

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería  
Metalúrgica

Profesor Patrocinante  
Sr. René Gómez Puigpinos

# FRAGMENTACIÓN POR EFECTO DEL TRANSPORTE DE MATERIAL EN PIQUES A ESCALA DE LABORATORIO



FRANCO IGNACIO RIVEROS COFRÉ

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de  
Ingeniero Civil de Minas

Noviembre, 2019

## RESUMEN

---

El transporte de mineral entre niveles es un proceso clave para mantener operativa una mina subterránea. La utilización de piques de traspaso de mineral es común y su función principal es el transporte y almacenamiento de roca fragmentada. Sin embargo, hay poca información sobre la fragmentación generada en ellos, la cual puede verse modificada si son recorridas grandes distancias generando gran cantidad de material fino.

El presente trabajo cuantifica la fragmentación de material por el efecto del transporte en piques a escala de laboratorio (1 : 30). En los ensayos, se utilizó material granular de arcilla, principalmente por su baja resistencia. Los resultados obtenidos a través de estos ensayos se compararon con una base de datos de ensayos similares obtenidos con grava. Se realizó una caracterización general de los materiales y se obtuvo la distribución de tamaños de los fragmentos antes y después de los ensayos. Además, se evaluó un ajuste de un modelo de conminución.

Se determinó a través de los resultados de los ensayos que la fragmentación de las partículas aumenta a medida que la distancia recorrida por el material aumenta y que la abrasión fue la causa de fragmentación en ambos materiales, pero afectando en mayor grado al material granular de arcilla debido a su baja resistencia. Mecanismo identificado principalmente por la disminución de los tamaños característicos menores. Por ejemplo, el tamaño característico donde se encontró el 10 % de los fragmentos ( $d_{10}$ ) disminuyó de 5,12 mm a 1,84 mm para la arcilla y de 6,00 mm a 5,43 mm para la grava en los ensayos de 6 m. El material fino, cuya fracción de tamaño era inexistente previo a los ensayos, aumentó con la distancia recorrida. Finalmente, en el caso particular del material de arcilla, la redondez ( $R$ ) de los fragmentos aumentó hasta un 72,87 % y la esfericidad ( $S$ ) aumentó hasta un 13,10 % después de las pruebas.

En conclusión, la fragmentación depende de las características del material utilizado durante las pruebas. Existe mayor abrasión entre fragmentos más angulosos, debido a que estos van perdiendo sus bordes al fluir dentro de los piques y a medida que aumenta la distancia recorrida. Mientras que los fragmentos tienden a aumentar su redondez y esfericidad, lo que resulta en la estabilización del proceso de fragmentación.

## ABSTRACT

---

Mineral transportation between different levels is a key process in an underground mining operation. Ore passes are structures which are mainly used to transport and store fragmented rock. However, there is not much information regarding the rock fragmentation in an ore pass, which can be modified by long distance transportation producing considerable amount of fine material.

The effect of rock fragmentation through ore passes is quantified. A scaled model is used, at 1 : 30 ratio. Clay material was selected in tests because of its low strength. A general characterization of material was made to obtain the fragment sizes both before and after the tests. Additionally, a comminution model was analyzed to analyze the effect of material transportation. The results were then compared with the obtained results of the previous similar tests performed with gravel.

Analyses of the both materials showed that fragmentation increases when the traveled distance of the granular material increases, due to the abrasion between fragments. In the case of clay, this impact is even more considerable since it has lower strength. The fragmentation evaluation was performed by analyzing the size reduction on smaller characteristic sizes. For instance, the characteristic size for the fine fragments ( $d_{10}$ ), decreased from 5.12 mm to 1.84 mm for clay material, and from 6.00 mm to 5.43 mm for gravel material on 6 m of travel distance. Finer fragmentation, which was almost inexistent before the tests, increases with travel distance and, in the particular case of clay fragments, their roundness ( $R$ ) increased to 72,87 % and their sphericity ( $S$ ) increased to 13,10 % after tests were conducted.

In conclusion, fragmentation depends on the characteristics of materials used during the test. Effect of abrasion is higher between fragments with sharper edges, mostly because they diminish their edges as they flow inside the ore passes. As travel distance increases, particles tend to increase their roundness and sphericity, resulting in the stabilization of the fragmentation process.

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia.

Agradezco a los profesores que fueron parte de mi educación hasta ahora.

Agradezco a las personas que me ayudaron sin esperar nada a cambio.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.1.1. Objetivo General .....	2
1.1.2. Objetivos Específicos .....	2
1.2. Alcances .....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Piques de Traspaso .....	3
2.1.1. Factores de Diseño.....	3
2.1.2. Mecanismos de Construcción .....	5
2.1.3. Reforzamiento y Revestimiento .....	8
2.1.4. Problemas Operacionales .....	9
2.2. Flujo Gravitacional en Piques.....	12
2.2.1. Control de Flujo en Piques .....	14
2.3. Fragmentación en Material Granular .....	15
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	17
3.1. Elección de Materiales .....	17
3.1.1. Tipos de Materiales.....	17
3.1.2. Comparación en Costo.....	18
3.1.3. Comparación y Descarte de Materiales.....	18
3.2. Caracterización de Materiales .....	19
3.2.1. Densidad y Porosidad .....	19
3.2.2. Factor de Forma .....	22
3.2.3. Índice de Resistencia a la Carga Puntual .....	24
3.2.4. Ángulos de Fricción .....	26
3.2.5. Distribución Granulométrica y Coeficientes de Uniformidad y Curvatura .....	28
3.3. Descripción del Modelo .....	29
3.4. Procedimiento Experimental .....	30
3.4.1. Preparación de Materiales Antes de Ensayo .....	30
3.4.2. Generación de Curvas Granulométricas .....	32
3.4.3. Descripción de los Ensayos .....	33

4. MODELOS PREDICTIVOS DE FRAGMENTACIÓN DE MATERIAL GRANULAR .....	34
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	37
5.1. Caracterización del Material Tras el Flujo en Piques.....	37
5.1.1. Factor de Forma.....	37
5.1.2. Curvas Granulométricas.....	38
5.1.3. Coeficientes de Uniformidad y Curvatura .....	39
5.2. Efecto del Transporte en la Fragmentación.....	40
5.2.1. Generación de Material Fino .....	42
5.3. Modelo de Predicción .....	44
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
6.1. Conclusiones Generales.....	48
6.2. Recomendaciones.....	50
7. BIBLIOGRAFÍA .....	51
ANEXOS.....	54
Anexo A. Desarrollo Experimental.....	54
A.1. Descripción de Materiales.....	54
Anexo B. Caracterización de Materiales.....	55
B.1. Datos del Cálculo de la Densidad.....	55
B.2. Procedimientos Picnometría .....	56
B.3. Procedimiento Densidad Aparente .....	57
B.4. Ensayos de Carga Puntual.....	57
B.5. Ensayos de Corte Directo.....	60
Anexo C. Metodología Experimental .....	66
C.1 Datos Curvas de Distribución Inicial .....	66
C.2. Datos Granulometría Inicial.....	66
Anexo D. Modelo de Predicción .....	66
D.1. Detalle de las Funciones de Selección y de Quiebre.....	66
Anexo E. Resultados y Discusiones .....	67
E.1. Datos Factor de Forma.....	67
E.2. Datos Distribución de Tamaños .....	67
E.3. Datos Porcentaje de Fragmentación .....	68
E.4. Modelo de Fragmentación.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1. Pique de traspaso típico para un <i>LHD</i> [12].....	3
Figura 2.2. Estructura de un pique de traspaso con caja de quiebre. ....	4
Figura 2.3. Clasificación de métodos <i>raising</i> (disposición de accesos) [19].....	5
Figura 2.4. Clasificación de métodos <i>raising</i> (mecanismo de fragmentación) [19].....	5
Figura 2.5. Métodos <i>raising</i> convencional [19].....	6
Figura 2.6. Método <i>raising</i> con <i>Jora hoist</i> [19]. ....	6
Figura 2.7. Métodos <i>Blasthole Raising</i> [19]. ....	7
Figura 2.8. Método <i>Raise borer</i> [19]. ....	8
Figura 2.9. Gráfico, proporciones ( $D/d$ ) para el flujo en un pique de traspaso, varios autores [23].	10
Figura 2.10. Colgadura y arco cohesivo en piques [23]. ....	11
Figura 2.11. Degradación de piques con respecto al régimen estructural presente [14]. ....	12
Figura 2.12. Zonas de movimiento en piques [25].....	12
Figura 2.13. Comparación entre inclinación del pique y largo del <i>chute</i> [25]. ....	13
Figura 2.14. Comparación entre granulometría del material, inclinación y fricción del pique [25]..	13
Figura 2.15. Pique con cadenas de control [18].....	14
Figura 2.16. <i>Feeder</i> con cadenas [32].....	15
Figura 3.1. Principales etapas del proyecto. ....	17
Figura 3.2. Ejemplo medición de densidad por desplazamiento de líquido [35]. ....	20
Figura 3.3. Equipo picnometría. ....	21
Figura 3.4. Muestra con mediciones en Autocad.....	24
Figura 3.5. Ensayo de carga puntual [35].....	24
Figura 3.6. Configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos [38]. ....	25
Figura 3.7. Testigos posteriores a ensayos de carga puntual. ....	25
Figura 3.8. Equipo para el ensayo de corte directo. ....	27
Figura 3.9. Gráfico, esfuerzo normal y de corte (arcilla y grava). ....	27
Figura 3.10. Gráfico, dilatancia (arcilla y grava). ....	28
Figura 3.11. Modelo a escala de un pique de traspaso.....	30
Figura 3.12. Ladrillos húmedos y horno industrial.....	31
Figura 3.13. Chancador de mandíbulas y de cono. ....	31

Figura 3.14. Tamizadora (mallas #4, #8 y #16) y harnero. ....	32
Figura 3.15. Curvas granulométricas iniciales. ....	33
Figura 5.1. Curvas granulométricas para diferentes distancias de transporte (arcilla). ....	38
Figura 5.2. Curvas granulométricas para diferentes distancias de transporte (grava). ....	39
Figura 5.3. Gráfico, tamaños característicos en función de la distancia recorrida (grava). ....	41
Figura 5.4. Gráfico, tamaños característicos en función de la distancia recorrida (arcilla). ....	42
Figura 5.5. Gráfico, generación de material fino con respecto a la distancia recorrida. ....	43
Figura 5.6. Curva granulométrica ajustada, ensayo 1 m (arcilla). ....	44
Figura 5.7. Curva granulométrica ajustada, ensayo 1 m (grava). ....	44
Figura 5.8. Gráfico, tiempo de residencia en función a la distancia recorrida (arcilla). ....	46
Figura 5.9. Gráfico, tiempo de residencia en función a la distancia recorrida (grava). ....	46
Figura E.1. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 2 m (arcilla). ....	69
Figura E.2. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 3 m (arcilla). ....	69
Figura E.3. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 6 m (arcilla). ....	69
Figura E.4. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 2 m (grava). ....	70
Figura E.5. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 3 m (grava). ....	70
Figura E.6. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 6 m (grava). ....	70



## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1. Pautas para prevenir colgaduras en piques de traspaso de mineral [21].	10
Tabla 3.1. Comparación de materiales.	18
Tabla 3.2. Resumen de las características de los materiales.	19
Tabla 3.3. Intervalos de tamaño para las muestras de arcilla.	28
Tabla 5.1. Resultados esfericidad (arcilla).	37
Tabla 5.2. Resultados redondez (arcilla).	37
Tabla 5.3. Coeficientes de uniformidad y curvatura en cada ensayo (arcilla).	39
Tabla 5.4. Coeficientes de uniformidad y curvatura en cada ensayo (grava).	39
Tabla 5.5. Porcentaje de reducción de tamaño en diferentes distancias (grava).	41
Tabla 5.6. Porcentaje de reducción de tamaño en diferentes distancias (arcilla).	41
Tabla 5.7. Generación de fino en los ensayos (arcilla).	43
Tabla 5.8. Generación de fino en los ensayos (grava).	43
Tabla 5.9. Parámetros del modelo de fragmentación.	44
Tabla 5.10. Bondad de ajuste del modelo (arcilla).	45
Tabla 5.11. Bondad de ajuste del modelo (grava).	45
Tabla 5.12. Esfuerzo vertical y tiempo de residencia en función de la distancia recorrida (arcilla).	45
Tabla 5.13. Esfuerzo vertical y tiempo de residencia en función de la distancia recorrida (grava).	45
Tabla B.1. Datos de las pruebas del método por desplazamiento de líquido.	55
Tabla B.2. Datos obtenidos de los ensayos de carga puntual (arcilla).	59
Tabla B.3. Datos calculados de los ensayos de carga puntual (arcilla).	59
Tabla B.4. Datos obtenidos antes de los ensayos de carga puntual (grava).	59
Tabla B.5. Datos calculados de los ensayos de carga puntual (grava).	60
Tabla B.6. Datos obtenidos y calculados de los ensayos de corte (arcilla).	61
Tabla B.7. Datos obtenidos y calculados de los ensayos de corte (grava).	61
Tabla B.8. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 1 kg (arcilla).	62
Tabla B.9. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 5 kg (arcilla).	62
Tabla B.10. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 10 kg (arcilla).	63
Tabla B.11. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 5 kg (grava).	64
Tabla B.12. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 7 kg (grava).	64

Tabla B.13. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 17 kg (grava). .....	65
Tabla C.1. Datos curva de distribución inicial (grava). .....	66
Tabla C.2. Datos curva de distribución inicial (arcilla).....	66
Tabla C.3. Porcentaje y masa de grava inicial (ensayo 1 m). .....	66
Tabla C.4. Porcentaje y masa de arcilla inicial (ensayo 1 m).....	66
Tabla E.1. Datos del factor forma de muestras de grava.....	67
Tabla E.2. Distribución de tamaños de los ensayos (grava).....	67
Tabla E.3. Distribución de tamaños de los ensayos (arcilla). .....	68
Tabla E.4. Tamaño medio de los ensayos (grava). .....	68
Tabla E.5. Tamaño medio de los ensayos (arcilla). .....	68
Tabla E.6. Razón $P_i/F_i$ en función al tamaño característico y la distancia recorrida (grava). .....	68
Tabla E.7. Razón $P_i/F_i$ en función al tamaño característico y la distancia recorrida (arcilla). .....	68



# 1. INTRODUCCIÓN

---

La industria minera utiliza piques de traspaso para el transporte y almacenamiento de roca fragmentada mineral, estéril o relleno entre niveles. Estas estructuras son utilizadas en minería subterránea y de ellas depende la productividad de la mina, la selección de equipos y el diseño de otras estructuras mineras como bateas y puntos de extracción [1].

La implementación de métodos de explotación subterráneos ha ido aumentando debido al agotamiento de yacimientos de mineral superficiales. Por lo cual, los piques de traspaso de mineral cumplen un rol fundamental dentro del proceso de extracción por la necesidad de transporte de mineral entre niveles subterráneos

La extracción del mineral comienza desde la fragmentación de la roca in situ, para su posterior carga y transporte hacia las siguientes etapas de reducción de tamaño. Sin embargo, se desprecia el efecto de la fragmentación que genera el transporte y almacenamiento de mineral dentro de piques de traspaso donde puede ocurrir conminución autógena asociada al flujo de mineral [2]. Aunque en los piques de traspaso, los esfuerzos generados por el peso de la columna de mineral quebrado son menores en comparación a otros procesos, como en el caso de la extracción de la columna de mineral quebrado en un método de explotación *caving*, ocurre fragmentación producto de la interacción entre los fragmentos de roca o entre estos y las paredes del pique, siendo la abrasión el principal mecanismo de rotura bajo esfuerzos de cizalle bajos [3]. La fragmentación por abrasión ocurre cuando la energía aplicada sobre un fragmento es menor a su resistencia, pero es suficiente para romper sus discontinuidades o desgastar sus bordes. Por lo que un fragmento con bordes angulosos bajo flujo se rompe más fácilmente que uno cúbico o esférico, generando así material fino, fragmentación que aumenta con la distancia recorrida y el tiempo de residencia en el sistema, determinado por la tasa de extracción [1, 4, 5, 6].

La fragmentación de rocas en una distribución de tamaños será diferente para cada tamaño. Una roca de menor tamaño posee una mayor resistencia que una de mayor tamaño, lo que implica un bajo grado de fragmentación para diferentes esfuerzos de campo [7, 8]. Por otro lado, cuando hay presencia de material fino en una distribución, este pasa a través de los fragmentos más grandes

acumulándose en el fondo, amortiguando los fragmentos mayores y por ende aumentando los puntos de contacto entre gruesos y finos. Esto, evita la concentración de altos esfuerzos en las rocas, por lo que la concentración de esfuerzos disminuye en materiales menos porosos [1, 3, 9, 10].

Por estas razones se propone en este trabajo cuantificar la fragmentación por el efecto del transporte de material granular en piques de traspaso, a través de la utilización de piques a escala de laboratorio.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo General

Determinar la fragmentación producida por la distancia recorrida de materiales granulares en piques de traspaso en un modelo a escala de laboratorio.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

1. Revisar y analizar la base de datos disponible de ensayos de laboratorio previos realizados con material granular de grava [11].
2. Seleccionar un material de resistencia media a baja para los ensayos de laboratorio.
3. Cuantificar la fragmentación generada por el efecto de la distancia del transporte de los materiales granulares a escala de laboratorio (1 : 30).
4. Analizar el efecto de las características de los materiales en la fragmentación.
5. Ajustar un modelo de conminución.

## 1.2. ALCANCES

Este estudio se centra en la cuantificación de la fragmentación producto del flujo de material de arcilla y grava en piques de traspaso a escala de laboratorio a través del tamizado y la generación de la distribución granulométrica del material. Por lo cual, se debe considerar que los materiales utilizados no poseen las características propias de las rocas de mineral explotable. Además, no se considera presencia de agua, ni se cuantificó el efecto de los esfuerzos producidos por el material en las diferentes alturas de la columna de material en los ensayos.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Piques de Traspaso

Los piques de traspaso o chimeneas son excavaciones, utilizados principalmente para el transporte por flujo gravitacional de roca fragmentada (mineral, estéril o relleno) de un nivel a otro en minas subterráneas. A su vez, estos son utilizados para almacenar material, siendo un aspecto esencial para la operación eficiente de una mina [12]. En la Figura 2.1 se puede apreciar un pique de traspaso de mineral típico para equipos cargadores de transporte y descarga (LHD).

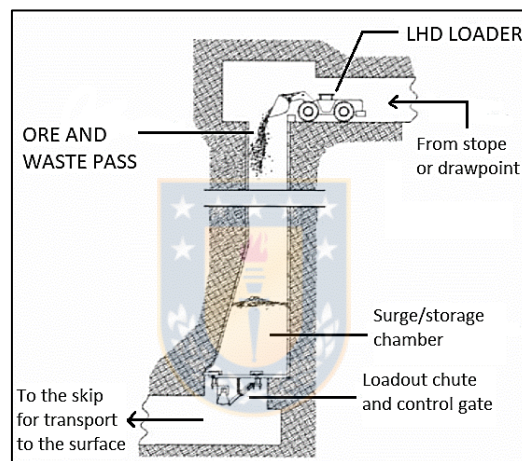


Figura 2.1. Pique de traspaso típico para un LHD [12].

#### 2.1.1. Factores de Diseño

El diseño de los piques de traspaso de mineral no solo depende de la cantidad de material que se requiere transportar o almacenar, sino que además se debe considerar las propiedades de la roca fragmentada que fluirá en él y las condiciones del macizo rocoso. Debido a que estas características determinan las dimensiones de un pique de traspaso que podrá operar correctamente.

La longitud de un pique de traspaso depende de la distancia vertical entre el o los niveles de extracción y el nivel común de transporte de mineral. Se pueden construir con una o más secciones dependiendo del método de excavación a utilizar [13]. Usualmente, las secciones excavadas por *Drop raising* o *Conventional raising* son más cortas que las construidas por *Alimak* o *Raise bored* [14]. Su longitud varía entre 18 m y sobre 180 m, con un promedio de 46 m [12]. Sin embargo, en las

minas de Quebec y Ontario, tienen un valor promedio de 87 m y 108 m respectivamente [14]. Mientras que para la mina subterránea Codelco División El Teniente, se utilizan piques en el sector Nuevo Nivel Mina de 54 m y en Codelco División Andina, en la cual se utiliza un Nivel de Reducción entre los niveles de producción y de transporte, la longitud es de los piques es de 25 m [15, 16].

La inclinación de los piques de traspaso cumple la función de facilitar el flujo de material o disminuir su velocidad, principalmente para reducir el impacto en su base generado por la descarga de material. En algunos casos se introduce un *dogleg* o una caja de quiebre en su parte inferior para reducir este efecto (ejemplo en la Figura 2.2). La inclinación típica varía de  $90^\circ$  a  $30^\circ$  y generalmente es mayor a  $60^\circ$  [12, 13]. En las operaciones de Quebec varía entre  $45^\circ$  a  $90^\circ$ , con un promedio de  $70^\circ$ . Mientras que en las de Ontario se favorecen los piques escarpados ( $80^\circ \pm 8,3^\circ$ ) [14].

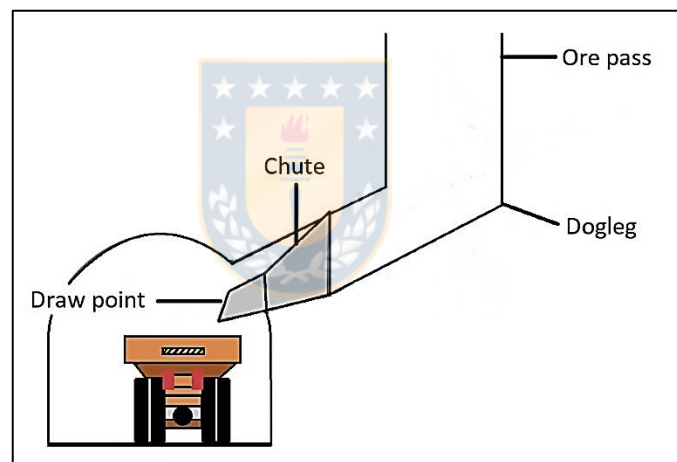


Figura 2.2. Estructura de un pique de traspaso con caja de quiebre.

Finalmente, la forma y dimensión de la sección transversal de un pique dependen del método de excavación. Por ejemplo, *Raise boring* produce formas circulares, las cuales se recomiendan para evitar problemas de estabilidad por altos esfuerzos en el macizo rocoso, mientras que *Alimak*, *Drop raising* y *Conventional raising* normalmente excavan con forma cuadrada o rectangular [13]. Peele [17] indicó que el área de la sección transversal era generalmente menor a  $5,6 \text{ m}^2$ . Sin embargo, el tamaño de un pique depende de la distribución de tamaños del mineral, las características del macizo rocoso y la capacidad requerida. Además, este debe asegurar el libre flujo de material, a través de la utilización de pautas empíricas que se detallan en las siguientes secciones.

### 2.1.2. Mecanismos de Construcción

Los piques de traspaso se construyen utilizando métodos de excavación como *Raise boring machine*, *Drop raising*, *Alimak raising* o *Pilot raising-slashing*. Sin embargo, para la elección del método se consideran factores como la geometría de la excavación requerida, la disponibilidad de accesos o la estabilidad de la roca [13, 18, 19]. Las técnicas *raising*, según su conducción, se pueden clasificar como *Blind raises*, las cuales requieren de solo un nivel de acceso y las que tienen dos niveles de acceso disponibles que se buscan conectar. Otra clasificación es por el uso o no de explosivos en su excavación. Clasificaciones que se presentan en las figuras 2.3 y 2.4.

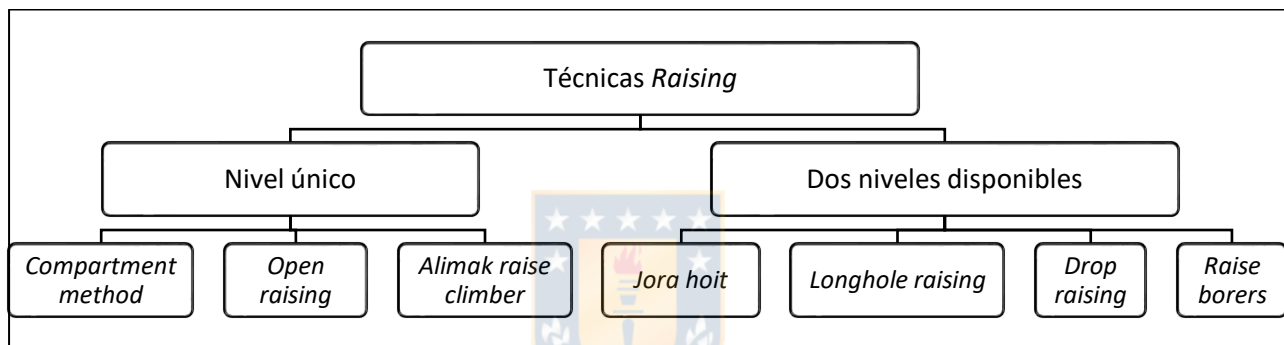


Figura 2.3. Clasificación de métodos raising (disposición de accesos) [19].

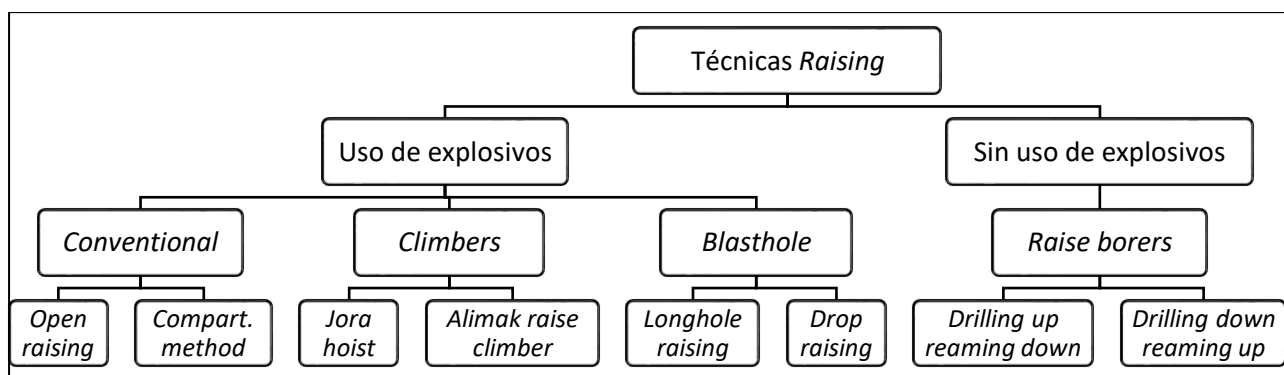


Figura 2.4. Clasificación de métodos raising (mecanismo de fragmentación) [19].

**Métodos Raising Convencional.** Existen dos métodos de *Raising* convencional, estos son *Open raising* y *Compartment raising*, el primero es un método antiguo y sencillo para conducir ascensos no mayores a 10 m y en terreno competente. Mientras que el método *Compartment raising* es una mejora del *Open raising*, consiste en dividir el ascenso en dos compartimientos, uno de ellos para el acceso de personas, líneas de servicio de agua, aire comprimido, conductos de ventilación, *pulley*

*block*, y escaleras. Mientras que el otro se utiliza para acomodar la roca volada. El método es lento y tedioso, pero permite ascensos de longitudes largas. En la Figura 2.5 se muestran estos métodos.

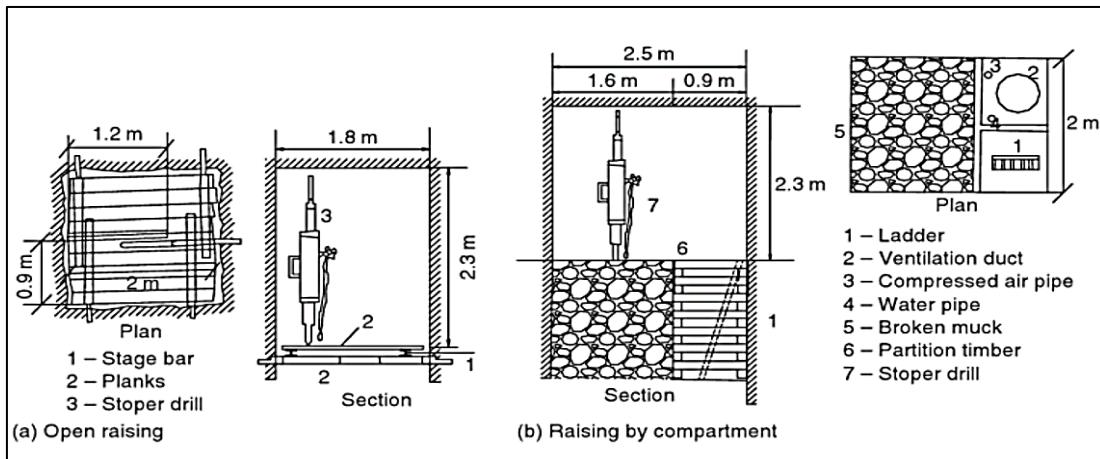


Figura 2.5. Métodos raising convencional [19].

**Métodos Raising con Climbers.** El método *Jora hoist* consiste en suspender una jaula con una cuerda de acero desde un nivel superior y utilizar perforación y voladura para ascender. Esta técnica es considerada lenta y se pueden generar daños en la cuerda tras la voladura, aparte de requerir un taladro de gran capacidad para perforar el diámetro central. Por estas razones se suspendió esta técnica cuando *Alimak climber* se comenzó a utilizar. Ejemplo del método *Jora hoist* en Figura 2.6.

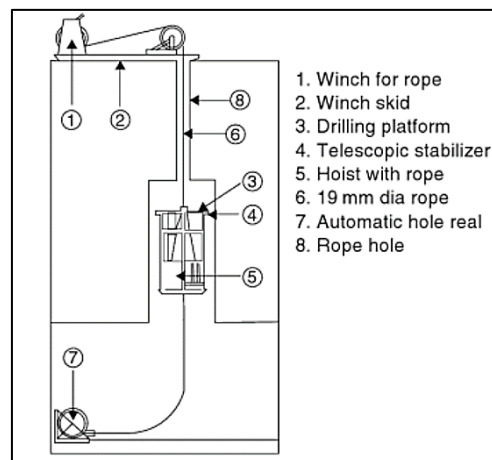


Figura 2.6. Método raising con Jora hoist [19].



La técnica *Alimak raise climber* hace posible conducir excavaciones largas, verticales o inclinadas, rectas o curvas y en su mayoría de formar rectangular. En esta técnica, los operadores ascienden en la jaula por lo que las exigencias de seguridad son altas.

**Métodos *Blasthole Raising*.** El método *Long-hole raising* consiste en la perforación de pozos paralelos largos en un patrón de fuego o *burn cut*, desde un nivel superior a uno inferior. Una vez terminada la perforación, la voladura se realiza en etapas del nivel inferior al superior. La técnica *Drop Raising* es la versión mejorada de la técnica *Long-hole raising* en la cual se utilizan grandes diámetros y pozos más largos para conducir el ascenso. Esta técnica es utilizada tanto en operaciones de voladura subterránea como superficial. En la Figura 2.7 se presentan los métodos *Long-hole raising* y *Drop raising*.

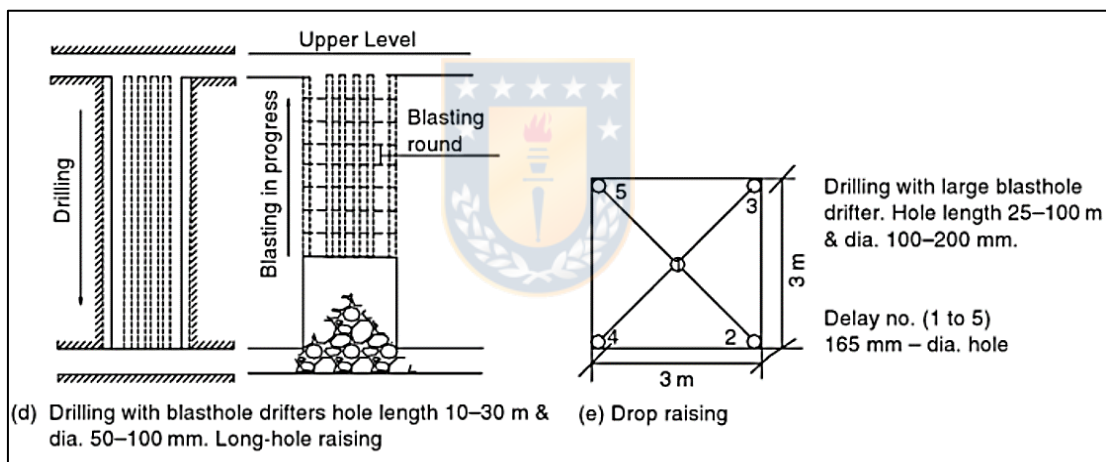


Figura 2.7. Métodos *Blasthole Raising* [19].

**Raise Borer.** Este método utiliza una máquina que puede perforar un orificio piloto de 225 mm a 250 mm de diámetro para ingresar a un nivel inferior, luego se instala una broca de gran tamaño en la parte inferior de la barra de perforación y se escarea al diámetro deseado hasta el nivel superior. En caso de una desviación, el pozo piloto puede ser abandonado. Sin embargo, estas máquinas están disponibles para conducir de cualquier manera. En la Figura 2.8 se puede apreciar este método.

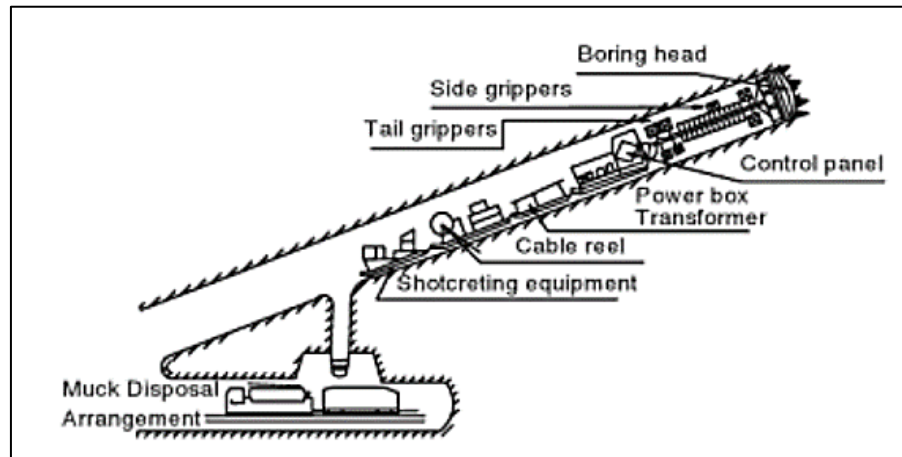


Figura 2.8. Método Raise borer [19].

En las minas subterráneas de Quebec, predominó el uso de la técnica *Alimak raising*, la cual se utilizó para construir el 63 % de los piques de traspaso de mineral. Este predominio de *Alimak* sobre *Raise borer*, Convencional o *Drop raising* se atribuye principalmente a que este método garantiza un grado razonable de seguridad para los mineros, al tiempo que permite la instalación de soporte, además de la capacidad de conducir el ascenso desde solo un acceso. Sin embargo, en las minas de Ontario la técnica *Raise borer* se utilizó para la excavación del 30 % de las secciones de pique para evitar las perturbaciones generadas por el uso de explosivos [14].

### 2.1.3. Reforzamiento y Revestimiento

**Reforzamiento.** El soporte utilizado en las paredes de las excavaciones normalmente se proporciona a medida que esta avanza. Se instala de manera convencional y generalmente consiste en *Friction bolts* y *Fully grouted fiberglass rock bolts* que se usan para mantener la integridad de las paredes. Se debe considerar que las dimensiones del pique deben ser suficientes para permitir su instalación. En algunos casos, se instala un revestimiento final y cualquier soporte de suelo adicional como una operación separada [18].

En las minas de Quebec, la mayoría de las excavaciones verticales o inclinadas se construyeron con *Alimak*, lo que facilitó la instalación de refuerzos y soporte tipo *Resin-grouted rebar* y *Resin grouted short cable bolts* o se utilizó pernos de cable corto con resina para disipar el impacto de choque generado por el material [14].

**Revestimiento.** Se usan para evitar el deterioro de la pared por la abrasión causada por el flujo del material. Los métodos de revestimiento más comunes empleados en las minas modernas son el *Cast-in-place concrete*, *Shotcrete* y *Groted/concreted steel lining*. Cuando se utilizan revestimientos de acero, estos también pueden actuar como encofrado exterior para el vertido de concreto.

Hadjigeorgiou y Lessard [14] utilizaron el sistema  $Q$  de Barton et al. [20] para cuantificar la calidad del macizo rocoso. Tras investigaciones en piques de minas en Quebec, se determinó que no hay incidencia de falla en ninguna sección que tenga un valor de  $Q$  mayor a 5, por ello se sugiere que los revestimientos se deben considerar para las condiciones del terreno donde  $Q$  es menor a 5.

#### 2.1.4. Problemas Operacionales

El diseño de los piques de traspaso de mineral requiere que el mineral quebrado fluya cuando este se extrae. El proceso es impulsado por la gravedad y resistido por la fricción y la cohesión. El material, tiene propiedades que deben ser consideradas en el diseño de un pique para garantizar flujo y estabilidad y así evitar problemas operacionales como los definidos a continuación.

**Colgaduras y Bloqueos.** Una colgadura se define como el impedimento del flujo en el llenado o en la zona de tránsito de un pique mientras que un bloqueo se localiza en la zona de descarga. La zona de descarga de un pique generalmente conduce a algún tipo de infraestructura de control de flujo, como cadenas de control o *chutes*, los cuales se caracterizan por una geometría modificada y por producir un cambio en la dirección del flujo, por lo que la mayoría de los problemas de flujo están cerca del área del *chute*.

Autores como Hambley et al. [21], Stacey y Erasmus [22] asumen que el riesgo de que se generen colgaduras debido al arqueado de roca es una función del tamaño del pique con respecto al tamaño de roca transportada. Una revisión de la literatura que incluye referencias de operaciones industriales que manejan materiales a granel y experimentos con modelos de laboratorio, indican que existen proporciones de diámetro del pique de traspaso de mineral para el diámetro máximo de fragmento que aseguran el flujo, estas se presentan en el gráfico de la Figura 2.9 [12, 23].

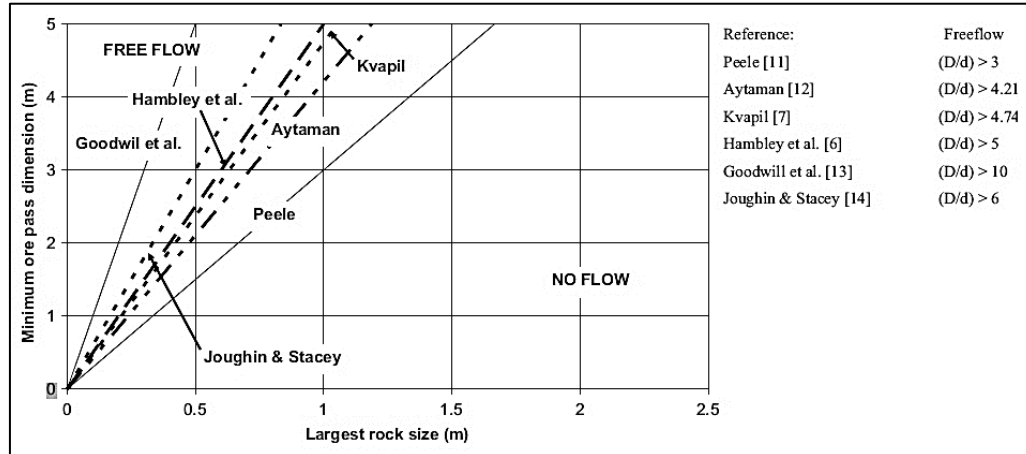


Figura 2.9. Gráfico, proporciones  $(D/d)$  para el flujo en un pique de traspaso, varios autores [23].

Hambley et al. [21] determinan la frecuencia y probabilidad de que se formen arcos de roca con respecto a esta proporción, como se muestra en la Tabla 2.1. Sin embargo, Hustrulid y Changshou [24] indican que estas relaciones son conservadoras por lo que se recomienda considerar la distribución de tamaños y las condiciones de las paredes en el diseño, lo que generalmente disminuirá las proporciones  $D/d$ .

Tabla 2.1. Pautas para prevenir colgaduras en piques de traspaso de mineral [21].

Razón de las dimensiones del pique ( $D$ ) y fragmento ( $d$ )	Frecuencia relativa de colgaduras	Probabilidad de flujo
$D/d > 5$	Muy baja	Alta
$3 < D/d < 5$	A menudo	Variable
$D/d < 3$	Muy alta	Nula o muy baja

La distribución tamaños y forma de los fragmentos afectan la probabilidad de que se generen colgaduras o bloqueos. Tras simulaciones numéricas realizadas en *PFC 3D* [23], se concluyó que para formas cúbicas se necesita una mayor dimensión de la abertura del pique que para formas esféricas. Mientras que, si hay rocas de gran tamaño, la probabilidad de colgadura es mayor. Requiriendo parrillas tipo *grizzly*, *scalper* o *mantles* para limitar el tamaño de la roca que ingresa al pique.

**Arcos Cohesivos.** La causa suele ser la cohesión de la fracción fina del mineral en un pique. Para esto se requiere que el material tenga una proporción importante de finos, los cuales tienen la capacidad de consolidarse con la presencia de agua. Los finos se definen como material con un

tamaño inferior a 0,07 mm. Sin embargo, la proporción y tamaño de fino está en discusión, por ejemplo, Kvapil [25] sugiere que se requiere una cantidad mayor al 10 % del material, mientras que Beus et al. [12] sugieren que es el 20 %, Jenike [26] propone que los finos tienen un tamaño menor 0,25 mm y que el porcentaje de finos debe ser mayor al 10 % y Mogi et al. [27] indicaron que el fino puede tener hasta 20 mm. Ejemplos de una colgadura y de un arco cohesivo en la Figura 2.10.

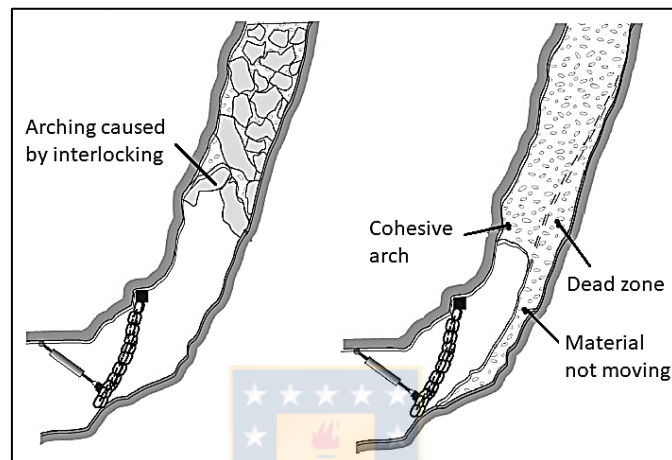


Figura 2.10. Colgadura y arco cohesivo en piques [23].

**Piping o Rat-holing.** Se produce cuando el material cohesivo forma un canal estrecho estable en las paredes del pique, que reduce el área de su sección transversal. Es estable siempre que el peso del material en la parte superior no supere la resistencia a la compresión de la parte inferior, por lo tanto, si la altura de material es suficiente, el *rathole* fallará por su propio peso [12].

**Degradación de Paredes.** Producido generalmente por la interacción entre el material que fluye en un pique de traspaso y sus paredes. Hadigeorgiou y Lessard [23] indican que existe relación entre el peso unitario del material y el grado de degradación de las paredes, aumentando la degradación a medida que el peso unitario aumenta. Morrison y Kazakidis [28] indican que las fallas estructurales de los piques son producto del flujo y el impacto de la roca con las paredes, de los altos esfuerzos, de la abrasión y el daño causado por los métodos de liberación de colgaduras. Mientras que Stacey y Swart [29] han reconocido la importancia de construir los piques en contra de la estratificación del macizo rocoso, debido a que los piques construidos a lo largo de la estratificación experimentan una severa degradación de sus paredes, como se puede ejemplificar en la Figura 2.11.

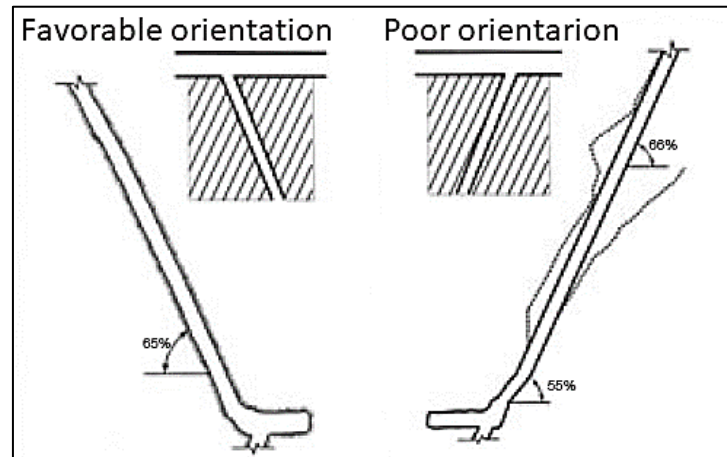


Figura 2.11. Degradación de piques con respecto al régimen estructural presente [14].

## 2.2. FLUJO GRAVITACIONAL EN PIQUES

El flujo gravitacional en los piques de traspaso de mineral se genera a partir de la descarga del material en su fondo. Dentro de un pique se logran distinguir tres zonas de movimiento [25], la Zona I o zona de descarga, la Zona II o de transición, denominada así debido al aumento de la uniformidad del movimiento y la Zona III o de hundimiento uniforme, donde el movimiento es uniforme en toda la sección transversal. Las diferentes zonas de movimiento muestran en la Figura 2.12 (c), mientras que en (a) y (b) se aprecia la distribución de la tasa de flujo del material en secciones horizontales.

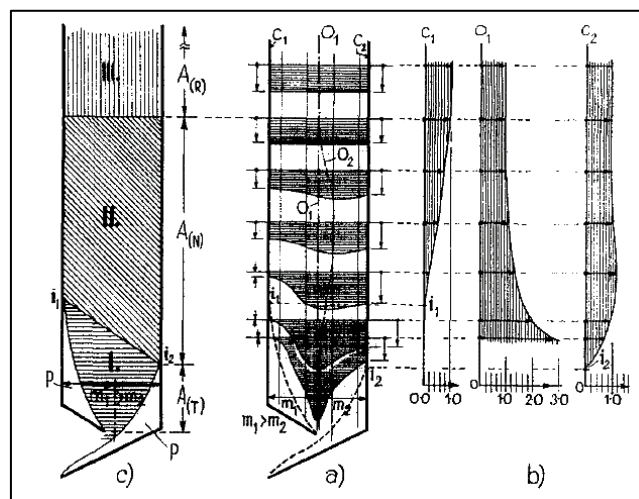


Figura 2.12. Zonas de movimiento en piques [25].

Las zonas pasivas son zonas sin movimiento de material que se generan al descargar un pique. Estas disminuyen a medida que el ángulo de inclinación y la tasa de extracción aumentan, pero aumentan si el largo del *chute* aumenta. Dicho comportamiento se ilustra en la Figura 2.13.

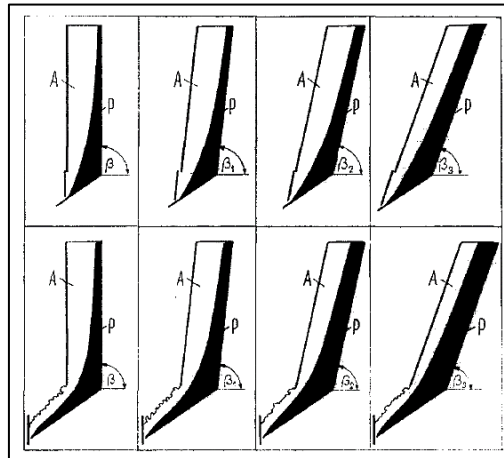


Figura 2.13. Comparación entre inclinación del pique y largo del chute [25].

O'Toole [30] indicó que en un material granular bien graduado, los fragmentos más pequeños se empaquetan en los espacios que quedan entre los más grandes. Por lo tanto, el potencial de compactación y arqueo es más frecuente. Mientras que se necesita de una inclinación mayor para piques con fricción apreciable en sus paredes [25]. Comparación que se ejemplifica en la Figura 2.14.

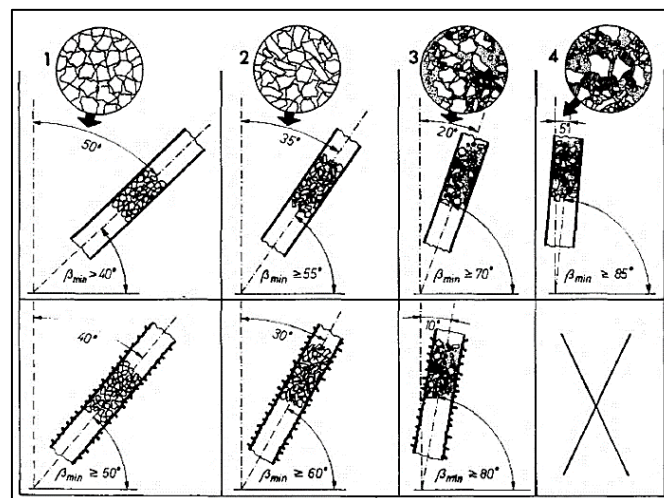


Figura 2.14. Comparación entre granulometría del material, inclinación y fricción del pique [25].

### 2.2.1. Control de Flujo en Piques

Es de suma importancia tener operativos los piques de traspaso de mineral de una mina, evitando problemas en el flujo de mineral. Para esto, se debe controlar tanto la carga como la descarga de un pique.

Stacey y Erasmus [22] advierten las ventajas y desventajas de operar un pique de traspaso de mineral a *choke-fed*, producido cuando se descarga el mineral a un pique que contiene mineral contantemente, frente a la caída libre del mineral, generada cuando el pique está vacío. Se destaca que al operar con *choke-fed* es probable que aumente el riesgo de interrupciones debido a colgaduras y arcos cohesivos, mientras que el riesgo de desgaste por impacto se reduce [31]. Por otro lado, para una obtener una buena descarga de un pique de traspaso se utilizan estructuras de control de flujo, las cuales se detallan a continuación.

Comúnmente se utilizan *chutes* con compuertas de choque, *chutes* con cadenas de control o *chutes* con ambas [14]. Las compuertas de choque son estructuras formada por una corredera con una puerta de acero que detiene el flujo del mineral cuando es accionado por cilindros hidráulicos. Mientras que las cadenas de control son cadenas dispuestas consecutivamente en forma de cortina, suspendidas del *chute* o de una porta cadenas, accionadas por cilindros hidráulicos que regulan el flujo de mineral de un pique de traspaso gracias a su peso. En la Figura 2.15 se puede apreciar la estructura de un pique de traspaso con cadenas de control.

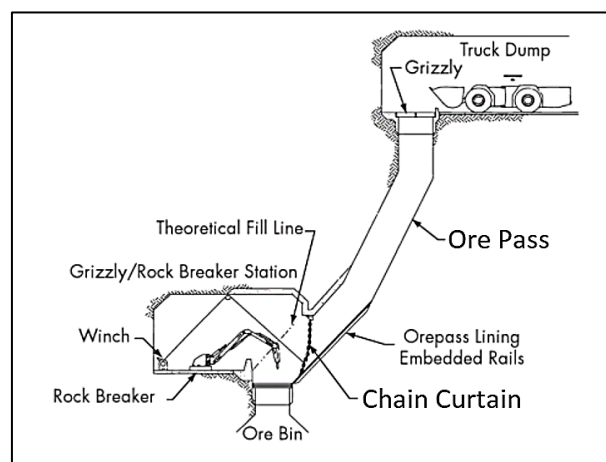


Figura 2.15. Pique con cadenas de control [18].



Además, se puede utilizar un *Feeder* que es un *chute* que posee un ángulo de inclinación mayor al ángulo de reposo del material, el cual restringe y restaura el flujo a través de un conjunto de cadenas suspendidas desde el chute, cuando estas se giran [32]. Representado en la Figura 2.16.

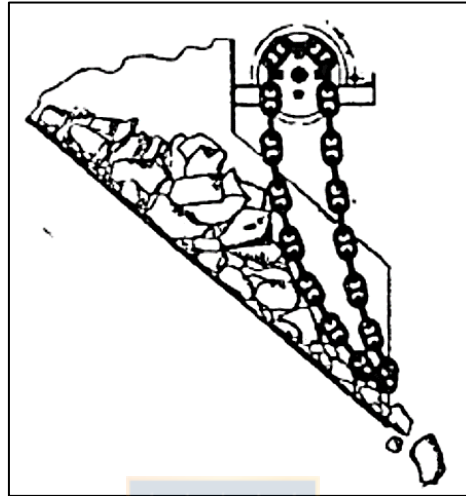


Figura 2.16. Feeder con cadenas [32].

### 2.3. FRAGMENTACIÓN EN MATERIAL GRANULAR

La generación de finos es uno de los problemas más significativos de la fragmentación producida en los piques de traspaso por el flujo de mineral. Tras las investigaciones de Bunker y Campbell et al. [31], se ratificó que se generó fragmentación secundaria por el flujo, debido a que la distribución de tamaños del mineral antes del ingreso a los piques era relativamente uniforme, mientras que después del transporte y descarga, el tamaño de las rocas se redujo significativamente.

La fragmentación secundaria en minería subterránea se origina comúnmente dentro del *caving*, la cual se atribuye a una combinación entre la fragmentación de las rocas sometidas a altos esfuerzos de compresión y cizalle producto del peso de la columna de material quebrado y el redondeo generado por la abrasión entre rocas producido por los bajos esfuerzos de cizalle generados cuando los fragmentos de roca se transportan desde el *cave back* hasta los puntos de extracción [3]. Sin embargo, la fragmentación secundaria también puede resultar del impacto generado por la interacción de los fragmentos de roca en un pique de traspaso.

Diferentes autores sugieren las razones por las cuales se genera fragmentación secundaria. Marsal [33] afirmó que el factor más importante que afecta tanto a la resistencia al corte como a la compresibilidad es la fragmentación que sufren los materiales granulares cuando se les somete a cambios en su estado de esfuerzos. Bridgwater et al. [34] indicaron que las condiciones necesarias para llevar a cabo una sola falla microscópica ocurren con menor frecuencia a esfuerzos bajos, sin embargo, se produce un redondeo de las esquinas de los fragmentos debido a una abrasión local. Además de comprobar que, sobre un rango de relaciones de aspecto, el material granular es insensible a la fragmentación bajo cizalle. Sin embargo, Pierce [3] concluyó de sus pruebas de compresión de laboratorio, que existe una correlación positiva entre la relación de aspecto y el potencial de fractura bajo compresión. La angularidad de los fragmentos aumenta el potencial de quiebre y redondeo bajo compresión. Los materiales de tamaño uniforme son más susceptibles al quiebre que los materiales bien graduados tanto por compresión como por cizallamiento, producto a la influencia del número de coordinación y que los materiales con una menor porosidad inicial se fracturan en menor cantidad bajo compresión debido a que las fuerzas se distribuyen entre un mayor número de fragmentos, lo que disminuye los esfuerzos de tracción generados.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este estudio de investigación se basó principalmente en el análisis de la fragmentación de distintos materiales granulares, la cual se genera cuando las partículas de material fluyen a través de una sección circular vertical de distintas longitudes, emulando piques de traspaso de mineral a escala 1 : 30.

Las etapas del desarrollo experimental se definieron a través de una Carta Gantt, en la cual se identificaron las principales actividades con sus respectivas fechas de inicio y término. En la Figura 3.1 se presentan las principales etapas realizadas en este trabajo de investigación.

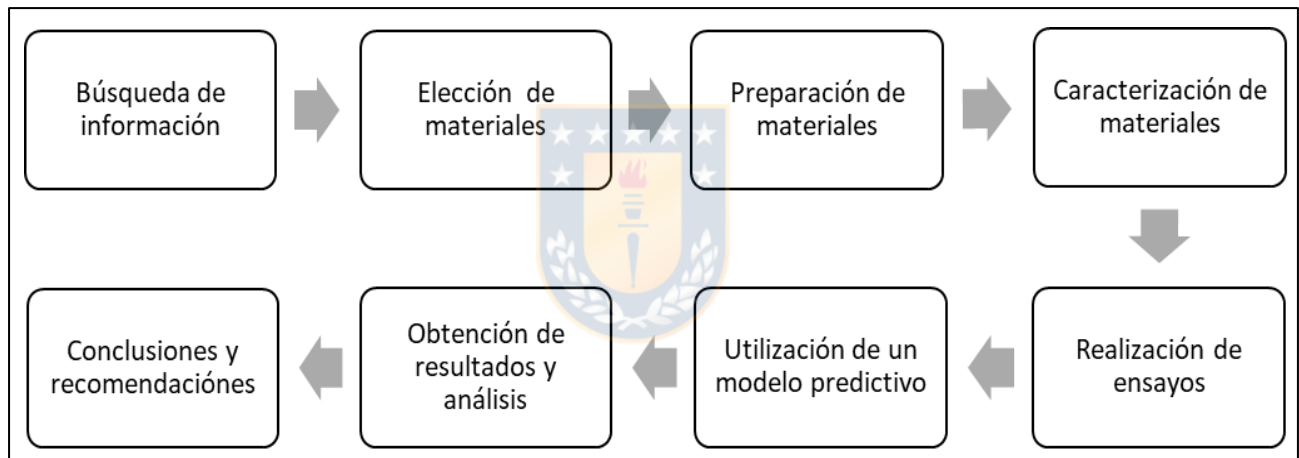


Figura 3.1. Principales etapas del proyecto.

#### 3.1. ELECCIÓN DE MATERIALES

Con la finalidad de evaluar los posibles materiales a utilizar en los ensayos de fragmentación en piques de traspaso a escala de laboratorio, se realizó una comparación de distintos materiales. Se consideró su comportamiento físico, génesis, disponibilidad local y costo.

##### 3.1.1. Tipos de Materiales

Por disponibilidad se consideró la utilización de áridos y materiales de construcción. Los áridos son materiales granulados que se utilizan como materia prima para la construcción, los cuales se caracterizan por su estabilidad química y resistencia mecánica. Las rocas de las que se extraen áridos naturales son arenas y gravas, rocas calcáreas sedimentarias como la caliza y dolomía y rocas ígneas

y metamórficas como el cuarzo, el granito, el basalto y la cuarcita. Por otro lado, los materiales de construcción son productos elaborados, empleados en la construcción de edificios u obras de ingeniería civil. Se analizaron materiales como ladrillos de arcilla, adoquines y pastelones de hormigón. Materiales que se describen con detalle en el Anexo A.1.

### 3.1.2. Comparación en Costo

En primer lugar, se realizó el cálculo del volumen de cada pique a escala para llenarlo con el material granular. Debido a que se requirió de dos pruebas por ensayo, el volumen de cada pique se multiplicó por dos y se sumaron sus valores, por lo cual se obtuvo un volumen total de 0,684 m<sup>3</sup>. Se asumió un esponjamiento de 50 % tras el chancado para los materiales de cuarzo, arcilla y hormigón y se calculó con ese valor el volumen del material requerido. En la Tabla 3.1 se puede apreciar la comparación entre materiales, destacando el costo, obtenido a través de la cantidad de material requerida para los ensayos según su formato de venta.

*Tabla 3.1. Comparación de materiales.*

Material	Cuarzo	Ladrillo de arcilla	Adoquín de hormigón	Pastelón de hormigón
Formato de venta	Saco	Unidad	Unidad	Unidad
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0,0142	0,0030	0,0018	0,0096
Cantidad requerida	48	229	380	71
Costo [CLP]	468.500	34.300	72.200	84.800

### 3.1.3. Comparación y Descarte de Materiales

Debido a que anteriormente se realizaron ensayos con material granular de grava, para fines de esta investigación se requirieron materiales menos resistentes que este, por lo cual se descartó el cuarzo, considerando además su elevado costo. Materiales como caliza y dolomita, eran una buena alternativa por su baja dureza, sin embargo, estos no son de venta común en la localidad por lo que se debe cotizar a empresas dedicadas a su explotación o venta. Mientras que el granito, la cuarcita y el basalto, están compuestos por minerales densos y duros, por lo que no se espera una fragmentación considerable de los clastos.

El ladrillo de arcilla fue la alternativa menos costosa en comparación a los demás materiales evaluados y por su baja resistencia a la flexión, este puede generar mayor fragmentación en los ensayos, aunque debido a su composición, podría provocar exceso de material fino y polvo. El

hormigón al igual que el ladrillo de arcilla tiene poca resistencia a la flexión, sin embargo, el costo económico es mayor. Aunque se requieren menos pastelones que bloques de adoquín, la inversión en pastelones es mayor, aunque esta diferencia no es considerable. Además, se espera que, debido a su composición y mayor resistencia a la tracción, este no genere una gran cantidad de polvo.

Finalmente, se seleccionó el material de arcilla proveniente de los ladrillos, por las razones ya mencionadas y debido a que se espera, este genere un desplazamiento mayor (a tamaños de fragmento menor) en su curva granulométrica que la grava extraída de una cantera local.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los materiales granulares de arcilla y grava se caracterizaron antes y después de los ensayos de fragmentación por flujo. Se determinaron parámetros que permitieron comparar sus propiedades. Los cuales se presentan en la Tabla 3.2 y se detallan en las siguientes secciones.

*Tabla 3.2. Resumen de las características de los materiales.*

Parámetro	Arcilla	Grava
Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$2.593 \pm 25$	$2.670 \pm 22$
Densidad aparente [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1.158	1.520
Porosidad [%]	55,34	43,07
Esfericidad ( <i>S</i> )	0,60	0,50
Redondez ( <i>R</i> )	0,21	0,70
Índice de resistencia a la carga puntual ( $I_{S50}$ ) [MPa]	$0,26 \pm 0,04$	$11,24 \pm 2,85$
Ángulo de fricción con paredes [°]	25	31
Ángulo de fricción interno [°]	44,39	37,89
Coeficiente de uniformidad inicial ( $C_u$ )	1,74	2,48
Coeficiente de curvatura inicial ( $C_z$ )	0,85	1,12

#### 3.2.1. Densidad y Porosidad

**Densidad.** La densidad es una propiedad física de la materia y esta puede presentarse en cualquiera de los estados. Es una magnitud que mide la cantidad de materia contenida en la unidad de volumen de un sistema. La densidad es una propiedad intensiva, por lo cual cada sustancia presenta una densidad determinada, independiente de la cantidad de materia. Mientras que las unidades en el Sistema Internacional (S.I.) son  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Se utilizaron dos métodos para calcular la densidad del material granular de grava y arcilla, los cuales se desarrollan a continuación.

**Desplazamiento de Líquido.** Este método consiste en llenar una probeta con un volumen exacto de agua, a la cual se le introduce un sólido. Luego se obtiene el volumen final, teniendo la precaución de que no halla burbujas de aire y que el material esté totalmente sumergido. Hay que tener presente que el líquido utilizado no debe reaccionar con el sólido. El volumen del sólido corresponde a la diferencia entre el volumen inicial y el final. Así, la densidad se obtiene a partir de la Ecuación 1.

$$\rho_s = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (1)$$

Donde,  $\rho_s$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ,  $m$  es la masa del sólido en kg,  $V_f$  es el volumen final en  $\text{m}^3$  y  $V_i$  es el volumen inicial en  $\text{m}^3$ .

Para determinar la densidad de la grava, se utilizó este método debido a que las muestras eran irregulares. El procedimiento consistió en tomar 8 conjuntos de muestras de grava elegidos al azar de un contenedor, los cuales se masaron con una balanza cuya precisión fue de  $\pm 0,01$  g. Los datos obtenidos y resultados se presentan en el Anexo B.1. La densidad se determinó utilizando la Ecuación 1. Obteniendo como resultado una densidad promedio de  $2.670 \pm 48 \text{ kg/m}^3$ . Ejemplos de las pruebas de desplazamiento de líquido se muestran en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Ejemplo medición de densidad por desplazamiento de líquido [35].

**Picnometría.** Es un método que permite determinar la densidad relativa de una muestra respecto de un material de referencia. Esto se logra comparando la masa de un volumen de muestra con la masa del mismo volumen del material de referencia. Para la prueba se requiere principalmente de un picnómetro y un desecador. El picnómetro es un frasco de vidrio con cuello estrecho de volumen conocido que posee una tapa biselada con un capilar. El desecador es un gran recipiente de vidrio con una tapa ajustada, su borde es esmerilado y su tapa permite que el recipiente este herméticamente cerrado. Siendo su principal función, mantener limpia y deshidratada una sustancia por medio del vacío. Ejemplo de ambos en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Equipo picnometría.

Según la Norma ASTM D854 (determinación de la gravedad específica de partículas sólidas) [36], se realizaron las pruebas para obtener la densidad del material, procedimientos que se detallan en el Anexo B.2. Donde se calculó la densidad del sólido utilizando la Ecuación 2.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

Donde,  $\rho_s$  es la densidad del sólido en  $\text{kg/m}^3$ ,  $M_s$  es la masa del sólido en kg, mientras que  $V_s$  es el volumen del sólido en  $\text{m}^3$ .

Se realizaron 3 pruebas, de las cuales se obtuvo el volumen del picnómetro igual a 49,8 mL y la densidad promedio del material de arcilla igual a  $2.593 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ .

**Densidad Aparente o a Granel.** La densidad aparente de un material o de un suelo, es la relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo huecos y poros de este.

La densidad aparente de los materiales, tanto para el material granular de grava como el de arcilla, se determinó pesando una muestra y vertiéndola en una probeta, midiendo el volumen total ocupado. El procedimiento se detalla en el Anexo B.3. Obteniendo como resultado una densidad aparente del material granular de grava igual a  $1.520 \text{ kg/m}^3$  y una densidad aparente del material granular de arcilla igual a  $1.158 \text{ kg/m}^3$ .

**Porosidad.** Es el porcentaje del volumen total de un material consistente en aberturas o poros y se puede considerar como un índice de la cantidad de agua del suelo que se puede almacenar en una formación saturada.

La porosidad se puede calcular de distintas maneras, en el caso de los materiales de grava y arcilla, la porosidad se determinó a partir de sus densidades, a través de la Ecuación 3.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_s}\right) 100 \quad (3)$$

Donde,  $n$  es la porosidad expresada en %,  $\rho_p$  es la densidad aparente en  $\text{kg/m}^3$ , y  $\rho_s$  es la densidad real de las partículas de la muestra en  $\text{kg/m}^3$ . Como se determinó anteriormente la densidad de las muestras y la densidad aparente de cada material, se obtuvo una porosidad igual a 43,07 % para la grava y 55,34 % para la arcilla.

### 3.2.2. Factor de Forma

Para definir la forma de los fragmentos de roca se utilizaron dos características de estos, la esfericidad y la redondez o angularidad [37].

**Esfericidad.** Es la forma global de una roca, es decir la similitud entre su largo, alto y ancho. La cual se puede cuantificar utilizando la Ecuación 4.

$$S = \frac{r_{max-in}}{r_{min-cir}} \quad (4)$$

Donde,  $S$  es la esfericidad,  $r_{max-in}$  es el radio de la circunferencia inscrita mayor en la roca y  $r_{min-cir}$  es el radio mínimo circunscrito, cuyas unidades están expresadas en longitud.



**Redondez o Angularidad.** Es una propiedad individual de los fragmentos de una roca y es una función de los radios de curvatura de sus diversas aristas y esquinas. Se puede determinar cuantitativamente utilizando la Ecuación 5.

$$R = \frac{\Sigma r_i / N}{r_{max-in}} \quad (5)$$

Donde,  $R$  es la redondez cuya magnitud es adimensional,  $\Sigma r_i$  es la sumatoria de radios inscritos de los bordes de la roca,  $N$  es el número de radios inscritos medidos y  $r_{max-in}$  es el radio de la circunferencia inscrita mayor, radios cuyas unidades están expresadas en longitud.

Para determinar el factor de forma del material de grava se obtuvieron fotografías digitales de 15 muestras, las cuales fueron importadas al programa *Autodesk AutoCAD*, para realizar el análisis de las imágenes, donde se obtuvo el radio mínimo circunscrito, el radio máximo inscrito y los radios inscritos de los bordes, para calcular la esfericidad y redondez de las muestras [35].

Para determinar el factor de forma de los fragmentos de arcilla, se hizo uso de un harnero, con el cual se clasificó el material en 3 intervalos de tamaño, se eligieron 15 muestras aleatorias de cada intervalo para definir la esfericidad y redondez promedio de cada una, antes y después de los ensayos. El primer intervalo consistió en diámetros de 18 mm a 37 mm, el segundo de 16 mm a 18 mm y el tercero de 10 mm a 16 mm. Las muestras de cada intervalo se fotografiaron y se importaron a *Autodesk AutoCAD* al igual que la grava. Mientras que los diámetros de partículas menores no se analizaron debido a su menor escala, por lo cual se asumió una mayor resistencia de las muestras y menor variabilidad de los parámetros. En la Figura 3.4 se puede apreciar un ejemplo de las mediciones en el programa *AutoCAD*.

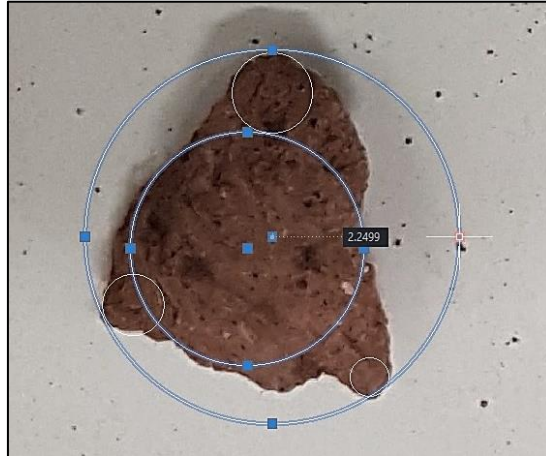


Figura 3.4. Muestra con mediciones en Autocad.

### 3.2.3. Índice de Resistencia a la Carga Puntual

Los ensayos de carga puntual son un método alternativo para obtener de forma indirecta la resistencia a la compresión uniaxial ( $UCS$ ) a partir del índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ). La falla de la roca se produce debido a la tensión de tracción y se puede realizar en muestras irregulares, cilíndricas o bloques. El procedimiento consistió en comprimir una muestra entre 2 puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa hidráulica hasta producir su falla (ejemplo en la Figura 3.5). En el Anexo B.4 se detallan los requerimientos de las pruebas y el procedimiento con mayor detalle.

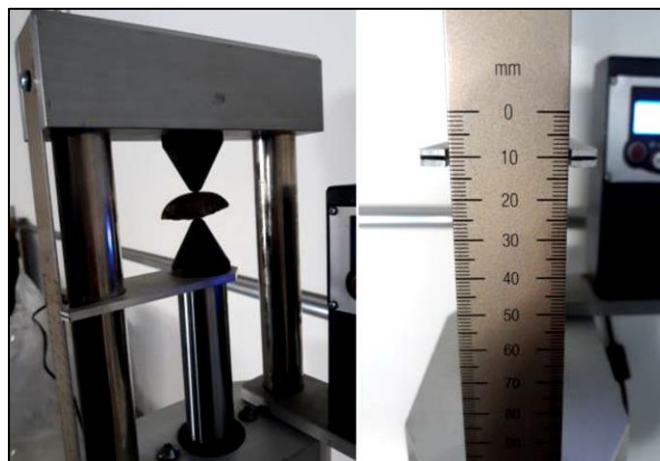


Figura 3.5. Ensayo de carga puntual [35].

La configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos se presentan en la Figura 3.6, donde (a) es la muestra diametral, (b) es la muestra axial, (c) el bloque y (d) la muestra irregular.

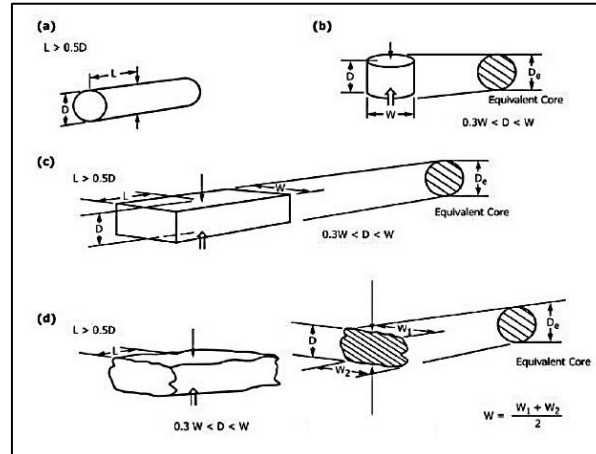


Figura 3.6. Configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos [38].

Se seleccionaron 15 muestras irregulares de grava y se obtuvieron los parámetros,  $L$  (distancia entre los puntos de contacto y la cara libre más cercana),  $W_1$  y  $W_2$  (anchos). Mientras que se extrajeron 16 muestras de ladrillos de arcilla cortados por una sierra eléctrica y se determinó el parámetro  $W$  (ancho más pequeño perpendicular a la dirección de carga). En la Figura 3.7 se muestran los testigos, posterior a los ensayos de carga puntual. En el Anexo B.4. se reportan los datos de los ensayos.



Figura 3.7. Testigos posteriores a ensayos de carga puntual.

Se determinó el valor promedio de  $I_{S50}$ , de acuerdo con las sugerencias expuestas por la ISRM [38]. Las cuales advierten que si el número de muestras es mayor a 10 hay que descartar los 2 mayores y los 2 menores y cuando es menor que 10, solo se descarta el mayor y el menor. Obteniendo así un  $I_{S50}$  de la arcilla igual a  $0,26 \pm 0,04$  MPa y de la grava igual  $11,24 \pm 2,85$  MPa [35].

### 3.2.4. Ángulos de Fricción

La fuerza de fricción es la cual se produce entre dos superficies en contacto. Existe la fuerza de fricción dinámica, la cual se opone al movimiento relativo entre ambas superficies y la estática que se opone al inicio del deslizamiento. Generadas debido a las imperfecciones, generalmente microscópicas, entre las superficies en contacto.

Para determinar el ángulo de fricción de las paredes de los tubos de cloruro de polivinilo (PVC) y los materiales, se utilizó la metodología de Nedderman [39] considerando la pendiente deslizante de las muestras de material granular de arcilla y grava. Las pruebas determinaron que el ángulo de fricción entre las paredes del tubo y el material de arcilla fue de  $25^\circ$ , mientras que  $31^\circ$  el de grava.

La resistencia al corte de suelos, rocas o macizos rocosos se puede definir como la resistencia del material hasta su rotura en la superficie o planos internos producto de un esfuerzo cortante. Cuando se supera el límite de resistencia cortante, las partículas se mueven unas respecto a otras, siguiendo una superficie de mínima resistencia.

El ángulo de fricción interno es el ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr en un punto que representa una condición dada de un esfuerzo de rotura de un material sólido. El cual se determinó gracias a los ensayos de corte directo en grava y arcilla.

**Ensayo de Corte Directo.** Con estos ensayos se puede determinar la resistencia al corte de un suelo de forma directa de un plano de debilidad mediante la aplicación de un esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) constante y un esfuerzo de corte ( $\tau$ ). Puede ser llevado a cabo en distintos tipos de suelo, sin embargo, existe una limitación en el tamaño máximo de partícula presente en la muestra. La baja velocidad de desplazamiento asegura la disipación del exceso de presión en los poros, pero en suelos cohesivos blandos permite un flujo plástico.

El ensayo se realizó con el equipo llamado Aparato de Ensayo de Corte Directo o Residual modelo S276 de la marca Matest, el cual se ilustra en la Figura 3.8. El cual puede albergar muestras redondas de diámetro 5 cm, 6 cm, 6,35 cm y 10 cm y muestras cuadradas de  $6 \cdot 6 \text{ cm}^2$  o  $10 \cdot 10 \text{ cm}^2$ .



Figura 3.8. Equipo para el ensayo de corte directo.

Las muestras utilizadas para los ensayos correspondieron a material granular de arcilla y grava con tamaño de partícula menor a 0,5 mm. El procedimiento se basó en la norma ASTM D3080/D3080M [40], detallado en el Anexo B.5 junto a los datos obtenidos. La envolvente de falla de Mohr-Coulomb, se determinó por la ecuación de la recta que se obtuvo al graficar esfuerzo normal y de corte, la cual fue de  $\tau = 0,979 \cdot \sigma_n + 19,953$  para la arcilla, donde el valor 19,953 representa a la cohesión en kPa y 0,979 representa a la  $\tan(\Phi)$ , siendo  $\Phi$  el ángulo de fricción interno, por lo cual se obtuvo un ángulo de  $44,39^\circ$ . Mientras que para la grava la ecuación fue igual a  $\tau = 0,7782 \cdot \sigma_n + 22,72$  por lo cual se obtuvo un ángulo de fricción interno igual a  $37,89^\circ$ . En la Figura 3.9 se muestra el gráfico esfuerzo normal en función al esfuerzo de corte para ambos materiales.

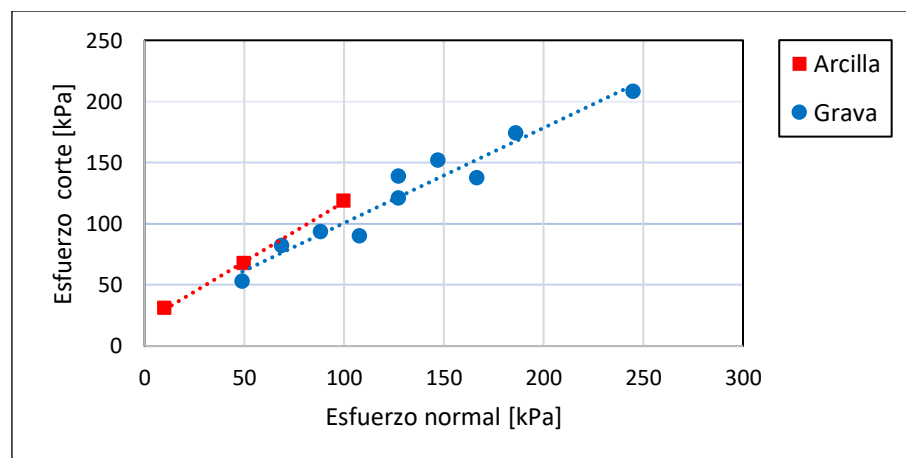


Figura 3.9. Gráfico, esfuerzo normal y de corte (arcilla y grava).

En la Figura 3.10 se presenta el gráfico de dilatación de arcilla y grava, en el cual se observa el comportamiento de las muestras con distintas cargas con respecto al desplazamiento horizontal y vertical. A medida que el esfuerzo normal aplicado a través de la carga es mayor, se aprecia una tendencia a la compactación de las muestras.

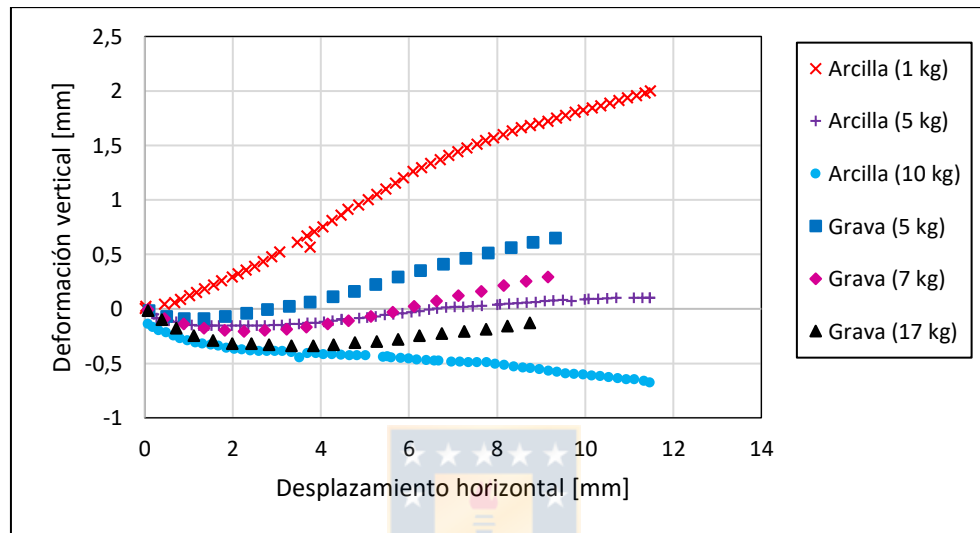


Figura 3.10. Gráfico, dilatación (arcilla y grava).

### 3.2.5. Distribución Granulométrica y Coeficientes de Uniformidad y Curvatura

**Distribución Granulométrica.** Las distribuciones de tamaños de los materiales granulares, permiten obtener una caracterización de los tamaños de los fragmentos presentes en las muestras, una vez clasificados a través de harneros y tamices. Las cuales se representan a través de las curvas granulométricas, en función al tamaño del fragmento y el material pasante acumulado porcentual.

Para las pruebas de fragmentación por flujo se masó la cantidad de material retenido en cada malla a través de una balanza, antes y después de los ensayos. En la Tabla 3.3 se reportan los rangos de tamaños utilizados para caracterizar las muestras.

Tabla 3.3. Intervalos de tamaño para las muestras de arcilla.

Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8
Rango de tamaños [mm]	[0, 1,17)	[1,17, 2,36)	[2,36, 5)	[5, 6)	[6, 10)	[10, 16)	[16, 18)	[18, 37)

**Coefficiente de Uniformidad.** Es utilizado para cuantificar y calificar la distribución de tamaños del material granular. El coeficiente de uniformidad está definido por la Ecuación 6.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (6)$$

Donde,  $C_U$  es el coeficiente de uniformidad,  $d_{10}$  es el tamaño correspondiente al 10 % del material pasante y  $d_{60}$  es el tamaño correspondiente al 60 % del material pasante [41]. El coeficiente de uniformidad se calculó a partir de la distribución granulométrica de los materiales, antes y después de los ensayos y utilizando interpolación semilogarítmica. El  $C_U$  inicial para la arcilla fue de 1,74 y para la grava fue de 2,48.

**Coefficiente de Curvatura.** Es utilizado para saber cuan graduado está el material granular, considerando el equilibrio entre los diversos tamaños. El coeficiente de curvatura está definido por la Ecuación 7.

$$C_Z = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (7)$$

Donde,  $C_Z$  es el coeficiente de curvatura, mientras que  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  y  $d_{60}$  son los tamaños correspondientes al 10 %, 30 % y 60 % del material pasante [41]. Se obtuvo un valor inicial de  $C_Z$  para la arcilla de 0,85 y para la grava de 1,12.

### 3.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para realizar los ensayos con arcilla, se utilizó la estructura construida previamente del modelo a escala de los piques de traspaso de mineral utilizados con grava. Para simular los piques de traspaso se utilizaron tres tubos de policloruro de vinilo (*PVC*), cuyas longitudes eran de 1 m, 2 m y 3 m. Los tubos poseían en común un diámetro de 11 cm, los cuales se montaron de uno sobre una estructura metálica cuya función fue dar soporte a los tubos y fijarlos verticalmente, considerando además que esta estructura debió soportar el peso del material dentro del tubo. Además, se dispuso de la construcción de una canaleta que retuvo el material de arcilla una vez retirado un tapón de poliestireno expandido en el fondo del tubo, produciendo la formación de una pila de material que impidió el flujo. Mientras que en el fondo de la estructura se ubicó un balde para extraer el material una vez realizado el ensayo. El modelo físico se ilustra en la Figura 3.11.



*Figura 3.11. Modelo a escala de un pique de traspaso.*

Anteriormente para la extracción del material de grava dentro del tubo, se dispuso de una placa metálica en la parte inferior del armazón a 11 cm de altura desde el piso, la cual permitió además sellar el tubo para cargarlo completamente. La estructura se modificó para el material de arcilla para no perder material fino en los ensayos.

### 3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental consistió principalmente en 3 etapas, la primera de ellas fue la reducción de tamaño de los materiales, la segunda fue la clasificación de los fragmentos por su tamaño y la última fue la generación de sus curvas granulométricas antes y después de los ensayos.

#### 3.4.1. Preparación de Materiales Antes de Ensayo

El tratamiento del material previo a los ensayos es llevado a cabo en los equipos de la Planta Piloto Metalurgia Química, Doctor Igor Wilkomirsky y el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería Metalurgia de la Universidad de Concepción. El cual se desarrolla a continuación.

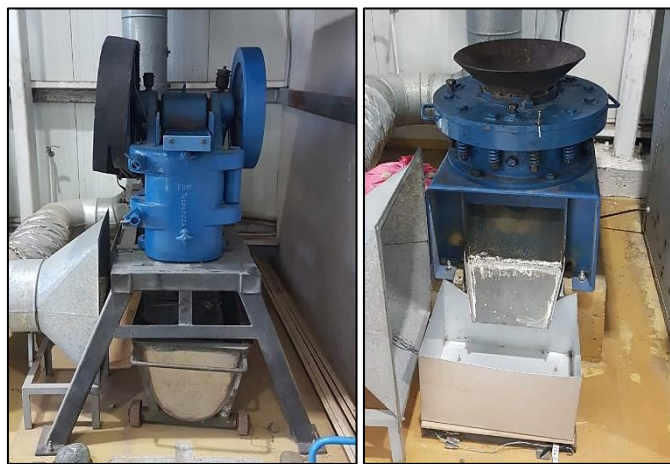
**Secado.** En el caso de la arcilla obtenida de ladrillos, se requirió un secado en hornos industriales a 378,15 K durante 24 horas, para eliminar rastros de humedad y así este parámetro no influya en los ensayos de fragmentación. Los ladrillos húmedos y el horno industrial se muestran en la Figura 3.12.





*Figura 3.12. Ladrillos húmedos y horno industrial.*

**Chancado.** Para la reducción del tamaño de roca se requirió de un chancador de mandíbulas. Estos se pueden clasificar según movimiento de sus placas trituradoras. El chancador tipo *Blake*, permite una descarga con área variable, el tipo *Dodge* permite un área de alimentación variable y el de tipo *Universal* permite variar ambas áreas. Para ambos materiales se requirió de una reducción de tamaño, por lo cual el material se procesó en un chancador de mandíbulas tipo *Blake*, para disponer de un tamaño máximo de roca igual a una pulgada. Además, el material fragmentado de grava tras el chancado se procesó por un chancador de cono para generar tamaños de fragmentos menores. Ambos chancadores se pueden apreciar en la Figura 3.13.



*Figura 3.13. Chancador de mandíbulas y de cono.*

**Tamizado.** El material fragmentado se tamizó en un harnero con mayas de diámetros iguales a 5 mm, 6 mm, 10 mm, 16 mm, 18 mm y 37 mm. Con el fin de separar los fragmentos en intervalos de tamaño y así obtener la distribución de tamaños de las muestras. Para evitar colgaduras por sobre tamaño, el tamaño máximo del material debe que ser 1 : 5 del diámetro del pique. Por lo cual, para el modelo a escala, el tamaño máximo debió ser de 22 mm, pero como no se dispuso de una malla con dicha medida, este quedó definido por el chancador de mandíbula en 25,4 mm.

En el caso de la arcilla los fragmentos menores a 5 mm se clasificaron en una tamizadora para completar la fracción fina en la distribución de tamaños de los ensayos. Las mallas utilizadas fueron la #16 con pasante cuyos diámetros se encuentran entre 0 mm a 1,17 mm, la malla #8 con pasante entre 1,17 mm y 2,36 mm y la malla #4 con pasante entre 2,36 mm y 4,70 mm de diámetro. La tamizadora y el harnero, utilizados para los ensayos se muestran en la Figura 3.14.



*Figura 3.14. Tamizadora (mallas #4, #8 y #16) y harnero.*

### 3.4.2. Generación de Curvas Granulométricas

A partir de la clasificación del material en los intervalos de tamaño se construyeron las curvas granulométricas iniciales. La cantidad de material utilizado de cada intervalo quedó definido por un cierto porcentaje de la masa total que se necesitó para llenar un tubo. Masa calculada a partir del volumen del tubo de cada ensayo y la densidad aparente del material. En Figura 3.15 se presentan las curvas granulométricas iniciales de ambos materiales. Cuyos datos se reportan en el Anexo C.1.

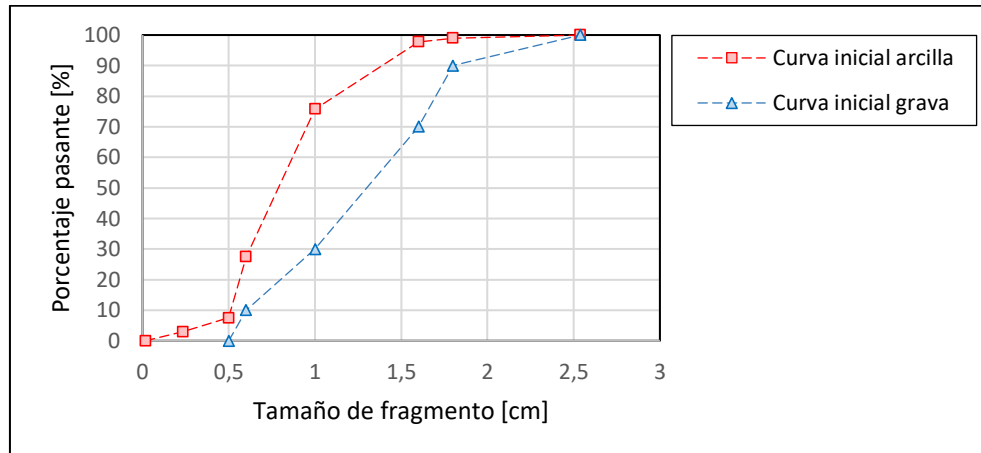


Figura 3.15. Curvas granulométricas iniciales.

Se generaron las curvas de distribución de tamaños para caracterizar el material antes y después de los ensayos, con el fin de obtener una comparación entre ellas. Además de poder hacer un análisis del desplazamiento de las curvas granulométricas según el tipo de material.

### 3.4.3. Descripción de los Ensayos

Se realizaron cuatro ensayos a alturas de 1 m, 2 m, 3 m y 6 m para ambos materiales. Cada ensayo se ejecutó dos veces para evaluar su replicabilidad. Como los ensayos con material granular de grava fueron efectivamente replicables, no se evaluó replicabilidad para el material de arcilla.

Previo a las pruebas, el porcentaje de material de cada intervalo de tamaño fue homogeneizado (un ejemplo del porcentaje y masa de cada material correspondiente al ensayo de 1 m se reporta en el Anexo C.2). El tubo se ubicó en el piso horizontalmente y se cargó el material mientras se inclinaba lentamente para evitar fragmentación por caída libre o choque entre fragmentos. Cuando comenzó la prueba, el material se fue extrayendo a una velocidad de 10 cm/min, mediante la eliminación de la pila natural de material formada en el fondo del pique, gracias a una espátula con la cual se empujó el material de la pila hasta un balde. Finalmente, cuando se extrajo todo el material (sin rellenar), la curva de distribución de tamaños de la prueba se generó por tamizado. El tubo de mayor longitud tenía 3 m, por lo cual se desarrollaron los ensayos de 6 m de altura considerando que el material fluyera dos veces desde este tubo, descargando el tubo de 3 m y recargándolo con el mismo material de la misma manera que en los otros ensayos.

## 4. MODELOS PREDICTIVOS DE FRAGMENTACIÓN DE MATERIAL GRANULAR

Se hizo uso de un modelo de fragmentación secundaria conformado por un set de ecuaciones basadas en las características del material y las condiciones de operación. Modelo análogo a los mecanismos de fragmentación que ocurren en una columna de material quebrado, como si fuera una molienda autógena. En el cual se consideran principalmente dos funciones de origen estadístico que definen el progreso del quiebre de las rocas como una sucesión de eventos discretos.

Entre ellas se encuentra la función de selección, que determina la fracción de rocas que sufren quiebre mientras el resto se mantienen intactas y la función de quiebre, que representa la probabilidad de que una fracción de fragmentos de un tamaño inicial terminen en un tamaño final [6]. Cuyo detalle se presenta en el Anexo D.1.

La forma general del modelo de conminución se define en la Ecuación 8 como la fracción de masa mineral en el intervalo de tamaño  $i$ -ésimo ( $m_i$ ).

$$m_i = \int_0^{\infty} f_i(t)T(t)dt \quad (8)$$

Donde  $f_i(t)$  es la fracción de masa mineral en el intervalo  $i$ -ésimo que se fragmenta en el tiempo  $t$  y  $T(t)$  es la distribución del tiempo de residencia. Como la fragmentación del material con mayor intervalo de tamaño es proporcional a la cantidad de material de tamaño  $i$  en la molienda, se determina la Ecuación 9.

$$\frac{d[m_{tot}f_i(t)]}{dt} = -S_i m_{tot} f_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_{tot} f_j(t) \quad (9)$$

Donde,  $m_{tot}$  es la masa total que se fragmentará,  $S_i$  es la función de selección y  $b_{ij}$  es la función de quiebre. En el modelo se asume un comportamiento de flujo pistón, por lo tanto, los fragmentos tienen un tiempo de residencia ( $\tau$ ) constante en el sistema y  $m_i$  se define en función a  $\tau$ .

Para obtener  $m_i$  se debe resolver la ecuación cinética de molienda *batch* asumiendo  $m_{tot}$  constante. Donde la resolución de las  $N$  ecuaciones diferenciales de primer orden y de coeficientes constantes, se realiza en forma secuencial con valores de  $i$  de 1 hasta  $N$  y con  $t$  igual a  $\tau$  o en forma matricial. Lo cual se describe en la Ecuación 10.

$$m_i = \sum_{j=1}^i A_{ij} e^{-S_j \tau} \quad (10)$$

Donde,  $S_j$  es la función de selección en la cual el material se fragmenta en el intervalo  $j$ -ésimo,  $\tau$  es el tiempo de residencia y  $A_{ij}$  se define en la Ecuación 11, donde  $f_{i0}$  es la distribución de partículas inicial.

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i < j \\ f_{i0} - \sum_{k=1}^{i-1} A_{ik} & \text{if } i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} S_k}{S_i - S_j} A_{kj} & \text{if } i > j \end{cases} \quad (11)$$

Finalmente, la función de quiebre puede ser expresada con la Ecuación 12.

$$B_{i1} = \alpha_1 \left(\frac{x_i}{x_2}\right)^{\alpha_2} + (1 + \alpha_1) \left(\frac{x_i}{x_2}\right)^{\alpha_3} \quad (12)$$

Donde  $B_{i1}$  es la forma acumulativa de las funciones  $b_{ij}$  del primer evento de quiebre, las constantes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  son parámetros del modelo ( $0 < \alpha_1 < 1$ ;  $\alpha_2 < \alpha_3$ ) que representan la forma de los fragmentos de las curvas granulométricas, los cuales deben ser ajustados con datos experimentales y  $x_i$  es la abertura de la malla para un intervalo de tamaño dado.

Mientras que la función de selección se expresa con la Ecuación 13.

$$S_i^E = S_1^E \exp \left\{ Z_1 \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) + Z_2 \left[ \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (13)$$

Donde,  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $S_1^E$  son los parámetros del modelo a ajustar con los datos experimentales,  $d_i$  es la media geométrica del intervalo de tamaño  $i$ ,  $S_i^E$  representa la razón de quiebre específica de fragmentos de tamaño  $i$ , mientras que  $Z_1$  y  $Z_2$  representan la forma de la variación de la razón de quiebre específica con el tamaño de roca. La función de selección debe considerar la presión aplicada, por lo que se determinó una relación entre la razón de quiebre ( $S_i^E$ ), la cual es invariante con respecto al tamaño de partícula y el esfuerzo vertical ( $\sigma_v$ ) (cociente entre la potencia aplicada y la masa total, la cual es considerada constante). Como se define en la Ecuación 14.

$$S_i = S_i^E(\sigma_v) \quad (14)$$

El esfuerzo vertical medio generado por las diferentes alturas de la columna de mineral quebrado, se obtuvo a través de la fórmula de Janssen [39] expresada en la Ecuación 15.

$$\bar{\sigma}_v = \frac{R_h \rho_b g}{\tan(\phi_w) k} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-k \tan(\phi_w) z}{R_h}\right) \right] \quad (15)$$

Donde,  $R_h$  es el radio hidráulico en m,  $\rho_b$  es la densidad aparente en  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$  es la constante gravitacional en  $\text{m/s}^2$ ,  $\phi_w$  es el ángulo de fricción del límite de la columna de extracción en rad,  $k$  es la relación entre los esfuerzos horizontal y vertical, y  $z$  es la altura de la columna de quebrado en m.

El Modelo de Conminución para *Block Caving* (BCCM) se utilizó para determinar la fragmentación secundaria, ajustando los parámetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\tau$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $S_1^E$  con los resultados de los datos experimentales y el esfuerzo vertical medio generado por el peso de la columna de material de cada ensayo, a través de la herramienta *Solver* de *Microsoft Excel*, con la cual se minimizó el cálculo del error cuadrático de las fracciones másicas del material pasante acumulado de cada ensayo. Mientras que la bondad de ajuste del modelo se determinó con el error cuadrático medio (MSE) y con el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), expresados en las ecuaciones 16 y 17 [6].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i,exp} - y_{i,mod})^2 \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{i,exp} - y_{i,mod})^2}{\sum (y_{i,exp} - \bar{y}_{i,exp})^2} \quad (17)$$

Donde,  $N$  es número total de fracciones de tamaño,  $y_{i,exp}$  son las fracciones de tamaño acumulativas para el tamaño  $i$  experimental e  $y_{i,mod}$  para el modelado. Mientras que  $\bar{y}_{i,exp}$ , es el valor promedio de los valores de  $y_{i,exp}$ .

Como en la columna de material quebrado existen diferentes tiempos de residencia de los fragmentos ( $\tau$ ) y diferentes esfuerzos verticales ( $\sigma_v$ ) con respecto a su altura, se consideró analizar este fenómeno, obteniendo los tiempos de residencia a distintas alturas de la columna, manteniendo los parámetros ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $S_1^E$ ) obtenidos anteriormente del modelo de predicción para cada material.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

En el presente capítulo se reporta y se hace análisis de los principales resultados obtenidos después de los ensayos de flujo gravitacional en piques a escala de laboratorio.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TRAS EL FLUJO EN PIQUES

#### 5.1.1. Factor de Forma

La esfericidad promedio del material de grava fue igual a 0,496 y su redondez promedio igual a 0,700 (datos obtenidos y calculados se reportan en el Anexo E.1).

En la Tabla 5.1. se muestra la esfericidad promedio de las 15 muestras de arcilla de cada intervalo antes y después de cada ensayo. Mientras que en la Tabla 5.2 se muestra la redondez promedio de cada intervalo de tamaño antes y después de cada ensayo de las mismas muestras.

*Tabla 5.1. Resultados esfericidad (arcilla).*

Intervalo [mm]	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
[18, 37)	0,580	0,673	0,671	0,663	0,703
[16, 18)	0,597	0,627	0,667	0,665	0,660
[10, 16)	0,632	0,658	0,675	0,680	0,682
Promedio	0,603	0,653	0,671	0,669	0,682

*Tabla 5.2. Resultados redondez (arcilla).*

Intervalo [mm]	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
[18, 37)	0,158	0,286	0,295	0,336	0,344
[16, 18)	0,216	0,307	0,296	0,308	0,366
[10, 16)	0,249	0,334	0,400	0,331	0,368
Promedio	0,208	0,309	0,330	0,325	0,359

Se obtuvo así la esfericidad promedio inicial de arcilla igual 0,603 y el mayor valor de la esfericidad promedio alcanzada de los ensayos igual a 0,682. Mientras que la redondez promedio inicial fue de 0,208 y la redondez promedio mayor de los ensayos fue igual a 0,359. En otras palabras, un aumento de un 13,10 % de la esfericidad y un 72,87 % de la redondez de los fragmentos, por lo cual, tanto la esfericidad como la redondez aumentaron después de los ensayos. Considerando que estos coeficientes deberían aumentar al disminuir el tamaño de los fragmentos debido a que los fragmentos de tamaño menor presentan menor número de discontinuidades. Además, de aumentar

con la distancia recorrida, debido al desgaste de los bordes angulosos por la abrasión generada por el flujo del material. Tendencia que se aprecia con mayor fuerza en los resultados de la redondez.

El factor de forma de las muestras de ambos materiales, reflejaron la tendencia que estos tienen a fragmentarse en las pruebas de flujo. La angularidad de los fragmentos de arcilla fue mucho mayor a los de grava, por lo que estos poseían una mayor probabilidad de perder sus bordes angulosos producto al flujo. Por otro lado, las proporciones de largo y ancho de los fragmentos de grava, dados por la esfericidad, reflejaron clastos más ovalados que los presentes en las muestras de arcilla. Sin embargo, esto no reflejó una mayor fragmentación en los ensayos, debido a la mayor resistencia de la grava.

### 5.1.2. Curvas Granulométricas

Las curvas de distribución de tamaños de los ensayos se determinaron para los materiales granulares de arcilla y grava, considerando el promedio de ambas replicas para este último. Las curvas granulométricas de todos los ensayos de transporte por flujo de cada material se grafican en las figuras 5.1 y 5.2 (datos presentes en el Anexo E.2). De las cuales se puede apreciar el notorio desplazamiento entre las curvas de distribución iniciales con las generadas a partir de las pruebas, independientemente del material. Aumentando el porcentaje de material pasante a medida que aumenta la distancia de recorrido en las pruebas.

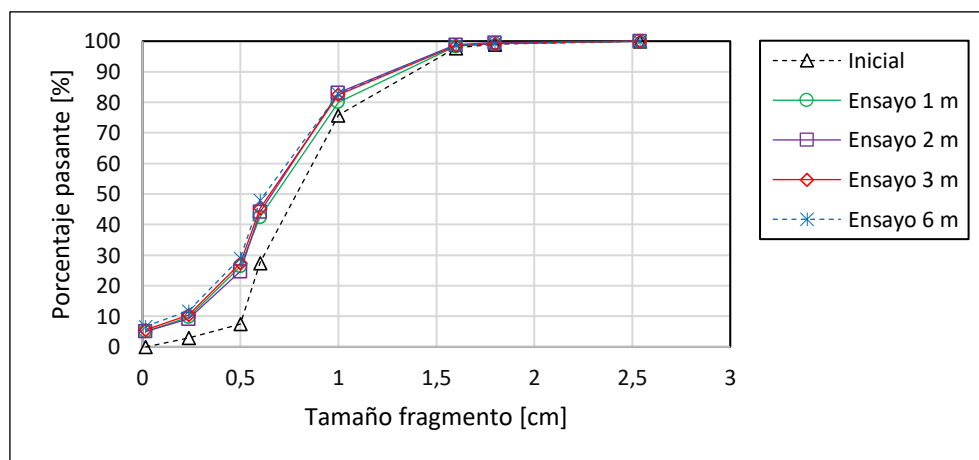


Figura 5.1. Curvas granulométricas para diferentes distancias de transporte (arcilla).



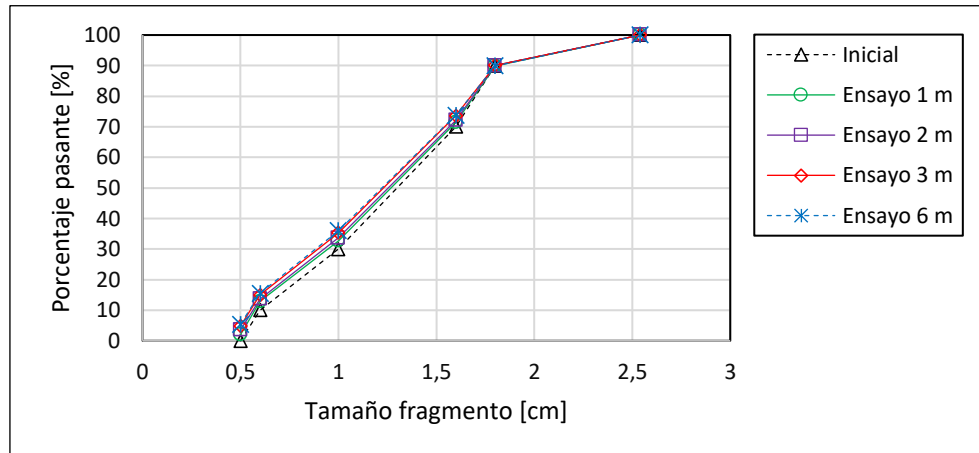


Figura 5.2. Curvas granulométricas para diferentes distancias de transporte (grava).

En las pruebas realizadas con arcilla, el tamaño característico de los fragmentos que sufrió mayor reducción fue el  $d_{10}$  del ensayo de 6 m, el tamaño disminuyó de 5,12 mm a 1,84 mm producto de la generación de material fino. Mientras que el  $d_{50}$  del mismo ensayo se redujo de 7,61 mm a 6,18 mm y el  $d_{80}$  de 10,94 mm a 9,58 mm, disminuyendo así el porcentaje de reducción de tamaño para tamaños de fragmentos mayores. Misma tendencia presentan las pruebas con grava, para el ensayo de 6 m el  $d_{10}$  se redujo de 6,00 mm a 5,43 mm, el  $d_{50}$  de 12,65 mm a 11,90 mm y el  $d_{80}$  de 16,97 mm a 16,74 mm. Sin embargo, los porcentajes de reducción presentaron magnitudes mucho menores. Los cuales se analizan en las siguientes secciones.

### 5.1.3. Coeficientes de Uniformidad y Curvatura

En las tablas 5.3 y 5.4 se pueden apreciar los resultados de los coeficientes de uniformidad y curvatura inicial y de todas las pruebas de flujo en arcilla y grava.

Tabla 5.3. Coeficientes de uniformidad y curvatura en cada ensayo (arcilla).

	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
$C_u$	1,74	3,39	3,04	3,47	3,79
$C_z$	0,85	1,41	1,37	1,50	1,67

Tabla 5.4. Coeficientes de uniformidad y curvatura en cada ensayo (grava).

	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
$C_u$	2,48	2,50	2,52	2,54	2,56
$C_z$	1,12	1,08	1,07	1,06	1,05

El coeficiente de uniformidad promedio de los ensayos en arcilla fue de 3,42, mientras que el de grava es de 2,53, ambos aumentaron en comparación al  $C_U$  inicial. Sin embargo, la magnitud de esta diferencia de los  $C_U$  en las pruebas con arcilla fue mucho mayor. Este efecto fue producido por la mayor reducción del  $d_{10}$  en comparación a la reducción del  $d_{60}$  en los ensayos. Obteniendo como resultado fracciones de tamaños menores que antes no existían debido a la fragmentación, una mayor distribución de tamaños y una menor inclinación vertical de las curvas granulométricas.

El coeficiente de curvatura promedio de las pruebas con arcilla fue de 1,49, mientras que el de grava fue de 1,06. En arcilla el  $C_z$  promedio aumento en comparación al  $C_z$  inicial, pero no así el  $C_z$  promedio en grava. El efecto producido en las pruebas con arcilla fue debido a la disminución del  $d_{10}$  por el exceso de fragmentación del material, lo que produjo a su vez una graduación continua de tamaños. Mientras que la reducción del  $C_z$  en grava fue debido a que no hubo una reducción de tamaño considerable de los fragmentos más grandes en comparación a los de tamaño intermedio, debido a que la resistencia de la grava es mucho mayor y no existen otros fragmentos capaces de producir rotura en ellos, por lo que el  $d_{30}$  disminuyó y el  $d_{60}$  se mantuvo.

La porosidad inicial de la arcilla, cuyo valor es 55,34 %, reflejó un mayor índice de vacíos entre sus fragmentos, lo que produjo una mayor pendiente en su curva granulométrica y un menor  $C_U$  inicial. En comparación a la grava la cual poseía una porosidad de 43,07 %, una menor pendiente en su curva granulométrica y un mayor  $C_U$  inicial. Sin embargo, tras los ensayos, el  $C_U$  de la arcilla superó al de la grava, por lo cual se supuso se debió a su mayor porosidad inicial que promovió la aparición de esfuerzos de cizalle sobre los bordes angulosos de los fragmentos, los cuales poseían menos áreas de contacto entre las partículas, provocando una mayor fragmentación del material.

## 5.2. EFECTO DEL TRANSPORTE EN LA FRAGMENTACIÓN

Los porcentajes de fragmentación de las partículas se analizaron a partir de los tamaños característicos de las distribuciones de tamaños. Estos son  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{80}$  que son los tamaños característicos del fragmento bajo el cual se encuentran el 10 %, 50 % y 80 % del material pasante respectivamente (datos reportados en Anexo E.3). Para cuantificar el grado de fragmentación, se consideró la Ecuación 18 basada en las diferencias entre los tamaños característicos iniciales y los finales.

$$Br = \left( \frac{d_{j,f} - d_{j,i}}{d_{j,i}} \right) 100 \quad (18)$$

Donde  $Br$  es el porcentaje de fragmentación,  $d_{j,f}$  es el tamaño final del tamaño característico  $j$  y  $d_{j,i}$  es el tamaño inicial del tamaño característico  $j$ . El porcentaje de reducción es función del tamaño característico y la distancia de transporte. Los cuales se indican en las tablas 5.5 y 5.6.

Tabla 5.5. Porcentaje de reducción de tamaño en diferentes distancias (grava).

Tamaño característico	Br (1 m)	Br (2 m)	Br (3 m)	Br (6 m)
$d_{10}$	-4,8 %	-6,4 %	-8,6 %	-9,5 %
$d_{50}$	-2,5 %	-3,5 %	-5,4 %	-5,9 %
$d_{80}$	-0,4 %	-0,7 %	-1,3 %	-1,3 %

Tabla 5.6. Porcentaje de reducción de tamaño en diferentes distancias (arcilla).

Tamaño característico	Br (1 m)	Br (2 m)	Br (3 m)	Br (6 m)
$d_{10}$	-53,4 %	-51,8 %	-57,1 %	-64,0 %
$d_{50}$	-12,7 %	-14,8 %	-15,9 %	-18,8 %
$d_{80}$	-8,7 %	-12,2 %	-11,7 %	-12,4 %

Los porcentajes de fragmentación en arcilla son mucho mayores a los en grava. Sin embargo, para ambos estos aumentan con respecto a la distancia recorrida y disminuyen a medida que aumenta tamaño característico. En las figuras 5.3 y 5.4 se ilustra el efecto de la distancia recorrida en los tamaños  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{80}$ . A través de la razón entre el tamaño final ( $P_i$ ) sobre el inicial ( $F_i$ ).

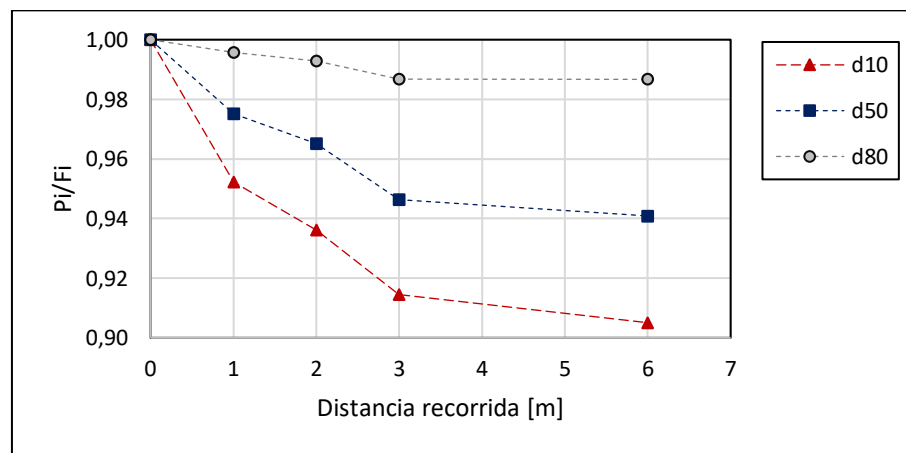


Figura 5.3. Gráfico, tamaños característicos en función de la distancia recorrida (grava).

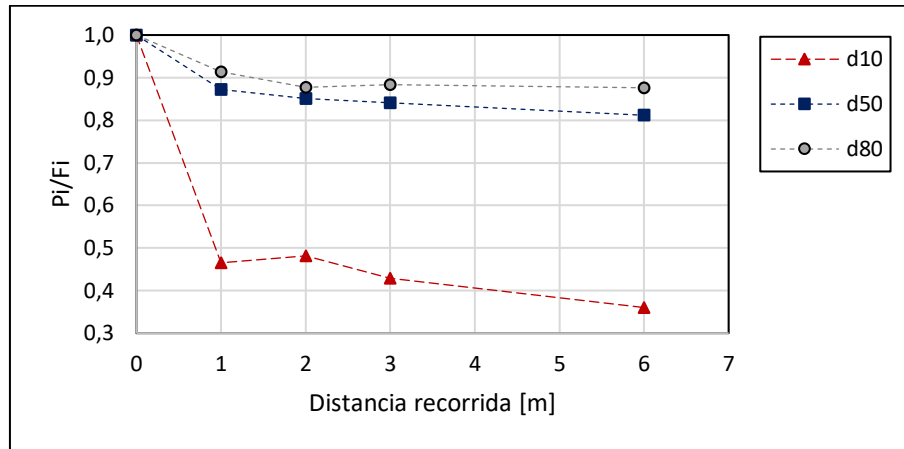


Figura 5.4. Gráfico, tamaños característicos en función de la distancia recorrida (arcilla).

Para las distancias de transporte menores en las pruebas con grava, la fragmentación se observó principalmente en  $d_{50}$  y  $d_{10}$ . Mientras que, para la distancia recorrida de 6 m, la razón de cambio en los tamaños disminuyó, lo cual significa que la razón con la cual se fragmentaba el material se redujo, ya que estos fragmentos se fueron redondeando durante el flujo perdieron sus geometrías afiladas. Con menos angularidad, el fragmento no pudo romperse en condiciones de bajo estrés. Mientras que la baja reducción del  $d_{80}$ , se debió a la falta de fragmentos de tamaño mayor que fueran capaces de producir un quiebre de estos fragmentos. Por otro lado, la variación del tamaño en arcilla se observó principalmente en  $d_{10}$ , debido a que se generó mayor cantidad de material fino, en función a su mayor porosidad, menor redondez inicial y menor resistencia que los fragmentos de grava. Cabe destacar que, a diferencia de los ensayos con grava, la arcilla no releja una tendencia a la reducción de su fragmentación, al menos con estas distancias de recorrido.

### 5.2.1. Generación de Material Fino

Los fragmentos de roca de cada material considerados como finos se determinaron como el material pasante de las mallas de tamaño menor. Por lo cual, en las pruebas de transporte con arcilla, el fino se consideró como las partículas de tamaño menor a 1,17 mm y para la grava menor a 5 mm. Cabe destacar que antes de las pruebas la masa de material menor a estos tamaños era nula. En las tablas 5.7 y 5.8 se reporta la masa de fino generado a diferentes distancias recorridas y el porcentaje de fino generado en comparación al total de material recuperado para las diferentes pruebas.

*Tabla 5.7. Generación de fino en los ensayos (arcilla).*

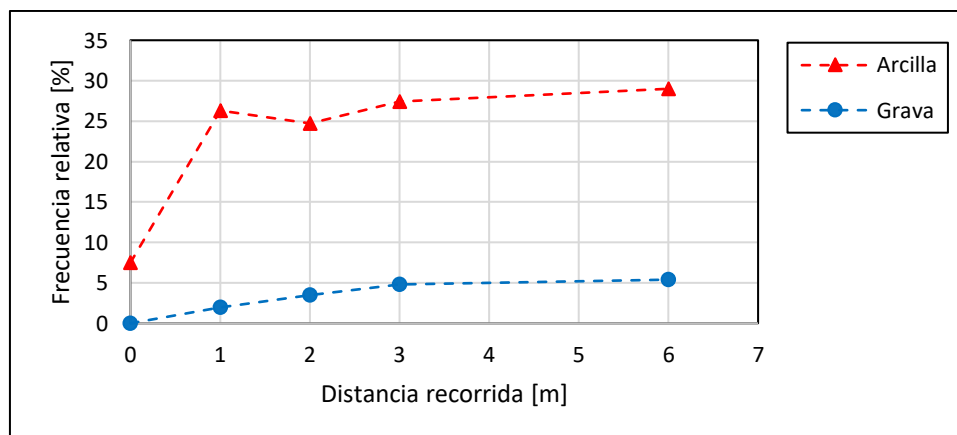
Distancia [m]	Masa de fino [g]	Frecuencia relativa [%]
1	558,00	5,08
2	1.102,68	5,06
3	1.826,70	5,61
6	2.191,60	6,72

*Tabla 5.8. Generación de fino en los ensayos (grava).*

Distancia [m]	Masa de fino [g]	Frecuencia relativa [%]
1	240	2,00
2	850	3,53
3	1.820	4,84
6	2.040	5,39

En algunos casos, el material recuperado de las pruebas fue menor al material inicial. Se supuso que estas pérdidas se atribuyeron a la generación de polvo en suspensión no recuperado y al material retenido en el proceso de tamizado.

En la Figura 5.5 se ejemplifica la generación de material fino con respecto a la distancia recorrida, considerando tamaños de fragmentos menores a 5 mm para ambos materiales. Se puede apreciar que la generación de finos es mayor para el material de arcilla que para el de grava y que a medida que la distancia recorrida aumenta, la generación de finos tiende a disminuir tanto para la arcilla y como para la grava, por la ya pérdida de los bordes angulosos de los fragmentos generado por la abrasión entre ellos, la disminución de tamaños y el aumento en la graduación de las muestras.



*Figura 5.5. Gráfico, generación de material fino con respecto a la distancia recorrida.*

### 5.3. MODELO DE PREDICCIÓN

En la Tabla 5.9 se reportan los parámetros ajustados con los ensayos del modelo de fragmentación. Gracias a ellos se obtuvieron las curvas granulométricas ajustadas y se graficaron junto a las experimentales e iniciales. En las figuras 5.6 y 5.7 se aprecia el buen ajuste de las curvas de los ensayos de 1 m. Los gráficos del ajuste de todos los ensayos se presentan en el Anexo E.4.

Tabla 5.9. Parámetros del modelo de fragmentación.

Ensayo	$S_1^E$	Z1	Z2	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\tau$
Arcilla	35,724	-0,466	-0,049	0,067	3,700	3,900	2,97
Grava	0,009	-81,671	-114,179	0,447	0,110	0,120	0,035

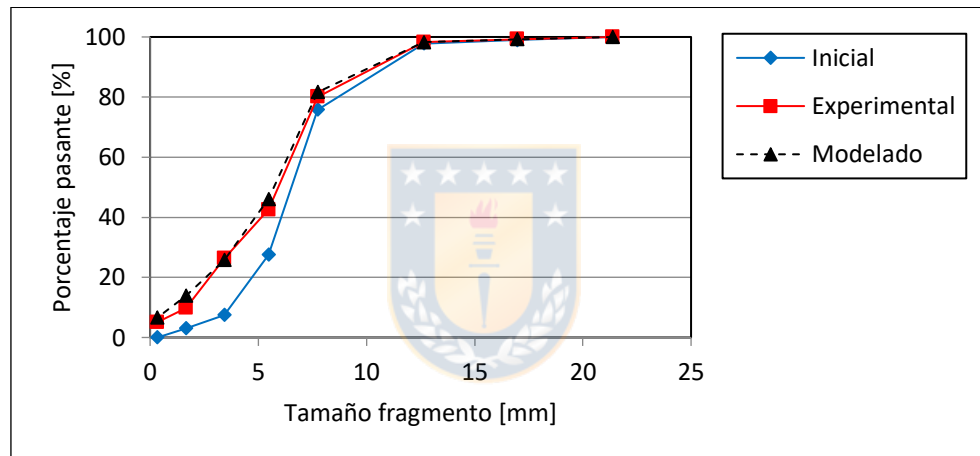


Figura 5.6. Curva granulométrica ajustada, ensayo 1 m (arcilla).

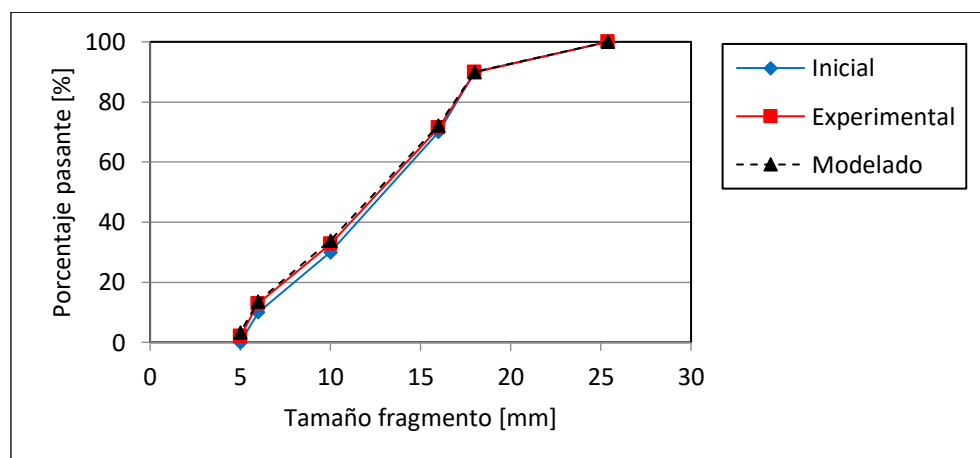


Figura 5.7. Curva granulométrica ajustada, ensayo 1 m (grava).

Los errores cuadráticos medios ( $MSE$ ) se obtuvieron con respecto a las distribuciones experimentales y las modeladas, se presentan en las tablas 5.10 y 5.11 junto a sus respectivos coeficientes de correlación. Los altos valores de  $R^2$ , son debido a que la obtención de los parámetros del modelo se efectuó minimizando el error entre las fracciones acumuladas.

*Tabla 5.10. Bondad de ajuste del modelo (arcilla).*

Distancia recorrida [m]	1	2	3	6
$MSE$ [% <sup>2</sup> ]	6,48	3,62	5,63	6,65
$R^2$ [%]	95,20	97,56	95,73	94,37

*Tabla 5.11. Bondad de ajuste del modelo (grava).*

Distancia recorrida [m]	1	2	3	6
$MSE$ [% <sup>2</sup> ]	0,49	0,03	0,11	0,03
$R^2$ [%]	99,63	99,98	99,91	99,97

En las tablas 5.12 y 5.13 se presentan los esfuerzos verticales medios ( $\bar{\sigma}_v$ ) para las distintas alturas de la columna de material junto a la variación del tiempo de residencia ( $\tau$ ).

*Tabla 5.12. Esfuerzo vertical medio y tiempo de residencia en función de la distancia recorrida (arcilla)*

Distancia recorrida [m]	1	2	3	6
$\bar{\sigma}_v$ [Pa]	2.214	2.227	2.227	2.227
$\tau$ [d]	2,797	2,563	3,035	3,520

*Tabla 5.13. Esfuerzo vertical medio y tiempo de residencia en función de la distancia recorrida (grava)*

Distancia recorrida [m]	1	2	3	6
$\bar{\sigma}_v$ [Pa]	1.766	1.767	1.767	1.767
$\tau$ [d]	0,016	0,025	0,033	0,037

Se puede apreciar que el tiempo de residencia aumentó a medida que la altura de material quebrado aumentó. Mientras el esfuerzo vertical medio se mantuvo casi constante, producto de la baja escala. Se graficó el comportamiento del parámetro  $\tau$  (tiempo de residencia fija) en función de la distancia recorrida. En las figuras 5.8 y 5.9 se ejemplifica este comportamiento con arcilla y grava.

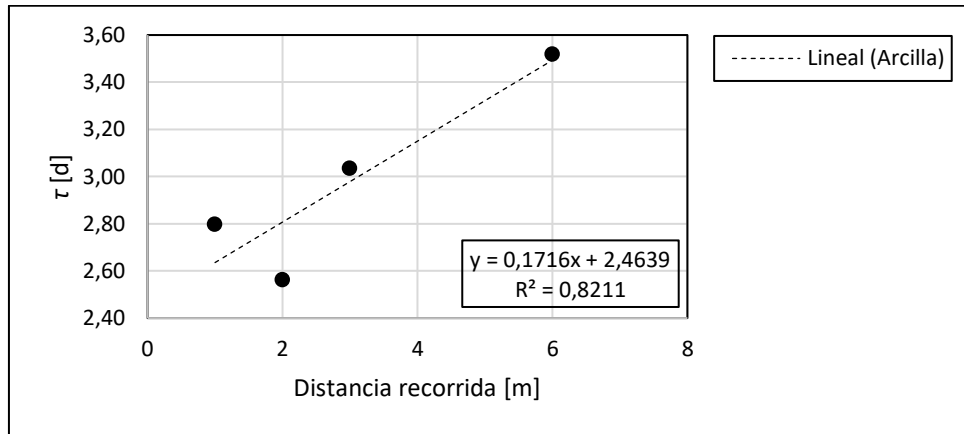


Figura 5.8. Gráfico, tiempo de residencia en función a la distancia recorrida (arcilla).

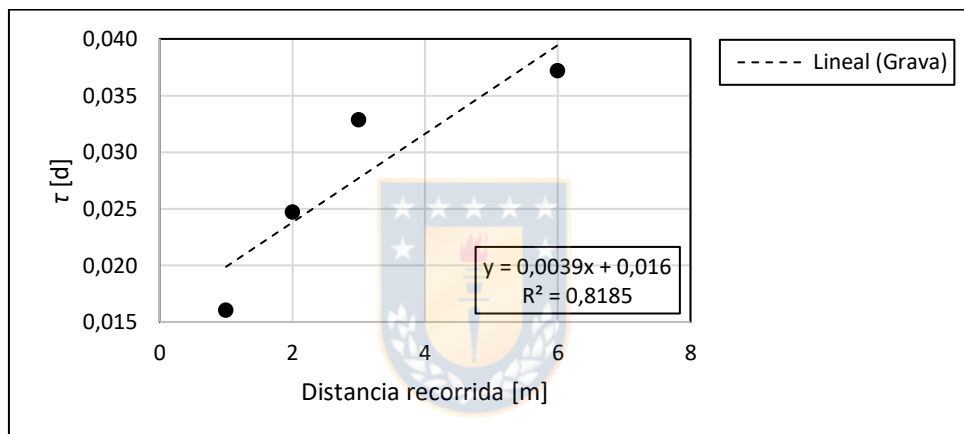


Figura 5.9. Gráfico, tiempo de residencia en función a la distancia recorrida (grava).

El tiempo de residencia aumentó con respecto a la distancia recorrida, esto significa que los fragmentos que se encontraron en las zonas más altas de la columna de quebrado permanecieron más tiempo en el sistema, aumentando así su probabilidad de fragmentarse. Sin embargo, para los ensayos de ambos materiales se utilizó la misma tasa de extracción, por lo cual la fragmentación generada en los ensayos se otorgó en mayor medida a las características de cada material y a la interacción entre sus partículas y las paredes del sistema durante el flujo. No así al tiempo de residencia y a los esfuerzos verticales medios, debido a que estos últimos no variaron significativamente al aumentar la altura de la columna de material quebrado. Además, la magnitud del esfuerzo vertical medio mayor producido en los ensayos de 6 m, es considerablemente menor al índice de resistencia a la carga puntual obtenido experimentalmente para ambos materiales. Cabe destacar que, para obtener los tiempos de residencia a través modelo de predicción, se requirió del



cálculo del esfuerzo vertical medio, el cual considera parámetros como la densidad aparente, el ángulo de fricción interno del material, la fricción del material con las paredes, el radio hidráulico, entre otros, los cuales fueron obtenidos en la caracterización de los materiales y calculados a partir del modelo físico. Por lo cual es fundamental evaluar como estos parámetros influyen en el mecanismo de fragmentación de los distintos materiales.

La fragmentación en los ensayos con arcilla es mayor que los ensayos con grava, por lo cual el modelo de fragmentación determinó valores del tiempo de residencia mayor a las partículas de arcilla, por lo cual se podría suponer una tasa de extracción menor. Mientras que, el esfuerzo vertical medio fue mayor en los ensayos con arcilla a pesar de su baja densidad aparente, debido a su menor ángulo de fricción con las paredes y mayor ángulo de fricción interno. Por lo cual se concluye que, para obtener una menor fragmentación de las partículas del material en las pruebas de transporte, es necesario un menor tiempo de residencia de estos en el sistema, en otras palabras, una mayor tasa de extracción para materiales con menor resistencia, como la arcilla.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 6.1. CONCLUSIONES GENERALES

Gracias a este estudio se logró cuantificar el grado con el cual se fragmentaron distintos materiales granulares con respecto a la distancia recorrida por los fragmentos, a través de pruebas realizadas en piques de traspaso de mineral a escala de laboratorio. Pruebas que se realizaron en materiales granulares de arcilla y grava.

En las pruebas realizadas con material granular de arcilla se observó una mayor fragmentación en los tamaños de partícula menor ( $d_{10}$ ), destacando el ensayo de 6 m en el cual el tamaño característico se redujo un 64,0 % en comparación al tamaño característico inicial, principalmente por la baja resistencia del material y la baja sobrecarga en las pruebas. Por lo que se supuso que la abrasión fue uno de los mecanismos de fragmentación que afectó principalmente a las partículas. Esto se reflejó en los valores de la redondez y la esfericidad de los fragmentos, que aumentaron hasta un 72,87 % y un 13,10 % respectivamente en comparación a los valores iniciales y debido a que la cantidad de material fino aumentó considerablemente en comparación a otras fracciones de tamaño, aumentando de un 7,5 % a un 29,0 % de finos después del ensayo de 6 m. Aumentando la fragmentación de las partículas a medida que la distancia de recorrido en los ensayos aumentó.

En las pruebas realizadas con grava se observó mayor fragmentación en los tamaños de fragmentos menores  $d_{10}$  y  $d_{50}$ , el tamaño característico se redujo 9,5 % y 5,9 % respectivamente, a pesar de su alta resistencia y la baja sobrecarga. No así el  $d_{80}$ , el cual se redujo solo un 1,3 %. Al igual que en los ensayos de arcilla la abrasión fue el único mecanismo de fragmentación de las partículas anteriormente clasificados como sub-angulosos a sub-redondeados. Esto también se confirmó debido a que aumentó la cantidad de material fino a medida que la distancia de recorrido aumentó, alcanzado un valor de 5,4 % para el ensayo de 6 m. Sin embargo, este aumento en la generación de finos se estabilizó con la distancia recorrida, debido a que los fragmentos fueron perdiendo sus bordes angulosos por la abrasión. Cabe destacar que los tamaños más grandes no se fragmentaron porque las discontinuidades de los tamaños grandes de roca requieren partículas de mayor tamaño o tener una menor cantidad de puntos de contacto con otras partículas para fragmentarse.

Cuantitativamente los porcentajes de fragmentación en los ensayos con arcilla fueron mayores a los con grava, por lo que el desplazamiento de la curva de distribución de tamaños inicial a tamaños menores fue mayor, por ello, la fragmentación de las rocas estuvo fuertemente relacionada con sus propiedades, de las cuales se encuentra la resistencia, la porosidad, la esfericidad y la redondez. Resultados que se reflejan en la disminución de los tamaños característicos, el aumento de los coeficientes de uniformidad y curvatura, el aumento de los porcentajes de fragmentación y la generación de finos.

El modelo de fragmentación secundaria permitió obtener buenos ajustes de los ensayos de fragmentación por el flujo de los materiales y predicciones de las distribuciones de tamaños en función de los esfuerzos verticales generados. En las curvas de distribución de tamaños ajustadas se observó que disminuyeron los porcentajes de material pasantes altos y aumentaron los bajos, produciendo curvas más suaves. Se introdujo el valor de los esfuerzos verticales medios para todos los ensayos de ambos materiales, considerando parámetros como la densidad aparente, el ángulo de fricción interno, el ángulo de fricción con las paredes, el radio hidráulico y la altura de la columna de quebrado. Se determinó que la fragmentación depende del esfuerzo vertical producido, la distancia recorrida en los ensayos y el tiempo de residencia de los fragmentos en el sistema. Aumentando la fragmentación con mayores esfuerzos verticales y con mayores tiempos de residencia en ambos materiales. Sin embargo, como los esfuerzos verticales no variaron significativamente entre cada ensayo, este parámetro no influyó en mayor medida a las predicciones, por lo cual se otorgó la fragmentación generada a las características del material granular y el flujo en el modelo a escala.

Dado a que los estudios se basaron en un modelo a escala de laboratorio de piques de traspaso de mineral, los resultados de las pruebas podrían simular los efectos ocurridos en piques a escala real y así aportar en un futuro cercano al desarrollo operacional en la industria minera con respecto al transporte de material entre niveles.

En los piques de traspaso de mineral con grandes distancias de recorrido, se podría esperar la generación de una cantidad significativa de material fino (particularmente en materiales de baja resistencia) que podría implicar problemas operacionales producto de la generación de arcos cohesivos, la reducción de la sección transversal del pique, aumento del polvo en suspensión o en el

caso de presencia de agua, generación de barro. Por otro lado, haciendo un paralelo con estudios donde se analiza el flujo de material, como en las columnas de extracción en minería *caving*, la abrasión relacionada con la distancia recorrida del material se identifica como uno de los mecanismos presentes en la fragmentación secundaria, por lo que se puede relacionar el comportamiento de estos materiales en las pruebas con estudios del comportamiento de roca mineral en columnas de extracción.

## 6.2. RECOMENDACIONES

Este estudio, se basó en la cuantificación de la fragmentación por el flujo de distintos materiales granulares a partir de la construcción de piques a escala de laboratorio. Por lo cual, el poder reflejar el comportamiento de los materiales en piques a escala es fundamental. Para esto se recomienda utilizar fragmentos de roca mineral explotable en las pruebas, que simulen la fragmentación generada en piques a gran escala o utilizar materiales con propiedades distintas para generar nuevas bases de datos y poder compararlas con las ya obtenidas. Se sugiere cuantificar el efecto de la presencia de agua en los ensayos de fragmentación por flujo, incorporar el efecto de la descarga de mineral en piques vacíos, cuantificar la generación de polvo en suspensión y los cambios de energía generados en el sistema. Además, poder agregar al modelo físico a escala de laboratorio de los piques de traspaso de mineral variaciones en el ángulo de inclinación y estructuras de control de flujo. Finalmente, se recomienda que el modelo de conminución ajustado se represente a escala real y se pueda comparar con datos de campo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] LAUBSCHER, D. H. *A practical manual on block caving*. For the International Caving Study. Brisbane: JKMRC and Itasca Consulting Group, 2000.
- [2] BROWN, E.T. *Block Caving Geomechanics: International Caving Study 1997-2004*. The University of Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007.
- [3] PIERCE, M. E. *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*. PhD thesis, The University of Queensland, Australia, 2010.
- [4] SAINSBURY, B. Sensitivities in the numerical assessment of cave propagation. *Caving 2010*. pp. 523-535.
- [5] OSSES, F. *Ensayos de carga multicontacto para el estudio de ruptura de roca primaria en mina El Teniente*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [6] GÓMEZ, R. CASTRO, R.L., CASALI, A., PALMA, S., HEKMAT, A. A comminution model for secondary fragmentation assessment for block caving. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017.
- [7] BRADY, B. BROWN, E. Rock strength and deformability. *Rock mechanics for underground mining*. 3rd ed. 2004, pp. 85-139.
- [8] MCDOWELL, G. BOLTON, M. ROBERTSON, D. The fractal crushing of granular materials. *J. Mech. Phys. Solids*. 1996, vol. 44, pp. 2079-2102.
- [9] MCDOWELL, G. HUMPHREYS, A. Yielding of granular materials. *Granular Matter*. 2002.
- [10] DORADOR, L. EBERHARDT, E. ELMO, D. NORMAN, B. AGUAYO, A. Assessment of broken ore density variation in a block cave drawn column as a function of fragment size distributions and fines migration. *Caving 2014, 3rd inter. symposium on block and sublevel caving*. Santiago, Chile: 2014, pp. 109-117.
- [11] SALAS, M. *Efecto de la distancia del pique de traspaso de la fragmentación de la roca*. Informe práctica profesional, Universidad de Concepción, Chile, 2018.
- [12] BEUS, M. J. et al. Design of ore passes. HUSTRULID, W. BULLOCK, R. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. 2001, pp. 627-634.
- [13] BLOSS, M. et al. Underground ore movement. DARLING, P. *SME Mining engineering handbook*. 3rd ed. United States of America: 2011, pp. 1271-1294.
- [14] HADJIGEORGIOU, J. et al. Ore pass practice in Canadian mines. *The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2005, vol. 105, pp. 809-816.
- [15] CODELCO, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos. *Proyecto Nuevo Nivel Mina División El Teniente* [en línea] [fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en:

[https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20110706/asocfile/20110706130724/presentacion\\_expomin\\_16\\_abril\\_2010\\_rev\\_0.pdf](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110706/asocfile/20110706130724/presentacion_expomin_16_abril_2010_rev_0.pdf)

- [16] BLANCO, B. *Análisis de sismicidad inducida período 2012-2013 en mina subterránea Río Blanco, áreas 17-18 y proyecciones para sistema de monitoreo microsísmico en proyecto minería continua en CODELCO División Andina*. Memoria de título de Geofísico, Universidad de Concepción, Chile, junio 2013.
- [17] PEELE, R. *Mining Engineers' Handbook*. 3rd ed. 1947, vol. 1, p. 403.
- [18] CLINE, Joe. Construction of underground openings and related infrastructure. DARLING, P. *SME Mining engineering handbook*. 3rd ed. United States of America: 2011, pp. 1223-1254.
- [19] RAJ TATIYA, R. Excavation in upward direction – raising. *Surface and underground excavations – methods, techniques and equipment*. London, UK: Taylor & Francis Group LLC, 2005, pp. 331-354.
- [20] BARTON, N., LIEN, R. y LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 1974, vol. 6, pp. 189–236.
- [21] HAMBLEY, D. F. PARISEAU, W. G. SINGH, M. M. Guidelines for open-pit ore pass design. Contract Report US Bureau of Mines. 1983.
- [22] STACEY, T. R., ERASMUS, B. J. Setting the scene: rockpass accident statistics and general guidelines for the design of rockpasses. *South African Inst. of Mining and Metallurgy*. 2005, vol. 105, no. 11, pp. 745-752.
- [23] HADJIGEORGIOU, J., LESSARD, J. F. Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007.
- [24] HUSTRULID, W. A. CHANGSHOU, S. Some remarks on ore pass design guidelines, quantification and analysis of ore pass/draw point flow problems, leading to the development of design rule of thumbs – final report. *Laboratory ore pass studies in support of design guidelines*. USA: Dept. of Mining Engineering, University of Utah, Graham Mustoe Division of Eng., Colorado School of Mines: 2004, Unpublished.
- [25] KVAPIL, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bin mines-II. Coarse material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1965.
- [26] JENIKE A. W. Gravity flow of bulk solids. *Bulletin no. 108*. USA: The University of Utah, 1961.
- [27] MOGI, G. YAMATOMI, J. ADACHI, T. An expert system controlling ore flow in large scale orepass systems. *4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. Calgary: 1995, pp. 169-175.
- [28] MORRISON, D.M. KAZAKIDIS, V.N. Orepasses in Burst-Prone Ground: Current Practice and Alternatives. *12th Mine Operators Conference*. Timmins: CIM, 1995.

- [29] STACEY, T.R. SWART, A.H. Investigation into Drawpoints, Tips Orepasses and Chutes. *Report to the Safety in Mines Research Advisory Committee*. 1997, Project OTH 303, vol. 1.
- [30] O'TOOLE, D., Ernest Henry Mine Review of Orepass Flow and Longevity. 2014, Internal Publication.
- [31] BUNKER, K. A., CAMPBELL, A. D. et al. Guidelines for ore pass design in a sublevel cave mine. *Design methods in underground mining*. Perth, Australia: Australian center for geomechanics, 2015.
- [32] NPCS Board of consultants & Engineers. Plastic Moulding by Machinery. *The Complete Technology Book on Bricks, Cement and Asbestos*. 2007.
- [33] MARSAL, R. J. Large Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1967, ASCE, vol. 93, pp. 27-43.
- [34] BRIDGWATER, J. et al. Particle attrition due to shearing – the effects of stress, strain and particle shape. *Chemical Engineering Science*. 2003.
- [35] CID, F. *Lab. de Mecánica de Rocas*. Informe práctica profesional, Universidad de Concepción, junio 2019.
- [36] ASTM. D854-02, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, PA: 2002.
- [37] CHO, G. DODDS, J. SANTAMARINA, C. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006.
- [38] ASTM. D5731-95, Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications. West Conshohocken, PA: 1995.
- [39] NEDDERMAN, R. M. The method of differential slices. *Statics and Kinematics of Granular Material*. 1992, pp. 84-126.
- [40] ASTM. D3080/D3080M-11, Standard test method for direct shear test of solid under consolidated drained conditions. West Conshohocken, PA: 2011.
- [41] CRAIG, R. F. Basic characteristics of soils. *Craig's Soil Mechanics*. 7th ed. 2004, pp. 1-29.
- [42] AFANADOR, G. GUERRERO, G. MONROY, R. Mechanical & physical properties of solid, masonry ceramic bricks. Bogotá: Ciencia e ingeniería neogranadina, 2012, vol. 22, pp. 43-58.
- [43] LEÓN, L. HERNÁNDEZ, M. Comparing the values of compressive strength of concrete at the age of 7 and 28 days. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*. Cuba: 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1-9.

## ANEXOS

---

### ANEXO A. DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### A.1. Descripción de Materiales

**Grava.** Se denomina grava a partículas granulares de material pétreo, formadas por clastos de 2 mm a 64 mm de tamaño, originados a través de roca triturada en procesos mecánicos o naturales. Compuesto principalmente por rocas como caliza, granito, dolomita, basalto, arenisca, cuarzo y cuarcita. Las cuales poseen propiedades distintas por lo que es difícil definir propiedades generales.

**Arena.** Conformada por partículas de 0,063 mm a 2 mm de tamaño y cuya composición al igual que la grava varía de acuerdo con las características de las rocas del área de procedencia local, predominando principalmente la sílice en forma de cuarzo. Sin embargo, su granulometría demasiado pequeña, dificulta la fragmentación de las rocas.

**Cuarzo.** Es un mineral compuesto por dióxido de silicio o sílice, incoloro en estado puro pero que puede adoptar numerosas tonalidades si lleva impurezas, posee una dureza de valor 7 en la escala de Mohs por lo que puede rayar a cerámicas comunes, su densidad es de 2.650 kg/m<sup>3</sup> y cristaliza en el sistema trigonal por lo que no es susceptible a exfoliación. Generalmente se utiliza como piedra ornamental por su atractivo brillo grasiento, por lo que su venta es muy común.

**Caliza.** Es una roca sedimentaria compuesta principalmente por calcita, cuya dureza en la escala de Mohs tiene un valor de 3 y cuya densidad es de 2.710 kg/m<sup>3</sup>. En el ámbito de áridos se denomina piedra caliza y calcinada se denomina cal. La caliza se utiliza generalmente como material de construcción u ornamental en forma de sillares o placas de recubrimiento.

**Dolomita.** Es un mineral compuesto por carbonato de calcio y magnesio, cuya dureza en la escala de Mohs varía de 3,5 a 4 y cuya densidad varía de 2.860 kg/m<sup>3</sup> a 3.100 kg/m<sup>3</sup>. Proscrita como mineral en el *clinker* del hormigón, sin embargo, como árido de hormigón valdría siempre que se analice su reacción con el cemento.

**Granito.** Es una roca ígnea plutónica formada principalmente por cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y mica. Utilizado como recubrimiento de edificios, monumentos, cocinas, cimentación, embalses, entre otros. Debido a su alta densidad y resistencia al desgaste y compresión.



**Cuarcita.** Es una roca metamórfica con alto contenido de cuarzo. Se utiliza para procesos metalúrgicos y fabricación de ladrillos de sílice, ferrosilicio, arena, entre otros. Además, se utiliza como balasto de caminos y ferrovías, como roca ornamental y esculturas.

**Basalto.** Es una roca ígnea volcánica, rico en hierro y magnesio. El basalto masivo (sin vesículas) tiene una densidad de  $2.800 \text{ kg/m}^3$  a  $2.900 \text{ kg/m}^3$  y dureza de 4,8 a 6,5 en la escala de Mohs. Hoy en día se utilizan fibras artificiales de basalto para reforzar estructuras de hormigón.

**Ladrillo de Arcilla.** Es un material de construcción normalmente cerámico y con forma ortoédrica. Se elabora a partir de arcilla, que es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina, caolín, montmorillonita e illita, cocida a altas temperaturas. Los ladrillos se caracterizan por tener una gran resistencia a la compresión, aunque no así a la flexión, cuyas resistencias van de 1 MPa a 1,4 MPa. Sin embargo, poseen una gran resistencia a temperaturas altas, lluvia y viento, aunque estas características dependen del porcentaje de materiales a usar en su proceso de elaboración [42].

**Adoquines o Pastelones de Hormigón.** Son bloques ortoédricos hechos generalmente de piedra labrada, hormigón o concreto. El hormigón o concreto es el material resultante de la mezcla de cemento u otro aglomerante con áridos y agua y cuya principal característica es la resistencia al esfuerzo de compresión, aunque no así frente a otros tipos de esfuerzos. Por lo que son utilizados principalmente para la pavimentación de calles [43].

## ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### B.1. Datos del Cálculo de la Densidad

*Tabla B.1. Datos de las pruebas del método por desplazamiento de líquido.*

Set	Masa [g]	Volumen desplazado [mL]	Densidad [ $\text{g/cm}^3$ ]
1	150,14	55	2,73
2	150,02	53	2,83
3	150,47	55	2,74
4	150,17	56	2,68
5	499,61	190	2,63
6	499,59	190	2,63
7	499,68	185	2,70
8	499,56	190	2,63

## B.2. Procedimientos Picnometría

### **Preparación del Material.**

1. Se coloca una muestra de 10 g del sistema particulado en un vaso de precipitado de 25 mL y se pone a secar a  $110 \pm 5$  °C. Posteriormente se deja enfriar a temperatura ambiente y se transfiere a un recipiente con aislamiento.

2. Se llena una piseta con agua destilada y se coloca en el recipiente con aislamiento. Se coloca el vaso de precipitado de 250 mL con agua a temperatura ambiente en un desecador, el cual se debe cerrar y aplicar vacío por 5 minutos.

3. Luego se debe transferir el vaso al recipiente con aislamiento.

4. Finalmente se debe mantener el picnómetro, el embudo, la piseta, el vaso de precipitado con agua y el material en un recipiente con aislamiento por 3 horas antes de hincar la medida.

### **Calibración del Picnómetro.**

1. Se debe pesar el picnómetro en una balanza con sensibilidad de 0,01 g y repetirlo 4 veces.

2. Anotar la masa y calcular el promedio y su respectiva desviación estándar, la cual debe ser menor o igual a 0,02 g. Si fuese mayor, hay que masar dos veces más.

3. Llenar el picnómetro con agua desaireada hasta la marca señalada y pesar las veces que sea necesario, calculando el promedio. La masa de agua se determina restando el peso total del picnómetro con agua menos el peso del picnómetro.

4. Finalmente, calcular el volumen del picnómetro dividiendo la masa de agua por su densidad.

### **Medición de Densidad.**

1. Se debe masar el picnómetro vacío, colocar el embudo en el picnómetro y verter la muestra de 10 g. Con la piseta se debe verter agua por el embudo hasta que todo sólido haya pasado y agregar agua hasta la mitad de su volumen para después agitar para formar una pulpa.

2. Posteriormente se debe colocar el picnómetro en el desecador y conectar el vacío por 1 hora, agitando la pulpa cada 15 minutos.

3. Finalmente se debe llenar el picnómetro con agua desaireada hasta la marca, mediante un embudo colocado justo sobre la superficie de la pulpa y subirlo a medida que el picnómetro se llena. Una vez lleno y con el tapón capilar puesto, este se debe masar.

### B.3. Procedimiento Densidad Aparente

1. Preparar tres muestras de aproximadamente 50 g, cada una de un material particulado con granulometrías de malla #8 a #10, #28 a #35 y 65# a #100 respectivamente.

2. Pesar una de las muestras y verterla cuidadosamente en una probeta de 100 mL, golpeando suavemente la base de la probeta para homogenizar el material y dejar su superficie horizontal.

3. Finalmente se debe leer el volumen de la probeta y calcular la densidad aparente como la masa de la muestra dividida por el volumen total ocupado (sólido más poros).

### B.4. Ensayos de Carga Puntual

#### Procedimiento del Ensayo.

1. Se ubican los testigos entre las puntas cónicas de la prensa hidráulica lo más céntrica posible y se procedió a ajustarlo a su medida con la bomba hidráulica

2. Una vez el testigo queda sujeto en la prensa, medir la distancia entre los puntos de contacto de la platina ( $D$ ) y aplicar presión de forma cuidadosa hasta lograr la falla de la muestra. El ensayo es válido solo si la rotura del testigo es por la mitad.

3. Finalmente se registra la presión aplicada entregada por el manómetro conectado con la prensa hidráulica y la dimensión  $D'$  medido en el instante de la falla.

#### Requerimientos del Ensayo.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (*ASTM – American Society for Testing and Materials*) ha establecido el procedimiento básico para realizar y calcular el índice de resistencia a la carga puntual (*ASTM D5731*).

1. Este método es aplicable a rocas de resistencia media, es decir, tener una resistencia a la compresión sobre los 15 MPa.

2. Para llevar a cabo un ensayo de carga puntual el diámetro de las muestras no debe ser inferior a 30 mm ni mayor a 85 mm.

3. Para realizar ensayos de muestras irregulares se debe tener en cuenta que la razón entre espesor y ancho mínimo del testigo debería estar entre 1/3 y 1. Además, la distancia donde se aplica la carga debería ser a lo menos 0,5 veces el ancho mínimo.

4. El Índice de Resistencia a la Carga Puntual ( $I_s$ ) se puede calcular a través de la Ecuación 19.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (19)$$

Donde  $I_s$  es el índice de resistencia a la carga puntual [MPa],  $P$  es la carga de falla [N],  $D_e$  es el diámetro del núcleo equivalente [mm] y es dado por  $D_e^2$  igual a  $D^2$  para muestras diametrales en [mm<sup>2</sup>] o  $D_e^2$  igual a  $4 \cdot A \cdot \pi$ , para muestras irregulares, axiales o bloques. Donde  $A$  es igual a  $W \cdot D$  (área de la sección transversal mínima) donde,  $D$  es la distancia entre los puntos de contacto de la platina y  $W$  es el ancho más pequeño del espécimen, perpendicular a la dirección de carga. Si los lados no son paralelos, se calcula  $W$  como  $(W_1 + W_2)^2$ .

Además, hay que considerar que, si se produce una penetración significativa en la platina, la dimensión  $D$  que se utilizará para calcular la resistencia de carga puntual debe ser el valor  $D'$  medido en el instante de falla, que será menor que el valor inicial  $D$ . La dimensión en el fallo siempre se puede utilizar como alternativa al valor inicial y se prefiere.

5. Los valores modificados de  $D_e$  se pueden calcular a través de la Ecuación 20.

$$D_e^2 = D \cdot D' \text{ (para núcleos)} = \frac{4 \cdot W \cdot D'}{\pi} \text{ (otras formas)} \quad (20)$$

El índice de resistencia de carga puntual determinado por el ensayo debe corregirse al diámetro equivalente estándar ( $D_e$ ) de 50 mm. El diámetro de 50 mm ha sido el diámetro preferido, ya que dicho diámetro está asociado a la designación de calidad de roca ( $RQD$ ).

6. La corrección del  $I_s$  se puede obtener a través de la Ecuación 21.

$$I_{S50} = F \cdot I_s \quad (21)$$

Donde  $F$  es el Factor de corrección de tamaño, dado por la Ecuación 22.

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (22)$$

### Datos de los Ensayos de Carga Puntual.

Tabla B.2. Datos obtenidos de los ensayos de carga puntual (arcilla).

N° Ensayo	P [kN]	W [mm]	D' [mm]
1	1,2	60	45,0
2	1,19	65	40,0
3	0,93	66	39,5
4	1,02	68	38,5
5	0,92	64	41,0
6	1,24	68	42,5
7	1,13	67	43,0
8	1,25	74	41,0
9	0,56	68	44,5
10	0,81	72	38,0
11	0,76	72	40,5
12	0,92	68	38,0
13	0,82	64	42,5
14	0,67	67	43,5
15	1,18	66	41,5
16	1,18	69	43,5

Tabla B.3. Datos calculados de los ensayos de carga puntual (arcilla).

N° Ensayo	$De^2$ [mm]	$I_s$ [MPa]	F	$I_s(50)$ [MPa]
1	3438	0,35	0,95	0,33
2	3310	0,36	0,90	0,33
3	3319	0,28	0,90	0,25
4	3333	0,31	0,89	0,27
5	3341	0,28	0,91	0,25
6	3680	0,34	0,93	0,31
7	3668	0,31	0,93	0,29
8	3863	0,32	0,91	0,30
9	3853	0,15	0,95	0,14
10	3484	0,23	0,88	0,21
11	3713	0,20	0,91	0,19
12	3290	0,28	0,88	0,25
13	3463	0,24	0,93	0,22
14	3711	0,18	0,94	0,17
15	3487	0,34	0,92	0,31
16	3822	0,31	0,94	0,29

Tabla B.4. Datos obtenidos antes de los ensayos de carga puntual (grava).

Muestra	$W_2$ [mm]	$W_1$ [mm]	L [mm]	D [mm]
1	27	19	17	15,0
2	37	30	17	26,0
3	44	45	20	8,0

4	30	26	10	13,5
5	27	30	15	12,0
6	25	24	13	11,5
7	30	22	12	9,5
8	27	23	8	11,0
9	24	22	11	12,0
10	21	19	11	14,5
11	26	21	11	10,5
12	29	19	8	9,5
13	22	21	12	9,5
14	25	24	11	7,0
15	27	25	11	6,5

*Tabla B.5. Datos calculados de los ensayos de carga puntual (grava).*

Muestra	W [mm]	D' [mm]	P [kN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Is [MPa]	F	Is(50) [MPa]
1	23,0	13,0	6,57	380,70	19,51	17,26	0,655	11,30
2	33,5	24,0	10,43	1023,68	32,00	10,19	0,818	8,33
3	44,5	7,0	4,38	396,61	19,92	11,04	0,661	7,30
4	28,0	12,5	6,71	445,63	21,11	15,06	0,678	10,21
5	28,5	10,0	5,08	362,87	19,05	14,00	0,648	9,07
6	24,5	11,0	4,87	343,14	18,52	14,19	0,640	9,08
7	26,0	8,5,0	6,45	281,39	16,77	22,92	0,612	14,02
8	25,0	10,5	3,29	334,14	18,28	9,84	0,636	6,26
9	23,0	11,5	4,30	336,77	18,35	12,77	0,637	8,13
10	20,0	13,5	8,29	343,77	18,54	24,11	0,640	15,43
11	23,5	9,5	8,03	284,25	16,86	28,25	0,613	17,32
12	24,0	8,0	5,89	244,46	15,64	24,09	0,593	14,28
13	21,5	8,5	6,50	232,68	15,25	27,93	0,586	16,37
14	24,5	6,5	3,19	202,76	14,24	15,73	0,568	8,94
15	26,0	5,5	4,87	182,07	13,49	26,75	0,555	14,84

## B.5. Ensayos de Corte Directo

### Procedimiento del Ensayo.

1. En primer lugar, preparar la muestra fuera el equipo, mientras se posiciona la caja de corte y se configura el equipo.

2. Se ubica la muestra en el equipo, donde se configura una velocidad de desplazamiento de 0,2 mm/min y un tiempo de 70 min por ensayo para las pruebas realizadas de arcilla y velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min y tiempo de 20 min para el material granular de grava.

3. La medición de los manómetros se tomó cada minuto, registrando el desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y la deformación del disco. Con los datos obtenidos, se procedió a determinar cuál fue la deformación máxima de cada ensayo y se determinó el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) en el plano de falla a partir de las ecuaciones 23 y 24.

$$\sigma_n = \frac{10 \cdot m \cdot g \cdot 10^{-3}}{A} \quad (23)$$

Donde,  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal en kPa,  $m$  es la carga en kg,  $g$  es la aceleración de gravedad en  $m/s^2$  y  $A$  el área de la caja de corte en  $m^2$ .

$$\tau = \frac{1,6282 \cdot \varepsilon + 0,0052}{0,01} \quad (24)$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo de corte en kPa y  $\varepsilon$  es la deformación en mm.

Gracias a las ecuaciones 27 y 28, se puede graficar el esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, obteniendo así la envolvente de falla de Mohr-Coulomb (Ecuación 25). Esta envolvente de falla es presentada a continuación, la cual se puede obtener graficando los pares de puntos de esfuerzo de corte y normal, utilizando una línea de tendencia. Donde,  $C$  es la cohesión [kPa],  $\sigma_n$  el esfuerzo normal [kPa] y  $\phi$  el ángulo de fricción interna [°].

$$\tau = C + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (25)$$

### Datos de los Ensayos de Corte Directo.

*Tabla B.6. Datos obtenidos y calculados de los ensayos de corte (arcilla).*

Ensayo	Carga [kg]	Deformación [mm]	Desplazamiento horizontal [mm]	Desplazamiento vertical [mm]	Esfuerzo normal [kPa]	Esfuerzo de corte [kPa]
1	1	0,185	3,68	0,67	10	30,64
2	5	0,410	6,64	0,00	50	67,28
3	10	0,715	11,47	-0,68	100	118,57

*Tabla B.7. Datos obtenidos y calculados de los ensayos de corte (grava).*

Ensayo	Carga [kg]	Deformación [mm]	Desplazamiento horizontal [mm]	Desplazamiento vertical [mm]	Esfuerzo normal [kPa]	Esfuerzo de corte [kPa]
1	5	0,320	7,29	0,46	49,0	52,63
2	7	0,500	7,64	0,16	68,6	81,94
3	9	0,570	6,77	0,05	88,2	93,33
4	11	0,550	8,04	-0,05	107,8	90,08
5	13	0,740	7,69	0,11	127,4	121,01

6	13	0,850	8,62	0,08	127,4	138,93
7	15	0,930	6,11	-0,06	147,0	151,95
8	17	0,840	8,74	-0,13	166,6	137,30
9	19	1,065	8,01	-0,08	186,2	173,93
10	25	1,275	8,19	-0,08	245,0	208,13

*Tabla B.8. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 1 kg (arcilla).*

Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]	Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]
1	0,035	0,014	0	31	0,165	5,88	1,2
2	0,04	0,03	0,02	32	0,162	6,09	1,26
3	0,05	0,45	0,04	33	0,16	6,28	1,295
4	0,06	0,68	0,055	34	0,16	6,495	1,335
5	0,065	0,815	0,085	35	0,16	6,705	1,37
6	0,075	1,02	0,12	36	0,155	6,905	1,405
7	0,085	1,18	0,15	37	0,152	7,11	1,44
8	0,09	1,36	0,185	38	0,15	7,31	1,475
9	0,1	1,56	0,215	39	0,145	7,55	1,51
10	0,11	1,75	0,255	40	0,145	7,74	1,545
11	0,12	1,985	0,29	41	0,142	7,92	1,57
12	0,13	2,12	0,318	42	0,14	8,14	1,6
13	0,14	2,305	0,355	43	0,138	8,34	1,63
14	0,15	2,49	0,39	44	0,135	8,545	1,66
15	0,155	2,69	0,435	45	0,132	8,75	1,68
16	0,165	2,88	0,475	46	0,132	8,95	1,7
17	0,17	3,065	0,52	47	0,132	9,15	1,72
18	0,175	3,75	0,567	48	0,13	9,35	1,75
19	0,18	3,46	0,61	49	0,128	9,555	1,775
20	0,185	3,68	0,67	50	0,125	9,77	1,805
21	0,185	3,85	0,705	51	0,125	9,95	1,825
22	0,185	4,045	0,75	52	0,125	10,155	1,84
23	0,185	4,25	0,81	53	0,122	10,36	1,86
24	0,185	4,455	0,86	54	0,12	10,56	1,885
25	0,18	4,62	0,91	55	0,118	10,77	1,91
26	0,18	4,86	0,95	56	0,118	10,96	1,935
27	0,178	5,07	1	57	0,12	11,16	1,955
28	0,178	5,27	1,05	58	0,12	11,36	1,98
29	0,175	5,48	1,1	59	0,13	11,48	2
30	0,17	5,69	1,15				

*Tabla B.9. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 5 kg (arcilla).*

Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]	Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]
1	0,04	0,09	-0,025	31	0,395	5,65	-0,05
2	0,06	0,21	-0,05	32	0,395	5,85	-0,04



3	0,1	0,27	-0,085	33	0,395	6,05	-0,03
4	0,12	0,55	-0,11	34	0,395	6,24	-0,021
5	0,15	0,72	-0,12	35	0,401	6,45	-0,01
6	0,17	0,9	-0,14	36	0,41	6,64	0
7	0,185	1,07	-0,15	37	0,41	6,84	0,01
8	0,2	1,24	-0,155	38	0,41	7,04	0,015
9	0,21	1,44	-0,155	39	0,41	7,23	0,015
10	0,225	1,52	-0,155	40	0,41	7,45	0,02
11	0,24	1,69	-0,155	41	0,41	7,65	0,028
12	0,25	1,98	-0,155	42	0,402	8	0,034
13	0,26	2,17	-0,155	43	0,4	8,07	0,04
14	0,275	2,35	-0,155	44	0,4	8,27	0,045
15	0,285	2,55	-0,155	45	0,4	8,47	0,05
16	0,295	2,72	-0,155	46	0,4	8,67	0,054
17	0,305	2,93	-0,152	47	0,395	8,88	0,06
18	0,31	3,11	-0,15	48	0,39	9,08	0,07
19	0,32	3,3	-0,142	49	0,39	9,28	0,075
20	0,33	3,5	-0,139	50	0,39	9,5	0,078
21	0,335	3,69	-0,132	51	0,395	9,69	0,07
22	0,34	3,88	-0,129	52	0,395	9,99	0,085
23	0,35	4,07	-0,12	53	0,395	10,08	0,09
24	0,355	4,26	-0,11	54	0,39	10,29	0,091
25	0,36	4,47	-0,1	55	0,385	10,5	0,095
26	0,37	4,47	-0,095	56	0,385	10,7	0,098
27	0,375	4,87	-0,085	57	0,38	11,1	0,099
28	0,38	5,05	-0,08	58	0,38	11,3	0,099
29	0,385	5,24	-0,07	59	0,375	11,47	0,099
30	0,395	5,45	-0,055	60	0,38	11,47	0,099

Tabla B.10. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 10 kg (arcilla).

Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]	Tiempo [min]	Def. [mm]	Despl. H. [mm]	Despl. V. [mm]
1	0,05	0,07	-0,14	31	0,615	5,41	-0,445
2	0,11	0,18	-0,17	32	0,62	5,6	-0,45
3	0,16	0,32	-0,2	33	0,625	5,81	-0,455
4	0,195	0,48	-0,22	34	0,63	5,99	-0,46
5	0,23	0,65	-0,25	35	0,635	6,18	-0,47
6	0,26	0,8	-0,27	36	0,645	6,4	-0,475
7	0,29	0,97	-0,29	37	0,65	6,58	-0,48
8	0,31	1,15	-0,31	38	0,655	6,67	-0,48
9	0,33	1,31	-0,32	39	0,66	6,965	-0,488
10	0,355	1,5	-0,33	40	0,665	7,16	-0,49
11	0,375	1,67	-0,34	41	0,675	7,35	-0,492
12	0,39	1,86	-0,36	42	0,68	7,55	-0,495
13	0,405	2,03	-0,37	43	0,685	7,76	-0,495
14	0,42	2,21	-0,375	44	0,68	7,96	-0,505

15	0,435	2,4	-0,385	45	0,68	8,16	-0,515
16	0,45	2,59	-0,39	46	0,68	8,38	-0,53
17	0,46	2,78	-0,39	47	0,68	8,59	-0,54
18	0,475	2,96	-0,39	48	0,68	8,76	-0,545
19	0,49	3,13	-0,39	49	0,685	8,96	-0,555
20	0,495	3,33	-0,4	50	0,685	9,17	-0,57
21	0,505	3,51	-0,45	51	0,685	9,36	-0,58
22	0,52	3,7	-0,41	52	0,685	9,56	-0,594
23	0,535	3,89	-0,41	53	0,69	9,75	-0,6
24	0,55	4,06	-0,418	54	0,691	9,95	-0,605
25	0,565	4,25	-0,42	55	0,695	10,15	-0,615
26	0,57	4,455	-0,425	56	0,698	10,34	-0,62
27	0,58	4,65	-0,43	57	0,699	10,54	-0,63
28	0,59	4,82	-0,431	58	0,7	10,74	-0,64
29	0,6	5,02	-0,431	59	0,7	10,93	-0,65
30	0,609	5,51	-0,44	60	0,705	11,12	-0,65

Tabla B.11. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 5 kg (grava).

Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento horizontal [mm]	Deformación vertical [mm]	$\tau$ [kPa]
1	0,07	0,10	-0,02	11,92
2	0,14	0,50	-0,07	23,32
3	0,17	0,90	-0,09	28,20
4	0,20	1,35	-0,09	33,09
5	0,23	1,83	-0,07	37,97
6	0,25	2,31	-0,04	41,23
7	0,26	2,79	-0,01	42,86
8	0,28	3,28	0,02	46,11
9	0,29	3,76	0,06	47,74
10	0,30	4,28	0,11	49,37
11	0,31	4,76	0,16	51,00
12	0,32	5,25	0,22	52,63
13	0,32	5,75	0,29	52,63
14	0,32	6,26	0,35	52,63
15	0,32	6,78	0,41	52,63
16	0,32	7,29	0,46	52,63
17	0,3	7,80	0,51	49,37
18	0,31	8,32	0,56	51,00
19	0,31	8,82	0,61	51,00
20	0,3	9,32	0,65	49,37

Tabla B.12. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 7 kg (grava).

Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento horizontal [mm]	Deformación vertical [mm]	$\tau$ [kPa]
1	0,1	0,07	-0,01	16,80

2	0,18	0,45	-0,09	29,83
3	0,245	0,88	-0,14	40,41
4	0,28	1,35	-0,18	46,11
5	0,32	1,82	-0,2	52,63
6	0,35	2,25	-0,21	57,51
7	0,38	2,73	-0,2	62,40
8	0,41	3,22	-0,19	67,28
9	0,42	3,67	-0,17	68,91
10	0,445	4,15	-0,14	72,98
11	0,46	4,63	-0,11	75,42
12	0,47	5,13	-0,07	77,05
13	0,48	5,63	-0,03	78,68
14	0,485	6,12	0,02	79,49
15	0,49	6,63	0,07	80,31
16	0,5	7,12	0,12	81,94
17	0,5	7,64	0,16	81,94
18	0,48	8,15	0,21	78,68
19	0,48	8,66	0,25	78,68
20	0,48	9,16	0,29	78,68

Tabla B.13. Resultados de ensayo de corte directo para un peso de 17 kg (grava).

Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento horizontal [mm]	Deformación vertical [mm]	$\tau$ [kPa]
1	0,06	0,08	-0,02	10,29
2	0,23	0,39	-0,1	37,97
3	0,4	0,71	-0,18	65,65
4	0,48	1,11	-0,25	78,68
5	0,52	1,55	-0,29	85,19
6	0,57	1,99	-0,32	93,33
7	0,63	2,42	-0,32	103,10
8	0,65	2,82	-0,33	106,36
9	0,69	3,33	-0,34	112,87
10	0,7	3,83	-0,34	114,50
11	0,73	4,29	-0,33	119,39
12	0,76	4,77	-0,31	124,27
13	0,77	5,27	-0,3	125,90
14	0,79	5,75	-0,28	129,16
15	0,8	6,24	-0,25	130,78
16	0,81	6,75	-0,23	132,41
17	0,81	7,25	-0,21	132,41
18	0,82	7,75	-0,19	134,04
19	0,84	8,24	-0,16	137,30

## ANEXO C. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### C.1 Datos Curvas de Distribución Inicial

*Tabla C.1. Datos curva de distribución inicial (grava).*

Tamaño fragmento [mm]	Porcentaje pasante [%]
5	0
6	10
10	30
16	70
18	90
25,4	100

*Tabla C.2. Datos curva de distribución inicial (arcilla).*

Tamaño fragmento [mm]	Porcentaje pasante [%]
1,17	0,0
2,36	3,0
5	7,5
6	27,5
10	75,8
16	97,8
18	99,0
25,4	100,0

### C.2. Datos Granulometría Inicial

*Tabla C.3. Porcentaje y masa de grava inicial (ensayo 1 m).*

Diámetro fragmento [mm]	[0, 5)	[5, 6)	[6, 10)	[10, 16)	[16, 18)	[18, 25,4)
Cantidad porcentual [%]	0	10	20	40	20	10
Masa [kg]	0,000	1,212	2,424	4,848	2,424	1,212

*Tabla C.4. Porcentaje y masa de arcilla inicial (ensayo 1 m).*

Diámetro fragmento [mm]	[0, 1,17)	[1,17, 2,36)	[1,3, 5)	[5, 6)	[6, 10)	[10, 16)	[16, 18)	[18, 25,4)
Cantidad porcentual [%]	0,0	3,0	4,5	20,0	48,3	22,0	1,2	1,0
Masa [kg]	0,00	0,33	0,50	2,20	5,32	2,42	0,13	0,11

## ANEXO D. MODELO DE PREDICCIÓN

### D.1. Detalle de las Funciones de Selección y de Quiebre.

La tasa de quiebre o la función de selección ( $S_i$ ) de los fragmentos de roca es proporcional a la reducción de la fracción de masa de mineral ( $f_i$ ), en el intervalo de tamaño  $i$ -ésimo que se fragmenta en un determinado tiempo ( $t$ ). Como se expresa en la Ecuación 26.

$$\frac{df_i(t)}{dt} = -S_i f_i(t) \quad (26)$$

Mientras que, la distribución de tamaños resultante del material fragmentado en cada etapa de quiebre está determinada por la fracción acumulada del producto del quiebre ( $B_{ij}$ ) (Ecuación 27).

$$B_{ij} = \sum_{k=i}^n b_{kj} \quad (27)$$

Donde  $b_{kj}$  es la fracción de mineral en el intervalo de tamaño  $j$ -ésimo que aparece en el intervalo  $k$ -ésimo después del quiebre. Considerando que la distribución de tamaños de entrada de cada evento de quiebre es la distribución de salida del evento anterior.

## ANEXO E. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### E.1. Datos Factor de Forma

Tabla E.1. Datos del factor forma de muestras de grava.

Muestra	Radio mínimo circunscrito	Radio máximo inscrito	Esfericidad	$\sum r_i/N$	Redondez
1	225,1774	105,3027	0,4676	70,3181	0,6678
2	150,6221	101,6968	0,6752	93,8419	0,9228
3	118,8198	28,1955	0,2373	14,3450	0,5088
4	94,3680	49,7889	0,5276	38,7620	0,7785
5	61,5687	53,6210	0,8709	46,9526	0,8756
6	61,6952	48,4933	0,7860	39,1485	0,8073
7	79,5765	45,6283	0,5734	20,1016	0,4406
8	74,9942	38,7442	0,5166	28,0150	0,7231
9	62,0855	34,0819	0,5490	26,6862	0,7830
10	60,4949	40,7622	0,6738	34,7506	0,8525
11	65,6011	15,0692	0,2297	12,2716	0,8143
12	58,9950	29,5821	0,5014	17,8363	0,6029
13	79,2597	28,0317	0,3537	14,4159	0,5143
14	81,1189	22,3465	0,2755	15,6968	0,7024
15	71,0760	14,5239	0,2043	7,4681	0,5142

### E.2. Datos Distribución de tamaños

Tabla E.2. Distribución de tamaños de los ensayos (grava).

Tamaño fragmento [mm]	Ensayo 1 m		Ensayo 2 m		Ensayo 3 m		Ensayo 6 m	
	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]
5	2,0	2,0	3,5	3,5	4,8	4,8	5,4	5,4
6	10,9	12,9	10,1	13,7	10,1	15,0	10,1	15,5
10	19,8	32,7	20,0	33,7	20,4	35,3	20,5	36,0
16	38,7	71,5	38,4	72,1	38,3	73,6	37,7	73,7
18	18,4	89,9	17,9	90,0	16,4	90,1	16,2	89,9
25,4	10,1	100,0	10,0	100,0	9,9	100,0	10,1	100,0

Tabla E.3. Distribución de tamaños de los ensayos (arcilla).

Tamaño fragmento [mm]	Ensayo 1 m		Ensayo 2 m		Ensayo 3 m		Ensayo 6 m	
	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]	$f_i$ [%]	$N_i$ [%]
1,17	5,1	5,1	5,1	5,1	5,6	5,6	6,7	6,7
2,36	4,7	9,8	4,1	9,1	4,9	10,5	5,1	11,8
5	16,6	26,3	15,5	24,7	16,9	27,4	17,2	29,0
6	16,2	42,5	19,5	44,1	18,0	45,3	18,9	48,0
10	37,6	80,1	39,0	83,1	37,2	82,5	34,9	82,9
16	18,2	98,3	15,7	98,8	16,0	98,6	15,9	98,7
18	0,9	99,2	0,8	99,5	0,6	99,2	0,6	99,3
25,4	0,8	100,0	0,5	100,0	0,8	100,0	0,7	100,0

### E.3. Datos Porcentaje de Fragmentación

Tabla E.4. Tamaño medio de los ensayos (grava).

Tamaño	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
$d_{10}$ [cm]	0,60	0,57	0,56	0,55	0,54
$d_{50}$ [cm]	1,26	1,23	1,22	1,20	1,19
$d_{80}$ [cm]	1,70	1,69	1,68	1,67	1,67

Tabla E.5. Tamaño medio de los ensayos (arcilla).

Tamaño	Inicial	Ensayo 1 m	Ensayo 2 m	Ensayo 3 m	Ensayo 6 m
$d_{10}$ [cm]	0,51	0,24	0,25	0,22	0,18
$d_{50}$ [cm]	0,76	0,66	0,65	0,64	0,62
$d_{80}$ [cm]	1,09	1,00	0,96	0,97	0,96

Tabla E.6. Razón  $P_i/F_i$  en función al tamaño característico y la distancia recorrida (grava).

Distancia recorrida [m]	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{80}$
0	1,000	1,000	1,000
1	0,952	0,975	0,996
2	0,936	0,965	0,993
3	0,914	0,946	0,987
6	0,905	0,941	0,987

Tabla E.7. Razón  $P_i/F_i$  en función al tamaño característico y la distancia recorrida (arcilla).

Distancia recorrida [m]	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{80}$
0	1,000	1,000	1,000
1	0,466	0,873	0,913
2	0,482	0,852	0,878
3	0,429	0,841	0,883
6	0,360	0,812	0,876

## E.4. Modelo de Fragmentación

### Curvas Granulométricas con los Ajustes del Modelo.

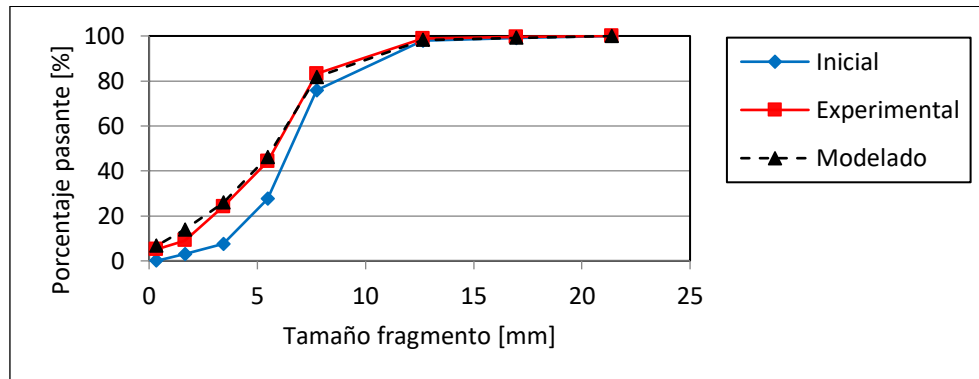


Figura E.1. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 2 m (arcilla).

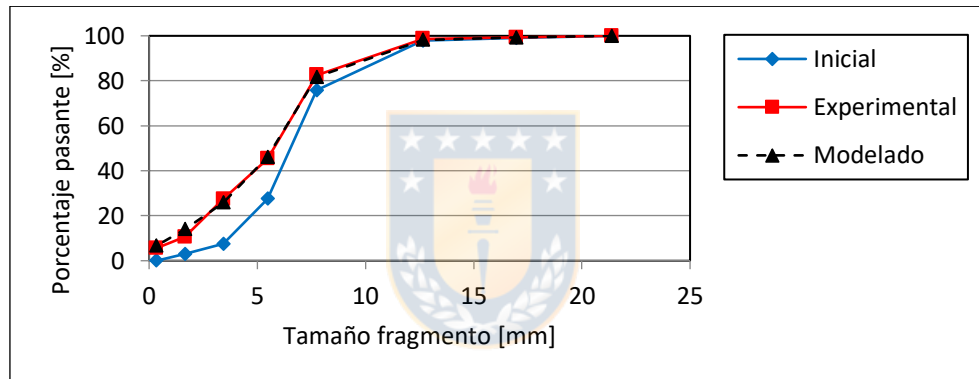


Figura E.2. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 3 m (arcilla).

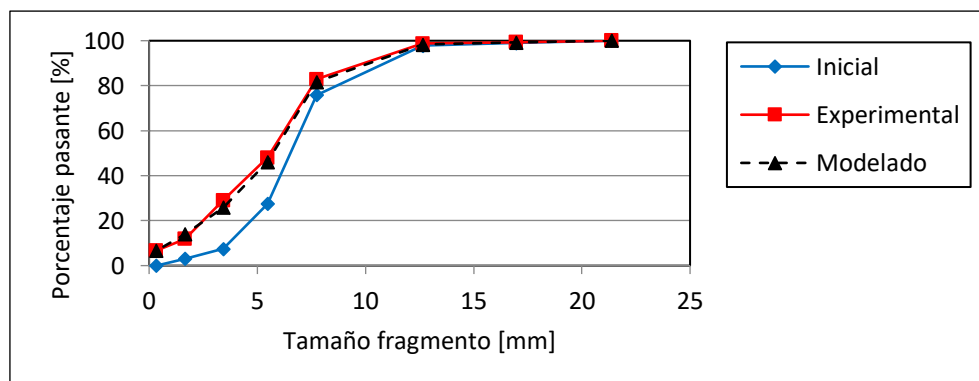


Figura E.3. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 6 m (arcilla).

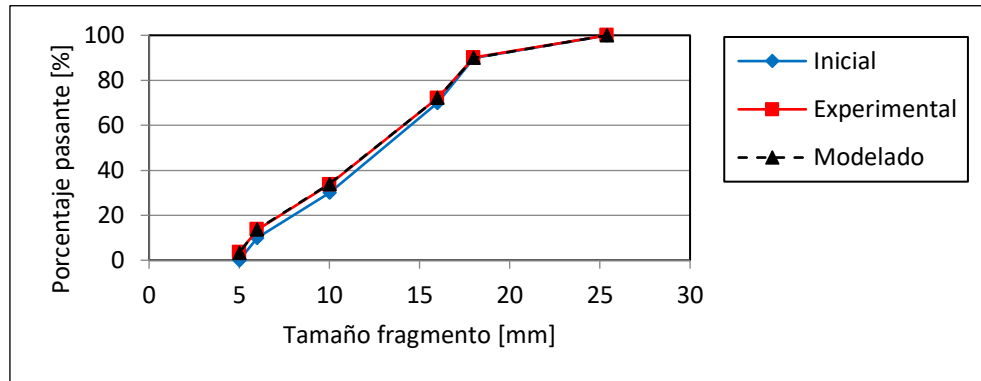


Figura E.4. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 2 m (grava).

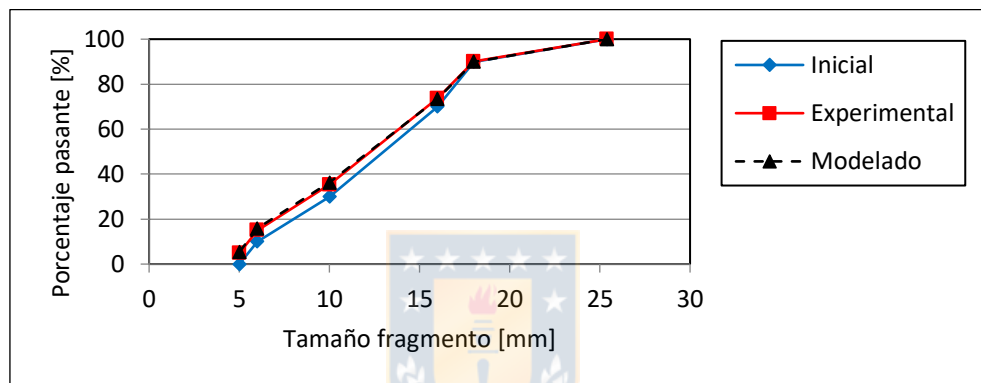


Figura E.5. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 3 m (grava).

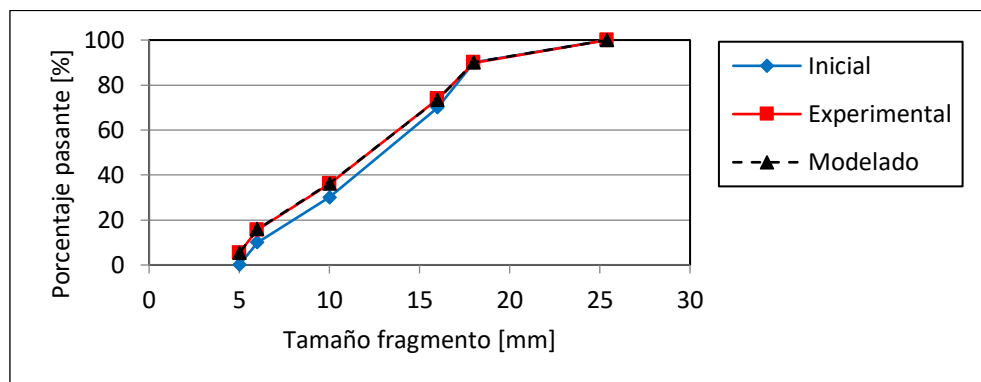


Figura E.6. Curva de distribución de tamaño ajustada, ensayo 6 m (grava).



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título:</b> Fragmentación por efecto del transporte de material en piques a escala de laboratorio.	
<b>Nombre Memorista:</b> Franco Ignacio Riveros Cofré.	
<b>Modalidad</b>	<b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>
<b>Concepto</b>	<b>Prof. René Gómez P.</b>
<b>Calificación</b>	
<b>Fecha</b>	
<b>Prof. Roberto Fustos T.</b>	
<b>Ingeniero Supervisor:</b>	
<b>Institución:</b>	
<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>	
<b>Prof. Asieh Hekmat.</b>	<b>Prof. Fernando Betancourt.</b>
<b>Resumen</b>	
<p>El presente trabajo cuantifica la fragmentación de material por el efecto del transporte en piques a escala de laboratorio (1 : 30). En los ensayos, se utilizó material granular de arcilla. Los resultados obtenidos a través de estos ensayos se compararon con una base de datos de ensayos similares obtenidos con grava. Se realizó una caracterización general de los materiales y se obtuvo la distribución de tamaños de los fragmentos antes y después de los ensayos. Además, se evaluó un ajuste de un modelo de conminución.</p> <p>Se determinó a través de los resultados de los ensayos que la fragmentación de las partículas aumenta a medida que la distancia recorrida por el material aumenta y que la abrasión fue la causa de fragmentación en ambos materiales, pero afectando en mayor grado al material de arcilla debido a su baja resistencia. Mecanismo identificado principalmente por la disminución de los tamaños característicos menores. Mientras que la cantidad de material fino aumentó con la distancia recorrida. Finalmente, en el caso particular del material de arcilla, el aumento de la redondez (<math>R</math>) de los fragmentos en hasta un 72,87 % y de la esfericidad (<math>S</math>) hasta un 13,10 % después de las pruebas.</p> <p>En conclusión, la fragmentación depende de las características del material utilizado durante las pruebas. Existe mayor abrasión entre fragmentos más angulosos, debido a que estos van perdiendo sus bordes al fluir dentro de los piques y a medida que aumenta la distancia recorrida. Mientras que los fragmentos tienden a aumentar su redondez y esfericidad, lo que resulta en la estabilización del proceso de fragmentación.</p>	