



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DE TRANSPORTE DE MATERIALES GRANULARES EN
LA FRAGMENTACIÓN SECUNDARIA**

POR

Patricio Eduardo Cortez Caraboni

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
René Gómez Puigpinos

Octubre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Patricio Eduardo Cortez Caraboni

© 2023 Patricio Eduardo Cortez Caraboni

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

En el método de explotación de Block Caving, se denomina fragmentación secundaria al proceso de reducción de tamaño de material que ocurre después de su desprendimiento del macizo rocoso, a medida que los fragmentos descienden a través de la columna de extracción. Este proceso depende, entre otros parámetros, de la distancia que recorren los fragmentos de material y de cómo interactúan entre ellos; y se ve influenciado por los esfuerzos compresivos y de corte presentes en la columna.

El presente trabajo cuantifica la fragmentación por el efecto del transporte de tres materiales mediante un modelo físico a escala en una proporción de 1:30. En los ensayos se utilizó material granular de adocreto, cuyos datos fueron comparados con ensayos previos realizados a dos materiales: grava y arcilla. Para comparar el comportamiento de los tres materiales, estos fueron caracterizados mediante la obtención de una serie de propiedades intrínsecas de cada uno de ellos, así como mediante obtención de las distribuciones de tamaños antes y después de los ensayos.

Los resultados muestran que la reducción de tamaño ocurre principalmente producto de la abrasión, y si bien posee una tendencia lineal en los tamaños de fragmento menores, esta tendencia cambia a una relación logarítmica a medida que aumenta la distancia de transporte. También se pudo apreciar que tanto la esfericidad como la redondez del adocreto variaron su tendencia al alza en una relación logarítmica, siendo los fragmentos más angulosos los más afectados por la abrasión. La fragmentación no resulta ser directamente proporcional al UCS, siendo esta última mucho más marcada para el caso de la arcilla en relación a los otros materiales; lo anterior es corroborado mediante los factores de fragmentación de Hardin (B_r), que es de 0.190 para la arcilla, en comparación con 0.050 obtenidos para el adocreto y los 0.038 obtenidos para la grava para los ensayos de 6 metros. Se estimó que las distancias de transporte en donde los materiales dejaron de fragmentarse significativamente fueron de 46.8 metros para el adocreto, 60 metros para la arcilla y 38.6 metros para la grava; en tanto las distancias de ensayo en donde ocurre la mayor variación del aumento de la fragmentación se estimaron en 2.087 metros para el adocreto y 3.924 para la grava. Finalmente, se formularon ecuaciones que permiten relacionar la distancia de transporte (L) con el factor B_r ; particularmente para el caso del adocreto, la ecuación corresponde a $L = 0.0221 \ln(B_r) + 0.0143$.

Abstract

In Block Caving mining method, secondary fragmentation is known as the process of material size reduction that undergoes after it detaches from the rock mass, as fragments descend through the draw column. This process is related, among many other parameters, to the travel distance of the granular material and the interaction between individual fragments as they travel through the column; and is influenced by compressive and shear stresses associated with the draw column.

This report attempts to quantify granular material fragmentation due to the effect of transportation distance of three materials by using a reduced-scale model on a scaled ratio of 1:30. Tests were conducted using concrete granular material, and the data obtained was compared with previous tests carried out on two materials: gravel and clay. To compare the behavior of the three materials under these conditions, they were characterized by obtaining a series of intrinsic properties of each of them, as well as by obtaining size distributions before and after the tests.

Results show that fragment size reduction occurs mainly because of abrasion, and although it has a linear trend in smaller fragment sizes, it shifts to a logarithmic trend as transport distance increases. It was also noted that both the sphericity and the roundness of concrete fragments varied their upward trend in a logarithmic relationship, with the most angular fragments being the most affected by abrasion. Fragmentation is not directly proportional to the UCS, being much higher in clay granular material; this can be shown by comparing Hardin fragmentation factor (B_r) of each material, which is 0.190 for clay, compared to 0.050 obtained for concrete and 0.038 obtained for gravel for the 6-meter tests. It was estimated that the transport distance where the materials stopped fragmenting significantly were 46.8 meters for concrete, 60 meters for clay and 38.6 meters for gravel, while test distances where the greatest variation on fragmentation increase were estimated at 2.087 meters for concrete and 3.924 for gravel. Finally, a series of equations which relate travel distance (L) to B_r were formulated; particularly for concrete material, the obtained equation was $L = 0.0221 \ln (B_r) + 0.0143$.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a los profesores de la carrera de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Concepción por su disposición, dedicación y vocación de docencia, en especial a mi profesor guía René Gómez. También quisiera agradecer al personal del Departamento de Ingeniería Metalúrgica por su importante colaboración en el presente trabajo, en especial a Edgardo Elorza, Sergio Toledo y Patricio Leonelli.

Agradezco también a quienes fueron mis compañeros de carrera, por su amistad y apoyo incondicional; especialmente a Eliecer Muñoz, Franco Riveros, Pablo Vega, Ignacio Osses y Marcelo Ávila.

Finalmente, agradezco a mi familia. A mi madre y a mi abuela, quienes me acompañan en espíritu; y a las dos personas más incondicionales de mi vida: a mi hermana, Valentina y a mi pareja, Pía.

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	1
Objetivos	3
Alcances.....	3
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Fragmentación en Minería de Block Caving.....	4
2.2. Variables Principales Asociadas a la Fragmentación de Materiales Granulares	6
2.3. Modelos de Predicción de Fragmentación en Materiales Granulares.....	8
2.3.1. Modelo de Marsal [18]	8
2.3.2. Modelo de Lee & Farhoomand [19].....	9
2.3.3. Modelo de Lade et al. [20]	9
2.3.4. Modelo de Hardin [15].....	10
2.3.5. Modelo de McDowell [22, 23, 24]	12
2.3.6. Modelo de Bridgwater [17].....	14
2.3.7. Modelo de Pierce [4]	16
3. Desarrollo Experimental.....	19
3.1. Selección de Material	19
3.2. Caracterización de Materiales	22
3.2.1. Índice de Resistencia a la Carga Puntual	23
3.2.2. Densidad Real, Densidad Aparente y Porosidad	25
Densidad Real.....	25
Densidad Mediante Desplazamiento de Líquido.....	26
Densidad Mediante Picnometría.....	26
Densidad Aparente.....	27
Porosidad.....	28
3.2.3. Propiedades de Fricción de los Materiales.....	29
Ángulo de Fricción entre Paredes y Material	29
Ángulo de Fricción Interna	30
3.2.4. Factor de Forma.....	33
Esfericidad	34
Redondez.....	34
3.2.5. Coeficientes de Uniformidad y de Curvatura	36
3.3. Procedimiento Experimental	37
3.3.1. Conminución, Clasificación y Distribución Granulométrica Inicial.....	37
Secado y Chancado.....	37
Clasificación Mediante Harnero y Tamiz	39
3.3.2. Descripción del Dispositivo de Flujo	41
3.3.3. Descripción de Ensayos de Flujo	42

4. Resultados	44
4.1. Caracterización del Material Tras Ensayo de Fragmentación a Escala de Laboratorio	44
4.1.1. Curvas Granulométricas Post Ensayos	44
4.1.2. Factor de Forma Post Ensayos	46
4.1.3. Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Post Ensayos	49
4.2. Efecto del Transporte en la Fragmentación	51
4.2.1. Variaciones en Tamaños Característicos de los Fragmentos	51
4.2.2. Generación de Material Fino en los Ensayos	58
4.2.3. Factores de Fragmentación de Basados en las Distribuciones Granulométricas	59
4.2.4. Punto de Desaceleración de Fragmentación y Altura de Variación Mínima de Fragmentación	62
5. Conclusiones y Recomendaciones	66
6. Referencias	70
7. Anexos.....	73
Anexo A: Caracterización de Material	73
A.1. Datos de Selección de Materiales	73
A.2. Descripción de Procedimientos de Caracterización de Materiales	74
A.3. Datos Utilizados para Caracterización del Material	80
Anexo B: Resultados Fase Experimental.....	87
B.1. Comparativa Curvas Granulométricas Pre y Post Ensayos	87
B.2. Datos Asociados a Factores de Lade y Lee & Farhoomand	90
B.3. Diámetros Característicos Arcilla y Grava	92
B.4. Datos Utilizados para Obtención del Factor de Fragmentación de Marsal.....	93
B.5. Datos Utilizados para Obtención del Factor de Fragmentación de Hardin	94

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Mapa Conceptual del Proyecto</i>	2
<i>Figura 2: Tipos de Fragmentación en Minería</i>	5
<i>Figura 3: Diagrama Celda Anular Utilizada por Bridgwater</i>	14
<i>Figura 4: Diagrama de Materiales Utilizados por Bridgwater</i>	15
<i>Figura 5: Equipo Servoplus de Matest para Pruebas de Compresión</i>	21
<i>Figura 6: Gráfico UCS vs Deformación Ensayo Adocreto</i>	21
<i>Figura 7: Gráfico UCS vs Deformación Ensayo Solerilla</i>	22
<i>Figura 8: Dispositivo de Ensayo de Carga Puntual</i>	24
<i>Figura 9: Testigos de Adocreto Antes (derecha) y Después (izquierda) de los Ensayos de Carga Puntual</i>	25
<i>Figura 10: Balanza Digital y Picnómetro</i>	27
<i>Figura 11: Equipo Matest S276 para Ensayos de Corte Directo</i>	31
<i>Figura 12: Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para el Adocreto</i>	32
<i>Figura 13: Gráfico Dilatancia Adocreto</i>	33
<i>Figura 14: Clasificación de Esfericidad y Redondez de Krumbein y Pettijohn</i>	35
<i>Figura 15: Adocreto Húmedos antes de Chancado</i>	38
<i>Figura 16: Chancador de Mandíbulas</i>	39
<i>Figura 17: Harnero Utilizado para Clasificación de Material Granular Superior a 5 mm</i>	40
<i>Figura 18: Ro-tap Utilizado para Clasificación de Material Inferior a 5 mm</i>	40
<i>Figura 19: Curvas Granulométricas Iniciales</i>	41
<i>Figura 20: Pique de Traspaso a Escala de Laboratorio Montado en Estructura Metálica</i>	42
<i>Figura 21: Curvas Granulométricas de Adocreto Antes y Después de Ensayos</i>	44
<i>Figura 22: Curvas Granulométricas de Arcilla Antes y Después de Ensayos</i>	45
<i>Figura 23: Curvas Granulométricas de Grava Antes y Después de Ensayos</i>	45
<i>Figura 24: Variación de la Esfericidad según la Distancia Recorrida</i>	48
<i>Figura 25: Variación de la Redondez según la Distancia Recorrida</i>	49
<i>Figura 26: Factor B_{15} en Función de la Longitud de Ensayo para los Tres Materiales</i>	53
<i>Figura 27: Factor B_{10} en Función de la Longitud de Ensayo para los Tres Materiales</i>	54
<i>Figura 28: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Adocreto</i>	55
<i>Figura 29: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Arcilla</i>	56
<i>Figura 30: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Grava</i>	56
<i>Figura 31: Porcentaje de Finos por Longitud de Ensayo para cada Material</i>	59
<i>Figura 32: Gráfico Factor de Fragmentación de Hardin vs Distancia Recorrida</i>	61
<i>Figura 33: Factor de Hardin para Ensayos de Baja Distancia para Adocreto y Grava</i>	63
<i>Figura 34: Testigo de Solerilla Antes del Ensayo de Compresión Uniaxial</i>	74
<i>Figura 35: Testigo de Solerilla Tras el Ensayo de Compresión Uniaxial</i>	74
<i>Figura 36: Disposición de los Testigos y Relación con Diámetro Equivalente</i>	79
<i>Figura 37: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 1 Metro</i>	87
<i>Figura 38: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 2 Metros</i>	88
<i>Figura 39: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 3 Metros</i>	88
<i>Figura 40: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 6 Metros</i>	89
<i>Figura 41: Factores B_{10} y B_{15} en Función de la Longitud de Ensayo para los Ensayos de Adocreto</i>	91

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Valor de n_s Según Forma de Partícula</i>	11
<i>Tabla 2: Cuadro Resumen Modelos Experimentales de Fragmentación Granular</i>	17
<i>Tabla 3: Materiales Considerados para la Ensayos de Transporte de Material</i>	20
<i>Tabla 4: Resumen de Parámetros Obtenidos tras Caracterización de Materiales</i>	23
<i>Tabla 5: Ángulos de Fricción Interna y Cohesión de los Materiales Utilizados</i>	32
<i>Tabla 6: Esfericidad, Redondez y Forma de Partícula Iniciales</i>	35
<i>Tabla 7: Valores de Esfericidad para Adocreto</i>	47
<i>Tabla 8: Valores de Redondez para Adocreto</i>	47
<i>Tabla 9: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Adocreto</i>	50
<i>Tabla 10: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Arcilla</i>	50
<i>Tabla 11: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Grava</i>	50
<i>Tabla 12: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para el Adocreto</i>	52
<i>Tabla 13: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para el Adocreto</i>	53
<i>Tabla 14: Diámetros Característicos Adocreto</i>	54
<i>Tabla 15: Promedio Porcentual Ponderado Promedio de Reducción de Tamaños Característicos por cada Ensayo</i>	57
<i>Tabla 16: Factores de Fragmentación B_m por Ensayo y Material</i>	60
<i>Tabla 17: Factores de Fragmentación de Hardin [15] por Ensayo y Material</i>	61
<i>Tabla 18: Línea de Tendencia y Correlación Asociadas a Factor Br</i>	62
<i>Tabla 19: Variación de la Fragmentación Respecto al Ensayo que lo Antecede (Normalizado)</i>	62
<i>Tabla 20: Tendencia a Variación de la Fragmentación (Normalizado)</i>	64
<i>Tabla 21: Cotización Materiales Considerados para la Realización de Ensayos de Transporte</i>	73
<i>Tabla 22: Valores Máximos para Ensayos de Compresión Uniaxial de Solerilla</i>	73
<i>Tabla 23: Valores Máximos para Ensayos de Compresión Uniaxial de Adocreto</i>	73
<i>Tabla 24: Parámetros Ensayo Picnometría</i>	76
<i>Tabla 25: Datos Obtenidos a Partir de Ensayo Picnometría</i>	76
<i>Tabla 26: Densidad Papel Film Plástico</i>	77
<i>Tabla 27: Densidad Material Granular Adocreto</i>	77
<i>Tabla 28: Datos Cálculo Factor de Forma Adocreto Inicial</i>	80
<i>Tabla 29: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 1 Metro Adocreto</i>	81
<i>Tabla 30: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 2 Metros Adocreto</i>	81
<i>Tabla 31: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 3 Metros Adocreto</i>	82
<i>Tabla 32: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 6 Metros Adocreto</i>	83
<i>Tabla 33: Datos Obtenidos a partir de Ensayo de Carga Puntual Adocreto</i>	84
<i>Tabla 34: Datos Calculados a partir de Ensayo de Carga Puntual</i>	84
<i>Tabla 35: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para el Adocreto</i>	85
<i>Tabla 36: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para la Arcilla</i>	86
<i>Tabla 37: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para la Grava</i>	86
<i>Tabla 38: Datos Utilizados para la Determinación del Ángulo de Fricción entre Paredes y Material Granular de Adocreto</i>	86
<i>Tabla 39: Porcentaje Adocreto Retenido en Cada Ensayo</i>	89
<i>Tabla 40: Porcentaje Arcilla Retenido en Cada Ensayo</i>	89
<i>Tabla 41: Porcentaje Grava Retenido en Cada Ensayo</i>	90
<i>Tabla 42: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para la Arcilla</i>	90
<i>Tabla 43: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para la Grava</i>	90
<i>Tabla 44: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para la Arcilla</i>	91
<i>Tabla 45: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para la Grava</i>	91
<i>Tabla 46: Diámetros Característicos Arcilla</i>	92

<i>Tabla 47: Diámetros Característicos Grava</i>	92
<i>Tabla 48: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Adocreto</i>	92
<i>Tabla 49: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Arcilla</i>	92
<i>Tabla 50: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Grava</i>	93
<i>Tabla 51: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Adocreto</i>	93
<i>Tabla 52: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Arcilla</i>	93
<i>Tabla 53: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Grava</i>	94
<i>Tabla 54: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 1 Metro</i>	94
<i>Tabla 55: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 2 Metros</i>	95
<i>Tabla 56: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 3 Metros</i>	95
<i>Tabla 57: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 6 Metros</i>	95
<i>Tabla 58: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 1 Metro</i>	96
<i>Tabla 59: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 2 Metros</i>	96
<i>Tabla 60: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 3 Metros</i>	97
<i>Tabla 61: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 6 Metros</i>	97
<i>Tabla 62: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 1 Metro</i>	97
<i>Tabla 63: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 2 Metros</i>	98
<i>Tabla 64: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 3 Metros</i>	98
<i>Tabla 65: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 6 Metros</i>	99

Nomenclatura

B_M :	Factor de Rotura de Marsal.
B_{10} :	Factor de Quiebre de Lade.
B_{15} :	Factor de Quiebre Relativo de Lee y Farhoomand.
B_p :	Potencial de Quiebre.
B_t :	Fragmentación Total.
B_r :	Factor de Fragmentación de Hardin/Quiebre relativo de Hardin.
d_{ni}, d_{nf} :	Diámetro Característico Inicial/Final.
UCS:	Resistencia a la Compresión Uniaxial.
IS_{50} :	Índice de Resistencia a la Carga Puntual Homologado a 50 mm.
ρ :	Densidad.
ρ_a :	Densidad Aparente.
ϕ :	Porosidad.
τ :	Esfuerzo de Corte.
σ_n :	Esfuerzo Normal.
\emptyset :	Ángulo de Fricción Interna.
S:	Esfericidad.
R:	Redondez.
C_u :	Coficiente de Uniformidad.
C_c :	Coficiente de Curvatura.
PRF:	Punto de Ralentización de Fragmentación
PVM:	Altura de Variación Mínima de Fragmentación

1. Introducción

En un mundo en donde la demanda de mineral crece de manera constante, la industria minera, y especialmente la industria minera nacional, se ha visto en la obligación de cambiar el paradigma que ha permanecido enquistado en nuestra historia desde el amanecer de nuestra nación en lo que a minería concierne. Desde aquel entonces, los métodos superficiales de extracción de mineral han permanecido como la principal forma de explotación; no obstante, todo tiende a señalar que el panorama está continuamente cambiando. Según cifras del Consejo Minero de Chile, la producción de cobre en Chile proveniente de operaciones subterráneas ha aumentado desde un 13% entre los años 2003 y 2005 hasta un 20% durante el primer semestre del 2021, proyectándose un alza a futuro si es que se tiene en consideración que el proyecto de Chuquicamata Subterránea alcanzará su producción óptima durante el transcurso de la presente década [1].

Si bien la industria minería es reconocida por ser bastante conservadora, en donde cuesta incorporar novedades en los procesos y en donde los márgenes para escapar de lo ya establecido son sumamente estrechos, esta transición de minería superficial a subterránea surge como respuesta ante los nuevos desafíos que afronta la industria, tales como el aumento de costos de extracción, aquellos derivados de las características de la roca primaria, la baja sostenida de las leyes superficiales, los requerimientos de sustentabilidad y la mayor preocupación por mejorar los estándares de seguridad y salud ocupacional de los operadores.

Una de las principales diferencias existentes entre las operaciones mineras superficiales de las subterráneas, particularmente en los métodos de *caving*, es la forma en que se extrae el material. Por una parte, en minería a cielo abierto es necesario el uso de gran cantidad de explosivos; en tanto, en los métodos de *caving* se utilizan en menor cantidad y, en lugar de estos, se utilizan las propias condiciones del macizo rocoso para contribuir a la fragmentación del material, el cual desciende hasta en nivel de extracción para posteriormente ser trasladado hasta las zonas de acopio. Como consecuencia del descenso que sufre material desde el punto en donde se encuentra en condiciones naturales hasta el nivel de extracción, es que se genera un flujo de material granular, el cual es definido por Neddermann como un conglomerado de partículas que se encuentran en contacto directo entre sí, que desciende debido a la acción de la gravedad [2]. En este mismo contexto, esta

habilidad o condición de un material granular de fluir depende de una serie de propiedades del material, de la geometría de las infraestructuras asociadas y de las condiciones de estrés [3]. El contacto entre las partículas de este flujo de material, así como la interacción que estos fragmentos poseen con las paredes del pique de traspaso y la influencia del peso de la columna de material, conllevan a la reducción de tamaño de estos mismos, en lo que se denomina fragmentación secundaria [4].

Es de suma importancia mantener el control de los tamaños fragmentos de material que circulan por una batea de extracción y piques de traspaso para prevenir problemas operacionales que puedan incidir en el normal desempeño de la operación. Según lo expuesto por Hambley et al. [5], es preciso determinar una razón entre el diámetro del pique de traspaso y el diámetro máximo de los fragmentos de material que ingrese a este, para así asegurar la probabilidad de flujo y minimizar la probabilidad de colgaduras que impidan el flujo normal del mineral [5]. Asimismo, es necesario mantener un control de la generación de finos producto de la fragmentación que ocurre al interior del pique de traspaso, puesto que, en caso de que existiese presencia de agua, el material fino podría generar la presencia de arcos cohesivos que detendrían el flujo de mineral [6].

Dado lo anteriormente mencionado, es que se destaca la importancia de cuantificar y predecir la fragmentación que ocurre dentro de los piques de traspaso para así poder prevenir problemas operacionales que, finalmente, pueden repercutir también aguas abajo. Para aquello se propone realizar una simulación de un pique de traspaso en condiciones similares a las que ocurren en una mina, pero en un entorno más controlado, como lo es un laboratorio.

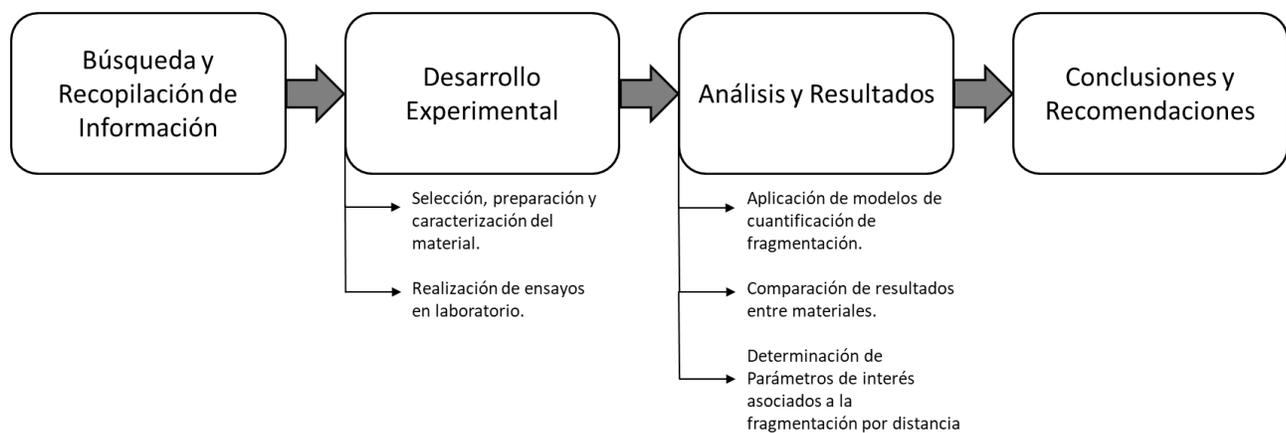


Figura 1: Mapa Conceptual del Proyecto

Objetivos

El objetivo principal de la presente memoria es el siguiente:

- Cuantificar, mediante la utilización de un modelo a escala de laboratorio de un pique de traspaso, el efecto que la distancia tiene sobre la fragmentación de distintos materiales.

En tanto, los objetivos específicos corresponden a:

- Determinar, de manera experimental, la influencia de las distintas características de los materiales granulares en el proceso de reducción secundaria.
- Seleccionar un material, de resistencia intermedia, para la realización de los ensayos de laboratorio.
- Comparar los resultados experimentales, obtenidos a partir de los ensayos realizados, con los datos de los ensayos previamente realizados para otros materiales.
- Aplicar criterios matemáticos, basados en bibliografía revisada, que permitan cuantificar la fragmentación de material granular.
- Identificar las variables que se deben tener en consideración para estudios futuros.

Alcances

Si bien el estudio contempla la realización de ensayos que simulan el traslado de material que ocurre en operaciones mineras subterráneas, no se pueden replicar las condiciones de confinamiento y de esfuerzos presentes en dichas operaciones, así como tampoco se considera la presencia de agua ni la fricción entre el material granular y las paredes. Adicionalmente, es preciso señalar que los materiales granulares utilizados para la realización de este proyecto son utilizados en el rubro de la construcción, por lo que no poseen características iguales a las del mineral presente en las faenas mineras; situación similar a la que acontece con el material utilizado para replicar el pique de traspaso, motivo por el cual el efecto que ejercen las paredes del pique a escala sobre el material diferirá con lo que ocurre en la práctica.

2. Marco Teórico

Para comprender de mejor manera los fenómenos físicos que se encuentran involucrados en los procesos de fragmentación, poder definir el grado de incidencia que cada uno de los factores involucrados tiene en dicho proceso y poder explicar, de una forma más acertada, el comportamiento de los materiales que se encuentran sometidos bajo condiciones determinadas; es necesario establecer los lineamientos teóricos que ligan la fragmentación de materiales granulares con la metodología de Block Caving.

2.1. Fragmentación en Minería de Block Caving

La comprensión de los mecanismos naturales de fragmentación del macizo rocoso y de los mecanismos de fragmentación que ocurren en la columna de extracción, son fundamentales en la minería de *caving*, puesto que permite establecer los parámetros de diseño idóneos para que la operación sea lo más eficiente y segura posible. Dentro de estos parámetros de diseño destacan el espaciamiento entre puntos de extracción, el control de tiraje, las tasas de productividad, el control de la dilución que ingresa a la columna de extracción, control de colgaduras y procesos y costos asociados a reducción secundaria [7].

En minería de *caving*, se pueden distinguir tres mecanismos principales de fragmentación de material; por impacto cuando el material cae desde el *cave back* hasta la parte superior de la columna de extracción; por compresión cuando el material se encuentra dentro de las zonas estáticas; y por abrasión cuando el material se encuentra en las zonas de movimiento [4]. A diferencia de otras metodologías de *caving*, aprovecha tanto las condiciones de esfuerzo a las cuales se encuentra sujeto, como las propiedades mecánicas del macizo rocoso, minimizando así la utilización recurrente de explosivos propia de otros métodos de minería subterránea [8]. En consideración a lo antes mencionado, en dicho proceso se pueden distinguir tres tipos de fragmentación: Fragmentación In-Situ, Fragmentación Primaria y Fragmentación Secundaria [9, 10, 7]; los cuales se ilustran en la Figura 2.

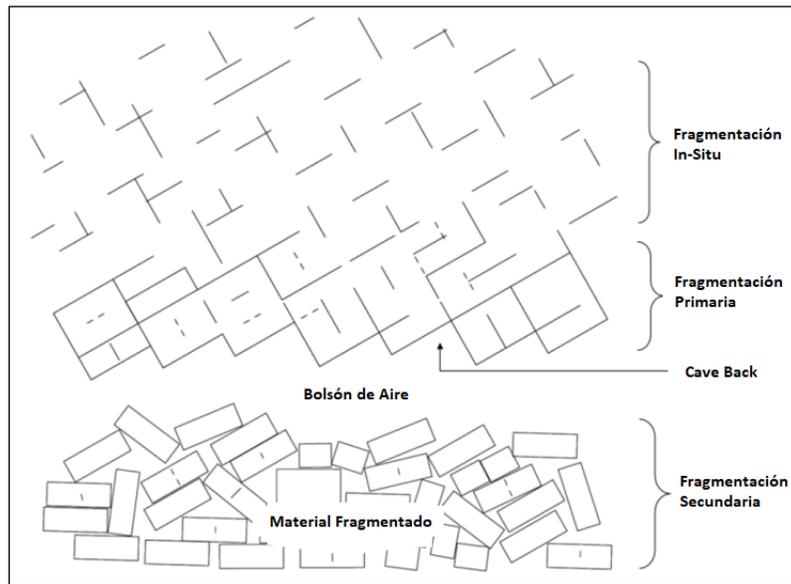


Figura 2: Tipos de Fragmentación en Minería

La fragmentación in-situ se encuentra establecida por el conjunto de discontinuidades presentes de forma natural en el macizo rocoso, es decir, con anterioridad a la actividad minera [7]. Una vez iniciado el proceso de *caving*, y como consecuencia de este mismo, se produce la fragmentación primaria, la cual se origina como resultado de la redistribución de esfuerzos en el macizo a causa de la socavación; esfuerzos que se concentran en los planos de debilidad de la roca, conformados por fracturas preexistentes en esta misma; e implica el desprendimiento de bloques de material desde el *cave back*, que corresponde a la zona ubicada por sobre dicha socavación [9]. Una vez desprendidos los bloques de mineral, estos se agrupan en columnas de extracción, punto en donde se inicia la etapa de fragmentación secundaria, proceso que corresponde a la conminución del material producto de la interacción entre los distintos fragmentos que lo componen, y que se extiende durante el periodo de residencia del material en la columna de extracción, en los piques de traspaso y en los equipos de carguío y transporte.

Existen una serie factores asociados a la operación minera que influyen en el grado de conminución de un material que se somete a fragmentación secundaria. De acuerdo a lo señalado por Brown [7], entre estos destacan la condición de esfuerzos en la socavación, la tasa y altura de extracción y el tiempo de residencia en las distintas etapas del proceso extractivo. Por otra parte, los

mecanismos de fragmentación secundaria también se ven afectados factores geológicos y/o propiedades del mineral, entre los cuales destacan la extensión de las discontinuidades preexistentes en el macizo, la resistencia del material de relleno presente en las discontinuidades, la sobrecarga del material producto del peso de la columna, falla de bloques producto de la influencia de esfuerzos de cizalle en arcos cohesivos en la socavación, fallas por flexión producidas en bloques alargados, o abrasión en bordes de bloques que inciden en la cantidad de finos resultantes.

2.2. Variables Principales Asociadas a la Fragmentación de Materiales Granulares

En primer lugar, es importante destacar que los materiales poseen propiedades intensivas, es decir que no varían dependiendo de la cantidad de material. En lo que respecta a las variables que influyen la fragmentación de materiales granulares, destacan a la resistencia a la tracción, resistencia a la compresión y elasticidad. Los minerales, generalmente poseen una baja resistencia a la tracción en relación a su resistencia a la compresión, por ende poseen un comportamiento frágil [11].

Son numerosos los estudios que se han realizado acerca de la fragmentación de materiales granulares, si bien no son muchos los asociados al ámbito minero ni a las operaciones de *caving* en sí, los principios bajo los cuales se basan y los resultados obtenidos pueden aplicarse directa o indirectamente a la fragmentación que se lleva a cabo en minería.

Los primeros estudios asociados al estudio de la mecánica de fractura de los materiales corresponden a Griffith [12], quien sostiene que los materiales poseen pequeñas fisuras, las cuales se propagan siempre y cuando se apliquen esfuerzos que sobrepasen el esfuerzo de rotura del material en cuestión, el cual a su vez depende de la longitud y la forma de dichas fisuras. Además postula que los esfuerzos tienden a concentrarse en los bordes de las fracturas del material, situación que favorecería su propagación. Son estas mismas fracturas las que generan superficies adicionales en el material, aumentándose así la fricción; variable que se define como la fuerza que se opone al deslizamiento de dos superficies en contacto en forma paralela a su plano de contacto y actúa tanto en las fracturas como entre fragmentos independientes entre sí [13]. El criterio de falla

de Mohr-Coulomb, el cual estima nivel de esfuerzos de cizalle al cual un material falla, considera la fricción como un factor influyente dentro este proceso, así como también considera relevante al esfuerzo normal aplicado y a la cohesión del material; esta última se define como la capacidad de un material de resistir al deslizamiento en ausencia de un esfuerzo normal y que depende tanto de factores intrínsecos de la roca, como de factores externos, tales como la presencia de finos y la humedad del material [13]; variables que aumentarían la cohesión del aglomerado de partículas cuando hay presencia de finos [14]. A pesar de lo antes mencionado, la presencia de agua a presión en las discontinuidades de macizos rocosos formados por materiales poco porosos causa una disminución de la presión efectiva entre las superficies a ambos lados de la discontinuidad formando así planos de debilidad, disminuyendo, por tanto, la potencial resistencia al corte.

Otra variable que influye considerablemente en la fragmentación es la distribución granulométrica del material. De acuerdo a lo expuesto por Hardin [15], el potencial de fragmentación del material granular aumenta a medida que crecen los tamaños de partícula; esto debido a la mayor cantidad de puntos de contacto que una partícula de mayor tamaño puede tener con otras partículas, aumentando así la cantidad de fuerzas normales que se ejercen sobre la superficie de estas mismas. Adicionalmente, a medida que aumenta el volumen de la roca existe una mayor probabilidad de encontrar defectos o fisuras en el espécimen, significando una disminución de su resistencia; este fenómeno se conoce como Efecto Escala [16]. Por otra parte, los estudios llevados a cabo tanto por Hardin como por Pierce [4, 15], indicaron que la fragmentación del material granular aumenta a mayores valores de porosidad o razón de vacío, dado a un aumento de los esfuerzos de tracción en los puntos de contacto de los fragmentos contiguos entre sí, y dado el aumento de la posibilidad de interconectar poros de cada fragmento de material granular, propagando así la fractura de estos mismos [11].

La forma de los fragmentos de material son también un factor para tener en consideración, estos se definen en base a su esfericidad y redondez. Tanto Hardin como Bridgewater [17] establecieron que los materiales con fragmentos más angulosos poseían una mayor cantidad de fragmentación por desgaste, situación reflejada en la cantidad de finos obtenidos en los experimentos.

2.3. Modelos de Predicción de Fragmentación en Materiales Granulares

La sección que se presenta a continuación se enfoca en la revisión de una serie de modelos de caracterización y predicción de fragmentación de materiales granulares, así como los fundamentos teóricos en los que se sustentan.

2.3.1. Modelo de Marsal [18]

Marsal condujo uno de los primeros estudios asociados a la cuantificación de la fragmentación de materiales granulares. Para este estudio, realizó una serie de ensayos triaxiales y de compresión en tres materiales distintos, cuyos tamaños de partículas no superaban los 20 cm de diámetro.

Para realizar el análisis comparativo y cuantitativo del estudio, se relacionó el quiebre que sufren las partículas con los porcentajes de masa retenidos pre y post ensayo que resultan de la clasificación del material mediante harneros o tamices. En particular, propuso un factor de rotura de partículas (B_M), que considera las diferencias entre los porcentajes de masa retenidos antes y después de los ensayos, denotados por W_{ki} y W_{kf} respectivamente, tal como se presenta en la ecuación 1.

$$\Delta W_k = W_{kf} - W_{ki} \quad (1)$$

Cabe destacar que, para el cálculo del factor B_M , se considera únicamente las variaciones porcentuales positivas de material retenido en cada tamiz. Algebraicamente se denota como se presenta en la ecuación 2.

$$B_M = \sum \Delta W_k, \quad \text{si } \Delta W_k > 0 \quad (2)$$

La metodología de Marsal, es considerada como una de las precursoras de la metodología que plantearía Hardin en 1985. Lo planteado por este último, y que se describirá más adelante en la presente sección, permite desarrollar un análisis de las curvas granulométricas como un sistema continuo más que como un conjunto de elementos discretos, puesto que se considera un rango mucho más amplio de tamaños de fragmentos en lugar de acotar el análisis a los intervalos de tamaños en donde aumenta la fracción de material retenido, motivo por el cual se le considera como un método que es capaz de cuantificar de mejor forma la fragmentación del material.

2.3.2. Modelo de Lee & Farhoomand [19]

Siguiendo un enfoque asociado a la variación de un diámetro de partícula determinado, Lee y Farhoomand utilizaron como factor representativo de rotura o quiebre relativo (B_{15}) a la razón entre los diámetros que representan el tamaño bajo el que se encuentra el 15% de la muestra antes y después de los ensayos.

$$B_{15} = \frac{D_{15i}}{D_{15f}} \quad (3)$$

En donde D_{15i} representa el diámetro bajo el que se encuentra el 15% del material previo al ensayo, y D_{15f} representa al mismo concepto, pero post ensayo.

2.3.3. Modelo de Lade et al. [20]

Los autores formularon un índice de fragmentación asociado a lo propuesto por Hazen [21], quien relacionó el diámetro característico d_{10} antes y después de la fragmentación con la capacidad de permeabilidad de distintos tipos de arenas que se utilizaban para filtrar y purificar el agua. Tras su estudio, Hazen bautizó el d_{10} como el diámetro efectivo.

De manera de poder establecerá una correlación entre las permeabilidades de distintos tipos de materiales, Lade et al. proponen la siguiente modificación al diámetro efectivo.

$$B_{10} = 1 - \frac{d_{10f}}{d_{10i}} \quad (4)$$

En donde D_{10i} y D_{10f} representan los diámetros bajo los que se encuentra el 10% del material pre y post ensayo respectivamente. La formulación de este índice indica que $B_{10}=0$ cuando no existe fragmentación de material y $B_{10}=1$ cuando el material posee una fragmentación infinita.

2.3.4. Modelo de Hardin [15]

Este modelo se realizó en base a datos obtenidos a partir de pruebas de fragmentación para una serie de partículas de suelo con diferentes propiedades intensivas. Según lo propuesto por Hardin, el nivel de fragmentación total de una partícula (B_t), que se encuentra sometida a ciertas condiciones de esfuerzos, se puede cuantificar en base a seis parámetros principales¹: distribución de tamaño de partículas, estado de efectivo de esfuerzos, dureza o resistencia del material, ruta efectiva de esfuerzos, forma de la partícula y razón de vacíos [15].

Distribución de tamaño de partículas: El potencial de quiebre (B_p) es mayor mientras más grande es la partícula, lo cual se debe, principalmente, a dos factores; el aumento de las fuerzas normales que actúan sobre una partícula de mayor tamaño dada su mayor superficie, y el aumento de la probabilidad de que exista un defecto en una partícula de mayores dimensiones. Por lo anteriormente descrito, las partículas bajo 0.074 mm se consideraron como poco representativas del comportamiento real del suelo en cuestión, motivo por el cual, se excluyó del cálculo de B_p , que se define como el área sobre la curva de distribución granulométrica.

Asimismo, se define B_t como el área comprendida entre las curvas distribución granulométrica antes y después de que las partículas fuesen sometidas a esfuerzos y se define el quiebre relativo (B_r) como:

¹ Indica la presencia de agua como un factor a considerar, pero no fue incluido al momento de plantear las ecuaciones finales.

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (5)$$

Donde B_r es independiente de la distribución granulométrica y donde B_t y B_p tienen una relación prácticamente lineal y donde B_r puede alcanzar valores entre 0 y 1.

Estado y ruta efectiva de esfuerzos: Hardin relaciona B_r con el nivel de esfuerzos, tanto normales (σ'_0) como de corte (τ_0) al que se sometió las partículas, mediante una relación empírica que muestra como el quiebre relativo varía ante distintas condiciones.

Razón de vacíos: La influencia de la razón de vacíos (e_i) radica en que la fragmentación del material disminuye a medida que aumenta la concentración de partículas, es decir, a medida que disminuye la razón de vacíos, puesto que existe una disminución en las fuerzas de contacto entre partículas.

Forma de la partícula y dureza/resistencia del material: Se asigna un valor numérico según la forma de la partícula (n_s) de acuerdo con los valores que se exponen en la Tabla 1. Por otra parte, la dureza del material (h) se relaciona según la Ecuación 6.

Tabla 1: Valor de n_s Según Forma de Partícula

Forma de la Partícula	Valor de n_s
Angular	25
Subangular	20
Subredondeada	17
Redondeada	15

$$h = \left(n_s \sigma'_r \frac{(1 + e_i)}{800 p_a} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Donde σ_r corresponde al esfuerzo de quiebre de referencia y p_a representa a la presión atmosférica.

Finalmente, el nivel de fragmentación total (B_t) de un tipo de suelo sometido a un nivel de esfuerzo específico se definió mediante la ecuación 7.

$$B_t = \frac{B_p S^{n_b}}{1 + S^{n_b}} \quad (7)$$

En tanto, los parámetros n_b y S que de la ecuación 7 se definen en las ecuaciones 8 y 9 respectivamente.

$$n_b = \frac{h^2}{(1 + e_i)n_s} + 0.3 \quad (8)$$

$$S = \frac{(1 + e_i)n_s}{800 h^2} \frac{\sigma'_0}{p_a} \left[1 + 9 \left(\frac{\tau_0}{\sigma'_0} \right)^3 \right] \quad (9)$$

Adicionalmente, Hardin también concluyó que la fragmentación aumenta cuando las partículas presentan una alta angulosidad y también cuando la razón entre esfuerzo y resistencia del fragmento aumenta.

2.3.5. Modelo de McDowell [22, 23, 24]

El estudio se basó en una serie de análisis numéricos y probabilísticos. Inicialmente, el año 1996, el estudio del autor se basó en el comportamiento de una formación de 50 triángulos isósceles idénticos al cual se le aplicó un modelo de simulación de fragmentación basado en el Modelo de Fracturas Weibull, el que define la probabilidad de supervivencia ($P_s(V)$) de un bloque de material de un volumen V que se encuentra sujeto a un esfuerzo σ de acuerdo con la ecuación 6 que se presenta a continuación.

$$P_s(V) = \exp\left(-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (10)$$

Donde V_0 es el volumen de material que satisface:

$$P_s(V_0) = \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (11)$$

Donde σ_0 corresponde al valor de σ bajo el cual el 37% de los bloques, o triángulos en este caso, resisten la fractura. El exponente m corresponde al módulo de Weibull, el cual aumenta a medida que disminuye la variabilidad de la resistencia del material.

En tanto, dado que en el estado inicial de la formación de triángulos isósceles planteados, el tamaño inicial (d_0) era idéntico para cada uno de ellos, se incluyó dicha variable, y se estableció la probabilidad de supervivencia de un fragmento de dimensiones inferiores a las iniciales (d) de acuerdo con lo planteado en la siguiente ecuación.

$$P_s(d) = \exp\left(-\left(\frac{d}{d_0}\right)^w \frac{(\sigma/\sigma_0)^m}{(C-2)^{\alpha m}}\right) \quad (12)$$

Para el caso de estudio se considera $w=2$, puesto que indica las dimensiones del modelo (en este caso es una simulación en base a un modelo 2D), C corresponde al número de coordinación, es decir el número de contactos que una partícula tiene con las partículas que la rodean y α es un factor que permite modificar la influencia del número de coordinación en el modelo predictivo.

Concluyó que el número de coordinación tiene una mayor influencia en lo que respecta a la determinación de la probabilidad de fractura de una partícula, y mientras mayor es este número, menor es la probabilidad de fractura.

Por otra parte, en los experimentos llevados a cabo en los años 2001 y 2002, se consideraron agregados de partículas tridimensionales compuestas por arenas calcáreas y de sílice y se realizaron simulaciones mediante métodos de elementos discretos [23, 24]. Además, se cuantifica el efecto que induce la alteración de la geometría inicial del aglomerado en la resistencia a la fractura de las partículas que lo componen.

Las conclusiones que se obtuvieron fueron que cuando el valor del módulo de Weibull (m) adquiere valores entre 1.5 y 4, la función de densidad de probabilidad Weibull utilizada se comporta similar a la función de densidad de probabilidad Normal a igual media y desviación estándar. Adicionalmente, se concluyó que no existen variaciones en la resistencia al remover una cantidad inferior al 25% de las partículas iniciales, sin embargo, al remover un mayor porcentaje de partículas, se afecta la geometría inicial del aglomerado de manera que el factor σ_0 se altera de manera considerable.

2.3.6. Modelo de Bridgwater [17]

El estudio conducido por Bridgwater et al. planteó un modelo para medir el desgaste de los materiales. Para conducir dichos experimentos, los autores utilizaron una celda anular, que es un aparato que realiza pruebas de corte sobre un material, sometiéndolo a presiones normales. El dispositivo gira a una velocidad de hasta 1.5 revoluciones por hora mientras se le aplica una masa que presiona el material, obteniéndose así las condiciones necesarias para determinar el esfuerzo de corte de este. La Figura 3 muestra el diagrama de la celda utilizada en el estudio.

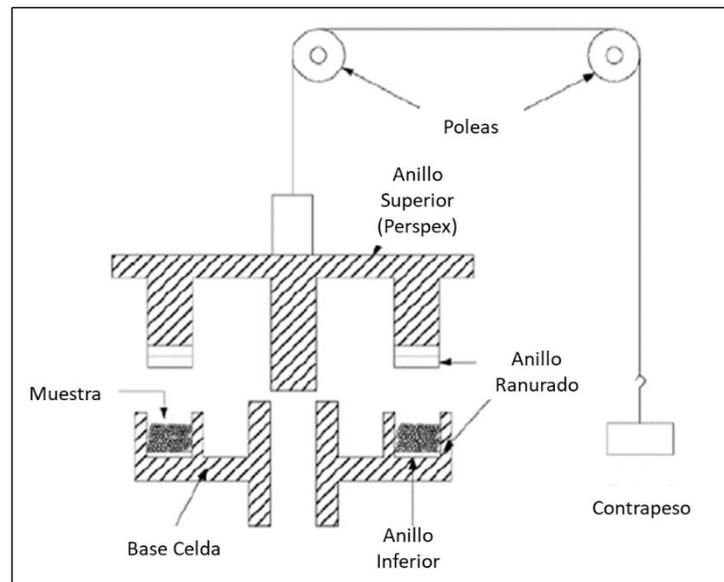


Figura 3: Diagrama Celda Anular Utilizada por Bridgwater

Los dos materiales utilizados, denominados material C y material E, fueron elaborados por los propios autores del estudio y se componen de una mezcla de agua, bauxita, bentonita y almidón de papa, los cuales fueron posteriormente calentados a 400°C por 1.5 horas para después aumentarla por sobre los 1000°C (hasta 1050°C para el material C y 1400°C para el material E) hasta enfriarlos gradualmente a 100°C/h para su endurecimiento. Los materiales se elaboraron con cantidades iguales de materiales a excepción de la cantidad de bentonita (38 g para el material C y 100 g para el material E) y se les moldeó con geometrías similares a las que se visualizan en la Figura 4.

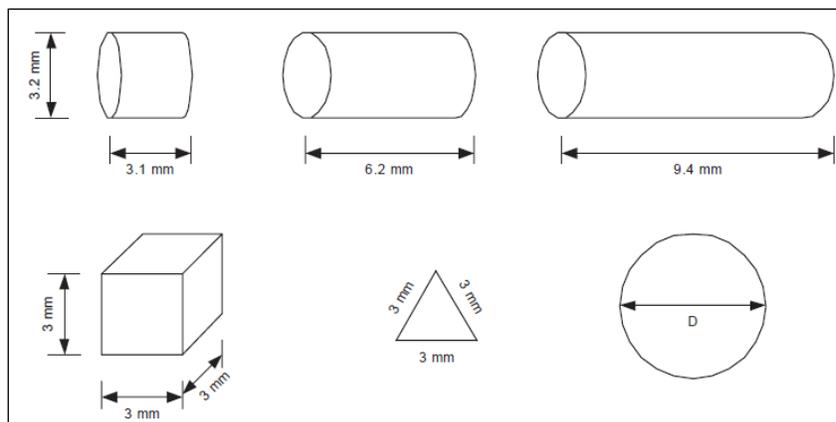


Figura 4: Diagrama de Materiales Utilizados por Bridgwater

La Ecuación 9 define la fracción de masa obtenida mediante atrición o desgaste (W) en función del límite de fractura por tracción (σ_{scs}), la deformación (Γ), el esfuerzo normal (σ), un parámetro relativo a la atrición (ϕ), la tasa de degradación del material (β) y la constante de proporcionalidad de Gwyn (K_N).

$$W = K_N \left(\frac{\sigma \Gamma^\phi}{\sigma_{scs}} \right)^\beta \quad (13)$$

El estudio concluyó que los fragmentos obtenidos producto de la atrición tuvieron una geometría similar, independientemente del esfuerzo aplicado, lo cual puede estar ligado al surgimiento de cadenas de esfuerzos dentro del material. Asimismo, la geometría inicial del material

elaborado (Figura 4) no tuvo mayor injerencia en el nivel de atrición, sustentando aún más la teoría de la influencia de las cadenas de esfuerzos.

Además, se requirió de la aplicación de un esfuerzo mayor para fragmentar el material E en comparación con el C y se presentó una mayor variabilidad en cuanto a los tamaños de partículas obtenidos en el material E. A pesar de lo anterior, se estableció que la formulación planteada es tremendamente efectiva para caracterizar el nivel de atrición en materiales sujetos a esfuerzos.

2.3.7. Modelo de Pierce [4]

Finalmente, el estudio realizado por Pierce desarrolló un modelo híbrido de predicción de fragmentación en minería, puesto que compatibilizó métodos numéricos y empíricos para cuantificar la fragmentación que se obtiene en los puntos de descarga de material. El autor visualizó a la mina como un gran dispositivo de conminución y consideró tres variables de entrada para su modelo:

Distribución de tamaño de material tras fragmentación primaria: Se realizan análisis mediante la metodología *Synthetic Rock Mass* (SRM) o mediante el programa *Block Cave Fragmentation* (BCF).

Energía que aplica el dispositivo sobre el material: Se distinguen tres tipos de energía de conminución; impacto, cizalle y compresión. Las dos primeras se pueden calcular mediante pruebas físicas de acuerdo con las ecuaciones 10 y 11, en tanto la energía de compresión no se definió a cabalidad, estipulando que requiere una investigación más profunda.

$$E_{Imp} = \rho g H \quad (14)$$

$$E_{Ciz} = \xi \sigma \Gamma \quad (15)$$

Propiedades de fragmentación del material: A pesar de lo antes mencionado, el modelo de Hardin puede entregar información respecto tanto a la energía de compresión, como a los

parámetros asociados con los esfuerzos de corte y cizalle, los cuales fueron incorporados al software REBOP (*Rapid Emulator Based on PFC*), a pesar de que el modelo de Hardin no considera la relación de aspecto entre las partículas.

El modelo obtuvo buenos resultados, puesto que sus resultados fueron validados en una mina operativa, sin embargo, se encuentran en espera de un proceso más extenso de validación.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con ciertos aspectos que destacan o distinguen cada uno de los modelos experimentales anteriormente expuestos.

Tabla 2: Cuadro Resumen Modelos Experimentales de Fragmentación Granular

Modelo	Materiales	Método/Tipo de Ensayo	Comentarios Claves/Adicionales
Hardin (1985)	Arenas de cuarzo, basalto, andesita, caliza, granito, variedad de rocas sedimentarias y metamórficas.	Utilización de datos de ensayos de fragmentación de materiales conocidos (Ensayos uniaxiales, biaxiales y triaxiales)	Enfoque de carácter empírico. La metodología no permite conocer la distribución de partículas después de aplicados los esfuerzos.
McDowell (1996)	No Aplica	Simulaciones de Modelos Probabilísticos	No se consideran factores como la razón de vacíos inicial. Define importancia del número de coordinación en la fractura (a mayor número, menor probabilidad).
McDowell (2001, 2002)	Arenas calcáreas y Arenas de Sílice	Modelamiento numérico mediante Método de Elementos Discretos	Se estima la probabilidad de supervivencia de las partículas. La alteración de la geometría de las partículas o del aglomerado, junto con la inclusión de fallas en este último, inducirían la fragmentación.
Bridgwater (2003)	Cerámicos (fabricación propia)	Celda de corte anular. El material es sometido a Esfuerzos de corte y compresivos conocidos	Forma del material fragmentado no varía con la forma inicial del material (se asocia con las cadenas de esfuerzos). Las partículas se fragmentan por división y por atrición. Material con mayor arcilla y temperatura: mayor esfuerzo

			requerido para lograr igual fragmentación.
Pierce (2009)	No Especifica	SRM, REBOP y métodos empíricos	Considera la mina como un dispositivo de conminución secundaria. El método se validó en una mina operativa. No considera factores como el ángulo de impacto ni la orientación de las discontinuidades.

3. Desarrollo Experimental

La fase experimental del proyecto, la cual se presenta a continuación, se enfocó en cuantificar la fragmentación que experimentan distintos materiales granulares al recorrer una estructura que emula a un pique de traspaso de mineral en una faena minera, pero a una escala reducida, en particular una escala de 1:30, de manera de que esta etapa se pudiese realizar en las dependencias del Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción.

En el capítulo que se desarrollará a continuación, se describen los principales aspectos del desarrollo experimental del proyecto, el cual se divide en tres principales secciones: Selección del Material, Caracterización del Material y Procedimiento Experimental.

3.1. Selección de Material

Para seleccionar el material, se consideraron sus características físicas como principal criterio para definir el material a utilizar en las fases subsiguientes del estudio. Teniendo en cuenta que el estudio tiene como objetivo analizar la fragmentación de un material granular durante su extracción, es fundamental que dicho material posea un comportamiento físico similar al que tendría un material que circule por una columna de Block Caving o un pique de traspaso en una operación.

Teniendo en consideración que los materiales utilizados con anterioridad en estudios relacionados con la fragmentación de materiales granulares fueron grava y arcilla, se contemplaron materias primas asociadas al rubro de la construcción como posibles materiales a utilizar en las etapas posteriores de este estudio. Con motivo de lo anteriormente mencionado, en la Tabla 3 se puede apreciar la comparación entre las distintas opciones de materiales evaluados, en tanto, en la Tabla 21 ubicada en el Anexo A.1, se puede ver en mayor detalle la cotización y el valor asociado a cada una de las opciones.

Tabla 3: Materiales Considerados para la Ensayos de Transporte de Material

Material	Formato	Volumen de Material por Formato [m3]	Unidades de Material Necesarias
Adocreto A	Unidad	0.0012	152
Mortero A	Saco	0.0200	10
Hormigón Rápido	Saco	0.0200	10
Adocreto B	Unidad	0.0014	130
Pastelón	Unidad	0.0064	29
Mortero B	Saco	0.0200	10
Solerilla	Unidad	0.0120	16

Considerando la disponibilidad de los materiales expuestos en la Tabla 3 como criterio principal, y el costo total a desembolsar como criterio secundario y el tiempo de preparación del material previo a la realización de los ensayos como último criterio, las opciones “Adocreto A” y “Solerilla” resultaron ser preseleccionadas para ser sometidas a los ensayos de transporte de material.

Teniendo en consideración que a partir de los ensayos realizados con materiales de grava y arcilla que precedieron a este estudio [25, 26, 27], se obtuvo valores de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de 292.24 MPa y 6.76 MPa respectivamente², y de manera de poder obtener datos sobre materiales que se posean rangos intermedios de UCS, los elementos anteriormente preseleccionados fueron sometidos a un ensayo de compresión uniaxial para verificar que su resistencia a la compresión uniaxial fuese, efectivamente, superior a la previamente obtenida para la arcilla, pero inferior al valor obtenido para la grava.

² Valores estimados mediante la fórmula $I_{s50} = (UCS)/K$, con $K=24$ [36].



Figura 5: Equipo Servoplus de Matest para Pruebas de Compresión

Para la realización del ensayo de compresión uniaxial se utilizó el equipo *Servoplus* de Matest que se muestra en la Figura 5, se realizaron cuatro ensayos por material seleccionado, cuyos resultados de ilustran en las Figuras 6 y 7. Los testigos utilizados tenían un diámetro de 58.7 mm y una altura 120 mm, medidas que se encuentran en concordancia con lo estipulado en la norma ASTM D7012 [28].

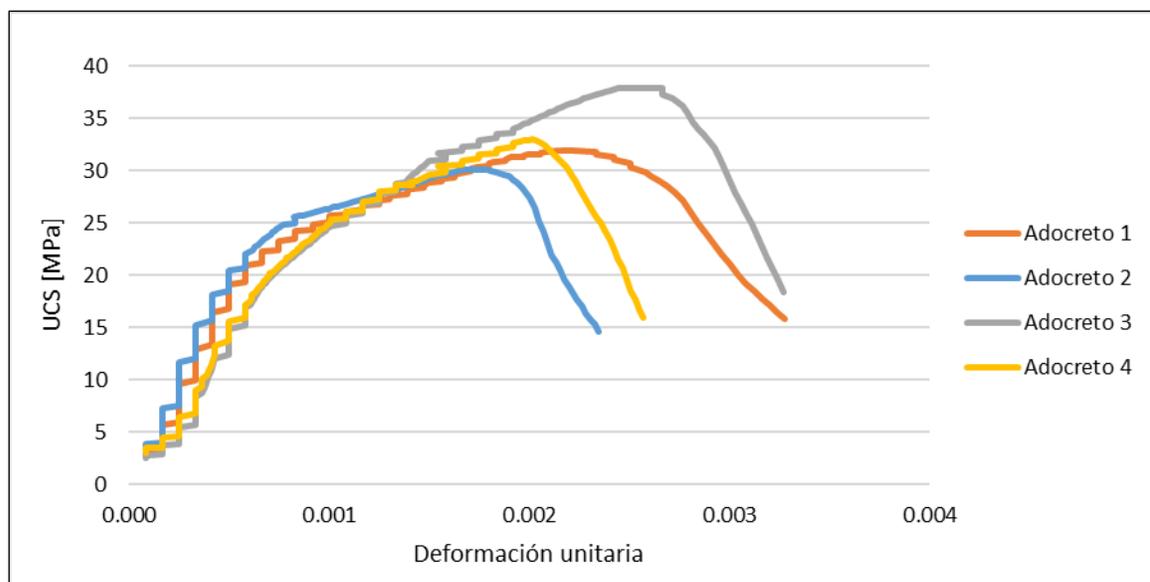


Figura 6: Gráfico UCS vs Deformación Ensayo Adocreto

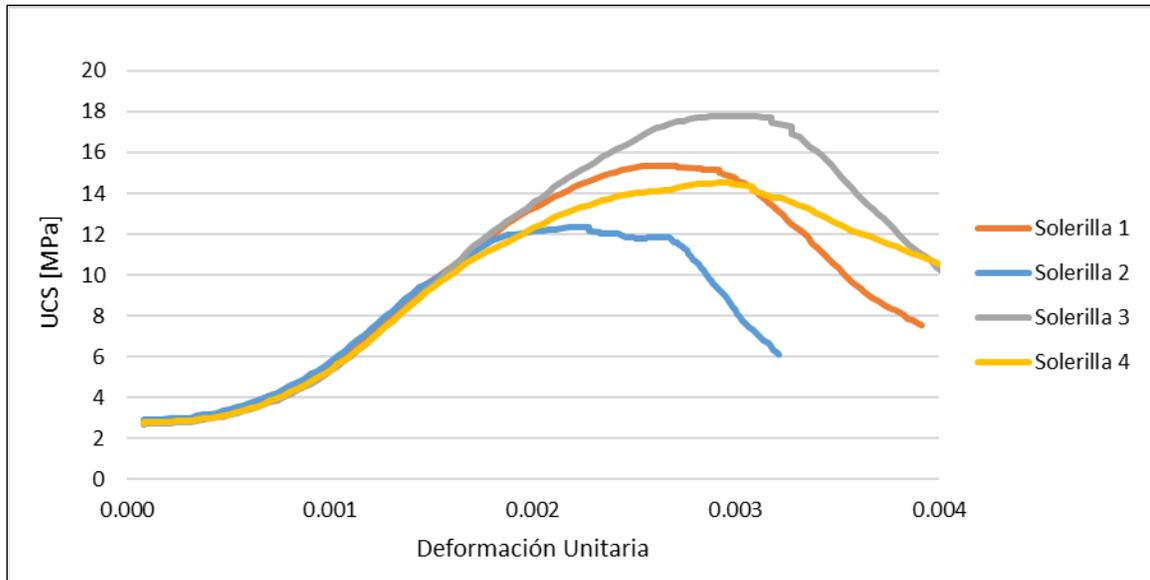


Figura 7: Gráfico UCS vs Deformación Ensayo Solerilla

De los ensayos se obtuvo un UCS promedio de 14.99 ± 2.26 [MPa] para la solerilla y de 33.24 ± 3.36 [MPa] para el adocreto. Considerando que ambos valores de UCS cumplen con la condición de poseer una magnitud superior a la arcilla e inferior a la grava, se seleccionó al adocreto como el material a utilizar en las etapas sucesivas del proyecto puesto que, de los dos materiales preseleccionados, su UCS fue el más cercano al valor intermedio entre los materiales utilizados en los estudios previos.

Los resultados correspondientes a cada uno de los ensayos de compresión se detallan en la Tabla 22 y la Tabla 23 ubicadas en el Anexo A.1, así como dos ejemplos de testigos de adocreto y solerilla pre y post ensayo de compresión.

3.2. Caracterización de Materiales

Previo a la realización de los ensayos de fragmentación, fue necesario definir las propiedades de cada uno de los materiales utilizados de manera previa a la realización de los ensayos de transporte. Cada uno de los valores de los parámetros obtenidos para la arcilla, adocreto y grava se exponen en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 4: Resumen de Parámetros Obtenidos tras Caracterización de Materiales

Parámetro	Grava	Arcilla	Adocreto
Densidad [kg/m ³]	2.670±22	2.593±25	2.444±5
Densidad Aparente [kg/m ³]	1.52	1.158	1.340
Angulo de Fricción Entre Partículas [°]	37.9	44.4	52.1
Angulo de Fricción con Paredes [°]	31.0	25.0	27.6
Coefficiente de Uniformidad (C _u)	2.48	1.74	2.48
Coefficiente de Curvatura (C _c)	1.12	0.85	1.12
Índice de Resistencia a la Carga Puntual (I _{s50}) [MPa]	11.24±2.85	0.26±0.04	2.34±0.27
Porosidad [%]	43.07	55.34	44.39
Esfericidad (S)	0.496	0.603	0.603
Redondez (R)	0.700	0.210	0.319

En la siguiente sección se presentan, de forma detallada, tanto las descripciones como las fórmulas utilizadas para la obtención de cada uno de los parámetros señalados con anterioridad; en tanto, los procedimientos asociados a los respectivos parámetros y los datos utilizados para su cálculo obtención se describen con mayor detalle el Anexo A.2 y en el Anexo A.3 respectivamente.

3.2.1. Índice de Resistencia a la Carga Puntual

El índice de resistencia a la carga puntual (I_s), es un método que permite obtener el valor del UCS mediante un método indirecto denominado ensayo de carga puntual. Teniendo en consideración que las muestras de grava no podían ser sometidas a un ensayo de compresión uniaxial, puesto que no cumplían con las disposiciones establecidas en la norma ASTM D5731-02, dado que las muestras no contaban con las dimensiones requeridas para dicho ensayo, se optó por obtener el valor del UCS mediante un método indirecto, el cual se describe en la presente sección.

Al obtener el valor del I_s , el cual se obtuvo mediante la Ecuación 16, se procedió a realizar la conversión para obtener el valor del I_{s50} , que corresponde al Índice de Resistencia a la Carga Puntual homologado a 50 mm, de manera de normalizar las muestras utilizadas en los ensayos.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (16)$$

Donde P representa a la carga aplicada al momento de falla del testigo medida en Newton [N], en tanto D_e corresponde al diámetro del núcleo equivalente medido en milímetros [mm]. La relación entre los diámetros equivalentes del testigo utilizado y el requerido para el cálculo del I_{s50} se describen con mayor detalle en el Anexo A.3.

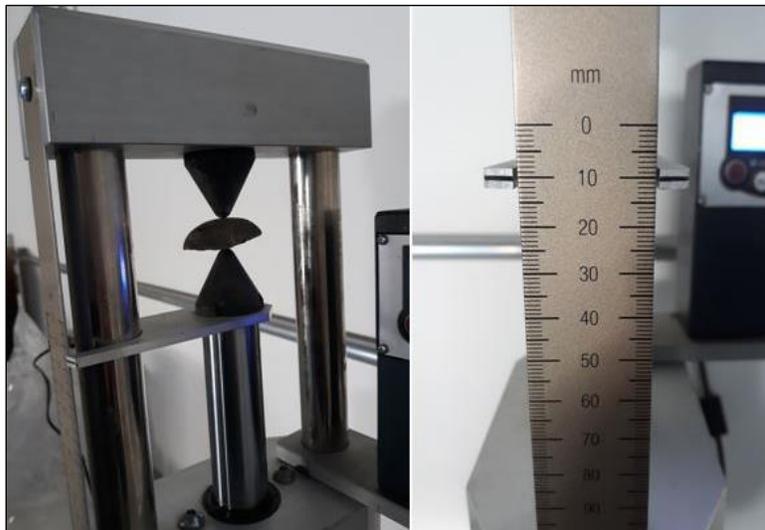


Figura 8: Dispositivo de Ensayo de Carga Puntual

Los ensayos de carga puntual se realizaron en el Dispositivo de Carga Puntual que se aprecia en la Figura 8; una vez efectuados, y procurando que estos sean considerados válidos según la norma ASTM 5731, se procede a realizar la conversión a los valores de I_{s50} , los cuales corresponden a 0.26 ± 0.04 MPa para el material granular de arcilla, 11.24 ± 2.85 MPa para el de grava y 2.34 ± 0.27 MPa para el adocreto. El estado de los testigos de adocreto antes y después de la realización de los ensayos de carga puntual se puede apreciar en la Figura 9.



Figura 9: Testigos de Adocreto Antes (derecha) y Después (izquierda) de los Ensayos de Carga Puntual

3.2.2. Densidad Real, Densidad Aparente y Porosidad

Densidad Real

La densidad es una magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo o sustancia y se expresa mediante el cociente entre la masa y el volumen de este. La densidad es una propiedad física de la materia de carácter intensivo, es decir, que es un valor característico para cada cuerpo o sustancia; es así como el volumen de un cuerpo de material y masa conocida no puede tener un volumen cualquiera, sino que este debe ser concordante con la magnitud de su densidad. En el sistema internacional de medidas (S.I.), su unidad de medida es de kg/m^3 , aunque comúnmente también se utilizan g/cm^3 y ton/m^3 como unidades de medición.

Cabe destacar que la densidad de las sustancias, en los tres estados de la materia, varía dependiendo de la presión a la que se encuentran sometidos y a su temperatura; es por ello que para las experiencias descritas a continuación, se consideró como referencia una densidad del agua de 1000 kg/m^3 , que corresponde a la magnitud de su densidad cuando se encuentra a una presión de 1 atmósfera (atm) y a una temperatura de 4.0°C .

En el siguiente apartado, se muestran los métodos que se utilizaron para obtener las densidades de los materiales granulares de arcilla, adocreto y grava. La densidad para los dos

primeros materiales se obtuvo mediante el método de picnometría, en tanto, la densidad de la grava se obtuvo mediante el método de desplazamiento de líquido.

Densidad Mediante Desplazamiento de Líquido

La densidad se obtiene a partir del cociente entre la masa total de material sumergido y la diferencia entre el volumen final e inicial de fluido como se muestra en la Ecuación 17. Para medir la variación de volumen, se utilizó una probeta de graduación de 1 ml.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V_f - V_i} \quad (17)$$

Donde ρ corresponde a la densidad en kg/m^3 , m_i es la masa de del fragmento i -ésimo del material, V_i corresponde al volumen inicial medido en la probeta, en tanto V_f corresponde al volumen del fluido medido en la probeta una vez se introduce la totalidad del material dentro de esta.

El procedimiento de determinación de la densidad real de la grava consistió en seleccionar 8 conjuntos de muestras de grava elegidos de forma aleatoria, los cuales se masaron en una balanza de precisión ± 0.01 g. La densidad media obtenida mediante la metodología antes descrita fue de $2670 \pm 48 \text{ kg/m}^3$. El detalle de los datos utilizados y los resultados obtenidos se presentan en el Anexo A.3.

Densidad Mediante Picnometría

Este método permite determinar la densidad de manera más exacta puesto que los picnómetros, que son unos recipientes de vidrio en forma de matraz, se someten a un proceso de calibración de manera sistemática, permitiendo conocer de manera precisa el volumen que son capaces de almacenar. El picnómetro posee un tapón con un pequeño capilar que permite la expulsión de las burbujas de aire una vez que este se enrasa con agua destilada. El detalle del procedimiento utilizado se expone en el Anexo A.3. Por otra parte, los valores asociados al mencionado procedimiento se muestran en el Anexo A.2. La densidad del sólido se obtuvo utilizando la Ecuación 18.

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (18)$$

Donde ρ corresponde a la densidad en kg/m^3 , m_s es la masa material utilizado en el procedimiento y V_s corresponde al volumen del material calculado a partir del procedimiento. En la Figura 10 se vislumbra el picnómetro junto con la balanza utilizada en el ensayo de picnometría.



Figura 10: Balanza Digital y Picnómetro

Se realizaron 3 ensayos tanto para la arcilla como para el adocreto, y estos arrojaron una densidad media de $2593 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ para la arcilla y una densidad promedio de $2444 \pm 5 \text{ kg/m}^3$ para el adocreto.

Densidad Aparente

La densidad aparente de un material es la relación entre su volumen y su masa, incluyendo huecos y poros de este. La densidad aparente de los materiales granulares de grava y de arcilla, se determinó pesando una muestra y vertiéndola en una probeta, midiendo el volumen total ocupado, sin embargo, se considera que los espacios generados entre los fragmentos de material y la pared del recipiente son una considerable fuente de error para la medición de la densidad. Se obtuvo como

resultado una densidad aparente del material granular de grava igual a 1520 kg/m^3 y una densidad aparente del material granular de arcilla igual a 1158 kg/m^3 .

Para el material granular de adocreto, realizaron tres ensayos similares al de desplazamiento de líquido, pero en esta ocasión se utilizó un único fragmento en cada ensayo con diámetro superior a 37 mm, impermeabilizando cada una de las muestras mediante la aplicación de un envoltorio de papel film plástico y, utilizando la Ecuación 19, se estableció la densidad aparente.

$$\rho_a = \frac{m_s - m_p}{V_f - V_i} \quad (19)$$

Donde ρ corresponde a la densidad en kg/m^3 , m_s masa del material, m_p es masa del envoltorio de papel filme plástico, V_i corresponde al volumen inicial medido en la probeta, en tanto V_f corresponde al volumen del fluido medido en la probeta una vez se introduce la totalidad del material dentro de esta. Del procedimiento anterior se obtuvo una densidad aparente del material granular para el adocreto de 1359 kg/m^3 .

Porosidad

La porosidad corresponde a la fracción o porcentaje del material que está compuesto por vacíos, poros o aberturas y se relaciona, aunque no de manera directamente proporcional, a la permeabilidad, que es la capacidad de un material de permitir el paso de un fluido sin que su composición se vea alterada. Para los materiales de arcilla, adocreto y grava, la porosidad se calculó mediante la Ecuación 20, la cual se presenta a continuación, y se utilizaron las densidades descritas con anterioridad en esta sección.

$$\phi = \left(1 - \left(\frac{\rho_a}{\rho} \right) \right) * 100 \quad (20)$$

Donde ϕ corresponde a la porosidad expresada en porcentaje, en tanto ρ y ρ_s corresponden a las densidades real y aparente respectivamente, medidas en kg/m^3 . En consecuencia, se obtuvo

una porosidad de 43.07% para la grava, de 55.34% para la arcilla y una porosidad de 44.39% para el adocreto.

3.2.3. Propiedades de Fricción de los Materiales

La fricción se define como el fenómeno que describe la necesidad de la acción de una fuerza de cizalle, y de carácter tangencial a la superficie sobre la que actúa, para que dos superficies que se encuentran en contacto deslicen a lo largo de un plano paralelo al plano sobre el cual interactúan [13]. La fricción; la cual puede ser de tipo estática, cuando esta se opone al inicio del deslizamiento; o de tipo dinámica, cuando se opone al deslizamiento de un objeto o partícula en movimiento; tiene injerencia considerable en el estudio del comportamiento de los materiales tanto a nivel microscópico, tal como lo expuso Griffith [12]; a nivel de partículas y/o agregados de las mismas, tal como se demostraron en los experimentos conducidos por Bridgwater [17] y a nivel macroscópico, como es el caso de las fallas geológicas.

En esta sección, se definen dos propiedades relacionadas con la fricción que son de interés para el proyecto: la fricción entre las paredes y el material, y el ángulo de fricción interna.

Ángulo de Fricción entre Paredes y Material

Esta propiedad indica la fricción entre las paredes de la representación del pique a escala de laboratorio, hecho de PVC o cloruro de polivinilo, y el material del agregado de partículas que fluye por el interior de este. El ángulo de fricción entre las paredes y el material es indicador de la resistencia al desplazamiento proporcionada por el tubo de PVC sobre el material que fluya por su interior.

Para la determinación de esta propiedad, se utilizaron dos tubos de PVC, de 1 y 2 metros de longitud respectivamente. El material se colocó en uno de los extremos del tubo, el cual se posiciona inicialmente de forma horizontal, procediendo a alzar el mismo extremo hasta que el material deslizara, procurando mantener el otro extremo fijo en la posición inicial. Considerando la altura vertical a la que comenzó el deslizamiento del material, y mediante trigonometría, se pudo obtener el ángulo de fricción entre las paredes del tubo y el material, el cual fue de 27.6° para el adocreto;

25.0° para la arcilla, y 31.0° para la grava. Los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados se detallan en la Tabla 38 en el Anexo A.3.

Ángulo de Fricción Interna

El ángulo de fricción interna posee una relación estrecha con la teoría de Mohr-Coulomb, y corresponde, de manera gráfica, al ángulo formado entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr. La relación anteriormente mencionada se denomina Criterio de Falla de Mohr- Coulomb, y se presenta en la Ecuación 21.

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi) + C \quad (21)$$

En donde τ es el esfuerzo de corte, σ_n corresponde al esfuerzo normal, C corresponde a la cohesión, que es la fuerza que mantiene unida a las partículas de un mismo material entre sí, y ϕ que representa al ángulo de fricción interna.

De manera más tangible, el ángulo de fricción interna se relaciona corresponde al máximo ángulo posible para la pendiente de un cúmulo de material granular, propiedad que comúnmente se conoce como el ángulo de reposo del material.

El ángulo de fricción interna de los tres materiales que se contemplan en el proyecto se obtuvo, de manera indirecta, mediante ensayos de corte directo. El equipo utilizado para la realización de los ensayos fue el Aparato de Ensayo de Corte Directo o Residual S276 de la marca Matest, el cual se puede apreciar en la Figura 11, y el procedimiento de los ensayos se realizó en concordancia con lo estipulado en la norma ASTM D3080/D3080M tal y como se encuentra explicitado en el Anexo A.2.



Figura 11: Equipo Matest S276 para Ensayos de Corte Directo

Dicho ensayo permite obtener los valores del esfuerzo de corte en base a la medición de las deformaciones máximas del material mediante la aplicación de fuerzas perpendiculares entre sí (una de ellas normal y otra paralela a la dirección del movimiento de la caja de corte), generándose así un plano de cizalle. La aplicación de distintas fuerzas normales sobre el dispositivo permitió obtener un gráfico de esfuerzo de corte y esfuerzo normal, cuya ecuación de la recta se contrastó con la ecuación del Criterio de Falla de Mohr Coulomb (Ecuación 21), en donde la pendiente de la ecuación de la recta corresponde a la tangente del ángulo de fricción interna del material ($\tan \phi$) y el coeficiente de posición corresponde a la cohesión del material (C) en kPa.

La Figura 12, presenta el gráfico de esfuerzo normal y esfuerzo cortante para el adocreto considerando los valores obtenidos a partir de 7 ensayos de corte directo.

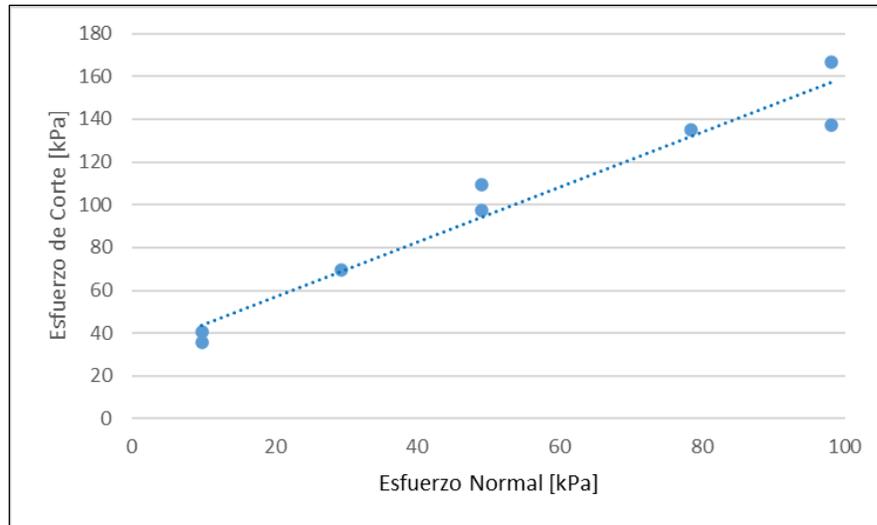


Figura 12: Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para el Adocreto

En tanto los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) para los tres materiales considerados en el proyecto se detallan en la Tabla 5 que se presenta a continuación.

Tabla 5: Ángulos de Fricción Interna y Cohesión de los Materiales Utilizados

Material	Angulo de Fricción Interna [°]	Cohesión [kPa]
Arcilla	44.39	19.953
Adocreto	52.12	31.132
Grava	37.89	22.720

A partir de los datos obtenidos de los ensayos de corte antes mencionados, se pudo obtener el gráfico de dilatancia asociado a cada uno de los materiales. La dilatancia es la variación de volumen de un material granular que ocurre como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo de corte. En la Figura 13 se vislumbra el gráfico de dilatancia del adocreto, mostrando un comportamiento acorde con lo esperado para un material granular, es decir un aumento de volumen de la muestra a medida que se desarrolla el ensayo, además de una mayor compactación del material a medida que el esfuerzo normal aplicado aumenta.

El detalle de los valores obtenidos mediante los ensayos de corte se expone en el Anexo A.3.

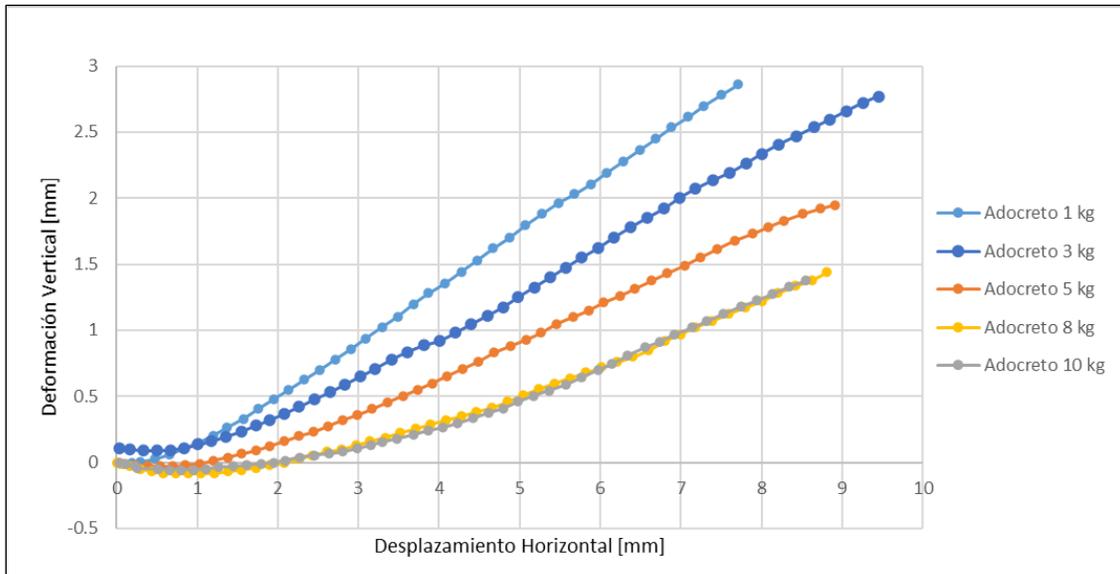


Figura 13: Gráfico Dilatancia Adocreto

3.2.4. Factor de Forma

El tamaño y la forma son dos características que influyen directamente en la potencial fragmentación del material. Si bien el tamaño máximo inicial de las partículas es un factor que se encuentra establecido de forma predeterminada para este proyecto bajo el criterio que se expone en la sección 3.2.4. del presente informe, la forma de las partículas no se encuentra sujeta a restricción alguna.

Según lo expuesto por Hardin, la forma de las partículas influye en la fragmentación del material según lo expresado en la Ecuación 9 que forma parte de la función de quiebre planteada por el autor. Asimismo, McDowell indicó que al introducir irregularidades sobre un agregado de partículas simétrico, el esfuerzo requerido para fragmentar el material disminuye considerablemente.

En esta sección, se describen y definen dos características relacionadas con la forma de las partículas que son de interés para el proyecto: la redondez y la esfericidad.

Esfericidad

La esfericidad es una propiedad que compara el largo, ancho y alto de la partícula para establecer, de manera cuantitativa, el nivel de similitud entre la partícula y una esfera de igual volumen; y se determina utilizando la Ecuación 22.

$$Esfericidad = \frac{r_{max-in}}{r_{min-cir}} \quad (22)$$

Donde r_{max-in} corresponde al radio de la esfera más grande que se puede inscribir dentro de la partícula y $r_{min-cir}$ corresponde al diámetro de la esfera más pequeña que se puede inscribir en la partícula.

Redondez

La redondez se centra en relacionar, cuantitativamente, el grado de curvatura de las aristas de la partícula con el radio máximo de la esfera mayor que se pueda inscribir en la partícula. Esta propiedad se define utilizando la Ecuación 23.

$$Redondez = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-in}} \quad (23)$$

Donde r_i corresponde al radio de la circunferencia inscrita en la arista "i", en tanto N corresponde al número total de circunferencias inscritas en las aristas de la partícula.

Tanto la esfericidad como la redondez son magnitudes adimensionales y sus valores pueden tomar valores entre 0 y 1. De acuerdo con los valores obtenidos en las dos propiedades antes mencionadas, se puede clasificar de manera cuantitativa en base a la clasificación planteada por Krumbein y Pettijohn [29], la cual se puede apreciar en la Figura 14.

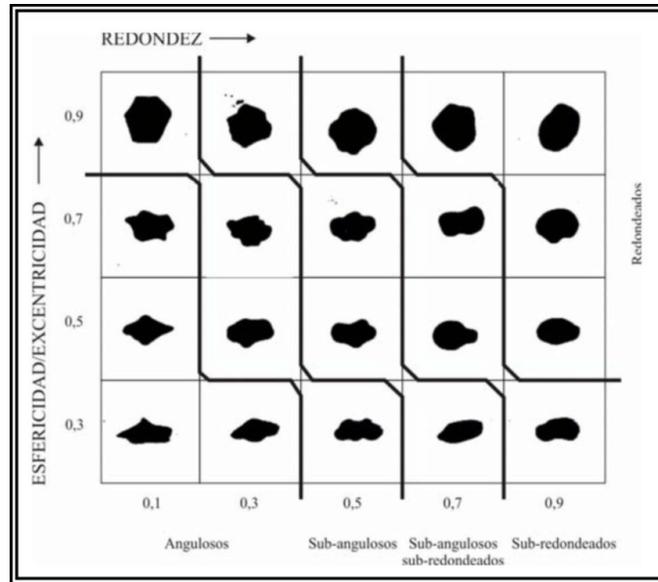


Figura 14: Clasificación de Esfericidad y Redondez de Krumbein y Pettijohn

La determinación de ambos parámetros se efectuó mediante un análisis digital de fotografías realizado a través del software *Autodesk AutoCAD* sobre las cuales se inscribieron y circunscribieron los radios requeridos para el posterior cálculo de la redondez y la esfericidad. El análisis se realizó en base a imágenes de distintos fragmentos de cada material; 5 correspondientes a partículas de diámetro entre 18 y 37 mm, 5 de diámetros entre 16 y 18 mm y 5 de diámetros entre 10 y 16 mm; cada uno de estos elegidos de manera aleatoria. No se analizaron fragmentos de menor tamaño puesto que se consideró que la resistencia de las partículas de menor tamaño, dada su menor escala, no eran representativas de la resistencia real de los materiales, por lo que su inclusión podría variar significativamente la esfericidad y la redondez real del material.

Según las consideraciones anteriormente expuestas, se obtienen los valores de esfericidad, redondez y forma de la partícula para cada uno de los materiales utilizados en el proyecto, los cuales se encuentran explicitados en la Tabla 6.

Tabla 6: Esfericidad, Redondez y Forma de Partícula Iniciales

Parámetro	Grava	Arcilla	Adocreto
Esfericidad (S)	0.496	0.603	0.603
Redondez (R)	0.700	0.210	0.319
Forma de las Partículas	Sub-redondeados	Angulosos/Sub-angulosos	Sub-angulosos

3.2.5. Coeficientes de Uniformidad y de Curvatura

Para poder representar de mejor manera el comportamiento mecánico de diferentes tipos de suelos y materiales, además tener la capacidad de compararlos y clasificarlos bajo un único criterio [30, 31], resulta conveniente expresar ciertas características de forma numérica, tal como las relacionadas con el tamaño de las partículas o su distribución granulométrica.

Uno de los métodos mayormente utilizados para efectos de la caracterización granulométrica de los materiales, fue el planteado por Hazen, quien define el Coeficiente de Uniformidad (C_u) como un índice que cuantifica la uniformidad de la distribución de tamaños de una muestra de material granular [21]. Mientras más cercano a 1 es el valor de C_u , más uniforme es la distribución de tamaños. El coeficiente de uniformidad se define según la Ecuación 24.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (24)$$

Donde d_{10} representa al diámetro de partícula bajo el cual se encuentra un 10% del material total, en cambio d_{60} representa al diámetro de partícula bajo el cual se encuentra el 60% del material total. El coeficiente de uniformidad se calculó a partir de la distribución granulométrica de los materiales. El C_u inicial para la arcilla fue de 1.74, en tanto para el adocreto y la grava fue de 2.48.

Por otra parte, el Coeficiente de Curvatura (C_c) indica la proporción entre los tamaños o que tan graduados se encuentran los diferentes rangos de tamaños en las partículas de suelo. Un suelo se considera como bien graduado cuando el C_c posee un valor entre 1 y 3 [30]. El coeficiente de curvatura se define según la Ecuación 25.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} * d_{60}} \quad (25)$$

Donde d_{30} corresponde al diámetro de partícula bajo el cual se encuentra el 30% del material total. Se obtuvo un valor inicial de C_c de 0.85 para la arcilla y de 1.12 para la grava y el adocreto.

3.3. Procedimiento Experimental

La sección que se presenta a continuación se puede desglosar en dos etapas principales. En primer lugar, se describen los procesos asociados a la fragmentación del material desde su formato original a fragmentos más pequeños, y la generación de las curvas granulométricas que surgieron como consecuencia de dicha fragmentación. La segunda etapa se enfoca en la descripción, tanto del modelo a escala de un pique de traspaso, como de los ensayos realizados en el mencionado modelo.

3.3.1. Conminución, Clasificación y Distribución Granulométrica Inicial

Los procesos que se describen a continuación se llevaron a cabo en dos locaciones: La Planta Piloto Metalúrgico-Química Dr. Igor Wilkomirsky de la Universidad de Concepción, en donde se realizó el secado y chancado del material; y el Laboratorio de Mecánica de Rocas en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción, en donde se efectuó la clasificación del material previamente fragmentado.

Secado y Chancado

Dado el estado de humedad en el que se encontraba el adocreto, el cual se puede visualizar en la Figura 15, y tal como se realizó con los ladrillos de arcilla [26], se procedió a secar el material en un horno industrial para secado de muestras, puesto que la presencia de humedad modificaría la resistencia real del material tanto en el proceso de chancado, como en el ensayo de transporte.



Figura 15: Adocretos Húmedos antes de Chancado

Los adocretos fueron secados en el horno industrial por 36 horas a una temperatura de 40°C y posteriormente fueron dejados enfriar por 12 horas para que su temperatura se igualase a la temperatura ambiente. Una vez transcurrido este periodo, y luego que se verificase que las condiciones de humedad del material eran las adecuadas para los procesos subsecuentes, se procedió con la etapa de chancado.

Para la fase de chancado de los tres materiales se utilizó un chancador de mandíbulas tipo *Blake*, configurado para que el diámetro de los fragmentos de material resultantes no fuese superior a 1 pulgada. Dada la alta resistencia de la grava, fue necesario procesar el material proveniente del chancado primario en un chancador de conos para que, de esta manera, se pudiesen obtener fragmentos de menor tamaño. El chancador de mandíbulas utilizado en el proceso de conminución se puede apreciar en la Figura 16.



Figura 16: Chancador de Mandíbulas

Clasificación Mediante Harnero y Tamiz

La clasificación del material de mayor diámetro se llevó a cabo mediante un harnero marca SALAS, el cual se presenta en la Figura 17, el cual posee mallas de abertura 5 mm, 6 mm, 10 mm, 16 mm y 37 mm. Teniendo en consideración que, según lo expuesto por Hambley et al., la relación entre el diámetro de los fragmentos material que circulan por el pique de traspaso y el diámetro de éste, debe ser superior a 1 : 5 para que la frecuencia relativa de colgaduras sea mínima y, por consiguiente, la probabilidad de flujo sea alta [5]. Teniendo presente que el diámetro del tubo de PVC que emula al pique de traspaso posee un diámetro de 110 mm, el diámetro máximo de los fragmentos debiese ser de 22 mm, sin embargo, considerando que el harnero utilizado no cuenta con una malla con abertura de esa dimensión, y considerando también que, en la fase de conminución del material, el chancador de mandíbulas fue configurado para que el diámetro de salida no superase los 25.4 mm, se estableció que el diámetro máximo de las muestras o d_{100} , fuese el previamente establecido en la fase de reducción de tamaño.

Para la realización de la clasificación, se evitó utilizar la función vibratoria del harnero, de modo de minimizar el efecto del equipo en la fragmentación del material, de modo que la fragmentación medida al final del proyecto proceda mayormente del ensayo de transporte.



Figura 17: Harnero Utilizado para Clasificación de Material Granular Superior a 5 mm

Si bien la clasificación del material granular de diámetro superior a 5 mm pudo ser realizada en el harnero descrito con anterioridad, los fragmentos de material de diámetros inferiores, los cuales poseen un rol de suma importancia en lo que respecta a la correcta caracterización del material y la posterior cuantificación de la fragmentación producto del transporte, debieron ser clasificados en una tamizadora o *Ro-tap*, equipo que se puede apreciar en la Figura 18, aparato que posee mallas de aberturas inferiores a 5 mm. En concreto, tanto para la clasificación del material granular de adocreto como el de arcilla, se utilizaron las mallas #8 y #4, que corresponden a aberturas de 1.17 y 2.36 mm respectivamente.



Figura 18: Ro-tap Utilizado para Clasificación de Material Inferior a 5 mm

Una vez finalizado el proceso de clasificación, se procedió a la caracterización del material mediante sus curvas granulométricas, para lo cual se realizó el registro de las masas retenidas en cada una de las mallas tanto del harnero como del *Ro-tap*. Dada las masas obtenidas para el adocreto, se procedió a utilizar una curva granulométrica que se ajustase a la obtenida previamente para la grava. En la Figura 19 se exhiben las curvas granulométricas iniciales obtenidas para cada uno de los tres materiales que forman parte del proyecto, las cuales serán contrastadas con las curvas granulométricas obtenidas tras la realización de los ensayos de transporte, y que se presentarán en el Capítulo 5 de este proyecto, con el propósito de cuantificar la fragmentación del material con motivo de los ensayos.

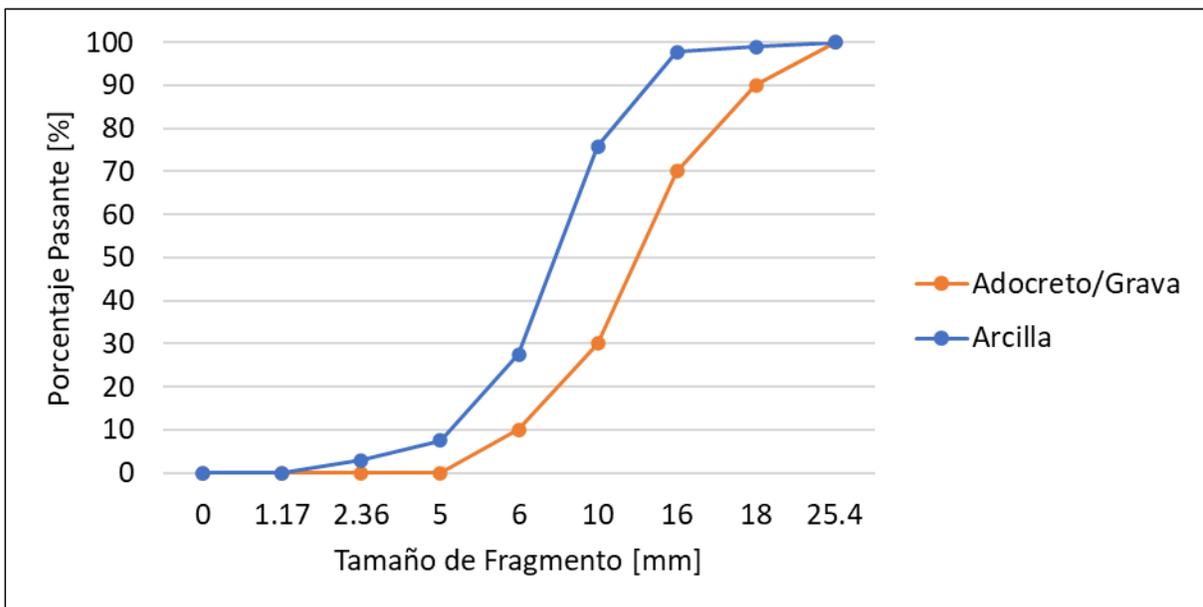


Figura 19: Curvas Granulométricas Iniciales

Los datos asociados a la confección de las curvas granulométricas antes descritas se encuentran definidas en el Anexo B.1.

3.3.2. Descripción del Dispositivo de Flujo

El pique de traspaso a escala de laboratorio se encuentra compuesto por tres tubos de *PVC* de 1, 2 y 3 metros de longitud respectivamente, todos ellos de 110 mm de diámetro. Dependiendo

de la longitud requerida en cada uno de los ensayos, los tubos se iban montando sobre una estructura metálica que permitía sostenerlos verticalmente, de manera tal que el material fluyese a través del conducto por acción de la fuerza de gravedad. Una vez el material comenzaba a fluir, el material se iba depositando en una bandeja metálica vibratoria cuya función era permitir el descenso del material a un ritmo constante y dirigir los fragmentos, por medio de una boquilla integrada en la bandeja, hacia un depósito plástico que los retuviera una vez finalizado el ensayo. Cabe destacar que la bandeja vibratoria se añadió la estructura únicamente para los ensayos realizados con adocreto; para el caso de los dos materiales previamente analizados, es decir la grava y la arcilla, la extracción del material fue realizada manualmente. En la Figura 20 se puede visualizar el pique de traspaso a escala de laboratorio que fue utilizado para este proyecto con la adición de la bandeja vibratoria añadida antes de la realización de los ensayos con adocreto.



Figura 20: Pique de Traspaso a Escala de Laboratorio Montado en Estructura Metálica

3.3.3. Descripción de Ensayos de Flujo

Se realizaron ensayos para cinco alturas distintas: 1 m, 2 m, 3 m, 6 m y 18 m para el caso del adocreto³, cada uno de estos ensayos fue efectuado dos veces a excepción del ensayo de 18 metros,

³ Tanto para la grava como para la arcilla se realizaron ensayos de 1,2,3 y 6 metros únicamente.

el que se efectuó en una única ocasión. Dada las limitaciones propias del dispositivo construido, el material ya ensayado debió ser recirculado por el tubo de 3 metros para poder obtener los datos asociados a las mayores longitudes de ensayo propuestas⁴.

Para poder contrastar de manera efectiva la fragmentación anterior y posterior a la realización de los ensayos de flujo, se debe procurar que el material utilizado en cada ensayo respete la distribución granulométrica que se visualiza en la Figura 19 y cuyo detalle se puede encontrar en el Anexo B.1. De acuerdo con lo anterior, se obtienen las masas de material requeridas para cada uno de los intervalos de tamaños establecidos en la fase de clasificación, las cuales se mezclan y homogenizan de tal manera que la distribución de los tamaños sea similar en todos los puntos del conjunto de fragmentos. Posteriormente se cubrió uno de los extremos del tubo de *PVC* con un tapón de poliestireno para evitar la salida del material y se procedió a cargar el material dentro de los tubos, en primera instancia inclinando el tubo levemente desde la posición horizontal para así evitar la fragmentación del material por impacto, para poco a poco ir aumentando la verticalidad del tubo hasta que este se posiciona de manera perpendicular al suelo. Una vez llenado el tubo, este se montó y se fijó a la estructura metálica para así dar inicio al ensayo mediante la extracción del tapón de poliestireno y la simultánea conexión de la bandeja vibratoria a la red eléctrica. La vibración de la bandeja, junto con una ocasional intervención manual, permitieron que los fragmentos de material fuesen expulsados a través de la boquilla hacia el depósito plástico en donde finalmente debían ser depositados a la espera de la fase de clasificación post ensayo. Es importante señalar que el depósito plástico seleccionado como receptor del material contaba con una baja profundidad y fue posicionado lo más cercano posible a la boquilla de la bandeja vibratoria, para así minimizar la fragmentación por impacto tras el ensayo.

⁴ Se realizaron dos circulaciones del material para los ensayos de 6 metros y seis circulaciones del material para el ensayo de 18 metros.

4. Resultados

El capítulo que se presenta a continuación se enfoca en reportar y analizar los principales resultados obtenidos tras la realización de los ensayos de flujo gravitacional en piques a escala de laboratorio.

4.1. Caracterización del Material Tras Ensayo de Fragmentación a Escala de Laboratorio

4.1.1. Curvas Granulométricas Post Ensayos

En la siguiente sección se muestra una comparación entre las curvas de distribución de tamaños iniciales y post ensayos para los tres materiales utilizados durante el presente estudio. Dado que, como se mencionó en el capítulo 3.3, se realizaron al menos dos ensayos por cada una de las longitudes de pique a escala de laboratorio, las curvas granulométricas presentadas a en las Figuras 21, 22 y 23 corresponden al promedio de los ensayos individuales realizados para cada distancia.

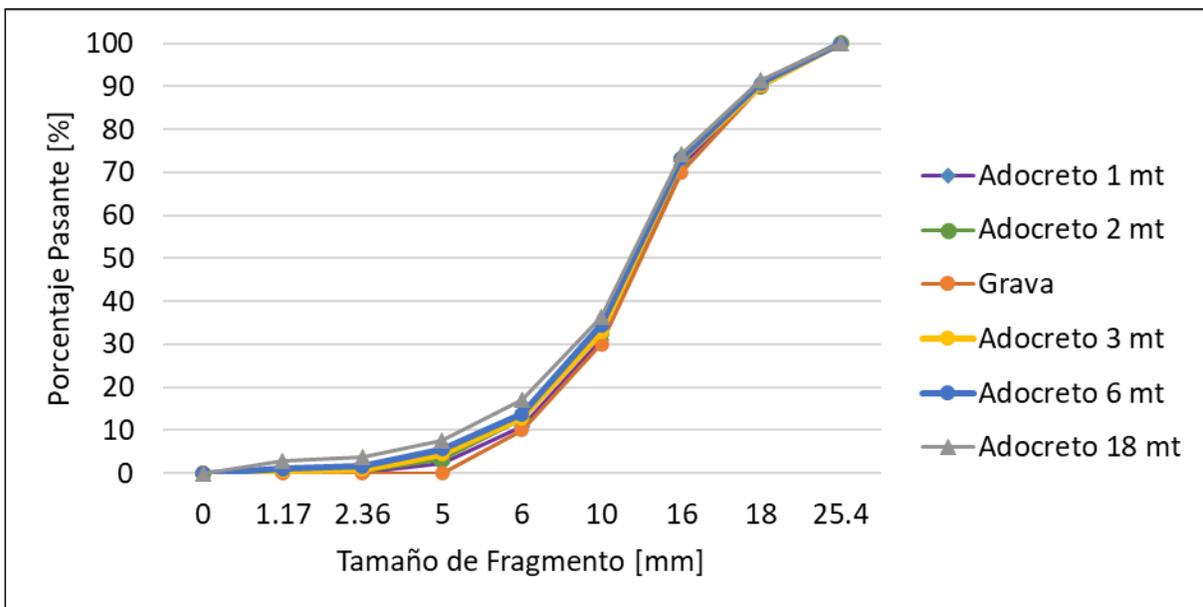


Figura 21: Curvas Granulométricas de Adocreto Antes y Después de Ensayos

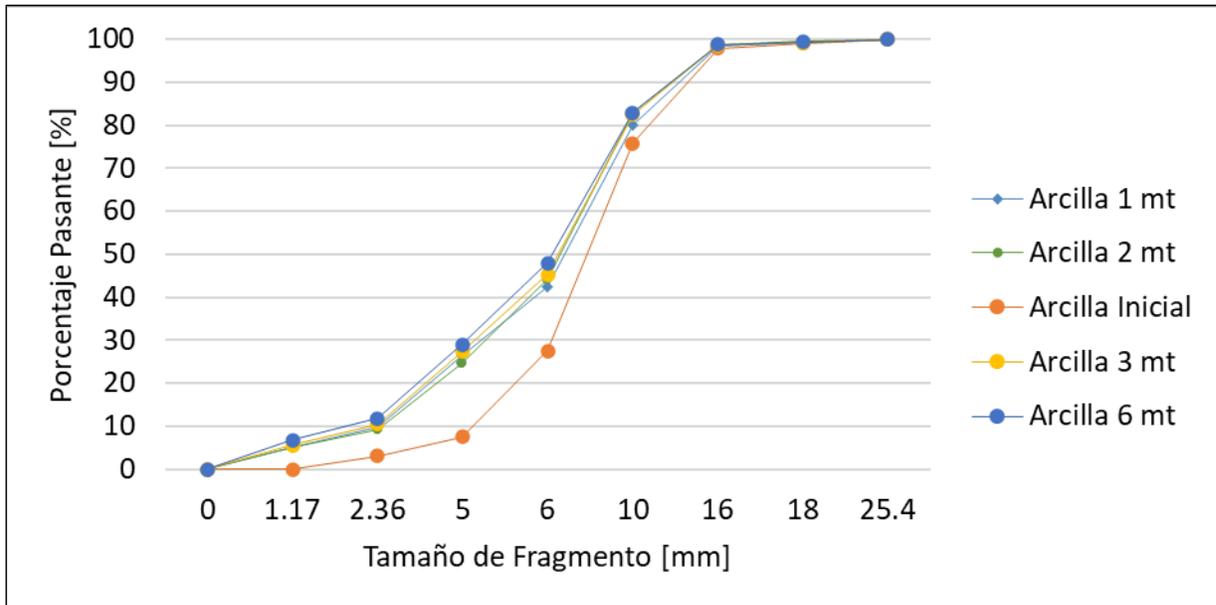


Figura 22: Curvas Granulométricas de Arcilla Antes y Después de Ensayos

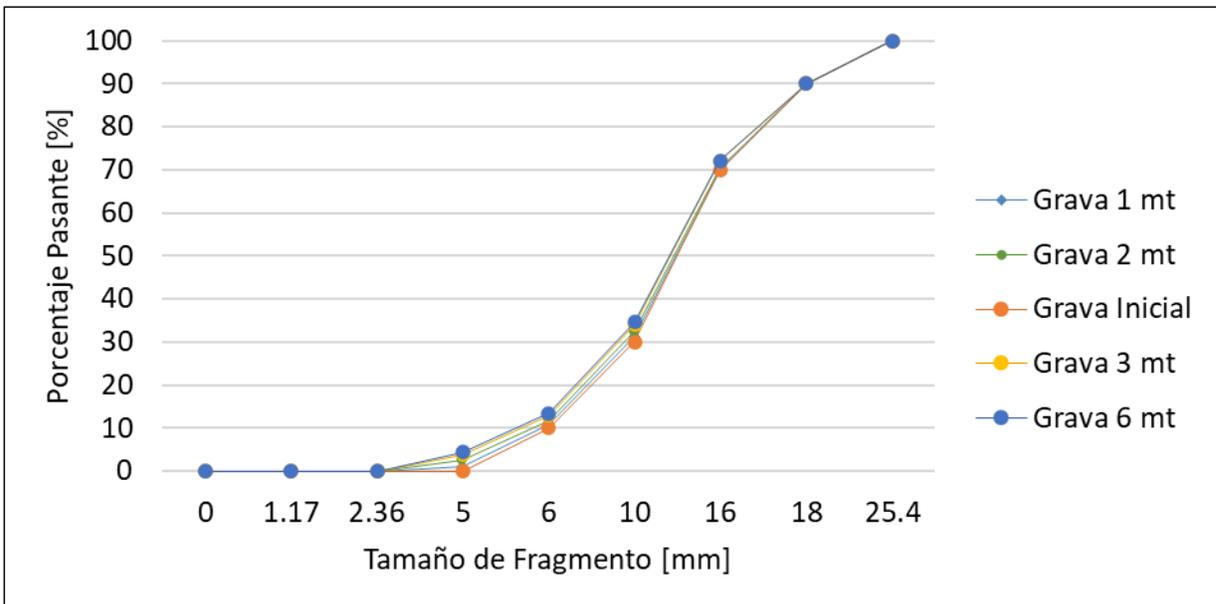


Figura 23: Curvas Granulométricas de Grava Antes y Después de Ensayos

Los datos utilizados para la confección de las curvas granulométricas, así como los gráficos que comparan, de manera individual para cada ensayo, las distribuciones de tamaño pre y post ensayo para el caso del adocreto se encuentran en el Anexo B.1.

Las curvas granulométricas de los materiales de arcilla y grava se basaron en los resultados obtenidos por Riveros y Salas en sus respectivos procesos de clasificación de material. En el caso de grava, los datos obtenidos por Salas presentaron ciertas inconsistencias al momento de contrastarlos con el material granular de adocreto, situación que se pudo advertir por la superposición de las curvas granulométricas de adocreto y de grava para un ensayo de transporte de igual longitud. En consideración de lo anterior, se procedió a realizar una corrección a la clasificación del material granular de grava realizada por Salas, con el objetivo de diferenciar la fragmentación originada por el ensayo de transporte de aquella fragmentación provocada por el equipo de clasificación. Las curvas de grava exhibidas en la presente sección fueron confeccionadas de manera acorde con los datos obtenidos en la actividad de corrección antes mencionada [32].

En las ilustraciones anteriormente expuestas, se puede apreciar que las curvas granulométricas se desplazan hacia la izquierda a medida que aumenta la longitud del pique de traspaso para los ensayos de flujo de los tres materiales utilizados. Dicho desplazamiento es indicativo de un aumento del material pasante en cada una de las mallas y/o tamices utilizados para la clasificación de aquellos materiales, situación que expone gráficamente la ocurrencia de la reducción del material durante los ensayos de flujo, y que este fenómeno es directamente proporcional a la distancia recorrida por dichos materiales.

4.1.2. Factor de Forma Post Ensayos

El análisis del factor de forma de los fragmentos de material se realizó en torno a los intervalos de tamaño establecidos en la sección 3.2. La utilización de diámetros de partículas contenidos en intervalos de tamaño inferiores a 10 mm puede inducir a alteraciones en la medición del factor de forma.

La esfericidad y redondez de los fragmentos de adocreto fueron obtenidas mediante el análisis de 15 muestras, aleatoriamente seleccionadas, por cada uno de los ensayos descritos en la sección 3.3. Los resultados del mencionado análisis se indican en las Tablas 7 y 8; en tanto el detalle

de los datos utilizados para los cálculos del factor de forma del adocreto, así como los datos asociados a la arcilla y la grava se pueden revisar en el Anexo A.3.

Tabla 7: Valores de Esfericidad para Adocreto

Intervalo	Ensayo 1 [m]	Ensayo 2 [m]	Ensayo 3 [m]	Ensayo 6 [m]
[18,37)	0.597	0.620	0.642	0.653
[16,18)	0.619	0.612	0.635	0.626
[10,16)	0.615	0.637	0.618	0.663
Esfericidad Promedio	0.611	0.624	0.632	0.649

Tabla 8: Valores de Redondez para Adocreto

Intervalo	Ensayo 1 [m]	Ensayo 2 [m]	Ensayo 3 [m]	Ensayo 6 [m]
[18,37)	0.306	0.317	0.319	0.320
[16,18)	0.318	0.339	0.345	0.348
[10,16)	0.337	0.331	0.344	0.364
Redondez Promedio	0.321	0.329	0.335	0.344

De los valores anteriormente descritos, se puede apreciar que la esfericidad promedio del adocreto aumentó desde su valor inicial de 0.603 hasta 0.649 obtenida para el material que fue ensayado en el pique a escala de 6 metros, significando un aumento de un 7.63 % para este parámetro. Este resultado concuerda con los resultados obtenidos para el material de arcilla, sin embargo, el aumento de la esfericidad para este último material fue sustancialmente mayor, alcanzando un 13.10 %.

La variación de la esfericidad en relación con la distancia recorrida, tal como se muestra en la Figura 24, sigue una tendencia logarítmica para la mayoría de los intervalos analizados, es decir, que la tasa en la que la esfericidad incrementa disminuye de manera consistente a medida que la distancia de transporte aumenta.

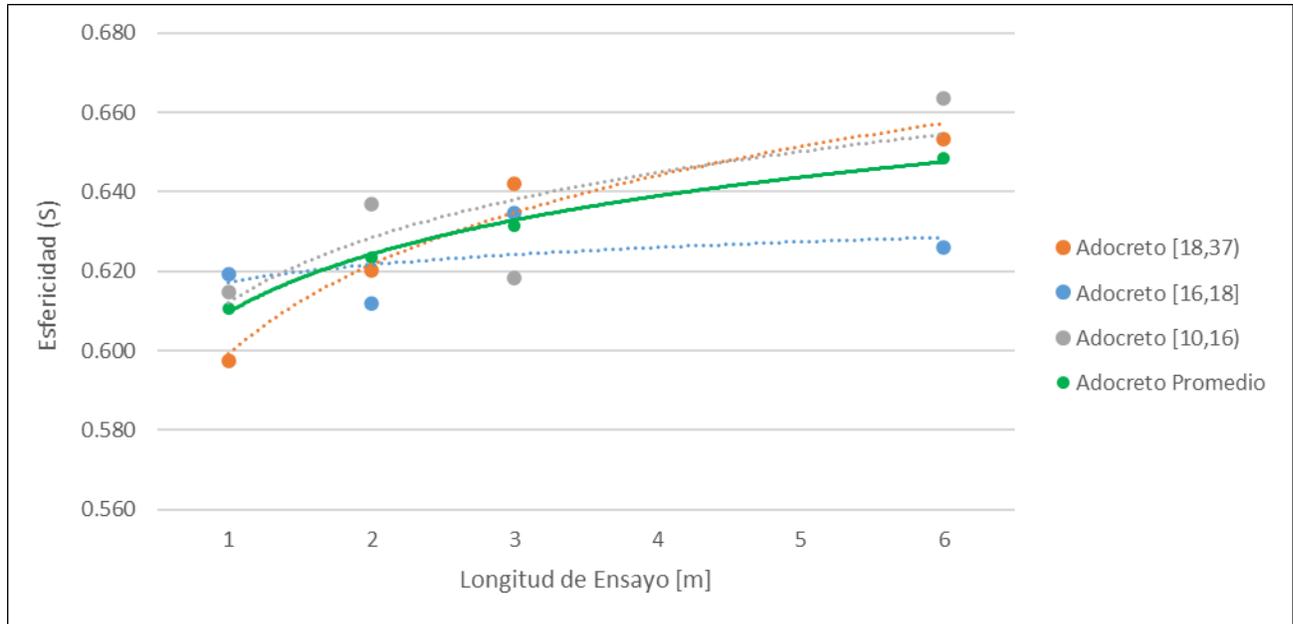


Figura 24: Variación de la Esfericidad según la Distancia Recorrida

Por otra parte, la redondez de los fragmentos de adocreto aumentó desde su valor inicial de 0.319 a 0.344 para el ensayo de 6 metros, lo que significó un aumento de un 7.84 %, variación significativamente menor al aumento de un 72.87 % de variación que presentó la redondez del material granular de arcilla.

Al igual que la esfericidad, la variación de la redondez con relación a la distancia recorrida, sigue una tendencia logarítmica, sin embargo, en esta ocasión la tendencia logarítmica se apreció de una manera más consistente en todos los intervalos de tamaño analizados. En la Figura 25, se puede apreciar la variación de la redondez en relación a la distancia recorrida, denotando la relación antes descrita entre las variables.

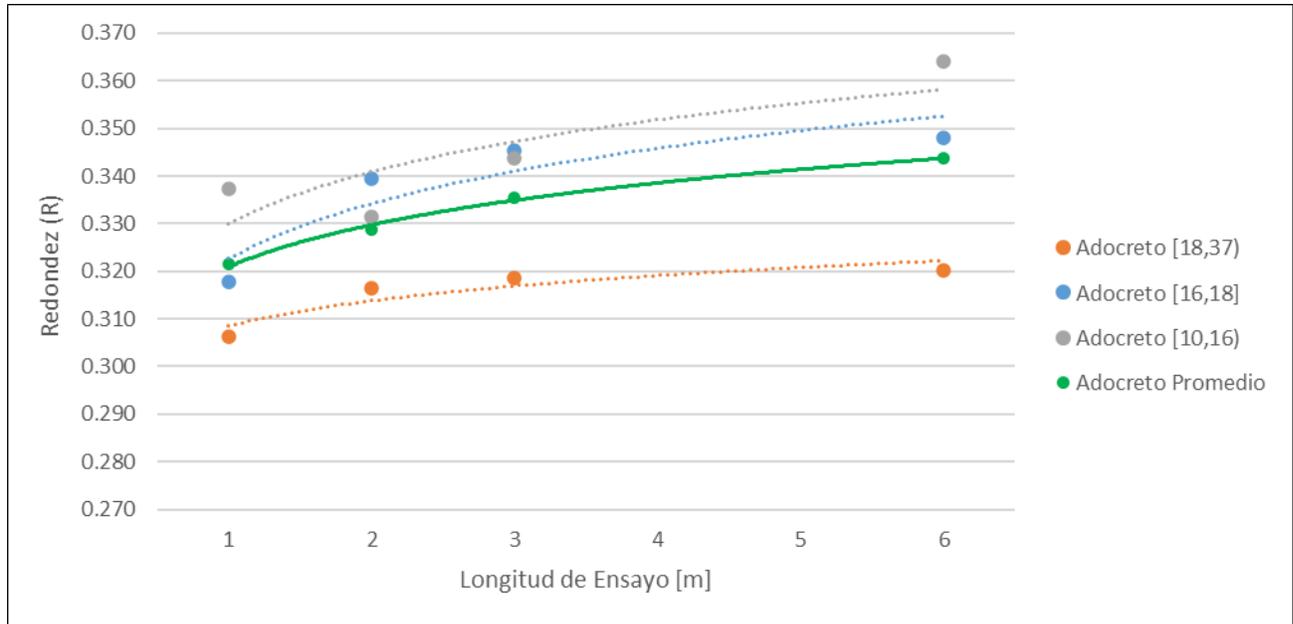


Figura 25: Variación de la Redondez según la Distancia Recorrida

Las variaciones en los parámetros asociados al factor de forma de las muestras de los materiales analizados son un claro indicador de la fragmentación que sufren en los ensayos de flujo. Coincidentemente, las esfericidades iniciales de la arcilla y el adocreto fueron las mismas, lo que permitió la realización de una comparación directa entre ambos parámetros y que reflejó que, en términos porcentuales, el aumento en la esfericidad para la arcilla duplicó al aumento de la esfericidad que se produjo en el adocreto. Asimismo, la variación en la redondez fue, en términos porcentuales, más de nueve veces superior para el material granular de arcilla que para el adocreto. Lo anteriormente descrito, es consistente con la diferencia entre los valores de UCS para ambos materiales, valor que es 9 veces superior para el adocreto en relación con la arcilla, lo que se plasmó en que los bordes más angulosos de los fragmentos de arcilla fuesen más propensos a sufrir desgaste producto de los ensayos de transporte en comparación con los fragmentos de adocreto.

4.1.3. Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Post Ensayos

De forma similar a lo apreciado entre las curvas granulométricas pre y post ensayos de flujo, los coeficientes de uniformidad y de curvatura también presentaron una variación lineal en relación

a la longitud de los ensayos. Las Tablas 9, 10 y 11 entregan la comparación entre los estados iniciales y finales de C_u y C_c para adocreto, arcilla y grava.

Tabla 9: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Adocreto

Parámetro	Inicial	E1 [m]	E2 [m]	E3 [m]	E6 [m]	E18 [m]
Cu	2.42	2.42	2.45	2.48	2.52	2.62
Cc	1.15	1.14	1.12	1.12	1.08	1.05

Tabla 10: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Arcilla

Parámetro	Inicial	Ensayo 1 [m]	Ensayo 2 [m]	Ensayo 3 [m]	Ensayo 6 [m]
Cu	1.70	3.29	3.19	3.39	3.80
Cc	0.84	1.45	1.49	1.56	1.78

Tabla 11: Coeficientes de Uniformidad y Curvatura Pre y Post Ensayos para Grava

Parámetro	Inicial	Ensayo 1 [m]	Ensayo 2 [m]	Ensayo 3 [m]	Ensayo 6 [m]
Cu	2.42	2.41	2.43	2.45	2.47
Cc	1.15	1.12	1.11	1.08	1.07

Los resultados obtenidos reportan una tendencia al aumento de los coeficientes de uniformidad a medida que se incrementa la distancia de transporte, así como un aumento en el coeficiente de curvatura de la arcilla; por otra parte, se pudo apreciar lo contrario para los C_c del adocreto y la grava, los cuales disminuyeron levemente ante la variación de la longitud de los ensayos.

El coeficiente de uniformidad promedio de los ensayos de adocreto y grava fue prácticamente idéntico, con valores de 2.47 y 2.44 respectivamente; en tanto el C_u promedio de las pruebas de arcilla fue de 3.42. A comparar la información obtenida con la ecuación asociada a C_u expuesta en la sección 3.2, se desprende que las alzas de los coeficientes ocurren como consecuencia de una mayor reducción del d_{10} en comparación a la reducción de tamaño del d_{60} . Por otra parte, considerando que la variación del C_u es mucho mayor para la arcilla, y al comparar los datos

obtenidos con las curvas granulométricas de los tres materiales antes y después de los ensayos de flujo, se pudo realizar conclusiones respecto al mecanismo de fragmentación de los materiales granulares utilizados, sobre lo cual se profundizará en el capítulo 5.

En cuanto a los coeficientes de curvatura, los valores promedio registrados para el adocreto y la grava fueron de 1.11 y 1.10 respectivamente, atribuyéndose la disminución del C_c con respecto al inicial (1.15 para ambos casos) a una mayor fragmentación en los rangos de tamaño medio, que se ven representados en la Ecuación 25 por el d_{30} , en comparación con los otros diámetros presentes en la fórmula ya mencionada: d_{10} y d_{60} .

Por otra parte, la variación del C_c promedio post ensayos para el caso del material granular de arcilla fue de 1.57. Este valor fue sustancialmente superior al C_c inicial de 0.84 y se debe a la considerable disminución del d_{10} , principalmente debido a la gran cantidad de fragmentación por abrasión, fenómeno que es atribuible al bajo UCS y a la baja resistencia al corte de la arcilla. Esto explica la amplia diferencia entre variación entre el C_c inicial y el C_c promedio de los ensayos, la cual se estimó en 0.73, en comparación con la variación del C_c entre ensayos, la cual fue de 0.33.

4.2. Efecto del Transporte en la Fragmentación

4.2.1. Variaciones en Tamaños Característicos de los Fragmentos

La obtención de los resultados asociados a la variación de los tamaños característicos para los tres materiales analizados se realizó mediante la comparación directa entre los valores pre y post ensayo y mediante la aplicación las metodologías de Lade et al. [20] y Lee & Farhoomand [19] que se describieron con anterioridad en la sección 2.1.

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 2, Lee & Farhoomand [19] basaron su análisis de la fragmentación del material granular en la variación del tamaño característico d_{15} tal como se explicitó en la Ecuación 3. En la Tabla 12, se muestran los valores de d_{15} iniciales y finales calculados para cada uno de los ensayos de flujo del adocreto, así como el valor obtenido para el factor B_{15} .

Tabla 12: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para el Adocreto

Longitud Ensayo [m]	d_{15} Final [m]	d_{15} Inicial [m]	B_{15}
1	6.819	7	1.027
2	6.499	7	1.077
3	6.418	7	1.091
6	6.231	7	1.123
18	5.591	7	1.252

Los valores de d_{15} se obtuvieron mediante la interpolación de los datos utilizados para la confección de las curvas granulométricas iniciales, los que se exponen en el Anexo B.1; en tanto, los valores de d_{15} y B_{15} de los materiales granulares de grava y arcilla se pueden revisar en el Anexo B.3. En la Figura 26 se puede apreciar la variación del factor B_{15} en función de la longitud de ensayo para los tres materiales. La curva que mejor se ajusta a los datos obtenidos para el adocreto, considerando los ensayos de 18 metros, corresponde a $0.075 \ln(L) + 1.0169^5$ para dicho material con un R^2 de 0.9531, y una curva de $0.0531 \ln(L) + 1.0319$ con un R^2 de 0.9773 cuando se consideran únicamente los ensayos de 1,2,3 y 6 metros. Si bien el valor de la curva de tendencia lineal que se ajusta mejor a los datos presenta un R^2 similar al obtenido con el ajuste logarítmico (0.9597) cuando se incluyen los ensayos de 18 metros, el valor de R^2 disminuye considerablemente a un 0.8474 cuando no se consideran los ensayos de 18 metros, motivo por el cual se sostiene que los datos se aproximan de mejor forma a una curva de tendencia logarítmica. La curva representativa del factor B_{15} incluyendo el ensayo de 18 metros se puede apreciar en el Anexo B.3.

⁵ El ensayo de flujo de 18 metros fue únicamente realizado para el material granular de adocreto; tanto para la grava como para la arcilla, el ensayo de flujo de mayor longitud fue de 6 metros.

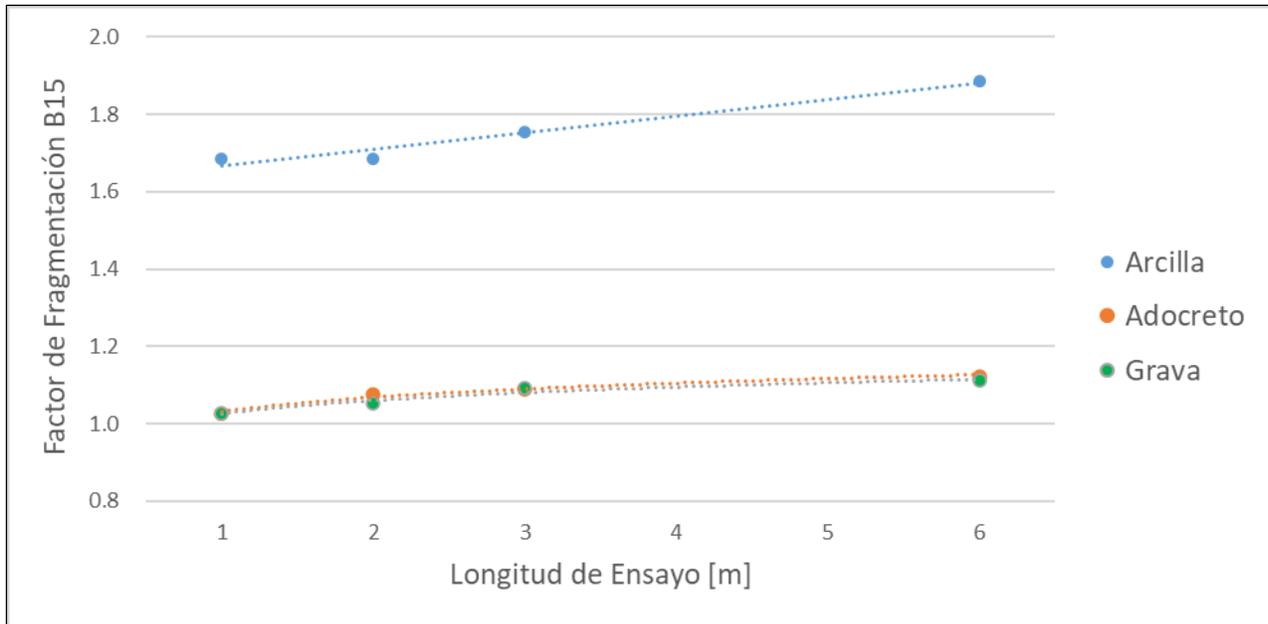


Figura 26: Factor B_{15} en Función de la Longitud de Ensayo para los Tres Materiales

Se procedió de forma análoga para la obtención de los datos necesarios para el cálculo de los parámetros utilizados en la propuesta por Lade et al. [20]. En la Tabla 13 se aprecian los valores de d_{10} inicial y final, además de los valores de d_{10} calculados para cada ensayo de flujo del adocreto.

Tabla 13: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para el Adocreto

Longitud Ensayo [m]	d_{10} Final [m]	d_{10} Inicial [m]	B_{10}
1	5.900	6	0.017
2	5.731	6	0.045
3	5.656	6	0.057
6	5.539	6	0.077
18	5.259	6	0.124

En la Figura 27 se grafica la variación del factor B_{10} en función de la longitud de ensayo de flujo para los tres materiales. La curva logarítmica que mejor ajusta a los datos obtenidos para el adocreto, considerando los ensayos de 18 metros es $0.036 \ln(L) + 0.0172$. Los datos asociados al factor B_{10} para los materiales de grava y arcilla se exponen en el Anexo B.3.

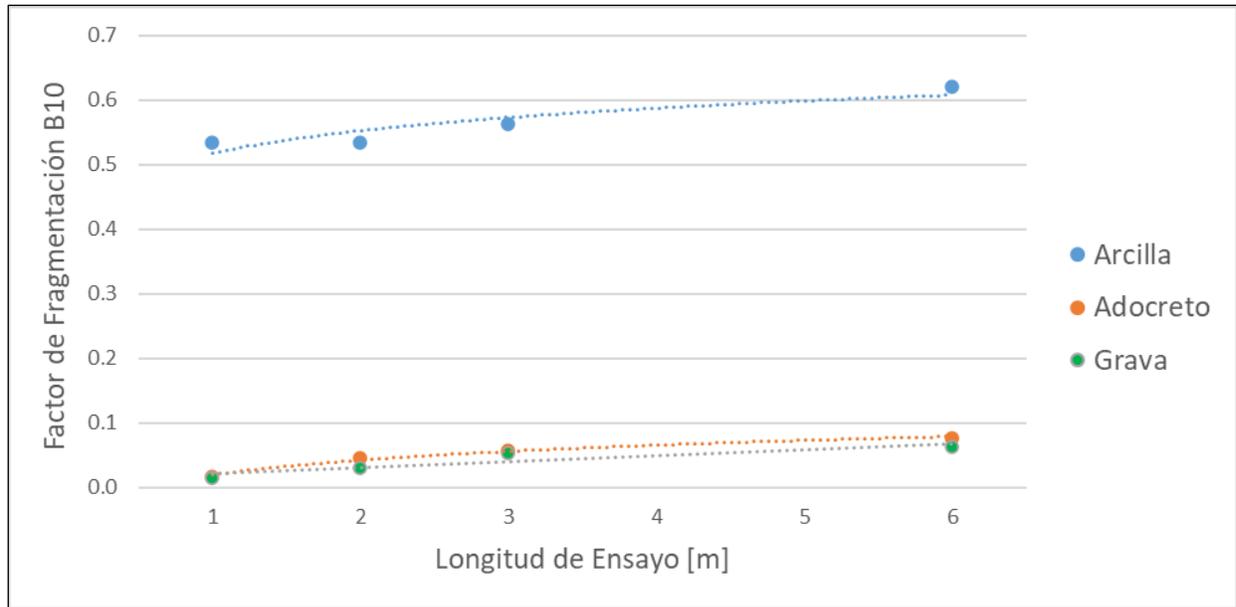


Figura 27: Factor B_{10} en Función de la Longitud de Ensayo para los Tres Materiales

En cuanto a los diámetros característicos, los que se definen como el tamaño de fragmento bajo el cual se encuentra un determinado porcentaje del material, se procedió a obtener los valores de d_{50} y d_{80} , con el objeto de poder analizar los tamaños medios y superiores de la distribución granulométrica. Los valores mencionados se agregan a d_{10} , d_{15} , d_{30} y d_{60} , los cuales fueron previamente calculados para la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura, así como para las formulaciones establecidas previamente en esta sección. En la Tabla 14 se especifican los valores de los diámetros característicos del adocreto para cada longitud de ensayo, así como los correspondientes tamaños característicos de la curva granulométrica inicial.

Tabla 14: Diámetros Característicos Adocreto

Longitud de Ensayo [m]	d_{10}	d_{15}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	d_{80}
1	5.900	6.819	9.785	12.807	14.291	16.916
2	5.731	6.499	9.502	12.586	14.064	16.812
3	5.656	6.418	9.433	12.553	14.039	16.791
6	5.539	6.231	9.129	12.397	13.945	16.765
18	5.259	5.591	8.710	12.176	13.753	16.665
Inicial	6.000	7.000	10.000	13.000	14.500	17.000

De la tabla anterior se aprecia claramente la reducción de los diámetros característicos en cuestión a medida que aumenta la distancia de traslado; situación que se replicó en los materiales de arcilla y grava, cuyos resultados se pueden ver en las Tablas 46 y 47 en el Anexo B.4. En adición a lo anterior, y con el objeto de analizar de una forma adecuada la variación de los diámetros característicos, se procedió a representar gráficamente la fragmentación de los materiales en las Figuras 28, 29 y 30 que se presentan a continuación.

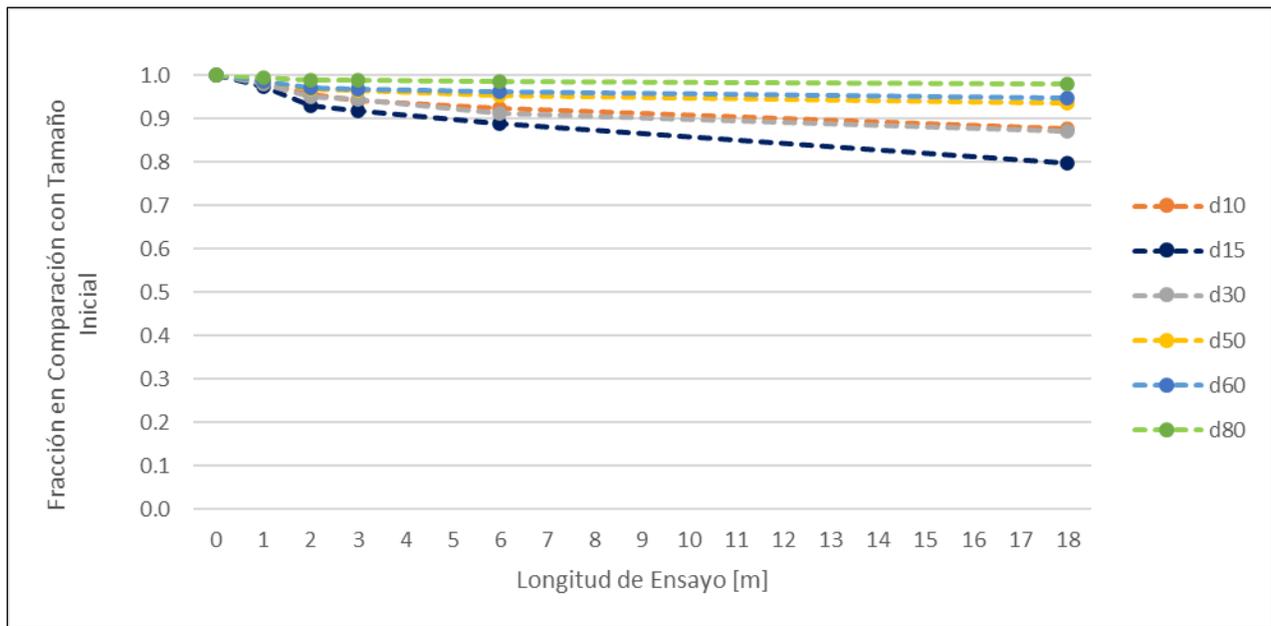


Figura 28: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Adocreto

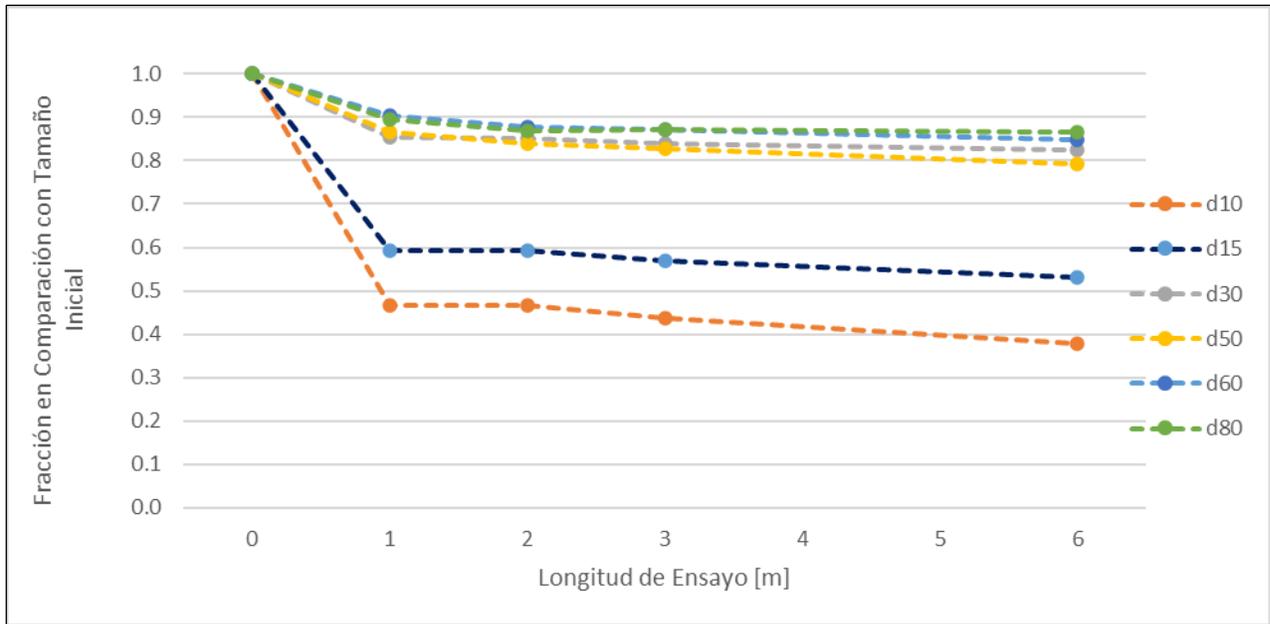


Figura 29: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Arcilla

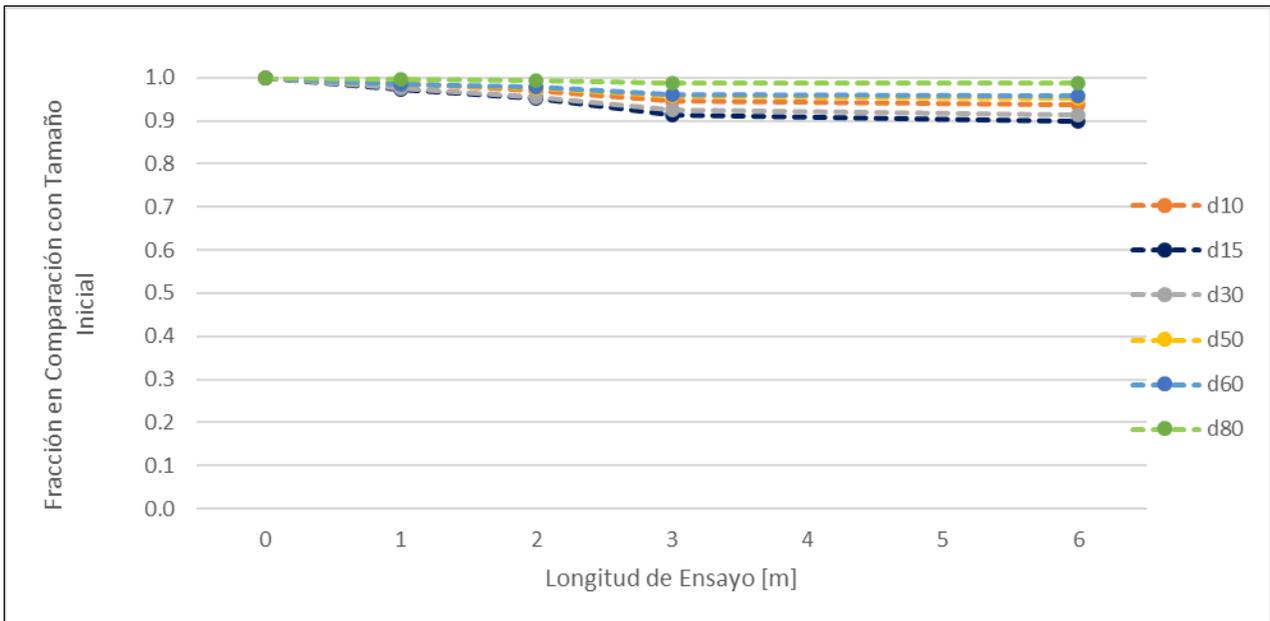


Figura 30: Fracción de Tamaños Característicos con Respecto al Tamaño Inicial para Grava

Al analizar los gráficos previamente expuestos, se pudo establecer que el material que más disminuyó sus tamaños característicos fue la arcilla, seguido del adocreto y, finalmente, la grava. En cuanto al comportamiento de la reducción de los tamaños característicos, este fue similar para adocreto y la grava; es decir, los diámetros que más se redujeron en comparación con su valor inicial

fueron similares en ambos casos; en concreto d_{15} , d_{30} y d_{10} fueron los tamaños que más disminuyeron, en tanto los tamaños que menos variaron fueron d_{80} , d_{60} y d_{50} . Diferente fue lo acontecido con la arcilla, en donde d_{10} y d_{15} fueron, por un amplio margen, los diámetros que más se redujeron en tamaño.

Otro punto importante para destacar es que los diámetros característicos no disminuyen a una razón constante a medida que aumenta la longitud de los ensayos. Se pudo apreciar que, en todas las pruebas de flujo realizadas, existe una mayor fragmentación en los primeros metros, para después estabilizarse y mantenerse constante en magnitudes mucho menores. Sin perjuicio de lo anterior, el punto en donde se atenúa la tendencia a la reducción de tamaño varía entre cada material; para la arcilla dicho punto se identifica alrededor 1 metro de longitud de ensayo, para el adocreto cerca de los 2 metros y para la grava en 3 metros aproximadamente.

Con la finalidad de visualizar de mejor manera lo antes señalado, en la Tabla 15 se detallan los porcentajes medios ponderados de la fragmentación de todos los diámetros en comparación con al ensayo inmediatamente anterior. Para ponderar los porcentajes, se estableció como base una diferencia de 1 metro con el ensayo que lo precede, cualquier diferencia superior a dicho valor fue ajustada para obtener una variación porcentual que representara la reducción de tamaño por metro recorrido. El detalle de la variación porcentual para cada diámetro y material se encuentra adjunto en las Tablas 48, 49 y 50 del Anexo B.4.

Tabla 15: Promedio Porcentual Ponderado Promedio de Reducción de Tamaños Característicos por cada Ensayo

Material	$D_{i,1}$	$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,6}$	$D_{6,18}$
Adocreto	-1.64%	-2.39%	-0.64%	-0.57%	-0.33%
Arcilla	-23.67%	-1.54%	-2.22%	-1.65%	Sin Registro
Grava	-1.69%	-1.31%	-2.26%	-0.27%	Sin Registro

Los valores $D_{x,y}$ representan la variación entre los tamaños característicos de los ensayos x e y ⁶. Los valores obtenidos muestran que a ciertas longitudes de ensayo la reducción de los diámetros

⁶ El subíndice "i" representa a los tamaños característicos de las curvas granulométricas iniciales

característicos disminuye hasta en un 50% en relación con el intervalo de 1 metro inmediatamente anterior, confirmando así lo señalado con anterioridad en la presente sección.

4.2.2. Generación de Material Fino en los Ensayos

Los fragmentos de material cuyo diámetro fue clasificado como inferior 5mm, y cuya clasificación fue realizada en el dispositivo *Ro-Tap* descrito en la sección 3.3.1, fueron considerados como material fino. Es importante señalar que tanto en las curvas granulométricas iniciales de adocreto como en las de grava, el porcentaje de material fino era de cero; por otra parte las curvas iniciales de arcilla si contaron con material pasante en ese intervalo de tamaño.

Los finos generados mediante los ensayos de flujo se subdividieron en dos grupos: cuantificados y pérdidas. Los finos cuantificados corresponden a aquellos fragmentos que fueron clasificados, y posteriormente cuantificados, mediante el dispositivo *Ro-Tap*; en cambio, los finos clasificados como pérdidas son aquellos fragmentos de material pequeño que, dada su alta volatilidad, se transformaron en polvo en suspensión como consecuencia de la actividad de los equipos de clasificación vibratoria y/o del traslado manual del material granular, motivo por el cual no pudieron ser clasificados. El total de pérdida de material de adocreto durante los ensayos de transporte fue de 312 gramos de un total de 136.7 kilogramos, lo que corresponde a un 0.23% de la masa inicial.

En la Figura 31 se expone el porcentaje de material fino obtenido a partir cada ensayo de flujo para adocreto, arcilla y grava.

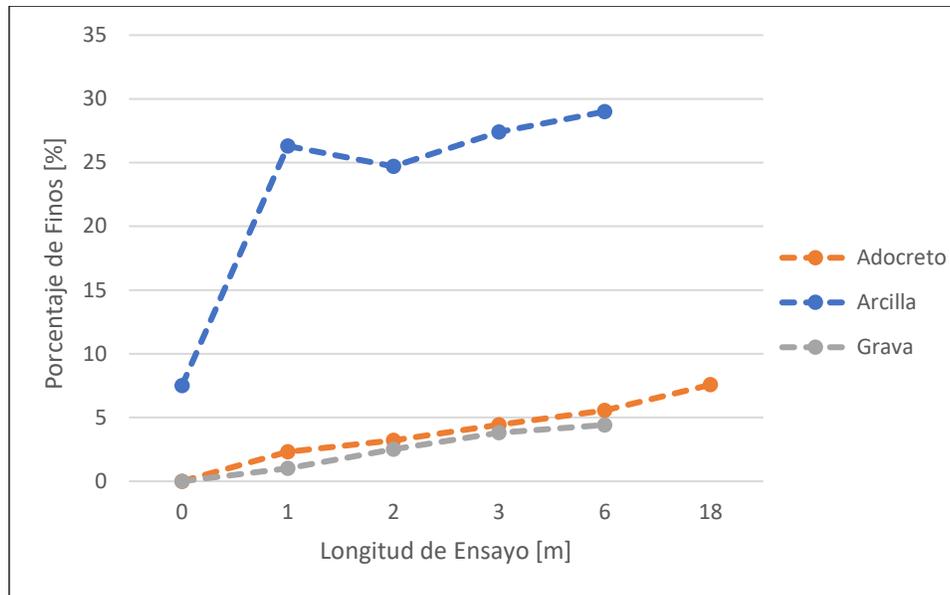


Figura 31: Porcentaje de Finos por Longitud de Ensayo para cada Material

De acuerdo con lo visualizado anteriormente, e independientemente que el porcentaje de finos inicial de la arcilla sea superior a los del adocreto y la grava, el porcentaje de fino resultante es ampliamente superior para el material de arcilla en comparación con los dos materiales restantes. Claramente la generación de finos aumenta con la distancia, sin embargo la tendencia al alza disminuye a medida que aumenta la distancia de transporte.

4.2.3. Factores de Fragmentación de Basados en las Distribuciones Granulométricas

A diferencia de los factores de fragmentación asociados a diámetros característicos, los factores que se describen en esta sección consideran virtualmente la totalidad de la curva granulométrica de cada uno de los ensayos de flujo descritos a lo largo del proyecto.

El factor B_m de Marsal [18] se obtuvo mediante la utilización de las ecuaciones 1 y 2 descritas en la sección 2.1, y los resultados asociados a cada ensayo se reportan en la Tabla 16 que se presenta a continuación.

Tabla 16: Factores de Fragmentación B_m por Ensayo y Material

Material	$D_{i,1}$	$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,6}$	$D_{6,18}$
Adocreto	0.96	1.84	1.46	2.30	3.20
Arcilla	18.80	4.60	3.40	2.70	Sin Registro
Grava	1.61	1.70	1.60	0.80	Sin Registro

El detalle de las diferencias entre los porcentajes de masa retenida utilizados para el cálculo de los valores de B_m expuestos en la tabla anterior, se detallan en las Tablas 51, 52 y 53 ubicadas en el Anexo B.4.

Si bien los resultados obtenidos fueron tendencialmente similares a los obtenidos al comparar los resultados de B_m con la variación de los tamaños característicos en cada ensayo, en particular cuando se calcula el promedio ponderado por distancia⁷, el B_m tiende a considerar, en la mayoría de los intervalos, una mayor fragmentación de material. Adicionalmente, indicó un punto máximo de fragmentación para el material granular de grava cercano a los 2 metros de longitud de ensayo en lugar de los 3 metros establecidos mediante la metodología de reducción de tamaños característicos.

Asimismo, se procedió a obtener el factor de fragmentación de Hardin (B_r) [15] mediante la ecuación 5 descrita en la sección 2.1. Para la obtención de las áreas asociadas a los parámetros B_t y B_p , se estableció el ancho de los intervalos rectangulares como la diferencia entre las aberturas de mallas contiguas utilizadas en la clasificación del material y, considerando que las curvas granulométricas diseñadas poseen segmentos rectos entre los puntos que indican los pares coordenados de porcentaje pasante en función del tamaño de fragmento, se utilizó el punto medio entre los límites del subintervalo como la altura del rectángulo.

Los valores asociados al cálculo del factor B_r se indican en las Tabla 54 a 65 presentes en el Anexo B.5, en tanto en la Tabla 17 se reportan los valores del factor de Hardin de los tres materiales para cada una de las longitudes de ensayo.

⁷ Valores ponderados por distancia: $D_{3,6}$ Adocreto: 0.766; $D_{3,6}$ Arcilla: 0.900; $D_{3,6}$ Grava: 0.267; $D_{6,18}$ Adocreto: 0.267.

Tabla 17: Factores de Fragmentación de Hardin [15] por Ensayo y Material

Material	Longitud Ensayo [m]			
	1	2	3	6
Arcilla	0.140	0.162	0.169	0.190
Adocreto ⁸	0.015	0.030	0.036	0.050
Grava	0.008	0.018	0.033	0.038

Los valores de B_r obtenidos dan cuenta de una tendencia al alza de la cantidad de material fragmentado en función de la distancia recorrida, no obstante se aprecia claramente que esta tendencia se ve atenuada a medida que aumenta la distancia de transporte del material.

Para visualizar de mejor manera lo anteriormente señalado, la Figura 32 grafica la variación del factor B_r para cada material en función de la longitud de ensayo.

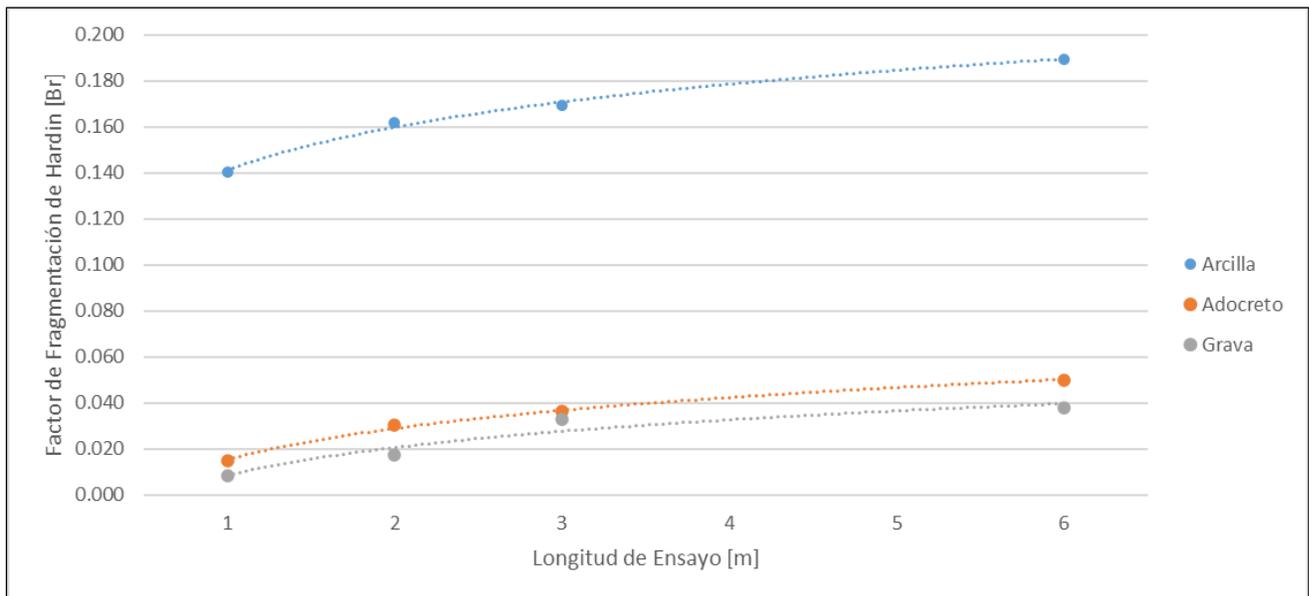


Figura 32: Gráfico Factor de Fragmentación de Hardin vs Distancia Recorrida

Gráficamente, se puede observar que los valores siguen una tendencia aproximadamente logarítmica; es más, las líneas de tendencia respectivas así lo confirman, dado que poseen un coeficiente de correlación R^2 a las curvas de ajuste logarítmico de 0.9943 para la arcilla, 0.9956 para

⁸ Factor B_r de Adocreto 18[m]: 0.077.

el adocreto y 0.9272 para la grava. Las líneas de tendencia asociadas a cada uno de los materiales se muestran a continuación.

Tabla 18: Línea de Tendencia y Correlación Asociadas a Factor Br

Material	Línea de Tendencia	R ²
Adocreto	$Br = 0.0211 \ln(L) + 0.0143$	0.9956
Arcilla	$Br = 0.027 \ln(L) + 0.1412$	0.9943
Grava	$Br = 0.0174 \ln(L) + 0.0086$	0.9272

Con Br correspondiente al Factor de Fragmentación de Hardin y L correspondiente a la longitud de ensayo de flujo.

4.2.4. Punto de Desaceleración de Fragmentación y Altura de Variación Mínima de Fragmentación

Si bien las líneas de tendencia logarítmicas se ajustan de forma bastante precisa a los datos recabados para los ensayos por sobre 1 metro de longitud, una vez es considerado el estado inicial del material, es decir cuando se considera el origen del sistema, la línea de tendencia pierde su excepcional capacidad de ajuste.

Tabla 19: Variación de la Fragmentación Respecto al Ensayo que lo Antecede (Normalizado)

Material	Ensayo 1[m]	Ensayo 2[m]	Ensayo 3[m]	Ensayo 6[m]	Ensayo 18[m]
Arcilla	0.1404	0.0216	0.0074	0.0067	Sin Registro
Adocreto	0.0147	0.0156	0.0062	0.0045	0.0022
Grava	0.0084	0.0092	0.0153	0.0016	Sin Registro

La Tabla 19 muestra la evolución de la fragmentación a medida que varió la longitud de los ensayos, cuantificando, mediante el índice B_r , la cantidad en la que se redujeron los tamaños de los

fragmentos de material en relación con el tramo de 1 metro que precede a dicho ensayo. Cabe destacar que los ensayos de 6 y 18 metros se encuentran normalizados a 1 metro de la misma forma en la que se realizó en la sección 4.2.1. De los datos presentados en la Tabla 17, se puede notar que existe un crecimiento constante en los ensayos de menores longitudes para el adocreto y la grava, no obstante dicha alza sufre un repentino descenso en los ensayos en los que el material recorre menores distancias. Considerando lo anterior, se graficaron los B_r para dos primeros ensayos de adocreto y también para los tres primeros ensayos de grava, los que se pueden apreciar en la Figura 33.

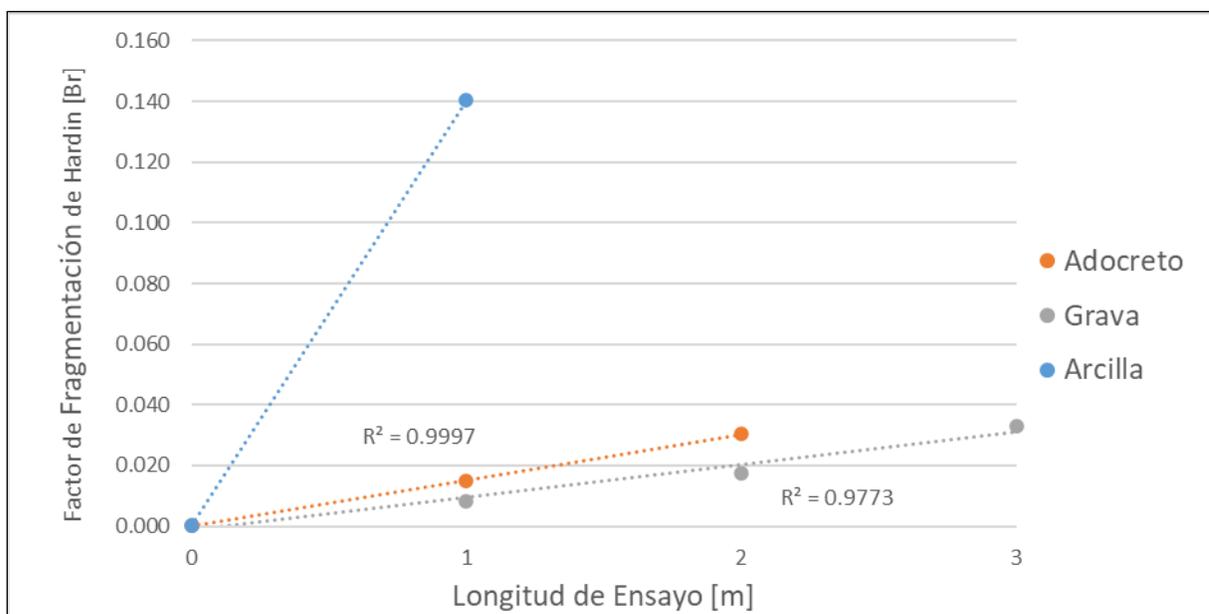


Figura 33: Factor de Hardin para Ensayos de Baja Distancia para Adocreto y Grava

Al ajustar los puntos a una línea de tendencia lineal, se pudo distinguir que los coeficientes de correlación eran aún más altos para esos puntos en comparación con una curva de ajuste logarítmico. En consideración de lo anterior, se pudo afirmar que la cantidad de fragmentación de los materiales crece de forma lineal hasta una distancia de transporte determinada y, de ahí en más, la fragmentación adquiere un comportamiento logarítmico.

Dado que el crecimiento de la variable dependiente (B_r) cuando los datos poseían un comportamiento lineal era mayor a cuando estos tenían un comportamiento logarítmico, fue posible definir un punto en donde la fragmentación se desaceleró y que fue definido como Punto de

Ralentización de Fragmentación (PRF), el cual corresponde al punto en donde el comportamiento lineal de fragmentación pasó a ser un comportamiento logarítmico.

Los valores expuestos en la Tabla 20 representan la variación en el aumento de la fragmentación del material. Esto permite estimar cuando la tendencia al aumento de la fragmentación es menos acentuada, permitiendo aproximar el punto en donde aquel hecho ocurre.

Tabla 20: Tendencia a Variación de la Fragmentación (Normalizado)

Material	Ensayo 1[m]	Ensayo 2[m]	Ensayo 3[m]	Ensayo 6[m]	Ensayo 18[m]
Arcilla	0.1404	-0.1188	-0.0142	-0.0007	Sin Registro
Adocreto	0.0147	0.0009	-0.0094	-0.0017	-0.0023
Grava	0.0084	0.0008	0.0061	-0.0137	Sin Registro

El cambio de signo de los valores de la Tabla 20 indica que el PRF se encuentra entre los dos ensayos con signos distintos, precisamente en el punto en donde la tendencia a la variación es igual a 0. En particular, para el adocreto este punto se ubica entre 2 y 3 metros y para la grava entre 3 y 6 metros. Para el caso de la arcilla no es del todo claro el punto en cuestión, puesto que es probable que la disminución de la tendencia al alza de la fragmentación se encuentre bajo 1 metro de longitud de ensayo, por lo que sería necesario realizar un ensayo de flujo de una longitud menor (0.5 metros idealmente). En caso de que la tendencia a la variación arrojara un valor positivo y el valor para el ensayo de 1 metro se mantuviese positivo, se establecería que el PRF se encuentra entre 1 y 2 metros.

Tanto para el adocreto como para la grava, se interpoló de forma lineal entre los ensayos de 2 y 3 metros para el caso del adocreto, y entre los de 3 y 6 metros para el caso de la grava. De lo anterior se determinó que el PRF para el adocreto es de 2.087 metros y el de la grava es de 3.924 metros.

Considerando que a distancias de transporte altas, la fragmentación del material tiene un comportamiento logarítmico, y el límite de la función logaritmo natural cuando la variable independiente tiende a infinito es infinito, sería correcto afirmar que a medida que aumenta la

distancia de transporte, aumenta también la fragmentación en una cantidad que no es constante si se analiza cada intervalo de distancia en forma separada. La aseveración antes planteada implicó que la obtención de un límite de dicha función no fuese obtenible, no obstante se planteó una alternativa que se denominó Punto de Variación Mínima de Fragmentación (PVM), que corresponde a la distancia de transporte de material en donde su fragmentación deja de tener un impacto significativo en la cuantificación de la fragmentación del material.

Para la obtención de la PVM se procedió a obtener la derivada de las líneas de tendencia asociadas a cada material, las cuales se reportaron en la Tabla 18. Las líneas de tendencia de los tres materiales poseen la forma que se señala en la ecuación 26, y cuya derivada se presenta en la ecuación 27.

$$y = a \ln x + b \quad (26)$$

$$y' = \frac{a}{x} \quad (27)$$

Tomando en cuenta que el factor B_r se calculó con tres decimales, se consideró como fragmentación significativa cualquier razón de cambio igual o mayor a 5×10^4 , ya que una variación de esa magnitud puede modificar la última cifra significativa del valor B_r . Considerando lo anterior, se estableció que el la PVM para el adocreto fue de 46.8 metros, para la arcilla fue de 60 metros y para la grava fue de 38.6 metros.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El estudio presentado permitió cuantificar el grado de fragmentación de los tres materiales granulares en función de la distancia recorrida en los ensayos de transporte realizados en el modelo a escala de un pique de traspaso.

Respecto a la variación de los parámetros característicos producto de la fragmentación del material, si bien esta ocurre en mayor medida en los materiales con bajo UCS y en menor medida en los materiales con mayor UCS, la relación entre la reducción de sus tamaños no es directamente proporcional a la diferencia de resistencia a la compresión entre los materiales. En concreto, el índice de resistencia a la carga puntual de la grava es más de 4 veces superior al del adocreto y 43 veces superior al de la arcilla, sin embargo la fragmentación de la grava es; según los valores obtenidos mediante las metodologías de Marsal, Hardin, Lee, Lade y mediante las comparaciones entre los tamaños característicos; aproximadamente la mitad en comparación con la del adocreto, y entre 5 y 16 veces inferior a la fragmentación de la arcilla (varía dentro de ese rango dependiendo de la metodología aplicada y de la longitud del ensayo).

En lo que respecta a la esfericidad, ésta aumentó en un 7.55% para el adocreto, en tanto para la grava, el aumento fue de un 13.10%. En cuanto a la redondez, el aumento para el caso del adocreto fue de un 7.95%, en cambio para la arcilla, este factor aumentó en un 72.87%. Lo anteriormente mencionado explica, en cierta medida, la amplia diferencia en la fragmentación de ambos materiales, puesto la redondez se relaciona directamente con la angulosidad de los fragmentos; un material con un aumento tan drástico en dicho parámetro indica una reducción significativa de los bordes angulosos del material granular, significando una gran cantidad de material fino generado, tal como se aprecia en la Figura 31, refrendando así la hipótesis que sostiene que la mayor parte de la reducción de tamaño ocurre mediante abrasión. Lo anteriormente mencionado justifica la baja fragmentación del material granular de grava, puesto que un alto IS_{50} , junto con una angulosidad baja (redondez alta), disminuyen la ocurrencia de reducción de tamaño por abrasión. Los fragmentos de tamaño más grandes fueron los que más se fragmentaron, puesto que a medida que disminuyen los diámetros de los fragmentos de material, disminuye la presencia de zonas angulosas.

Otro factor importante por destacar es que las variaciones de la esfericidad y la redondez en función de la distancia recorrida poseen comportamientos logarítmicos, tal como se puede apreciar en las Figuras 24 y 25. Este fenómeno se condice con las experiencias realizadas Gale [33] y en lo expuesto por Griffiths [34], quienes afirman que la esfericidad y la redondez se reducen en forma logarítmica al trasladarse largas distancias [33, 34]. El ensayo de transporte de 18 metros fue sumamente importante para afirmar lo anteriormente señalado, puesto que permitió refrendar lo señalado respecto a la tendencia logarítmica, al verificar lo que se suponía en un inicio mediante la realización de un ensayo a una muy larga distancia en comparación con los ensayos precedentes.

En cuanto a la dilatación del material, se ve que esta aumenta con el aumento de la carga a la cual está sometida en los ensayos de caracterización del material, fenómeno que también influye en el aumento de la fragmentación del material. Zhang [35] señala que la dilatación es la causa que el material no se desplace en forma paralela al plano de rotura, en este caso a la pared del pique de traspaso, provocando así un incremento en el volumen y, como consecuencia, un aumento en las presiones sobre las paredes. De esta forma se genera una mayor cantidad de vacíos dentro del pique, los cuales, presumiblemente, son ocupados por material más fino, desencadenando un aumento del esfuerzo de las paredes del pique el cual se concentra en las zonas más angulosas de los fragmentos de material granular, contribuyendo así a su fragmentación.

La porosidad por otra parte resultó ser mucho mayor en el material granular de arcilla y muy similar en el adocreto y la grava. Su influencia dentro de la fragmentación radica en una mayor razón de vacíos para la arcilla, situación que aumenta la posibilidad de ocurrencia de planos de falla preferenciales en dicho material en relación con la grava y el adocreto, así como una mayor susceptibilidad a la compresión y a la fractura por los esfuerzos ejercidos por la columna de material y por las paredes del pique a escala.

Respecto al tiempo de residencia del adocreto, el tiempo medio por metro de longitud de ensayo fue de 131 segundos, con una desviación estándar de 18 segundos; en general se mantuvo constante en alrededor de 120 segundos a excepción de los ensayos de 1 metro. El tiempo de residencia se relaciona estrechamente con el ángulo de fricción entre partículas; y si bien no se realizó un análisis sobre este factor en los proyectos anteriores, los tiempos de residencia debiesen ser mayores para el caso del adocreto, siempre y cuando el extremo por donde sale el material tras

descender por el pique de traspaso estuviese a la misma distancia de la bandeja colectora. Un mayor Angulo de reposo entre partículas provoca que el cono que se forma al momento que el material desciende por el pique sea de menor volumen, siendo así más lento el descenso, aumentando el tiempo de residencia, y siendo así sometido a las presiones de las paredes del pique y a la abrasión por el contacto con el resto del material por un mayor periodo de tiempo.

En lo relacionado con las metodologías de cuantificación de fragmentación de materiales granulares, existen bastantes interrogantes respecto a los métodos que realizan un análisis de la variación de sus diámetros característicos. Metodologías como las de Lade y Lee [19, 20] concurren en el reduccionismo científico, puesto que en lugar de considerar todos los puntos de la curva granulométrica, se remiten considerar un conjunto de puntos aislados, los cuales no necesariamente sean representativos de la totalidad de los fragmentos de material y que, como se advirtió en el desarrollo del proyecto, sus fragmentaciones no tienen la misma proporción a distintas distancias de transporte.

Por otra parte, los métodos que consideran factores de fragmentación basados en las curvas granulométricas pre y post ensayos poseen una mayor representatividad de la fragmentación del material. No obstante, la metodología de Marsal [18], que considera los porcentajes de variación positiva del material pasante, tiende a sobre estimar la fragmentación de ciertos intervalos de tamaño, y subestimar otros. Este fenómeno se atenuaría en caso de que los intervalos de tamaño fuesen iguales y se atenuaría aún más si la cantidad inicial de material fuese igual en todos los tramos, situación que hace que el método no resulte ser del todo confiable. En cuanto a la metodología propuesta por Hardin [15], además de que considera las curvas granulométricas en su totalidad, estima la fragmentación en función de una proporción entre el material que realmente se fragmenta, y la cantidad que, potencialmente podría fragmentarse el material; situación que lo transforma en un método mucho mejor para realizar comparaciones entre diferentes materiales. De todos los métodos antes descritos, Hardin fue el más confiable, por ende fue en el que más se basó para realizar las conclusiones del presente estudio.

En cuanto a la estimación de los puntos de desaceleración de fragmentación y punto de variación mínima de fragmentación, estos se calcularon bajo la condición que los materiales poseen una fragmentación lineal para los fragmentos más bajos y logarítmica en los fragmentos más altos.

Es preciso también mencionar que estos valores son aproximados y no del todo exactos, puesto que no se conocen a ciencia cierta los puntos exactos en donde cambia dicho comportamiento. Cabe destacar que los valores obtenidos de 2.087 metros para el adocreto y 3.924 metros para la grava corresponden a valores en la escala reducida; en escala real corresponderían a 62.6 metros y 117.7 metros respectivamente. Lo anteriormente mencionado significa que la fragmentación de cada material aumenta de forma progresiva hasta que recorre las distancias previamente mencionadas, de ese punto en adelante, el material sigue fragmentándose, sin embargo la tasa en que aumenta la fragmentación disminuye progresivamente, siguiendo una tendencia exponencial.

Similar es lo que acontece para la altura de variación mínima, cuyos valores fueron estimados en 46.8 metros para el adocreto, 60 metros para la arcilla y 38.6 metros para la grava. Traspasados dichos valores a la escala real, los valores correspondientes al punto en donde la tasa de variación de la fragmentación deja de ser significativa son 1404 metros para el adocreto, 1800 metros para la arcilla y 1158 metros para la grava.

En cuanto a las recomendaciones asociadas al presente estudio, se propone utilizar materiales extraídos de una mina o materiales de características similares a los que se encuentran en las operaciones mineras en los próximos ensayos de transporte. Adicionalmente, se propone alterar el pique de traspaso para verificar cual es la influencia de este sobre la fragmentación; esto se puede llevar a cabo mediante la introducción de discontinuidades dentro del tubo, que permitan aumentar la rugosidad de sus paredes, o mediante el aumento del diámetro del pique de traspaso para verificar los efectos que poseen las paredes en la fragmentación del material. También podría ser factible la utilización de piques a escala con orientación subvertical, para así poder apreciar de mejor manera la influencia del ángulo de deslizamiento en la reducción de tamaño. Finalmente, sería muy interesante contrastar los datos expuestos en este proyecto, con datos provenientes de una operación minera real, de manera de validar lo expuesto en el presente proyecto y en los proyectos que lo precedieron.

6. Referencias

- [1] Consejo Minero, «Cifras Actualizadas de la Minería,» 2021.
- [2] R. Nedderman, *Statics and Kinematics of Granular Materials*, Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [3] R. Castro, M. Fuenzalida y F. Lund, «Experimental Study of Gravity Flow Under Confined Conditions,» *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014.
- [4] M. Pierce, D. Weatherley y T. Kojovic, «A Hybrid Methodology for Secondary Fragmentation Prediction in Cave Mines,» *Caving 2010*, pp. 567-581, 2009.
- [5] D. Hambley, W. Parisseau y M. Singh, «Guidelines for Open-Pit Ore Pass Design,» de *Contract Report U.S Bureau of Mines*, 1983.
- [6] R. Kvapil, «Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bin Mines,» *Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences-II. Coarse Materials*, 1965.
- [7] E. Brown, *Block Caving Geomechanics*, Brisbane: University of Queensland, 2002.
- [8] B. Brady y E. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*, Dordrecht: Springer, 2005.
- [9] L. Dorador, «Alternativas de Predicción de Fragmentación Secundaria En Minería de Hundimiento Masivo (Block/Panel Caving),» 2014.
- [10] D. Laubscher, *A Practical Manual on Block Caving*, 2000.
- [11] P. Ramirez y L. Alejano, *Mecánica de Rocas: Fundamentos de Ingeniería de Taludes*, 2004.
- [12] A. Griffith, «The Phenomena of Rupture and Flow In Solids,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 163-198, 1921.
- [13] C. Jaeger, N. Cook y R. Zimmerman, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Cuarta ed., Blackwell Publishing, 2007.
- [14] L. Bocquet, E. Charlaix y F. Restagno, *Physics of Humid Granular Media*, Elsevier, 2002.
- [15] B. Hardin, «Crushing of Soil Particles,» *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1177-1192, 1985.
- [16] E. Hoek y E. Brown, *Underground Excavations in Rock*, Londres: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

- [17] J. Bridgewater, R. Utsumi, Z. Zhang y T. Tuladhar, «Particle Attrition due to Shearing - The Effects of Stress, Strain and Particle Shape,» *Chemical Engineering Science*, vol. 58, pp. 4649-4665, 2003.
- [18] R. Marsal, «Large scale testing of rockfill materials,» *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 93(SM2)*, pp. 27-43, 1967.
- [19] K. Lee y I. Farhoomand, «Compressibility and Crushing of Granular Soils in Anisotropic Triaxial Compression,» *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 68-86, 1967.
- [20] P. Lade, J. Yamamuro y P. Bopp, «Significance of Particle Crushing in Granular Materials,» *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 309-316, 1966.
- [21] A. Hazen, «Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration: 24th Annual Report,» de *Massachusetts State Board of Health, Pub Doc. N°34*, Massachusetts, 1892, pp. 539-556.
- [22] G. McDowell, B. M.D. y R. D., «The Fractal Crushing of Granular Materials,» *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, vol. 44, nº 12, pp. 2079-2102, 1996.
- [23] G. McDowell, «Statistics of Soil Particle Strength,» *Geotechnique*, vol. 51, nº 10, pp. 897-900, 2001.
- [24] G. McDowell y O. Harireche, «Discrete Element Modelling of Soil Particle Fracture,» *Geotechnique*, vol. 52, nº 2, pp. 131-135, 2002.
- [25] M. Salas, «Informe de Práctica,» Concepción, 2019.
- [26] F. Riveros, «Fragmentación por Efecto del la Transporte de Material en Piques a Escala de Laboratorio,» Concepción, 2019.
- [27] R. Gómez, R. Castro, A. Casali, S. Palma y A. Hekmat, «A Comminution Model for Secondary Fragmentation Assessment for Block Caving,» Springer-Verlag GmbH, 2017.
- [28] American Society for Testing and Materials, «Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures,» 2013.
- [29] W. Krumbein y P. F.J, *Manual of Sedimentary Petrography*, Nueva York: Appleton Century Crofts, 1938.
- [30] A. Casagrande, «Classification and Identification of Soils,» de *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1948, pp. 901-930.

- [31] K. Terzaghi, R. B. Peck y G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Tercera ed., J. W. & Sons, Ed., Wiley-Interscience, 1996.
- [32] P. Cortez, *Informe de Práctica*, Concepción, 2022.
- [33] S. Gale, «The Shape of Fluvial Gravels: Insights from Fiji's Sabeto River,» *Geosciences* 2021, 2021.
- [34] J. C. Griffiths, *Scientific Method in Analysis of Sediments*, New York: McGraw-Hill, 1967, p. 508.
- [35] I. Ishibashi y X. Zhang, «Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay,» *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 33, nº 1, pp. 182-191, 1993.
- [36] E. Broch y J. A. Franklin, «The Point-Load Strength Test,» de *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 9, Oxford, Pergamon Press, 1972, pp. 669-697.
- [37] G. Cho, J. Dodds y J. Santamarina, «Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness and Strength: Natural and Crushed Sands,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006.
- [38] J. Reid, «A Solution to the Batch Grinding Equation,» *Chemical Engineering Science*, vol. 20, nº 11, pp. 953-963, 1965.
- [39] L. Austin y L. D.W., «Estimation of non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding,» *Powder Technology*, vol. 5, nº 5, pp. 276-271, 1972.
- [40] J. Herbst y D. Fuerstenau, «Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models,» *Int J Miner Process*, vol. 7, nº 1, pp. 1-31, 1980.
- [41] H. Hulburt y S. Katz, «Some Problems in Particle Technology: A Statistical Mechanical Formulation,» *Chemical Engineering Science*, vol. 19, pp. 555-574, 1964.
- [42] L. Austin y F. Concha, *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*, Concepción: CYTED, 1994.

7. Anexos

Anexo A: Caracterización de Material

A.1. Datos de Selección de Materiales

Tabla 21: Cotización Materiales Considerados para la Realización de Ensayos de Transporte

Material	Volumen Material [m ³]	Unidades Material	Valor Unitario [CLP]	Valor Total [CLP]
Adocreto A	0.0012	152	290	44080
Mortero A	0.0200	10	2800	28000
Hormigón Rápido	0.0200	10	5790	57900
Adocreto B	0.0014	130	240	31200
Pastelón	0.0064	29	1690	49010
Mortero B	0.0200	10	5490	54900
Solerilla	0.0120	16	1790	28640

Tabla 22: Valores Máximos para Ensayos de Compresión Uniaxial de Solerilla

Muestra	Carga Máxima [kN]	UCS [Mpa]
Solerilla 1	41.459	15.321
Solerilla 2	33.325	12.315
Solerilla 3	48.153	17.794
Solerilla 4	39.299	14.523

Tabla 23: Valores Máximos para Ensayos de Compresión Uniaxial de Adocreto

Muestra	Carga Máxima [kN]	UCS [Mpa]
Adocreto 1	86.444	31.945
Adocreto 2	81.478	30.109
Adocreto 3	102.711	37.956
Adocreto 4	89.179	32.955



Figura 34: Testigo de Solerilla Antes del Ensayo de Compresión Uniaxial



Figura 35: Testigo de Solerilla Tras el Ensayo de Compresión Uniaxial

A.2. Descripción de Procedimientos de Caracterización de Materiales

Procedimiento Picnometría

Etapa 1: 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 ± 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.

Etapa 2: 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 oxigenada 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 oxigenada 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.

Tabla 24: Parámetros Ensayo Picnometría

Masa Picnómetro Vacío (g)	Masa Picnómetro con tapa (g)	Masa Muestra (g)	Masa Picnómetro, muestra y tapa (g)	Masa Pincómetro, muestra, tapa y agua (g)
25.8824825	31.04407	14.6317875	45.6758575	90.0644
26.00744	31.14712	14.94097	46.08809	90.3221
26.697835	31.84449	14.802635	46.647125	89.8945

Tabla 25: Datos Obtenidos a Partir de Ensayo Picnometría

Masa Agua Destilada (g)	Volumen Sólido (ml)	Densidad Sólido (kg/m ³)
44.3885425	5.9694575	2451.108413
44.23401	6.11499	2443.335149
43.247375	6.069625	2438.805528

Procedimiento Densidad Aparente

1. Se seleccionan 5 muestras de material de granulometría superior a 10 mm. En particular, se selecciona material sobre 37 mm de diámetro.
2. Masar cada una de las muestras y posteriormente envolverla, en su totalidad, en papel film plástico de manera que ésta quede impermeabilizada. Una vez envuelta la muestra, volver a masar.
3. Seleccionar una probeta de diámetro superior al diámetro del material empleado y agregar un volumen de agua que cubra la totalidad de la muestra. Medir dicho volumen.
4. Verter la muestra en la probeta y leer el volumen de esta.
5. 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), teniendo en cuenta que se debe deducir la masa y el volumen del papel film plástico.
6. Se estima la densidad del papel film plástico con un procedimiento análogo al descrito anteriormente para las muestras granulares realizando un ensayo para 2 muestras, resultados que se reportan en la Tabla 26.

Tabla 26: Densidad Papel Film Plástico

Muestra	Masa Film [g]	Vol. Inicial [ml]	Vol. Final [ml]	Dif. Volumen [ml]	Densidad Film [kg/m ³]
1	2.461	455	485	30	82.024
2	2.511	460	483	23	109.173
Promedio					95.598

Se determinó que el volumen de agua desplazado por el papel film en cada uno de los ensayos es inferior a 0.3 ml; considerando que para el cálculo de volumen se utilizó una probeta con sensibilidad de 1 ml, se consideró que su influencia en la densidad aparente del adocreto es despreciable. En la Tabla 27 se detallan los valores utilizados para la obtención de la densidad aparente del adocreto.

Tabla 27: Densidad Material Granular Adocreto

Muestra	Masa Muestra [g]	Masa Muestra + Film [g]	Masa Film [g]	Vol. Inicial [ml]	Vol. Final [ml]	Dif. Volumen [ml]	Densidad Muestra [kg/m ³]	Vol. film [ml]
1	42.592	43.268	0.676	345	375	30	1419.740	0.141
2	28.299	28.639	0.340	390	409	19	1489.412	0.281
3	27.364	28.044	0.680	390	415	25	1094.548	0.140
4	52.146	52.892	0.749	440	475	35	1489.880	0.128
5	29.946	30.764	0.817	390	415	25	1197.855	0.117
6	53.345	53.928	0.582	360	397	37	1441.759	0.164
7	41.692	42.350	0.658	372	406	34	1226.234	0.145
8	38.019	38.368	0.348	362	390	28	1357.834	0.274
Promedio							1339.658	0.174

Ensayos de Carga Puntual

El procedimiento, consiste en la colocación de una muestra del material granular a analizar entre las 2 puntas cónicas del dispositivo, el cual se acciona y mediante un mecanismo hidráulico comprime la muestra y provoca la falla del material mediante tracción de forma indirecta.

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 16.

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 [mm²] 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 $(W_1 + W_2)^2$.

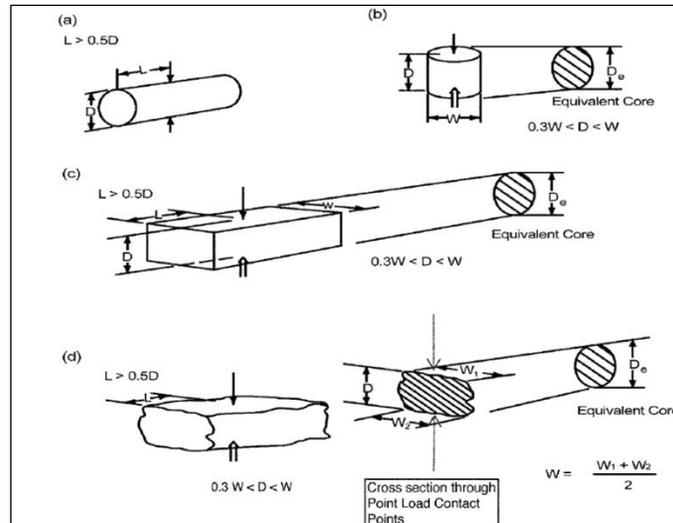


Figura 36: Disposición de los Testigos y Relación con Diámetro Equivalente

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. El índice de resistencia de carga puntual determinado por el ensayo debe corregirse al diámetro equivalente estándar (D_e) de 50 mm mediante la Ecuación 16. Se utiliza el diámetro de 50 mm ya que dicho diámetro está asociado a la designación de calidad de roca (RQD).

Ensayos de Corte Directo

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 minutos por ensayo para las pruebas realizadas de arcilla, 50 minutos para las pruebas de adocreto y de 20 minutos para el material granular de grava, y una velocidad de desplazamiento de 0.5 mm/min para todos los materiales ya mencionados.
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 (σ_n) y el esfuerzo de corte (τ) en el plano de falla a partir de la Ecuación 21. Posteriormente se puede graficar el esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal, obteniendo así la envolvente de falla de Mohr-Coulomb. A continuación, se presenta la mencionada envolvente de falla, 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], σ_n el esfuerzo normal [kPa] y ϕ el ángulo de fricción interna [°].

A.3. Datos Utilizados para Caracterización del Material

Tabla 28: Datos Cálculo Factor de Forma Adocreto Inicial

Muestra	Radio Mínimo Circunscrito	Radio Máximo Inscrito	Esfericidad	$\Sigma r_i/n$	Redondez
1	15.62	11.78	0.754	4.281	0.363
2	13.50	9.95	0.737	3.654	0.367
3	16.90	8.14	0.482	2.923	0.359
4	12.63	6.71	0.531	2.165	0.323
5	15.67	10.75	0.686	3.772	0.351
6	17.07	9.15	0.536	3.148	0.344
7	16.07	10.80	0.672	4.356	0.403
8	11.84	6.81	0.575	2.788	0.409
9	9.67	6.27	0.648	1.248	0.199
10	12.95	8.70	0.672	2.559	0.294
11	8.80	6.21	0.706	2.370	0.382
12	11.58	7.22	0.623	1.761	0.244
13	15.65	8.47	0.541	2.629	0.310
14	12.57	6.10	0.485	1.608	0.264
15	16.72	8.75	0.523	1.804	0.206
16	13.74	6.56	0.477	1.820	0.277

Tabla 29: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 1 Metro Adocreto

Muestra	Radio Mínimo Circunscrito	Radio Máximo Inscrito	Esfericidad	$\Sigma ri/n$	Redondez
1	19.46	12.89	0.662	4.505	0.350
2	20.43	13.72	0.672	5.159	0.376
3	32.12	17.98	0.560	5.813	0.323
4	33.75	18.07	0.535	4.690	0.260
5	38.26	21.32	0.557	4.746	0.223
6	25.80	17.68	0.685	4.380	0.248
7	19.89	15.27	0.768	5.548	0.363
8	26.70	14.51	0.543	4.485	0.309
9	18.50	12.18	0.658	4.389	0.360
10	41.53	18.31	0.441	5.647	0.308
11	35.60	21.72	0.610	6.900	0.318
12	22.17	14.50	0.654	5.466	0.377
13	25.36	15.82	0.624	5.427	0.343
14	34.22	20.15	0.589	6.283	0.312
15	19.29	12.43	0.644	4.582	0.369
16	26.88	15.24	0.567	4.654	0.305

Tabla 30: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 2 Metros Adocreto

Muestra	Radio Mínimo Circunscrito	Radio Máximo Inscrito	Esfericidad	$\Sigma ri/n$	Redondez
1	28.29	14.97	0.529	5.641	0.377
2	37.62	18.60	0.494	6.177	0.332
3	30.55	19.33	0.633	7.222	0.374
4	25.65	15.12	0.589	6.216	0.411
5	23.07	14.86	0.644	5.076	0.342
6	33.27	16.66	0.501	6.429	0.386
7	24.24	16.53	0.682	5.462	0.330
8	21.64	17.32	0.800	6.200	0.358

9	16.37	10.38	0.634	2.900	0.279
10	29.23	17.50	0.599	4.514	0.258
11	20.35	13.27	0.652	3.160	0.238
12	14.93	7.52	0.504	2.389	0.318
13	17.79	13.38	0.752	3.344	0.250
14	16.91	9.95	0.588	3.699	0.372
15	22.02	15.35	0.697	4.430	0.289
16	19.40	13.45	0.693	4.442	0.330
17	22.09	14.12	0.639	5.794	0.410
18	18.34	11.32	0.617	3.050	0.269
19	37.04	21.04	0.568	6.779	0.322
20	16.28	10.66	0.655	3.493	0.328

Tabla 31: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 3 Metros Adocreto

Muestra	Radio Mínimo Circunscrito	Radio Máximo Inscrito	Esfericidad	$\Sigma ri/n$	Redondez
1	37.81	24.67	0.652	7.587	0.308
2	31.21	21.69	0.695	6.488	0.299
3	44.96	28.83	0.641	8.741	0.303
4	43.36	31.80	0.733	9.438	0.297
5	39.05	24.66	0.631	9.498	0.385
6	42.71	23.94	0.561	7.245	0.303
7	42.19	24.52	0.581	8.240	0.336
8	36.68	25.52	0.696	7.712	0.302
9	23.18	17.23	0.743	6.665	0.387
10	50.47	32.28	0.640	14.271	0.442
11	24.09	15.25	0.633	5.133	0.337
12	20.02	10.63	0.531	2.932	0.276
13	18.84	10.66	0.566	3.502	0.329
14	24.79	14.86	0.599	5.387	0.363

15	18.03	10.45	0.580	3.758	0.360
16	13.53	8.67	0.641	3.061	0.353
17	22.73	12.63	0.556	3.695	0.293
18	16.55	11.35	0.686	4.229	0.373
19	17.84	11.46	0.642	4.212	0.368
20	13.52	8.44	0.624	2.513	0.298

Tabla 32: Datos Cálculo Factor de Forma Ensayo 6 Metros Adocreto

Muestra	Radio Mínimo Circunscrito	Radio Máximo Inscrito	Esfericidad	$\Sigma ri/n$	Redondez
1	44.98	30.29	0.673	9.153	0.302
2	36.07	21.07	0.584	7.636	0.362
3	40.38	24.59	0.609	7.221	0.294
4	40.06	24.08	0.601	6.816	0.283
5	32.38	22.15	0.684	8.011	0.362
6	37.92	26.36	0.695	8.548	0.324
7	45.71	33.23	0.727	10.414	0.313
8	39.66	23.28	0.587	6.944	0.298
9	33.49	21.21	0.633	6.981	0.329
10	43.85	27.56	0.629	10.953	0.397
11	12.49	8.69	0.696	3.236	0.372
12	35.76	22.93	0.641	6.793	0.296
13	35.69	20.32	0.569	8.011	0.394
14	37.75	28.24	0.748	10.490	0.371
15	33.20	18.53	0.558	6.163	0.333
16	30.09	19.79	0.658	8.627	0.436
17	37.39	27.18	0.727	11.145	0.410
18	36.35	22.92	0.631	7.040	0.307
19	31.46	22.24	0.707	6.692	0.301
20	33.44	20.59	0.616	8.042	0.391

Tabla 33: Datos Obtenidos a partir de Ensayo de Carga Puntual Adocreto

Muestra	D' [mm]	D [mm]	Ancho Superior [mm]	Ancho Inferior [mm]	L [mm]	Fuerza de ruptura [kN]
1	37	39	42.2	39	27.3	4.71
2	33	36	49.3	46.2	28	5.01
3	32	35	60	56.6	28	4.69
4	30	32	64	54.3	32	4.81
5	30	32	55	50.5	27	5.14
6	37	41	66	57.2	31	5.43
7	31	33	47.3	44	28	5.46
8	29	34	66	57	31	5.3
9	30	32	41	38	29.5	4.07
10	24	26	47	39	27	2.96
11	38	40	51	40	29	4.21
12	29	32	44	43	29	4.92
13	29	31	52	48.5	28	5.99
14	28	31	53	51	25	4.28
15	31	33	45	37	29	4.52
16	35	37	48	37	29	4.06
17	30	32	47.3	44.6	28	4.24
18	32	34	48.5	39	32	2.34
19	36	40	50	41	30	5.16
20	32	34	50.3	48.6	27	5.46
21	29	31	45.5	42.7	28	2.68
22	32	34	42	40.5	28	4.49
23	29	31	40.2	39.3	28	4.13
24	29	32	47.3	47	27	5.19

Tabla 34: Datos Calculados a partir de Ensayo de Carga Puntual

Muestra	W [mm]	De ²	Is [Mpa]	F	Is ₅₀ [Mpa]
1	40.6	1912.7	2.46	0.94	2.32
2	47.8	2006.3	2.50	0.95	2.38
3	58.3	2375.4	1.97	0.99	1.95
4	54.3	2074.1	2.32	0.96	2.22

5	50.5	1929.0	2.66	0.94	2.51
6	61.6	2902.0	1.87	1.03	1.93
7	45.7	1801.8	3.03	0.93	2.82
8	61.5	2270.8	2.33	0.98	2.28
9	38.0	1451.5	2.80	0.88	2.48
10	43.0	1314.0	2.25	0.87	1.95
11	45.5	2201.4	1.91	0.97	1.86
12	43.5	1606.2	3.06	0.91	2.77
13	50.3	1855.4	3.23	0.94	3.02
14	52.0	1853.8	2.31	0.93	2.16
15	37.0	1460.4	3.10	0.89	2.74
16	37.0	1648.8	2.46	0.91	2.24
17	44.6	1703.6	2.49	0.92	2.28
18	43.8	1782.5	1.31	0.93	1.22
19	45.5	2085.6	2.47	0.96	2.38
20	48.6	1980.1	2.76	0.95	2.62
21	44.1	1628.3	1.65	0.91	1.49
22	40.5	1650.1	2.72	0.91	2.48
23	39.3	1451.1	2.85	0.88	2.52
24	47.0	1735.4	2.99	0.92	2.75

Tabla 35: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para el Adocreto

Masa [kg]	Deformación [mm]	Desplazamiento Vertical [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Esfuerzo Normal [kPa]	Esfuerzo de Corte [kPa]
1	0.22	0.94	7.15	9.81	35.53
5	0.60	0.70	8.67	49.05	97.40
10	0.84	0.23	8.82	98.10	137.29
1	0.25	1.70	4.87	9.81	40.41
3	0.43	1.62	5.97	29.43	69.72
5	0.67	1.38	6.64	49.05	109.61
8	0.83	1.07	7.38	78.48	134.85
10	1.02	1.07	7.32	98.10	166.60

Tabla 36: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para la Arcilla

Masa (kg)	Deformación [mm]	Despl. Vertical [mm]	Despl. Horizontal [mm]	Esf. Normal [kPa]	Esf. Corte [kPa]
1	0.185	0.670	3.680	9.810	30.640
5	0.410	0.000	6.640	49.050	67.280
10	0.715	-0.680	11.470	98.100	118.570

Tabla 37: Datos Gráfico Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal para la Grava

Masa (kg)	Deformación [mm]	Despl. Vertical [mm]	Despl. Horizontal [mm]	Esf. Normal [kPa]	Esf. Corte [kPa]
5	0.320	0.460	7.290	49.000	52.630
7	0.500	0.160	7.640	68.600	81.940
9	0.570	0.050	6.770	88.200	93.330
11	0.550	-0.050	8.040	7.800	90.080
13	0.740	0.110	7.690	127.400	121.010

Tabla 38: Datos Utilizados para la Determinación del Ángulo de Fricción entre Paredes y Material Granular de Adocreto

N° Ensayo	Longitud Tubo PVC [m]	Altura Deslizamiento [m]	Angulo Fricción Paredes/Material [°]
1	0.97	0.41	25.0
2	0.97	0.45	27.6
3	0.97	0.5	31.0
4	0.97	0.47	29.0
5	0.97	0.43	26.3
6	0.97	0.5	31.0
7	0.97	0.43	26.3
8	0.97	0.43	26.3
9	0.97	0.46	28.3
10	0.97	0.48	29.7
11	2.04	0.91	26.5
12	2.04	0.94	27.4
13	2.04	1.01	29.7
14	2.04	0.88	25.6
15	2.04	0.96	28.1
16	2.04	0.91	26.5
17	2.04	0.92	26.8

18	2.04	0.91	26.5
19	2.04	0.93	27.1
20	2.04	0.94	27.4

Anexo B: Resultados Fase Experimental

B.1. Comparativa Curvas Granulométricas Pre y Post Ensayos

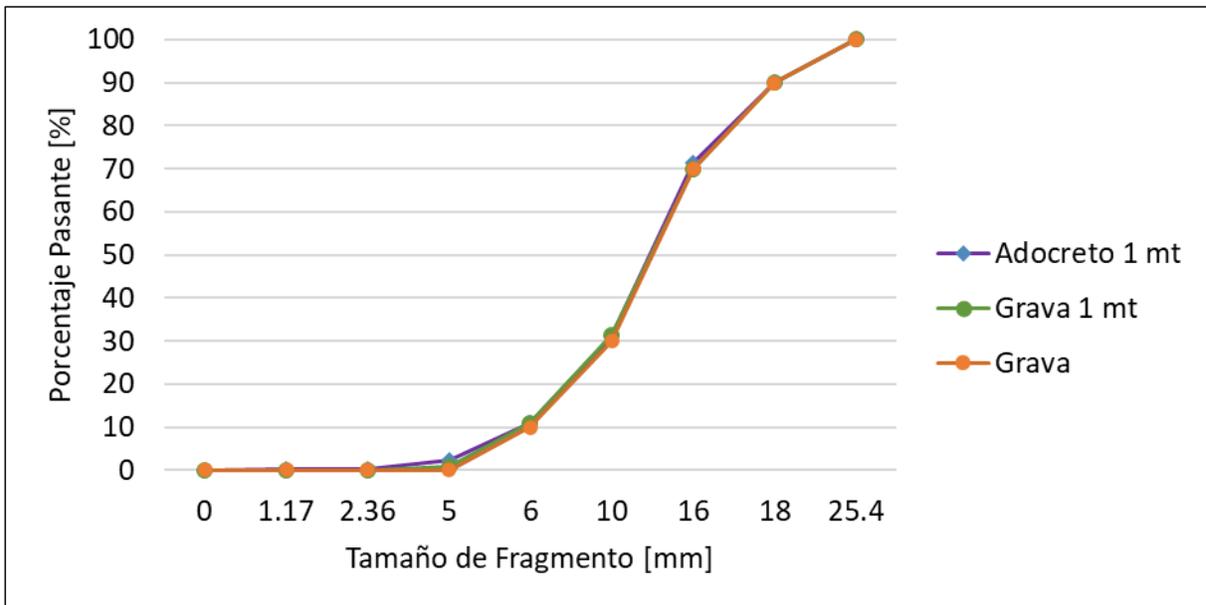


Figura 37: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 1 Metro

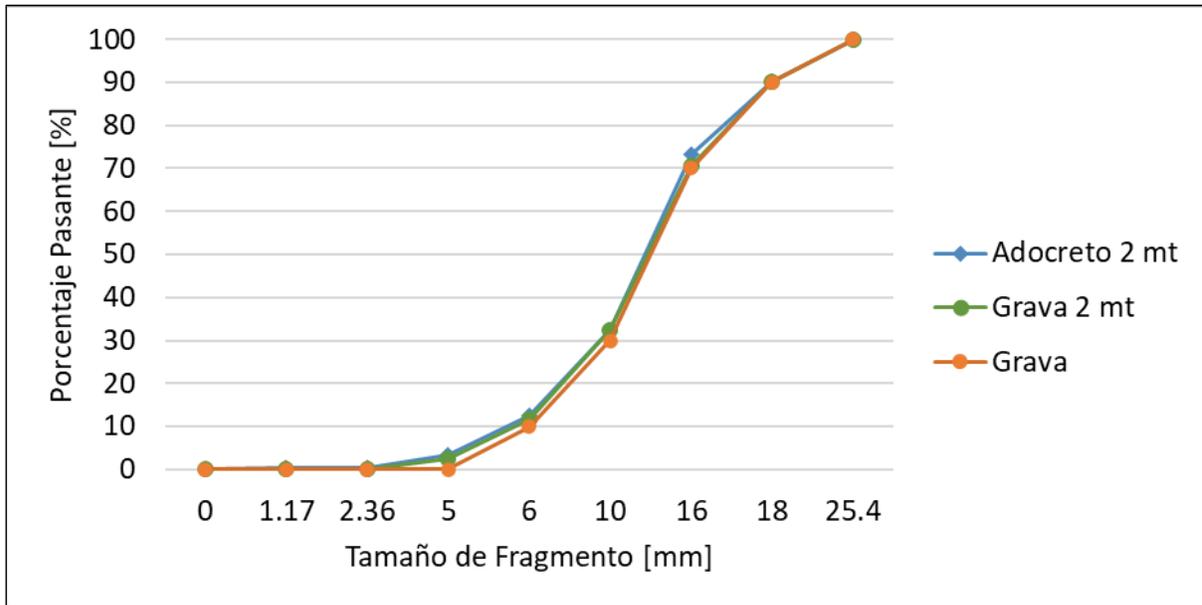


Figura 38: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 2 Metros

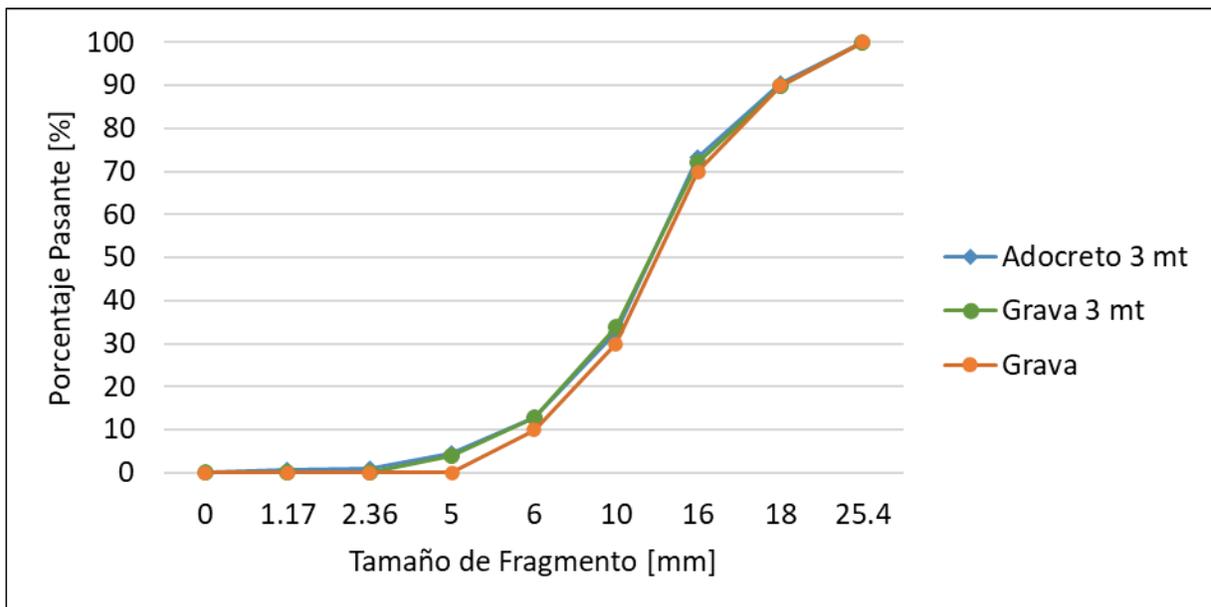


Figura 39: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 3 Metros

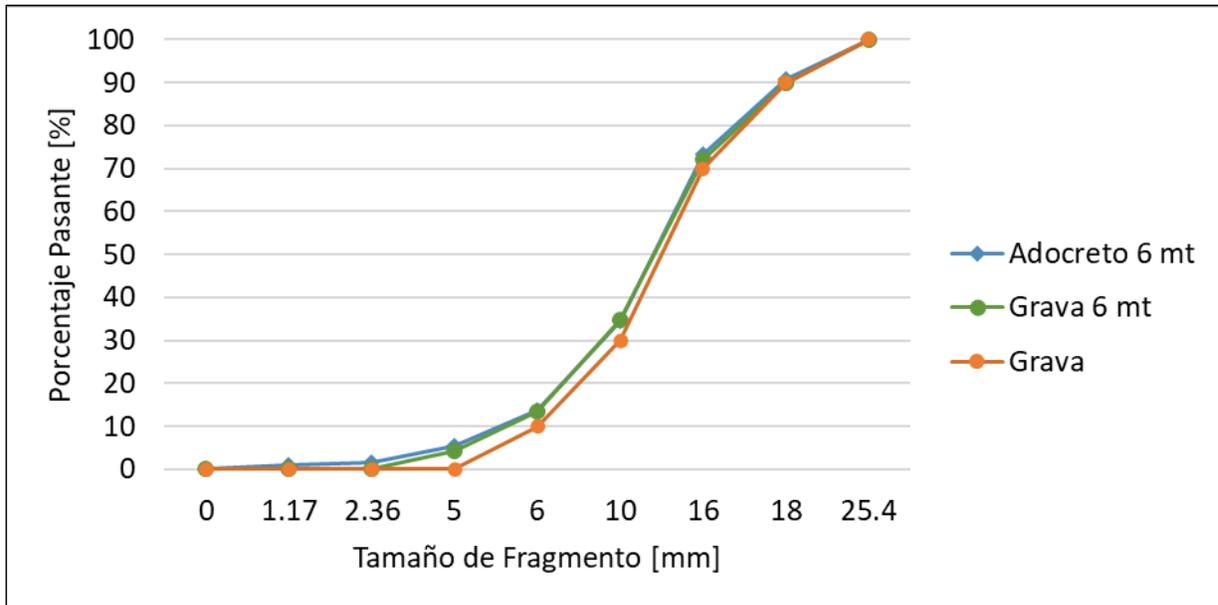


Figura 40: Comparación Curvas Granulométricas de Grava y Adocreto Antes y Después de Ensayo de 6 Metros

Tabla 39: Porcentaje Adocreto Retenido en Cada Ensayo

Intervalo Tamaño [mm]	Adocreto [1 m]	Adocreto [2 m]	Adocreto [3 m]	Adocreto [6 m]	Adocreto [18 m]
[18,25.4]	9.967	9.927	9.607	9.146	8.451
[16,18)	18.515	16.964	17.199	17.573	17.298
[10,16)	40.429	40.618	40.373	38.771	38.050
[6,10)	20.231	19.986	19.903	20.705	19.234
[5,6)	8.548	9.300	8.489	8.258	9.397
[2.36,5)	2.013	2.692	3.537	3.965	3.915
[1.17,2.36)	0.099	0.132	0.263	0.506	0.737
[0,1.17)	0.198	0.380	0.631	1.081	2.909

Tabla 40: Porcentaje Arcilla Retenido en Cada Ensayo

Intervalo Tamaño [mm]	Arcilla [1 m]	Arcilla [2 m]	Arcilla [3 m]	Arcilla [6 m]
[18,25.4]	0.800	0.500	0.800	0.700
[16,18)	0.900	0.700	0.600	0.600
[10,16)	18.200	15.700	16.100	15.800
[6,10)	37.600	39.000	37.200	34.900

[5,6)	16.200	19.400	17.900	19.000
[2.36,5)	16.500	15.600	16.900	17.200
[1.17,2.36)	4.700	4.000	4.900	5.100
[0,1.17)	5.100	5.100	5.600	6.700

Tabla 41: Porcentaje Grava Retenido en Cada Ensayo

Intervalo Tamaño [mm]	Grava [1 m]	Grava [2 m]	Grava [3 m]	Grava [6 m]
[18,25.4]	10.000	10.000	10.000	10.000
[16,18)	20.078	19.478	17.978	17.878
[10,16)	38.553	38.153	38.053	37.453
[6,10)	20.517	20.717	21.017	21.217
[5,6)	9.834	9.134	9.134	9.034
[2.36,5)	1.017	2.517	3.817	4.417

B.2. Datos Asociados a Factores de Lade y Lee & Farhoomand

Tabla 42: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para la Arcilla

Longitud Ensayo [m]	D_{15} Final [m]	D_{15} Inicial [m]	B_{15}
1	3.192	5.375	1.684
2	3.192	5.375	1.684
3	3.063	5.375	1.755
6	2.851	5.375	1.885

Tabla 43: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{15} para la Grava

Longitud Ensayo [m]	D_{15} Final [m]	D_{15} Inicial [m]	B_{15}
1	6.817	7	1.027
2	6.654	7	1.052
3	6.398	7	1.094
6	6.299	7	1.111

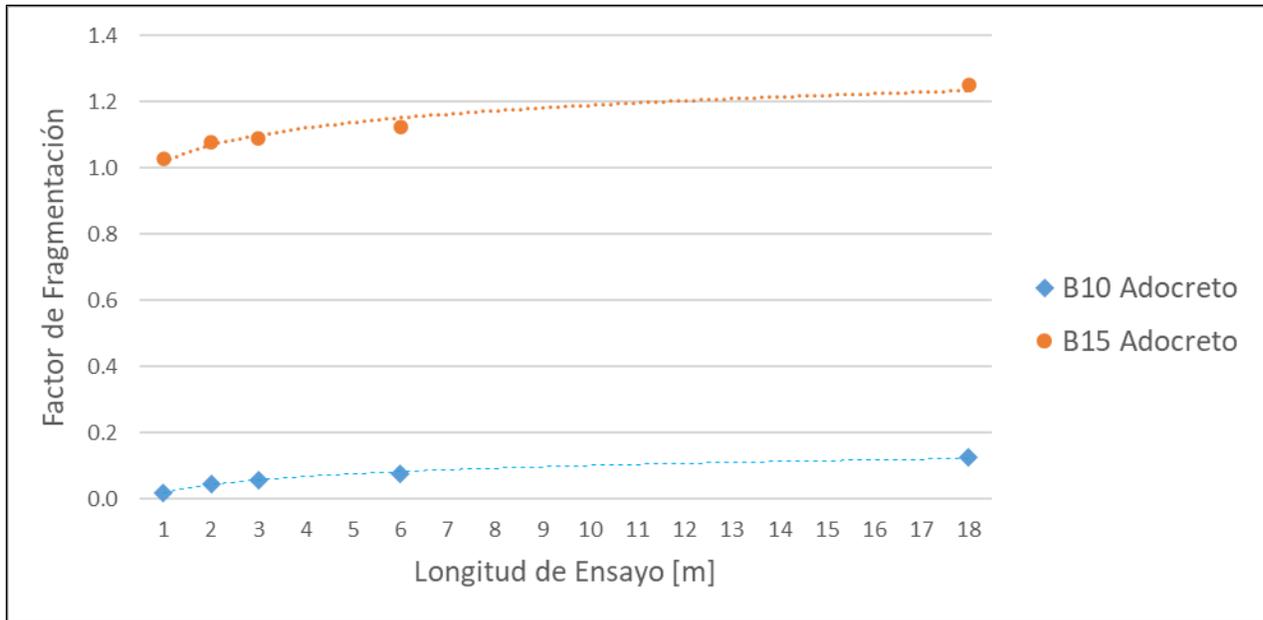


Figura 41: Factores B_{10} y B_{15} en Función de la Longitud de Ensayo para los Ensayos de Adocreto

Tabla 44: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para la Arcilla

Longitud Ensayo [m]	d_{10} Final [m]	d_{10} Inicial [m]	B_{10}
1	2.392	5.125	0.533
2	2.392	5.125	0.533
3	2.239	5.125	0.563
6	1.940	5.125	0.621

Tabla 45: Resultados de Parámetro de Fragmentación B_{10} para la Grava

Longitud Ensayo [m]	d_{10} Final [m]	d_{10} Inicial [m]	B_{10}
1	5.917	6	0.014
2	5.823	6	0.029
3	5.681	6	0.053
6	5.622	6	0.063

B.3. Diámetros Característicos Arcilla y Grava

Tabla 46: Diámetros Característicos Arcilla

Longitud Ensayo [m]	d ₁₀	d ₁₅	d ₃₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₈₀
1	2.392	3.192	5.228	6.798	7.862	9.989
2	2.392	3.192	5.208	6.605	7.631	9.682
3	2.239	3.063	5.145	6.505	7.581	9.731
6	1.940	2.851	5.053	6.229	7.375	9.668
Inicial	5.125	5.375	6.125	7.863	8.692	11.145

Tabla 47: Diámetros Característicos Grava

Longitud Ensayo [m]	d ₁₀	d ₁₅	d ₃₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₈₀
1	5.917	6.817	9.744	12.790	14.283	16.919
2	5.823	6.654	9.553	12.667	14.175	16.883
3	5.681	6.398	9.255	12.432	13.944	16.776
6	5.622	6.299	9.130	12.362	13.897	16.773
Inicial	6.000	7.000	10.000	13.000	14.500	17.000

Tabla 48: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Adocreto

Diam. Característico	d _{i,1}	d _{1,2}	d _{2,3}	d _{3,6}	d _{6,18}
d10	-1.67%	-2.86%	-1.30%	-2.07%	-5.07%
d15	-2.59%	-4.68%	-1.25%	-2.92%	-10.27%
d30	-2.15%	-2.89%	-0.72%	-3.23%	-4.58%
d50	-1.49%	-1.72%	-0.27%	-1.24%	-1.79%
d60	-1.44%	-1.59%	-0.17%	-0.67%	-1.38%
d80	-0.49%	-0.61%	-0.13%	-0.16%	-0.60%
Promedio Ponderado	-1.64%	-2.39%	-0.64%	-0.57%	-0.33%

Tabla 49: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Arcilla

Diam. Característico	d _{i,1}	d _{1,2}	d _{2,3}	d _{3,6}
d10	-53.33%	0.00%	-6.41%	-13.34%
d15	-40.61%	0.00%	-4.04%	-6.91%
d30	-14.64%	-0.39%	-1.20%	-1.80%

d50	-13.55%	-2.84%	-1.51%	-4.24%
d60	-9.55%	-2.94%	-0.66%	-2.71%
d80	-10.37%	-3.08%	0.51%	-0.65%
Promedio Ponderado	-23.67%	-1.54%	-2.22%	-1.65%

Tabla 50: Variación Porcentual de diámetros Característicos en Grava

Diam. Característico	$d_{i,1}$	$d_{1,2}$	$d_{2,3}$	$d_{3,6}$
d10	-1.38%	-1.59%	-2.44%	-1.04%
d15	-2.61%	-2.38%	-3.86%	-1.53%
d30	-2.56%	-1.96%	-3.12%	-1.35%
d50	-1.62%	-0.96%	-1.86%	-0.56%
d60	-1.50%	-0.75%	-1.63%	-0.34%
d80	-0.48%	-0.21%	-0.63%	-0.02%
Promedio Ponderado	-1.69%	-1.31%	-2.26%	-0.27%

B.4. Datos Utilizados para Obtención del Factor de Fragmentación de Marsal

Tabla 51: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Adocreto

Intervalo Tamaño [mm]	$D_{i,1}$	$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,6}$	$D_{6,18}$
[18,25.4]	-0.03	-0.04	-0.32	-0.46	-0.70
[16,18)	-1.49	-1.55	0.23	0.37	-0.28
[10,16)	0.43	0.19	-0.24	-1.60	-0.72
[6,10)	0.23	-0.24	-0.08	0.80	-1.47
[5,6)	-1.45	0.75	-0.81	-0.23	1.14
[2.36,5)	2.01	0.68	0.84	0.43	-0.05
[1.17,2.36)	0.10	0.03	0.13	0.24	0.23
[0,1.17)	0.20	0.18	0.25	0.45	1.83
Bm Adocreto	0.96	1.84	1.46	2.30	3.20

Tabla 52: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Arcilla

Intervalo Tamaño [mm]	$D_{i,1}$	$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,6}$
[18,25.4]	-0.20	-0.30	0.30	-0.10
[16,18)	-0.30	-0.20	-0.10	0.00
[10,16)	-3.80	-2.50	0.40	-0.30

[6,10)	-10.70	1.40	-1.80	-2.30
[5,6)	-3.80	3.20	-1.50	1.10
[2.36,5)	12.00	-0.90	1.30	0.30
[1.17,2.36)	1.70	-0.70	0.90	0.20
[0,1.17)	5.10	0.00	0.50	1.10
Bm Arcilla	18.80	4.60	3.40	2.70

Tabla 53: Variación de Porcentaje Retenido Respecto del Ensayo Precedente para Grava

Intervalo Tamaño [mm]	D _{i,1}	D _{1,2}	D _{2,3}	D _{3,6}
[18,25.4]	0.00	0.00	0.00	0.00
[16,18)	0.08	-0.60	-1.50	-0.10
[10,16)	-1.45	-0.40	-0.10	-0.60
[6,10)	0.52	0.20	0.30	0.20
[5,6)	-0.17	-0.70	0.00	-0.10
[2.36,5)	1.02	1.50	1.30	0.60
Bm Grava	1.61	1.70	1.60	0.80

B.5. Datos Utilizados para Obtención del Factor de Fragmentación de Hardin

Tabla 54: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 1 Metro

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.17	5.1	106.805	109.600	2.795	0.026
2.36	9.8	110.135	117.215	7.081	0.060
5	26.3	216.348	250.140	33.792	0.135
6	42.5	65.600	82.500	16.900	0.205
10	80.1	154.800	193.400	38.600	0.200
16	98.3	64.800	79.200	14.400	0.182
18	99.2	2.500	3.200	0.700	0.219
25.4	100	2.960	3.700	0.740	0.200
Total		723.948	838.955	115.007	0.137

Tabla 55: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 2 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.17	5.1	106.805	109.600	2.795	0.026
2.36	9.1	110.551	117.215	6.664	0.057
5	24.7	219.384	250.140	30.756	0.123
6	44.1	65.600	82.500	16.900	0.205
10	83.1	145.600	193.400	47.800	0.247
16	98.8	54.300	79.200	24.900	0.314
18	99.5	1.700	3.200	1.500	0.469
25.4	100	1.850	3.700	1.850	0.500
Total		705.790	838.955	133.165	0.159

Tabla 56: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 3 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.17	5.6	106.531	109.600	3.069	0.028
2.36	10.5	109.421	117.215	7.794	0.066
5	27.4	213.972	250.140	36.168	0.145
6	45.3	63.650	82.500	18.850	0.228
10	82.5	144.400	193.400	49.000	0.253
16	98.6	56.700	79.200	22.500	0.284
18	99.2	2.200	3.200	1.000	0.313
25.4	100	2.960	3.700	0.740	0.200
Total		699.834	838.955	139.121	0.166

Tabla 57: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Arcilla de 6 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.17	6.7	105.928	109.600	3.672	0.033
2.36	11.8	107.993	117.215	9.223	0.079
5	29.0	210.144	250.140	39.996	0.160
6	48.0	61.500	82.500	21.000	0.255

10	82.9	138.200	193.400	55.200	0.285
16	98.7	55.200	79.200	24.000	0.303
18	99.3	2.000	3.200	1.200	0.375
25.4	100	2.590	3.700	1.110	0.300
Total		683.555	838.955	155.400	0.185

Tabla 58: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 1 Metro

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Area Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.198	109.491	109.600	0.109	0.001
2.360	0.297	118.705	119.000	0.295	0.002
5.000	2.310	260.558	264.000	3.442	0.013
6.000	10.858	93.416	95.000	1.584	0.017
10.000	31.089	316.106	320.000	3.894	0.012
16.000	71.518	292.178	300.000	7.822	0.026
18.000	90.033	38.449	40.000	1.551	0.039
25.400	100.000	36.878	37.000	0.122	0.003
Total		1265.782	1284.600	18.818	0.015

Tabla 59: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Adocreto de 2 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.380	109.392	109.600	0.208	0.002
2.360	0.512	118.469	119.000	0.531	0.004
5.000	3.205	259.094	264.000	4.906	0.019
6.000	12.504	92.146	95.000	2.854	0.030
10.000	32.491	310.010	320.000	9.990	0.031
16.000	73.109	283.202	300.000	16.798	0.056
18.000	90.073	36.819	40.000	3.181	0.080
25.400	100.000	36.731	37.000	0.269	0.007
Total		1245.862	1284.600	38.738	0.030

Tabla 60: Factor de Fragmentación de Hardín para Ensayo de Adocreto de 3 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.629	109.255	109.600	0.345	0.003
2.360	0.892	118.095	119.000	0.905	0.008
5.000	4.429	256.977	264.000	7.023	0.027
6.000	12.918	91.327	95.000	3.673	0.039
10.000	32.821	308.522	320.000	11.478	0.036
16.000	73.195	281.952	300.000	18.048	0.060
18.000	90.393	36.412	40.000	3.588	0.090
25.400	100.000	35.544	37.000	1.456	0.039
Total		1238.083	1284.600	46.517	0.036

Tabla 61: Factor de Fragmentación de Hardín para Ensayo de Adocreto de 6 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	1.077	109.010	109.600	0.590	0.005
2.360	1.583	117.418	119.000	1.582	0.013
5.000	5.547	254.588	264.000	9.412	0.036
6.000	13.805	90.324	95.000	4.676	0.049
10.000	34.510	303.369	320.000	16.631	0.052
16.000	73.281	276.626	300.000	23.374	0.078
18.000	90.854	35.866	40.000	4.134	0.103
25.400	100.000	33.842	37.000	3.158	0.085
Total		1221.042	1284.600	63.558	0.049

Tabla 62: Factor de Fragmentación de Hardín para Ensayo de Grava de 1 Metro

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.000	109.600	109.600	0.000	0.000
2.360	0.000	119.000	119.000	0.000	0.000
5.000	1.017	262.658	264.000	1.342	0.005
6.000	10.851	94.066	95.000	0.934	0.010

10.000	31.368	315.561	320.000	4.439	0.014
16.000	70.000	295.895	300.000	4.105	0.014
18.000	90.000	40.000	40.000	0.000	0.000
25.400	100.000	37.000	37.000	0.000	0.000
Total		1273.779	1284.600	10.821	0.008

Tabla 63: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 2 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.000	109.600	109.600	0.000	0.000
2.360	0.000	119.000	119.000	0.000	0.000
5.000	2.517	260.678	264.000	3.322	0.013
6.000	11.651	92.916	95.000	2.084	0.022
10.000	32.368	311.961	320.000	8.039	0.025
16.000	70.522	291.330	300.000	8.670	0.029
18.000	90.000	39.478	40.000	0.522	0.013
25.400	100.000	37.000	37.000	0.000	0.000
Total		1261.963	1284.600	22.637	0.018

Tabla 64: Factor de Fragmentación de Hardin para Ensayo de Grava de 3 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre-Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0.000	109.600	109.600	0.000	0.000
2.360	0.000	119.000	119.000	0.000	0.000
5.000	3.817	258.962	264.000	5.038	0.019
6.000	12.951	91.616	95.000	3.384	0.036
10.000	33.968	306.161	320.000	13.839	0.043
16.000	72.022	282.030	300.000	17.970	0.060
18.000	90.000	37.978	40.000	2.022	0.051
25.400	100.000	37.000	37.000	0.000	0.000
Total		1242.347	1284.600	42.253	0.033

Tabla 65: Factor de Fragmentación de Hardín para Ensayo de Grava de 6 Metros

Tamaño Max [mm]	fu [%]	Fragmentación Material	Área Sobre Curva Pre- Ensayo (Bp)	Quiebre Total (Bt)	Quiebre Relativo (Br)
1.170	0	109.600	109.600	0.000	0.000
2.360	0	119.000	119.000	0.000	0.000
5.000	4.417	258.170	264.000	5.830	0.022
6.000	13.451	91.066	95.000	3.934	0.041
10.000	34.668	303.761	320.000	16.239	0.051
16.000	72.122	279.630	300.000	20.370	0.068
18.000	90.000	37.878	40.000	2.122	0.053
25.400	100.000	37.000	37.000	0.000	0.000
Total		1236.105	1284.600	48.495	0.038

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

Título: Influencia de la Distancia de Transporte de Materiales Granulares en la Fragmentación Secundaria		
Nombre Memorista: PATRICIO EDUARDO CORTEZ CARABONI		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Muy Bueno	 Prof. René Gómez Puigpinos
Calificación	6.0	
Fecha	26.10.2023	
 Prof. René Gómez P.		
		Ingeniero Supervisor: René Gómez Puigpinos
		Institución: Universidad de Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Asieh Hekmat		 Prof. Roberto Fustos Toribio
Resumen		
<p>En el método de explotación de Block Caving, se denomina fragmentación secundaria al proceso de reducción de tamaño de material que ocurre después de su desprendimiento del macizo rocoso, a medida que los fragmentos descienden a través de la columna de extracción. Este proceso depende, entre otros parámetros, de la distancia que recorren los fragmentos de material y de cómo interactúan entre ellos; y se ve influenciado por los esfuerzos compresivos y de corte presentes en la columna.</p> <p>El presente trabajo cuantifica la fragmentación por el efecto del transporte de tres materiales mediante un modelo físico a escala en una proporción de 1:30. En los ensayos se utilizó material granular de adocreto, cuyos datos fueron comparados con ensayos previos realizados a dos materiales: grava y arcilla. Para comparar el comportamiento de los tres materiales, estos fueron caracterizados mediante la obtención de una serie de propiedades intrínsecas de cada uno de ellos, así como mediante obtención de las distribuciones de tamaños antes y después de los ensayos.</p> <p>Los resultados muestran que la reducción de tamaño ocurre principalmente producto de la abrasión, y si bien posee una tendencia lineal en los tamaños de fragmento menores, esta tendencia cambia a una relación logarítmica a medida que aumenta la distancia de transporte. También se pudo apreciar que tanto la esfericidad como la redondez del adocreto variaron su tendencia al alza en una relación logarítmica, siendo los fragmentos más angulosos los más afectados por la abrasión. La fragmentación no resulta ser directamente proporcional al UCS, siendo esta última mucho más marcada para el caso de la arcilla en relación a los otros materiales; lo anterior es corroborado mediante los factores de fragmentación de Hardin (B_r), que es de 0.190 para la arcilla, en comparación con 0.050 obtenidos para</p>		

el adocreto y los 0.038 obtenidos para la grava para los ensayos de 6 metros. Se estimó que las distancias de transporte en donde los materiales dejaron de fragmentarse significativamente fueron de 46.8 metros para el adocreto, 60 metros para la arcilla y 38.6 metros para la grava; en tanto las distancias de ensayo en donde ocurre la mayor variación del aumento de la fragmentación se estimaron en 2.087 metros para el adocreto y 3.924 para la grava.

Finalmente, se formularon ecuaciones que permiten relacionar la distancia de transporte (L) con el factor B_r ; particularmente para el caso del adocreto, la ecuación corresponde a $L = 0.0221 \ln (B_r) + 0.0143$.