



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

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA EN EL
FLUJO GRAVITACIONAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CARLOS RODRIGO ZÚÑIGA SANTIBÁÑEZ

PROFESOR GUÍA:
ALFONSO OVALLE WALKER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
RAÚL CASTRO RUIZ

SANTIAGO DE CHILE
2007

RESUMEN

El presente trabajo de título corresponde a un trabajo de investigación realizado para CODELCO Chile, División El Teniente. Se presentan los resultados de un estudio experimental de flujo gravitacional, cuyo objetivo principal es investigar como influye la dispersión granulométrica en el fenómeno. El estudio fue llevado a cabo en un modelo físico bidimensional de dimensiones 50 x 26 x 80 cm³, con un único punto de extracción en la base del modelo. El material utilizado fue gravilla, y se ensayaron 2 granulometrías con distinta dispersión granulométrica.

Los resultados de mayor importancia y las principales conclusiones son:

- Al iniciar la extracción de material se desarrollan dos zonas. Una zona de extracción, formada por el material extraído y una zona en movimiento. Estas zonas están caracterizadas por su diámetro y su altura y están definidas por un elipsoide que crece a medida que progresa la extracción de material. La altura del elipsoide de movimiento crece indefinidamente y a una mayor velocidad que el ancho, mientras que el ancho esta acotado por un ancho máximo, denominado diámetro de tiraje aislado.
- La variable principal que controla la geometría de las zonas de movimiento y extracción es el peso extraído.
- La dispersión granulométrica del material no influye en la geometría de las zonas de movimiento y extracción ni en la determinación del valor del dta, para el rango de granulometrías estudiadas.
- La frecuencia de colgaduras depende de la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño de partículas y de la forma de éstas.
- La existencia de segregación de tamaños durante la extracción depende del tamaño de abertura del punto de extracción y de la dispersión granulométrica del material.
- El tamaño del punto de extracción influye en la geometría de la zona de extracción.

SUMMARY

The present thesis is an investigation made for CODELCO Chile, El Teniente Mine. This work presents the results of an experimental study of gravitational flow. The main objective is to investigate how the particle size composition (narrow or wide) affects the drawing phenomenon. The investigation was conducted in a bidimensional physical model with a single drawpoint, whose dimensions are 50 x 26 x 80 cm³. The tests were conducted using crushed stone, and two different particle size compositions were tested.

The more relevant results and conclusions are:

- When the extraction of material begins, two zones are developed. One zone is called the extraction zone and the other is called the movement zone. These zones are characterized by their width and height and are defined by an ellipsoid that grows with the material extracted. The height of the movement ellipsoid grows indefinitely and has a greater rate of growth than the width. The width has a limit value in his growth known as isolated extraction diameter.
- The overall geometry of the movement zone and extraction zone is mainly controlled by the mass drawn.
- The particle size composition does not affect the geometry of movement and extraction zones and neither affects the value of the isolated extraction diameter.
- The hang-ups frequency depends on the ratio between the drawpoint dimensions and the particle size, and on the shape of the particles.
- The existence of particle size segregation during the extraction depends on the drawpoint dimensions and the particle size composition of the material.
- The drawpoint dimension affects the geometry of the extraction zone.

ÍNDICE

RESUMEN	1
SUMMARY.....	2
ÍNDICE.....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	6
1.1 Contexto del presente estudio	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Alcances	9
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	10
2.1 Métodos de explotación por hundimiento	10
2.1.1 Principio del método.....	10
2.1.2 Características de los métodos de explotación por hundimiento	11
2.1.3 Campo de aplicación.....	11
2.1.4 Panel Caving	12
2.1.5 Implementación del Método	12
2.2 Flujo Gravitacional.....	15
2.2.1 Modelos de Flujo Gravitacional.....	19
2.2.2 Fuerzas preponderantes.....	30
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	34
3.1 Instalación experimental	35
3.2 Caracterización del material empleado	36
3.2.1 Distribución granulométrica	37
3.2.2 Forma de las partículas	38
3.2.3 Ángulo de fricción interna	38
3.2.4 Densidad específica y a granel.....	39
3.2.5 Humedad	39
3.3 Preparación de muestras.....	40
3.3.1 Fabricación de muestras.....	40
3.3.2 Homogeneización de muestras	40
3.3.3 Carguío en el modelo	41

3.3.4 Marcadores físicos	41
3.4 Experiencias realizadas	42
3.4.1 Variables controladas.....	42
3.5 Experimentación	45
3.5.1 Experiencias de prueba	45
3.5.2 Experiencias definitivas.....	46
CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	48
4.1 Resultados experiencias de prueba.....	48
4.2 Resultados experiencias definitivas	50
4.2.1 Extracción de material	50
4.2.2 Geometría zonas de extracción y en movimiento	50
4.2.2.1 Ancho de elipse en movimiento y diámetro de tiraje aislado	51
4.2.2.2 Altura de elipse en movimiento.....	53
4.2.2.3 Altura de tiraje aislado.....	54
4.2.2.4 Ancho de elipse de extracción	55
4.2.2.5 Altura elipse de extracción	55
4.2.2.6 Velocidad de flujo	56
4.2.2.7 Índice de Uniformidad.....	57
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
5.1 Geometría de movimiento y extracción	59
5.1.1 Efecto de la dispersión granulométrica.....	62
5.1.2 Efecto del tamaño del punto de extracción.....	68
5.2 Velocidad de flujo	71
5.3 Dilución.....	73
5.4 Colgaduras.....	75
5.5 Granulometría a baldes de extracción	77
5.6 Análisis dimensional	81
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS	89
ANEXO A CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	90

1. Experiencias de prueba	90
1.1 Distribución granulométrica	90
1.2 Humedad	91
2. Experiencias definitivas	91
2.1 Distribución granulométrica	91
2.1.1 Experiencias 1-4	91
2.1.2 Experiencias 5-8	92
2.2 Factor de forma	93
2.3 Densidad Específica.....	94
2.4 Humedad	95
ANEXO B EXPERIMENTACIÓN.....	96
1. Geometría elipsoide de movimiento y extracción.....	96
2. Velocidad de flujo	105
3. Granulometría a baldes de extracción.....	106
4. Constantes adimensionales.....	109

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto del presente estudio

Debido al agotamiento de las reservas que actualmente se encuentran en explotación sobre el nivel Teniente 8, División El Teniente propone una estrategia de explotación incorporando el área llamada Nuevo Nivel Mina (NNM).

En lo operacional, el proyecto incluye un sistema de explotación basado en el método Panel Caving, que involucra niveles de hundimiento, de extracción, de transporte intermedio y chancado, y además, un sistema de manejo de mineral principal que permite llevar el mineral desde el área subterránea a la planta en superficie. Cabe destacar que el mineral a explotar es totalmente primario.

El principio que rige los métodos de explotación por hundimiento, se basan en crear una abertura que implique una dinámica de desplome constante, que permita extraer el mineral a través de una malla de puntos de extracción ubicada en la base del sector a explotar (nivel de producción). La altura de socavación inicial proporcionada por la tronadura, debe ser tal que no se produzcan puntos de apoyo del bloque que impidan o afecten el proceso de socavación natural inmediata. Para evitar los posibles puntos de apoyo del bloque, una vez tronada la base, es necesario determinar previamente la altura que debe alcanzar la socavación producida por la tronadura.

Lo primero que ocurre al socavar la base, es la fractura y caída de grandes bloques de material, luego de un tiempo, se produce una mayor fragmentación de estos bloques de material al ir presionando unos con otros, alcanzando en una etapa más avanzada una granulometría para la cual se puede asimilar a un flujo granular.

El impacto económico y la importancia del fenómeno en si mismo justifica el estudio y trabajo de investigación que se pretende desarrollar al respecto en este trabajo. En efecto, esporádicamente casi todas las minas explotadas por hundimiento han sido objeto de

estudios de flujo gravitacional y hay varias experiencias de modelamiento en maquetas, que han permitido hacer progresos notables en el conocimiento del fenómeno y la practica del tiraje. Los materiales utilizados principalmente en esta clase de ensayos son arena y gravillas.

Existe una serie de experimentos que se han efectuado en particular en los últimos años en modelos físicos de gran magnitud. En ellos se ha concluido lo siguiente:

- El cuerpo en movimiento posee forma similar a una elipse. Se distinguen, **una zona activa** donde se producen desplazamientos verticales y radiales hasta el elipsoide límite y **una zona pasiva** donde no hay movimiento. El movimiento en la zona activa es provocado por la extracción de un volumen menor, denominado elipsoide de extracción.
- El diámetro del elipsoide de movimiento crece al aumentar la extracción hasta un cierto diámetro, llamado diámetro de tiraje aislado, a partir del cual se mantiene constante.
- La velocidad de las partículas aumenta a medida que estas se acercan al punto de extracción. A su vez, esta velocidad es mucho mayor mientras más cerca esté la partícula del eje vertical del elipsoide, siendo máxima sobre éste.
- Cuando la distancia entre puntos de extracción es inferior a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado, hay interacción entre los puntos.
- Las condiciones de borde del modelo y las características del material empleado son las determinantes de la geometría del cuerpo de extracción.
- Según Laubscher [1] al acercar los puntos de extracción a una distancia inferior a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado se produce un modelo de comportamiento denominado tiraje aislado-interactivo.

- El uso de modelos físicos a escala, ya sea con uno ó más puntos de extracción ha sido de gran utilidad en la comprensión del comportamiento del flujo gravitacional de materiales particulados.
- A pesar de los esfuerzos en investigación, aún hay discusiones en la literatura en cuanto a los parámetros que controlan el tiraje aislado en block caving.

En este contexto se inserta esta memoria. Dado el tamaño de las instalaciones no es posible realizar un número importante de experimentos y estudiar en detalle el efecto de diversas variables como lo son el ángulo de fricción, forma de los fragmentos, etc. Este estudio se centrara, como parte de la investigación en modelos físicos, en el estudio del efecto u influencia de la dispersión granulométrica en el flujo gravitacional, y como afecta este en la geometría del cuerpo en movimiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

Estudio del efecto de la dispersión granulométrica sobre el fenómeno de flujo gravitacional, mediante el uso de un modelo físico bidimensional a escala, con un único punto de extracción.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Modelación física del flujo gravitacional por un único punto de extracción.
- Ensayar en un modelo bidimensional a pequeña escala, distribuciones granulométricas con distinta dispersión.
- Determinación de la influencia de la dispersión granulométrica del material en la geometría del cuerpo en movimiento.

- Determinación de la influencia de la dispersión granulométrica en el flujo gravitacional.

1.3 Alcances

Los alcances de este trabajo son los derivados de la utilización de modelos físicos de flujo gravitacional a escala reducida y de los materiales a utilizar en los ensayos.

Simular toda la dinámica del fenómeno se hace imposible, en particular, lo referente a la fragmentación secundaria del material y el proceso de caving previo al flujo de material.

CAPITULO 2: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

2.1 Métodos de explotación por hundimiento

Los métodos de explotación por hundimiento corresponden a un método de explotación, en el cual el cuerpo mineralizado, luego de socavada su base, se hunde y el material hundido es extraído por puntos de extracción localizados bajo esta socavación con una disposición geométrica determinada[2].

Éste método posee menores costos de operación comparado con otros métodos de explotación subterránea ya que utiliza una menor intensidad de perforación y tronadura.

2.1.1 Principio del método

Los esfuerzos presentes en un lugar y a cierta profundidad de un yacimiento, tienen su origen en el peso del macizo rocoso y en fenómenos externos como el movimiento de placas tectónicas en la corteza terrestre.

Todo macizo rocoso, mientras no se cree una cavidad lo suficientemente extensa en su interior, permanece en equilibrio. Esta abertura romperá el equilibrio existente, creando una redistribución del campo de esfuerzos en su alrededor.

La estabilidad de esta cavidad dependerá de sus dimensiones, de la calidad de la roca y del campo de esfuerzos existentes en el área. Si la resistencia de la roca, no es lo suficiente para soportar esta variación, ésta se fracturará y socavará hasta llenar la cavidad con material fragmentado de distintas densidades.

Si el material fragmentado es extraído, a medida que se socava, el equilibrio no se restablece y la socavación continuará hasta la superficie.

2.1.2 Características de los métodos de explotación por hundimiento

La explotación por hundimiento se basa en que tanto la roca mineralizada como la roca encajadora se encuentre fracturada bajo condiciones de diseño más o menos controladas. La extracción del mineral crea una zona de hundimiento sobre la superficie por encima del yacimiento. En consecuencia es muy importante establecer un proceso de fracturamiento continuo y completo, ya que las cavidades subterráneas no soportadas, presentan un riesgo elevado de desplomes repentinos que originan graves efectos a posterioridad en el funcionamiento de la explotación.

El comportamiento del mineral frente al hundimiento depende esencialmente de las características de la roca. Es necesario no solamente que el hundimiento ocurra, sino que además el mineral presente una granulometría adecuada.

En métodos de explotación por hundimiento, la fragmentación de la roca es provocada principalmente por fatigas de tracción más que por las de compresión. En este tipo de explotación, es imprescindible mantener estables galerías de extracción, por lo que conviene minimizar las concentraciones de esfuerzos en el nivel de producción y pilar de protección; por otra parte, conviene maximizar la concentración de esfuerzos sobre el nivel de hundimiento para producir la socavación y mejorar la fragmentación del mineral.

Los trabajos tendientes a socavar la base del cuerpo mineralizado, tienen su inicio en el diseño de la malla, la cual determinará las características del resto de las galerías componentes del sistema. La determinación de la malla depende fundamentalmente de las características de la roca.

2.1.3 Campo de aplicación

Este método es normalmente utilizado para extraer depósitos profundos, masivos, de bajas leyes en Cu, Mo, Fe. Es utilizado en yacimientos de grandes dimensiones, de alto tonelaje.

La producción se encuentra usualmente en un rango de 10.000 toneladas a 130.000 toneladas por día.

En general, los yacimientos más favorables para la aplicación de este método, son los depósitos de tipo porfírico, con mineralización bien diseminada y de gran extensión lateral y vertical, como son los depósitos de cobre porfírico. También es aplicable a pórfidos de molibdeno y depósitos de diamantes. La masa total del depósito, debe poseer suficientes fracturas en diferentes orientaciones para permitir el quiebre de la roca en pedazos más pequeños capaces de ser extraídos por los puntos de extracción, ubicados en el nivel de producción. Los depósitos deben tener grandes reservas, cubrir un área extensa y tener una altura relativamente grande, que permita una vida productiva razonable a los puntos de extracción [2]

2.1.4 Panel Caving

Este método de explotación corresponde a un método de explotación por hundimiento. Se trata de una variación del tradicional método de hundimiento por bloques (Block Caving).

A diferencia del método convencional, el hundimiento o incorporación de nuevas áreas a la producción es realizado en forma continua, por puntos de extracción.

El yacimiento se divide en paneles de grandes dimensiones, en el cual cada panel se corta por la zona inferior, es decir, se excava practicando una ranura horizontal mediante tronadura.

2.1.5 Implementación del Método

Para la implementación del método Panel Caving, se desarrollan básicamente 5 niveles: hundimiento, producción, traspaso, ventilación y transporte. Los niveles de hundimiento, producción, traspaso y transporte se muestran en la figura 2.1 y son descritos a continuación.

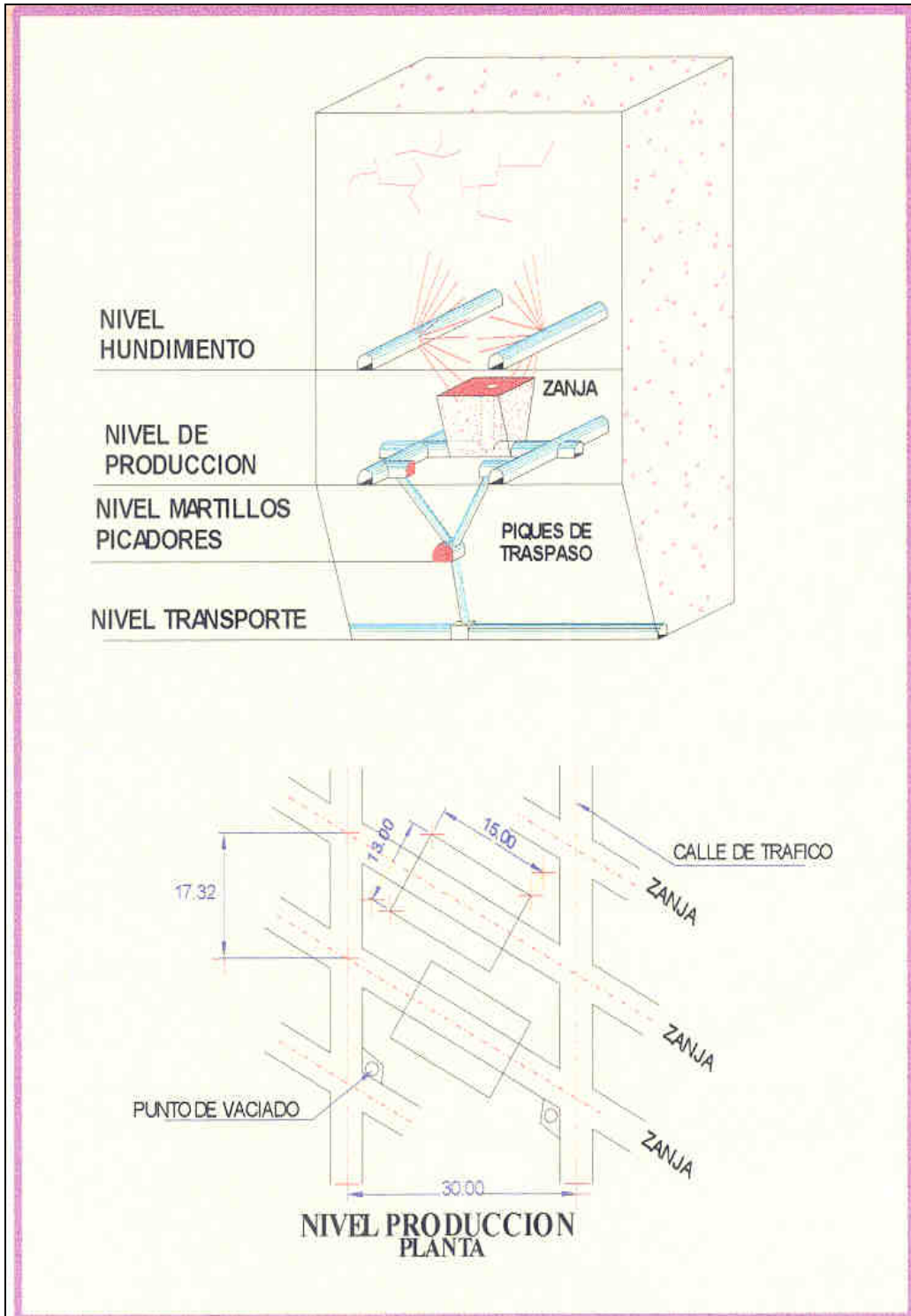


Figura 2.1 Método de explotación Panel Caving y Malla de Extracción Mina El Teniente

a) Nivel de Hundimiento: El objetivo de este nivel es generar la abertura que iniciará el hundimiento del panel. Consiste en una serie de galerías paralelas ubicadas sobre las calles del nivel de producción.

Es necesario distinguir entre Hundimiento Previo, Hundimiento Convencional y Hundimiento Avanzado. El Hundimiento Previo, consiste en avanzar con el frente de hundimiento (socavación), llevando desfasado - detrás del frente de hundimiento y bajo área hundida - la preparación del nivel de producción, disminuyendo de esta manera el grado de deterioro de la infraestructura productiva. En Hundimiento Convencional se hacen las zanjas primero y luego se procede a socavar. En la tercera modalidad, el Hundimiento Avanzado, se permite hacer parte del nivel de producción antes de socavar, a diferencia del Hundimiento Previo en que no se permite hacer nada en el nivel de producción antes de socavar el nivel de hundimiento.

b) Nivel de Producción: Su objetivo es permitir la extracción del material fragmentado. Está ubicado bajo el nivel de hundimiento y formado por una serie de galerías (calles), paralelas entre sí, que constituyen las vías de tráfico por donde circulan los equipos LHD. Interceptando a las calles se encuentran las estocadas de carguío, las que permiten a los equipos LHD entrar a cargar el mineral en el punto de extracción. Uniendo dos estocadas de carguío se encuentra la zanja recolectora de mineral. La unión entre la estocada de carguío y la zanja es conocida como punto de extracción.

A la disposición geométrica de calles, estocadas y zanjas se le denomina Malla de extracción.

c) Nivel de Ventilación: Su objetivo es permitir la ventilación de los niveles de producción, hundimiento, reducción, traspaso y transporte. Consisten en una serie de cruzados alternados por los cuales se inyecta aire limpio que va hacia los distintos niveles, los recorre y luego es extraído por chimeneas a otros cruzados y es finalmente enviado a superficie.

d) Nivel de Traspaso: Su objetivo es permitir el flujo del material extraído hasta el nivel de transporte. El material es transportado a través de piques de traspaso. Dependiendo de las

características granulométricas de la roca, se contempla un nivel picado intermedio, en el cual martillos picadores reducen el material de tamaño.

e) Nivel de Transporte: Su objetivo es el transporte del material a superficie. Se ubica en la parte inferior del nivel de traspaso y a este nivel convergen los piques de traspaso. El material es extraído a superficie ya sea por carros de ferrocarril, camiones de bajo perfil o correas transportadoras, dependiendo de factores operacionales de la mina.

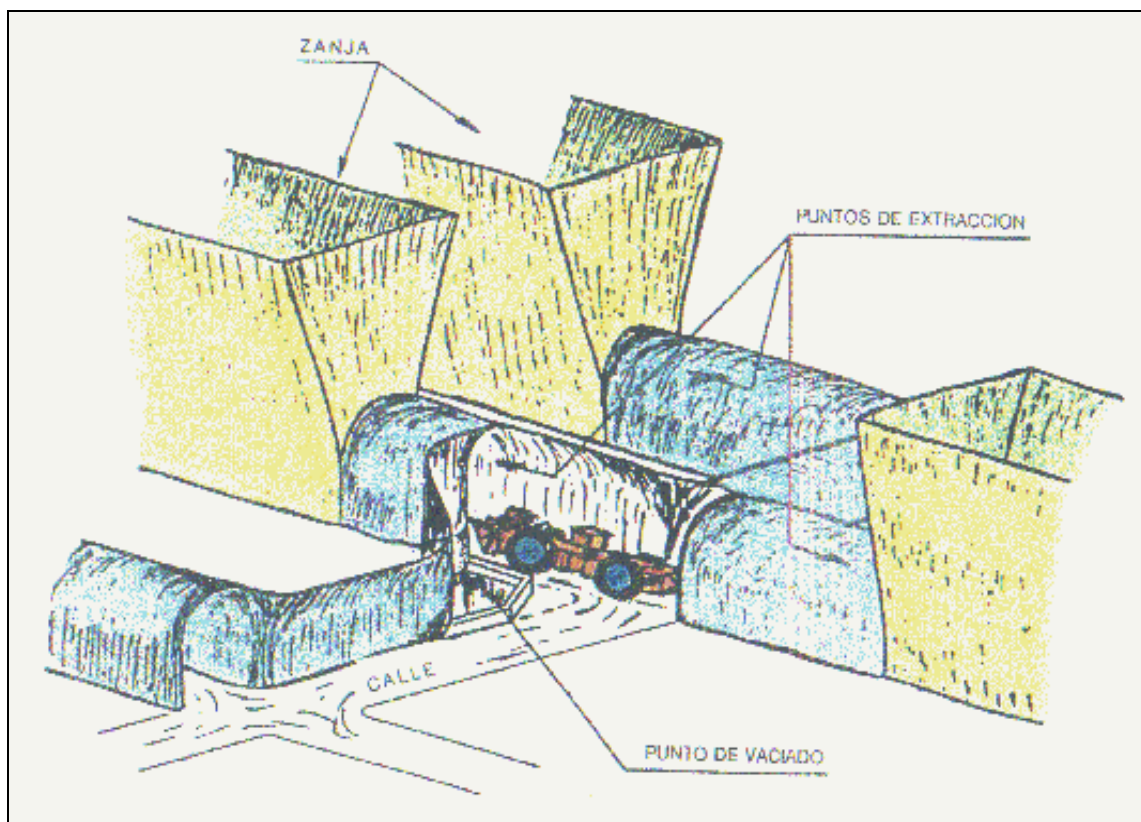


Figura 2.2 Esquema del Nivel de Producción

2.2 Flujo gravitacional

El flujo gravitacional de partículas se define como el flujo de material fragmentado no cohesivo a través de un punto de extracción afectado por la fuerza de gravedad. Así, las

partículas que se mueven desde su posición original, desarrollan un cuerpo en movimiento durante la descarga.

El flujo gravitacional se desarrolla gradualmente por sobre el nivel de hundimiento, a partir de fragmentos de roca que se han movido desde su posición original durante la descarga que produce la extracción del material acumulado por los equipos LHD. Estos equipos sólo extraen unas pocas toneladas en cada ciclo, por lo tanto, el flujo gravitacional en la minería por hundimiento, es lo suficientemente lento como para no inducir flujo permanente, ni fuerzas dinámicas.

El comportamiento del flujo gravitacional de material particulado, F_m , se puede definir como una función de las siguientes variables[3]

$F_m = f(E \text{ {extracción}}, P_m \text{ {Propiedades del material}}, G_m \text{ {Geometría de la malla}}, D_s \text{ {distancia a superficie}})$

Extracción: La extracción se puede caracterizar a partir de los parámetros de tiraje en función del tiempo (tonelaje total extraído, tiempo total de extracción, ritmo de extracción) y la relación entre los parámetros de todos los puntos de extracción que constituyen el área de hundimiento, que puede caracterizarse a partir de la uniformidad del tiraje, la cual está caracterizada por un índice, denominado índice de uniformidad. Este índice determina la simultaneidad de la extracción entre puntos de extracción vecinos, para un cierto período de tiempo, y se define como [3]:

$$I.U. = \frac{\sum_{i=1..n} |tep - tepi|}{\sum_{i=1..n} tepi} \quad (2.1)$$

Donde tep y $tepi$ son los tonelajes promedio extraídos por el punto de interés y por sus vecinos respectivamente, en el período de tiempo considerado.

Propiedades del material: Entre las principales propiedades del material, desde la perspectiva del flujo gravitacional están el ángulo de fricción interna del material ϕ , y la humedad. A mayor ϕ , menor diámetro de tiraje aislado y a mayor humedad menor diámetro de tiraje aislado. El ángulo de fricción interna es función de la densidad aparente del material de la columna, de características intrínsecas de la roca como son la rugosidad, resistencia de la roca intacta, angulosidad de los clastos, entre otros, y de la fragmentación que corresponde al tamaño de partículas y a la granulometría del material.

A mayor densidad, mayor tamaño de partícula y una granulometría extensa, mayor es el ángulo de fricción interna.

Es un error introducir propiedades constantes del material en los modelos de cálculo de flujo gravitacional, porque las propiedades del material varían dentro del flujo gravitacional, en espacio y tiempo. Sin embargo, para la comparación de distintos materiales, se dan algunas recomendaciones para la estandarización internacional de las propiedades [4].

Una completa descripción de un material, en nuestro caso, roca tronada y socavada, incluye un gran número de parámetros. Wood [5], realizó un análisis para material a granel en silos, siendo este estudio adaptable a roca socavada, determinando que el material puede ser agrupado en 3 grupos principales:

- 1.- Partículas discretas
- 2.- Partículas a granel y finalmente,
- 3.- Otras influencias

Los factores están listados a continuación

Partículas discretas	Conjunto a granel	Otras influencias
Fatiga	Aireación y fluidización	Contaminación
Degradación	Aglomeración	Formación de corteza/caldera
Elasticidad	Ángulo de reposo	Velocidad del flujo
Electrostática	Ángulo de deslizamiento	Geometría del container
Dureza	Efectos en la frontera	Geometría de la trayectoria del flujo
Magnetismo	Densidad a granel	Sistema de carguío
Composición del Mineral	Cohesión	Presión
Densidad relativa	Compactación y consolidación	Velocidad de carguío
Forma	Esfuerzos de contacto	Velocidad de descarga
Tamaño	Distribución de sólidos	Tiempo de almacenaje
Química superficial	Distribución de espacios vacíos	Vibración
Energía superficial	Efectos electrostáticos	Cambios de volumen
Rugosidad superficial	Textura	Material de la pared
	Potencial de flujo	Meteorización
	Fricción interna	
	Fuerzas interpartículas	
	Contenido de agua	
	Empaquetamiento	
	Interacciones partícula a partícula	
	Permeabilidad	
	Presión de los poros	
	Porosidad	
	Segregación	
	Fuerza de corte	
	Distribución de tamaños	
	Calor específico	
	Distribución de esfuerzos	
	Temperatura	
	Conductividad térmica	
	Tipo de gas intersticial (carbón)	
	Fuerza de acceso no confinado	
	Distribución de la energía cinética de vibración	

Tabla 2.1 Propiedades y procesos que determinan las características de sólidos a granel durante el almacenaje y flujo gravitacional

En el trabajo práctico, sin embargo, raramente todos estos parámetros pueden ser cuantificados, y por lo tanto la concentración se debe centrar en las propiedades físicas y mecánicas más relevantes, entre las que se cuentan: la distribución de tamaño de fragmentos, el factor de forma definido preferiblemente como esfericidad, la fricción superficial de los fragmentos, la fatiga, la densidad a granel de los fragmentos, la fuerza de corte, la cohesión del material a granel y el contenido de agua.

Los fragmentos grandes o el material fino con alta cohesión son normalmente responsables de las colgadas. La forma y la fricción superficial de los fragmentos determinan la movilidad del material, y la fatiga determina el cambio de la distribución de tamaño del fragmento durante el tiraje. La densidad aparente influencia la velocidad del flujo del material comparado al material circundante, el cuál tiene normalmente una densidad más

alta. La fractura de colgaduras es causada principalmente por las fuerzas de corte, y por lo tanto, el esfuerzo de corte y la cohesión son de importancia fundamental. Éstos son, por lo tanto, los parámetros que se deben incluir en una recomendación internacional para la clasificación de los materiales socavados.[4]

Geometría de la malla: La malla de extracción corresponde a la variable de diseño más relevante en un panel de hundimiento minero. La geometría de la malla de extracción considera la distribución y distancia entre puntos de extracción. La distancia entre éstos determinará si hay o no interacción entre los puntos de extracción en el flujo gravitacional.

Distancia a superficie: El flujo de material se comporta de manera distinta cuando detecta la proximidad de la superficie.

2.2.1 Modelos de Flujo Gravitacional

En diversos estudios, se ha intentado reproducir las características del flujo en minería por hundimiento. Se ha intentado describir y calcular la forma de la envolvente del cuerpo en movimiento, pocos de estos cálculos incluyen las propiedades del material explícitamente, sino que se trata de datos empíricos que no permiten conocer el mecanismo del flujo gravitacional.

Los investigadores han estudiado el tema, utilizando principalmente:

- Experimentos en modelos físicos
- Analogías con el flujo gravitacional de otros materiales en silos
- Modelamientos numéricos
- Pruebas en terreno a gran escala, utilizando marcadores

A continuación se describe el estado del arte de los modelos físicos y el aporte de los diversos investigadores del tema.

i) Rudolph Kvapil (1966)

Realizó ensayos utilizando un modelo físico que consistía en una caja con arena, con un orificio en su base.

De sus experimentos concluye que [6]:

- Al realizar la extracción de material, se produce una sucesiva deflexión de las líneas horizontales hacia la abertura.
- El cuerpo en movimiento posee forma similar a una elipse. Se distinguen, **una zona activa** donde se producen desplazamientos verticales y radiales hasta el elipsoide límite, **una zona pasiva** donde no hay movimiento. El movimiento en la zona activa es provocado por la extracción de un volumen menor, denominado elipsoide de extracción.
- Si la extracción continúa, el elipsoide aumenta en altura tanto como lo permita la columna de material, pero su diámetro se encuentra acotado a partir de un determinado momento. Por lo que, para alturas considerables, el elipsoide alcanza una forma cilíndrica, independiente del tamaño del punto de extracción.
- La dimensión del elipsoide de extracción, depende principalmente de la dimensión del punto de extracción, del caudal de vaciado, del ángulo de fricción entre pared y partícula y características del material.
- Las características del elipsoide dependen de muchas propiedades del material granular, como son el tamaño y forma de las partículas, la rugosidad

superficial de las partículas, el ángulo de fricción interna, la densidad, el porcentaje de componentes con efecto lubricante, el ritmo de extracción, propiedades intrínsecas de las partículas, etc. Éstas se combinan produciendo un comportamiento que puede ser expresado en términos de la movilidad del material. El material de alta movilidad produce un diámetro menor del elipsoide que el de baja movilidad.

- Distingue entre movimiento primario y secundario de partículas individuales en medios granulares. En el movimiento primario, las partículas siguen la dirección de la fuerza de gravedad y el movimiento secundario puede ser caracterizado por su traslación y rotación traslapada del movimiento primario.
- La velocidad de las partículas aumenta a medida que estas se acercan al punto de extracción. A su vez, esta velocidad es mucho mayor mientras más cerca esté la partícula del eje vertical del elipsoide, siendo máxima sobre éste.
- Al abrir un punto de extracción exageradamente grande con respecto al tamaño del granular, se produce un cambio en la forma del flujo. La parte central de la zona de flujo se mueve como una columna. Este tipo de flujo es llamado flujo de masa o de columna.

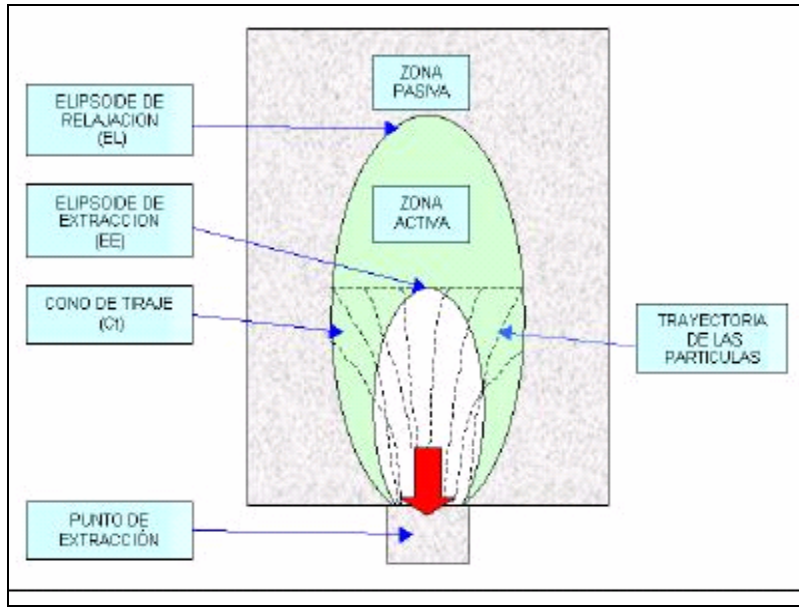


Figura 2.3 Teoría de Flujo según Kvapil

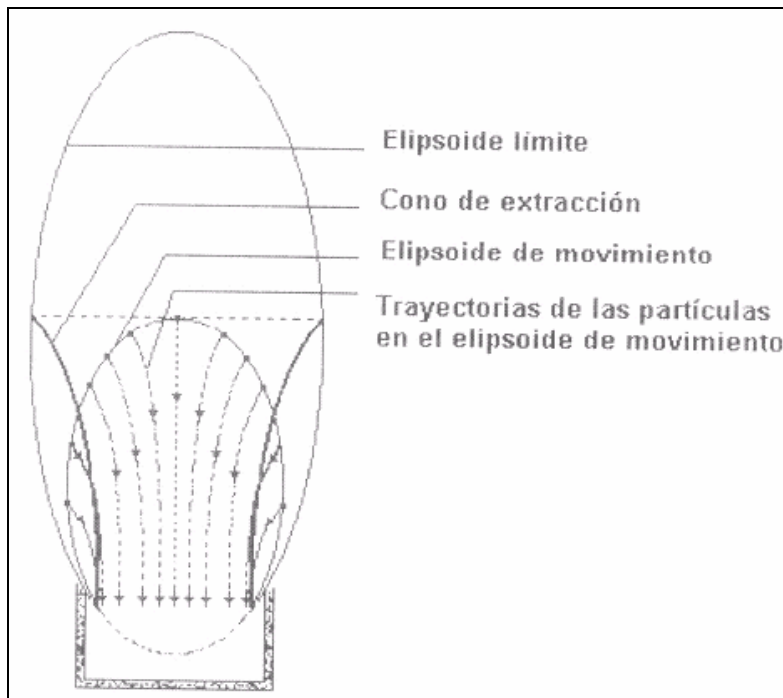


Figura 2.4 Trayectoria de las partículas en el elipsoide de movimiento

ii) Mc Cormick (1968)

Utilizó un modelo bidimensional de arena con un único punto de extracción en el fondo. Variando el tamaño máximo de partícula, Mc Cormick obtuvo diversos anchos de tiraje máximo, planteando de acuerdo a sus resultados comportamientos similares entre el material fino y grueso. También realizó un ensayo que consistió en extraer arena por un punto de extracción de ancho variable. Él concluye que el ancho del tubo no depende del ancho del punto de extracción [7].

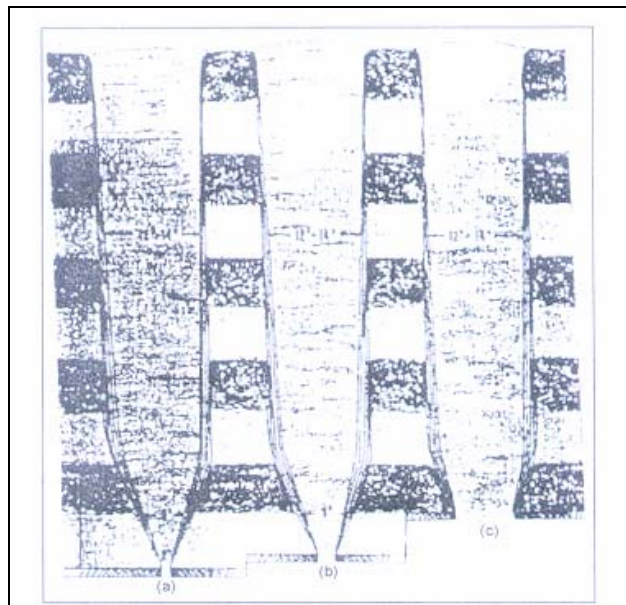


Figura 2.5 Experiencia realizada por Mc Cormick

iii) Li Yenge (1980)

Utilizó un modelo bidimensional de arena, en el cual simuló el flujo en una mina explotada por Sub Level Caving.

Concluye que las variables que afectan al flujo gravitacional son la geometría de empaquetamiento del material, condiciones de borde impuestas en el tiraje y variables como la cohesión de los granos.

Concluye, a su vez, que el objetivo de un modelo de prueba no es describir el patrón de flujo para el mineral, sino clasificar la importancia de los factores que contribuyen a las propiedades de extracción para los materiales bajo condiciones de borde específicas [8].

iv) Peters (1984)

Utilizó un modelo de arena con un único punto de extracción.

Experimentó con distintas distribuciones de tamaños para ver su efecto sobre la envolvente del flujo. Concluye que el ancho del tiraje depende del porcentaje de finos incluidos y las dimensiones del punto de extracción [9].

v) Stashevzky (1990)

Utilizó un modelo de arena con un punto de extracción.

Observa 2 zonas: La primera corresponde al material en movimiento, el cual fluye formando un tubo de paredes verticales. La segunda corresponde a una zona de reposo que corresponde al material fuera del tubo.

Se define una zona de erosión entre la zona de flujo de masa y el material estacionario, esta erosión produce que la envolvente de flujo se expanda sucesivamente al extraer material por el punto de extracción.

vi) Fuentes (1996)

Estudio teórico de similitud entre un modelo físico de arena y una mina de Block Caving.

Concluye que un modelo de arena es adecuado para estudiar el fenómeno de flujo gravitacional en paneles, pero hay que recorrer todavía un largo camino de ensayos y comparaciones. Los parámetros a escalar son la geometría y ángulos de fricción interna del material [10].

vii) Poschel (2000)

Realizó un estudio de factores de escala basado en ecuaciones de movimiento para el flujo de materiales granulares. Determinó que se deben escalar las propiedades del material (Módulos de Young, Poisson y ángulo de fricción del material), escala de longitudes y de tiempo. Sin embargo, la aplicación de esta metodología está restringida a flujos rápidos de medios granulares donde tiene gran importancia la fuerza normal entre granos, cosa que no ocurre en la minería por hundimiento de bloques [11].

viii) Laubscher (1981)

Utilizó modelos de arena a escala y estableció una relación entre el espaciamiento de los puntos de extracción y la interacción de las zonas de tiraje [1].

Teoría de Interacción: Si los puntos de extracción están separados a una distancia menor que 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado (DTA), el comportamiento de la columna es tal que ésta desciende uniformemente hasta una altura, denominada “altura de interacción”, a partir de la cual el material presenta un movimiento caótico, pudiendo aparecer en cualquiera de los puntos de extracción. La altura de interacción dependerá de la granulometría, la distancia entre los puntos de extracción, la irregularidad del tiraje y la velocidad de extracción.

La teoría interactiva de Laubscher considera dos posibles comportamientos para el flujo gravitacional. Estas son flujo aislado y flujo interactivo. El flujo aislado se genera cuando el espaciamiento entre puntos de extracción vecinos es mayor a 1.5 veces el DTA.

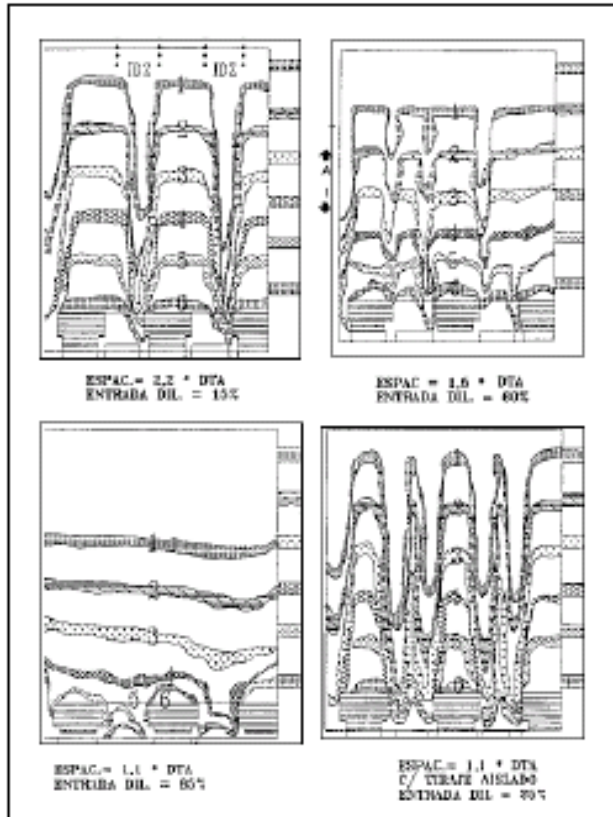


Figura 2.6 Resultados experimentales de Laubscher

Laubscher además plantea un modelo volumétrico de predicción de leyes, basado en la teoría de interacción, donde estima el porcentaje de extracción al comienzo de la dilución, que corresponde al momento en el cual el estéril es observado por primera vez en los puntos de extracción. Se plantea que el mineral extraído desde una columna es el resultado de la mezcla de mineral y estéril dentro de la columna. Se asume que la incorporación de estéril es de carácter lineal.

Para la determinación del ancho máximo de tiraje, Laubscher(1994) propone un ábaco basado en la calidad geomecánica de la roca in situ y el ancho del punto de extracción.

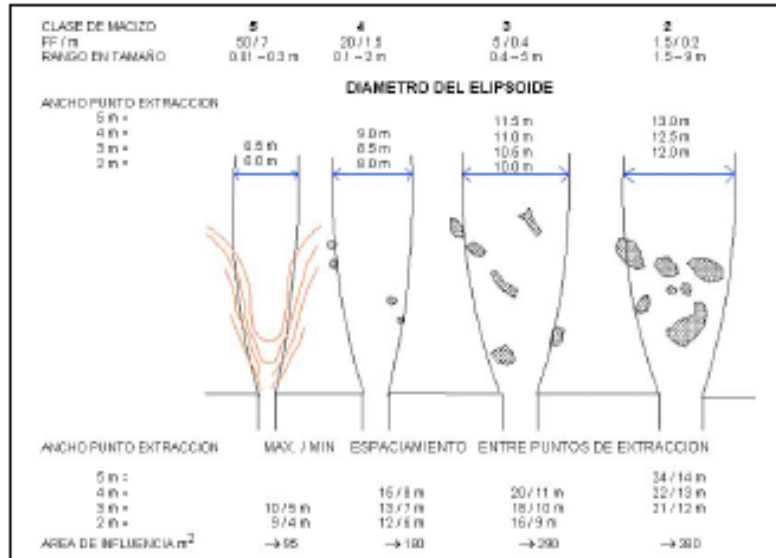


Figura 2.7 Diámetro de tiraje aislado en función de la calidad de la roca y ancho de carguío propuesto por Laubscher

ix) Estudios Recientes (Susaeta y Díaz)

Uno de los resultados más relevantes fue la observación de un nuevo patrón de comportamiento global, denominado flujo aislado-interactivo [3]. Se considera que la función del flujo de masas (F_m) tiene al menos tres modelos de comportamiento distintos: Flujo Aislado, Flujo Interactivo y Flujo Aislado-Interactivo [12].

Al acercarse los puntos de extracción a una distancia inferior a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado, el umbral de medio continuo es alcanzado durante el tiraje abierto. Se genera una superposición de comportamientos. Se da un comportamiento de flujo aislado sobre los puntos de extracción y flujo interactivo sobre la zona del pilar. Este modelo de comportamiento es denominado tiraje aislado-interactivo.

En el flujo “aislado-interactivo” existe movimiento lateral de parte de la columna hasta la superficie y la velocidad en la zona de tiraje aislado es mayor que la velocidad en la zona de interacción.

A continuación se detalla un esquema del flujo aislado-interactivo:

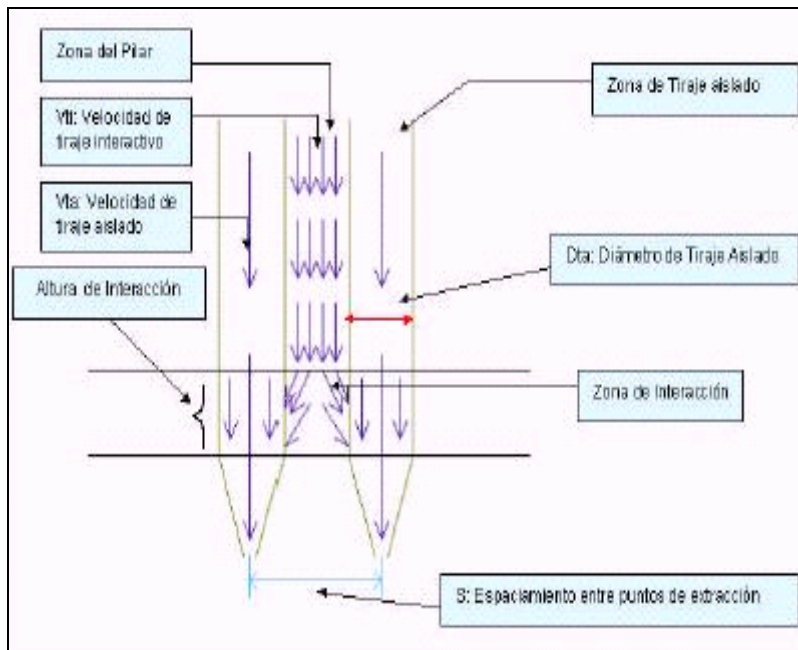


Figura 2.8 Flujo Aislado Interactivo

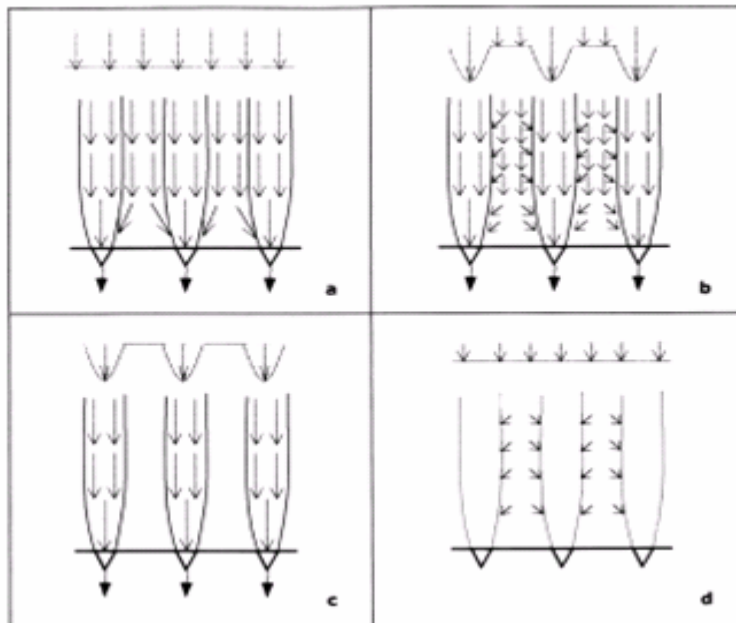


Figura 2.9 Patrones de extracción. a) flujo interactivo, b) flujo aislado-interactivo, c) flujo aislado, d) puntos de extracción cerrados, común para todos los casos.

x) Síntesis Crítica

- La envolvente de las partículas en movimiento tiene forma de elipsoide.
- El diámetro del elipsoide crece al aumentar la extracción hasta un cierto diámetro, llamado diámetro de tiraje aislado, a partir del cual se mantiene constante.
- Cuando la distancia entre puntos de extracción es inferior a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado, hay interacción entre los puntos.
- Las condiciones de borde del modelo y las características del material empleado son las determinantes de la geometría del cuerpo de extracción.
- A medida que el material fluye, se produce una sucesiva formación de arcos donde todo el peso que se apoya sobre estos es reparte en sus apoyos laterales, dejando el área bajo el arco libre de esfuerzos.
- Según Susaeta y Díaz, al acercar los puntos de extracción a una distancia inferior a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado se produce un modelo de comportamiento denominado tiraje aislado-interactivo.
- El uso de modelos físicos a escala, ya sea con 1 ó más puntos de extracción ha sido de gran utilidad en la comprensión del comportamiento del flujo gravitacional de materiales particulados.
- A pesar de los esfuerzos en investigación, aún hay discusiones en la literatura en cuanto a los parámetros que controlan el tiraje aislado en block caving.

2.2.2 Fuerzas preponderantes

El flujo de material granular está sujeto principalmente a 2 tipos de fuerzas: la fuerza de gravedad y fuerzas de fricción. La fuerza de gravedad es la fuerza de atracción que ejerce la Tierra hacia su centro sobre cualquier cuerpo con masa, mientras que, las fuerzas de fricción corresponden a fuerzas ejercidas por los fragmentos entre si, por medio de sus contactos puntuales o superficiales. Para materiales más finos, aparecen otros tipos de fuerzas, que pueden afectar al flujo, como son [13]:

-*Fuerzas de Van der Waals* (F_{vdw}): de acuerdo a un análisis comparativo entre esta fuerza y la fuerza de gravedad, se puede introducir un coeficiente α , tal que:

$$F_G = \alpha \cdot F_{vdw} \quad (2.2)$$

Tomando una densidad de partícula de 2,7 [ton/m³] y $g = [9,8 \text{ m/s}^2]$ se llega a distintos α para distintos tamaños de partículas (d_p), como se muestra en la tabla 2.2.

α (adimens)	d_p (cm)
41.000	0,638
1.000	0,185
100	0,086
10	0,04
1	0,019
0,1	0,008
0,01	0,004

Tabla 2.2 α para distintos d_p

Por lo tanto, para partículas superiores a 0,04 (cm), que constituye la mayoría del material a utilizar en este estudio, las fuerzas de Van der Waals son despreciables frente a la fuerza de gravedad.

-*Fuerzas capilares*: las fuerzas capilares son de mayor importancia que las de Van der Waals, siendo más preponderantes para tamaños inferiores a 0,4 (cm). Sin embargo, esto

ocurre sólo si hay un alto contenido de humedad en el material, por lo que en nuestro caso, no aparecen, ya que el material se encuentra totalmente seco.

-Fuerzas cohesivas: No existe cohesión en el material a utilizar, debido al tamaño de las partículas y a que no hay humedad.

-Efecto de pared: Al tener la abertura de salida en contacto con la pared de acrílico, se produce un efecto de pared, que distorsiona el movimiento de las partículas. . Se pensó que la pared posterior del modelo, podría estar provocando también un efecto de pared, pero de los experimentos, se observó que el elipsoide no se acerca a la otra pared, por lo que ésta no influye en el movimiento del material.

El ingeniero Raúl Castro (2001), realizó un análisis para estimar el efecto de tener el orificio de salida en contacto con la pared de acrílico

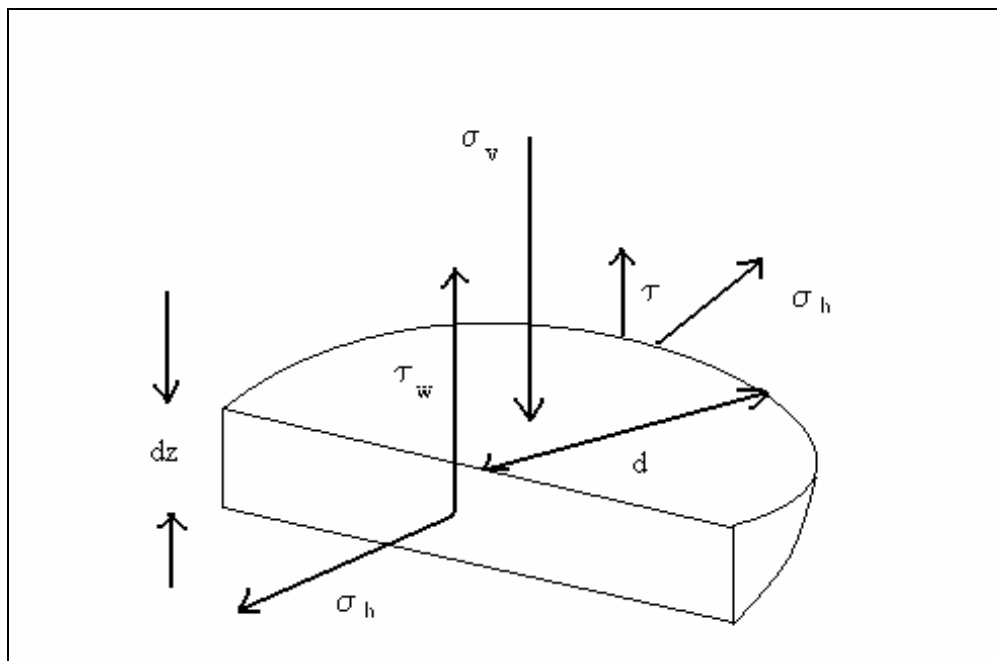


Figura 2.10 Efecto de pared

Se efectuó el análisis sobre un volumen como el de la figura 2.10[13]. La pared de acrílico se ve representada por la superficie recta y la curva es la superficie de deslizamiento. Los coeficientes de fricción entre pared y partículas e interpartícula son μ_w y μ , respectivamente.

Considerando que el área sobre la que actúa el esfuerzo de corte sobre la pared de acrílico, τ_w es $(2d)dz$, sobre la que actúa el esfuerzo de corte intergranular, τ , es $(\pi d/2)dz$ y sobre la que actúa el esfuerzo vertical, σ_v , es $\pi d^2/8$, y con $\tau_w = \mu_w \sigma_h$, $\tau = \mu \sigma_h$ y $\sigma_h = \lambda_p \sigma_v$, con σ_h el esfuerzo horizontal y λ_p un coeficiente de proporción entre el esfuerzo vertical y el horizontal, y definiendo $a_1 = \frac{4\lambda_p \mu}{d} \left(\frac{4\mu_w}{\pi\mu} + 1 \right)$, se obtiene:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + a_1 \sigma_v = \rho g \quad (2.3)$$

y cuya solución con la ecuación de borde $\sigma_v = 0$ en $z = 0$ es:

$$\sigma_v = \frac{\rho g}{a_1} (1 - e^{-a_1 z}) \quad (2.4)$$

Por otra parte, considerando la condición en donde la pared de acrílico tiene un ángulo de fricción igual al del material, la ecuación 2.4 se reescribe como:

$$\sigma_v = \frac{\rho g}{a_2} (1 - e^{-a_2 z}) \quad (2.5)$$

$$\text{con } a_2 = \frac{8\lambda_p \mu}{d} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right)$$

Sean, σ_{v1} el valor de σ_v al tener un modelo con una pared de acrílico y σ_{v2} el valor de σ_v para un modelo con coeficiente de fricción parietal igual al intergranular, se llega a la siguiente relación:

$$\frac{\sigma_{v1}}{\sigma_{v2}} = 1,18 \quad (2.6)$$

Es decir, el esfuerzo vertical, cuando la altura es cercana a 0,8 (m) es aproximadamente un 18% mayor al tener una pared de acrílico en vez de tener una de material granular. Por lo tanto, el efecto de pared es relativamente importante al tener un orificio de descarga en contacto con una de las paredes de acrílico. Sin embargo, todas las experiencias están sujetas a igual efecto de pared por lo que los resultados son comparables entre sí.

-Fuerzas magnéticas y electrostáticas: son preponderantes cuando se tiene material fuertemente magnetizado y partículas con diferencia de carga respectivamente, por lo que en nuestro caso son despreciables.

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que las fuerzas preponderantes en el flujo gravitacional de un material granular no cohesivo son, la fuerza de gravedad y la fricción.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este capítulo describe la metodología experimental utilizada en esta investigación. Se detalla el estudio realizado y cómo se realizó.

El flujo gravitacional en Block Caving es un proceso bastante complejo. Aún si el proceso de caving no es considerado, es decir, se tiene una roca totalmente fracturada, el proceso se puede tornar complejo, debido a cambios en las características geomecánicas de la roca, ya sea por cambios en el tiempo, el agua que se infiltra en la roca y que afecta las características de esfuerzo de corte de la roca, o a una cantidad significativa de arcillas y partículas muy finas que provocan una tendencia de la roca a ser cohesiva. Por lo tanto, es extremadamente complicado, estudiar todos los problemas que se dan durante el flujo gravitacional o entender todas las variables que afectan a éste, mediante modelamiento físico. Por lo que se hace necesario incorporar ciertas suposiciones y simplificaciones [14]:

- El flujo gravitacional en minas explotadas por métodos de hundimiento, involucra el estudio de fragmentos no cohesivos, moviéndose bajo la acción de la fuerza de gravedad.
- La fragmentación secundaria del material y el proceso de caving previo al flujo de material, no son considerados.
- El efecto de humedad no es considerado.
- El efecto de pared puede llegar a ser importante, pero si se considera el estudio de variables bajo la misma condición, para efectos de comparación, se puede despreciar.

Como sabemos, el ángulo de fricción interna es una constante del material granular que depende de las propiedades de las partículas individuales, como el tipo de roca, la rugosidad, el arreglo de las partículas, la forma, entre otros. Así, la forma de las partículas

influencia fuertemente el ángulo de fricción interna, mientras se mantienen constantes las otras propiedades. Se ha observado que partículas esféricas dan un bajo ángulo de fricción ($< 35^\circ$) mientras que partículas tabulares dan un ángulo de fricción alto ($35^\circ - 50^\circ$).[14]

Para el modelamiento de flujo de roca hundida no cohesiva, la grava o gravilla es un material más apropiado, que por ejemplo, arena fina, debido a que materiales finos pueden cambiar transformándose en materiales cohesivos a medida que se reduce su tamaño y por lo tanto las fuerzas capilares y electrostáticas pueden llegar a tener un orden de magnitud similar a la fuerza gravitacional. Por otra parte, materiales aluviales como la arena poseen un alto grado de erosión y en general tienen forma esférica lo que, como se mencionó anteriormente, puede incidir en el ángulo de fricción interna y potencialmente en los mecanismos de flujo gravitacional. Por último, la roca hundida en las minas explotadas por métodos de hundimiento, tiene forma angular por lo que estará mejor representada por material chancado.

El presente estudio busca determinar como afecta la dispersión granulométrica del material en el fenómeno de flujo gravitacional, para lo cual se experimentará en un modelo físico de flujo gravitacional, asumiendo ciertas suposiciones descritas anteriormente y utilizando material 100% chancado.

3.1 Instalación experimental

La experimentación se realiza en un modelo físico de flujo gravitacional, cuyas principales características se detallan a continuación:

- Estructura rectangular de madera con 4 paredes de acrílico. Sus dimensiones son 80 cms de alto x 50 cms de largo x 26 cms de ancho. Por lo tanto tiene un volumen de $0,104 \text{ m}^3$.
- Extracción mediante un único punto de extracción, ubicado junto a una de las paredes de acrílico. El punto de extracción se ubica en contacto con una de las

paredes para permitir la visualización de los marcadores, y así poder determinar la envolvente del flujo.

- Sistema manual de salida de flujo mediante el uso de una placa de madera.

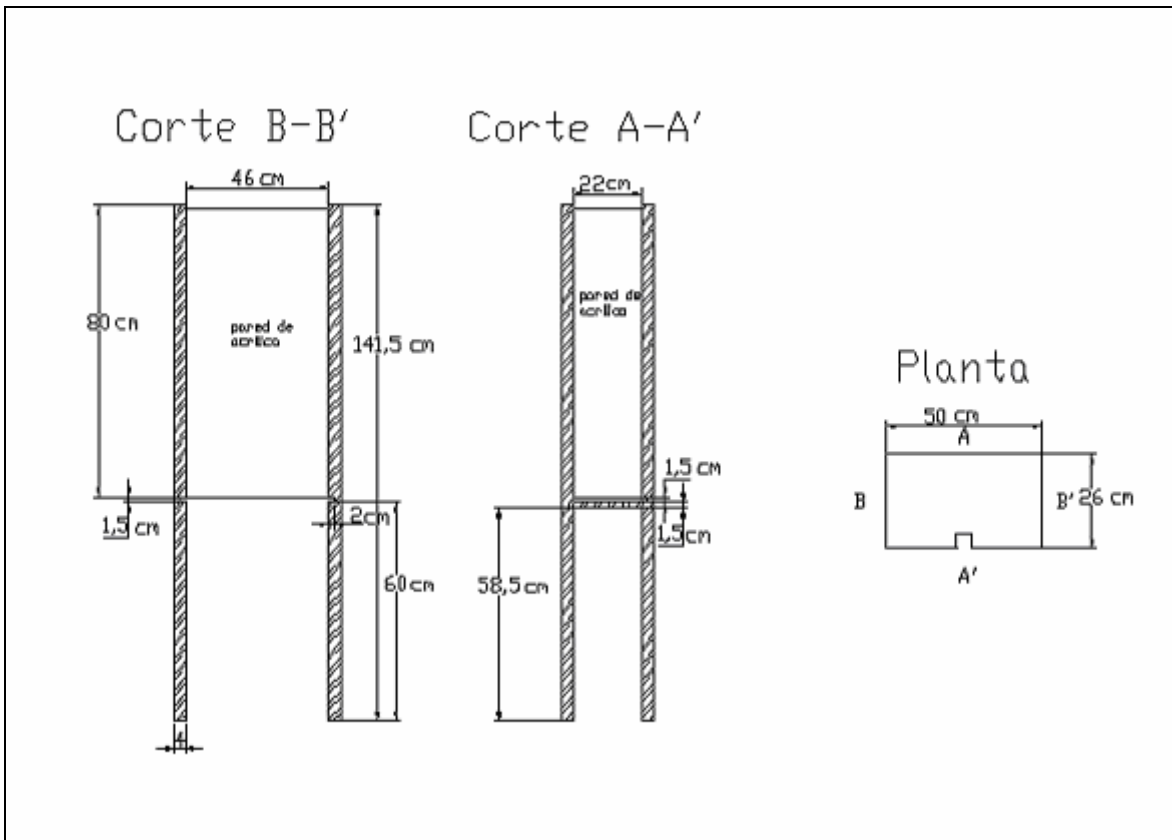


Figura 3.1 Modelo Físico utilizado

3.2 Caracterización del material empleado

El material granular utilizado se caracterizó con respecto a su distribución granulométrica, la forma de las partículas, la densidad específica y a granel, el ángulo de fricción interna y la humedad. Cabe destacar que se realizaron experiencias de prueba y finales con distintas granulometrías; las primeras para verificar si la instalación experimental podía ser utilizada para las experiencias finales.

3.2.1 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica para las experiencias de prueba es la siguiente.

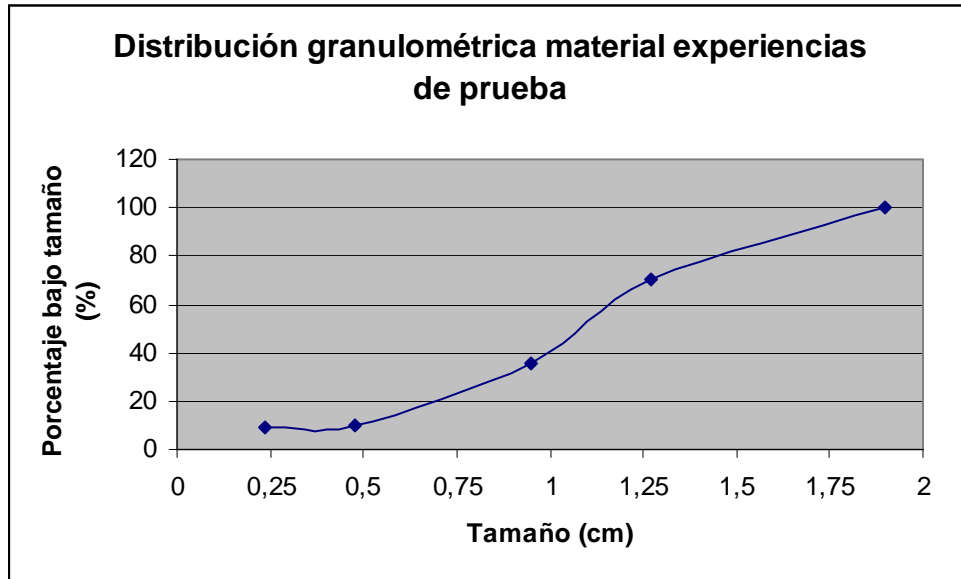


Gráfico 3.1 Distribución granulométrica experiencias de prueba

Para las experiencias definitivas se fabricaron 2 distribuciones granulométricas con distinta dispersión. El gráfico 3.1 muestra estas distribuciones:

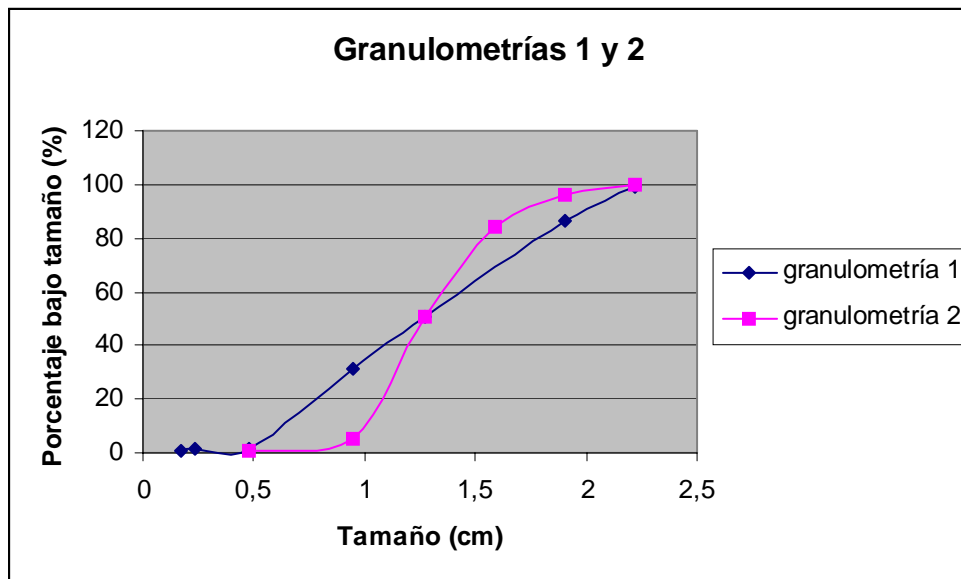


Gráfico 3.2 Distribuciones granulométricas del material empleado

Estas distribuciones se caracterizaron por el tamaño máximo de partícula, por el d_{50} y por el índice de uniformidad, definido como:

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

donde d_{60} y d_{10} son los tamaños bajo los cuales se encuentran el 60 % y el 10 % de la muestra, respectivamente. Si el índice de uniformidad Cu es igual a 1, se tiene un material completamente uniforme; si es mayor se tiene un material con partículas finas y gruesas.

Granulometría	d100 (cm)	d60 (cm)	d50 (cm)	d10(cm)	Cu
1	2,22	1,45	1,27	0,63	2,3
2	2,22	1,35	1,27	1,02	1,3

Tabla 3.1 Caracterización granulométrica.

3.2.2 Forma de las partículas

La forma de las partículas se determinó midiendo el largo, ancho y espesor de un número representativo de partículas (> 30). El factor de forma se determinó utilizando la siguiente relación:

$$r_v = \frac{6V}{\pi d^3} \quad (3.2)$$

donde V es el volumen de la partícula, y d es el promedio estadístico del largo, ancho y espesor de ésta. Si r_v es igual a 1 se tienen partículas esféricas, mientras que valores menores indican cierta regularidad. El valor de r_v para el material ensayado entregó un valor cercano a 0,7 por lo que se trata de partículas angulosas[Anexo A].

3.2.3 Ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción, fue obtenido formando una pila con el material a utilizar y se midió el ángulo de reposo, que corresponderá al ángulo de fricción interna del material. Para la medición del ángulo se midió con huincha la inclinación de la pila hasta los 30 cm., luego

se midió la altura vertical desde ese punto hasta el suelo, y aplicando trigonometría, se obtuvo el ángulo de reposo. Para corroborar estas mediciones, se sacaron fotografías a la pila y se realizaron mediciones similares a menor escala.

3.2.4 Densidad específica y a granel

Para el cálculo de la densidad específica, se tomó una muestra de más de 30 partículas, a las cuales, se les midió su densidad y luego se calculó el promedio estadístico de estas. Para la densidad a granel, de la pila de material se extrajo una muestra a la cual se le determinó su densidad, utilizando un recipiente de volumen conocido y pesando la muestra [Anexo A].

3.2.5 Humedad

La humedad del material fue calculada tomando una muestra del material y pesándola, luego se procedió a secar esta muestra en un horno y se pesó nuevamente [Anexo A]. El porcentaje de humedad se determinó utilizando la siguiente relación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_{\text{humedo}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{humedo}}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

En la tabla 3.2 se detalla la caracterización del material:

Granulometría	Φ	ρ esp (g/cm ³)	ρ a granel (g/cm ³)	Humedad (%)	Cu	rv
1	38°	2,73	1,6	0,1	2,3	0,7
2	37°	2,73	1,6	0,1	1,3	0,7

Tabla 3.2 Caracterización material

3.3 Preparación de muestras

3.3.1 Fabricación de muestras

Se obtuvo material chancado proveniente de la Mina Santa Laura, específicamente sacos de grava y gravillas con distintas granulometrías.

Es necesario para las pruebas, tener 2 distintas distribuciones granulométricas, manteniendo el d_{50} , para lo cual se utiliza los siguientes:

- Sacos de gravas y gravillas
- Harneros manuales
- Balanza digital

Se siguen los siguientes pasos para fabricarlas:

- 1.- Los sacos de grava y gravilla son harneados manualmente para separar el material por tamaño.
- 2.- Se pesa el material entre tamaños.
- 3.- Se repiten los pasos 2 y 3 hasta obtener los pesos necesarios para fabricar la granulometría requerida.

Al tener 2 distintas distribuciones granulométricas, estos pasos se deben repetir para cada granulometría de manera cíclica.

3.3.2 Homogeneización de muestras

Se realiza un roleo al material antes de cargarlo en el modelo de manera de obtener una mezcla adecuada del material.

3.3.3 Carguío en el modelo

Para el carguío del material dentro del modelo se siguen los siguientes pasos:

- 1.- Se define una altura de carga igual a 10 cm. Por lo cual habrá un total de 8 niveles.
- 2.- Se carga el material en un balde el que es pesado y luego vaciado en el modelo.
- 3.- En cada nivel se colocan marcadores de color negro y rojo.
- 4.- Una vez completado el carguío, se anota el peso total cargado y la altura de carguío.

3.3.4 Marcadores físicos

Los objetivos de utilizar marcadores físicos en las pruebas son los siguientes:

- 1.- Estudiar la movilidad de las partículas.
- 2.- Determinar la geometría del cuerpo en movimiento en función del tiempo.
- 3.- Determinar la geometría del cuerpo de extracción en función del tiempo
- 4.- Determinar la velocidad de las partículas en el flujo.

Estos marcadores físicos son del mismo material empleado y son coloreados con una fina película de pintura spray para alterar de manera mínima sus características. Se trabajó con 2 tipos de marcadores. Unos, para determinar el elipsoide de extracción y la velocidad de las partículas en el flujo y los otros para determinar el elipsoide de movimiento. El tamaño de los primeros corresponde al d_{50} del material en cada prueba. Son pintados de color rojo. Su ubicación es cada 10 cm medidos verticalmente y cada 4,6 cm medidos horizontalmente a partir del punto de extracción. Para poder identificar cada marcador, éstos son numerados, de acuerdo a la altura y a la distancia horizontal al punto de extracción. El tamaño de los marcadores del segundo tipo sigue la distribución granulométrica del material utilizado en la experiencia correspondiente. Son pintados de color negro. Se ubican cada 10 cm medido verticalmente a partir del punto de extracción y a todo lo ancho del modelo. Los 2 tipos de marcadores se colocan en contacto con la pared de acrílico, en cada nivel. Es necesario mencionar que al tener los marcadores en contacto con la pared de acrílico, la velocidad de

éstos será distinta a las partículas que no se encuentran en contacto con la pared de acrílico. Sin embargo, en todos los experimentos los marcadores estuvieron en contacto con la pared de acrílico, por lo que, para efectos de comparación, este efecto de pared se puede ignorar.



Figura 3.2 Marcadores rojos

3.4 Experiencias realizadas

Para la realización de las pruebas se utilizan los siguientes equipos:

- Modelo Físico
- Cámara Digital
- Baldes contenedores
- Harneros
- Balanza digital

3.4.1 Variables controladas

1) Condiciones de borde

-Área del punto de extracción: Rectangular de dimensiones 4,5 x 4,0 cm² para las experiencias 1, 2, 5 y 6 y de dimensiones 9,0 x 8,0 cm² para las experiencias 3, 4, 7 y 8.

-Peso específico de carga: Se calcula como:

$$\gamma_c = \frac{P}{V} \quad (3.4)$$

Donde P es el peso de material con volumen V cargado en el modelo.

2) Extracción

-Peso Extraído en cada balde: Medido en grf

-Peso Acumulado: Medido en grf. Suma acumulada de los pesos extraídos en cada balde.

-Peso Total extraído en la prueba: Medido en grf.

-Tiempo Extracción cada balde: Medido en segundos. Tiempo transcurrido durante la extracción del material en cada balde.

-Tiempo Acumulado: Medido en segundos. Suma acumulada de los Tiempos de Extracción

-Tiempo Total de extracción: Medido en segundos. Tiempo Total transcurrido en la extracción de material.

-Ritmo de Extracción: medido en grf/segundo, se calcula como

$$\frac{\text{PesoTotal}}{\text{TiempoTotal}} \quad (3.5)$$

-Granulometría del material extraído: se realiza análisis granulométrico a cada balde extraído.

3) Geometría del movimiento

- Altura y ancho de las zonas de extracción y movimiento: Medida en cm. Se determina mediante la observación de fotos y filmación de la prueba y con el uso de marcadores físicos.
- Diámetro de tiraje aislado: Medido en cm. Corresponde al diámetro constante de la elipse luego de una cierta cantidad de masa extraída.
- Altura de tiraje aislado: Medida en cm. Corresponde a la altura a la cual se alcanza el diámetro de tiraje aislado.
- Velocidad del flujo: Medida en cm/s. Se obtiene con el uso de los marcadores físicos, se calcula como:

$$V = \frac{z_f - z_i}{t_f - t_i} \quad (3.6)$$

Con,

V = velocidad al centro del movimiento

z_f: posición vertical final del marcador

z_i: posición vertical inicial del marcador

t: tiempo

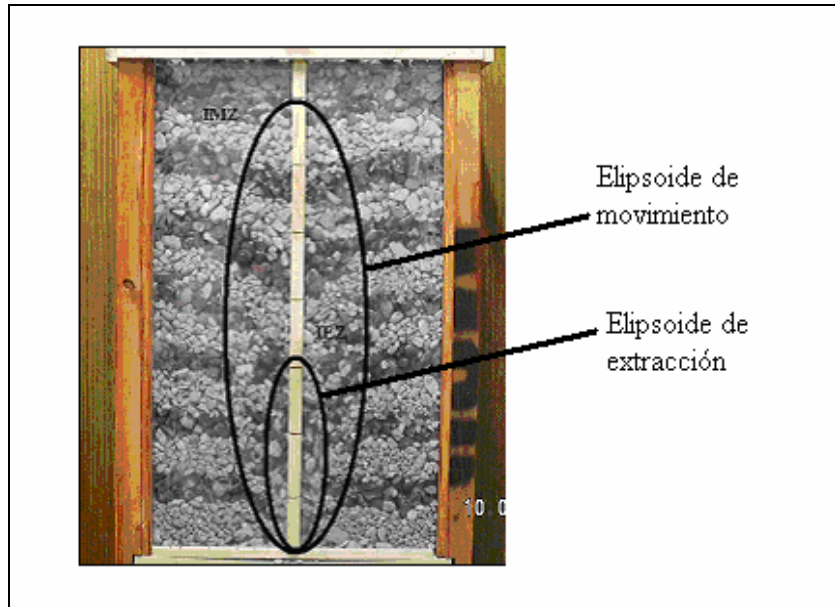


Figura 3.3 Determinación cuerpos de movimiento y extracción

3.5 Experimentación

Se realiza un total de 10 experiencias, 2 de prueba y 8 definitivas.

3.5.1 Experiencias de prueba

El objetivo de estas experiencias es comprobar el buen funcionamiento del modelo y de los marcadores y definir posibles cambios.

Descripción de las experiencias:

- Se utiliza un modelo físico de dimensiones $50 \times 26 \text{ cm}^2$ con altura de 80 cms.

- Las dimensiones del punto de extracción son $4,5 \times 4,0 \text{ cm}^2$ y se encuentra en contacto con la pared de acrílico.

- Para la primera experiencia se utilizan marcadores físicos separados cada 10 cms en la vertical y cada 4,6 cms en la horizontal. Se observa que marcadores son los que salen del modelo. Para la segunda experiencia se utilizan estos marcadores, pero también se utilizan

marcadores pintados de negro que se ubicarán en contacto con la pared de acrílico, formando capas horizontales cada 10 cms, para así poder medir la deflexión de la recta cuando se inicia el movimiento y los límites del cuerpo en movimiento.

3.5.2 Experiencias definitivas

El objetivo de estas experiencias es determinar la influencia que tiene la dispersión granulométrica en el flujo gravitacional.

La siguiente tabla detalla el plan experimental seguido:

Experimentos	d50 (cm)	d100 (cm)	A sal (cm ²)	Cu	dsal/d100	ϕ
1	1,27	2,2	4,5 x 4,0	2,3	2,05	38°
2	1,27	2,2	4,5 x 4,0	2,3	2,05	38°
3	1,27	2,2	9,0 x 8,0	2,3	4,09	38°
4	1,27	2,2	9,0 x 8,0	2,3	4,09	38°
5	1,27	2,2	4,5 x 4,0	1,3	2,05	37°
6	1,27	2,2	4,5 x 4,0	1,3	2,05	37°
7	1,27	2,2	9,0 x 8,0	1,3	4,09	37°
8	1,27	2,2	9,0 x 8,0	1,3	4,09	37°

Tabla 3.3 Plan experimental

Descripción de las experiencias:

-Se utilizaron 2 distribuciones granulométricas distintas, que se ensayarán en el mismo modelo a escala utilizado en las experiencias de prueba.

-Se utilizaron los 2 tipos de marcadores utilizados en las experiencias de prueba, ubicados en las mismas posiciones. Así, con la extracción de los marcadores numerados podremos determinar la zona de extracción y con las capas coloreadas la zona de movimiento, en función del material extraído.

-La extracción del material es mediante un sistema de corte manual

-Las experiencias son fotografiadas y grabadas en cámara digital.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Resultados experiencias de prueba

Se realizó un total de 2 experiencias de prueba, con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento del modelo y los marcadores. En la primera experiencia se utilizaron sólo los marcadores de color rojo numerados. En la segunda experiencia se utilizaron estos marcadores, pero también se utilizaron los de color negro.

Experiencia	Peso Total (grf)	Tiempo Total (s)	Ritmo de Extracción (grf/s)	dta (cm)
1	51.100	416	122,84	27,30
2	49.400	358	137,99	27,50

Tabla 4.1 Experiencias de prueba

Las conclusiones obtenidas luego de realizadas estas experiencias son las siguientes:

- Se da un buen uso a los marcadores numerados. Observando el orden en que son extraídos estos marcadores es posible obtener una visión cualitativa de la velocidad de las partículas en el flujo y las dimensiones del elipsoide de extracción.
- El uso de las capas coloreadas de negro nos permite una visualización clara y directa de la geometría del cuerpo en movimiento, pudiéndose distinguir el diámetro de tiraje aislado y la altura a la cual se alcanza este diámetro.
- En el modelo utilizado, el flujo se detiene a cada instante ya que se forman arcos sobre el punto de extracción, pero esto es fácilmente solucionable desestabilizando manualmente y en forma mínima el arco formado. Se puede inferir que el flujo gravitacional, cercano al punto de extracción está caracterizado por colapsos continuos de arcos que se forman en el punto de extracción.

- La velocidad del flujo es mayor en su eje y va disminuyendo hacia los extremos, y también disminuye a medida que nos alejamos del punto de extracción verticalmente.
- Cuando el movimiento alcanza la superficie, se produce un fenómeno donde las partículas de más arriba se mueven hacia el centro de la elipse y son extraídas antes, lo que puede ser sinónimo de dilución en la práctica.
- El punto de extracción ubicado junto a la pared de acrílico nos permite una visualización directa del cuerpo en movimiento.



Figura 4.1 Experiencias de prueba

Se concluye finalmente, que en las experiencias definitivas a realizar se debe:

- Utilizar los dos tipos de marcadores.
- El punto de extracción se mantendrá ubicado junto a la pared de acrílico.
- Se considerarán los datos medidos hasta obtener el diámetro de tiraje aislado.

4.2 Resultados experiencias definitivas

4.2.1 Extracción de material

Los datos de la extracción se presentan en la tabla 4.2:

Experiencia	Abertura salida (cm ²)	dsal (cm)	Peso Total (grf)	Tiempo Total (s)	Ritmo de Extracción (grf/s)
3	4,5 x 4,0	4,5	13.517	168,2	80,4
4	4,5 x 4,0	4,5	12.505	153,2	81,6
5	9,0 x 8,0	9,0	13.506	5,8	2.328
6	9,0 x 8,0	9,0	11.534	4,9	2.354
7	4,5 x 4,0	4,5	11.392	123,1	92,5
8	4,5 x 4,0	4,5	13.335	139,2	95,8
9	9,0 x 8,0	9,0	11.480	4,2	2.733
10	9,0 x 8,0	9,0	13.023	5,4	2.411

Tabla 4.2 Extracción experiencias definitivas

* dsal corresponde al ancho del punto de extracción.

4.2.2 Geometría zonas de extracción y en movimiento

Al iniciar la extracción se desarrollan dos zonas. Una zona de extracción, formada por el material removido y una zona en movimiento, formada por el material que fluye. Estas zonas están caracterizadas por su diámetro y su altura y son similares a una elipse.

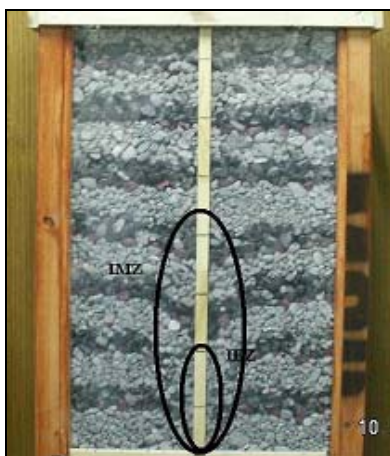


Figura 4.2 Elipses de movimiento y extracción

El diámetro y la altura de la elipse crecen a medida que se continúa con la extracción de material. Llega un determinado momento durante la extracción, en que el ancho de la elipse de movimiento deja de crecer aunque se siga extrayendo material, llegando a un diámetro constante. El valor de este diámetro constante es conocido como diámetro de tiraje aislado, d_{ta} . La altura de la elipse, por su parte, sigue creciendo y no es posible su medición.

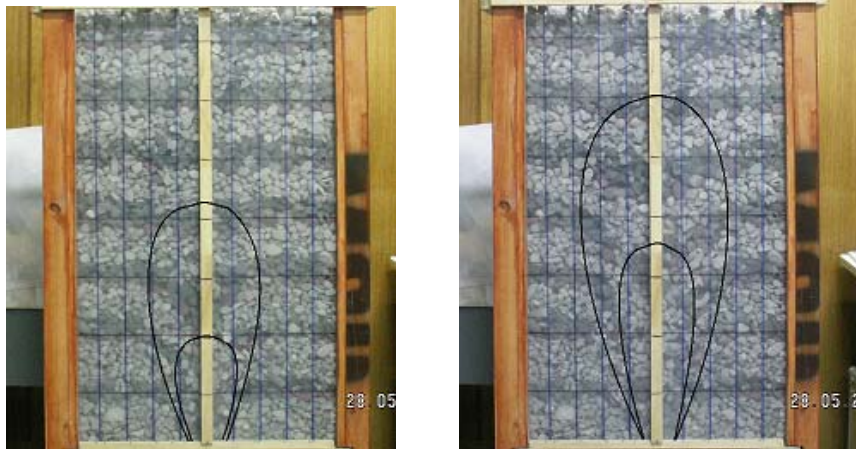


Figura 4.3 Aumento del ancho y altura elipse de movimiento.

4.2.2.1 Ancho de elipse en movimiento y diámetro de tiraje aislado

A medida que progresa la extracción, el ancho de la elipse de movimiento crece hasta alcanzar el diámetro de tiraje aislado. A continuación se observa como aumenta el ancho de la elipse con el peso extraído, aumento que se repite para todas las experiencias realizadas de manera similar.

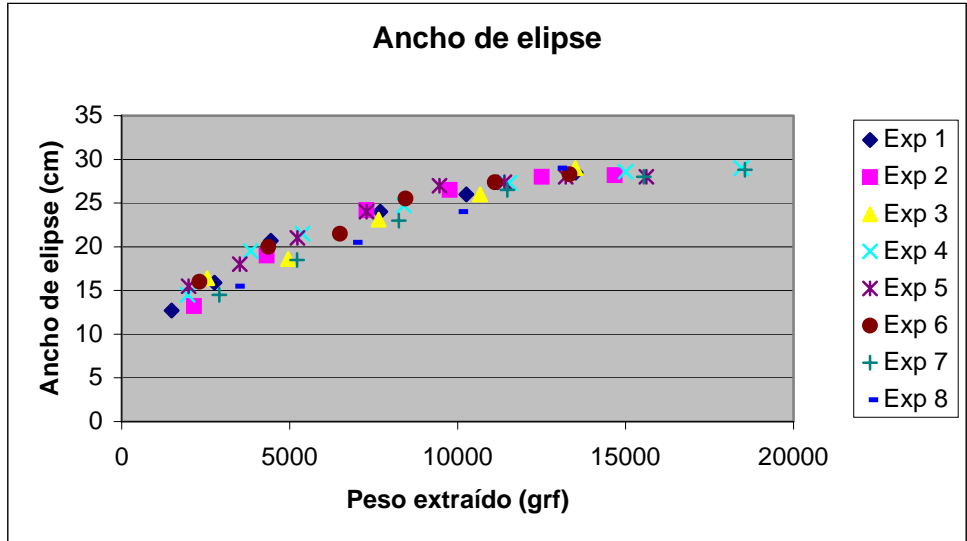


Gráfico 4.1 Peso extraído vs Ancho de elipse

En las distintas experiencias, el elipsoide alcanzaba la superficie, entre los 7200 y 10100 grf extraídos[Anexo B]. Luego de ocurrido esto, se procedía a rellenar el modelo con material en la parte superior, de esta manera se hizo posible la medición del diámetro de tiraje aislado.

El valor del diámetro de tiraje aislado para las experiencias se detalla a continuación

Experiencia	dta (cm)
1	28,2
2	28,0
3	29,0
4	29,1
5	28,0
6	28,3
7	28,8
8	29,0

Tabla 4.3 Diámetro de tiraje aislado

4.2.2.2 Altura de elipse en movimiento

A medida que progresa la extracción, la altura de la elipse de movimiento crece hasta hacerse imposible su medición. Esta altura crece a una velocidad mayor que el diámetro. A continuación se observa como varía la altura de la elipse con el peso extraído, para las 2 granulometrías ensayadas.

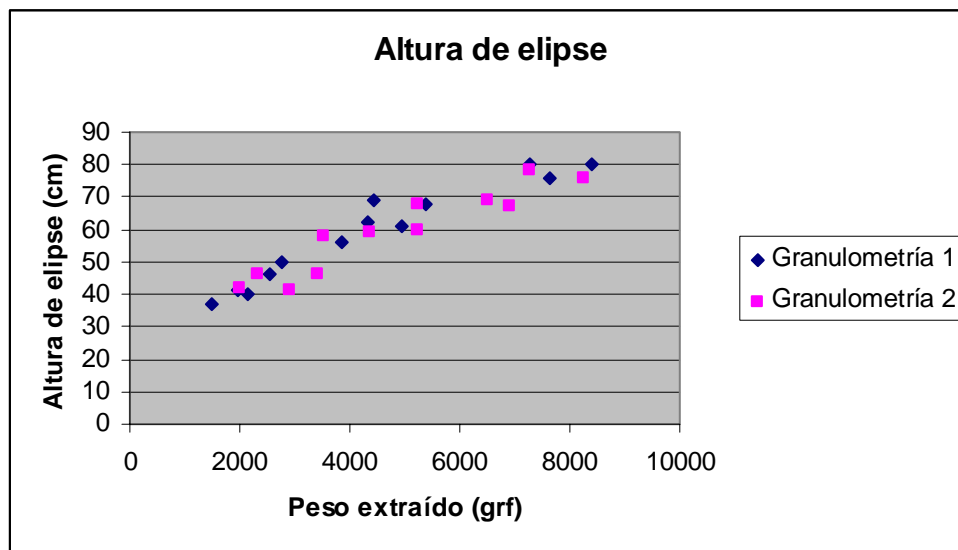


Gráfico 4.2 Peso extraído vs altura de elipse

Se observa que para granulometrías con distinta dispersión granulométrica la altura de elipse crece con el peso extraído de manera semejante.

A continuación se grafica la altura de la elipse en función del ancho de la elipse para las 2 granulometrías. Se grafica hasta alturas de elipse, factibles de medir en el modelo. Se obtiene lo siguiente:

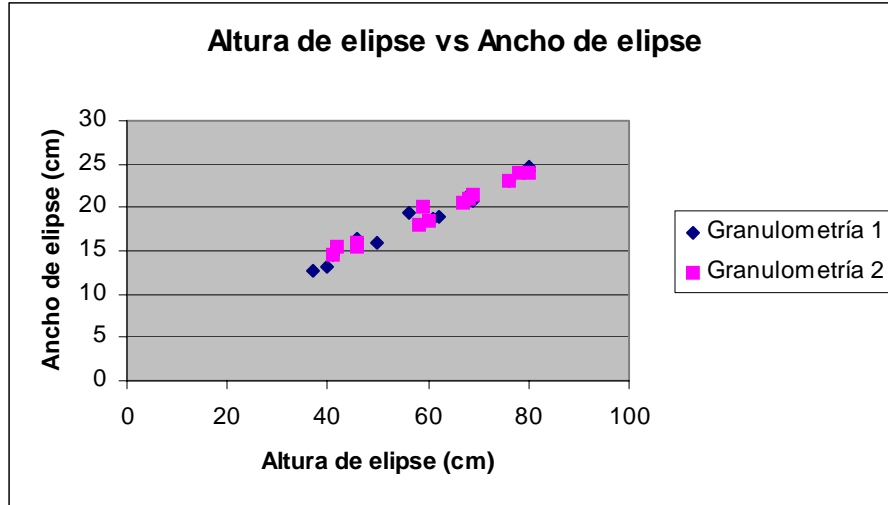


Gráfico 4.3 Altura de elipse vs Ancho de elipse

Del gráfico, los anchos para las 2 granulometrías son similares a alturas similares.

A medida que progresa la extracción, la razón entre altura de elipse y ancho de elipse aumenta, esto se debe a que la altura de elipse crece indefinidamente y a mayor velocidad que el ancho de elipse, y este a su vez, tiende a un valor constante, como se observa en el gráfico 4.1.

4.2.2.3 Altura de tiraje aislado

La altura de tiraje aislado, h_{ta} , es definida como la altura de la elipse de movimiento a la cual se alcanza el diámetro de tiraje aislado, como se observa en la figura 4.1. A continuación se muestran los valores de h_{ta} para las distintas experiencias.

Experiencia	d _{ta}	h _{ta}	h _{ta} /d _{ta}
1	28,2	53	1,9
2	28,0	51	1,8
3	29,0	57	2,0
4	29,1	56	1,9
5	28,0	55	2,0
6	28,3	55	1,9
7	28,8	52	1,8
8	29,0	57	2,0

Tabla 4.4 Altura de tiraje aislado

Como se observa en la tabla, la razón entre la altura de tiraje aislado y el diámetro de tiraje aislado se aproxima a 2. Resultado que es concordante con el trabajo realizado por el Ingeniero Raúl Castro y con la investigación realizada por CIMM.

4.2.2.4 Ancho de elipse de extracción

El ancho de la elipse de extracción aumenta a medida que se extrae el material, al igual que la elipse de movimiento, pero a una velocidad menor. Esto, se observa en el siguiente gráfico.

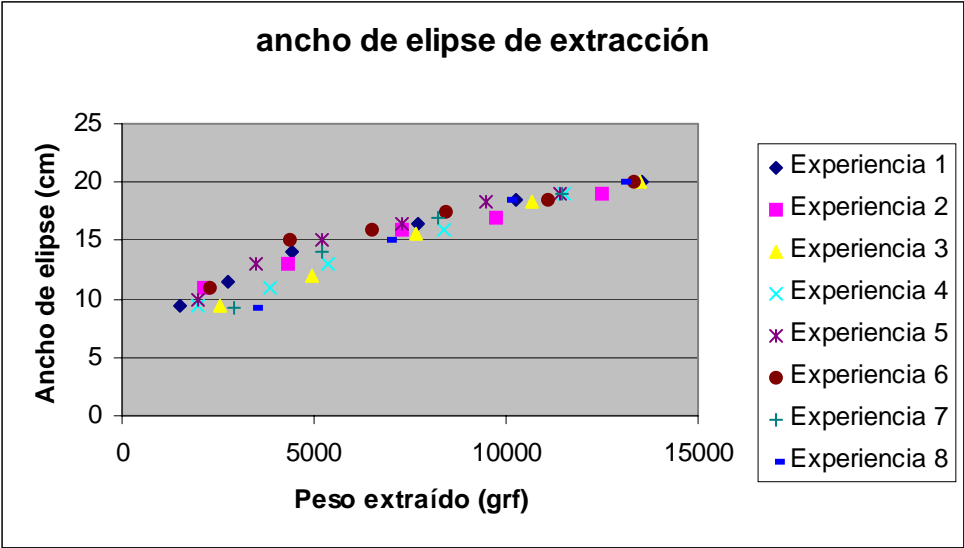


Gráfico 4.4 Ancho de elipse de extracción en función del peso extraído

4.2.2.5 Altura elipse de extracción

La altura de la elipse de extracción crece a medida que se extrae material. A continuación se grafica la altura de la elipse de extracción en función del peso extraído, para las 2 aberturas de salida distintas.

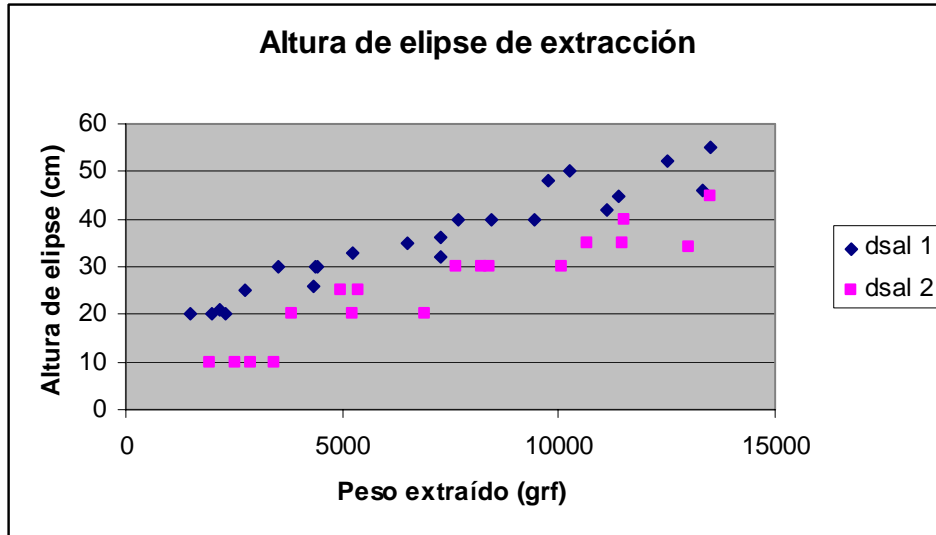


Gráfico 4.5 Altura elipse de extracción

*dsal 1 corresponde a la abertura de 4,5 cm y dsal 2 corresponde a la abertura de 9,0 cm.

De acuerdo a lo observado en el gráfico anterior, la altura de la elipse de extracción depende del ancho del punto de extracción.

4.2.2.6 Velocidad de flujo

La velocidad en el eje del elipsoide se presenta en el siguiente gráfico, el cual se grafica en semi-log para una mejor observación y comparación de los valores,

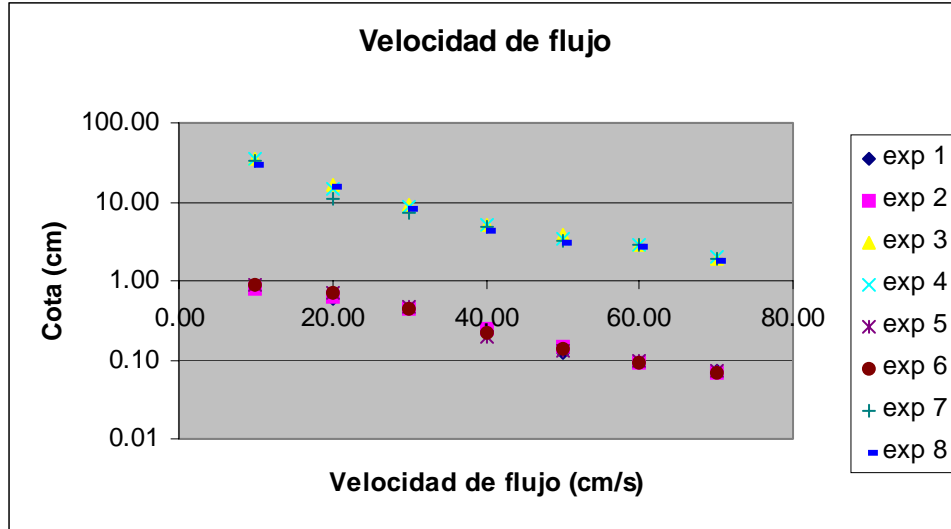


Gráfico 4.6 Velocidad de flujo en el eje del elipsoide en función de la cota

Del gráfico anterior se observa que la velocidad del flujo en el eje disminuye a medida que nos alejamos verticalmente del punto de extracción. Se observa una gran paridad en los resultados para las experiencias con un mismo dsal, sin importar la granulometría.

4.2.2.7 Índice de Uniformidad

La tabla siguiente muestra la relación entre la uniformidad de la distribución granulométrica y el diámetro de tiraje aislado,

Cu	dta
2,3	28,2
2,3	28,0
2,3	29,0
2,3	29,1
1,3	28,0
1,3	28,3
1,3	28,8
1,3	29,0

Tabla 4.5 Índice de uniformidad

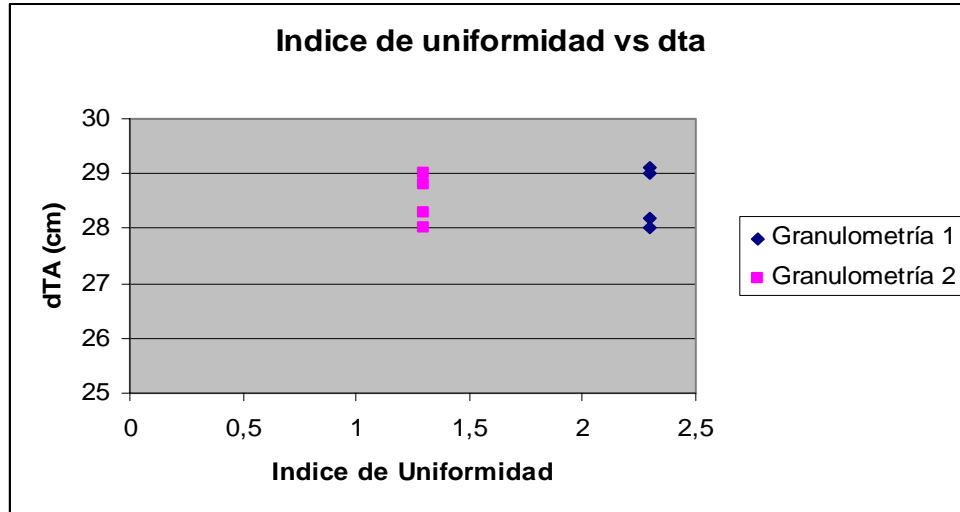


Gráfico 4.9 Índice de uniformidad vs dta

Se observa que si aumentamos el índice de uniformidad el diámetro de tiraje aislado no se ve afectado mayormente.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Geometría de movimiento y extracción

La geometría de la zona en movimiento y la zona de extracción es principalmente controlada por el peso extraído. La geometría de la zona de movimiento no cambia mientras no se extraiga material.

Del gráfico 4.1, se observa claramente que el ancho de la elipse de movimiento crece a medida que progresa la extracción, sin embargo, el ritmo de crecimiento, disminuye.

Al iniciar la extracción se produce un rápido crecimiento inicial del ancho de la elipse, para posteriormente tender asintóticamente a un valor constante.

El gráfico 5.1 muestra el crecimiento de la altura de la elipse de movimiento en función del peso extraído, para las distintas experiencias.

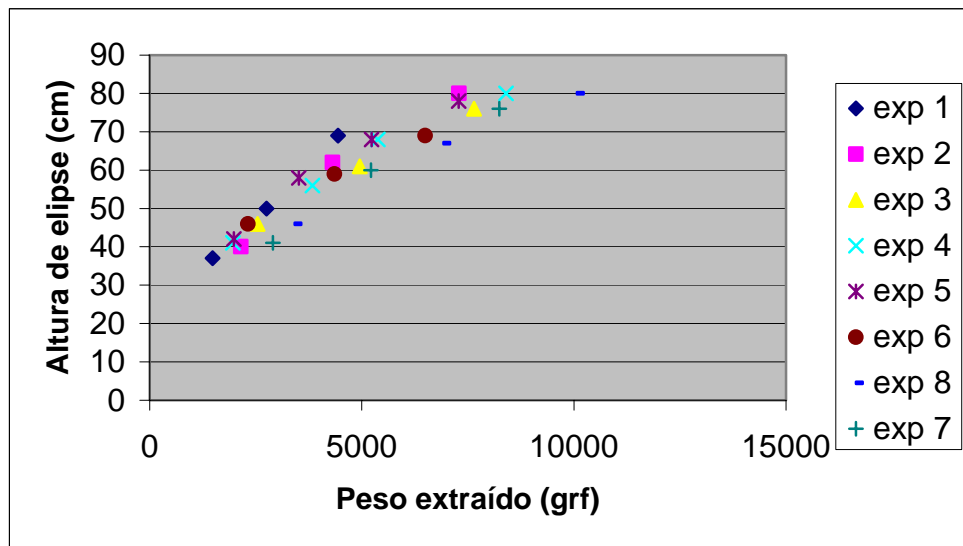


Gráfico 5.1 Peso extraído vs Altura de elipse

Se observa en el gráfico que el ritmo de crecimiento de la altura en función del peso extraído disminuye a medida que aumenta el peso extraído. Al empezar la extracción se

observa un rápido crecimiento de la altura de la elipse, a medida que progresa la extracción, el ritmo de crecimiento decrece y sigue una tendencia aproximadamente lineal.

El gráfico 5.2 muestra el cambio del ancho de la elipse de movimiento en función de la altura.

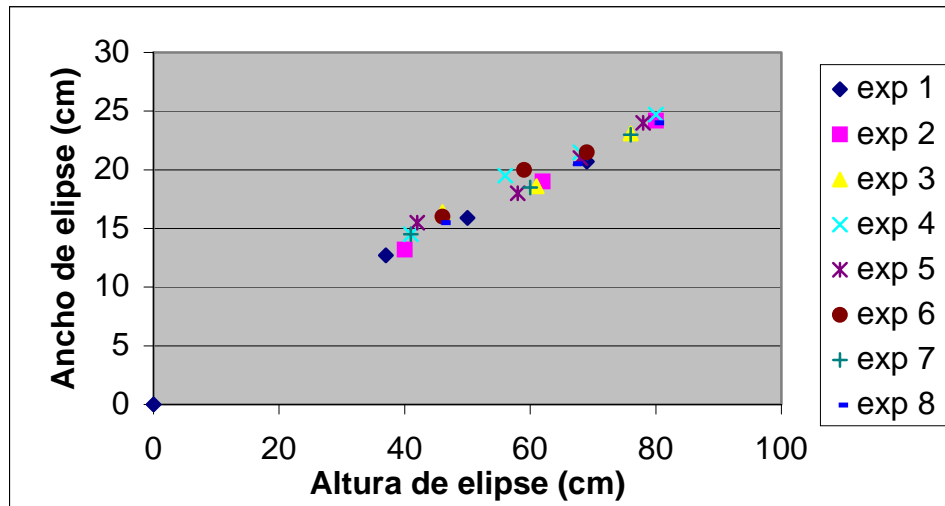


Gráfico 5.2 Altura de elipse de movimiento vs Ancho de elipse de movimiento

Se observa del gráfico que el ancho de la elipse de movimiento crece junto con la altura de elipse y que no se notan diferencias en los resultados entre las experiencias realizadas

Del gráfico 4.4, se observa claramente, al igual que para la elipse de movimiento, que el ancho de la elipse de extracción crece a medida que progresa la extracción. Al principio de la extracción, ocurre un rápido crecimiento del ancho de la elipse y luego este ritmo de crecimiento disminuye.

Existen diferencias entre las experiencias en el ancho de la elipse al inicio de la extracción, pero estas van desapareciendo a medida que se extrae el material, es decir, las distintas experiencias tienden a un mismo ancho. Estas diferencias se dan para experiencias con distinto tamaño de abertura de salida, lo que será analizado más adelante.

A continuación se grafica la altura de la elipse de extracción en función del peso extraído para las distintas experiencias realizadas.

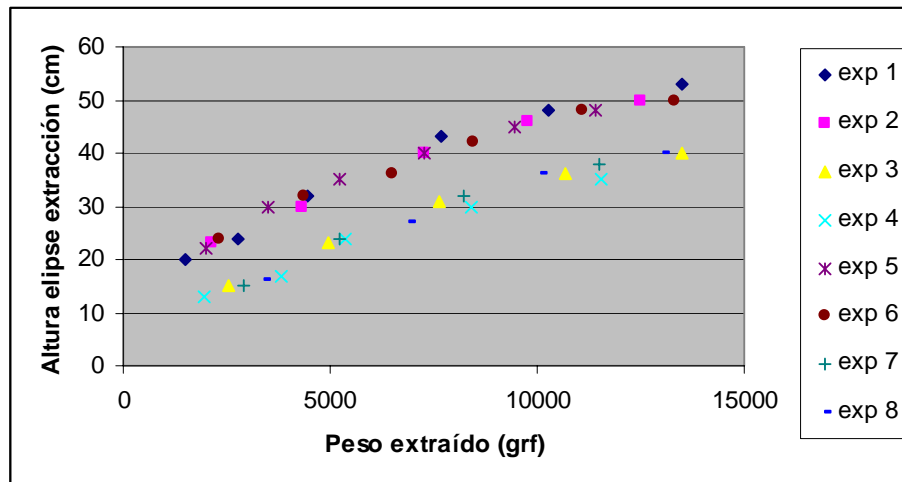


Gráfico 5.3 Altura de elipse de extracción en función del peso extraído.

Se observa claramente que la altura de la elipse de extracción crece junto con el peso extraído. Hay claras diferencias, observadas del gráfico, entre las experiencias en lo que respecta a la altura de la elipse de extracción. La diferencia ocurre en el inicio de la extracción. El crecimiento inicial de la altura de la elipse es mayor para las experiencias con dsal menor. Luego de esto, el ritmo de crecimiento se hace similar entre las distintas experiencias.

Al igual que para la elipse de movimiento, al principio de la extracción hay un rápido crecimiento del ancho. Luego de esto, el ritmo de extracción decrece.

Se grafica a continuación el ancho de la elipse de extracción en función de la altura de ésta.

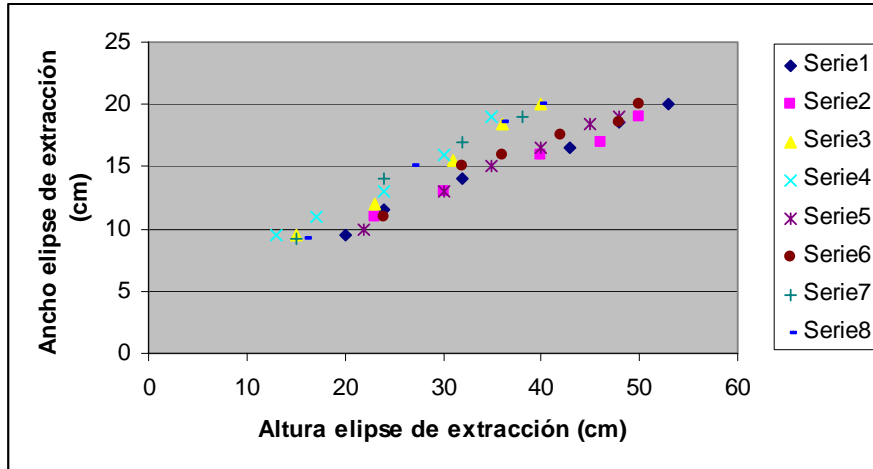


Gráfico 5.4 Ancho elipse de extracción en función de la altura

El ancho de la elipse de extracción crece junto con la altura de ésta. El ritmo de crecimiento del ancho con la altura sigue una tendencia lineal. Existe una diferencia entre las experiencias con distinto d_{sal} , a alturas semejantes se observan diferencias en el ancho. El ancho de la elipse de extracción es mayor para las experiencias con d_{sal} mayor.

5.1.1 Efecto de la dispersión granulométrica

Para el análisis del efecto de la dispersión granulométrica en la geometría de movimiento, se grafica el ancho de elipse de movimiento vs la altura de elipse de movimiento para las distintas granulometrías. Se grafica hasta alturas posibles de medir en el modelo.

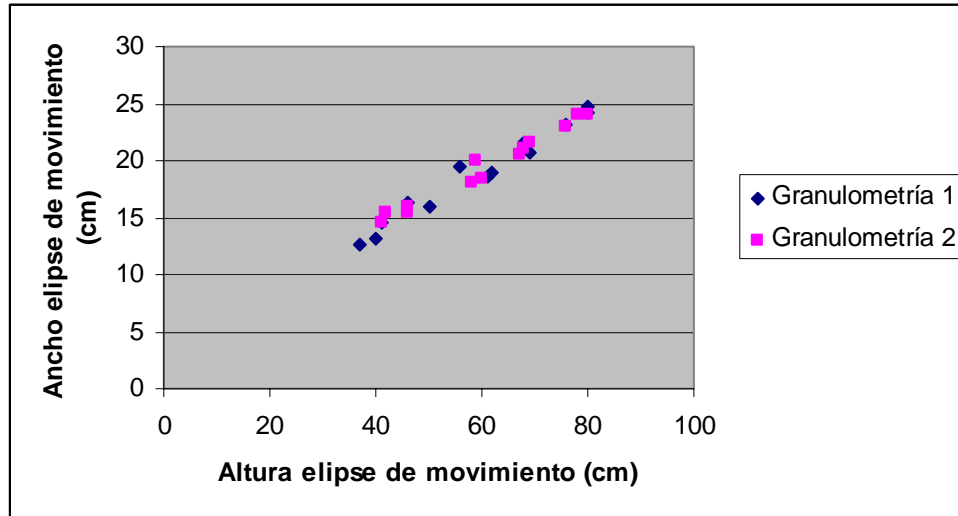


Gráfico 5.5 Altura de elipse de movimiento vs Ancho de elipse de movimiento.

Se puede observar en el gráfico 5.7 que los anchos a diferentes alturas de las elipses de movimiento entre las experiencias con distintas granulometrías, no difieren. Esto significa que la forma de las elipses de movimiento en cada experiencia son similares. Por lo tanto, no hay efecto de la dispersión granulométrica en la geometría de movimiento.

Para el análisis del efecto de la dispersión granulométrica en el valor del diámetro de tiraje aislado, utilizamos el índice de uniformidad, definido anteriormente, C_u .

Experiencia	C_u	d_{ta} (cm)	d_{sal} (cm)
1	2,3	28,2	4,5
2	2,3	28,0	4,5
3	2,3	29,0	9,0
4	2,3	29,1	9,0
5	1,3	28,0	4,5
6	1,3	28,3	4,5
7	1,3	28,8	9,0
8	1,3	29,0	9,0

Tabla 5.1 Efecto dispersión granulométrica

Analizando la tabla y manteniendo constante el d_{sal} , podemos notar que el d_{ta} no varía. Mientras que para las experiencias con igual índice de uniformidad pero distinto d_{sal} , el d_{ta} si varió, aunque no significativamente.

Se grafica a continuación el valor del dta para las distintas granulometrías, manteniendo constante el dsal.

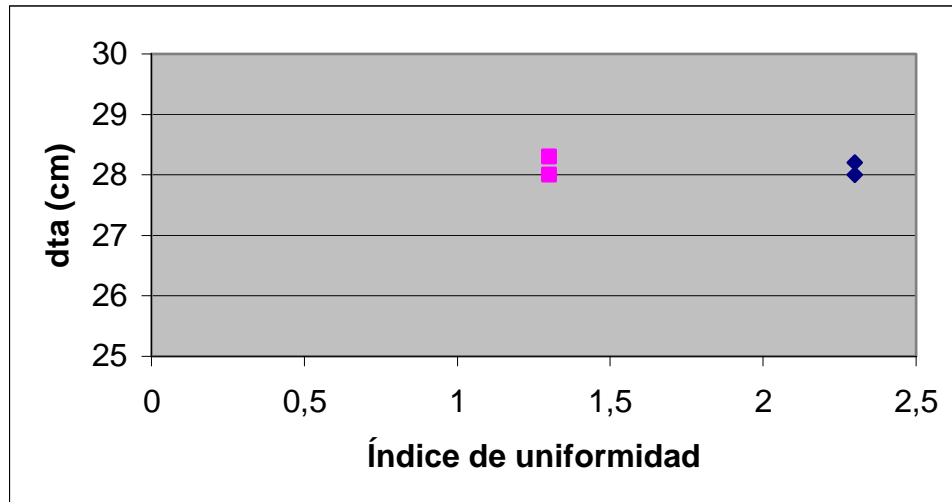


Gráfico 5.6 Índice de uniformidad vs dta para un dsal de 4,5 cm.

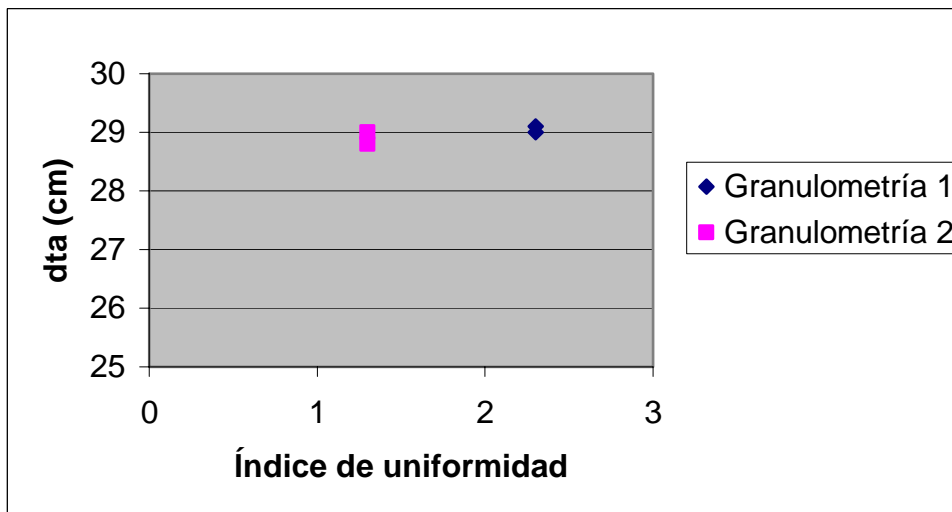


Gráfico 5.7 Índice de uniformidad vs dta para un dsal de 9,0 cm.

Se observa que para distintos índices de uniformidad, manteniendo constante el diámetro de salida, el diámetro de tiraje aislado no varía o varía en forma insignificante. Por lo tanto, se puede concluir que el índice de uniformidad no es determinante en la geometría de movimiento ni en la determinación del valor del dta, para el rango de granulometrías estudiadas.

A continuación se realiza una comparación con los resultados obtenidos en el proyecto FONDEF D99I-1037. En un punto de este proyecto, se obtuvo lo siguiente, utilizando los parámetros adimensionales d_{ta}/d_{100} y la $\tan(\phi)$ [3].

	d_{100} (cm)	d_{ta} (cm)	d_{ta}/d_{100}	ϕ	$\tan(\phi)$	Cu
A	0.118	12	101.69	35.83°	0.72	1.85
C	0.336	17.9	53.27	36.59°	0.74	3.02
D	0.475	18.5	38.95	37.43°	0.77	3.95
E	0.65	20	30.77	36.73°	0.75	4.04

Tabla 5.2 Detalle experiencias

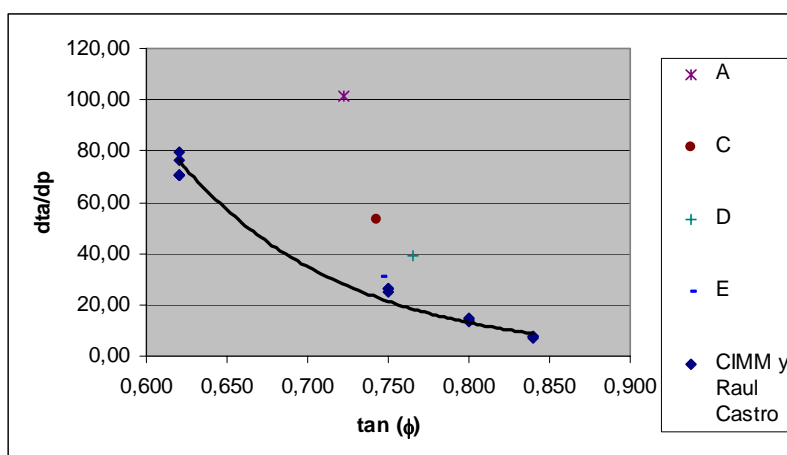


Gráfico 5.8 d_{ta}/d_p vs $\tan(\phi)$

Las experiencias correspondían a curvas granulométricas distintas. La pendiente de la distribución granulométrica del material A es mayor que la de C, ésta que la de D y ésta que la de E, siendo la pendiente del material de las experiencias del CIMM (1995) y del Ingeniero Raúl Castro (2001), la menor de todas. Dado esto, se postuló un comportamiento en el que la distribución granulométrica influye en el diámetro de tiraje aislado de la siguiente manera.

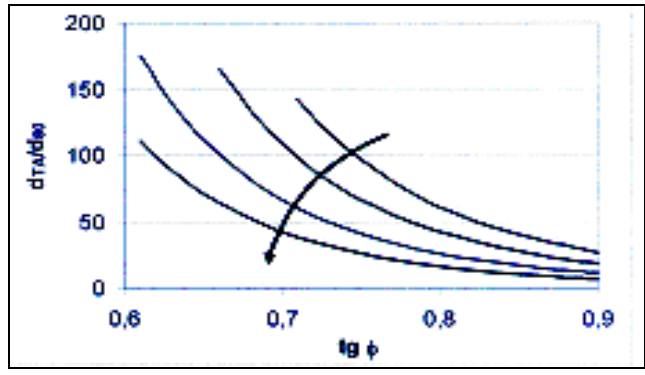


Gráfico 5.9 Efecto uniformidad del material en el dta

Se postula que a medida que disminuye la pendiente de la curva granulométrica, o sea, a medida que disminuye la uniformidad del material, la curva se mueve de acuerdo al gráfico 5.9.

Sin embargo, de los resultados obtenidos en esta experimentación y agregándolos al gráfico anterior se obtiene:

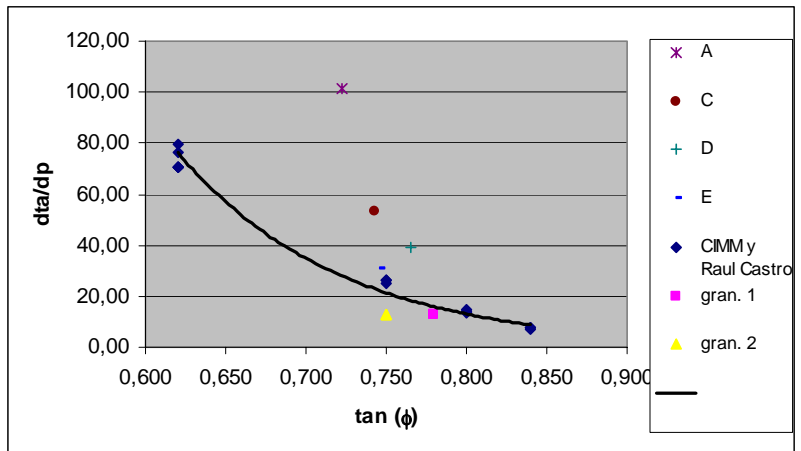


Gráfico 5.10 dta/dp vs tan (φ)

Las pendientes de las distribuciones granulométricas de los materiales usados en esta experimentación son mayores que las de las otras experimentaciones, por lo que en el gráfico deberían ubicarse más arriba que todos. Esto no se observa en el gráfico, los puntos se ubican cerca de los obtenidos por CIMM y el Ingeniero Raúl Castro, que corresponden a los de menor pendiente, o sea, de granulometría más extendida. Una explicación posible a

esta discrepancia con lo postulado, es que en esa experimentación se utilizó material de menor tamaño, específicamente gravilla y arena, que el utilizado en esta experimentación. Se sabe que los materiales aluviales como la arena poseen un alto grado de abrasión y en general tienen forma esférica, lo que podría ser la causa de la discrepancia en los resultados, pero se cita en el proyecto que el material es 100% chancado, lo que implicaría una forma angulosa del material. Entonces, la explicación posible a la discrepancia de los resultados, está en el cambio de tamaño del material y no la forma. En esta experimentación se utilizó un tamaño máximo de partícula semejante a la del Ingeniero Raúl Castro. Se concluye que no es la dispersión granulométrica la que influye en los resultados, sino que es el tamaño de partícula el que afecta la relación entre d_{ta}/d_p y $\tan(\phi)$.

Para el análisis del efecto de la dispersión granulométrica en la elipse de extracción se procede de forma similar que para la elipse de movimiento. Se grafica el ancho de la elipse de extracción para las distintas alturas, manteniendo constante el diámetro de salida.

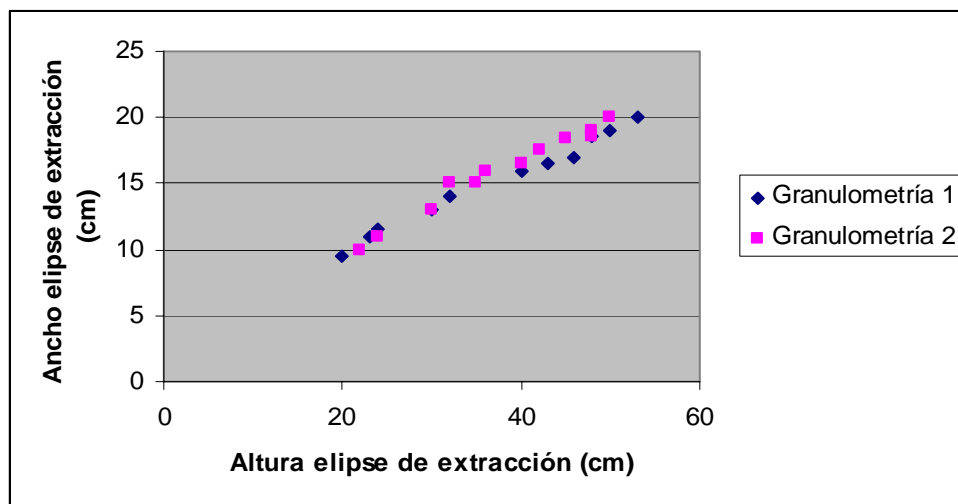


Gráfico 5.11 Geometría elipse de extracción con d_{sal} 4,5 cm

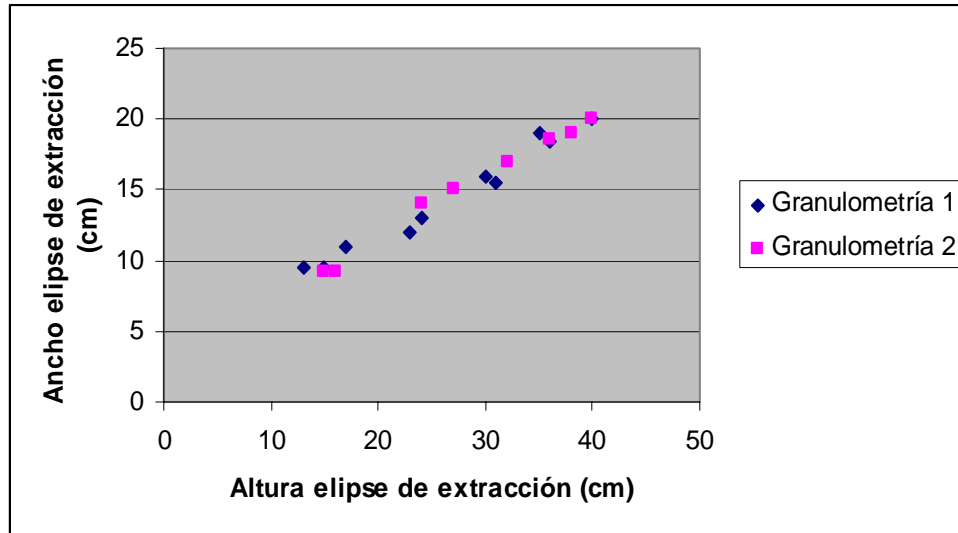


Gráfico 5.12 Geometría elipse de extracción con dsal 9,0 cm

En los 2 gráficos anteriores se observa que no hay diferencia en la geometría de la elipse de extracción entre las 2 granulometrías.

En los gráficos 4.4 y 5.3 se observa que en las experiencias con distinta granulometría y con el mismo diámetro de salida, el ancho y la altura de la elipse de extracción crecen con el peso extraído de la misma manera.

Por lo tanto, se puede concluir que la dispersión granulométrica no influye en la geometría de la zona de extracción.

5.1.2 Efecto del tamaño del punto de extracción (dsal)

En el gráfico 5.13 se observa que el tamaño del punto de extracción no influye en la geometría de la zona de movimiento. Se observan similares anchos a alturas semejantes para las experiencias con distinto dsal, por lo que la forma de la zona de movimiento no varía.

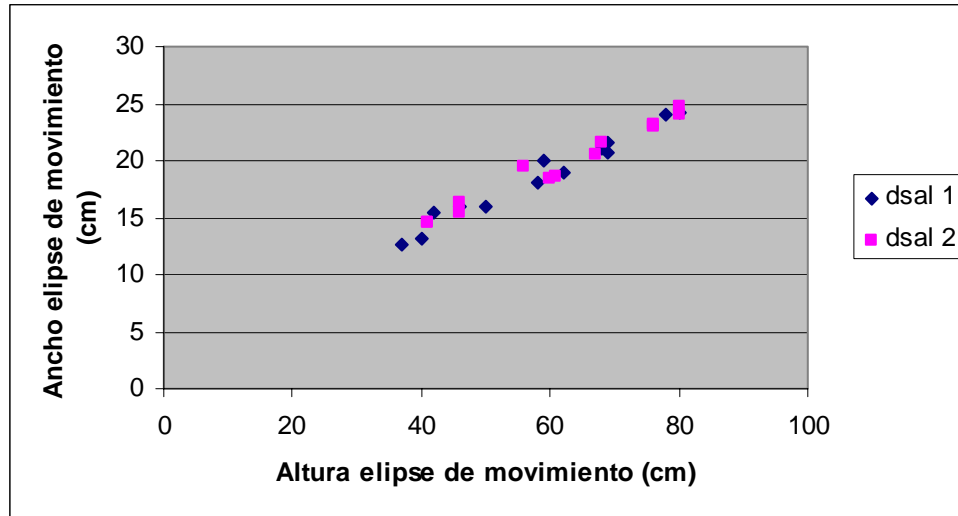


Gráfico 5.13 Altura elipse de movimiento en función del ancho de elipse de movimiento.

Se estudió el efecto del tamaño del punto de extracción en el valor del diámetro de tiraje aislado, usando dos puntos de extracción de distinto tamaño. La tabla 5.3 y el gráfico 5.14 muestran los resultados obtenidos para el dta con distintos tamaños del punto de extracción.

dta (cm)	dsal (cm)
28,2	4,5
28,0	4,5
28,0	4,5
28,3	4,5
29,0	9,0
29,1	9,0
28,8	9,0
29,0	9,0

Tabla 5.3 Influencia dsal en dta

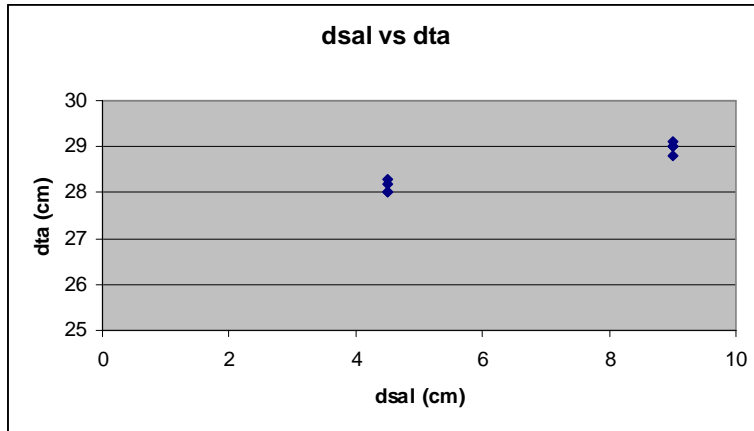


Gráfico 5.14 Influencia tamaño punto de extracción en dta

Se observa que si aumentamos el tamaño del punto de extracción, el diámetro de tiraje aislado también aumenta, no obstante, este aumento es insignificante, por lo que el tamaño del punto de extracción influye en forma mínima en el valor del diámetro de tiraje aislado, para el rango de tamaños de punto de extracción estudiados.

Se concluye por lo tanto, que el dsal influye aunque en forma insignificante en la geometría de la zona de movimiento.

Para el análisis del efecto del tamaño del punto de extracción en la geometría de la zona de extracción se grafica a continuación el ancho de la elipse de extracción en función de la altura de ésta.

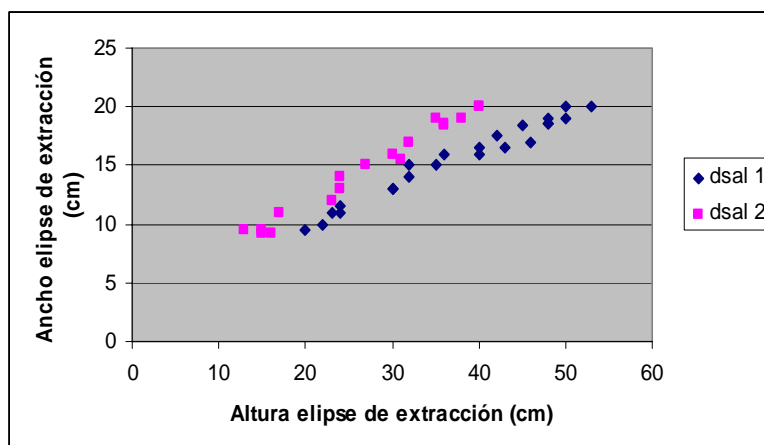


Gráfico 5.15 Ancho elipse de extracción en función de la altura elipse de extracción

Es claro el efecto que tiene el $dsal$ sobre la geometría de la elipse de extracción. Se observan distintos anchos a alturas similares. Las experiencias con un mayor $dsal$, presentan un ancho mayor a la misma altura que las experiencias con menor $dsal$. Por lo tanto, la elipse de extracción para experiencias con tamaño de abertura mayor tiene una excentricidad menor.

Se pensó en primera instancia, que la causa de que el ancho de la elipse de extracción fuera mayor cuando se tenía una mayor abertura, se debía a que el aporte de material a lo ancho del modelo (hacia atrás) cesaba antes, por lo que comenzaba una mayor contribución lateral de material, lo que provocaba el aumento del ancho de la elipse. Pero en terreno se comprobó que este cese precoz no ocurría, ya que la elipse no se acercaba en demasía ni llegaba a topar con la pared de atrás.

Se concluye que el tamaño del punto de extracción influye en la geometría de la elipse de extracción, provocando que ésta tenga mayor o menor excentricidad.

5.2 Velocidad de flujo

Del gráfico 4.6 se observa que la velocidad del flujo en el eje, disminuye a medida que nos alejamos del punto de extracción, y es posible observar una clara diferencia entre las experiencias realizadas. Para analizar esta diferencia se graficará la velocidad de flujo para las distintas granulometrías manteniendo constante el diámetro de salida.

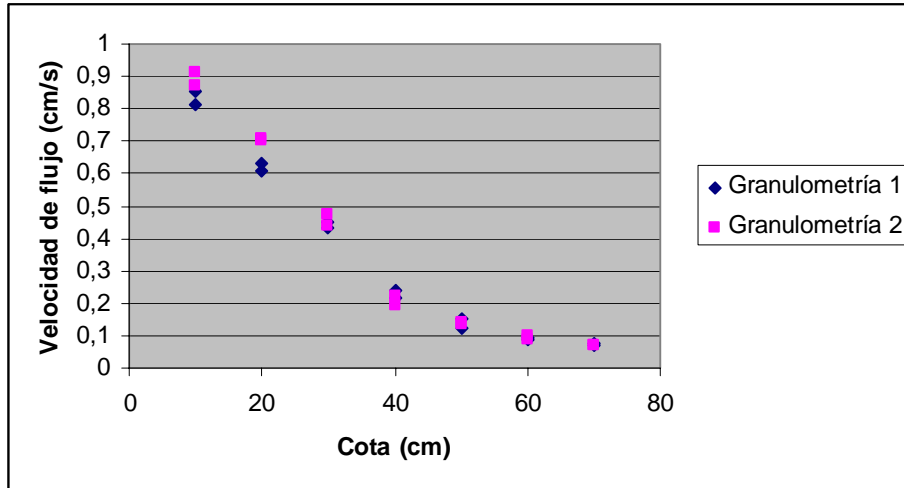


Gráfico 5.17 Velocidad de flujo en función de la altura para dsal 4,5 cm.

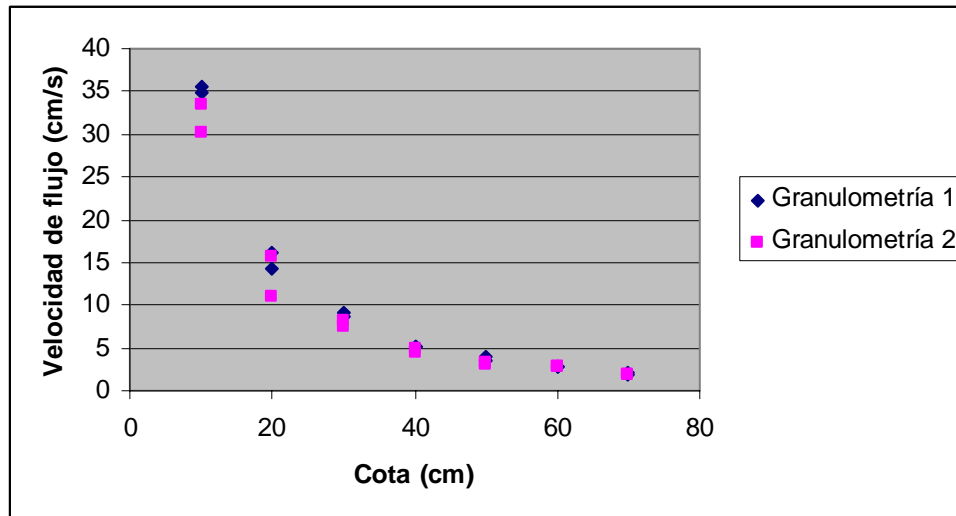


Gráfico 5.18 Velocidad de flujo en función de la altura para dsal 9,0 cm.

No se observan diferencias en la velocidad del flujo para las distintas granulometrías mientras mantengamos el dsal constante. Pero si se observa que al variar el dsal la velocidad cambia en forma considerable, como se aprecia mejor en el gráfico 4.6.

Se observa claramente que la velocidad del flujo depende del tamaño del punto de extracción. Mientras mayor sea el tamaño del punto de extracción, mayor será la velocidad del flujo. Cabe destacar, que las granulometrías ensayadas tienen un mismo d_{100} y d_{50} , por lo que es posible concluir de la bibliografía estudiada y de lo observado en esta

experimentación, que la velocidad del flujo no depende del tamaño del punto de extracción solamente, sino que depende de la relación existente entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño de partícula. Se tiene una mayor velocidad de flujo cuando la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño de partícula es mayor.

En la práctica la velocidad de flujo no sólo dependerá de la relación entre el tamaño de abertura y el tamaño de partícula, sino que también dependerá de la velocidad a la cual el material vaya siendo retirado del punto de extracción, o sea, la velocidad de flujo, en la práctica, será mayor a mayores tamaños de abertura de extracción siempre y cuando se trabaje eficientemente en el punto de extracción retirando el material. Por lo tanto, en la práctica, la velocidad del flujo dependerá del ritmo de extracción. A mayor ritmo de extracción, mayor será la velocidad del flujo.

De la extracción de los marcadores numerados, y de la visualización a través del acrílico, se concluye que la velocidad del flujo es mayor en el eje del cuerpo en movimiento y va disminuyendo a medida que nos alejamos verticalmente y a medida que nos alejamos del centro del punto de extracción. Esta característica de la velocidad del flujo es uno de los factores de la presencia de dilución temprana en los puntos de extracción.

5.3 Dilución

Al ser la velocidad de las partículas mayor en su eje, si se efectúa tiraje aislado en la práctica, se dará una situación como se observa en la figura 5.2, en que el material estéril llega tempranamente al punto de extracción.

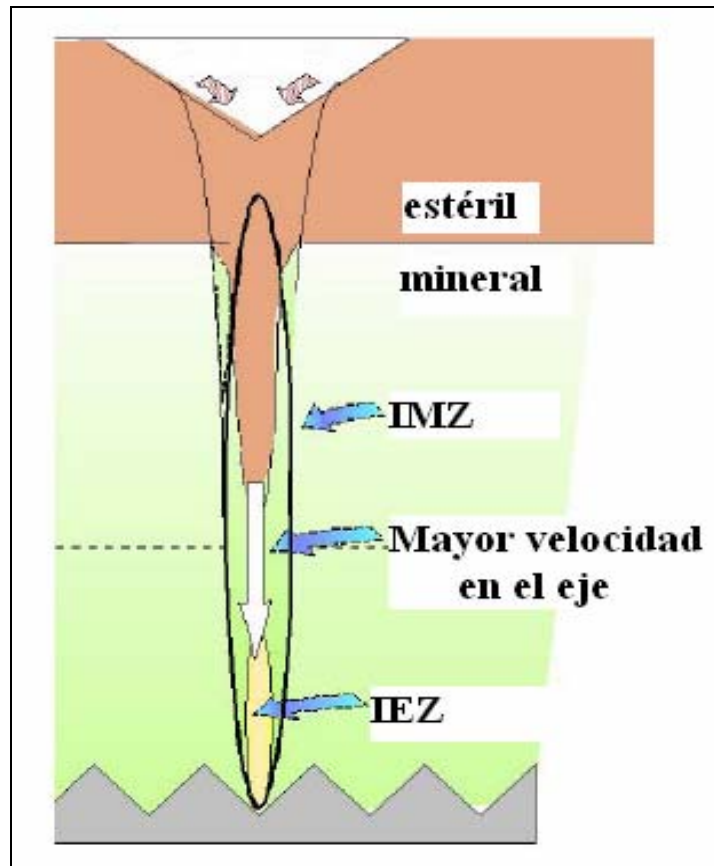


Figura 5.2 Dilución

Se concluye que para evitar esta temprana entrada de dilución al punto de extracción, se debe evitar realizar tiraje aislado, para lo cual se debe tener un adecuado control del tiraje en cada punto de extracción, para no extraer más material de un punto que en otro, o sea, para que exista tiraje uniforme entre puntos de extracción vecinos. Cuando en uno o más puntos de extracción se hace difícil la extracción del material, ya sea por colgaduras constantes u otra razón, y hay otros puntos de extracción en los que extraer material es más fácil, es un gran error trabajar en éstos últimos preferentemente, si esto ocurre la interacción entre puntos vecinos puede cesar y se tendría una situación de tiraje aislado en uno o más puntos de extracción con las consecuencias de dilución temprana antes explicada. El paso correcto a seguir ante esta situación es desestabilizar la colgadura que se ha producido en el o los puntos afectados lo antes posible, para que se pueda seguir trabajando normalmente en dichos puntos.

Para poder tener un buen control del tiraje, deben planificarse y realizarse métodos para mejorar la exactitud en la toma de datos tales como el tonelaje diario extraído en cada punto de extracción, y ésta información debe ser reunida y analizada para poder trazar lineamientos en lo que al control del tiraje se refiere.

Otra forma de dilución, ocurriría si las partículas de material estéril son más pequeñas. Cuando se tiene material con gran proporción de partículas gruesas y de formas irregulares, existe propensión a que se formen colgaduras y vacíos constantemente. Estos vacíos pueden eventualmente ser rellenados por material más fino, si el material más fino correspondiera al material estéril, se tendría que el estéril llega más rápido al punto de extracción.

5.4 Colgaduras

En la experimentación, se tiene una mayor velocidad de flujo cuando la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño máximo de partícula es mayor, esto se debe a que la frecuencia de colgaduras en el punto de extracción se reduce al aumentar esta razón. Para los experimentos en que la razón era cercana a 2, se produjeron colgaduras constantemente, mientras que para los experimentos en que esta razón era cercana a 4 no se produjeron colgaduras. Es importante notar que muchas veces las colgaduras fueron provocadas por partículas de forma alargada que obstruían el paso a las demás, por lo tanto, la existencia de colgaduras no sólo dependerá del tamaño de las partículas sino también de la forma de éstas, como se observa en la figura 5.3. Durante la experimentación, cada vez que se producían colgaduras, las partículas más pequeñas pasaban por los espacios que quedaban entre las partículas causantes de la colgadura e igualmente eran extraídas, hasta que el punto de extracción quedaba totalmente tapado. Esto es verificable mediante el análisis de la granulometría a los baldes de extracción.

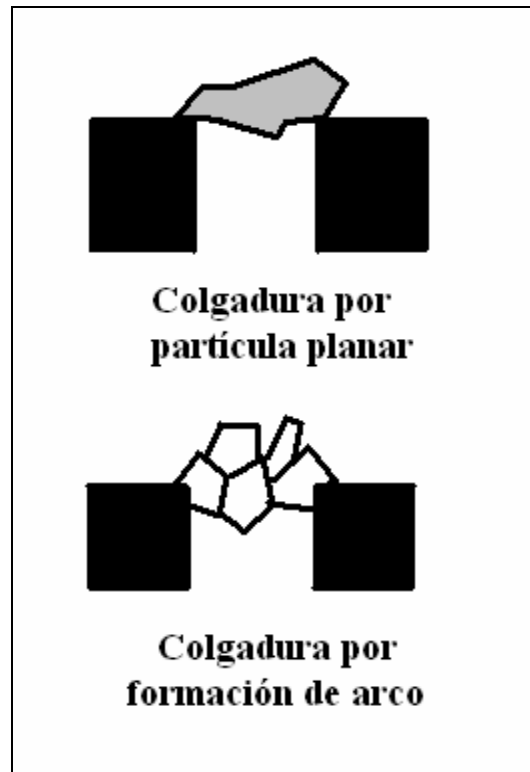


Figura 5.3 Colgaduras durante tiraje

La colgadura por una partícula planar es provocada por un fragmento que yace a todo lo ancho del punto de extracción y tapa el punto, evitando el flujo de material hasta que el fragmento sea fracturado, mediante perforación y tronadura.

La colgadura por formación de arco, está formada por un grupo de fragmentos que forman un arco en el punto de extracción y evita la salida de material. Durante la experimentación, se observó que este tipo de colgaduras, estaban formadas por 1 o más fragmentos. Al desestabilizarlos manualmente, el arco colapsaba y seguía el flujo.

Es importante para poder tener un tiraje uniforme entre puntos de extracción vecinos, asegurarse de que cada vez que se produzcan colgaduras, deshacerlas lo antes posible, ya que si persisten por un largo tiempo, la interacción entre puntos vecinos puede cesar, lo que puede como vimos anteriormente provocar la aparición de dilución tempranamente.

5.5 Granulometría a baldes de extracción

Los siguientes gráficos muestran la granulometría de salida a baldes de extracción para la experiencias con granulometría extendida y dsal 4,5 cms y 9,0 cms.[Anexo B]

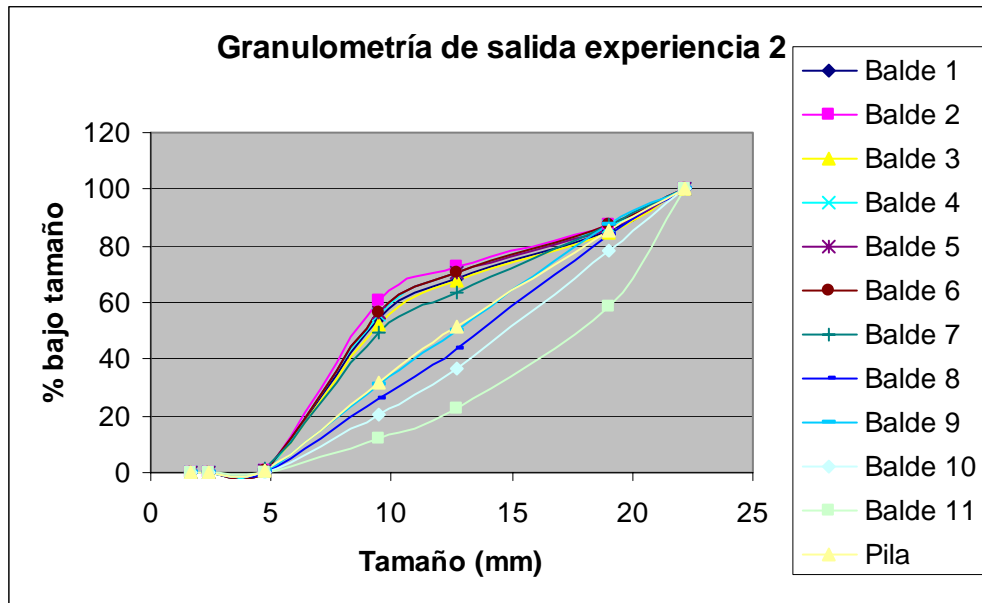


Gráfico 5.19 Granulometría de salida experiencia con dsal 4,5 cms.

*Pila corresponde a la granulometría del material cargado en el modelo.

Este gráfico corresponde a una de las experiencias realizadas para la primera granulometría con un tamaño de abertura del punto de extracción de 4,5 cm. Se observa que al principio de la extracción se produce una mayor extracción de las partículas más pequeñas. Un 50% del peso extraído corresponde a partículas de tamaño inferior a 9,5 mm aproximadamente, siendo que el d_{50} de la pila era de 12,7 mm. Esto ocurre porque las partículas más pequeñas se deslizan por entre los espacios que van dejando las más grandes llegando así al punto de extracción. Transcurrida la extracción, llega un momento en que el estrato de más arriba, o sea, el ubicado en la cota 80 cms, baja considerablemente, la superficie parece asentarse, y se forma una especie de cono invertido en la parte superior, como se observa en la figura 5.4, con esto comienza a ocurrir un nuevo fenómeno de segregación, pero esta vez empiezan a extraerse un mayor porcentaje de partículas de mayor tamaño. Esto se observa

en el gráfico para la granulometría de los baldes 8, 9, 10 y 11.. En este momento se produjo una mayor cantidad de colgaduras en el punto de extracción, ya que se estaban extrayendo partículas de mayor tamaño, producto de este tipo de segregación, que corresponde a segregación superficial.



Figura 5.4 Segregación de tamaños

La explicación de este fenómeno radica en que las partículas ubicadas en el eje o centro del punto de extracción, a cualquier altura, se mueven a mayor velocidad hacia el punto de extracción que las ubicadas distantes de este centro, por lo que se comienza a formar un cono invertido en la parte superior. Luego de transcurrida la extracción se llega a un ángulo en la parte superior, en el que las partículas de más arriba no logran equilibrarse y comienzan a caer hacia el centro. A medida que las partículas caen, las más pequeñas se van quedando atrás ya que se van alojando sobre partículas en reposo. Las partículas más grandes, por su parte, siguen fluyendo ya que no caben en los espacios dejados por las más pequeñas. Así las partículas más grandes llegan al eje del cuerpo en movimiento y son extraídas antes.

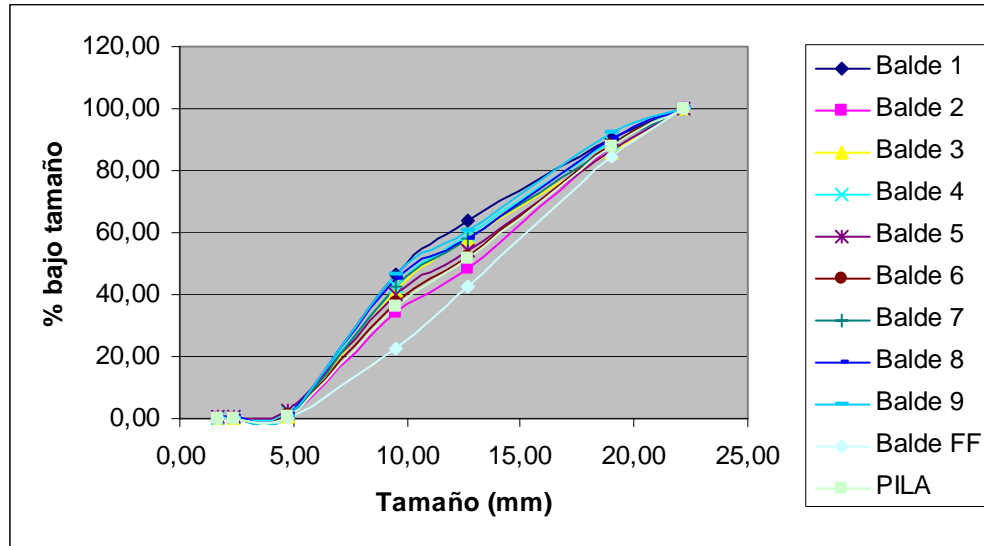


Gráfico 5.20 Granulometría de salida experiencia con dsal 9,0 cms

Se observa que al tener un mayor tamaño de abertura del punto de extracción no ocurre segregación al principio de la extracción, o sea, la granulometría de los primeros baldes es semejante a la granulometría de la pila cargada en el modelo. Sí se observa que ocurre el segundo fenómeno de segregación explicado anteriormente como se nota para el balde FF, pero en forma más moderada que para la experiencia anterior.

Los siguientes gráficos muestran la granulometría de salida para la experiencia con granulometría uniforme y dsal 4,5 cm y 9,0 cm.

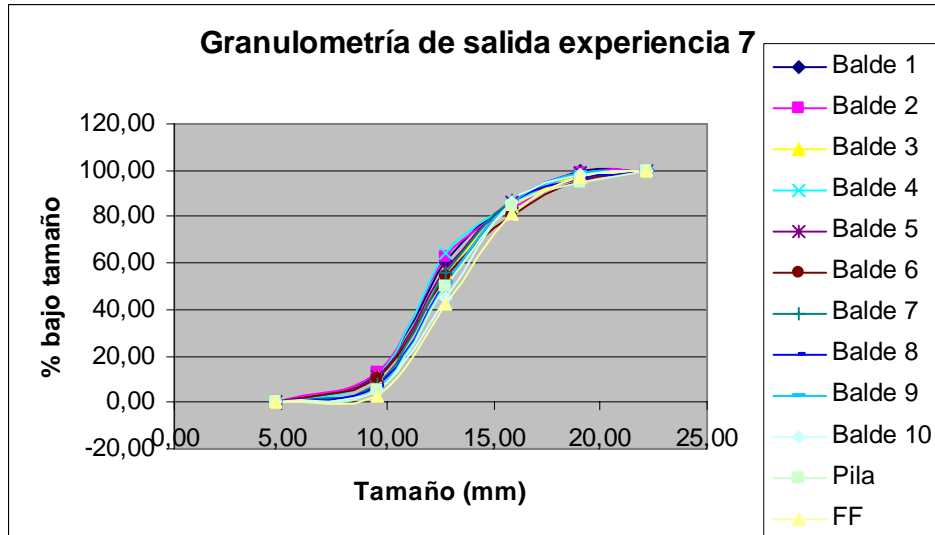


Gráfico 5.21 Granulometría de salida experiencia con dsal 4,5 cms.

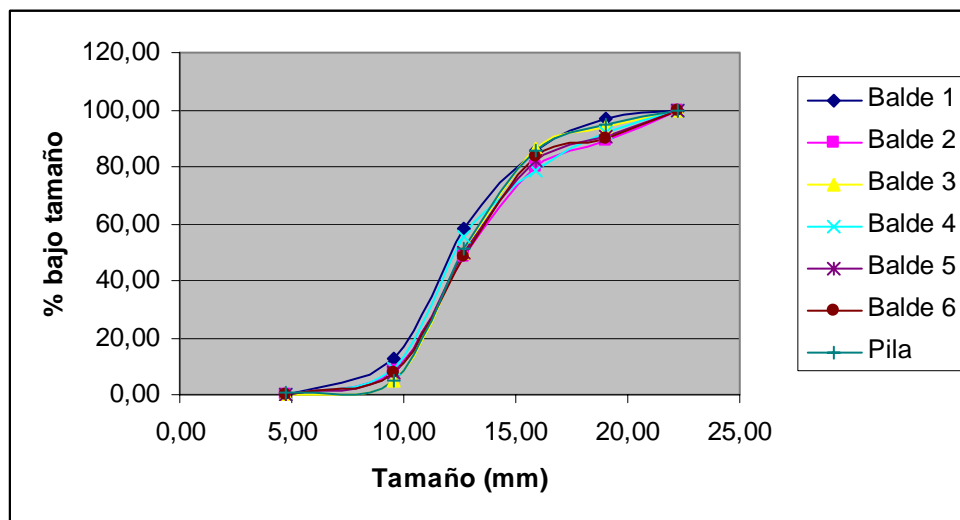


Gráfico 5.22 Granulometría de salida experiencia con dsal 9,0 cms.

Se observa que para los 2 casos no hay segregación de tamaños durante la extracción, incluso después de que el estrato de más arriba llega al punto de extracción. Esto se debe seguramente a que se estaba experimentando con granulometría uniforme.

En conclusión, dependerá del tamaño de la abertura del punto de extracción junto con la dispersión granulométrica del material si existirá o no segregación de tamaños durante la extracción. El tener una abertura pequeña en relación con el tamaño máximo de partículas y

una granulometría con alta dispersión granulométrica, provoca segregación de tamaños al principio de la extracción.

5.6 Análisis dimensional

Como se muestra en los resultados en el gráfico 4.1, el ancho de la elipse de movimiento crece a medida que aumenta el peso extraído, hasta alcanzar un valor constante, conocido como diámetro de tiraje aislado, d_{ta} . Es necesario recordar que el d_{ta} se obtuvo rellenando el modelo.

Por lo tanto, el análisis, se realizará para dos casos: primero para el caso estacionario, que corresponde a la situación en que se ha alcanzado el diámetro de tiraje aislado, o sea, la situación en que aunque se siga extrayendo material, el diámetro de la elipse no aumenta. Luego, se analizará el aumento del ancho de la elipse hasta alcanzar el diámetro de tiraje aislado, este corresponde al caso no estacionario [13].

Caso estacionario: En este caso el ancho de la elipse de movimiento es independiente del peso extraído. Se postula una relación funcional del tipo:

$$d_{ta} = f(\phi, dp, dsal)$$

El teorema Π indica que existirán 4-1 parámetros adimensionales que describen el problema. Éstos son:

$$\Pi_1 = \frac{d_{ta}}{dp} \quad \Pi_2 = \frac{dsal}{dp} \quad \Pi_3 = \tan(\phi)$$

Luego, graficando los datos obtenidos en esta experimentación junto con los obtenidos por el ingeniero Raúl Castro[11] y por CIMM se obtiene lo siguiente:

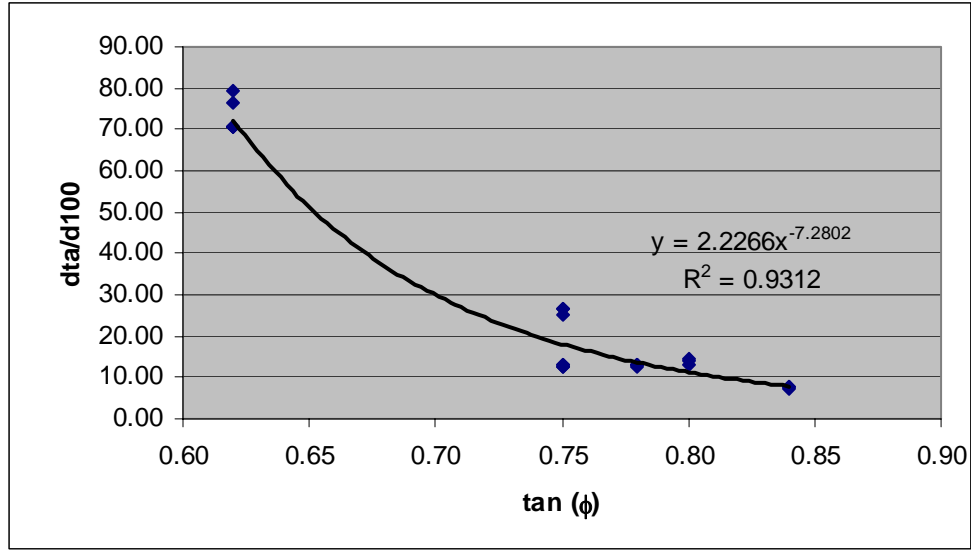


Gráfico 5.27 Relación entre Π_1 y Π_3 .

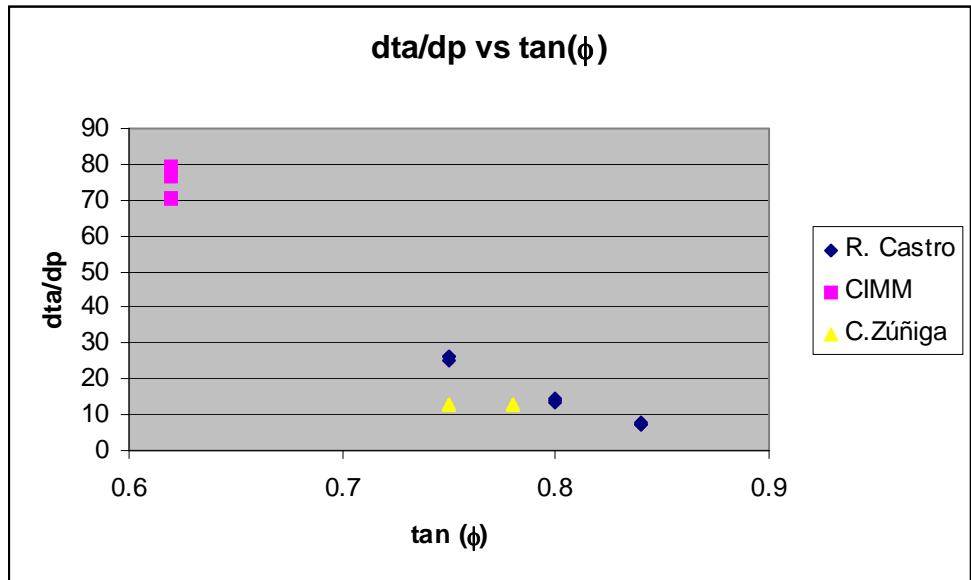


Gráfico 5.28 dta/dp vs $\tan(\phi)$

Por lo tanto, se tiene que:

$$\frac{dta}{dp} = 2,22 \tan(\phi)^{-7,28} \quad (5.1)$$

con $dp = d_{100}$.

Caso no estacionario: Para este caso se postula una relación funcional del tipo:

$$W = f(\phi, dp, dsal, P, \gamma)$$

Pero como vimos hay una relación entre dta , dp , y ϕ , por lo que la función anterior se reduce a:

$$W = f(dta, P, \gamma)$$

Por lo que existen 2 parámetros que describen el problema:

$$\Pi_1 = \frac{W}{dta} \quad \Pi_2 = \frac{P}{\gamma dta^3}$$

Se grafican estos parámetros a continuación para todas las experiencias realizadas.

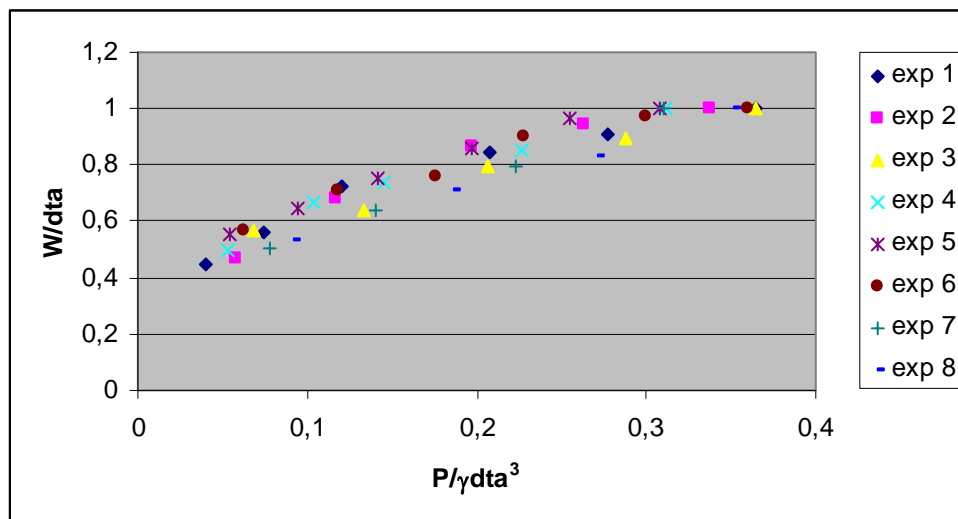


Gráfico 5.28 Relación entre parámetros adimensionales

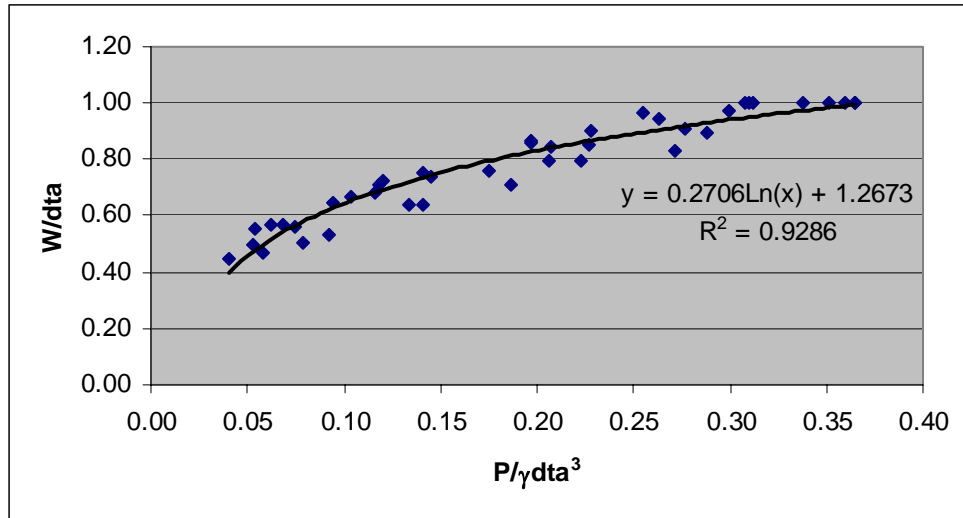


Gráfico 5.29 Modelamiento ancho elipse

Así, el ancho de la elipse queda modelado como sigue:

$$W = 0,2706 \cdot dta \cdot \ln\left(\frac{P}{\gamma dta^3}\right) + 1,2673 \quad (5.2)$$

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

De los resultados experimentales y el análisis de estos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Al iniciar la extracción de material se desarrollan dos zonas. Una zona de extracción, formada por el material extraído y una zona en movimiento. Estas zonas están caracterizadas por su diámetro y su altura y están definidas por un elipsoide que crece a medida que progresa la extracción de material.
- La variable principal que controla la geometría de las zonas de movimiento y extracción es el peso extraído. El diámetro y la altura del elipsoide crecen a medida que se extrae material.
- El diámetro del elipsoide de movimiento presenta un rápido crecimiento al inicio de la extracción, para posteriormente tender asintóticamente a un diámetro constante, conocido como diámetro de tiraje aislado, d_{ta} . El ancho del elipsoide queda modelado como sigue:

$$W = 0,2706 \cdot d_{ta} \cdot \ln\left(\frac{P}{\gamma d_{ta}^3}\right) + 1,2673$$

- La altura del elipsoide de movimiento crece indefinidamente y a una velocidad mayor que el ancho. La altura presenta un rápido crecimiento al inicio de la extracción. A medida que progresa la extracción, el ritmo de crecimiento decrece y sigue una tendencia aproximadamente lineal.
- La dispersión granulométrica del material no influye en la geometría de las zonas de movimiento y extracción ni en la determinación del valor del d_{ta} , para el rango de granulometrías estudiadas.

- El tamaño del punto de extracción tiene un efecto insignificante en la geometría de la zona de movimiento, pero si influye en la geometría del elipsoide de extracción, provocando que ésta tenga mayor o menor excentricidad.
- La velocidad del flujo depende de la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño de partícula, del ritmo de extracción y de la posición en la cual se encuentre la partícula con respecto al punto de extracción.
- La velocidad del flujo es mayor en el eje del cuerpo en movimiento y va disminuyendo a medida que nos alejamos verticalmente y a medida que nos alejamos del centro del punto de extracción.
- La frecuencia de colgaduras depende de la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño de partículas y de la forma de éstas. Cuando el valor de la razón entre el tamaño del punto de extracción y el tamaño máximo de partículas es cercano a 4, no se producen colgaduras.
- La existencia de segregación de tamaños durante la extracción depende del tamaño de abertura del punto de extracción y de la dispersión granulométrica del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Laubscher D. H., “Cave Mining, State of the Art”, August 1993, Notas de curso
- [2] Hartman, Howard L. “SME Mining Engineering Handbook”, 2nd Edition, Vol.2, pp 1815 –1835.
- [3] Informe Final, Proyecto FONDEF D99I-1037, “Desarrollo de un Modelo de Flujo Gravitacional para Minería por Hundimiento de Bloques”, Mayo 2002, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [4] Rustan, Agne. “Gravity Flow of Broken Rock – What is Known and Unknown”, Massmin 2000, 557-567p, Brisbane, Queensland
- [5] Wood, P A. “Fundamentals of bulk solids flow”, International Energy Agency Coal Research, London, Report number ICTIS/TR31, 1986.
- [6] R. Kvapil, “Gravity flow of granular Material on Hopper and Bins”, 1965, Inst, Rocks Mech, Min, Vol, 2 pp 277-304.
- [7] Mc Cormick R.J., “How wide does a drawpoint draw?”, EMJ, Greighton Mine, Ontario, Canada, Junio 1968, pp. 106-116
- [8] Li I. Yenge, “Analysis of Bulk Flow of Material Under Gravity Caving Process”, Part 2, 1981, Colorado School of Mines, Colorado, USA
- [9] D.C. Peters, “Physical Modeling of the draw behavior of broken rock in caving”, 1984, Colorado School of Mines, Colorado, USA

- [10] Fuentes, R., “Apéndice 1: Consideraciones sobre Similitud y Escalamiento”, CIMM, 1996, Apéndices informe final PB5-10004: “Simulación Física del Flujo Gravitacional”, Santiago, Chile
- [11] Poschel T., “Scalling properties of granular materials”, 2000, Universidad de Humboldt, Berlín, Alemania
- [12] Susaeta, Andrés. “Theory of gravity flow”, Massmin 2004, 167-178p, Santiago, Chile
- [13] Castro, Raúl. “Escalamiento para Modelo Físico de Flujo Gravitacional”, 2001, Departamento Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Chile.
- [14] Castro R., et al. “ A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model”, Int J Rock Mech Mining Sci, 2007

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

1. Experiencias de prueba

1.1 Distribución granulométrica

Tamaño partículas (cm)	% bajo tamaño	% retenido
1,9	99,99	0,01
1,27	70	29,99
0,95	36	34
0,476	10	26
0,238	9	1

Tabla 1.1 Distribución de tamaños material A

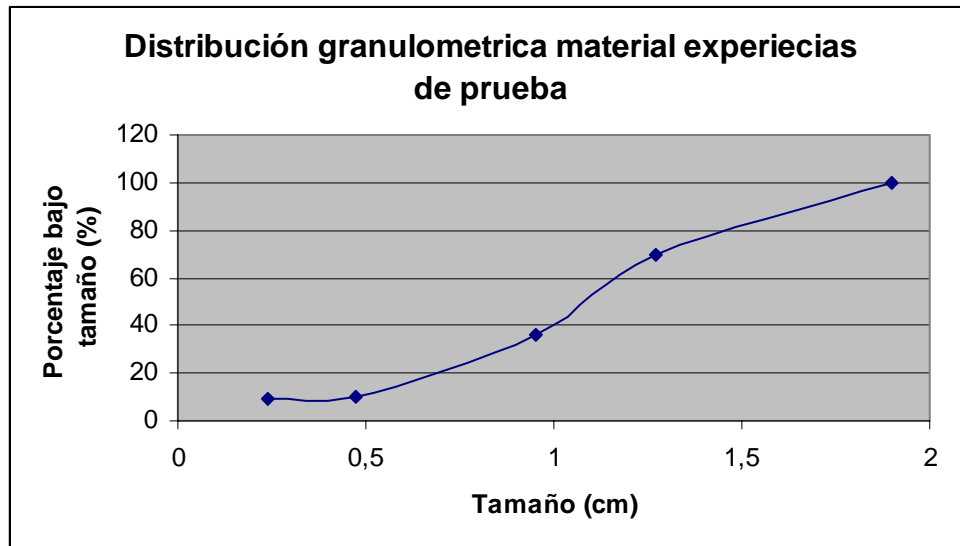


Gráfico 1.1 Distribución granulométrica experiencias de prueba.

1.2 Humedad

Peso Húmedo: 998,75 grf

Peso Seco: 997,81 grf

$$\% \text{ Humedad} = \frac{998,75 - 997,81}{998,75} \cdot 100 = 0,094$$

2. Experiencias definitivas

2.1 Distribución granulométrica

2.1.1 Experiencias 1-4: Granulometría 1

Tamaño partículas (cm)	% bajo tamaño	% retenido
2,22	99	1
1,9	86,42	12,58
1,27	50,68	35,74
0,95	31,2	19,48
0,476	1,4	29,8
0,238	0,8	0,6
0,168	0,2	0,6

Tabla 2.1 Distribución granulométrica experiencias 1-4

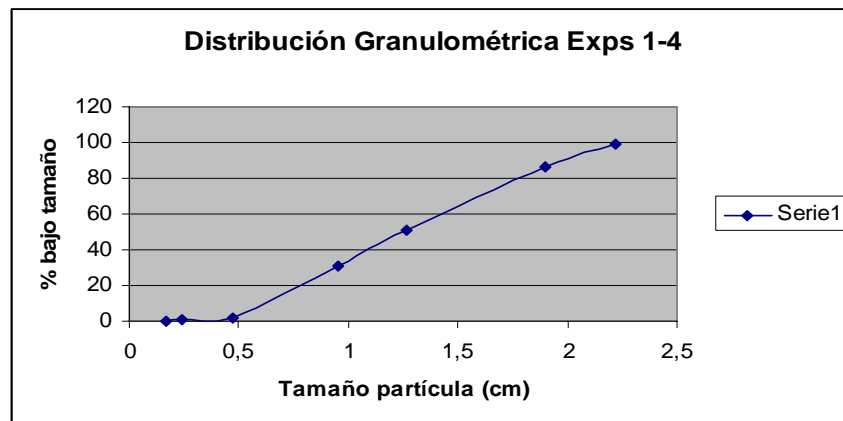


Gráfico 2.1 Distribución granulométrica experiencias 1-4

2.1.2 Experiencias 5-8: Granulometría 2

Tamaño partículas (cm)	% bajo tamaño	% retenido
2,22	99,99	0,01
1,9	95,78	4,21
1,59	83,89	11,89
1,27	50,64	33,25
0,95	4,89	45,75
0,476	0,48	4,41

Tabla 2.2 Distribución granulométrica experiencias 5-8

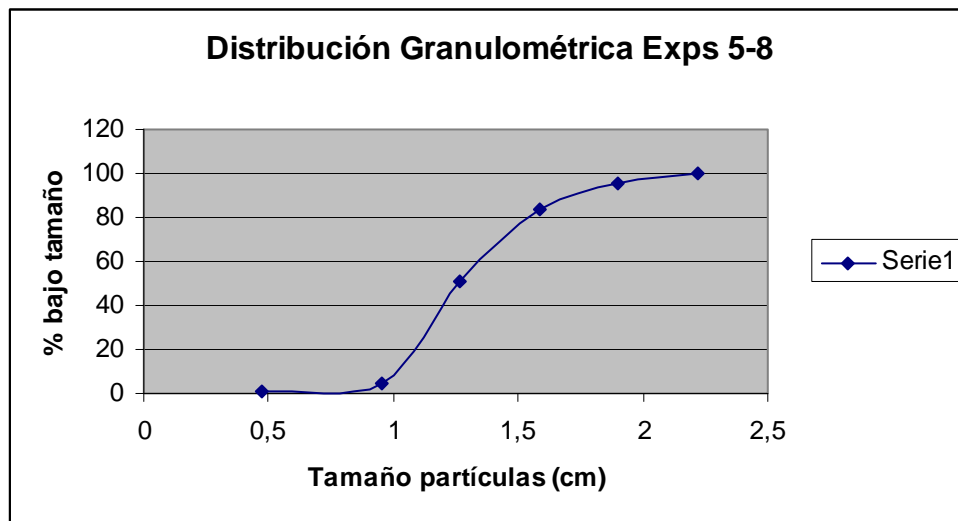


Gráfico 2.2 Distribución granulométrica experiencias 5-8

2.2 Factor de forma

N° Particula	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Volumen (cm3)	d (cm)	Factor de forma
1	3,70	2,30	2,10	8,00	2,70	0,78
2	3,70	2,00	1,80	7,00	2,50	0,86
3	3,10	2,20	1,40	4,00	2,23	0,69
4	2,80	2,50	2,00	5,00	2,43	0,66
5	4,70	2,60	2,10	10,00	3,13	0,62
6	2,80	2,30	1,40	4,00	2,17	0,75
7	3,60	2,60	1,70	8,00	2,63	0,84
8	3,00	1,80	1,00	2,00	1,93	0,53
9	4,10	2,30	1,60	7,00	2,67	0,71
10	2,70	2,30	1,70	3,00	2,23	0,51
11	2,60	2,30	1,80	5,00	2,23	0,86
12	2,20	1,00	0,90	1,00	1,37	0,75
13	2,00	1,10	1,00	1,00	1,37	0,75
14	1,40	1,10	0,50	0,30	1,00	0,57
15	1,80	1,20	0,50	0,50	1,17	0,60
16	1,60	0,90	0,60	0,40	1,03	0,69
17	3,30	2,60	1,50	4,00	2,47	0,51
18	3,40	2,40	2,20	8,00	2,67	0,81
19	3,60	2,60	2,10	9,00	2,77	0,81
20	3,20	2,80	1,30	4,00	2,43	0,53
21	2,40	1,70	1,70	3,00	1,93	0,79
22	1,90	1,30	0,90	1,00	1,37	0,75
23	3,60	2,10	1,60	4,00	2,43	0,53
24	3,80	1,80	1,80	5,00	2,47	0,64
25	2,00	1,50	0,80	1,50	1,43	0,97
26	3,60	2,20	2,00	8,00	2,60	0,87
27	4,30	1,80	1,80	3,00	2,63	0,31
28	3,60	2,80	1,50	7,00	2,63	0,73
29	3,00	2,60	1,30	5,00	2,30	0,79
30	3,20	1,80	1,30	3,00	2,10	0,62
31	3,10	2,00	1,40	4,00	2,17	0,75
Promedio	3,03	2,02	1,46	4,38	2,17	0,70

Tabla 2.3 Determinación Factor de Forma

2.3 Densidad Específica

N° Partícula	Peso (grf)	Volumen (cm3)	Densidad específica (grf/cm3)
1	19,37	8,00	2,42
2	14,86	7,00	2,12
3	11,15	4,00	2,79
4	14,39	5,00	2,88
5	28,30	10,00	2,83
6	12,55	4,00	3,14
7	16,17	8,00	2,02
8	6,35	2,00	3,18
9	17,72	7,00	2,53
10	12,40	3,00	4,13
11	12,19	5,00	2,44
12	1,95	1,00	1,95
13	2,81	1,00	2,81
14	0,60	0,30	2,00
15	1,40	0,50	2,80
16	1,08	0,40	2,70
17	14,44	4,00	3,61
18	20,29	8,00	2,54
19	20,33	9,00	2,26
20	12,65	4,00	3,16
21	7,06	3,00	2,35
22	2,90	1,00	2,90
23	13,04	4,00	3,26
24	13,12	5,00	2,62
25	4,60	1,50	3,07
26	19,09	8,00	2,39
27	14,64	3,00	4,88
28	17,86	7,00	2,55
29	12,24	5,00	2,45
30	8,24	3,00	2,75
31	9,20	4,00	2,30
Promedio	11,71	4,38	2,77

Tabla 2.4 Determinación Densidad Específica

2.4 Humedad

Peso Húmedo: 976,37 grf

Peso Seco: 975,46 grf

$$\% \text{ Humedad} = \frac{976,37 - 975,32}{976,37} \cdot 100 = 0,1 \%$$

ANEXO B: EXPERIMENTACIÓN

1. Geometría elipsoide de movimiento y extracción

Las variables que se midieron durante la experimentación son:

Pi: Peso extraído balde i, medido en grf

P: Peso acumulado extraído, medido en grf

Ti: Tiempo extracción balde i, medido en segundos

T: Tiempo acumulado de extracción, medido en segundos

R.E.i: Ritmo de extracción balde i, medido en grf / segundos

Wimz: Ancho elipse de movimiento, medido en cm

Himz: Altura elipse de movimiento, medido en cm

Wiez: Ancho elipse de extracción, medido en cm

Hiez: Altura elipse de extracción, medido en cm

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada experiencia.

Experiencia 1	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	1486	1486	20,2	20,2	73,56	12,7	37	9,5	20
Balde 2	1271,3	2757,3	18,2	47,5	69,85	15,9	50	11,5	24
Balde 3	1681,5	4438,8	25,1	72,6	66,99	20,7	69	14	32
Balde 4	3254,8	7693,6	37,6	97,6	86,56	24	mas de 80	16,5	43
Balde 5	2561,5	10255,1	28,6	125,6	89,56	26	mas de 80	18,5	48
Balde 6	3262,8	13517,9	38,5	168,2	84,75	28,2	mas de 80	20	53
Promedio	13517,9		168,2		78,55				

Tabla 1.1 Resultados experiencia 1

Experiencia 2	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	2151,9	2151,9	30,29	30,29	71,04	13,2	40	11	23
Balde 2	2163,6	4315,5	30,76	61,05	70,34	19	62	13	30
Balde 3	2974,5	7290	30,31	91,36	98,14	24,2	80	16	40
Balde 4	2467,8	9757,8	30,6	121,96	80,65	26,5	mas de 80	17	46
Balde 5	2747,4	12505,2	31,25	153,21	87,92	28	mas de 80	19	50
Promedio	12505,2		153,21		81,62				

Tabla 1.2 Resultados experiencia 2

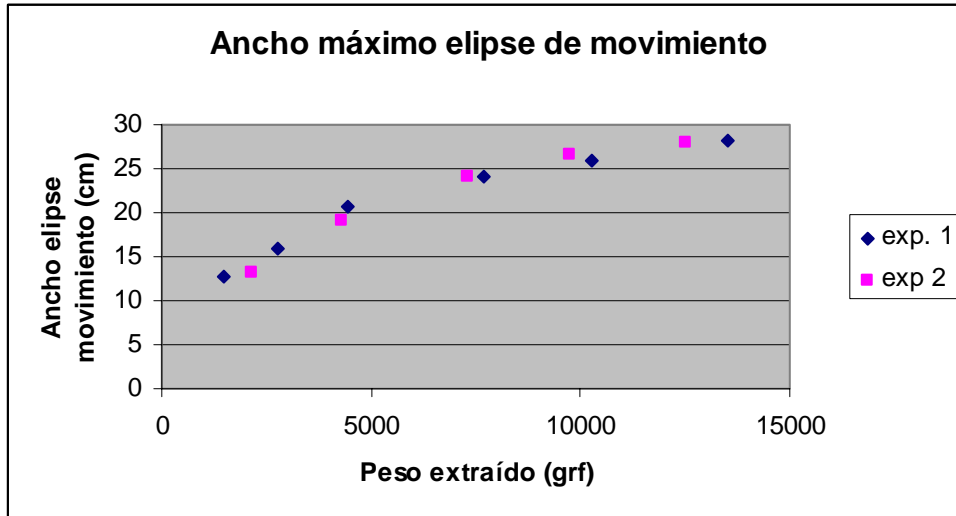


Gráfico 1.1 Ancho de elipse de movimiento experiencias 1 y 2 en función del peso extraído

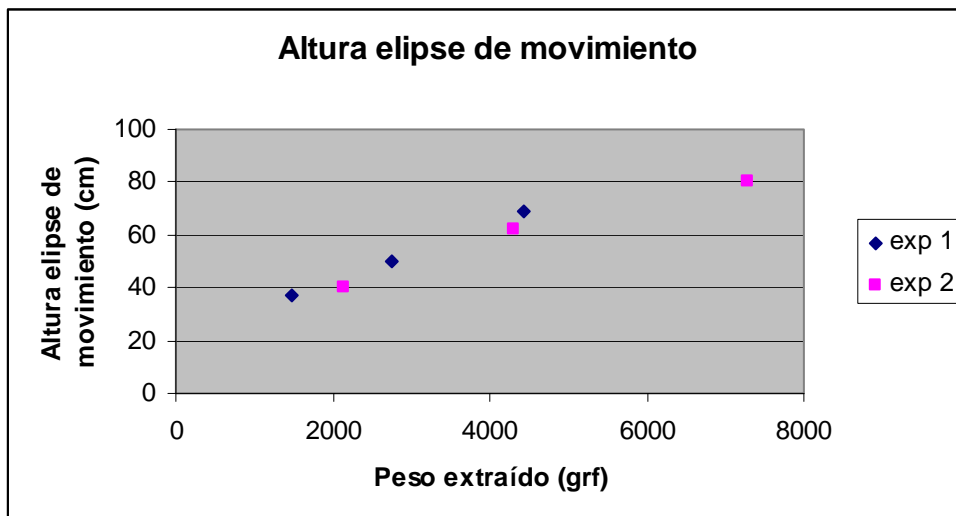


Gráfico 1.2 Altura de elipse de movimiento experiencias 1 y 2 en función del peso extraído

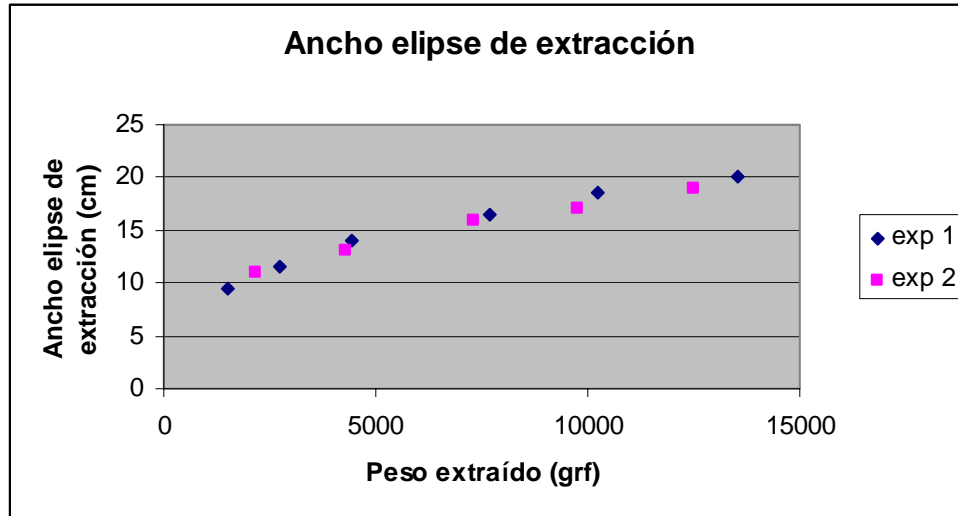


Gráfico 1.3 Ancho elipse de extracción experiencias 1 y 2 en función del peso extraído

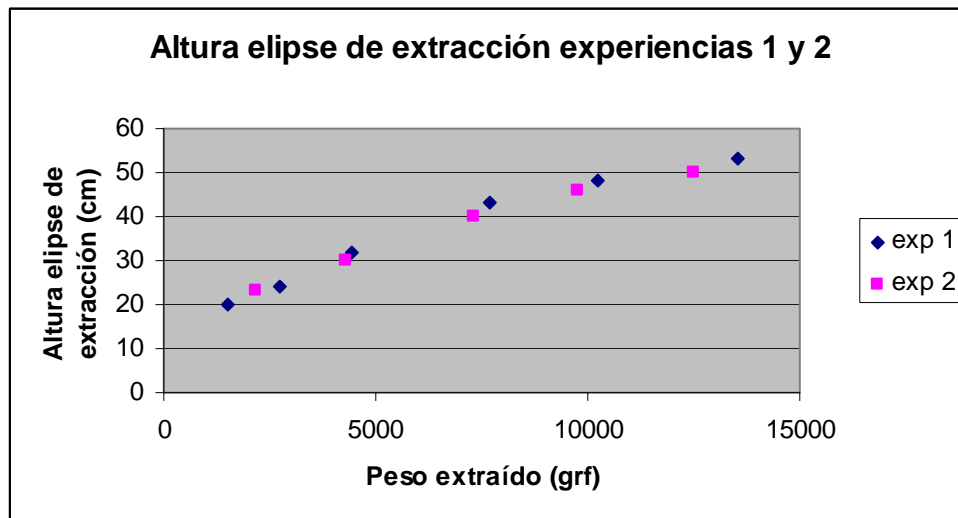


Gráfico 1.4 Altura elipse de extracción experiencias 1 y 2 en función del peso extraído

Experiencia 3	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	2540,3	2540,3	1,13	1,13	2248,05	16,4	46	9,5	15
Balde 2	2409,5	4949,8	1,06	2,19	2273,11	18,6	61	12	23
Balde 3	2695,8	7645,6	1,21	3,4	2227,93	23,1	76	15,5	31
Balde 4	3020,4	10666	1,26	4,66	2397,14	27	mas de 80	18,4	36
Balde 5	2840,6	13506,6	1,15	5,81	2470,09	29	mas de 80	20	40
Promedio	13506,6		5,81		2323,27				

Tabla 1.3 Resultados experiencia 3

Experiencia 4	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	1962,3	1962,3	0,86	0,86	2281,74	14,5	41	9,5	13
Balde 2	1875	3837,3	0,79	1,65	2373,42	19,5	56	11	17
Balde 3	1540,4	5377,7	0,65	2,3	2369,85	21,5	68	13	24
Balde 4	3020,4	8398,1	1,3	3,6	2323,38	24,7	80	16	30
Balde 5	3136,7	11534,8	1,25	4,85	2509,36	29,1	mas de 80	19	35
Promedio	11534,8		4,85		2371,55				

Tabla 1.4 Resultados experiencia 4

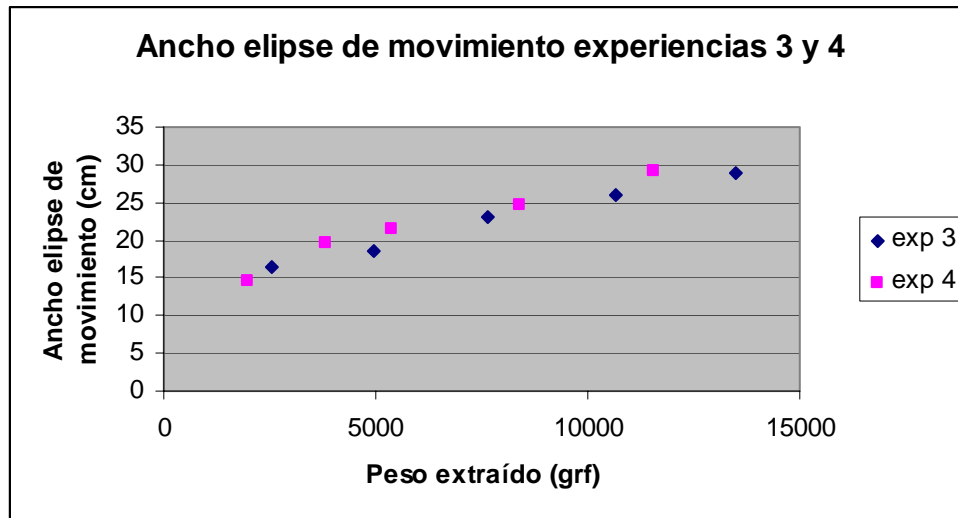


Gráfico 1.5 Ancho elipse de movimiento experiencias 3 y 4 en función del peso extraído

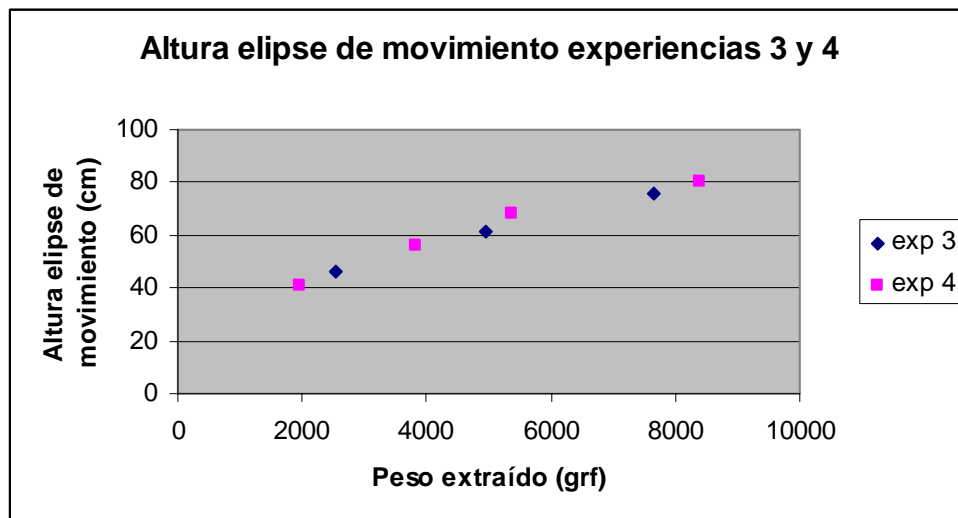


Gráfico 1.6 Altura elipse de movimiento experiencias 3 y 4 en función del peso extraído

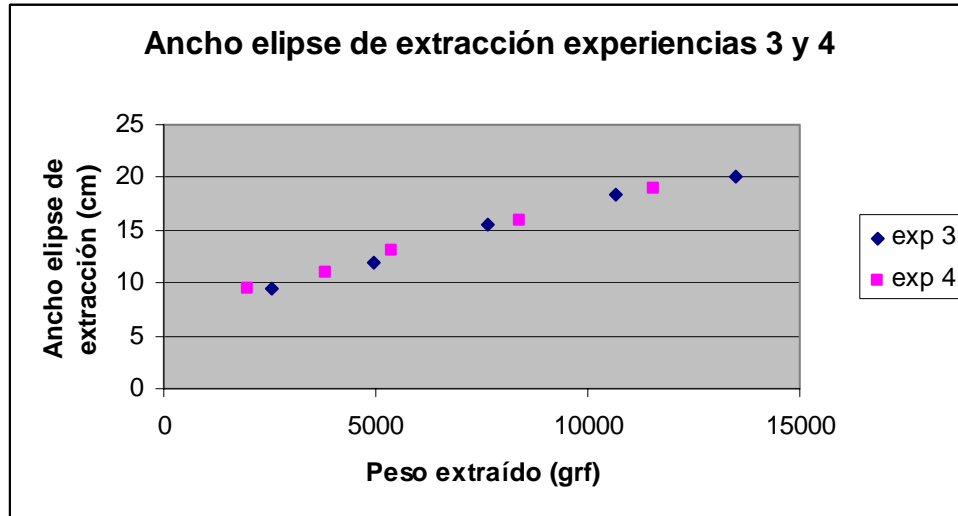


Gráfico 1.7 Ancho elipse de extracción experiencias 3 y 4 en función del peso extraído

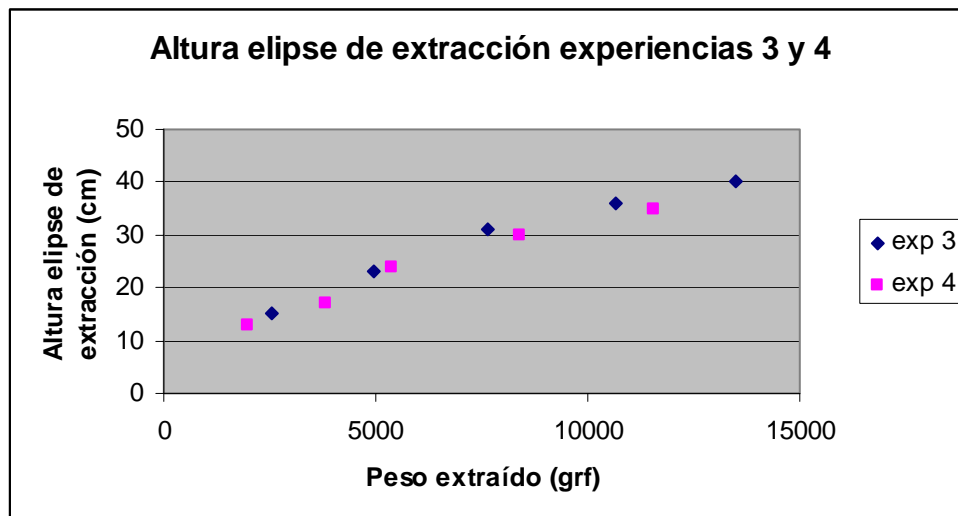


Gráfico 1.8 Altura elipse de extracción experiencias 3 y 4 en función del peso extraído

Experiencia 5	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	1988,9	1988,9	19,98	19,98	99,54	15,5	42	10	22
Balde 2	1522,8	3511,7	20,39	40,37	74,68	18	58	13	30
Balde 3	1718,9	5230,6	21,53	61,9	79,84	21	68	15	35
Balde 4	2055,3	7285,9	20,01	81,91	102,71	24	78	16,5	40
Balde 5	2173,2	9459,1	20,16	102,07	107,80	27	mas de 80	18,4	45
Balde 6	1932,9	11392	21,06	123,13	91,78	28	mas de 80	19	48
Promedio	11392		123,13		92,73				

Tabla 1.5 Resultados experiencia 5

Experiencia 6	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	2315,16	2315,16	24,18	24,18	95,75	16	46	11	24
Balde 2	2045,54	4360,7	21,34	45,52	95,85	20	59	15	32
Balde 3	2136,81	6497,51	21,6	67,12	98,93	21,5	69	16	36
Balde 4	1947,35	8444,86	20,64	87,76	94,35	25,5	mas de 80	17,5	42
Balde 5	2658,4	11103,26	27,88	115,64	95,35	27,4	mas de 80	18,5	48
Balde 6	2232,69	13335,95	23,51	139,15	94,97	28,3	mas de 80	20	50
Promedio	13335,95		139,15		95,87				

Tabla 1.6 Resultados experiencia 6

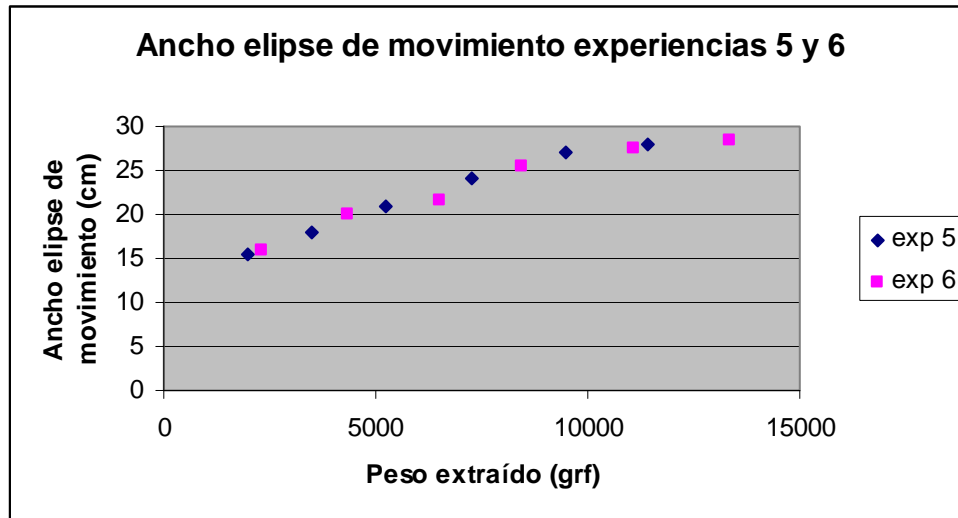


Gráfico 1.9 Ancho elipse de movimiento experiencias 5 y 6 en función del peso extraído

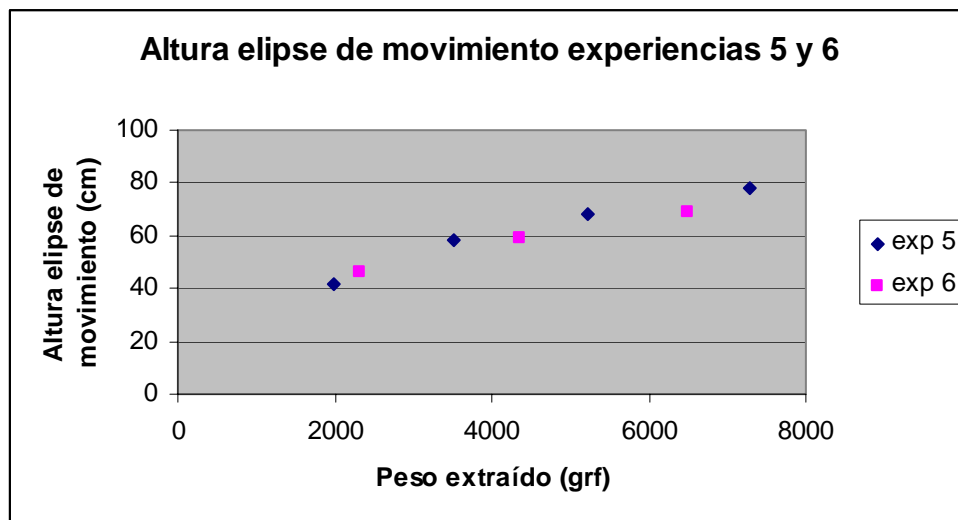


Gráfico 1.10 Altura elipse de movimiento experiencias 5 y 6 en función del peso extraído

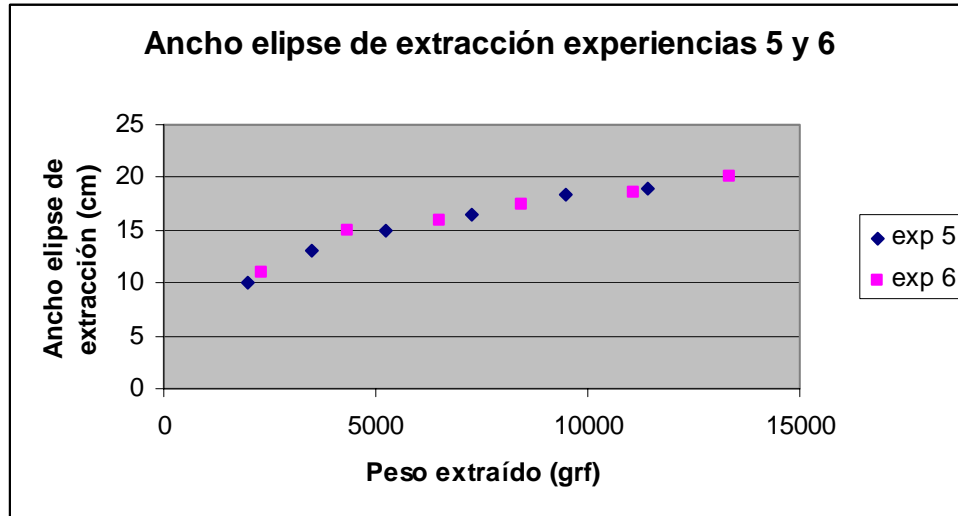


Gráfico 1.11 Ancho elipse de extracción experiencias 5 y 6 en función del peso extraído

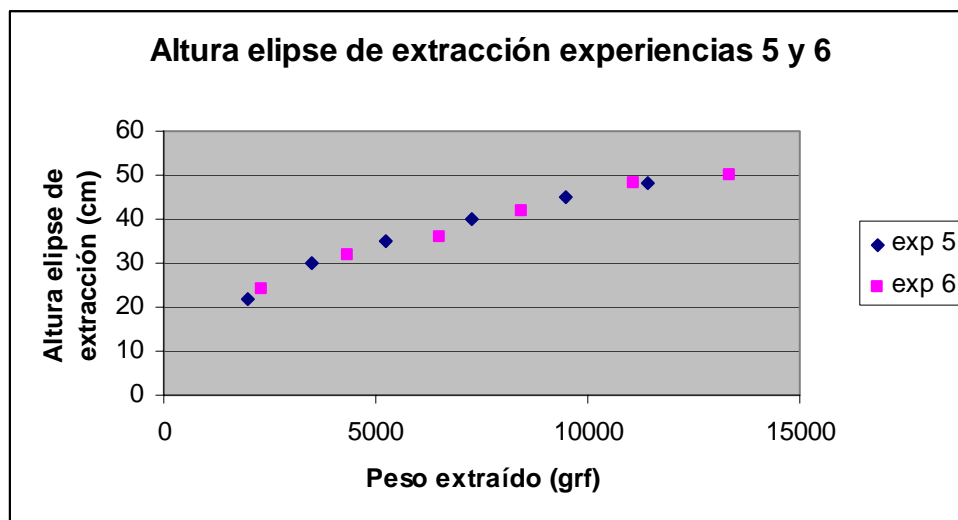


Gráfico 1.12 Altura elipse de extracción experiencias 5 y 6 en función del peso extraído

Experiencia 7	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	2902,96	2902,96	1,08	1,08	2687,93	14,5	41	9,2	15
Balde 2	2315,82	5218,78	0,78	1,86	2969,00	18,5	60	14	24
Balde 3	3024,73	8243,51	1,17	3,03	2585,24	23	76	17	32
Balde 4	3236,78	11480,29	1,13	4,16	2864,41	28,8	mas de 80	19	38
Promedio	11480,29		4,16		2776,64				

Tabla 1.7 Resultados experiencia 7

Experiencia 8	Pi (grf)	P (grf)	Ti (s)	T (s)	R.E.i (grf/s)	Wimz (cm)	Himz (cm)	Wiez	Hiez
Balde 1	3416,01	3416,01	1,36	1,46	2511,77	15,5	46	9,2	16
Balde 2	3508,16	6924,17	1,25	2,81	2806,53	20,5	67	15	27
Balde 3	3144,7	10068,87	1,51	4,42	2082,58	24	80	18,5	36
Balde 4	2954,62	13023,49	1,25	5,37	2363,70	29	mas de 80	20	40
Promedio	13023,49		5,37		1627,43				

Tabla 1.8 Resultados experiencia 8

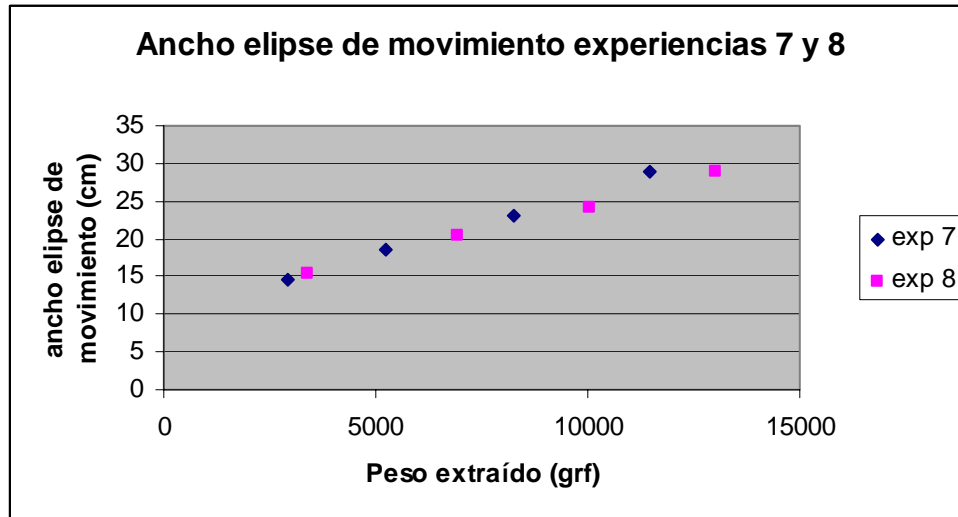


Gráfico 1.13 Ancho elipse de movimiento experiencias 7 y 8 en función del peso extraído

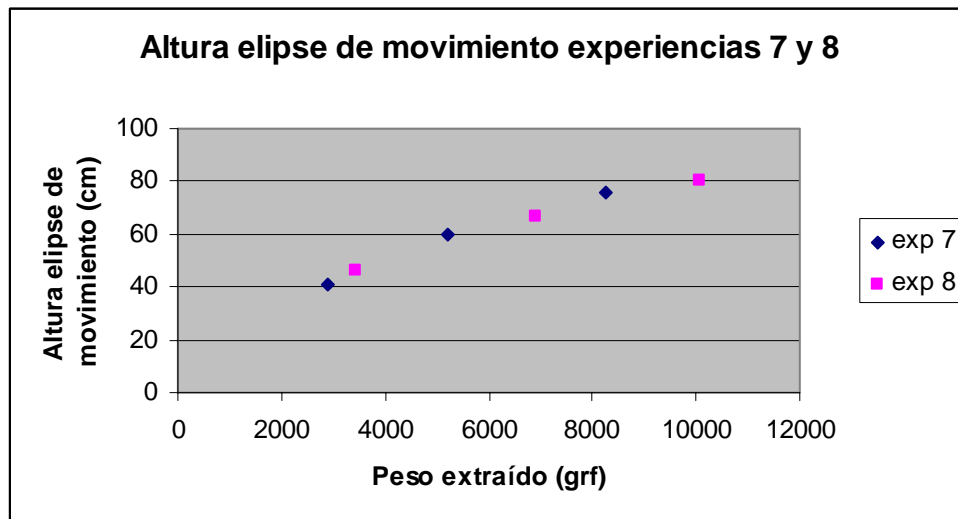


Gráfico 1.14 Altura elipse de movimiento experiencias 7 y 8 en función del peso extraído

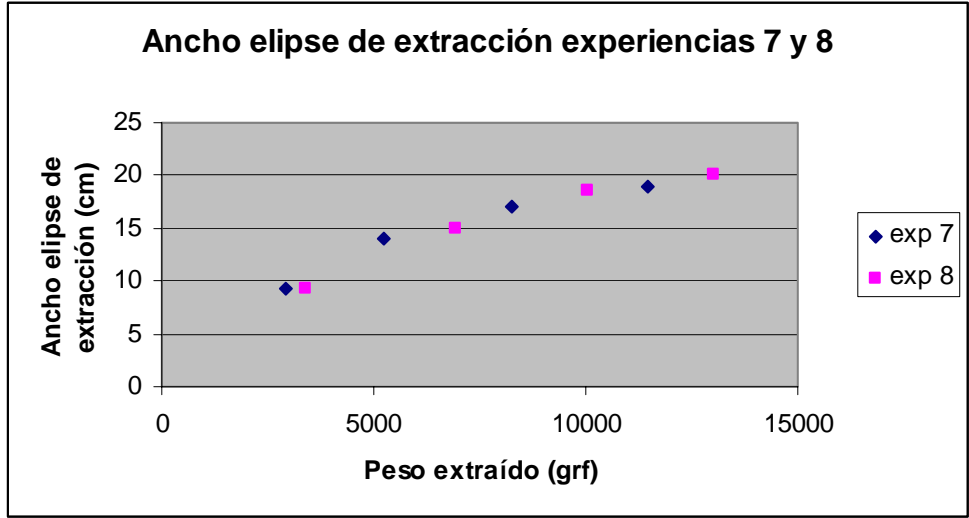


Gráfico 1.15 Ancho elipse de extracción experiencias 7 y 8 en función del peso extraído

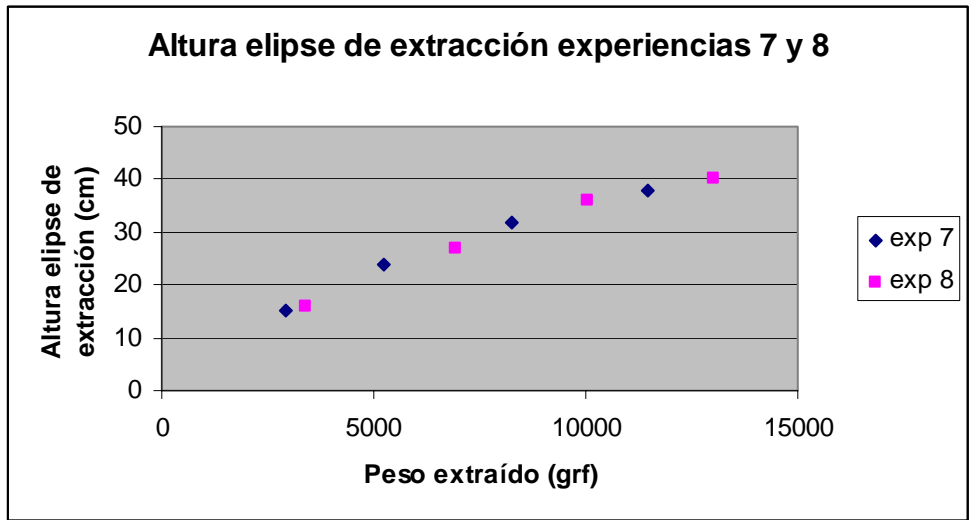


Gráfico 1.16 Altura elipse de extracción experiencias 7 y 8 en función del peso extraído

2. Velocidad de flujo

La velocidad calculada corresponde a la del centro del flujo. La velocidad fuera del eje fue medida cualitativamente por la extracción de los marcadores numerados.

Experiencia	Cota (cm)	Velocidad de flujo (cm/s)
Experiencia 1	10,00	0,85
	20,00	0,61
	30,00	0,43
	40,00	0,21
	50,00	0,12
	60,00	0,09
	70,00	0,07
Experiencia 2	10,00	0,81
	20,00	0,63
	30,00	0,45
	40,00	0,24
	50,00	0,15
	60,00	0,09
	70,00	0,07
Experiencia 3	10,00	34,80
	20,00	16,10
	30,00	9,10
	40,00	5,10
	50,00	3,90
	60,00	2,80
	70,00	1,90
Experiencia 4	10,00	35,60
	20,00	14,20
	30,00	8,60
	40,00	5,20
	50,00	3,50
	60,00	2,90
	70,00	2,00
Experiencia 5	10,00	0,91
	20,00	0,70
	30,00	0,48
	40,00	0,19
	50,00	0,13
	60,00	0,10
	70,00	0,07

Experiencia	Cota (cm)	Velocidad de flujo (cm/s)
Experiencia 6	10,00	0,87
	20,00	0,71
	30,00	0,44
	40,00	0,22
	50,00	0,14
	60,00	0,09
	70,00	0,07
Experiencia 7	10,00	33,33
	20,00	11,11
	30,00	7,41
	40,00	4,85
	50,00	3,30
	60,00	2,92
	70,00	1,92
Experiencia 8	10,00	30,20
	20,00	15,60
	30,00	8,30
	40,00	4,40
	50,00	3,10
	60,00	2,70
	70,00	1,80

Tabla 2.1 Velocidad en el eje del flujo

3. Granulometría a baldes de extracción

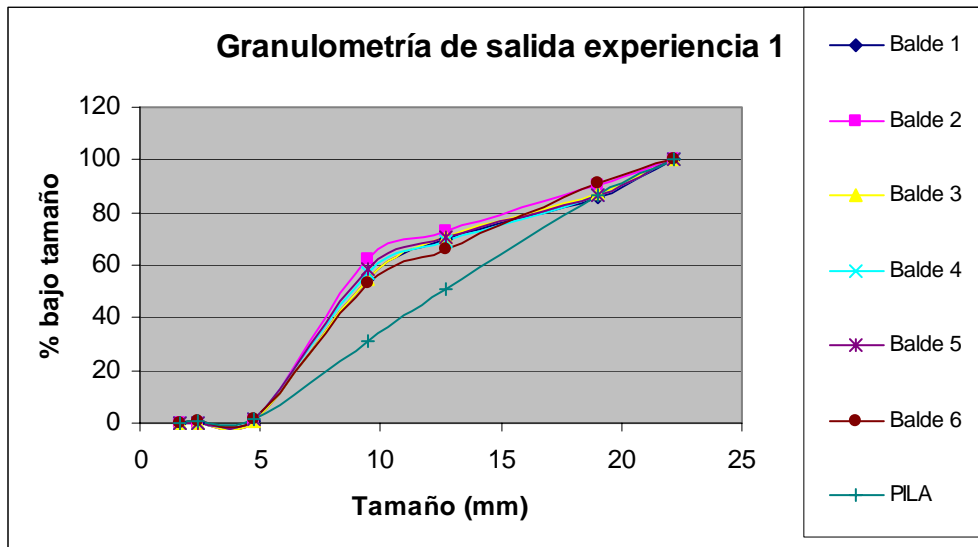


Gráfico 3.1 Distribución granulométrica a baldes de extracción experiencia 1

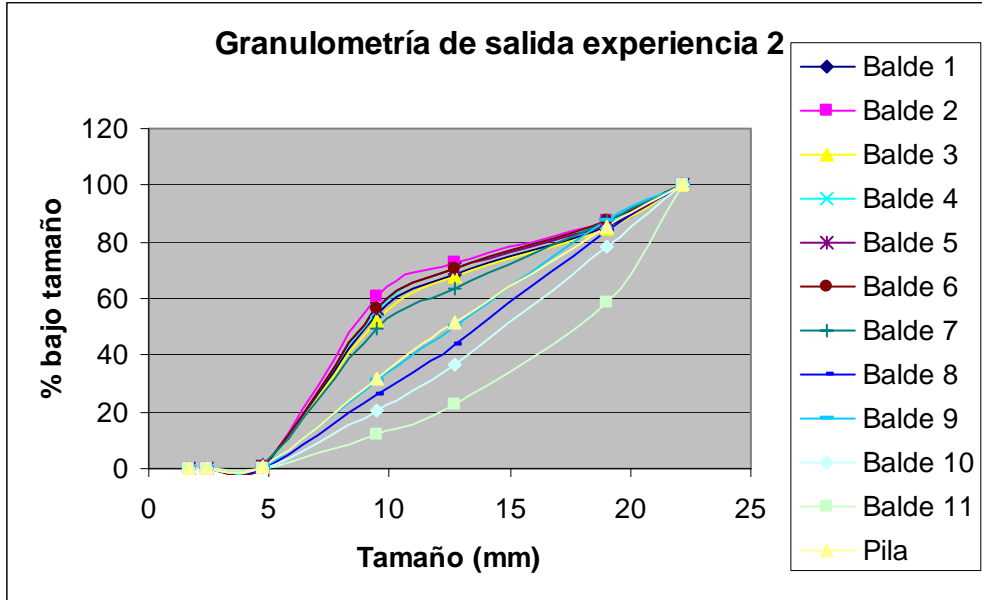


Gráfico 3.2 Distribución granulométrica a baldes de extracción experiencia 2

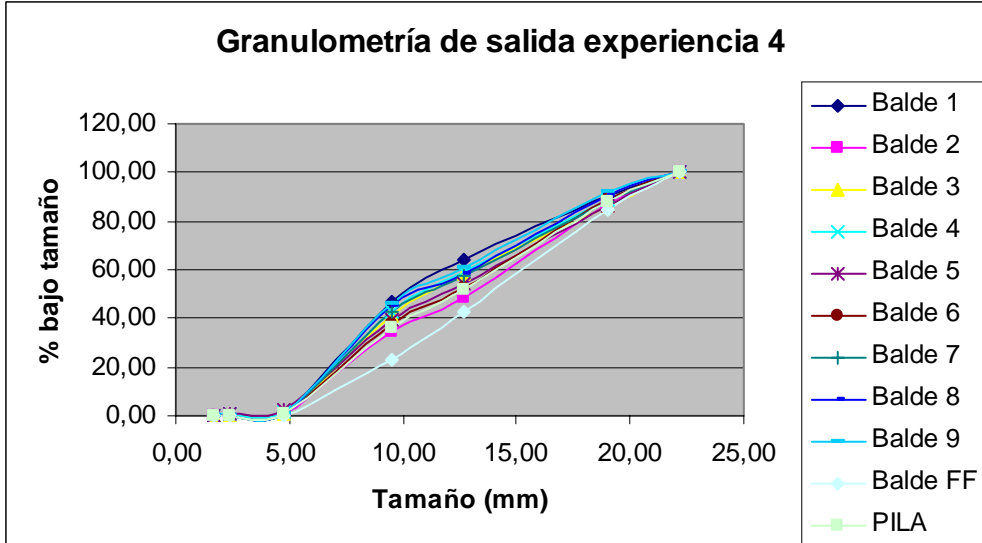


Gráfico 3.3 Distribución granulométrica a baldes de extracción experiencia 4

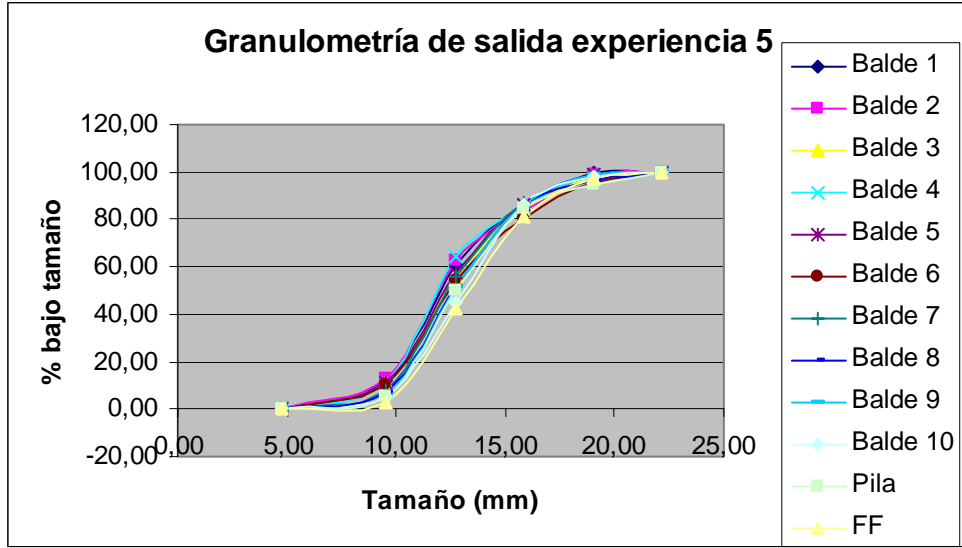


Gráfico 3.4 Distribución granulométrica a baldes de extracción experiencia 5

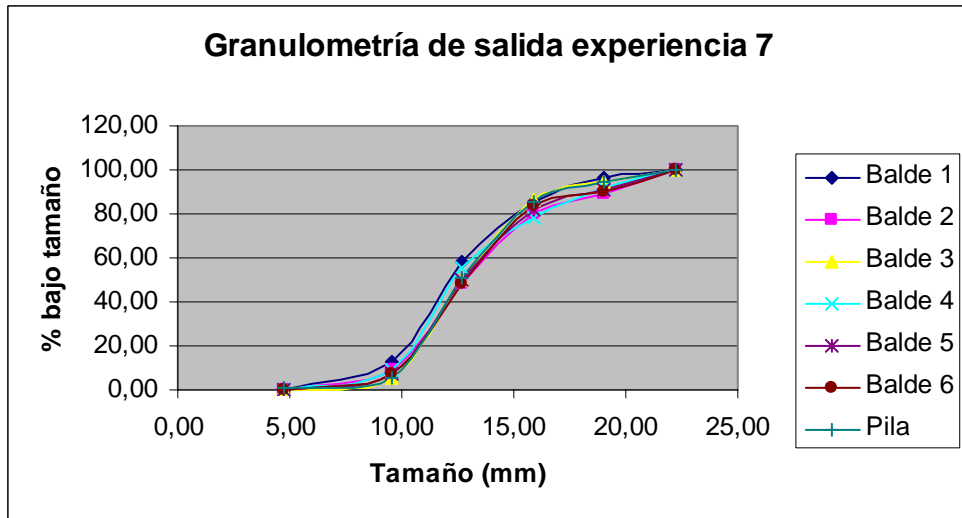


Gráfico 3.6 Distribución granulométrica a baldes de extracción experiencia 7

4. Constantes adimensionales

Experiencia	$P/\gamma d\alpha^3$	$W/d\alpha$	$d\alpha/dp$	$\tan(\phi)$
Experiencia 1	0,04	0,45	12,84	0,78
	0,07	0,56	12,84	0,78
	0,12	0,73	12,84	0,78
	0,21	0,84	12,84	0,78
	0,28	0,91	12,84	0,78
	0,36	1,00	12,84	0,78
Experiencia 2	0,06	0,47	12,61	0,78
	0,12	0,68	12,61	0,78
	0,20	0,86	12,61	0,78
	0,26	0,95	12,61	0,78
	0,34	1,00	12,61	0,78
Experiencia 3	0,07	0,57	13,06	0,78
	0,13	0,64	13,06	0,78
	0,21	0,80	13,06	0,78
	0,29	0,90	13,06	0,78
	0,36	1,00	13,06	0,78
Experiencia 4	0,05	0,50	13,11	0,78
	0,10	0,67	13,11	0,78
	0,15	0,74	13,11	0,78
	0,23	0,85	13,11	0,78
	0,31	1,00	13,11	0,78
Experiencia 5	0,05	0,55	12,61	0,75
	0,09	0,64	12,61	0,75
	0,14	0,75	12,61	0,75
	0,20	0,86	12,61	0,75
	0,26	0,96	12,61	0,75
	0,31	1,00	12,61	0,75
Experiencia 6	0,06	0,57	12,70	0,75
	0,12	0,71	12,70	0,75
	0,18	0,76	12,70	0,75
	0,23	0,90	12,70	0,75
	0,30	0,97	12,70	0,75
	0,36	1,00	12,70	0,75
Experiencia 7	0,08	0,50	12,97	0,75
	0,14	0,64	12,97	0,75
	0,22	0,80	12,97	0,75
	0,31	1,00	12,97	0,75

Experiencia	$P/\gamma d\alpha^3$	$W/d\alpha$	$d\alpha/dp$	$\tan(\phi)$
Experiencia 8	0,09	0,53	13,06	0,75
	0,19	0,71	13,06	0,75
	0,27	0,83	13,06	0,75
	0,35	1,00	13,06	0,75

Tabla 4.1 Constantes adimensionales para W