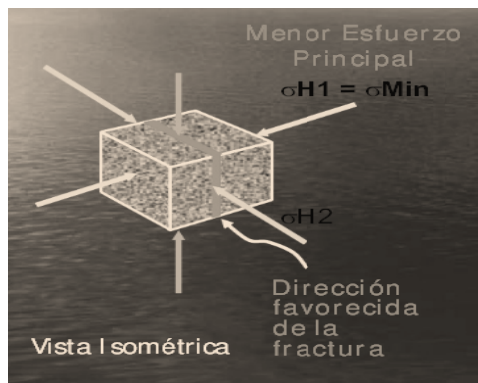


Figura 6 Plano de fractura, perpendicular al menor esfuerzo principal (Ingeniería de producción del petróleo, 2009)

PAFH: Consiste en presurizar una sección de una perforación, inyectando un fluido a presión, generalmente agua, a modo de generar o propagar una fractura a través del macizo rocoso.

DDE: Esta técnica está basada en el uso de explosivos, para llevar a cabo esta técnica, es necesario contar con una caracterización adecuada del macizo rocoso, sumado a detonadores de alta precisión, a modo de generar un diseño de tronadura adecuada

PAM: Consiste en la idea de utilizar las tecnologías de PAFH y DDE de manera conjunta, utilizando los explosivos en una zona previamente acondicionada por el fracturamiento hidráulico.

2.3.2 Extracción Continua Dozer Feeder

El dozer feeder es un desarrollo completamente nuevo. Similar a un alimentador de vaivén, el alimentador de Bucyrus dozer feeder (DF), tiene una propiedad clave - y proposición única – el concepto de movilidad. El DF es instalado directamente bajo el punto de extracción, donde una placa acerada, comienza con el movimiento de vaivén, primero ingresando a la pila de mineral, provocando que material llegue al sistema de transporte continuo y luego retrotrayéndose hacia su posición inicial, generando inestabilidad en la pila al formar un vacío, que permite al sistema continuo generar la extracción continua.

La operación del equipo diseñado por Bucyrus tiene las siguientes características:

- El material escurre hacia el transporte continuo cuando este se encuentra en operación, el ángulo de reposo del material permite la estabilización natural de la pila.
- Es una operación que puede ser manual, o remota.
- Posee una bajo costo de operación

Una ventaja, es que puede ser retirado rápidamente del punto de extracción, en cualquier momento, ya sea para realizar el mantenimiento o para llevar a cabo trabajos de limpieza en el punto de extracción. Esto puede ser necesario, por ejemplo, para descolgar el punto.

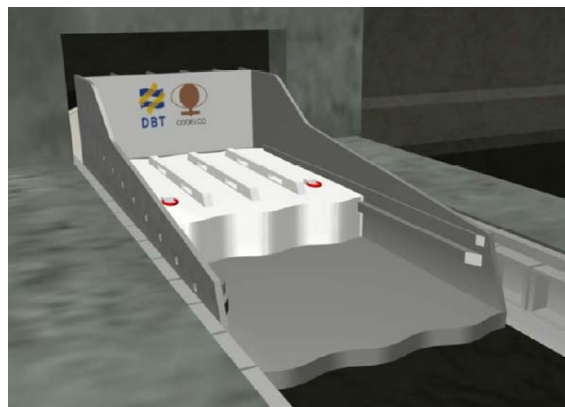


Figura 7 Equipo de extracción continua, dozer feeder de Bucyrus

2.3.3 Transporte Continuo

El equipo, panzer, consta de una coraza metálica sobre la cual es instalado un sistema de cadenas, cuya movilidad permite el transporte del mineral que se ubica sobre estas; pero a la vez y sobre las cadenas se encuentran a distancias de 1 [mt] unas placas metálicas que facilitan la operación del sistema.

Existen distintos tipos de panzer y su diferencia radica en la cantidad de cadenas que posee cada uno de estos, single-chain-center, double-chain-outboard y triple-chain-strand (Chang Ja, 2009).

Los panzer disponibles poseen capacidades nominales que varían entre 1400 a 4500 [tph] dependiendo del ancho de la coraza.

Este sistema posee sistemas automáticos de control, implicando un alto rendimiento y baja utilización de operadores.

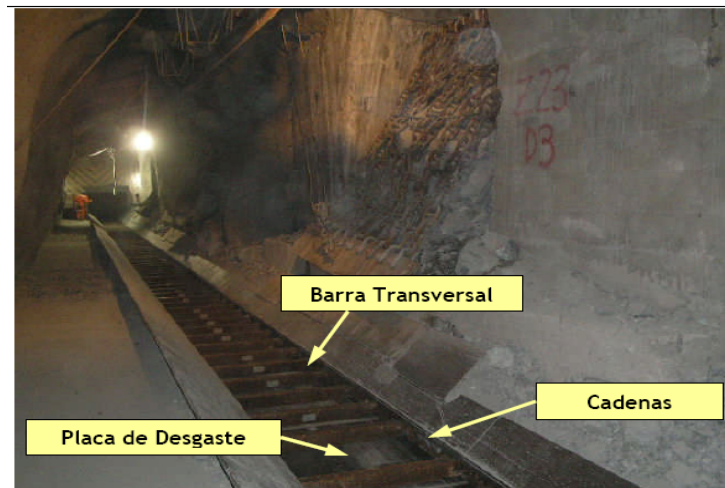


Figura 8 Equipo de transporte continuo, panzer

2.3.4 Fragmentación Continua

Para llegar a ser un “underground rock factory” es necesario incorporar chancadores que se adapten a las necesidades de la minería, en este caso, una de las características principales que debe cumplir para la minería continua, tiene relación con el tamaño y peso, ya que siendo menor que la de los trituradores comunes, lo hace ideal para la minería subterránea. La fragmentación continua tiene por actores principales a los equipos trituradores continuos, entre ellos, el sizer, que es una alternativa a los trituradores actuales.

Este tipo de triturador, consta de dos rodillos dentados, los que giran en sentido opuesto uno contra otro, fragmentando la roca debido a los efectos del cizalle y la tracción, es un triturador que puede ser alimentado de manera continua o discontinua, a lo que se suma que: posee una gran capacidad de producción, es de fácil instalación, se puede mover con relativa facilidad, son de bajo costo de operación, simples robustos y fáciles de mantener. (P. Fuenzalida, 2009).



Figura 9 Equipo de trituración continua, sizer

2.4 ¿Por qué Minería Continua?

La minería continua es un tópico que surge de las necesidades de los planes de desarrollo, y de realizar un mejor uso del área activa, para obtener mayores tasas de extracción. Además, se espera obtener con este método los siguientes beneficios (IM2, 2006e):

- Implementar un sistema de extracción continuo y simultáneo.
- Lograr mecanización y automatización.
- Disminuir la reducción secundaria.
- Reducir costos inversión, operación.
- Aumentar la velocidad de extracción.
- Aumentar la capacidad productiva.

Esta serie de impactos indican que la minería continua es una alternativa probable a desarrollar, sin embargo es una tecnología que está en proceso de validación.

2.5 Desarrollos del Proyecto Minería Continua

Se han establecido una serie de validaciones que buscan estimar los factores de éxito del sistema, los cuales permiten avanzar un escalón más en la escala de validación hacia un nuevo nivel de desarrollo, cabe destacar que cada peldaño otorga información que reduce la incertidumbre y aumenta el nivel de conocimiento para disminuir el número de supuestos con que se analiza la tecnología propuesta (Lara, 2008), hasta hoy se cuenta con las siguientes etapas realizadas por IM2:

- Validación del concepto: Discusión en un plano teórico.
- Validación del elemento clave: Evaluación de la propuesta.

- Validación del sistema integrado: Validación de la propuesta y creación del prototipo, DBT. Prueba El Salvador 2008.

En base a lo anterior y con la información recopilada, se han desarrollado diseños para los niveles de producción de un modulo genérico de minería continua (Lara, 2008), como también se ha hecho hincapié en que el concepto de minería continua aplicado en la operación minera, posee un alto potencial de utilización y desarrollo futuro (Carrasco, 2002).

En una primera instancia, los efectos que puede tener la extracción continua, sobre el elipsoide de extracción y movimiento, son desconocidos (Lara, 2008). Por lo que el estudio del flujo gravitacional asociado es un escalón más que otorga conocimiento acerca del comportamiento del equipo de extracción.

2.6 Flujo Gravitacional

El flujo gravitacional es el proceso mediante el cual material se mueve de su posición, debido al efecto de la gravedad, siendo este el proceso utilizado en las minas de Block-Panel Caving, debido a su bajo costo y alta productividad. Se definirá este fenómeno como el movimiento de un sólido granular provocado por el campo gravitatorio (Antillo, 2010)

El estudio del flujo gravitacional se ha desarrollado a través de diversas formas, desde modelos físicos análogos, aplicaciones de modelos numéricos continuos y discretos, hasta mediciones en terreno, mediante el uso de marcadores (Gustafsson 1998) para describir el movimiento existente en la realidad.

2.6.1 Elipsoides de Extracción y de Movimiento

Uno de los experimentos pioneros corresponde al que intentó clasificar de manera cuantitativa el flujo gravitacional (Kvapil, 1965) modelos físicos a escala en 2D, y de sus observaciones, se desprenden dos zonas demarcadas dentro del elipsoide que se formó (figura XX):

- i) El elipsoide de Extracción, IEZ
- ii) El elipsoide de Movimiento, IMZ

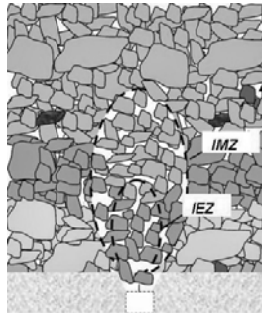


Figura 10: Definición del elipsoide de movimiento y del elipsoide de extracción (Castro 2006)

Es importante notar que la evolución en el diseño de los layout utilizados tiene estricta relación con el flujo gravitacional, teniendo diversas configuraciones, siendo importante en el diseño de estos la interacción que existe entre cada elipsoide. Que se observa en la figura 11 .

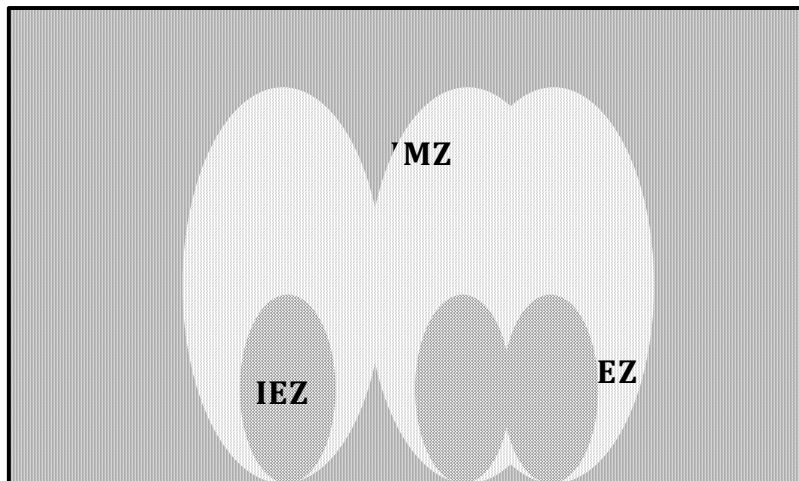


Figura 11: Definición de Zona de Extracción y Zona de Movimiento (EZ, MZ), en el lado izquierdo se aprecia la existencia del IEZ ya que no ha interactuado con otras zonas, mientras en el lado derecho corresponde a un EZ debido a la interacción existente. (Fernandez 2009)

Para comprender el comportamiento del flujo gravitacional se han desarrollado diversas alternativas, entre ellas destacan los modelos físicos, los modelos numéricos, entre estos últimos están, los autómatas celulares, elementos discretos, modelos continuos y cinemáticos.

Este trabajo se enfoca en el análisis de un modelo físico.

2.7 Modelos Físicos

El término “semejante” es familiar de los conocimientos de la geometría, es así como este término puede ser generalizado y aplicado a los fenómenos físicos (Langhaar, 1951), de ese modo comprender

qué ley física rige al sistema, el éxito de los modelos físicos radica en que las cantidades físicas pueden ser completamente descritas con las leyes fundamentales de la mecánica.

Han habido muchos intentos para responder a las preguntas acerca de como se comporta el flujo gravitacional, sin embargo, la comprensión de este, es aún un desafío. Las respuestas a estas interrogantes tienen un gran impacto en lo que a diseño minero respecta, no obstante a lo anterior, se está en una etapa en la cual se sigue aprendiendo.

Mucho de lo que ya ha sido aprendido proviene de las observaciones de modelos físicos, figura 12, (Kvapil) y observaciones que se han realizado a los mismos puntos de extracción (Janiled y Kvapil, 1966).

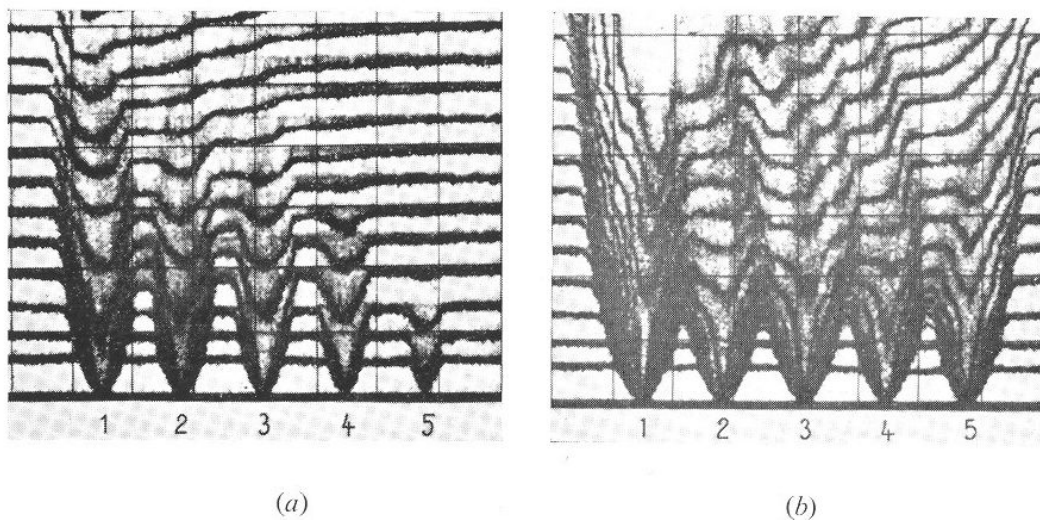


Figura 12 Experimentos en arena, estudio de flujo gravitacional (Kvapil, 1966)

La efectividad del modelo depende del grado de similitud con que se haya realizado, existiendo tres tipos de similitudes, geométrica, cinemática, y dinámica (Castro, 2006). La similitud geométrica se obtiene de manera directa al utilizar un factor de escala, la cinemática tiene relación directa con las velocidades y movimiento del sistema, mientras que la dinámica o total requiere de mayores recursos, de modo que esta similitud es la que también relaciona las fuerzas que interactúan en el sistema.

En los modelos físicos, utilizando material granular, se pueden lograr dos de las tres similitudes mencionadas (Pöschel et al 2001). No obstante a lo anterior, y si las condiciones del prototipo están bien establecidas, la técnica permite apreciar los mecanismos que se suceden en el flujo gravitacional (R Castro, 2001).

Los Investigadores han estudiado el tema usando principalmente modelos físicos, por analogías con el flujo gravitacional en otras circunstancias, como en silos (Jenike, 1966), por modelamiento matemático o numérico usando teorías de plasticidad (Pariseau y Pfleider, 1968) o la teoría de la probabilidad (Jolley, 1968). Dichas teorías, basadas en experimentos de arenas, harina y granos, no pueden describir satisfactoriamente el flujo de mineral, debido a que el tamaño de las partículas, y las condiciones de borde existente en la minería no son análogas (Yenge, 1980).

2.8 Conclusiones

Dada la revisión realizada se puede destacar que este trabajo es parte fundamental para el desarrollo y puesta en marcha de nueva tecnología, ayudando en la comprensión y mejoramiento del diseño propuesto.

Diversos autores han buscado herramientas, tanto matemáticas como modelos a escala reducidos, sin embargo, no existe un modelo que pueda pronosticar el fenómeno como tal, sólo se han acercado a la fenomenología dando indicios de su comportamiento.

El estudio esta enfocado a revisar dos formas de extracción, una empujando desde el punto de extracción hacia fuera y la segunda sacando por arrastre. Al ser este sistema de extracción, un sistema innovador, se justifica el estudio correspondiente al análisis de su mecanismo para luego comparar, bajo las mismas condiciones, distintos equipos que buscan hacer de la minería subterránea un “underground rock factory”.

El comportamiento de los elipsoides asociados a nuevos mecanismos de extracción son desconocidos, por lo que notar si existen diferencias importantes entre los métodos actuales y los métodos propuestos es importante para aclarar conceptos y permitir avanzar en la etapa final de puesta en marcha de la Minería Continua.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El capítulo resume la metodología utilizada en la experimentación con el modelo Físico; el capítulo será dividido en dos partes, la primera hace referencia a la Teoría de Modelos, al análisis de los datos y a la escalabilidad de las variables, mientras que la segunda parte define conceptos que permitirán realizar la experimentación.

3.1 Metodología de Estudio

El estudio se realiza en función de la teoría de Modelos, a partir de la cual se realizan experimentos a pequeña escala, que buscan estimar la influencia de los parámetros asociados al diseño minero, como también busca comprender y estimar los parámetros críticos asociados a la operación del sistema de extracción continua.

La experimentación a pequeña escala se lleva a cabo siguiendo etapas propias de la modelación asociada a esta forma de estudio:

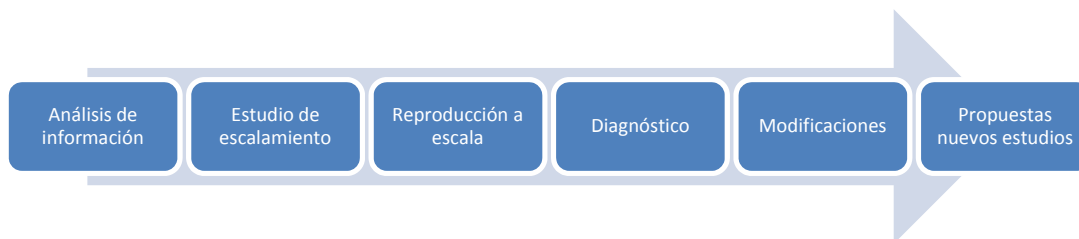


Figura 13 Etapas Modelación Física (Castro, 2001)

En la etapa, estudio de escalamiento, se definen los factores que afectan a las variables de interés, dichos factores están relacionados con las fuerzas que predominan en el fenómeno a escalar, sumado también, a las propiedades del material a escalar, el cual proviene de la mina, en este caso: el prototipo. El siguiente paso en esta metodología corresponde a reproducir a escala el equipo de extracción, Dozer Feeder, como así también reproducir el punto de extracción, lugar donde opera el equipo de extracción, para finalmente reproducir las diferentes granulometrías a ensayar, en ese caso: granulometría ICO Salvador y granulometría Diablo Regimiento Teniente.

Habiendo considerado los supuestos de la primera etapa en la ejecución de la segunda, se procede a la tercera etapa, en la cual se experimenta a modo de comprobar el funcionamiento del equipo escalado en estricta relación con los antecedentes que se cuenta del equipo real, observándose las

limitaciones y los problemas durante el desarrollo de la prueba. En función de los resultados obtenidos en la tercera etapa, se propondrán soluciones a los problemas detectados, apuntando a corregir y optimizar el sistema, consecuente con todo y como parte de un resultado final, se pronunciarán criterios y modificaciones a realizar en el equipo a escala real, como también generar recomendaciones para nuevos estudios, todo lo anterior se traduce en la última etapa de la prueba.

3.2 Análisis de información disponible

En la etapa de análisis de información y para manejar de manera correcta la base de datos con la información de la prueba a escala industrial del sistema de extracción continuo, realizada en El Salvador, se procede a un proceso de identificación de ciclos, donde sólo ingresará al análisis estadístico aquellos ciclos que sean considerados como ciclos válidos o completos.

Se define como ciclo válido a aquellas líneas de la base de dato que poseen información de presión tanto de entrada y de salida, sumado a que, de manera simultánea, exista información de la posición de la placa móvil, que tenga relación con las presiones de entrada y salida.

En el análisis se lleva a cabo la identificación de ciclos válidos a los datos de operación del dozer feeder, para los cuales se define la presión total de entrada y salida de la placa móvil.

Existen cuatro registros de información, dozer 1, dozer 2, dozer 3 y dozer 4, cada uno de ellos representa datos asociados a distintas etapas de la experiencia, ya sea en distintas posiciones o en diferentes puntos de extracción.

En la tabla 1 se muestra un resumen estadístico de las presiones medidas en el pistón que controla el ingreso y salida del sistema dozer a la pila de mineral, mientras que en la tabla 2 se muestran las velocidades del sistema bajo las mismas condiciones. También se observa que la información asociada a los dozer 1 y dozer 3 son los que presentan mayor número de ciclos válidos, correspondientes a la información analizada.

	Presión Salida			Presión Entrada		
	Datos Analizados	Presión (bar)	Desviación estándar (bar)	Datos Analizados	Presión (bar)	Desviación estándar (bar)
Dozer 1	1902	155,2	84,7	2170	55,5	38,0
Dozer 2	160	47,2	48,5	169	45,6	58,4
Dozer 3	838	133,8	74,3	1014	54,6	42,9
Dozer 4	457	16,7	20,0	388	30,8	52,0

Tabla 1 Presiones Operación Sistema Dozer

	Velocidad Salida			Velocidad Entrada		
	Datos Analizados	Velocidad (mm/s)	Desviación estándar (mm/s)	Datos Analizados	Velocidad (mm/s)	Desviación estándar (mm/s)
Dozer 1	1902	46,4	37,3	2170	33,9	18,4
Dozer 2	160	36,8	21,3	169	36,1	20,7
Dozer 3	838	39,9	20,6	1014	31,6	16,4
Dozer 4	457	25,6	22,4	388	25,5	22,9

Tabla 2 Velocidades Operación Sistema Dozer

De las bases de datos proporcionadas por IM2, se tiene que la información asociada a los dozer 1 y dozer 3 son las que poseen mayor cantidad de ciclos completos, de acuerdo a lo anterior y en base a esa información se definen los siguientes parámetros:

- Velocidad de entrada $33,2 \pm 17,8$ [mm/s]
- Velocidad de salida $44,5 \pm 33,5$ [mm/s]
- Presión de entrada máxima $55,2 \pm 39,7$ [bar]
- Presión máxima de salida $148,6 \pm 82,2$ [bar]

Para las velocidades estimadas en el proceso anterior, y para una longitud de carrera de la placa móvil de 1,5 [mt] el tiempo medio por ciclo, asociado a los ciclos válidos corresponde a 1,3 [min/ciclo].

En el período analizado para la tasa de extracción, Diciembre 2007 y Octubre 2008, se tiene que la extracción del sistema alcanza las $7,9 \pm 4,7$ [ton/ciclo], con un mínimo de 0,6 [ton/ciclo] y un valor máximo de 41 [ton/ciclo]. Por lo que la extracción media equivale a 365 [ton/hr]. La distribución de la extracción por ciclo se muestra en la Figura 14.

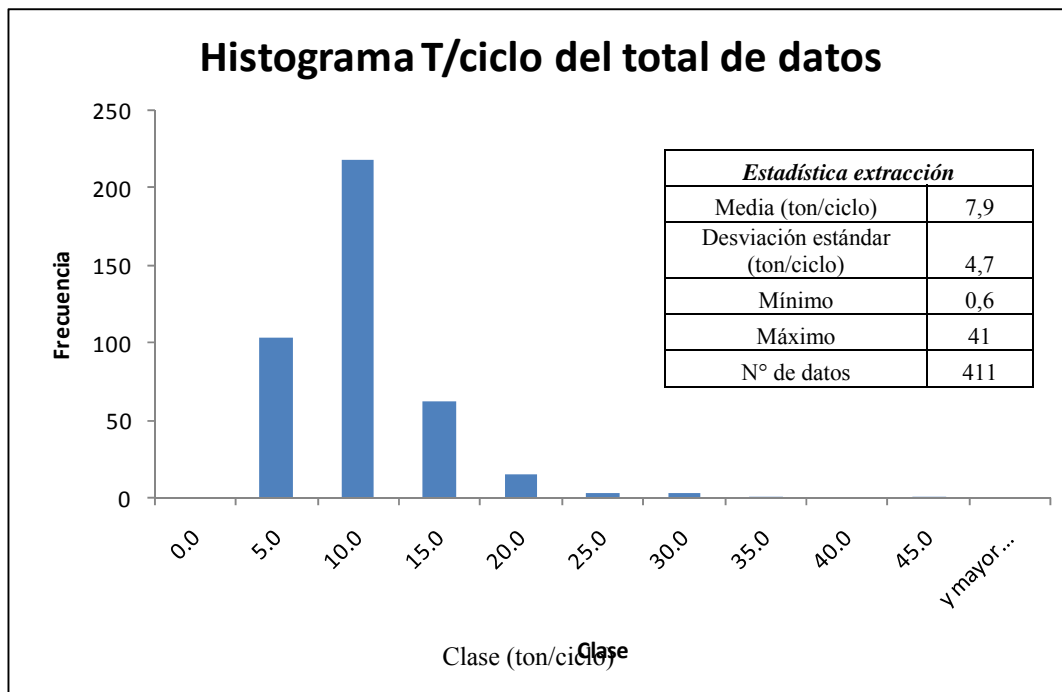


Figura 14 Histograma, Toneladas por Ciclo

Luego en base a esta información obtenida se realizan las comparaciones entre prototipo y modelo.

3.3 Escalamiento de Variables

El escalamiento está centrado en el material granular y en los equipos a reproducir. Para llevar a cabo el estudio del flujo gravitacional asociado a la minería continua, se definirá este fenómeno como el movimiento de un sólido granular provocado por el campo gravitatorio (Antillo, 2010), de tal manera que la fuerza motriz corresponde a la realizada por la gravedad, F_g . Por consiguiente y en base a la segunda ley de Newton, la relación que se debe cumplir entre el modelo y prototipo, para obtener una similitud dinámica, corresponde a:

$$\left. \frac{Inercia}{F_g} \right|_M = \left. \frac{Inercia}{F_g} \right|_P \quad (1)$$

Donde M y P se refieren a modelo y prototipo, respectivamente. La relación anterior conlleva a que deba satisfacerse la siguiente relación:

$$\left. \frac{V^2}{Lg} \right|_M = \left. \frac{V^2}{Lg} \right|_P \quad (2)$$

Donde V y L corresponden a una velocidad y a una longitud característica y los subíndices M y P denotan al modelo y prototipo, respectivamente.

Al definir $\lambda = \frac{L_M}{L_P}$ como escala de longitudes y $\lambda_x = \frac{X_M}{X_P}$ como la escala asociada a cualquier variable X, en función de la relación (2) se obtiene que la relación entre la escala de velocidad y la de longitud está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda_v^2 = \lambda \lambda_g \quad (3)$$

Dado que tanto el modelo como el prototipo experimentan la acción del mismo campo gravitacional, la expresión (3) queda redefinida, dado que $\lambda_g = 1$, reduciéndose a lo siguiente:

$$\lambda_v = \lambda^{1/2} \quad (4)$$

Existe una segunda similitud, la similitud cinemática, la que correlaciona el tiempo y la distancia recorrida por una partícula en el modelo como en el prototipo, indicando que éstas deben recorrer trayectorias homólogas en tiempos homólogos, por ende y con el sustento de la relación (4), la escala de tiempo en función de la relación en la escala de velocidades se describe por la siguiente expresión:

$$\lambda_T = \lambda^{1/2} \quad (5)$$

Para materiales granulares sin cohesión, material con el que se trabaja, se debe cumplir la relación de Coulomb:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (6)$$

Donde τ corresponde al esfuerzo tangencial, σ es el normal y ϕ es el ángulo de fricción interna. Entonces y en rigor con la similitud dinámica que existe entre modelo y prototipo, se debe cumplir que:

$$\left. \frac{\tau}{\sigma} \right|_M = \left. \frac{\tau}{\sigma} \right|_P \quad (7)$$

En otras palabras:

$$\operatorname{tg} \phi \Big|_M = \operatorname{tg} \phi \Big|_P \quad (8)$$

Si se define el coeficiente de roce como:

$$\mu = \operatorname{tg} \phi \quad (9)$$

El resultado de la relación (8) puede extenderse a cualquier otro sistema en el que esté involucrado el roce, en particular al sistema dozer – roca. De este modo, se debe cumplir que:

$$\mu_M = \mu_P \quad (10)$$

Existe otra variable que es interesante analizar, y corresponde a la presión ejercida sobre los cilindros, estos cilindros son los que provocan el movimiento de vaivén en el sistema; donde la relación entre la fuerza de presión F_p y la fuerza asociada a la gravedad, Peso, P , debe conservarse tanto en el modelo como en el prototipo, por lo tanto la relación que se debe cumplir es la siguiente:

$$\left. \frac{F_p}{P} \right|_M = \left. \frac{F_p}{P} \right|_P \quad (11)$$

De la expresión anterior se obtiene que la escala de presión corresponda a lo siguiente:

$$\lambda_p = \lambda_\rho \lambda_g \lambda \quad (12)$$

Donde λ_ρ es la escala de densidad.

Al considerar la densidad de la roca, igual para prototipo como para modelo, y recordando que la fuerza gravitatoria es la misma para ambos, se obtiene que la escala de presiones responde a la siguiente expresión:

$$\lambda_p = \lambda \quad (13)$$

Por lo tanto se tiene lo siguiente:

VARIABLE	ESCALA
Longitud	λ
Área	λ^2
Volumen	λ^3
Velocidad	$\lambda^{1/2}$
Tiempo	$\lambda^{1/2}$
Peso	λ^3
Presión	λ
Fuerza de presión	λ^3
Coefficiente de fricción	1

Tabla 3 Síntesis de las variables escaladas

3.4 Escalabilidad del Modelo

De lo anterior es sabido que se deben cumplir ciertas reglas, fundadas en el concepto de similitud, y el modelo a escala reducida no queda exento de dicha regla, por lo que debe cumplir con la escala de longitudes, λ .

Para seleccionar la escala, se deben considerar que las fuerzas presentes en el modelo estén bien definidas, tal y como lo es en el prototipo, sumado a que debe poseer dimensiones que permitan operar el sistema sin mayores dificultades, es natural que a mayor escala, mayor sea el parecido del modelo al prototipo, sin embargo, se tornan en modelos casi inmanejables, tanto o más por su operación o por el espacio requerido. Mientras que con escalas muy pequeñas, las fuerzas que en el prototipo son despreciables podrían comenzar a jugar un rol más importante, afectando el resultado, generando una distorsión, ya que las fuerzas cohesivas, capilares, de Van der Waals, magnéticas y electrostáticas no son preponderantes ante la gravedad, o bien su efecto es despreciable (Castro, 2001).

Lo anterior, referido a la escalabilidad de las variables involucradas y la escalabilidad del modelo, se traduce en que la escala a utilizar corresponderá a $\lambda = 1/50$.

A continuación se muestran en las figuras 15 y 16 las dimensiones correspondientes al Modelo Físico y al Sistema de Extracción Continuo.

3.4.1 Modelo Escalado 1:50

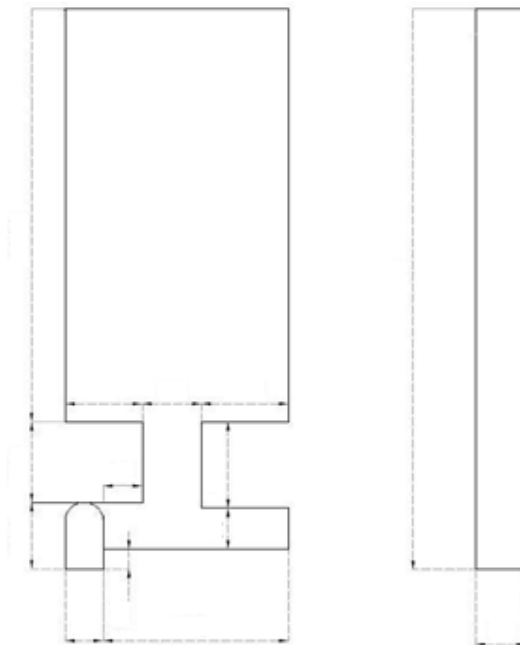


Figura 15 Dimensiones del modelo a escala 1:50 de la columna, zanja, calle y galería de producción (dimensiones en milímetros). Las dimensiones fueron retiradas debido a confidencialidad.

3.4.2 Dozer Escalado

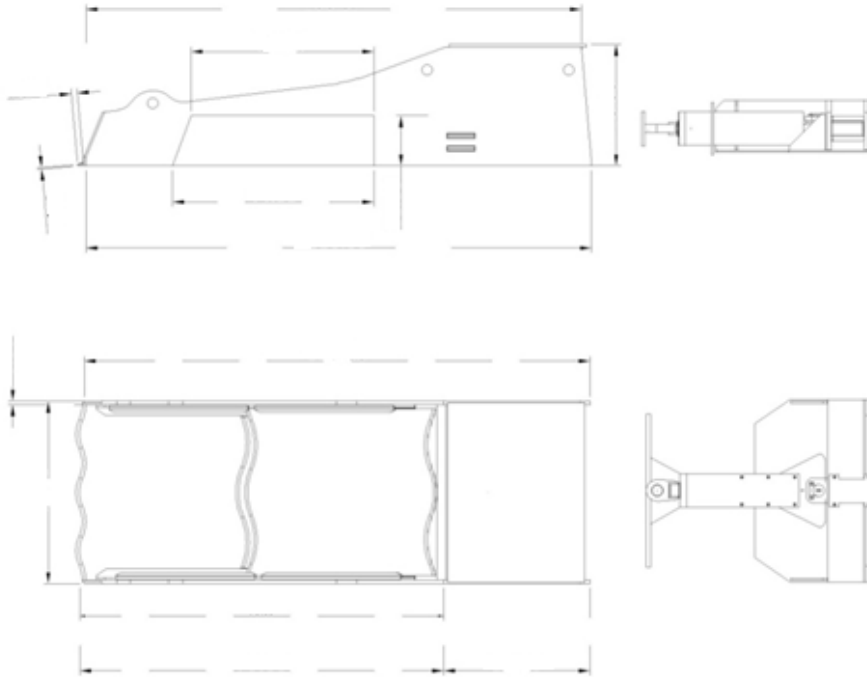


Figura 16 Equipo Dozer Feeder a escala 1:50 (dimensiones en milímetros). Las dimensiones fueron retiradas debido a confidencialidad

3.5 Conceptos Experimentales

Antes de definir las etapas para llevar a cabo las experiencias, es necesario tener presente con anterioridad ciertos conceptos, los que permiten describir los fenómenos observados en el desarrollo de estas (figura 17). Estas definiciones se presentan también en las figuras 17 a 23.

3.5.1 Galería de Servicio: Corresponde a la galería que está tras el dozer, por donde se realizan las mantenciones y limpiezas al equipo.

3.5.2 Dintel: Corresponde a la formación en forma de trapecio que evita que el material se acumule en la parte posterior, sumado a que protege al equipo de extracción.

3.5.3 Placa Móvil: Se define como placa móvil a la placa acerada que realiza el movimiento de vaivén del sistema dozer feeder.

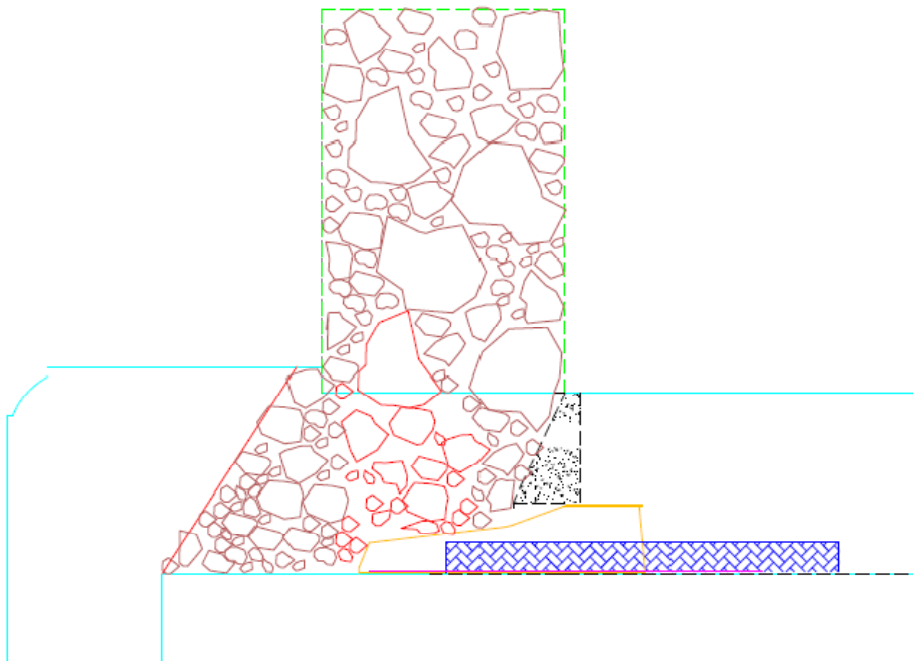


Figura 17 Se observa la ubicación de los conceptos dintel, placa móvil y galería de servicio

3.5.4 Zona Muerta: Se le denominará zona muerta a aquella donde el material no fluye.

3.5.5 Zona de Movimiento: Se le denominará zona de movimiento a aquella por la cual fluye el material, figura 18.

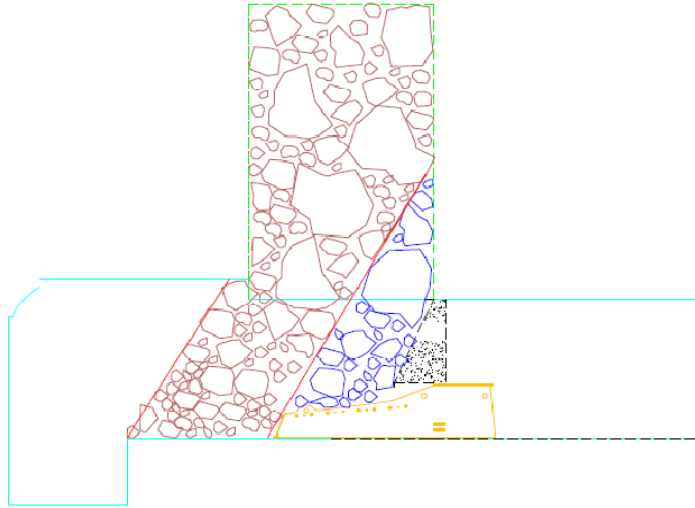


Figura 18 En rojo se aprecia la zona de flujo o movimiento, mientras que en azul la zona que no presenta mayor movilidad

3.6 Colgaduras: se les denominará colgadura a aquella eventualidad, en la cual a lo menos en tres ciclos completos del sistema de extracción, no se obtiene producción, debido a que el material ha quedado en estado de equilibrio, apoyándose en las paredes o dintel, provocando un arco estable que no permite el escurrimiento de material.

Se distinguen 4 tipos de colgaduras, su diferencia radica en la altura a la cual se generan.

3.6.1 Colgaduras Tipo 1: Se producen a una altura inferior a la altura de la visera, en ciertos casos, con gran proximidad al suelo. En este tipo de colgadura no fluye material, a pesar de observar material en el punto, figura 19.

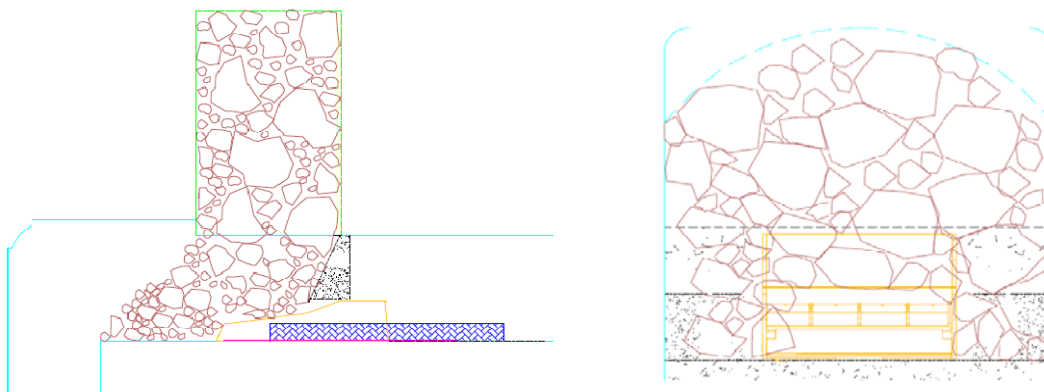


Figura 19 Esquema de la colgadura tipo 1

3.6.2 Colgaduras Tipo 2: Se producen a la altura de zanja, sosteniéndose en la visera por un lado y la galería de servicio por el otro. En este el material no fluye, debido al arco estable que se produce, lo que imposibilita al escurrimiento natural del material, figura 20.

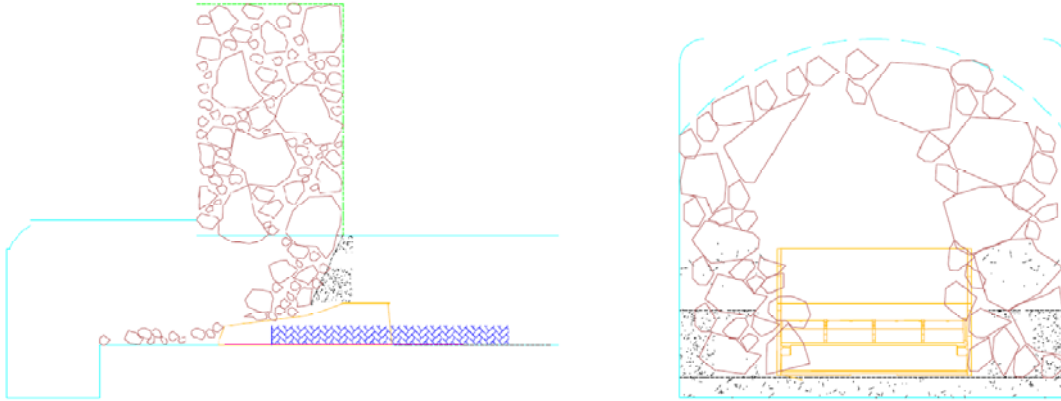


Figura 20 Esquema de la colgadura tipo 2

3.6.7 Colgaduras Tipo 3: Se producen sobre la visera, teniendo como apoyo las paredes de la zanja, o la base del equipo dozer, figura 21.

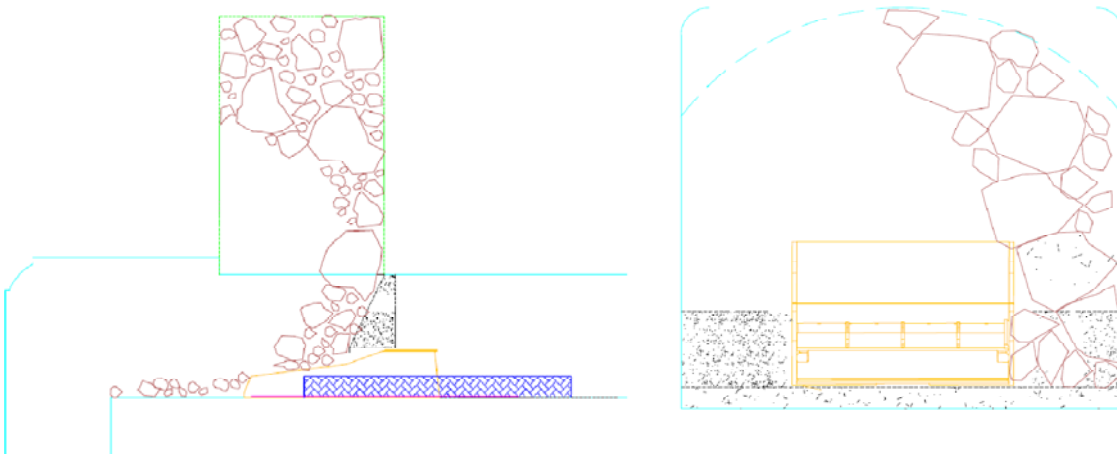


Figura 21 Esquema de la colgadura tipo 3

3.6.8 Colgaduras Tipo 4: Se producen sobre la altura de zanja, teniendo de apoyo los pilares del punto de extracción, figura 22.

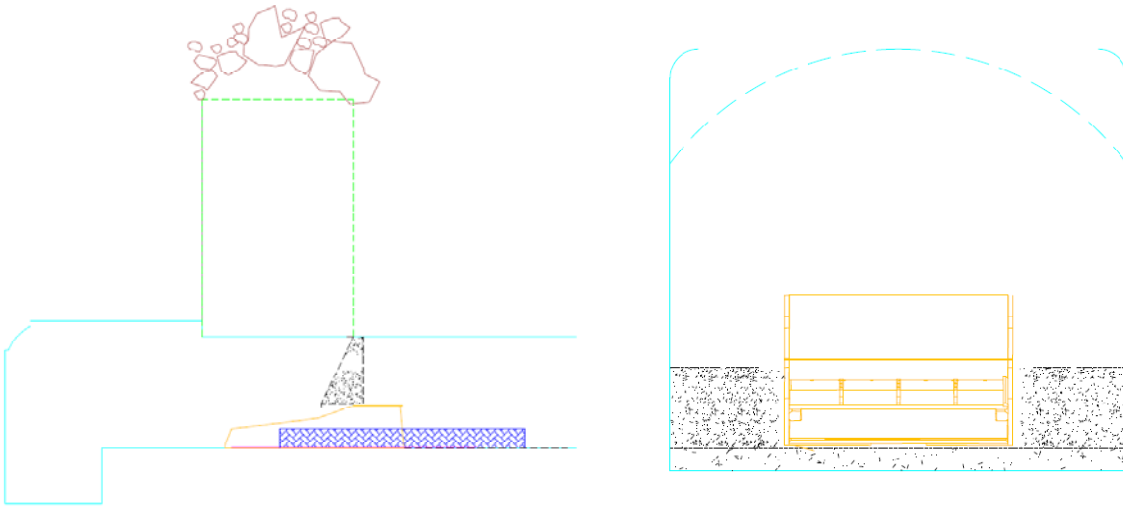


Figura 22 Esquema de la colgadura tipo 4

Las variables que son medidas, se dividirán entre las asociadas al funcionamiento del dozer (colgaduras, tasa de extracción, tiempos de ciclo, presiones) y otras relacionadas con el flujo gravitacional, las cuales están asociadas a las variables α , β_1 , β_2 , y el ancho w asociado al elipsoide, que se indican en la figura 23.

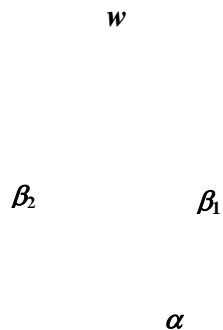


Figura 23 Definición de variables geométricas de la zona de extracción.

4. EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se abarcan los detalles asociados a la experimentación, considerando todos los pasos necesarios para poder realizar la experiencia, teniendo en consideración, toda preparación previa que haya sido necesaria para el desarrollo de la prueba.

Durante el proceso de experimentación, y para cumplir con los objetivos planteados, se realizaron un total de 20 experiencias, lo que genera una base de datos que permite estudiar el comportamiento del sistema de extracción continuo.

4.1 Instalación Experimental

La experimentación fue realizada en las dependencias del Laboratorio de Rocas de la Universidad de Chile, como parte de un trabajo de investigación que se adjudicó el Block Caving Laboratory (BCL), en el Modelo Físico para la Minería Continua.

4.1.1 Características asociadas al Modelo Físico

El modelo físico corresponde a una representación en dos dimensiones, 2D, de lo que corresponde a un punto de extracción, galería de producción, galería de servicio y zanja, el cual caracteriza una altura de columna de 50 [mt]. Es una estructura completamente desarmable, conformada por 16 placas de acrílico, más pequeñas piezas, también hechas en este material, quienes en conjunto con una estructura de fierro y al sistema de extracción dozer feeder en acero inoxidable, conforman el modelo físico, figura 24.

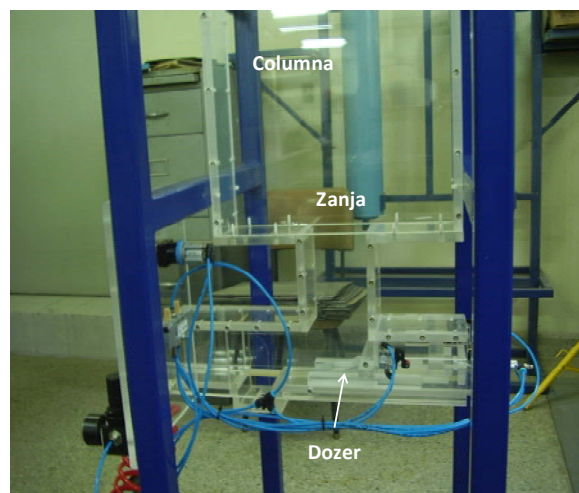


Figura 24 Modelo físico 2-D a escala 1:50.

El sistema de extracción de material corresponde a un sistema de placa móvil, dozer feeder, en los experimentos del N° 1 al 12; Cuña Extractora Frontal, en los experimentos del N° 13 al 20. El movimiento de la placa móvil lo realiza un sistema de aire comprimido, que permite simular el movimiento de vaivén del equipo real, el cual se activa al accionar un botón.

Para las experiencias se utilizan las posiciones P_2 y P_3 , en caso del sistema dozer feeder y dos posiciones P_1 y P_2 para el caso de la Cuña Frontal Extractora, como se muestra en la figura 25:

Figura 25 Configuraciones para la extracción de material granular, placa móvil en la parte superior y la cuña en la parte inferior

La extracción del material se realiza por un único punto de extracción; sin embargo, la posición de descarga del material, varía para ciertas experimentaciones N° 9, 10 y 11, figura 26.

Figura 26 Diseño esquemático del modelo para distintas distancias de la variable visera-calle

El diseño original de la zanja es de paredes verticales, de igual modo, se contempló considerar en la experimentación un caso con paredes inclinadas, experimento N° 8, definidas por el ángulo $\alpha = 75^\circ$. En la figura 27 se muestra la variable de diseño.

Figura 27 Diseño esquemático del Modelo Físico con ángulo de batea 75°

4.1.2 Consideraciones Experimentales

Las condiciones experimentales y el objetivo de cada experiencia se observan en la Tabla 3:

Experiencia	Nomenclatura	Objetivo Experimento
1	P2, Gm	Experiencia de prueba, observar comportamiento del sistema
2	P2, Gm	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 2
3	P2, G1	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 2
4	P2, G2	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 2
5	P2, Gm, AA	Observar mecanismo de extracción y colgaduras de material que ocurren sobre el dozer,
6	P3, G1, CC	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 3, medir esfuerzo durante la extracción y llenado.
7	P3, G2	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 3
8	Ang, P2, G1	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 2.
9	P2, G1, V8	Determinar la productividad de sistema dozer para el caso de alargar la distancia visera-calle 8 mm (0,4 m escalado).
10	P2, G1, V16	Determinar la productividad de sistema dozer para el caso de alargar la distancia visera-calle 16 mm (0,8 m escalado).
11	P2, G1, V24	Determinar la productividad de sistema dozer para el caso de alargar la distancia visera-calle 24 mm (1,2 m escalado).
12	P2, G1	Estudiar funcionamiento del dozer (8 bares - 100 ciclos). Medir fuerza mínima necesaria para el movimiento del dozer.
13	CE, CP1,Gm	Medir productividad de cuña extractora en posición 1
14	CE, CP1,G1	Medir productividad de cuña extractora en posición 1, (100 ciclos)
15	CE, CP1,G2	Medir productividad de cuña extractora en posición 1, (100 ciclos)
16	CE, CP2,Gm	Medir productividad de cuña extractora en posición 2, (100 ciclos)
17	CE, CP2,G1	Medir productividad de cuña extractora en posición 2, (100 ciclos)
18	CE, CP2,G2	Medir productividad de cuña extractora en posición 2, (100 ciclos)
19	CE, CP1,G1	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 1 cuña extractora.
20	CE, CP1,G1	Estudiar frecuencia de colgaduras, elipsoide de extracción y estadísticas de extracción en la posición 1 cuña extractora.

Tabla 4 Configuración y objetivos de las experiencias desarrolladas

Donde la notación utilizada significa lo siguiente:

- G1: granulometría tipo Salvador ICO
- G2: Granulometría tipo El Teniente DR
- Gm: granulometría mono tamaño +5 mm -1/2”
- P2: Posición 2 dozer, $P_i = 60$ mm
- P3: Posición 3 dozer, $P_i = 78$ mm
- AA: Se posiciona plancha de acrílico en las paredes laterales del modelo, de tal manera que el dozer queda en contacto directo con ellas
- Ang: Ángulo zanja, $\alpha = 75^\circ$
- CC: Se instala celda de carga en la base del modelo
- Ang: Se cambia ángulo de batea a 75°
- V8: Se adiciona 8 mm a la distancia visera-calle, lo cual sería equivalente a aumentar el ancho del pilar en 0,4 m en escala mina.
- V16: Se adiciona 16 mm a la distancia visera-calle, lo cual sería equivalente a aumentar el ancho del pilar en 0,8 cm en escala mina.
- V24: Se adiciona 24 mm a la distancia visera-calle, lo cual sería equivalente a aumentar el ancho del pilar en 1,2 m es escala mina.
- CE: Utilización de cuña extractora.
- CP1: Posición 1 cuña extractora, debajo de material en reposo, con término de la carrera directamente bajo la visera
- CP2: Posición 2 cuña extractora, debajo de la batea, con inicio de la carrera directamente debajo de la visera.

4.2 Instrumentación

Para llevar a cabo la realización y control de las experiencias, es necesario contar con ciertos equipos y herramientas, para posteriormente realizar el análisis de los datos. En las pruebas son necesarios:

- **Marcadores físicos:** Los marcadores están hechos del mismo material que el empleado en la experimentación, gravilla. A diferencia de ésta, los marcadores tienen un color representativo, verde, y un tamaño en particular, d_{50} . El coloreado se logra al aplicar una película de spray, a modo de no interferir con las propiedades del material, a lo cual se suma a que cada marcador posee una identificación única, la cual es realizada con un marcador de tinta indeleble negra.
- **Celda de carga:** Se utiliza un transductor para convertir una fuerza en una señal eléctrica, en este caso se busca medir el *esfuerzo vertical* a medida que ocurre la extracción de material al utilizar el sistema de extracción continua.
- **Strainmeter:** Corresponde a la herramienta que permite la recolección de datos provenientes de la celda de carga, para las experiencias se utiliza el modelo TC-31K, sumado a un Switching Box de 5 canales para el modelo TC-31K de la marca TML.
- **Medidor de presión:** Corresponde a un medidor tipo reloj, el cual permite registrar la presión de entrada y salida del sistema dozer feeder a la columna de material.

4.3 Distribuciones Granulométricas

Es necesario que el material granular deba conservar la escala geométrica y coeficiente de fricción de la roca fragmentada del prototipo; y para preservar el coeficiente de fricción, se utiliza material granular angular generado a partir de grava chancada. Mientras que para conservar la escala geométrica en el desarrollo de la investigación se escalan tres tipos de granulometrías. La primera granulometría emula a una proveniente del sector Inca Oeste de la División El Salvador, mientras que la segunda representa la granulometría proveniente de Diablo Regimiento, de La División El Teniente, finalmente se tiene Gm, que corresponde a una granulometría que permite realizar pruebas para estudiar y analizar el funcionamiento del mecanismo utilizado.

La distribución del material se muestra en las curvas granulométricas de la figura 28 que corresponde a los datos del prototipo, mientras que las de la figura 29 pertenecen a la curva utilizada en el modelo.

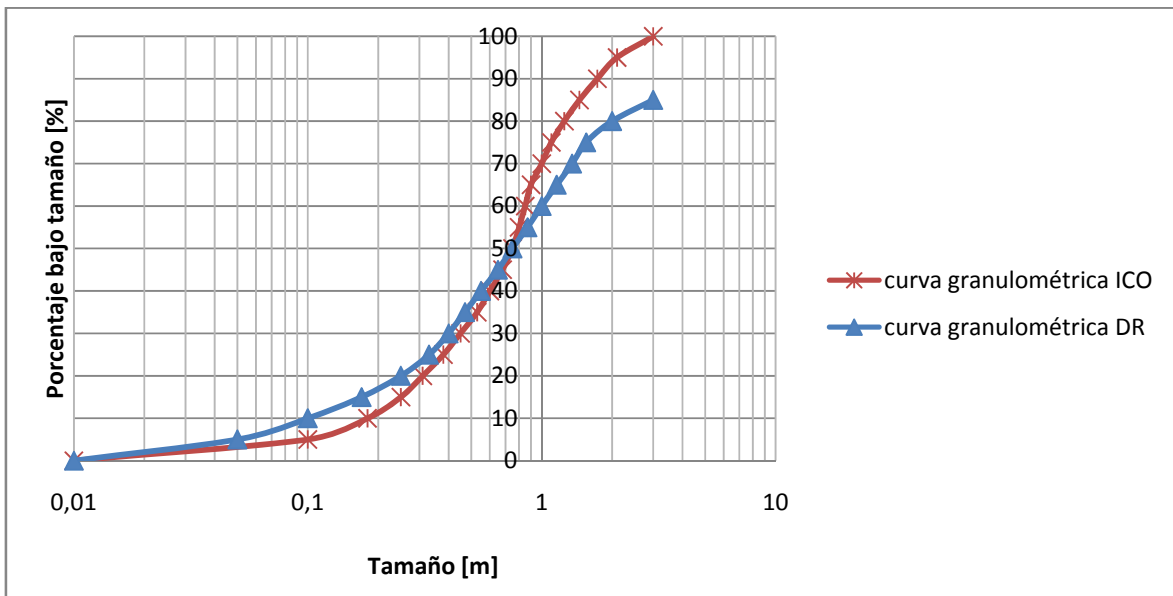


Figura 28 Curva granulométrica mineral hundido sectores Inca Oeste (ICO) y Diablo Regimiento (DR)

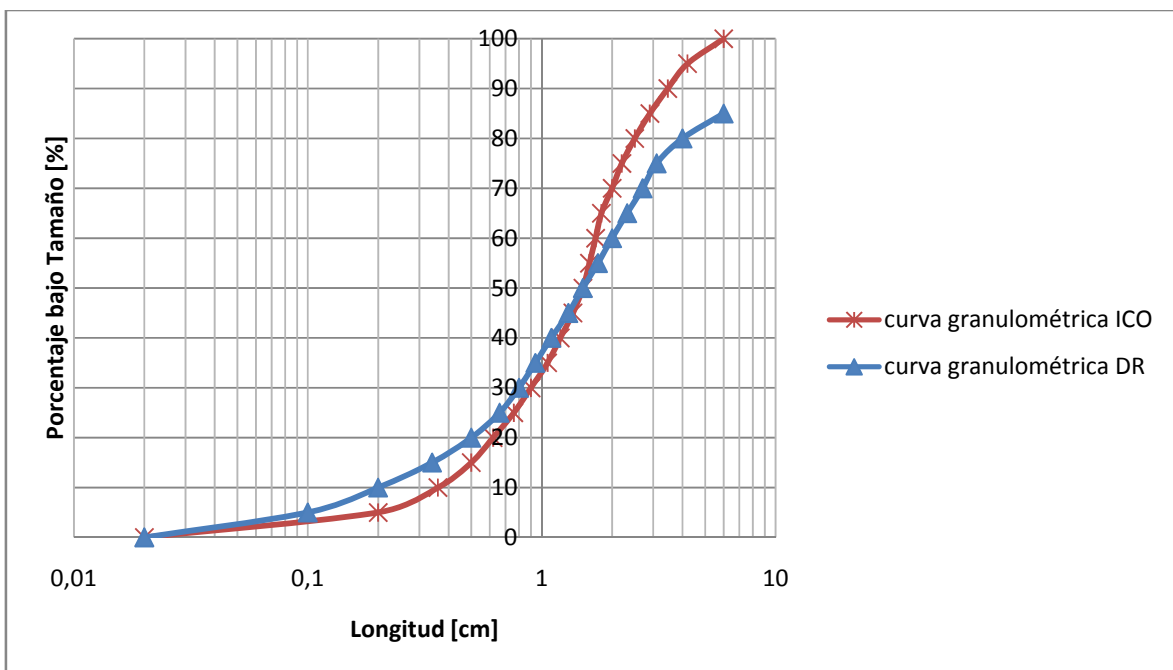


Figura 29 Curva granulométricas utilizadas en el modelo (azul: G1, rojo:G2)

4.4 Protocolo de preparación de muestras

4.4.1 Fabricación de Muestras

Para lograr obtener las curvas granulométricas que mantuviesen sus características de angulosidad y rugosidad, se utilizan los siguientes materiales:

- Gravilla
- Chancador
- Tamices
- Harnero mecanizado
- Harnero manual
- Balanza digital

Para lograr obtener las distribuciones granulométricas, se prosigue de la siguiente forma:

1. El material es secado en un horno por 48 hrs a 250 ° C.
2. El material es chancado a un setting igual al tamaño máximo requerido.
3. El producto es tamizado y pesado para obtener el material retenido por la malla.
4. Se separan los tamaños que se necesitan.
5. El material se vuelve a chancar el material.
6. El producto es tamizado y se obtiene el retenido por malla a modo de completar el material que faltase.
7. Se repiten los pasos 4 y 5 hasta completar el material requerido.

4.4.2 Homogenización de Muestras

Cada una de las tres muestras, de 70 kg aproximadamente, es homogeneizada de la siguiente forma:

1. Cada muestra se coloca en un tambor.
2. Una vez ahí se utiliza una puruña, a medida que el recipiente gira, se saca material del interior del recipiente y luego se regresa a este , así por 10 minutos
3. Se realiza lo mismo para las diferentes mezclas

4.5 Calibración celda de carga

Se realiza la calibración de celda de carga por el método de comparación, utilizando como referente una balanza electrónica certificada.

- a) Se definen pesos nominales, cada peso es puesto sobre la balanza electrónica asignándole el valor que indica la balanza a cada uno de los pesos.
- b) Se coloca un primer peso sobre la celda de carga, y se tabula lo que indica la celda de carga y el valor nominal del peso.
- c) Se prosigue colocando pesos sin sobrepasar la capacidad máxima de la celda de carga y se realiza la tabulación de los datos.
- d) Se realiza una correlación, regresión lineal, entre los datos nominales y los obtenidos por la celda de carga, obteniendo la relación existente entre peso nominal y peso de la celda de carga.

4.6 Protocolo experimental

Los pasos experimentales se pueden definir en las siguientes etapas: Carguío, Desarrollo de la Prueba y Análisis de Datos, sin embargo para realizar la experimentación, se debe recordar una serie de conceptos definidos en detalle en el capítulo III.

4.6.1 Carguío

El proceso de carguío de material al modelo se lleva a cabo en los siguientes pasos:

- a) Se definen niveles de carga, a partir de la altura de zanja existen 10 niveles que se encuentran separados a 10 [cm] uno respecto el otro, mientras que se definen 3 niveles al interior de la zanja, uno en la base, uno en la mitad de zanja y el tercero a la altura de visera.
- b) El llenado se realiza nivel a nivel, respetando lo indicado anteriormente.
- c) En cada nivel se instalan marcadores físicos, siguiendo una malla regular en cada nivel y se registra la altura a la cual se instalan.
- d) En el último nivel se posicionan marcadores distintivos que indicarán el término de la experiencia.

Instalación de Marcadores Físicos

La instalación de marcadores tiene la siguiente finalidad:

- a) Estudiar la movilidad de las partículas en el modelo físico
- b) Determinar la geometría del elipsoide asociado al flujo gravitacional

Los trazadores están colocados en distintos planos. Uno a nivel suelo, dos en la zanja (en su base y a media altura) y el resto en la columna, separados cada 10 cm partiendo de la altura de visera, en la figura 30 se muestran sus distribuciones:

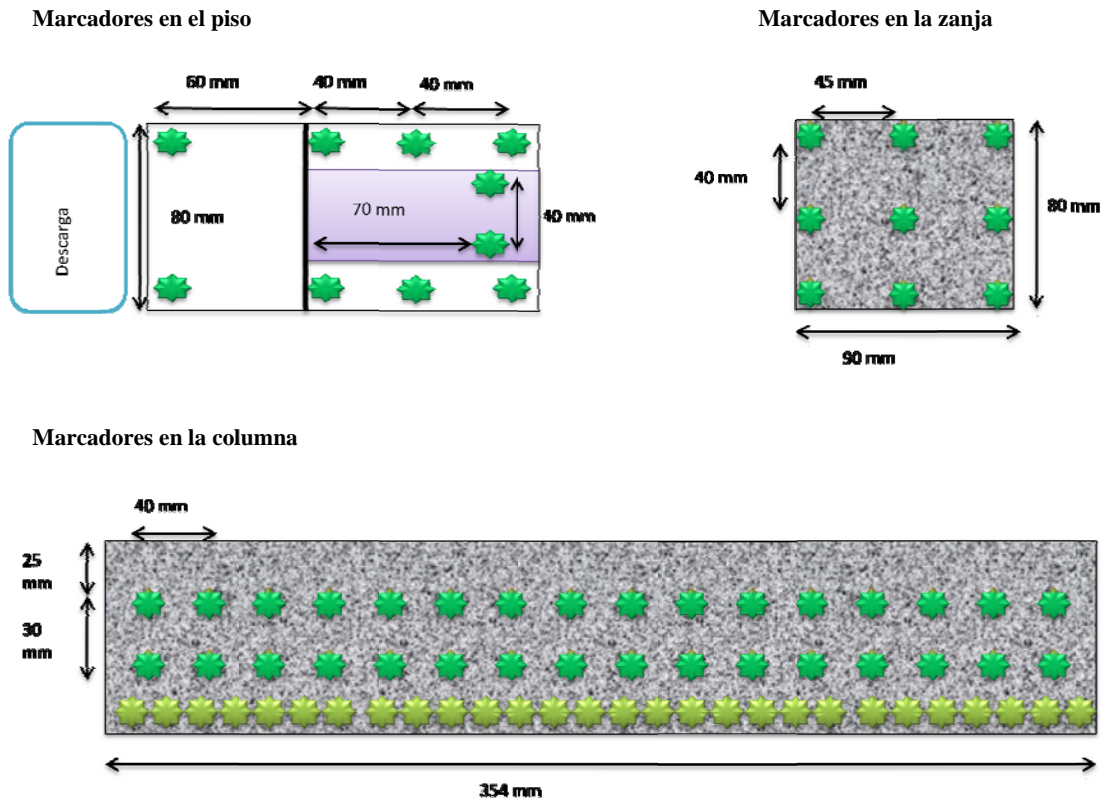


Figura 30 Vista en planta de la ubicación de los marcadores físicos

4.6.2 Desarrollo de la Prueba

Para realizar la prueba se necesitan los siguientes equipos:

- a) Modelo físico
- b) Balanza digital
- c) Celda de carga
- d) Strainmetter
- e) PC
- f) Foco halógeno
- g) Recipientes contenedores
- h) Cámara de video
- i) Hoja de registro de datos

Variables controladas

- a) Masa, M_i , en gramos
- b) Masa acumulada, M_a en gramos
- c) Tiempo, T_i , en segundos de cada ciclo
- d) Colgaduras, tipo 1, 2, 3 o 4
- e) Presencia de Marcadores, identificación

4.6.3 Análisis de Datos

Al término de la experiencia y en función de los datos obtenidos, se analizan para el sistema dozer feeder:

- a) Masa extraída
- b) Tiempo por ciclo
- c) Frecuencia de colgaduras
- d) Geometría del flujo gravitacional

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan las descripciones de los experimentos realizados, entregando los resultados obtenidos en cada uno de ellos, tanto para las variables asociadas al dozer feeder, como las del flujo gravitacional según corresponda.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos experimento tras experimento, en los cuales se describe lo ocurrido durante su desarrollo.

5.1 Experimento 1

Experimento que da inicio al proceso de experimentación, dado esta consideración, el objetivo principal de este es corroborar el correcto funcionamiento del sistema, analizando sus fortalezas y debilidades.

Durante el proceso de extracción continuo se mide, cuyo resultado se observa en la tabla 5.

1. Masa extraída por ciclo
2. Presión del sistema de aire comprimido
3. Masa Total Extraída

Nº ciclos Totales	Media (gr/ciclo)	Desviación Estándar (gr/ciclo)	Mínimo (gr/ciclo)	Máximo (gr/ciclo)	Masa total Extraída, (gr)	Presión (bar)
262	84,6	51,1	3,6	442,9	22.160	5

Tabla 5 Resultados del experimento 1

En el transcurso de esta primera experiencia, de prueba, se aprecian ciertos problemas en el sistema propuesto, ocurriendo trancones y desgaste de las piezas del sistema escalado, todo esto, debido a la elección de los materiales, que en su primera versión fue construido en acrílico y en aluminio; cuya resistencia a la abrasión y roce desencadenó el problema observado, ya que las partículas se incrustaban en el acrílico rallando, desgastando y trabando el sistema, cuando entre acrílico y aluminio se introducía una partícula. Como resultado de lo observado y conclusión de esta primera experiencia, se opta por construir el sistema de extracción con otros materiales, los que posean mayor resistencia a la abrasión, en este caso se utilizará acero inoxidable, a modo obtener mejores resultados.

5.2 Experimento 2

El objetivo de esta segunda experiencia es medir y estudiar el flujo del material granular asociado al sistema dozer mediante marcadores físicos, comprobando nuevamente el funcionamiento del sistema escalado y construido con los nuevos materiales. Para el desarrollo de esta prueba, se utiliza la granulometría monotamaño, Gm y la presión del sistema se deja fija en 5 [bar].

En el desarrollo de la prueba no se aprecian mayores problemas operacionales, y a diferencia de lo observado en la primera experiencia, la masa total extraída corresponde a 23.245 [gr]. La velocidad es regulada y calibrada ajustando las válvulas que controlan el sistema de aire comprimido, el cual permite el movimiento de vaivén de la placa móvil, a modo de igualar el valor en su equivalente a la prueba industrial.

Durante el proceso de extracción continuo se mide, cuyo resultado se observa en la tabla 6:

1. Masa extraída por ciclo
2. Masa Total Extraída
3. Tiempo de ciclo
4. Velocidad

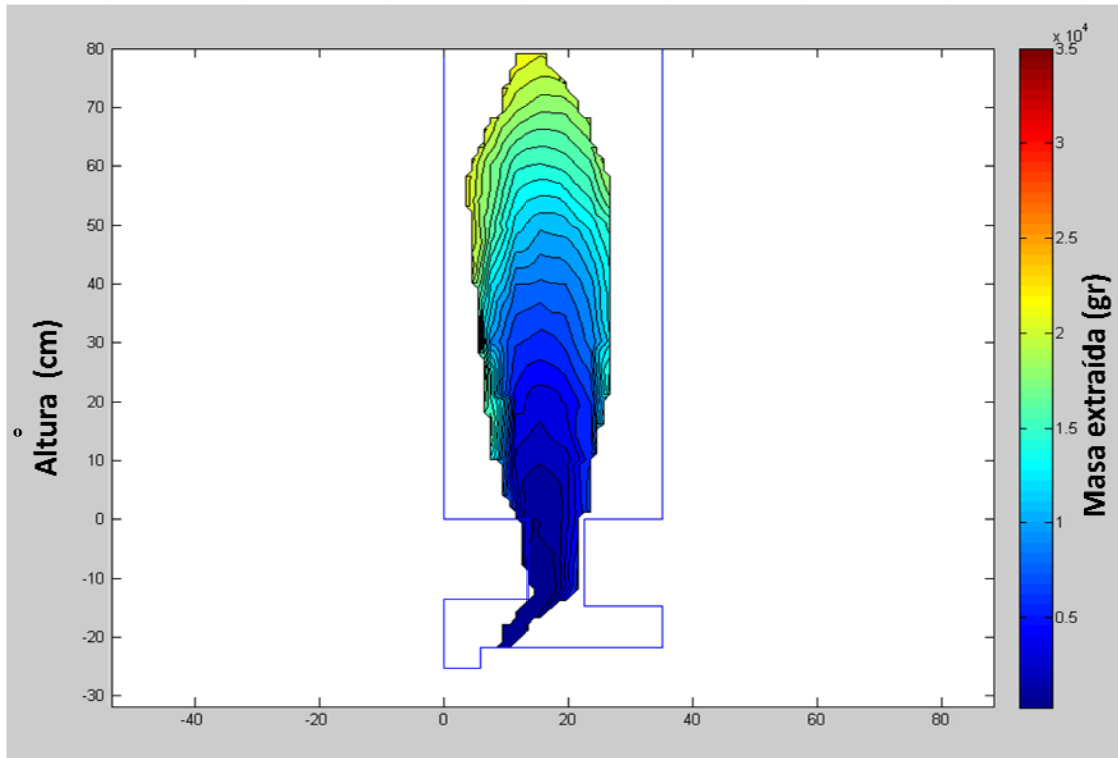
	Nº ciclos	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	296	78,5	33,4	0,2	193,7
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>		7,1	0,7	5,3	11,5
<i>Velocidad (mm/s)</i>		8,5	0,8	5,2	11,3

Tabla 6 Resultados del experimento 2

El ángulo de reposo del material, permite que éste escurra sólo cuando el dozer realiza su ciclo, ya que en esta y en todas las otras experiencias, la pila se asienta a una pequeña distancia de la calle de producción, donde se encuentra el panzer.

En la figura 31, se observa el elipsoide de extracción generado por el sistema de extracción continuo, el cual es construido a partir de un análisis realizado con los marcadores físicos, quienes de acuerdo a su posición inicial y en correlación con la masa que es extraída hasta el momento de su aparición en el punto de extracción, permite generar el elipsoide de flujo gravitacional. Observando la figura se puede apreciar que el eje de simetría está ubicado en el centro de la zanja.

Se incluyen en la figura las dimensiones de las variables geométricas definidas en la Figura 31.



w (mm)	α°	β_1°	β_2°
220	42,3	74,5	78,9

Figura 31 Elipsoide extracción experimento 2

5.3 Experimento 3

Este experimento busca ratificar el funcionamiento del sistema dozer y obtener nuevas mediciones en las zonas de flujo de material granular, sin embargo, esta vez se utiliza una distribución granulométrica que emula a la existente en el sector Inca Oeste de la División El Salvador, Codelco, por lo que se utiliza la granulometría G1.

El cambio de granulometría implica un cambio radical en el comportamiento del flujo, produciéndose eventos no observados en los experimentos anteriores. Se observan colgaduras, que en su gran mayoría corresponden al tipo 2.

Se aprecia una migración de finos, que se relaciona con el problema de trabaduras observado, debido a que este se acumula sobre el sistema de extracción provocando que este se trabe.

La presencia masiva de finos, o polvillo, genera las trabaduras en el sistema, ocasionando un aumento en los tiempos de ciclo, obligando a realizar mantenciones recurrentes al sistema de extracción, ya que cuando este se traba, se debe retirar el sistema y proceder a limpiar.

De forma adicional, se observa que la masa extraída por ciclo es menor si se compara a la obtenida con la granulometría Gm, obteniendo una mayor dispersión en la masa obtenida por ciclo. En la tabla 7 se observan los resultados obtenidos en la experiencia.

	Nº ciclos analizados	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	817	36,9	44,4	0,0	331,1
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>	555	10,7	2,9	2,6	25,3
<i>Velocidad (mm/s)</i>	555	6,0	1,6	2,4	23,3

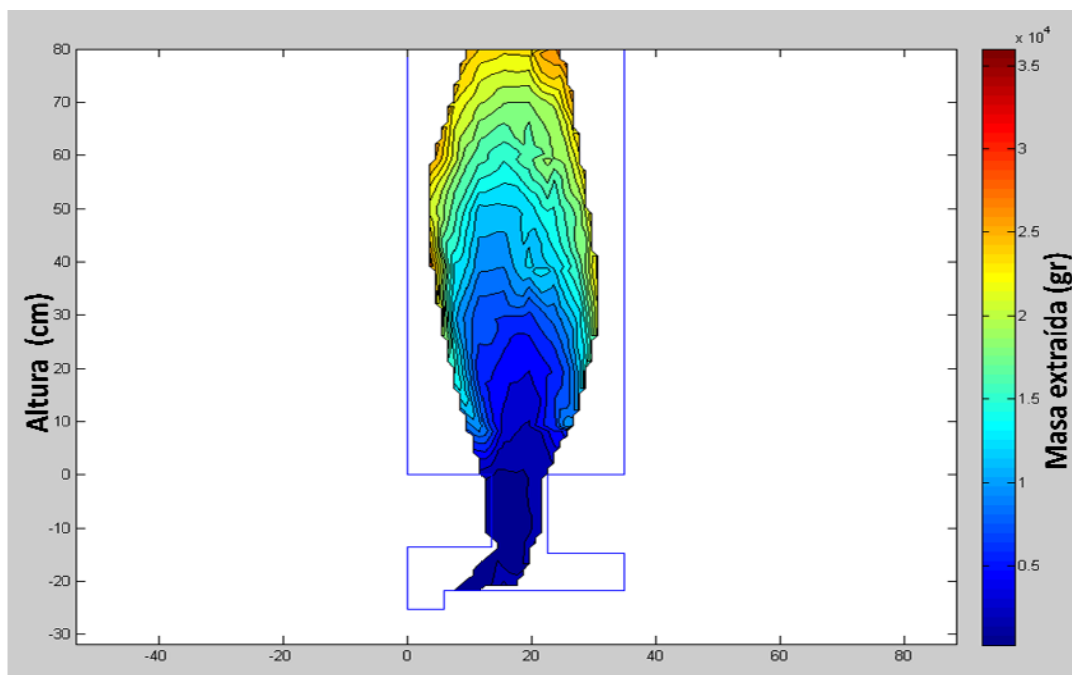
Tabla 7 Resultados del experimento 3

En relación a las colgaduras, como ya fue mencionado, la más frecuente es la tipo 2, ocurriendo en promedio cada 1.782 [gr], como se observa en la tabla 8. Durante el experimento se observó que las colgaduras eran provocadas por los finos, los cuales migran a través de la columna de mineral, estancándose sobre el dozer y debido a su escasa movilidad, forman un lecho de material inmóvil que además de generar problemas de trabadura, sirve de apoyo para la generación de arcos estables entre la visera y el lecho de material.

Colgaduras					
Masa promedio de material extraído entra colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1.782	17	1	14	0	2

Tabla 8 Características de las colgaduras en el experimento

La masa que se extrae durante la experiencia corresponde a 30.297 [gr]. Si se observa la Figura 32, se aprecia que este elipsoide es algo más ancho que el obtenido con la granulometría Gm. Se observa una zona de no flujo, lugar en el que se encuentra instalado el dintel.



w (mm)	α °	β_1 °	β_2 °
265	66	71,6	74,5

Figura 32 Elipsoide de extracción experimento 3

5.4 Experimento 4

La experiencia 4 tuvo como objetivo medir las zonas de flujo y el funcionamiento del dozer para una distribución de granulometría distinta a las ensayadas con anterioridad, la que cuenta con una mayor cantidad de finos y un mayor d_{80} , sin embargo, esta granulometría G2, mantiene el d_{50} de la granulometría G1.

La mayor presencia de finos y un d_{80} mayor, genera mayores dificultades en el movimiento de la placa móvil. Lo que conlleva a lo siguiente:

1. Disminución de la velocidad por ciclo
2. Aumento de la masa por ciclo
3. Aumenta la desviación estándar de la masa extraída por ciclo

Lo anterior ocurre al realizar la operación del sistema bajo las mismas condiciones de presión que las experiencias anteriores, la masa por ciclo, si bien es mayor que la generada por G1, sigue siendo inferior a la masa por ciclo que se obtiene al ensayar la granulometría Gm. Mientras que la desviación estándar de la masa extraída por ciclo aumenta, debido a que el material granular posee una mayor dispersión granulométrica (mayor cantidad de finos y mayor cantidad de gruesos en relación a G1). En la tabla 9 se observan los resultados obtenidos.

	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	816	43,8	61,0	0.0	100,35
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>		14,6	8,5	0,9	74,8
<i>Velocidad (mm/s)</i>		5,2	3,4	0,8	69,8

Tabla 9 Resultados del experimento 4

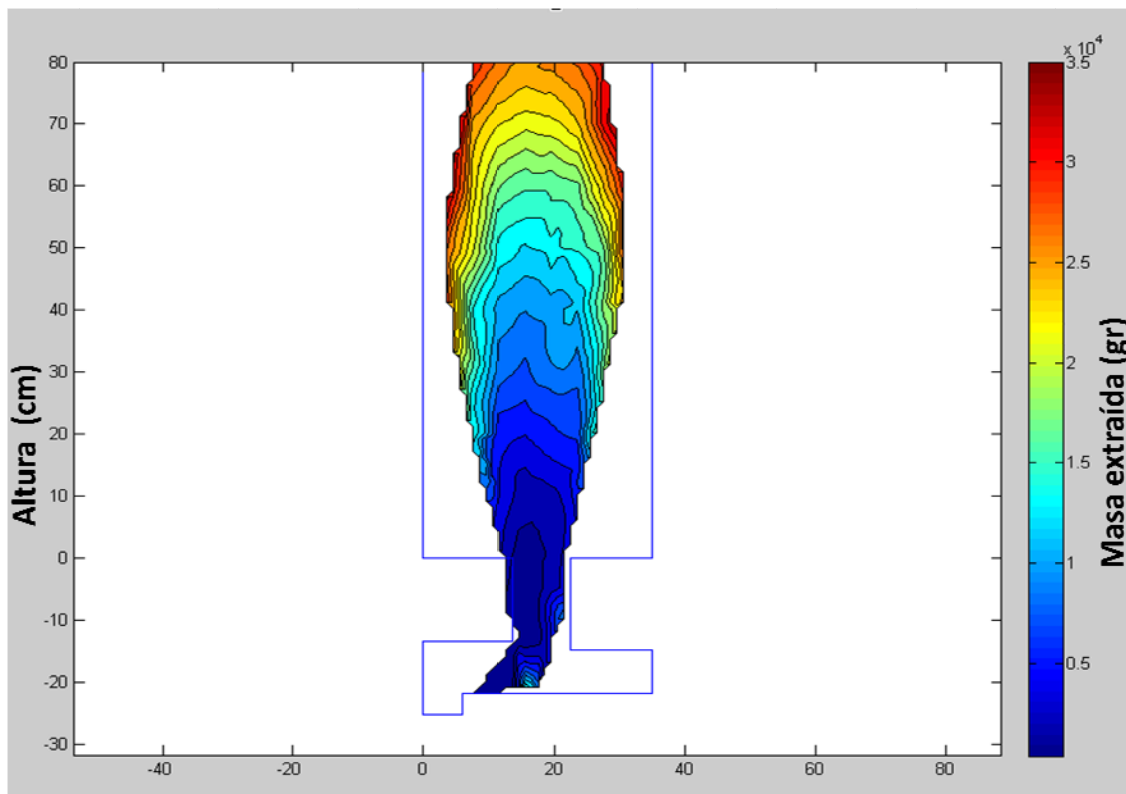
En esta experiencia las colgaduras tipo 2 siguen siendo las que predominan en el proceso de extracción, como se muestra en la tabla 10, resumen de colgaduras de esta experiencia. El material extraído por colgadura llega a los 2.223 [gr/colgadura].

Se acentúa la migración de finos, y en función de los espacios inter-partículas de gran tamaño que se observan, se aprecia que el lecho de material fino inmóvil sobre el dozer se forma de manera veloz, ocasionando los problemas de colgaduras y trabaduras.

Colgaduras					
Masa promedio de material extraído entra colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
2.233	16	1	12	3	0

Tabla 10 Características colgaduras experimento 4

En términos de masa este experimento llega a extraer 35.722 [gr]. En la figura 33 se observa que el ancho w en la mitad del elipsoide es similar a las experiencias anteriores, sin embargo en su límite superior se aprecia que es más ancho, lo que se relaciona con la granulometría ensayada.



w (mm)	α°	β_1°	β_2°
272	68,2	75,9	75,9

Figura 33 Elipsoide de extracción experimento 4

5.5 Experimento 5

Esta experiencia busca comprender la forma en que el dozer genera el flujo gravitacional observado en las experiencias anteriores, dando un énfasis en lo que ocurre sobre el dozer, a modo de concluir acerca del mecanismo del sistema de extracción.

Para llevar a cabo esta experiencia, se realizan modificaciones en el modelo físico, a modo de poder observar lo que ocurre sobre el dozer, para lo cual se instala una pared de acrílico transparente, en la posición de la guía del dozer.

La instalación de la pared vertical reduce los espacios disponibles para cargar el material, siendo imposible el ensayo con las granulometrías G1 y G2, sin embargo, para la comprensión del mecanismo sólo basta ensayar granulometría monotamaño.

El mecanismo se puede caracterizar en dos etapas, una de ingreso y otra de retrotracción. Durante el ingreso de la placa móvil a la pila, el material granular que se encuentra sobre la placa se mueve de manera solidaria a ésta, mientras que el mineral ubicado en la parte delantera del sistema de extracción es empujado hacia la calle de producción.

El empuje que genera el sistema causa una inestabilidad en la pila, ocasionando escurrimiento de material. A su vez, se provoca un movimiento en masa de material sobre la batea, caracterizado por una zona muerta de mínimas dimensiones cercana al dintel. Es durante la etapa de ingreso en la cual se produce la mayor extracción de material granular. (Figura 34).

Ahora bien, en la contraparte del ciclo, en el retorno de la placa móvil, se genera un vacío, el cual es llenado por las partículas en un movimiento gravitacional vertical, traducéndose en un reacomodo de la columna de mineral. Durante esta etapa se produce una extracción limitada de mineral debido a la inestabilidad causada por el reacomodo de la columna. (Figura 35).

En las figuras 34 y 35 se muestran los esquemas correspondientes a los mecanismos de extracción asociados a la entrada de la placa móvil a la pila y a la salida de ésta.

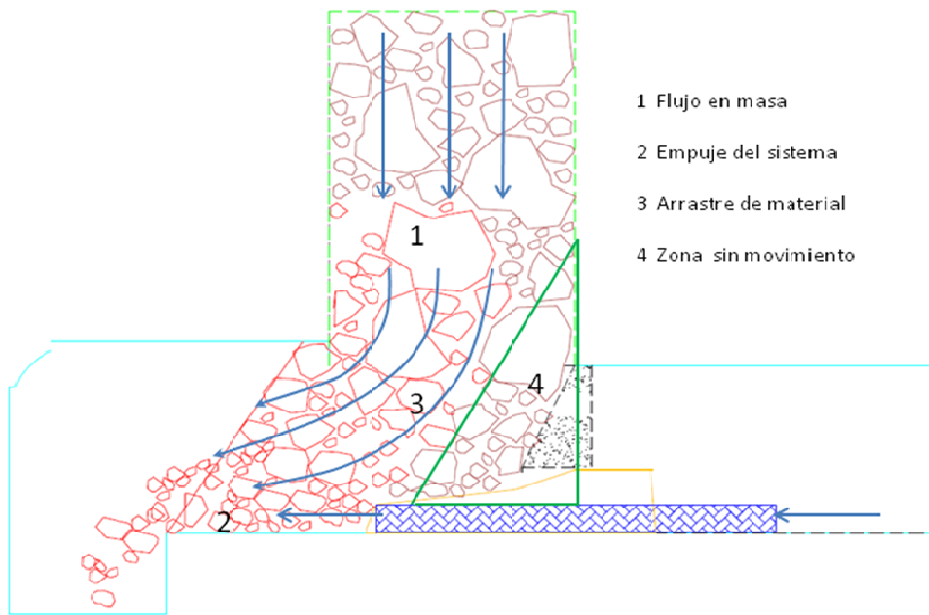


Figura 34 Mecanismo de extracción del material durante la etapa de ingreso del dozer a la zanja

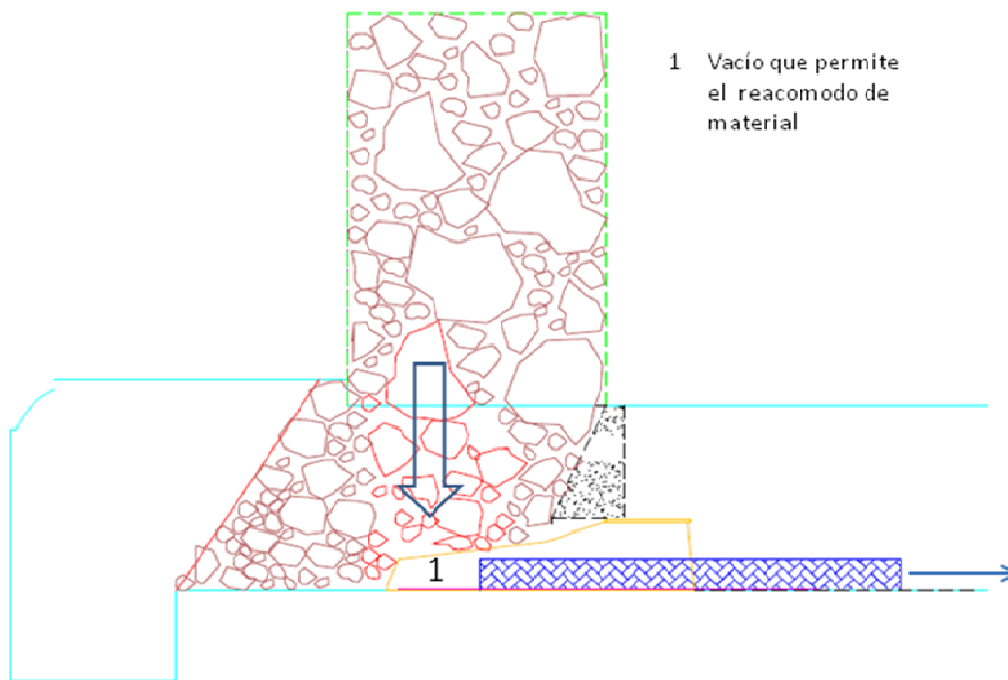


Figura 35 Mecanismo de extracción del material durante la etapa de salida del dozer a la zanja

5.6 Experimento 6

Esta experiencia busca estudiar el comportamiento del sistema de extracción continuo al modificar su posición, ahora se estudiará el funcionamiento en la posición 3, la cual se encuentra alejada 18 [mm] desde la visera hacia atrás.

Esta configuración implica que el sistema de extracción no queda ubicado directamente bajo la pila de material granular.

La cantidad de material que se extrae por ciclo disminuye en comparación con la configuración anterior, P₂ extrae un 12% más que P₃.

Al estar ubicado más atrás, el sistema de vaivén se encuentra por completo dentro de la zona denominada de no flujo, con lo que su efecto desestabilizador disminuye.

Dado que el sistema ya no se encuentra directamente bajo la columna y que éste ya no genera el mismo efecto que en las experiencias anteriores, se tiene por resultado lo descrito en la tabla 11.

	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	971	33,2	44,5	0,0	292,9
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>		11,0	4,5	2,1	31,6
<i>Velocidad (mm/s)</i>		6,2	2,2	1,9	29,3

Tabla 11 Resultados del experimento 6

En el desarrollo de la experiencia se tiene que el número de colgaduras tipo 1 aumentan levemente, debido a que se genera una caverna entre el material y la cuña móvil, teniendo como apoyos los refuerzos laterales que ejercen como guía del dozer. De esta forma, la cuña móvil realiza su movimiento de vaivén dentro de la zona de no flujo del sistema, figura 36, realizando ciclos en banda, los que extraen poco y en algunos casos nada de material.

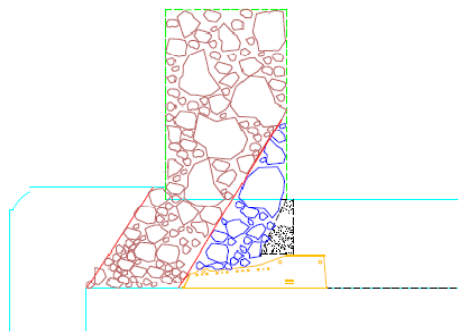
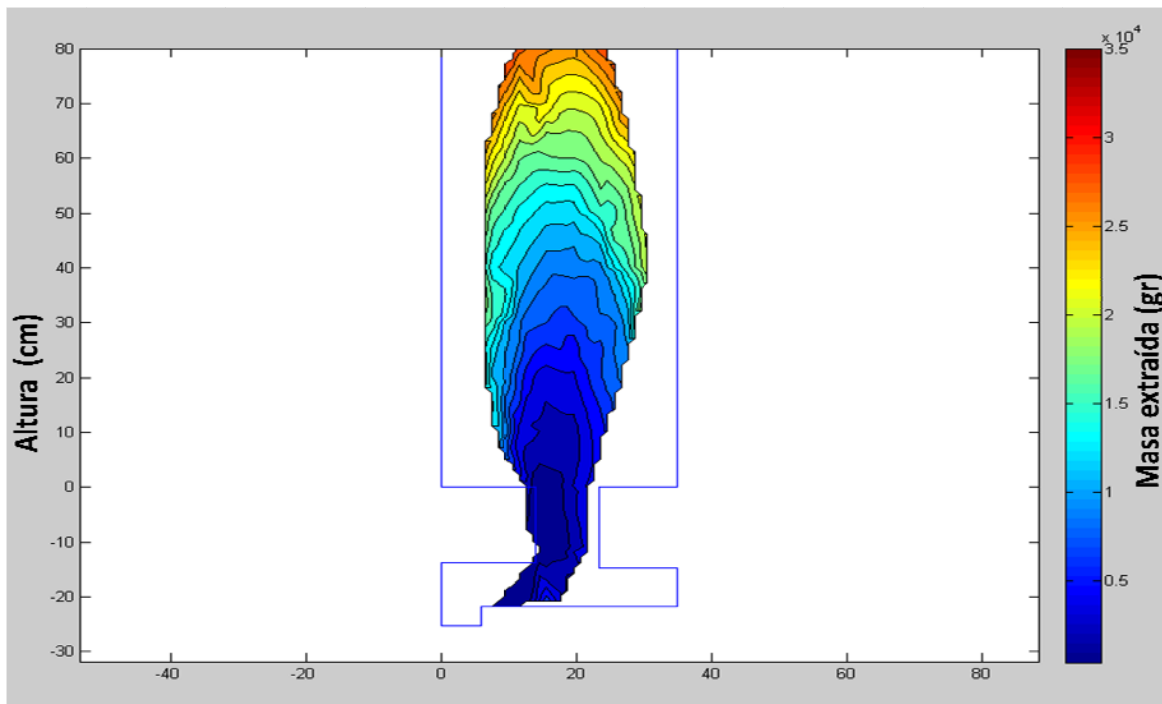


Figura 36 Zona de No Flujo en Azul, lugar donde realiza el movimiento de vaivén el sistema dozer feeder

Colgaduras					
Masa promedio de material extraído entra colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1.790	18	1	16	0	1

Tabla 12 Características de las colgaduras en el experimento 6

La masa extraída es de de 32.228 gr. El elipsoide de extracción presenta un grado de asimetría en la base como se observa en la Figura 37.



w (mm)	α °	β_1 °	β_2 °
220	63,4	74,6	71,6

Figura 37 Elipsoide de extracción experimento 6

5.7 Experimento 7

En la realización de la experiencia número 7 se busca ratificar y corroborar el funcionamiento del dozer en la posición más lejana a la visera, sin embargo, para el desarrollo de esta experiencia se utiliza la granulometría que presenta mayores desafíos al sistema de extracción, G2, que recordando, representa una granulometría con mayor presencia de finos, mismo d_{50} que G1 pero un mayor d_{80} .

En relación a las colgaduras se observa que sigue la tendencia de las experiencias anteriores, siendo la de mayor frecuencia la colgadura tipo 2, sin embargo, el número de éstas fue 20, un número mayor que el de los experimentos previos, en la tabla 13 se muestran los resultados de esta experiencia.

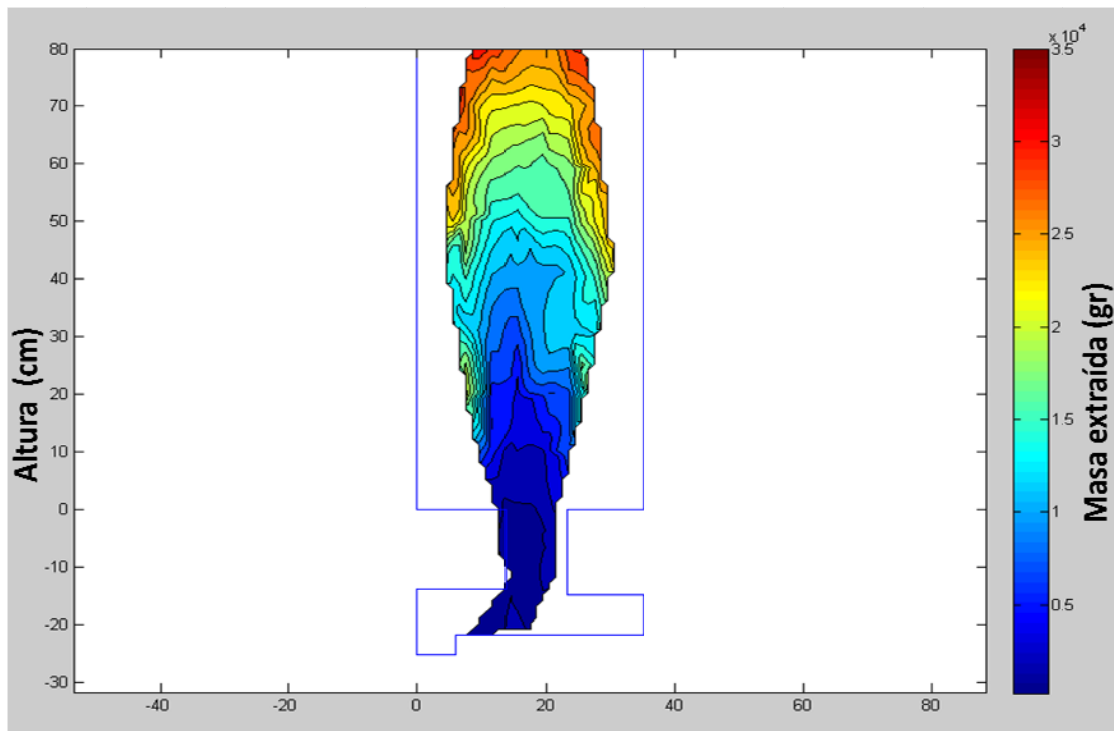
	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	869	38,0	47,2	0,0	321,8
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>	789	9,1	4,8	1,5	46,5
<i>Velocidad (mm/s)</i>	789	8,0	3,4	1,3	39,2

Tabla 13 Resultados del experimento 7

<i>Colgaduras</i>					
Masa promedio de material extraído entra colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1.649	20	0	17	0	3

Tabla 14 Características de las colgaduras en el experimento 7

En el desarrollo de la experiencia se extrajeron 32.298 [gr] de material, cantidad similar de material extraído de la experiencia anterior con la misma granulometría, no obstante distinta posición. Las colgaduras predominantes siguen siendo las tipo 2, como se muestra en la tabla 14. El flujo gravitacional no presenta mayores diferencias en lo observado con anterioridad, tal y como se muestra en la figura 38.



w (mm)	α°	β_1°	β_2°
240	63,4	74,6	75,9

Figura 38 Elipsoide de extracción experimento 7

5.8 Experimento 8

En esta experiencia se busca analizar el flujo gravitacional asociado a una nueva configuración en la geometría de zanja con 75° de inclinación en dos de sus paredes, dejando las otras 2 de manera vertical. Si bien no existe nada comparable entre el modelo y prototipo, ya que no existen resultados a escala industrial, de minería continua, con una geometría de ese estilo, el resultado otorga certeza en cuanto a funcionalidad entre una geometría y otra bajo las mismas condiciones estudiadas, se toma como referencia la experiencia 3, es decir, granulometría tipo G1 y una presión de 5 [bar] y posición P₂ del dozer, la tabla 15 resume la experiencia.

	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	868	36,4	44,6	0	248,0
<i>Tiempo de ciclo (s)</i>	765	9,2	2,9	3,9	30,4
<i>Velocidad (mm/s)</i>	765	7,0	1,7	2,0	15,3

Tabla 15 Resultados del experimento 8

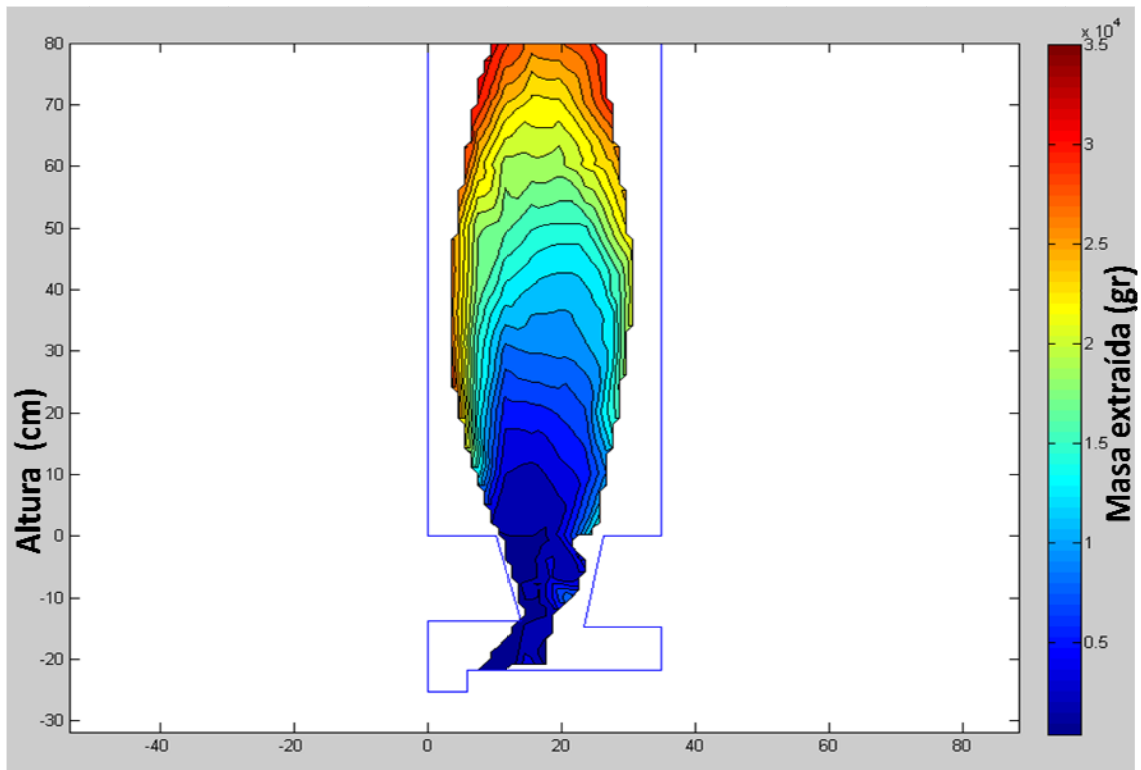
El material extraído alcanza los 31.585 [gr], mientras que el comportamiento dentro del modelo físico sigue siendo de la misma forma que en las experiencias anteriores, donde el fino presente en la columna migra a través de ésta acumulándose en la misma posición que lo hizo anteriormente, generando un lecho de material inmóvil que promueve la formación de colgaduras. En esta experiencia a diferencia de las anteriores se observa un nuevo fenómeno, denominado “efecto embudo”. Tal efecto es el responsable de la formación de una mayor cantidad de colgaduras, ya que al llegar a la zona de zanja el material debe comprimirse en el cambio de sección, lo que finalmente desencadena un aumento en las colgaduras con respecto a la configuración anterior, como se ve en la tabla 16.

<i>Colgaduras</i>					
Masa promedio de material extraído entra colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1.215	26	0	24	2	0

Tabla 16 Características de las colgaduras en el experimento 8

Este experimento posee una tasa de 1.215 [gr/colgadura], y debido a la geometría (aumento progresivo del ancho de zanja), que posee el modelo físico, se observa que el ancho del elipsoide es mayor que en las experiencias con las paredes de zanja en forma vertical, su ancho, w, alcanza los 280 [mm].

En la figura 39 se observa el elipsoide que se genera al utilizar una configuración con un ángulo de 75° en la construcción de la zanja.



w (mm)	α°	β_1°	β_2°
280	69,4	78,7	73,3

Figura 39 Elipsoide de extracción experimento 8

5.9 Experimentos 9, 10 y 11

Las experiencias que van de la N° 9 a la N° 11 tienen como objetivo cuantificar el efecto asociado a la producción del sistema dozer feeder, que genera la distancia que existe entre la visera y la calle de producción.

Para obtener dicha cuantificación se realizan experiencias de 100 ciclos, experimentos que son comparables entre sí, y a la vez se consideran los 100 primeros ciclos de la experiencia 3, la cual utiliza la misma granulometría que la ensayada en estas pruebas, G1. De cada experiencia se calculan sus producciones y arroja como resultado lo siguiente:

	Distancia Visera-calle		N° ciclos	Masa extraída (gr/ciclo)	Mínimo (gr)	Máximo (gr)	Masa total extraída (gr)
	Esc (mm)	real (m)					
Exp 3	60	1.20	100	30,2 (±47,7)	0	216,9	3.020
Exp 9	68	1.36	100	39,0 (±38,8)	0	176,7	3.896
Exp 10	76	1.52	100	32,3 (±35,4)	0	130,9	3.235
Exp 11	84	1.68	100	17,9 (±30,6)	0	156,9	1.791

Tabla 17 Resultados de los experimentos 9, 10 y 11

De la tabla se observa que la masa extraída por ciclo disminuye a medida que aumenta la distancia visera-calle, siendo la experiencia 11 la que genera esta afirmación, dado que al ser comparada con la experiencia N° 3, en el caso de las experiencias 9 y 10, se ve que la diferencia no es notoria.

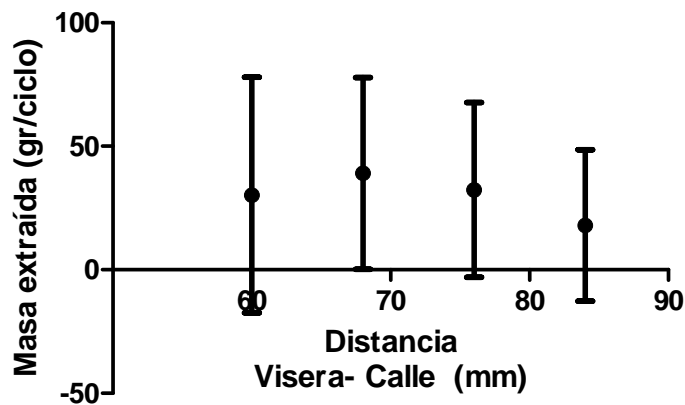


Gráfico 1 Variación de la masa en función al aumento de distancia de visera-calle

5.10 Experimento 12

Se realiza el experimento para corroborar el funcionamiento de una nueva modificación insertada dentro del sistema dozer, modificación que representa mejor el diseño del prototipo.

La diferencia en relación con el dozer utilizado en las experiencias anteriores, tiene relación con el largo de la placa móvil, en las experiencias pasadas, el efecto de arrastre, discutido en la experiencia N° 5, era un efecto ejercido a través de toda la placa que estaba en contacto con el material granular, sin embargo, en esta nueva versión, el arrastre lo realiza una porción limitada de la placa, asimilándose de mayor forma al caso real. Durante el desarrollo de la prueba de esta nueva placa móvil, se observan constantes problemas operacionales, esta vez, relacionados con el trabamamiento del sistema, el que ocurre cuando el sistema comienza su etapa de retroceso o salida de la pila.

Este efecto es causado por el material fino y anguloso que se acumula en la parte posterior del sistema. El asentamiento de las partículas ocurre cuando la placa ingresa, debido a que se genera un pequeño vacío, el cual es ocupado por finos y material anguloso, ocasionándose las trabaduras.

Para evitar el trabamiento con partículas angulosas se aplica un cambio más a la placa móvil. La arista perteneciente a la placa, la que ocasiona los problemas de trabaduras, se cambia de una arista recta a una sinusoidal. La forma sinusoidal tiene como objeto disminuir el trabamiento con las partículas angulosas, no obstante a eso el sistema dozer necesita mayor fuerza, pues para realizar el ciclo completo, este necesita como mínimo una presión de 8 [bar], cuando regresa, y un mínimo de 4 [bar] para ingresar, al comparar con la presión necesaria para el dozer de Placa Continua de efecto de arrastre mayor, se tiene que la presión del nuevo dozer es un 60% mayor.

En la tabla 17, se muestra que el orden de extracción de este nuevo dozer (placa con arrastre limitado) es del mismo orden de magnitud que el dozer de placa continua (placa con arrastre en toda la placa en contacto con el material), por lo que este resultado valida al modelo con placa continua como un modelo consistente, ya que entrega resultados que no difieren con respecto a las pruebas anteriores, obtenidos con el Dozer continuo, denotando una mejora a considerar.

Nº ciclos	Masa extraída (gr/ciclo)	Masa total extraída (gr)	Masa total extraída (gr)
104	31,9 (±42,1)	209,2	3.313

Tabla 18 Resultados del experimento 12

En la figura 40 se aprecia la incorporación de las modificaciones al sistema de extracción.



Figura 40 Dozer en sus dos versiones, a la izquierda el sistema de placa móvil acotada, a la derecha placa móvil continua

5.11 Experimentos 13, 14 y 15

Las experiencias que van entre la N° 13 y 15 tienen por objetivo estudiar el comportamiento de un nuevo equipo de extracción para la minería continua, que a diferencia del sistema dozer feeder opera desde la parte frontal del punto de extracción, el sistema es propuesto por IM2 y consiste en una cuña que ingresa a la pila de material utilizando los mismos conceptos que el sistema dozer, es decir, mediante pistones, los que tienen la función de hacer ingresar la cuña a la pila como también la de retirarlo de esta. Figura 41.

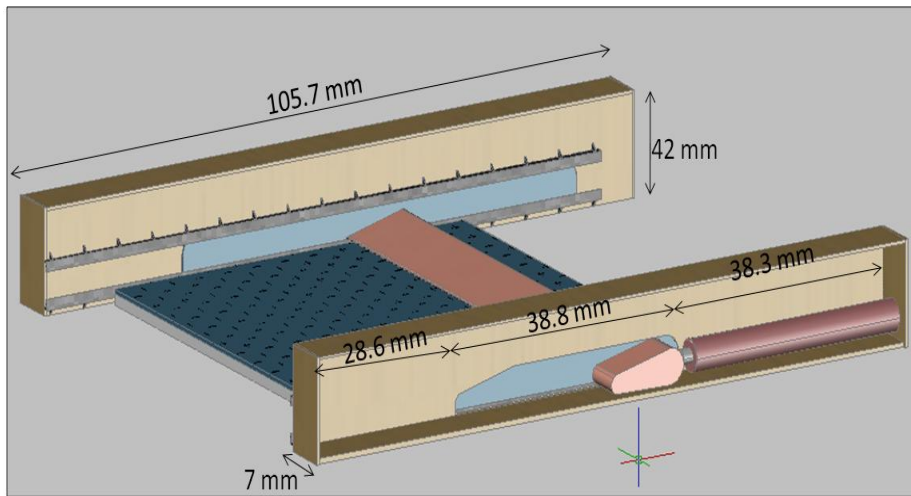


Figura 41 Esquema de la cuña móvil con sus dimensiones en [mm] “Dozer en posición de trabajo”; proyecto cuña móvil y transportador continuo; ingeniería de destalles; puntos de extracción, insertos, guías, vigas de reacción, IM2.

Los resultados de los experimentos realizados se muestran en la siguiente tabla, en la cual se puede comparar la productividad del sistema en función de las granulometrías, G1, G2 y Gm, ensayada en la posición P_1 de la cuña extractora.

	Descripción	Nº ciclos	Masa extraída (gr/ciclo)	Mínimo, (gr)	Máximo, (gr)	Masa total extraída (gr)
Exp 13	CE-P1-Gm	100	43,3 ($\pm 20,9$)	3,8	106,9	4.983
Exp 14	CE-P1-G1	100	19,7 ($\pm 27,4$)	0	174,9	2.209
Exp 15	CE-P1-G2	100	24,1 ($\pm 32,8$)	0	194,3	2.745

Tabla 19 Resultados de los experimentos 13, 14 y 15

Al observar los resultados se tiene que las productividades varían según la granulometría ensayada, siendo el orden de productividad asociado a esta variable el siguiente: $G_m > G_2 > G_1$.

Ocurriendo el mismo fenómeno que en el sistema dozer, no obstante a lo anterior, estas productividades se encuentran muy por debajo de las obtenidas con el sistema de extracción dozer, este último posee una extracción mayor en un 48% para monotamaño y de un 38% mayor para las granulometrías G_1 y G_2 .

Estas pruebas requieren que se utilice una presión de 8 [bar] para llevarlas a buen término, debido a que una menor presión no garantiza el ingreso de la cuña a la pila.

Los problemas observados tienen relación con las trabaduras en el sistema, las cuales se deben a dos causas fundamentales. La primera de ellas corresponde a la presencia de finos, éstos se acumulan delante de la cuña, compactándose o bien generando roce entre la cuña y el piso de la galería (cuando ingresa a la interfaz cuña-piso). Mientras que la segunda causa, tiene que ver con la aglomeración de partículas de tamaño menor a d_{50} , la que se propaga desde el fondo de la galería (donde está ubicado el dintel) hacia la calle de producción, de este modo las partículas se concatenan una con otra, generando una especie de “colchón rocoso” el cual impide el ingreso normal de la cuña a la pila. Este fenómeno, es incremental, es decir, a medida que incorpora más partículas, tanto gruesas como finas, acortan de manera progresiva el largo de carrera de la cuña, a tal punto que finalmente prohíben el ingreso de la cuña a la pila de material granular. (Figura 42)

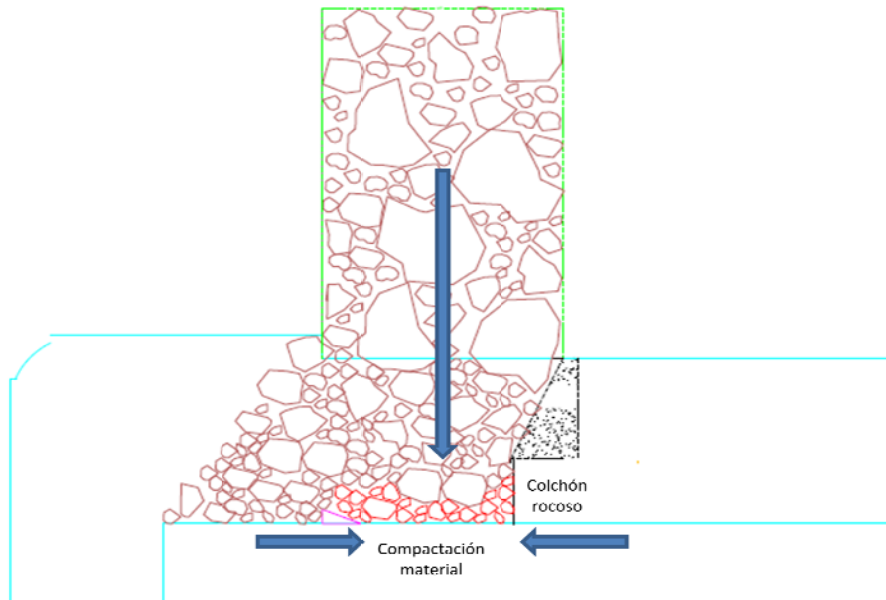


Figura 42 Esquema que muestra la formación de trabaduras, en rojo el material que se compacta generando trabaduras

5.12 Experimentos 16, 17, 18

Los experimentos que van del N°16 al N° 18 tienen como objetivo medir la productividad de la cuña extractora para las diferentes granulometrías en la posición P₂ de la cuña extractora diseñada por IM2

Se consideran 100 ciclos, y tal como se muestra en la tabla 19, los resultados obtenidos con esta segunda configuración, conservan la misma tendencia que los experimentos 13, 14 y 15. Por ende, la mayor productividad corresponde a la granulometría monotamaño, Gm, en segundo lugar queda la granulometría que emula Diablo Regimiento, G2 y finalmente la granulometría ICO, G1.

Las productividades resultantes, tabla 20, de estas experiencias están por debajo de las productividades obtenidas por el sistema Dozer.

	Descripción	Nº ciclos	Masa extraída, (gr/ciclo)	Mínimo (gr)	Máximo (gr)	Masa total extraída (gr)
Exp 16	CE-P2-Gm	100	41,8 (±25,6)	2	118,7	4.725
Exp 17	CE-P2-G1	100	23,7 (±68,6)	0	704,4	2.724
Exp 18	CE-P2-G2	100	25,9 (±112,3)	0	1002,6	2.987

Tabla 20 Resultados de los experimentos 16, 17 y 18

Para este sistema de extracción no existen datos industriales que permitan escalar el tiempo de ciclo que esta cuña debe cumplir, por lo que la velocidad del sistema de extracción es del mismo orden de magnitud que las velocidades del sistema dozer feeder, 7-9 [mm/s], a partir de esta definición se obtienen los siguientes resultados tabulados en la tabla 21:

	Descripción	Nº ciclos	Tiempo de ciclo (mm/s)	Velocidad (mm/s)
Exp 16	CE-P2-Gm	100	5,44 (±1,79)	8,2(±2,9)
Exp 17	CE-P2-G1	100	3,5 (±2,1)	14,9 (±6,3)

Tabla 21 Resultados de tiempo y velocidad para los experimentos 16, 17 y 18

Uno de los problemas, ya mencionados en el sistema, fueron las trabaduras, sin embargo, existe un problema aún no descrito, que tiene relación con las partículas que son de mayor tamaño que el d_{80} y que se encuentran en la base de la columna de mineral frente a la cuña extractora (Figura 43). La cuña no posee la fuerza suficiente para mover este tipo de material, es decir, no puede realizar el ciclo de extracción, debido a existe un obstáculo, partícula mayor al d_{80} que impide su funcionamiento.

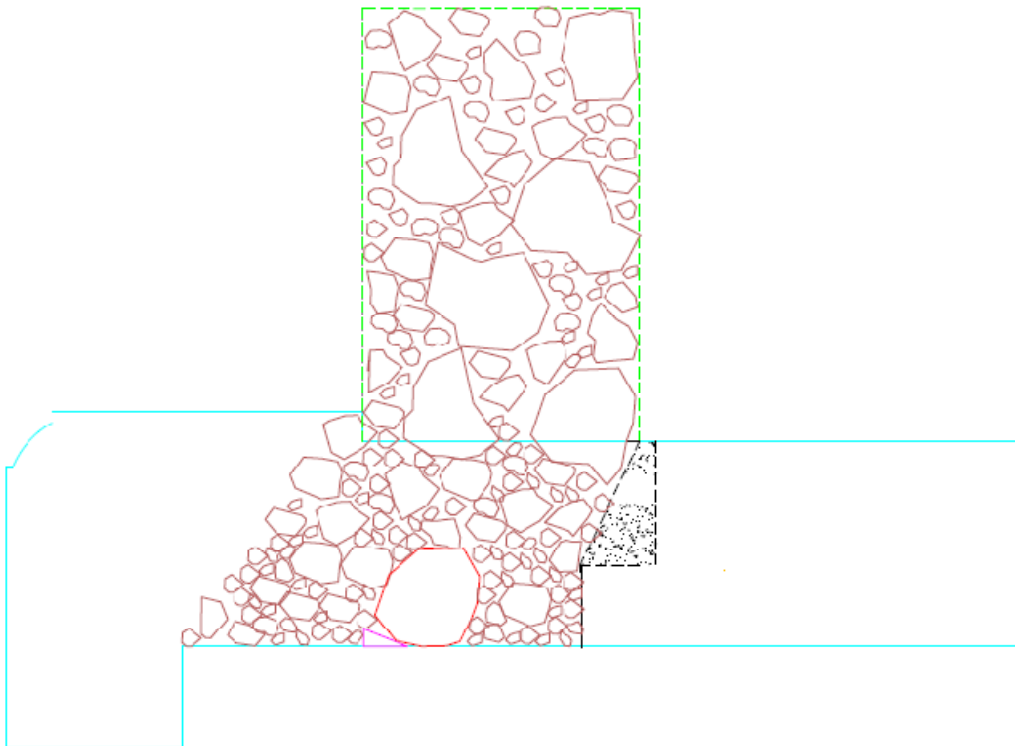


Figura 43 Esquema que muestra la formación de trabaduras, en rojo el material que no levanta la cuña extractora

5.13 Experimento 19

Esta experiencia tiene como finalidad medir la productividad en gramos por ciclo, determinar la tasa de formación de colgaduras en gramos por colgadura, sumado a la geometría del elipsoide de extracción, que resulta de realizar la extracción completa de la altura de columna, utilizando la granulometría, G1, en la posición P₁ de la cuña extractora, posición que presentó la menor cantidad de problemas operacionales según los resultados obtenidos en las experiencias anteriores.

Como resultado se tiene que la productividad, en comparación con las pruebas que poseen las mismas condiciones de granulometría prueba 14 y 17, es menor; esto se debe a la gran cantidad de colgaduras ocurridas, desencadenando una gran cantidad de ciclos en los cuales el sistema no produce, y cuando este llega a producir, logra completar pocos ciclos antes que la acumulación de finos y material cercano al d₅₀ o material sobre el d₈₀ causen los problemas descritos en las experiencias anteriores.

	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	1426	11,06	18,57	0	139,58

Tabla 22 Resultados del Experimento 19

La frecuencia media de colgaduras en gramos por ciclo es alta y corresponde a (960 gr/colg.) en comparación con el sistema dozer (1.200-2.200 gr/colg.)

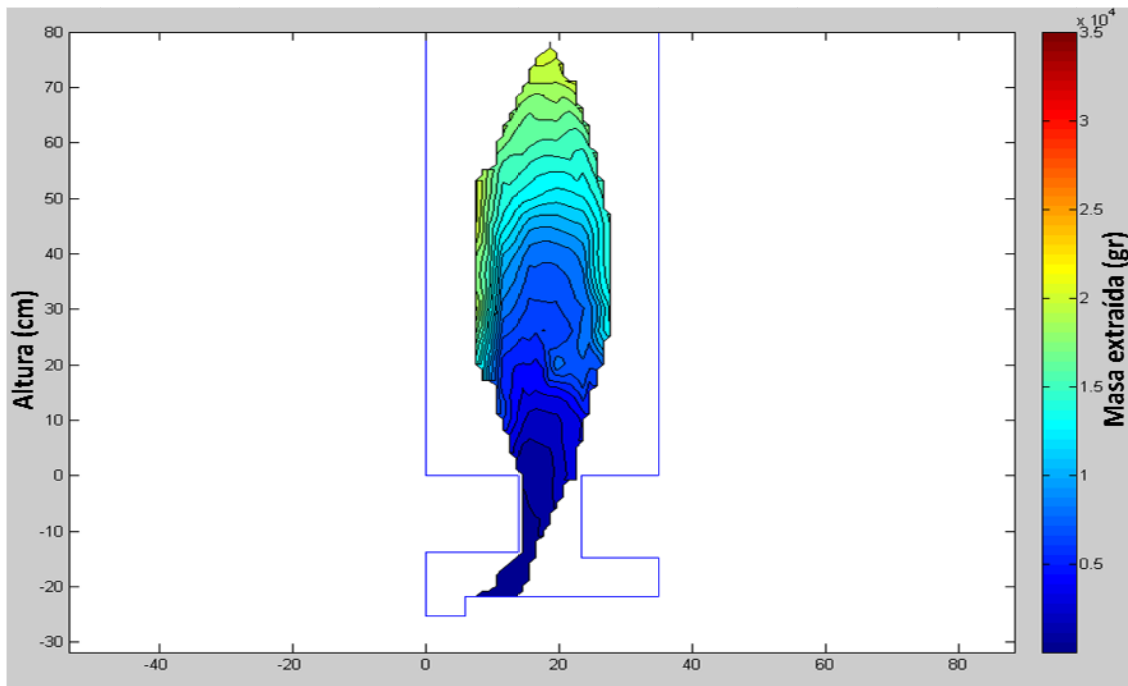
La alta frecuencia de colgaduras es debido a que el ancho del elipsoide a la altura de la visera, es menor que la zona de flujo en el mismo sector respecto al sistema dozer, lo que se traduce en una mayor frecuencia de colgaduras, produciéndose una zona de no flujo mucho mayor a la observada en las experiencias anteriores.

Como se indica en la tabla el tipo de colgadura más frecuente sigue siendo la tipo 2.

<i>Colgaduras</i>					
Masa promedio de material extraído entre colgaduras (gr/colg)	Número de colgaduras				
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
960,1	23	5	14	3	1

Tabla 23 Características de las colgaduras en el experimento 19

La masa total extraída alcanza los 22.082 [gr], alcanzando una altura de extracción de 780 [mm]. Se realizaron 1.426 ciclos y no se alcanza a extraer la altura de columna de las otras experiencias, esto debido a que la masa por ciclo es muy baja, haciendo que la experiencia tome un tiempo demasiado elevado. La elipse de extracción tiene una forma simétrica y está centrada en la zanja, siendo más angosta en la base que en las experiencias con el sistema dozer, como se ve en la figura 44.



w (mm)	α°	β_1°	β_2°
220	45	79,9	78,7

Figura 44 Elipsoide de extracción experimento 19

5.14 Experimento 20

Esta experiencia tiene como finalidad medir la productividad en gramos por ciclo, a partir de un elevado número de ciclos de extracción del modelo físico, utilizando la granulometría, G1, en la posición P₁ de la cuña extractora, posición que presentó la menor cantidad de problemas operacionales según los resultados obtenidos, esta experiencia busca corroborar y generar un aliciente más que indique que el modelo es consistente en la entrega de datos, para los dos sistemas de extracción estudiados.

	Nº ciclos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Masa por ciclo (gr)</i>	1.035	11,65	17,92	0	98,39

Tabla 24 Resultados del Experimento 20

La masa total extraída corresponde a 17.567[gr].

6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Este capítulo describe los análisis realizados a los resultados experimentales, de forma cuantitativa y cualitativa, permitiendo interpretar los resultados y situaciones observadas en las experiencias realizadas, también se discutirá además acerca de las fortalezas y debilidades que presenta el modelo físico en relación a la escalabilidad.

6.1 Productividad del Sistema Dozer Feeder

Al observar los resultados obtenidos para la producción por ciclo del sistema de extracción, se aprecia que dicha productividad está relacionada de manera directa con, la granulometría, el efecto de la granulometría es claro, la denominada monotamaño, es la que entrega mayor productividad al sistema, comparada con G1 o G2, sin embargo, es una granulometría ideal, la cual no se encuentra presente en las faenas; por lo que al comparar las granulometrías que emulan ICO y Diablo Regimiento entre sí, se aprecia que existe una mayor producción ligada a la granulometría, que posee mayor cantidad finos y un d_{80} mayor. Si se transforma a cifras se tiene que, la productividad G_m aumenta en un 50% en comparación a G1 y G2 y la productividad G2 aumenta en un 14% en comparación con G1.

La productividad del sistema también se relaciona con la posición del sistema, que es una variable que incide en la productividad del método de extracción, recordando que en una de sus posiciones el movimiento de vaivén era realizado en la zona muerta, de no flujo. Por lo tanto la posición P_2 del sistema, ubicada a 14 [mm] de la visera, entrega una mayor productividad por ciclo, Al llevarlo a porcentaje se tiene que, la productividad P_2 aumenta un 12% en comparación a P_3 .

También depende de la distancia visera-calle, ya que en los experimentos en los que se varía la distancia entre la visera y la calle, de d_0 a d_1 , d_2 y d_3 , se desprende que, un aumento de 24 [mm] (d_3), ocasiona una disminución en la capacidad productiva del sistema, obteniendo que la productividad de d_0 es un 47% en comparación a d_3 .

Recordando que d_0 corresponde a distancia original del sistema, d_1 significa un aumento de 8 [mm], d_2 es el aumento de 16 [mm] y d_3 que corresponde a aumento de 24 [mm].

6.2 Productividad del Sistema Cuña extractora

Al observar los resultados obtenidos para la producción, se aprecia que dicha productividad está relacionada de manera directa con, la granulometría, el efecto de la granulometría sigue la misma tendencia que el ocurrido en el sistema dozer, entregando los siguientes porcentajes comparativos entre productividades ligadas a las granulometrías, la productividad G_m es mayor en un 45% en comparación a G1 y G2 y la productividad G2 es mayor en un 13% en comparación con G1.

La posición del sistema es también y al igual que en el sistema de placa móvil, una variable que incide en la productividad. Luego la posición P₂ del sistema, ubicada directamente bajo la visera, entrega una mayor productividad por ciclo, Al llevarlo a porcentaje se tiene que, la productividad P₂ es un 12% mayor en comparación a P₁.

6.3 Productividad en el sistema Dozer Feeder (DF) y Cuña Extractora (CE)

El sistema de extracción cuña extractora presenta una menor productividad en [gr/ciclo] que la que presenta el sistema dozer, la productividad del sistema dozer feeder es un 48% mayor en comparación a la productividad de la cuña extractora utilizando Gm. Mientras que sigue la misma tendencia al ser un 38 % mayor utilizando las granulometrías G1 y G2.

Resumen de los resultados experimentales

	Descripción	d80 (mm)	d80/d10	Masa total extraída (Kg)	Masa por ciclo (gr/ciclo)	Tiempo por ciclo (s/ciclo)	Velocidad por ciclo (mm/s)	Fuerza Empuje (N)
Exp 1	P2-Gm	-7,7	~1	22,2	84,6 (±51,1)	N/D	N/D	71
Exp 2	P2-Gm	-7,7	~1	23,2	78,4 (±33,4)	7,1 (±0,7)	8,5 (±0,8)	57
Exp 3	P2-G1	19	5,6	30,3	36,9 (±44)	10,7 (±2,9)	5,9 (±1,6)	57
Exp 4	P2-G2	23	12,9	35,7	43,8 (±61)	14,6 (±8,5)	5,2 (±3,4)	57
Exp 6	P3-G1	19	5,6	32,3	33,2 (±44,5)	11 (±4,5)	6,2 (±2,2)	57
Exp 7	P3-G2	23	12,9	32,9	37,9 (±47,2)	9,1 (±4,7)	8,0 (±3,4)	57
Exp 8	P2-G1-Ang	19	5,6	31,6	36,4 (±44,6)	9,2 (±2,9)	7,0 (±1,7)	57
Exp 9	P2-G1-8	19	5,6	3,9	39 (±38,8)	N/D	N/D	57
Exp 10	P2-G1-16	19	5,6	3,2	32,3 (±35,4)	N/D	N/D	57
Exp 11	P2-G1-24	19	5,6	1,8	17,9 (±30,6)	N/D	N/D	57
Exp 12	P2-G1-D3	19	5,6	3,3	31,9 (±42,1)	N/D	N/D	91
Exp 13	CE-P1-Gm	-7,7	~1	4,9	43,3 (±20,9)	N/D	N/D	91
Exp 14	CE-P1-G1	19	5,6	2,2	19,7 (±27,4)	N/D	N/D	91
Exp 15	CE-P1-G2	23	12,9	2,7	24,1 (±32,8)	N/D	N/D	91
Exp 16	CE-P2-Gm	-7,7	~1	4,7	41,8 (±25,6)	5,4 (±1,8)	8,2 (±2,9)	91
Exp 17	CE-P2-G1	19	5,6	2,7	23,7 (±68,6)	3,5 (±1,8)	14,9 (±6,3)	91
Exp 18	CE-P2-G2	23	12,9	3	25,9 (±112,3)	N/D	N/D	91
Exp 19 (*)	CE-P1-G1	19	5,6	22,1	11,06 (±18,5)	N/D	N/D	91
Exp 20 (*)	CE-P1-G1	19	5,6	17,5	11,65 (±17,9)	N/D	N/D	91

(*) Datos medidos para la extracción parcial del modelo

N/D: No hay medición de datos

Tabla 25 Resumen de los resultados experimentales

6.4 Colgaduras en los sistemas de extracción

El aumento o disminución de las colgaduras en un sistema u otro tiene estricta relación con dos variables de diseño estudiadas, la posición del sistema de extracción y la geometría de zanja.

De manera general, se cumple que a medida que aumenta la distancia entre el dozer y la Visera, aumenta el N° de Colgaduras, es decir, P₃ dozer genera un aumento de un 15% en las Colgaduras.

No obstante a lo anterior, las colgaduras están relacionadas con el efecto embudo que se genera al utilizar una geometría de zanja con un ángulo de 75°, donde el material debe comprimirse para pasar de una abertura a otra menor, de este modo se potencian la formación de arcos estables entre las paredes inclinadas de la zanja. La geometría genera un aumento de un 32% en la generación de colgaduras.

La cuña extractora produce un mayor número de colgaduras, comparado con el sistema DF, CE genera colgadura cada 960 [gr] extraídos, en contraste con el DF que genera cada aproximadamente 1730 [gr] extraídos.

Resumen de las colgaduras de los experimentos

Exp.	N° ciclos	Descripción	Masa promedio de material extraído entre colgaduras (gr/colg)	Frecuencia de colgaduras				
				Número total de colgaduras	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
3	817	P2-G1	1782,1	17	6%	82%	0%	12%
4	816	P2-G2	2232,6	16	6%	75%	19%	0%
6	971	P3-G1	1790,5	18	6%	89%	0%	6%
7	869	P3-G2	1649,4	20	0%	85%	0%	15%
8	868	P2-G1-Ang	1214,8	26	0%	92%	8%	0%
19	1426	CE-P1-G1	960,1	23	22%	61%	13%	4%

Tabla 26 Resumen de las colgaduras de los experimentos

6.5 Efecto sobre el elipsoide de extracción

El sistema de extracción dozer feeder genera un flujo uniforme a lo largo de la batea, donde el eje de este elipsoide coincide con la mitad de la batea, que en comparación con otros sistemas de extracción, actuales, es un beneficio, dado que el eje del elipsoide que se genera mediante el accionar de LHD's es cercano a la visera, 1-3 [mt], lo que genera un flujo menos uniforme.

Se observa de los resultados que el ancho del elipsoide aumenta con la granulometría, y que la geometría podría genera un mayor porcentaje de recuperación, no obstante para saberlo es necesario estudiar el comportamiento de una malla de extracción.

El ángulo de extracción sobre la batea, β_1 y β_2 , van entre los 72° y los 79° . Durante la etapa experimental se observa que cercano al dozer existe una zona o talud inmóvil, zona muerta, de no flujo, cercano al dintel.

Resumen características de elipsoides de extracción DF

EXP.	Descripción	w (mm)	β_1°	β_2°
1	P2-Gm	220	-	-
2	P2-Gm	220	74,5	78,9
3	P2-G1	265	71,6	74,5
4	P2-G2	272	75,9	75,9
6	P3-G1	220	74,6	71,6
7	P3-G2	240	74,6	75,9
8	P2-G1-Ang	280	78,7	73,3

Tabla 27 Resumen características de elipsoides de extracción DF

Al igual que para el sistema dozer, en el sistema de cuña extractora, el elipsoide de extracción se encuentra centrado en la batea, y la zona de flujo es simétrica con respecto a ésta ($\beta_1 \sim \beta_2$).

EXP.	Descripción	w (mm)	β_1°	β_2°
3	P2-G1	265	70	77,1
19	CE-P1-G1	220	79,9	78,7

Tabla 28 Comparación de geometría de elipse de extracción para dozer y cuña extractora

6.6 Análisis cualitativo

6.6.1 Sistema extracción Dozer Feeder

En el transcurso de las 20 experiencias realizadas, se observa en cada una de ellas el comportamiento del sistema de extracción, describiendo lo observado en la tabla 28, en la cual se destacan el número de trabamientos, que generalmente ocurren cuando el sistema de extracción dozer feeder comienza el regreso en el ciclo. En pos de lo observado se puede inferir lo siguiente:

Una mayor presencia de finos aumenta la probabilidad de generación de trabadura, ya que, éste tipo de material se introduce dentro del sistema de extracción generando roce entre las partes interiores del sistema, placa móvil-pared dozer.

Una mayor exposición del sistema de extracción, es decir, que la placa móvil esté en contacto con la columna de mineral, genera un aumento en el número de colgaduras. Al existir mayor exposición de la placa del sistema, se permite que mayor cantidad de material este en contacto con la zona que genera trabaduras en el sistema.

A menor peso sobre la placa móvil, se producen menor cantidad de trabaduras, debido al efecto arco observado en el interior del modelo, el cual reduce el peso vertical que soporta el sistema de extracción cuando está bajo la columna de material granular.

El cambio de geometría, una batea con ángulo, genera menos problemas de trabaduras para las mismas condiciones de granulometría y posición del sistema de extracción. Sin embargo en este caso se forman mayor cantidad de colgaduras, las que permiten el movimiento expedito del sistema de extracción, referido al efecto arco mencionado en el punto anterior.

6.6.2 Sistema extracción cuña extractora

El sistema de extracción frontal no es realmente funcional, se observan gran cantidad de problemas operacionales, relacionado tanto con la cantidad de trabaduras, como con el flujo de material granular que genera, también se observan problemas con el cumplimiento del ciclo de extracción, donde de manera progresiva, se acorta hasta no realizar movimiento alguno, de lo observado se infiere lo siguiente:

- Los finos se introducen en las partes móviles del sistema.
- Los tamaños gruesos (> 3 cm) no pueden ser levantados por la cuña en el ingreso.
- Los tamaños gruesos (> 3 cm) no pueden ser empujados por la cuña en el regreso.
- La compactación de material granular en la parte posterior, es la responsable del acortamiento progresivo de la carrera.

6.7 Resumen resultados cualitativos experiencias dozer.

En la tabla 29 se entiende como trabadura a la imposibilidad del dozer o cuña para real un ciclo de extracción

Experiencia	Característica	Interferencias ciclos Dozer	Sistema de extracción	Características flujo
Número 1	P2, Gm	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	No hay migración de finos
Número 2	P2, Gm	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Zonas de flujo regular en altura No hay acumulación de finos sobre la base dozer
Número 3	P2, G1	Alto número de trabaduras (240), provocando interferencias en la continuidad de los ciclos	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Zonas de flujo irregular en altura Hay Acumulación de finos sobre el dozer de manera paulatina
Número 4	P2, G2	Alto número de trabaduras (214), provocando interferencias en la continuidad de los ciclos	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Zonas de flujo regular en altura Rápida acumulación de finos sobre el dozer
Número 5	P2, Gm, AA	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	No hay migración de finos
Número 6	P3, G1, CC	Bajo número de trabaduras (93), existen pocas interferencias en la continuidad del sistema	El material solo es empujado hacia la calle de producción, no hay efecto desestabilizador de la columna de material.	Zonas de flujo medianamente regular en altura Hay Acumulación de finos sobre el dozer de manera paulatina
Número 7	P3, G2	Bajo número de trabaduras (84), existen pocas interferencias en la continuidad del sistema	El material solo es empujado hacia la calle de producción, no hay efecto desestabilizador de la columna de material.	Flujo irregular en altura. Rápida acumulación de finos sobre el dozer
Número 8	Ang, P2, G1	Bajo número de trabaduras (57), existen pocas interferencias en la continuidad del sistema	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Ensanchamiento de la zona de flujo Zona de flujo regular en altura Hay Acumulación de finos sobre el dozer de manera paulatina
Número 9	P2, G1 , 8	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Aumenta zona de acumulación de finos sobre el dozer, respecto del experimento 3
Número 10	P2, G1, 16	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Aumenta zona de acumulación de finos sobre el dozer, respecto del experimento 9
Número 11	P2, G1 , 24	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	Aumenta zona de acumulación de finos sobre el dozer, respecto del experimento 10
Número 12	P2, G1	No hay trabaduras	El material se extrae hacia la calle de producción a través de empuje del talud y desestabilización de la columna de material	No se mide elipsoide

Número 13	CE-P1-Gm	Número de trabaduras medio (24% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae hacia la calle de producción a través de desestabilización de la pila y empuje del talud	No se mide elipsoide
Número 14	CE-P1-G1	Bajo número de trabaduras (6% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae hacia la calle de producción a través de desestabilización de la pila y empuje del talud	No se mide elipsoide
Número 15	CE-P1-G2	Alto número de trabaduras (85% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae hacia la calle de producción a través de desestabilización de la pila y empuje del talud	No se mide elipsoide
Número 16	CE-P2-Gm	Número de trabaduras medio (39% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae mayormente a través de empuje del talud producto del movimiento del material en la base de la columna	No se mide elipsoide
Número 17	CE-P2-G1	Número de trabaduras medio (32% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae mayormente a través de empuje del talud producto del movimiento del material en la base de la columna	No se mide elipsoide
Número 18	CE-P2-G2	Número de trabaduras medio (29% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae mayormente a través de empuje del talud producto del movimiento del material en la base de la columna	No se mide elipsoide
Número 19	CE-P1-G1	Alto número de trabaduras (24% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae hacia la calle de producción a través de desestabilización de la pila y empuje del talud	No existe efecto de acumulación de finos en la zona sobre el dintel. Se acumula finos alrededor del sistema de la cuña extractora.
Número 20	CE-P1-G1	Alto número de trabaduras (33% de la cantidad total de ciclos)	El material se extrae hacia la calle de producción a través de desestabilización de la pila y empuje del talud	No existe efecto de acumulación de finos en la zona sobre el dintel. Se acumula finos alrededor del sistema de la cuña extractora.

Tabla 29 Resumen resultados cualitativos experiencias dozer.

6.8 Fortalezas y Debilidades del Modelo Físico

Referente a la tabla 30 se tiene que:

	Descripción	d80 (mm)	d80/d10	Masa total extraída (Kg)	Masa (gr/ciclo)	Tiempo (s/ciclo)	Velocidad (mm/s)	Fuerza Empuje (KN)
Exp 3	P2-G1	19	5,6	30,3	36,9 (±44)	10,7 (±2,9)	5,9 (±1,6)	57
MC Mina	-	25	6,9	-	63 (± 37,6)	11	5,4 (±1,2)	16,6 -7,1

Tabla 30 Comparación experimento y escala mina sistema dozer (los valores MC Mina están escalados a valores de modelo)

Los experimentos realizados logran emular la cinemática del sistema dozer, ya que las velocidades que alcanza el sistema de extracción son similares, donde el rango obtenido corresponde al orden de magnitud del sistema de MC Mina.

Como se observa en la tabla 29, la masa extraída en la experimentación es menor que la obtenida del prototipo, sin embargo, el valor del experimento está dentro de los órdenes de magnitud definidos como aceptables, pudiéndose deber a que La fragmentación o peso relativo de cada partícula es muy variable. El criterio de aceptabilidad viene dado por la consistencia obtenida y que se pudo lograr la reproducción de la dinámica o fuerzas del sistema dozer, que son un buen indicador, los que muestran que los valores obtenidos a partir de modelos a escala están en el orden de magnitud de los obtenidos en la mina.

El sistema puede corregirse al utilizar materiales que posean igual fricción y que posean las características de quiebre de la roca real, es decir, utilizar materiales que simulen el UCS de la roca. El no utilizar este tipo de material ocasiona que el modelo 2D no logre representar a cabalidad la dinámica del sistema Otra mejora al sistema, que posee bastantes simplificaciones, puede ser la incorporación de la dimensión faltante, realizando experiencias en un modelo 3D, a modo de representar de mejor forma la realidad.

El error asociado al escalar correspondo a un 41% , ahora bien, en esta etapa se escala con respecto al prototipo, sin embargo se puede escalar de manera inversa, dejando de lado los factores de escalabilidad, realizando dicho análisis a los experimentos 4, 6 y 7, tomando al experimento 3 como referencia se obtiene que el error asociado es de 18.67%, 2.7% y 1.37% con respecto al valor MC respectivamente.

7. CONCLUSIONES

Este capítulo presenta los mayores resultados obtenidos luego de realizar y analizar las 20 experiencias, el cual está dividido en tres partes, primero se habla del Modelo físico, luego se pasará a los sistemas de extracción para generar recomendaciones asociadas a la investigación de nuevas tecnologías a la industria minera.

Respecto al *Modelo Físico* se puede concluir lo siguiente:

- El modelo logra reproducir la cinemática del sistema
- Los resultados obtenidos son un buen indicador de los mecanismos observados, debido a que se logran establecer las similitudes entre modelo y prototipo.
 - Colgaduras
 - Productividad
 - Trabamientos
 - Tiempo de ciclo
- Una mejor representatividad se logra mediante el escalamiento de la resistencia del material y mediante la utilización de modelos 3D.

El modelo físico ha sido una herramienta subestimada y desvalorizada para los estudios y pruebas de nuevos equipos en el área de la minería, sin embargo, estas experiencias logran demostrar que lo ocurrido a escala industrial puede ser representado a escala de laboratorio, si bien no representa su totalidad dinámica, permite comprender los conceptos que están tras el sistema, pudiendo generar e incorporar modificaciones a bajo costo y en un corto plazo.

Con relación a los experimentos realizados, se puede concluir lo siguiente en relación al sistema dozer feeder:

- La extracción del sistema es realizada por distintos mecanismos, los que ocurren durante el ingreso y retroceso de la placa móvil.
 - Ingreso: Empuje y arrastre por fricción
 - Retroceso: Inestabilidad de la Pila, reajuste gravitacional

En la etapa de ingreso se produce la mayor extracción de material del modelo físico mientras que en el retroceso hay ciclos en los que la extracción es nula.

- Los esfuerzos al interior del modelo de material fragmentado crecen de forma asintótica, tendiendo a un valor límite, a diferencia del aumento lineal que posee un sólido o líquido, lo que permite que un sistema de empuje posea altas probabilidades de ser funcional, solo le basta soportar y trabajar bajo condiciones del esfuerzo límite.
- La productividad del sistema es altamente variable, siendo función de:
 - Fragmentación, G_m genera un 50% más de extracción y un d_{80} mayor genera un aumento del 14% en la productividad
 - Posición, P_2 genera un aumento de un 12% en la extracción
 - Distancia Visera-Calle, cuando se utiliza la configuración de distancia d_3 la extracción disminuye un 47%
- Cambios en la geometría de la batea no provocan variaciones en el tonelaje por ciclo (ángulo de las paredes a 75° en comparación a la configuración original de las paredes a 90°)
- Las colgaduras de mayor relevancia son del tipo 2.
- Si el movimiento de vaivén de la placa móvil es realizado dentro de la zona definida como no flujo, aumenta la frecuencia de colgaduras.
- Las colgaduras generadas en la posición P_3 son un 15% mayor en cantidad respecto a las generadas en la posición P_2 .
- El cambio de geometría de la batea genera el denominado “efecto embudo”, desencadenando una mayor cantidad de colgaduras de baja altura, tipo 2, y en esa geometría no se observan colgaduras de mayor altura.
- El movimiento de material, o flujo gravitacional, ocurre en masa sobre el punto de extracción, generando un eje en la mitad de la batea. Esta característica puede generar el desarrollo de niveles de producción con puntos equiespaciados, y lograr una interacción uniforme entre los distintos puntos de extracción.

En función de los experimentos que estudiaron el comportamiento de la cuña extractora se puede concluir lo siguiente:

- La extracción del sistema es realizada por mecanismos que ocurren durante el ingreso y retroceso de la cuña, mecanismos que dependen de la posición en la que se encuentra dicha cuña.

Posición P_1

- Ingreso: Empuje de material, sin generar inestabilidad
- Retroceso: Empuje de material, inestabilidad

Posición P_2

- Ingreso: Empuje de material, generando inestabilidad
- Retroceso: Empuje de material, inestabilidad

En la etapa de regreso, en el retroceso, se produce la mayor extracción de material del modelo físico mientras que en el ingreso, hay ciclos en los que la extracción es nula, y es en esta etapa cuando se generan la mayor cantidad de problemas operacionales.

En el ingreso de la cuña, cuando arrastra partículas hacia el interior de la pila, bajo la batea, se genera una acumulación de material generando trabaduras y una disminución progresiva en la carrera de la cuña.

- La productividad del sistema es variable, siendo función de:
 - La distribución G_m , monotamaño, entrega una productividad un 45% mayor en comparación a las otras dos granulometrías ensayadas, en base a la medición de 100 ciclos para cada caso.
 - Mayor d_{80} genera un aumento de un 13% en la productividad del sistema
 - Posición, P_2 genera un aumento de un 12% en la extracción
- Las colgaduras ocurren con mucha mayor frecuencia, a pesar de utilizar las mismas condiciones de granulometría, sin embargo, siguen la misma tendencia que el sistema dozer feeder, siendo las colgaduras tipo 2 las más comunes.

- La zona de flujo asociada a la cuña extractora es una pequeña porción, ubicada en las cercanías de la visera, del área total de la batea.
- El elipsoide de extracción se encuentra centrado en la batea, y la zona de flujo es simétrica con respecto a esta. No obstante a esto el elipsoide de extracción corresponde a uno esbelto.
- El sistema cuña extractora presenta una menor productividad (gr/ciclo) que el sistema Dozer:
 - En la granulometría monotamaño, el sistema dozer feeder extrae en promedio un 48% más de masa por ciclo que el sistema de cuña extractora.
 - Las pruebas realizadas con las distribuciones granulométricas G1 y G2 el sistema dozer feeder extrae un 38% más de masa por ciclo que el sistema cuña extractora.

Como conclusiones cualitativas del sistema de extracción del dozer y la Cuña extractora, se puede decir lo siguiente:

- En el sistema de placa móvil, dozer feeder, se observa que las dificultades están relacionadas en el retorno de la placa a su posición original, necesitando mayor fuerza para cumplir con el ciclo, debido a que ciertas partículas se posicionan entre la placa móvil y un sector fijo del dozer, generando trabaduras.
- El uso de una arista sinusoidal disminuye la probabilidad de trabamiento, ocasionado por el aprisionamiento de las partículas contra la parte fija del dozer.
- En la práctica, la presión de salida es superior a la de entrada, coincidente con lo ocurrido en el modelo, lo que lo hace representativo de la dinámica del problema.
- El dozer de placa continua, basado en empuje y fricción, tiene mejor comportamiento ante las mismas condiciones que el dozer de placa no continua, en donde la fuerza requerida por el primero es un 60% menor que la requerida por el segundo. Este diseño, si bien no ha sido probado en la práctica, es una potencial mejora al sistema actual de extracción.
- Las trabaduras están correlacionadas con el peso existente sobre el sistema de extracción, donde este sistema funciona mejor cuando se generan arcos estables en la batea (los que en algunos casos se transforman en colgaduras), generando menos trabamientos.
- En el sistema de cuña frontal se observa que los trabamientos son constantes y existe una disminución progresiva de la carrera de la cuña, debido a que durante el ingreso de esta las

partículas son empujadas hacia el interior del punto de extracción, lo que se traduce en material compactado que impide el ingreso de la cuña a la pila

- El trabamiento y disminución de movilidad del sistema es debido a que material fino se introduce entre las interfaces móviles del sistema.

Las recomendaciones para futuros trabajos son las siguientes:

- Se recomienda replicar experimentos realizados en esta etapa para confirmar las tendencias encontradas e identificar la variabilidad de los resultados.
- Se recomienda cuantificar el efecto del acrílico sobre las partículas, y utilizar materiales que simulen de mejor manera las paredes de la batea, a modo de obtener un contacto que se asemeje de mejor forma a la realidad, interfaz roca fragmentada-roca insitu.
- Se recomienda incluir las siguientes variables de diseño y realizar los siguientes estudios:
 - Geometría del dintel posterior
 - Longitud de zanja
 - Dimensión de los puntos de extracción
 - Ángulo de socavación (apex)
 - Diseño de guías laterales
 - Modificar la carrera de la placa móvil
- Se recomienda realizar un estudio comparativo entre el sistema dozer, y LHD a escala reducida, comparando elipsoides de extracción, problemas operacionales, frecuencia de colgaduras, recuperación de reservas.
- Realizar pruebas en 3D, con un mayor número de puntos de extracción, a modo de comprender la interacción de los elipsoides de extracción, como también optimizar la operación del sistema dozer.
- Se recomienda utilizar los modelos físicos como herramienta para estudiar y comparar alternativas de producción y descuelgue de zanjas.

8. REFERENCIAS

- Antillo D, 2010 “Estudio de esfuerzos en roca fragmentada por medio de elementos discretos”, Memoria para optar al título de Ingeniero civil de Minas, Tesis, FCFM de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Behn y Göpfert, 1974, “Los Métodos por Hundimiento”, Anales del simposio de explotación de minas, Primer Congreso Latinoamericano de Minería y Metalurgia extractiva, Santiago Chile.
- Brown, E, 2003,” Block caving geomechanics, “1st edn”, Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Carrasco, F, 2002, “Aplicación de tecnologías del carbón para socavación previa”, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis, FCFM de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Castro , R, 2001,” Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional”, Tesis para optar al Título de Ingeniero civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Castro, R. 2006. “Study of the mechanisms of gravity flow for block caving”, PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Chacón, J, 1990, “Estudio Conceptual sobre nuevas modalidades de socavación en el método por Block Caving con extracción mecanizada”, Tesis, FCFM de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Chang, J, 2009,”Diseño y evaluación técnico económico de un nuevo sistema de carguío y transporte para la minería de hundimiento”, Memoria para optar al título de Ingeniero civil de Minas, Tesis, FCFM, de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Fernandez, F, 2009,”Modelación numérica de flujo gravitacional “, Tesis para optar al Título de Ingeniero civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Fuenzalida, P, 2009, “Diseños de Explotación en Panel Caving con trituración temprana con Sizers”, Tesis para obtener el grado de Magíster en Minería, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Gustafsson, P, 1998. Waste Rock Content Variations During Gravity Flow in Sublevel Caving: Analysis of full scale experiments and numerical simulations, PhD thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
- IM2, Instituto de Innovación Minero Metalurgica S.A. Validación transportador continuo. Ingeniería básica Proyecto Prueba Minería Continua. Santiago, Chile, 2006a.
- IM2, Instituto de Innovación Minero Metalurgica S.A. Diseño Conceptual Minería Continua Santiago, Chile, 2006b.

Janelid, I. and Kvapil, R., 1966. *Sublevel caving*. Int. J. Rock Mech. Sci.; 3; pp. 129-153.

Lara, F, 2008, “Diseño del nivel de producción para un modulo generic de minería continua” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis, FCFM de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Langhaar, H, 1951, “Dimensional Analysis and theory of models”, Wiley, New York, USA.

Laubscher, D.H. (1994) Cave mining – the state of the art, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 94(10), pp. 279–293.

Laubscher, D, 2000, “Block Caving Manual”, International Caving Study Report. JKMRC and Itasca Consulting Group Inc., Brisbane, Australia.

Pöschel, Salueña C, Schwager T, 2001, “*Scaling properties* of granular materials”, Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. 2001 Jul;64(1 Pt 1):011308. Epub 2001 Jun 28. Humboldt-University Berlin-Charité, Berlin, Germany.

Planos técnicos

- “C29-4_SAL-M-032-F”; Prueba sistema transportador continuo; n.v producción – snv. Correa a P-56; D/G excavación equipos.
- “C29-4_SAL-M-034-F”; Prueba sistema transportador continuo; n.v producción puntos extracción; disposición general equipos; detalle secciones.
- “C29-4_SAL-M-035-F”; Prueba sistema transportador continuo; n.v prod. Ptos. Extr.-chan.- descarga LHD; disposición general-equipos secciones.
- “C29-4_SAL-M-036-F”; Prueba sistema transportador continuo; n.v producción puntos de extracción; excavación.
- “C-5675-0”; Diagrama de perforación especial 2 ¼” en batea de frontones de minería continua, nivel producción sector Inca Oeste
- “C-5695-0”; Diagrama especial hundimiento con tiros levante 2 ¼” perforación minería continua; sector Inca Oeste.
- “Dozer en posición de trabajo”; proyecto cuña móvil y transportador continuo; ingeniería de destalles; puntos de extracción, insertos, guías, vigas de reacción.

Informes técnicos

- DBT 2006.Manual Dozer Feeder- Dozer Feeder con dispositivo de empuje.
- Bravo G. P.- Weishaupt R., Maturana P, 2008.. Prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua”, Informe IM2, Diciembre, 2008.

- Amigo, R. Espinoza, C, Vásquez, G, Rojas, E. Prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua”, Informe final IM2.
- Vicuña, 2009. Comunicación personal. Recopilación información Dozer: presiones medidas en el Dozer para 18 días prueba Minería Continua.
- Bravo G., Fuentes, C., 2005.; Simulación del extractor en un punto de extracción”, Informe IM2 Diciembre 2005.
- Petroleo: FRACTURAMIENTO HIDRAULICO EN POZOS DE PETROLEO web de la Ingeniería de Petroleo y Gas Natural de todo nivel.

www.petroblogger.com/.../fracturamiento-hidraulico-en-pozos-de.html (Venezuela)