



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

**ROTURA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE ESFUERZOS DE MATERIALES
GRANULARES GENERADOS EN MINERÍA DE BLOCK CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO ANTONIO SALAZAR ARAVENA

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO DORADOR ORTIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ROBERTO GESCHE SCHÜLER

LENART GONZALEZ LAGOS

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERO CIVIL
POR: FRANCISCO ANTONIO SALAZAR ARAVENA
FECHA: 28/01/2016
PROF. GUÍA: Sr. LEONARDO DORADOR O.

ROTURA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE ESFUERZO DE MATERIALES GRANULARES GENERADOS EN MINERÍA DE BLOCK CAVING

La gran minería en Chile y el mundo ha facilitado la generación de una extensa cantidad de materiales granulares mineros tales como relaves, lastres, y ripios post-lixiviación, entre otros, los cuales han dado pie a importantes iniciativas de investigación. Sin embargo, aún existen temas relevantes como la rotura de partículas generadas en estos materiales que no han concitado una debida atención.

Por ejemplo, un tópico sumamente significativo en minería subterránea de Block Caving es el proceso de fragmentación de la roca, en la cual el macizo rocoso es hundido desde su interior, permitiendo la generación de materiales quebrados; bloques colpas, bolones, gravas y arenas. Estos materiales continúan un nuevo proceso de fragmentación (fragmentación secundaria) debido al movimiento descendente del material quebrado al estar siendo removido desde puntos de extracción. Esto trae consigo una serie de configuraciones de esfuerzos de compresión y corte a lo largo de la columna descendente de material. Así, el proceso de fragmentación secundaria tendría muchas similitudes al fenómeno de la rotura de partículas en materiales granulares. Aunque este último tema ha sido estudiado durante décadas por diferentes autores tales como Lee y Farhoomand (1967), Vesic y Clough (1968), Marsal (1973) y Hardin (1985) entre otros, estudios de este tipo que incluyan materiales quebrados o materiales granulares generados de proyectos mineros son muy escasos (D'Espessailles 2014).

Para profundizar en el entendimiento de la rotura de materiales granulares generados en minería de Block Caving, esta memoria contempla la realización de 3 ensayos triaxiales CID de grandes dimensiones (probetas de diámetro = 60 cm, altura = 120 cm y diámetro = 100 cm, altura = 180 cm) a 20kgf/cm^2 de confinamiento. Además, dos ensayos de compresión triaxial CID (probetas de diámetro = 5 cm y altura = 10 cm) se compararán en términos de rotura con la obtenido en ensayos de corte simple (probetas de diámetro 7 cm). Se emplearán materiales de tronadura proveniente del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS).

Además, procedimientos para una correcta confección de probetas triaxiales de grandes dimensiones con granulometrías uniformes son presentados. En estos se obtuvo una alta cantidad de rotura evaluada con el parámetro "Bg" de Marsal (1967), presentando valores moderados al evaluarse con el parámetro "Br" de Hardin (1985). Además, desarrollaron una baja resistencia al ser comparados con una extensa data de triaxiales CID de grandes dimensiones. Durante el desmonte de las probetas se pudo observar los diferentes tipos de rotura generados, los cuales son explicados de acuerdo a los mecanismos de deformación desarrollados al interior de la probeta. En cuanto a la comparación de rotura de ensayos de pequeña escala (triaxiales CID y corte simple) los resultados no son concluyentes en el desarrollo de mayor rotura en ensayos de corte simple.

A mis padres, familia, amigos..

Agradecimientos

A los chicos del team Vancouver(?) por todo el apoyo durante el desarrollo de la memoria: Felipe, Josefina y por supuesto la Javi. ¡Se pasaron! A la Venus por ayudarme a tamizar, al chalo que también aportó un día. A Héctor que sacrificó vitales horas de sueño por ir a ayudarnos a Cerrillos. A los amigos del pipe. Altísimas figuras de la geotecnia mundial(?)

A la Sra. Marina y Don Carlos por hacer de mi estadía en Concepción una grata experiencia. A don Mauro Poblete y el profesor Felipe Villalobos del Laboratorio de Geomateriales de la UCSC por su excelente disposición y apoyo.

A los colegas del equipo de ensayos especiales de IDIEM, Don Mario y los muchachos del equipo. A Omar y Mario de Mecesus por la sabiduría. Al profesor Roberto Gesche y Lenart González por su gran labor como guías.

Y por supuesto a Leo. Enorme motivador y de las personas más jugadas que conocí.

A todos ustedes un abrazo y mil gracias!

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos generales	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Introducción	3
2.1.1 Minería de Block Caving	4
2.1.2 Fragmentación Secundaria en minería de Block Caving	5
2.2. Generalidades del comportamiento en materiales granulares	7
2.3. Resistencia al corte en materiales granulares	8
2.3.1 Rotura de partículas	10
2.4. Factores que afectan la resistencia al corte	11
2.4.1 Forma de las partículas	11
2.4.2 Granulometría inicial	12
2.4.3 Dureza de las partículas	13
2.4.4 Presión de confinamiento	15
2.5. Estimación de la rotura de partículas	15
2.6. Método de gradación paralela o curvas homotéticas	17
3. Materiales ensayados	18
3.1. PES (Pórfido Este Sericítico)	20
3.1.1 Material PES (2014)	21
3.1.2 Material PES (2015)	22
3.2. PEK (Pórfido Este Potásico)	24
3.2.1 Material PEK (2014)	24
3.2.2 Material PEK (2015)	25
4. Ensayos triaxiales de grandes dimensiones	27
4.1. Descripción del equipo y del ensayo	27
4.2. Metodología de armado de probetas triaxiales de grandes dimensiones para ensayos con granulometrías uniformes	29

4.2.1	Criterios considerados para la protección de la geomembrana.....	29
4.2.2	Evaluación de la erosión interna: criterio de Kezdi	34
4.3.	Confección de probetas	35
4.3.1	Ensayo Nº 2: unidad PES.....	36
4.3.2	Ensayo Nº 3: mezcla PES-PEK	39
4.3.3	Ensayo Nº 4: unidad PEK	41
5.	Otros ensayos de laboratorio	43
5.1.	Equipo triaxial	43
5.2.	Metodología de Ensayo	45
5.2.1	Preparación de material	45
5.2.2	Confección de probetas.....	45
5.2.3	Etapa de CO ₂	46
5.2.4	Saturación.....	46
5.2.5	Verificación de saturación	46
5.2.6	Consolidación	47
5.2.7	Corte.....	47
5.3.	Aparato de Corte Simple	47
5.4.	Descripción de equipo de Corte Simple.....	47
6.	Resultados.....	49
6.1.	Ensayos de grandes dimensiones.....	49
6.1.1	Curvas de tensión-deformación	49
6.1.2	Curvas de cambio volumétrico – deformación.....	50
6.1.3	Rotura de partículas	50
6.2.	Ensayos de laboratorio	52
6.2.1	Curvas de tensión deformación.....	53
6.2.2	Curvas de cambio volumétrico – deformación.....	53
6.2.3	Rotura de partículas	54
7.	Análisis de resultados.....	55
7.1.	Comparación de ensayos triaxiales CID convencionales con data obtenida de ensayos de corte simple.....	55
7.2.	Comparación geotécnica entre un material quebrado y un material de marina (lastre) ..	58

7.2.1	Data recopilada de ensayos de grandes dimensiones.....	58
7.2.2	Resultados de σ_1/σ_3 versus rotura de partículas	59
7.2.3	Ángulo de fricción secante ϕ_{sec} versus rotura de partículas	61
7.3.	Rotura de partículas en ensayos de grandes dimensiones.....	62
8.	Discusión.....	65
9.	Conclusiones	67
10.	Recomendaciones	68
11.	Bibliografía	69
12.	Anexo: Ensayos y cálculo de parámetros de rotura.....	73
12.1.	Ensayos triaxiales de grandes dimensiones.....	74
12.1.1	Material PES	74
12.1.2	Material PES-PEK	75
12.1.3	Material PEK	76
12.2.	Ensayos triaxiales de laboratorio	78
12.2.1	PES.....	78
12.2.2	PEK.....	79
12.3.	Estimación de parámetros de rotura, data recopilada.....	80
13.	Anexo: Fotografías ensayos triaxiales grandes dimensiones.....	87

Índice de figuras

Figura 1: esquema de explotación en Block Caving (Codelco, 2009b).....	4
Figura 2: etapas de fragmentacion secundaria, Adaptado de Duplancic y Brady (1999)	6
Figura 3: esquema columna de extracción. Adaptado de Dorador et al. (2014).....	7
Figura 4: mecanismos de deformación elástica	8
Figura 5: colapso de una agrupación inestable de partículas (Lambe & Whitman, 1989)	8
Figura 6: (a) supuesto de Coulomb y ensayo caja de corte (b) configuración de esfuerzos en test triaxial. (c) criterio de falla de Mohr-Coulomb (Rowe, 1962)	9
Figura 7: tipos de fragmentación. (a) fragmentación periférica (abrasión), (b) fragmentación total. Adaptado de Chik (2004).....	10
Figura 8: Escala de redondez de partículas. Adaptado de Powers (1953).....	11
Figura 9: efecto de la forma de la partícula (Lee & Farhoomand 1967).....	12
Figura 10: efecto de la granulometría inicial (Lee & Farhoomand 1967)	13
Figura 11: influencia de la dureza de las partículas en la cantidad de rotura. Adaptado de Lo & Roy (1973)	14
Figura 12: efecto del confinamiento (Lade et al. 1996).....	15
Figura 13: esquema de cuantificadores de rotura (Lade et al. 1996).....	16
Figura 14: esquema de cálculo del parámetro Br de Hardin (1985)	17
Figura 15: esquema de niveles de mina y Macro Bloques PMCHS (Codelco, 2009a)	19
Figura 16: esquema de ubicación de unidades geotécnicas, Chuquicamata (Codelco, 2009b)	20
Figura 17: muestra de unidad PES (izquierda) y muestra Frágil (derecha).....	21

Figura 18: histograma de ensayos de compresión simple sobre material PES y muestra FRÁGIL (D'Espessailles 2014).....	22
Figura 19: muestra litológica. a) Arcilla de Alteración, b) Cuarzo, c) Sericita, d) Masa Fundamental 1, e) Masa Fundamental 2 (Urrutia 2015)	23
Figura 20: histograma de ensayos de compresión simple a unidades de la muestra PES (Urrutia 2015)	23
Figura 21: histograma de ensayos de compresión simple a unidades de la muestra PES. Continuación (Urrutia 2015)	24
Figura 22: muestra de material PEK correspondiente al envío N°1 (2014) (D'Espessailles 2014)	25
Figura 23: histograma de ensayos de compresión simple sobre muestra PEK (2014) (D'Espessailles 2014).....	25
Figura 24: histograma de compresión simple sobre unidades litológica, muestra PEK (Urrutia 2015)	26
Figura 25: aparato triaxial de grandes dimensiones (Verdugo et al. 2007).....	28
Figura 26: material de volteo PES correspondiente al envío N°2	29
Figura 27: esquema geomembrana-geotextil para un espécimen triaxial.....	30
Figura 28: colocación de geotextil.....	30
Figura 29: forma de las partículas.....	31
Figura 30: probeta PES (100 cm x 180 cm). Los moldes de acero son retirados a medida que se formaban las capas.	32
Figura 31: probeta armada con la capa protectora, se observa una reducción importante de la deformación de la geomembrana.	33
Figura 32: criterio de Kezdi. Adaptado de Kezdi (1979).....	34

Figura 33: curva granulométrica de unidad PES (Codelco, 2011) y la homotética considerada para los ensayos triaxiales de grandes dimensiones	35
Figura 34: curva granulométrica de unidad PEK (Codelco, 2011) y la homotética considerada para los ensayos triaxiales de grandes dimensiones	35
Figura 35: granulometría ensayo N°2 PES y homotética	36
Figura 36: esquema de planta probeta PES	37
Figura 37: colocación del material para una capa PES	38
Figura 38: criterio de Kezdi, PES60x120	38
Figura 39: granulometrías ensayo N°2 mezcla PES-PEK.....	39
Figura 40: capa mezcla PES-PEK60x120.....	40
Figura 41: criterio Kezdi, PES-PEK60x120	40
Figura 42: granulometría ensayo N°3 PEK y homotética.....	41
Figura 43: planta PEK100x180	42
Figura 44: capa PEK100x180	42
Figura 45: cumplimiento del criterio de Kezdi, PEK100x180	43
Figura 46: (a) prensa de carga GDS 50KN Load Frame (GDSLF50). (b) placa de carga.	44
Figura 47: (a) panel de control de presiones. (b) cámara triaxial.....	44
Figura 48: Equipo de corte simple, Mecsup (D'Espessailles 2014)	48
Figura 49: curva q v/s ϵ , ensayos de grandes dimensiones.....	49
Figura 50: curvas ϵ v/s ϵ_v , ensayos de grandes dimensiones	50
Figura 51: granulometrías ensayo N°2 PES.....	51
Figura 52: granulometrías ensayo N°3 PES-PEK	51

Figura 53: granulometrías ensayo N°4 PEK.....	52
Figura 54: gráfico ϵ v/s q de ensayo Triaxial sobre material del envío N°1 (2014)	53
Figura 55: curvas ϵ v/s ϵ_v , ensayos de laboratorio sobre material del envío N°1 (2014).....	53
Figura 56: granulometrías post-ensayo triaxial sobre material del envío N°1 (2014). (a) unidad PES, (b) Unidad PEK.....	54
Figura 57: granulometrías de post-ensayos de Corte Simple (D'Espessailles 2014). (a) Muestra PES (b) Muestra PEK.....	55
Figura 58: trabajo externo aplicado v/s rotura de Hardin (Br). Material PES.	57
Figura 59: trabajo externo aplicado v/s rotura de Hardin (Br). Material PEK	57
Figura 60: Ensayos triaxiales (Marsal 1973)	59
Figura 61: parámetro de rotura de Marsal "Bg" v/s " σ_1/ σ_3 "	60
Figura 62: parámetro de rotura de Hardin "Br" v/s " σ_1/ σ_3 "	61
Figura 63: parámetro de rotura de Marsal "Bg" v/s " ϕ_{sec} "	62
Figura 64: (a) Rotura no significativa de clasto entre 6" y 5", (b) <i>splitting</i> de clasto entre 3" y 2"	63
Figura 65: fragmentación casi total de clasto entre 2" y 3".....	64
Figura 66: (a) fragmentación total de clasto entre 1" y 2". (b) partícula de tamaño 2" a 3" rodeada de partículas con alta cantidad de rotura	65
Figura 67: desarme ensayo N°3 PES-PEK (60x120).....	87
Figura 68: desarme ensayo N°4 PEK (100x180)	88

Índice de tablas

Tabla 1: características de la grava granítica chancada utilizada por Lee & Farhoomand (1967)	13
Tabla 2: resumen de pruebas de compresión simple sobre material PES y muestra Frágil..	22
Tabla 3: resumen de ensayos de compresión simple a unidades de muestra PES (Urrutia 2015)	24
Tabla 4: resumen de pruebas de compresión simple sobre muestra PEK (2014) (D'Espessailles 2014).....	25
Tabla 5: resumen de resultados de compresión simple sobre muestra PEK (Urrutia 2015) .	26
Tabla 6: resumen de parámetros de confección	36
Tabla 7: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos. PES.	37
Tabla 8: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos. Mezcla PES-PEK	39
Tabla 9: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos. PEK.	41
Tabla 10: parámetros iniciales de ensayos triaxiales sobre material PES y PEK del envío N°1 (2014)	45
Tabla 11: resumen de resultados de ensayos de grandes dimensiones	52
Tabla 12: resumen de resultados de ensayos triaxiales	54
Tabla 13: resumen de resultados obtenidos en ensayos de corte simple (D'Espessailles 2014)	56
Tabla 14: ensayo de corte simple en muestra PEK (D'Espessailles 2014).....	80
Tabla 15: ensayo de corte simple en muestra PES (D'Espessailles 2014).....	81

Tabla 16: muestra Infiernillo (a) (Marsal 1965)	82
Tabla 17: muestra Infiernillo (b) (Marsal 1965)	82
Tabla 18: muestra Malpaso (a) (Marsal 1965)	83
Tabla 19: muestra Malpaso (b) (Marsal 1965)	83
Tabla 20: otros ensayos (Marsal 1973).....	84
Tabla 21: resumen de parámetros de rotura de data recopilada para ensayos de grandes dimensiones.	85

Notación

B_g [%] : parámetro de rotura de Marsal

B_r [%] : parámetro de rotura de Hardin

c [kgf/cm²] : cohesión

C_c : Coeficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

C_u : Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{10} [mm] : tamaño de partículas para el cual ha pasado el 10% del material

D_{30} [mm] : tamaño de partículas para el cual ha pasado el 30% del material

D_{60} [mm] : tamaño de partículas para el cual ha pasado el 60% del material

DR [%] : densidad relativa

ε [%] : deformación axial

ε_v [%] : deformación volumétrica

ϕ [°] : ángulo de fricción interna

ϕ_{sec} [°] : ángulo de fricción secante

G_s : gravedad específica

σ_n [kgf/cm²] : esfuerzo normal

σ_1 [kgf/cm²] : esfuerzo principal mayor

σ_3 [kgf/cm²] : esfuerzo principal menor

σ_c [kgf/cm²] : tensión de confinamiento

τ [kgf/cm²] : esfuerzo de corte

p [kgf/cm²] : presión media

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

q [kgf/cm²] : tensión de corte

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$\Delta\sigma$ [kgf/cm²] : desviador de esfuerzos

γ [°] : deformación angular

$\Delta V/V$ [%] : deformación volumétrica

1. Introducción

1.1. Motivación

El auge existente en la industria minera trae consigo una serie de temas de estudios geotécnicos relacionados a materiales particulados generados de los procesos mineros tales como relaves (convencional, espesado, etc.), lastres (también conocidos como marinas o material de desmonte) y rípios lixiviados principalmente. Aunque la minería por rajo abierto es aún el método más requerido en los diseños mineros, la minería por hundimiento masivo (Block/Panel Caving) está comenzando a tener una gran importancia (Moss, 2011). Proyectos mineros emblemáticos tales como Palabora en Sudáfrica, o Grasberg en Indonesia están experimentando una transición rajo-Block Caving, y sin ir más lejos en Chile se podrían mencionar 2 mega-proyectos de este tipo: el nuevo nivel de Mina de Teniente y el proyecto minero Chuquicamata subterráneo. De hecho, se estima además que en 2020 la minería subterránea masiva llegue a ser tan relevante como la minería a rajo abierto (Moss, 2011). Sin embargo, pese a la gran demanda que está comenzando a experimentar este tipo de minería subterránea, existen una serie de dudas respecto a cómo el macizo rocoso se comporta cuando es socavado por minería de Block Caving, en especial en predecir la subsidencia en el tiempo y cuantificar de manera precisa la fragmentación del macizo durante el hundimiento.

En base a este último tema, la fragmentación del macizo rocoso depende de las características geotécnicas de la roca y de la redistribución de esfuerzos en el macizo durante la socavación y hundimiento (Laubscher, 1994). Durante este proceso de fragmentación, la roca se transforma en un “material quebrado” el cual corresponde a conglomerados de rocas, gravas y arenas generados de este proceso de fragmentación. Así, estos materiales quedan apilados y crean columnas desde las cuales es posible extraerlo con sistemas mecanizados.

Sin embargo, la fragmentación secundaria, correspondiente a la conminución de material quebrado dentro de columnas de extracción, es hasta el día de hoy un tema muy poco entendido, debido principalmente a la falta de estudios que analicen este fenómeno. Adicionalmente, los mecanismos que ocurren durante la fragmentación secundaria en materiales quebrados estarían íntimamente ligado al fenómeno de rotura de partículas en materiales granulares. Por lo tanto, este trabajo de investigación considera el análisis de

ensayos de laboratorios estandarizados de geotecnia, aplicados sobre materiales particulados que provienen directamente del proceso minero, de tal manera de estudiar el fenómeno de rotura de partículas y aplicar estos resultados en un mejor entendimiento del proceso de fragmentación secundaria en minería de hundimiento (block Caving).

1.2. Objetivos generales

Estudiar empíricamente la rotura de partículas de gravas y arenas de 2 materiales quebrados en función de diferentes variables intrínsecas y de estado. Principalmente se pretende estudiar los mecanismos de rotura de este tipo de materiales bajo diferentes trayectorias de esfuerzo además de corroborar el rol de los esfuerzos y deformaciones por corte en la rotura de partícula del material.

1.2.1 Objetivos específicos

- Análisis geotécnico de 2 materiales de tronadura (marinas) ensayados en el aparato triaxial de grandes dimensiones de IDIEM y escalado por medio de curvas homotéticas. Este material será proveniente del proyecto Chuquicamata Subterráneo (PMCHS).
- Caracterización geotécnica del material, incluyendo granulometría (ASTM, D136-06), densidades mínimas y máximas (ASTM D4253 y ASTM D4254), gravedad específica (ASTM D127-12) y ensayos de compresión simple a partículas de arena proveniente de un material de marina del proyecto PMCHS.
- Análisis de ensayos de compresión triaxial CID (consolidado isotrópicamente drenado) y corte simple ejecutados sobre el material granular de tronadura de PMCHS.
- Estudio comparativo de parámetros para cuantificar rotura de partículas.

2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En minería, una serie de materiales granulares son generados tales como lastres, ripios, lixiviados, relaves y materiales quebrados. En el caso de una mina subterránea de Block Caving, los materiales quebrados corresponden a conglomerados de colpas, bolones, gravas y arena que son generados por la socavación y hundimiento del macizo rocoso. En términos simples, se entiende por socavación el proceso en el cual una porción del macizo es debilitado mediante perforación y tronadura, generándose una redistribución de esfuerzos que posibilita su fracturamiento y posterior desplome por la acción de la fuerza gravitacional (hundimiento). Lo interesante de estos materiales “granulares” es su forma de partículas (angulosidad y radio de aspecto), la cual es heredada directamente de la roca. Esto trae consigo que estas partículas tengan una reducida cantidad de caras libres (en comparación a partículas de suelos granulares transportados), lo cual permite condiciones de empaquetamiento y densidades diferentes a las conocidas en mecánica de suelos.

El punto clave de los materiales quebrados, es la imposibilidad de estudiarlos empíricamente en base a ensayos de corte en laboratorio, ya que los bloques pueden tener volúmenes mayores a 2 m^3 (Flores et al. 2004). Así, una manera razonable de estudiar estos materiales es en base a materiales de tronadura de menor tamaño (de un mismo sector geotécnico del material quebrado a estudiar) en conjunto con métodos de escalamientos de tamaño tal como el método de granulometría paralela o curvas homotéticas (Lowe, 1964). Aun así, efectuar un estudio de caracterización geotécnica de este tipo no es común en proyectos mineros ya que podría ser costoso y podría generar interferencias en el nivel de extracción, y por lo tanto pérdidas de producción.

En base a la dificultad de ejecutar estudios empíricos de fragmentación de materiales granulares (materiales quebrados), resulta interesante como alternativa el recurrir al conocimiento de rotura de partículas en suelos granulares y enrocados, el cual ha estado orientado por ejemplo al estudio de presas de tierra, en las que suelen usarse materiales de buena calidad geotécnica, y cuyas partículas superan una resistencia a la compresión simple de 100 MPa. En cambio, los materiales quebrados suelen ser por lo general más débiles; al estar afectados tanto por procesos de degradación del macizo rocoso

(meteorización), como factores propios de la actividad minera, tales como el proceso de tronadura durante la socavación del mineral.

2.1.1 Minería de Block Caving

La minería por hundimiento masivo o *Block Caving* corresponde a un método de extracción empleado en faenas subterráneas que aprovecha la capacidad de fragmentación de la roca y la fuerza de gravedad. Consiste principalmente en la división del cuerpo mineralizado en bloques virtuales de gran tamaño, los cuales son hundidos por la socavación controlada desde su base (nivel de hundimiento, Figura 1) empleando perforaciones y tronadura (Brady & Brown, 2013). Esto induce un primer hundimiento por la aparición de un “efecto viga” en la base del bloque, generándose grandes esfuerzos de tracción por encima de la cavidad producida. A medida que se desprende el material los esfuerzos dominantes comienzan a ser de corte o cizalle.

El material fragmentado es conducido a través de galerías hacia el nivel de producción (Figura 1) donde es transportado hacia a los siguientes etapas de procesamiento del mineral.

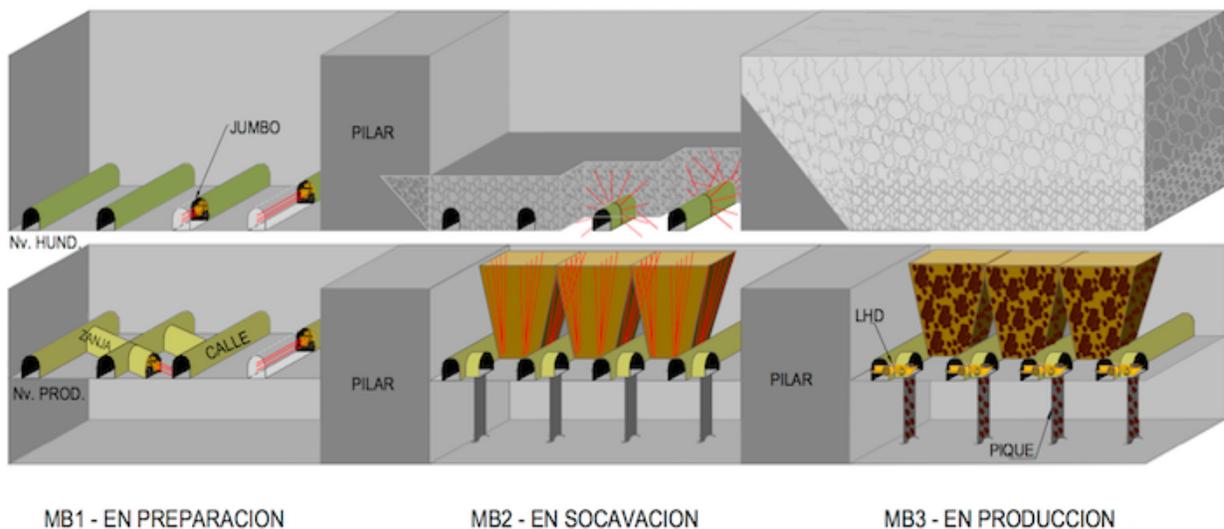


Figura 1: esquema de explotación en Block Caving (Codelco, 2009b)

Un aspecto fundamental del proceso de hundimiento es la fragmentación del macizo rocoso que da lugar a la generación de materiales quebrados. Conocer la granulometría de este material es de suma importancia para el desarrollo de un plan de extracción minero, ya que

permite diseñar el tamaño óptimo de los puntos de extracción y el espaciamiento entre ellos de modo de evitar la aparición de colgaduras (bloques de gran tamaño que quedan atrapados al interior de los conductos, los cuales generan pérdidas de producción).

2.1.2 Fragmentación Secundaria en minería de Block Caving

El proceso de fragmentación, desde un punto de vista geomecánico, consiste en una generación continua de bloques consistente en 3 etapas: Fragmentación *in Situ*, Fragmentación Primaria y Fragmentación Secundaria (Laubscher, 1994). Estos son detallados a continuación:

- Fragmentación *in Situ* (Natural): son aquellos bloques generados por discontinuidades previas al proceso de socavación del macizo rocoso. El tamaño de estos bloques puede ser estimado de manera aproximada mediante información de sondajes y estimaciones numéricas probabilísticas, que ayudan a predecir los supuestos bloques generados en forma natural al interior del macizo.
- Fragmentación Primaria: tiene lugar durante el comienzo del proceso de socavación y se debe a una redistribución de esfuerzos existente en el techo de roca (*Cave Back*, Figura 2), lo que trae consigo un fracturamiento del macizo rocoso (grietas de tracción).
- Fragmentación Secundaria: los bloques que se desprenden del techo de roca comienzan a apilarse en una columna de extracción (Figura 2). Cuando el material comienza a ser extraído desde la base de la columna, estos bloques comienzan a descender y por consiguiente inician un segundo proceso de fragmentación, en un fenómeno dominado por esfuerzos de compresión por sobrecarga de la columna de material y corte que se generan en los bordes de la columna (Pierce 2009).

El fenómeno global de fragmentación resulta fundamental para el diseño de la malla de extracción de una mina de Block Caving ya que condiciona el tamaño de los bloques que se generan. Si por ejemplo la fragmentación es gruesa, se generarán muchos bloques de sobre-tamaño que pueden terminar bloqueando los puntos de extracción, lo que se traduce en pérdidas millonarias para el proyecto minero.

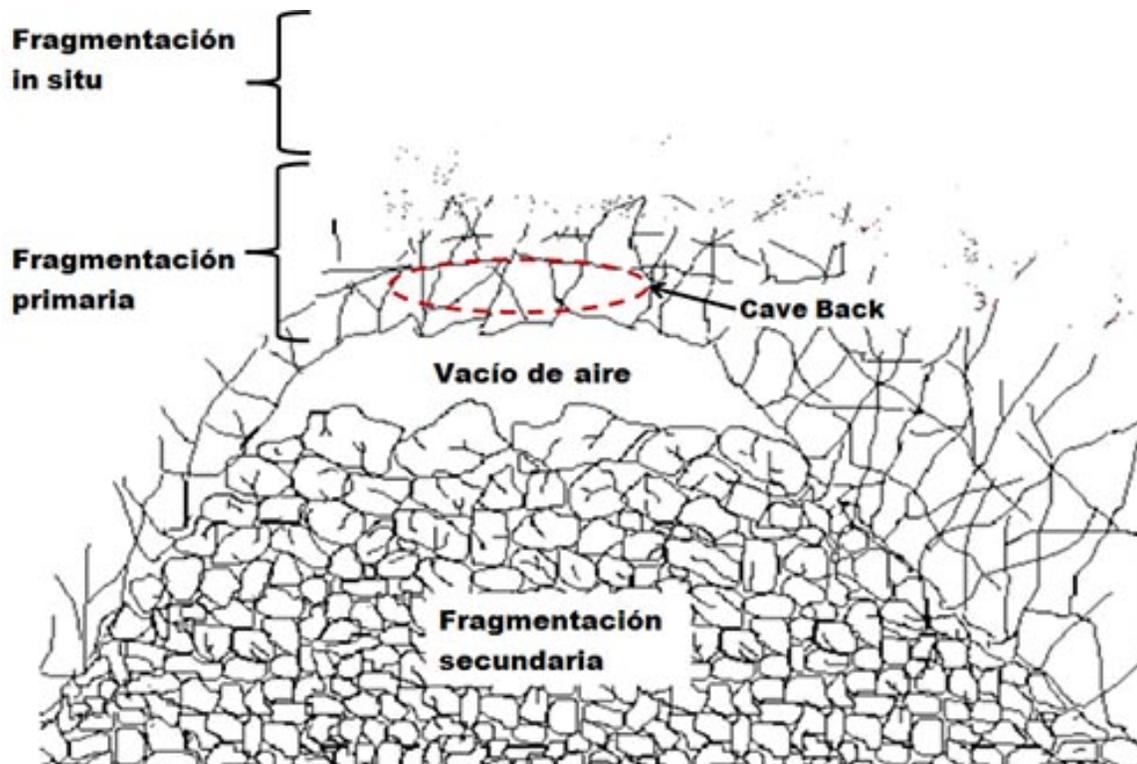


Figura 2: etapas de fragmentación secundaria, Adaptado de Duplancic y Brady (1999)

Según Dorador et al. (2014), el fenómeno de Fragmentación Secundaria asociado a una columna de extracción aislada (sin interacción entre columnas vecinas) puede asociarse a 2 modos de esfuerzo: una compresión anisotrópica en el centro de la columna, similar a un camino de tensiones de compresión unidimensional; y en los bordes un camino de tensiones semejante al de un corte simple monótono (Figura 3).

Una alternativa factible para el estudio empírico de la fragmentación secundaria es brindada por ensayos triaxiales CID (Consolidado isotrópicamente drenado), ya que en este tipo de pruebas los materiales experimentan esfuerzos tanto de compresión como de corte. En la literatura, diversos autores han desarrollado ensayos triaxiales de grandes dimensiones, sin embargo, son pocos los antecedentes de este tipo de ensayos ligados a materiales provenientes de minería (Contreras 2011), mas bien lo estudiado hasta ahora corresponde a materiales de *rockfill* (Marsal, 1965; Marachi et al. 1969; Marsal, 1973).

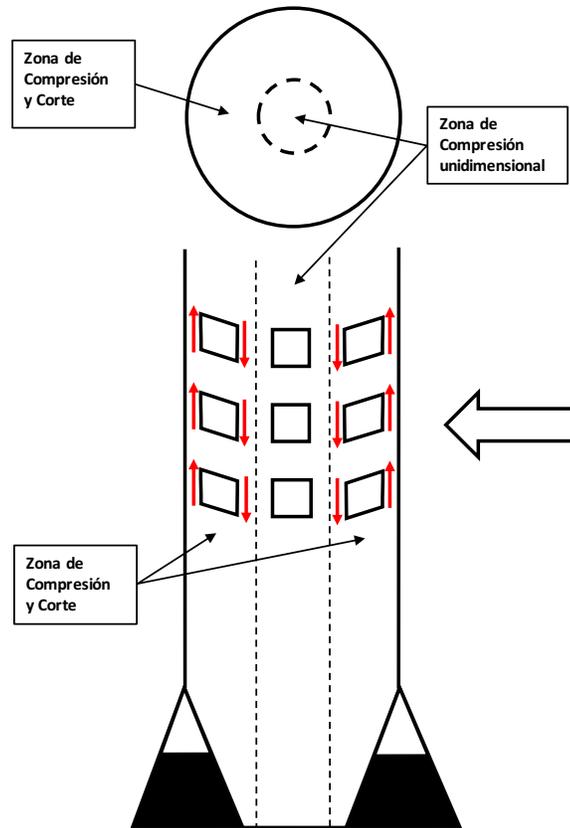


Figura 3: esquema columna de extracción. Adaptado de Dorador et al. (2014)

2.2. Generalidades del comportamiento en materiales granulares

Las deformaciones que un elemento de suelo experimenta debido a la acción de una fuerza externa son el resultado de deformaciones internas (movimientos de cuerpo rígido) y desplazamientos relativos entre las partículas que componen el material. En particular, para suelos granulares, se pueden considerar dos mecanismos que contribuyen a la deformación: la distorsión de las partículas (y por consiguiente la fractura de las mismas) y el movimiento relativo de partículas, ya sea por deslizamiento o rodadura (Lambe & Whitman, 1989).

En términos de energía, la aplicación de esta fuerza supone un traspaso de trabajo mecánico a la muestra de suelo. El suelo absorbe solo una parte de la energía transmitida con la cual aumenta su energía interna. Este fenómeno se manifiesta en deformaciones elásticas del material: pequeñas deformaciones de las partículas y su estructura debido a esfuerzos de compresión y corte (Figura 4). La porción restante de energía se disipa al generar distorsiones cortantes al interior del material, correspondiente a deformaciones plásticas: deslizamientos y rodaduras de las partículas (Figura 5)

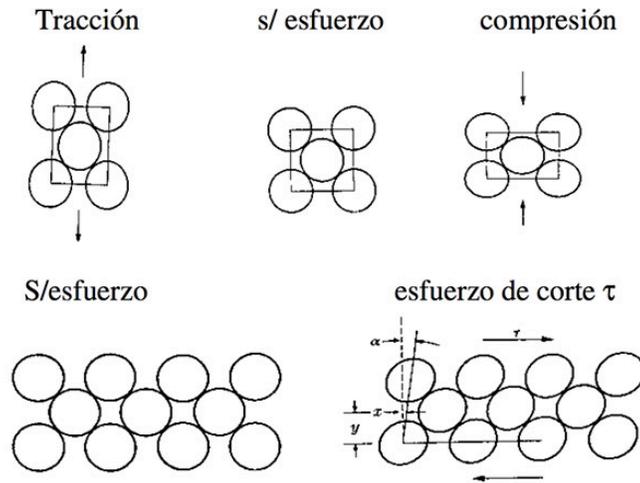


Figura 4: mecanismos de deformación elástica

Ambos fenómenos son raramente independientes uno del otro. Las partículas idealizadas de la Figura 4 representan una estructura de suelo que se encuentra sometido a una fuerza externa. Si estas partículas fuesen lo suficientemente rígidas y no pudieran deslizar unas respecto de otras mantendrían el sistema estable luego de aplicada la carga, pero como efectivamente no lo son, sufren deformaciones que hacen colapsar la estructura del suelo (Figura 5). Las grandes deformaciones están ligadas a la capacidad de las partículas de sufrir distorsión. (Lambe & Whitman, 1989).

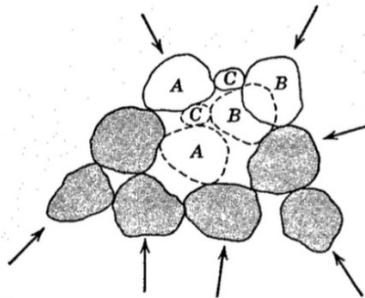


Figura 5: colapso de una agrupación inestable de partículas (Lambe & Whitman, 1989)

2.3. Resistencia al corte en materiales granulares

Es comúnmente aceptado que la teoría de la plasticidad usada en medios continuos puede también aplicarse en medios constituidos por partículas discretas tales como arenas y arcillas (Rowe, 1962). La resistencia al corte de enrocados, y suelos en general, se puede

definir de forma simple como el máximo esfuerzo de corte que el material logra soportar antes de producirse la falla. Es posible obtener una curva de resistencia al corte de un material en el plano de los círculos de Mohr, los cuales representan el estado tensional de un suelo en la falla. Si se realizan varios ensayos con distintas presiones de confinamiento σ_3 es posible construir una curva envolvente de falla (Figura 6c).

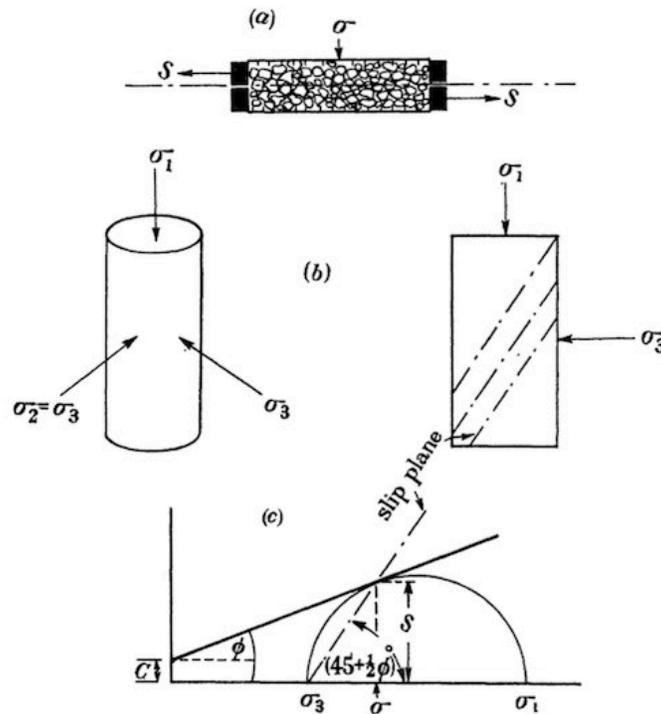


Figura 6: (a) supuesto de Coulomb y ensayo caja de corte (b) configuración de esfuerzos en test triaxial. (c) criterio de falla de Mohr-Coulomb (Rowe, 1962)

Según el criterio de falla de Mohr-Coulomb se considera una envolvente lineal de falla de la forma (Terzaghi 1943):

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \text{sen}(\phi) \quad (1)$$

Donde: c es la cohesión del material, σ_n el esfuerzo normal al que se somete la muestra y ϕ el ángulo de fricción interna que desarrolla el material. Para materiales granulares (suelos no cohesivos) la ecuación se puede escribir simplemente como:

$$\tau = \sigma_n \cdot \text{sen}(\phi) \quad (2)$$

En el caso de los materiales quebrados en minería de Block Caving, estos podrían estar sometidos a altas presiones, equivalentes a altura de columna de material mayores a 500 m (Hancock, 2013). Por lo tanto, criterios de fallas como el de Mohr-Coulomb no podrían ser aplicados directamente debido a que la envolvente de falla deja de ser lineal y comienza a mostrar una curvatura. La razón de esta curvatura ha sido asociada principalmente al fenómeno de rotura de partículas (Marsal, 1967; Leps, 1970).

2.3.1 Rotura de partículas.

Como ya se ha mencionado, la aplicación de una carga externa a una muestra de suelo, como por ejemplo en un ensayo triaxial CID (Consolidado isotrópicamente drenado), produce una serie de deformaciones en las partículas que conforman la muestra ensayada. Estas deformaciones provocan que las partículas comiencen a desgastarse, propiciando el colapso de la estructura que forman, por lo que mayores deformaciones son esperables que sucedan. Al aumentar las deformaciones, las partículas ya no solo sufrirán desgaste, sino que también es posible que se fracturen o fragmenten en varios trozos. El fenómeno de la rotura de partículas modifica significativamente la distribución de tamaños al interior de la probeta, y con ello el comportamiento mecánico del suelo.

Chik (2014) identifica dos tipos principales de rotura de partículas, tal como se indica en la Figura 7. (a) Fragmentación periférica o abrasión: donde las partículas al ser sometidas a deformaciones comienzan a redondearse al perder sus esquinas afiladas por contacto con otras partículas, generando material fino. (b) Fragmentación total: en este caso las partículas experimentan una rotura casi total, desintegrándose completamente al aplicarse una carga externa.

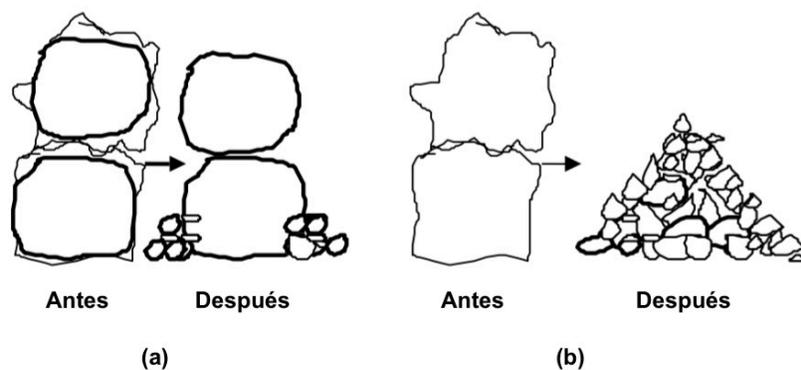


Figura 7: tipos de fragmentación. (a) fragmentación periférica (abrasión), (b) fragmentación total. Adaptado de Chik (2004)

En la zona de deformación plástica los autores señalan que se da lugar otro tipo de rotura, denominado *splitting* que supone una o más fracturas de la partícula sin que esta se fragmente por completo (McDowell et al. 1996)

2.4. Factores que afectan la resistencia al corte

Existen varios factores que intervienen en la resistencia al corte en suelos (Lee & Farhoomand 1967; Hardin 1985; Lo & Roy 1973). A continuación se tratarán los más relevantes que podrían ser asociados a materiales quebrados.

2.4.1 Forma de las partículas

Características como la angulosidad, esfericidad y rugosidad de las partículas que conforman un suelo cumplen un importante rol en su resistencia al corte. Una forma de clasificar las partículas de acuerdo a su forma es propuesta por Powers (1953). En esta clasificación, se ordenan de acuerdo a su esfericidad y grado de redondeamiento (Figura 8)

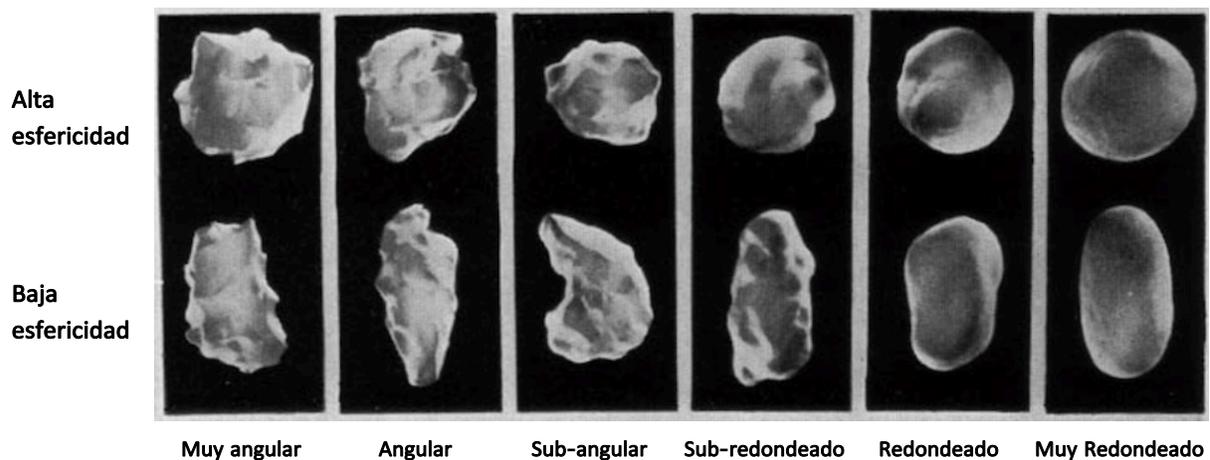


Figura 8: Escala de redondez de partículas. Adaptado de Powers (1953)

Mientras más angulosas sean las partículas sometidas a esfuerzos de compresión y/o corte, mayor es la rotura que se genera. Por ejemplo, esto se puede observar en los resultados de ensayos obtenidos por Lee & Farhoomand (1967), en arenas gruesas (Figura 9). Dicho comportamiento se explica debido a la concentración de esfuerzos en zonas estrechas de las partículas, posibilitando el fracturamiento (Lade et al. 1996). Por ejemplo este factor es importante en materiales quebrados ya que la forma que poseen estos no sólo es angular sino además la forma de estos bloques posibilita una cantidad menor de caras libres, lo cual

no es totalmente comparable con enrocados o materiales granulares gruesos, cuyas partículas han estado afectas a procesos de transporte, y por lo tanto, de abrasión y generación de redondez y mayor cantidad de caras libres en las partículas.

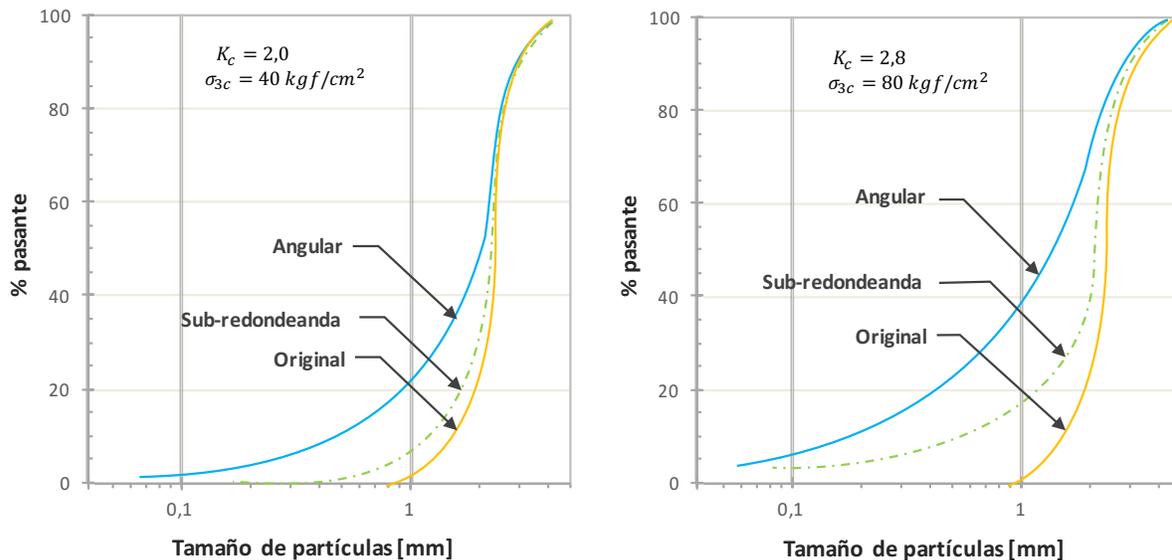


Figura 9: efecto de la forma de la partícula (Lee & Farhoomand 1967)

Koerner (1970) por su parte concluye que un incremento de la angulosidad de las partículas se traduce en un incremento del ángulo de fricción interna de suelos no cohesivos cuando son sometidos a pruebas a bajas presiones de confinamiento. De forma similar, Morris (1956) establece que la resistencia al corte de los suelos se ve favorecida por la rugosidad de las partículas que lo conforman, pero solo hasta cierto punto. A partir de este óptimo, cualquier aumento de la rugosidad implica una disminución de la resistencia del suelo.

2.4.2 Granulometría inicial

Respecto a la influencia de la granulometría en la rotura de partículas, Lee & Farhoomand (1967), luego de efectuar ensayos triaxiales sobre gravas de granito triturado, concluyen que suelos con granulometrías iniciales uniformes sufren mayor rotura de partículas en comparación con granulometrías mejor graduadas (Figura 10). Esto ha sido explicado desde un punto de vista de número de contactos de partículas (n), ya que granulometrías uniformes poseen menor n , lo cual posibilita una mayor concentración de tensiones y por lo tanto, mayor rotura de partículas. Respecto a materiales quebrados, estos poseen

granulometrías muy uniformes con un Coeficiente de Curvatura C_u que podrían ser de 2,86 (Castro 2006), y por lo tanto este factor sería significativo en estos materiales.

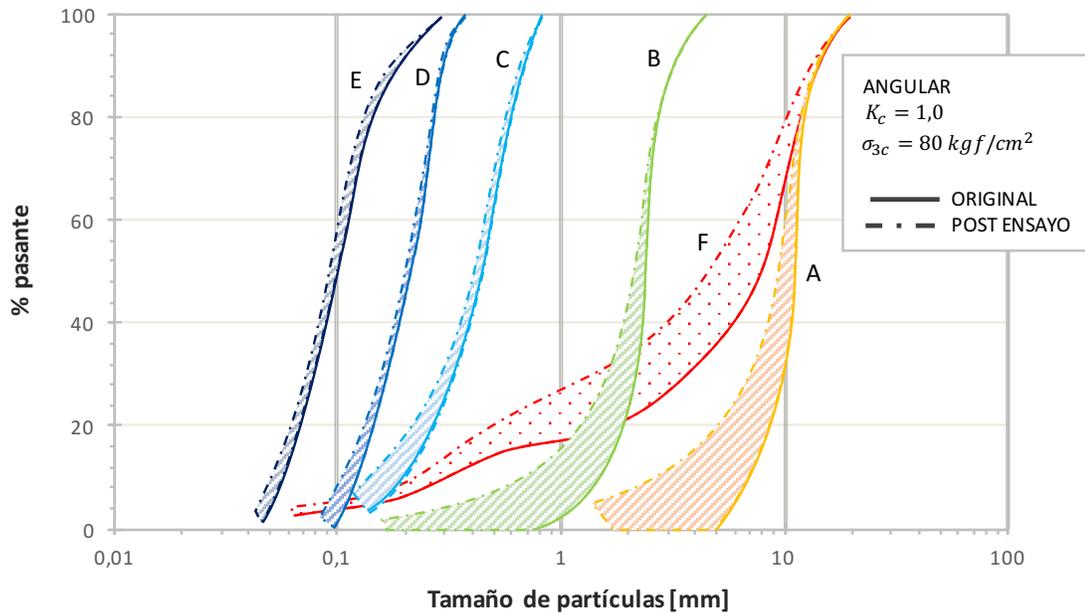


Figura 10: efecto de la granulometría inicial (Lee & Farhoomand 1967)

Tabla 1: características de la grava granítica chancada utilizada por Lee & Farhoomand (1967)

Suelo		Tamaño de grano (Tamiz)
Designación	Nombre	
A	Grava	3/4" - #4
B	Arena gruesa	#4 - #20
C	Arena media	#20 - #50
D	Arena fina	#40 - #100
E	Arena muy fina	< #100
F	Grava arenosa bien graduada	< 3/4"

2.4.3 Dureza de las partículas

La dureza de las partículas de los materiales quebrados también jugaría un rol importante en la fragmentación. Se espera que a mayor dureza, menor sea la cantidad de rotura estimada. Lo & Roy (1973) realizaron pruebas triaxiales CID en tres arenas de distinta dureza. En orden descendente de dureza, las arenas correspondieron a: óxidos de aluminio, cuarzo y

caliza. En la Figura 11 se presentan los resultados de las pruebas realizadas en arenas de óxido de aluminio y caliza, donde se observa claramente que, partiendo de una misma granulometría inicial, la cantidad de rotura obtenida en los ensayos sobre caliza es mayor.

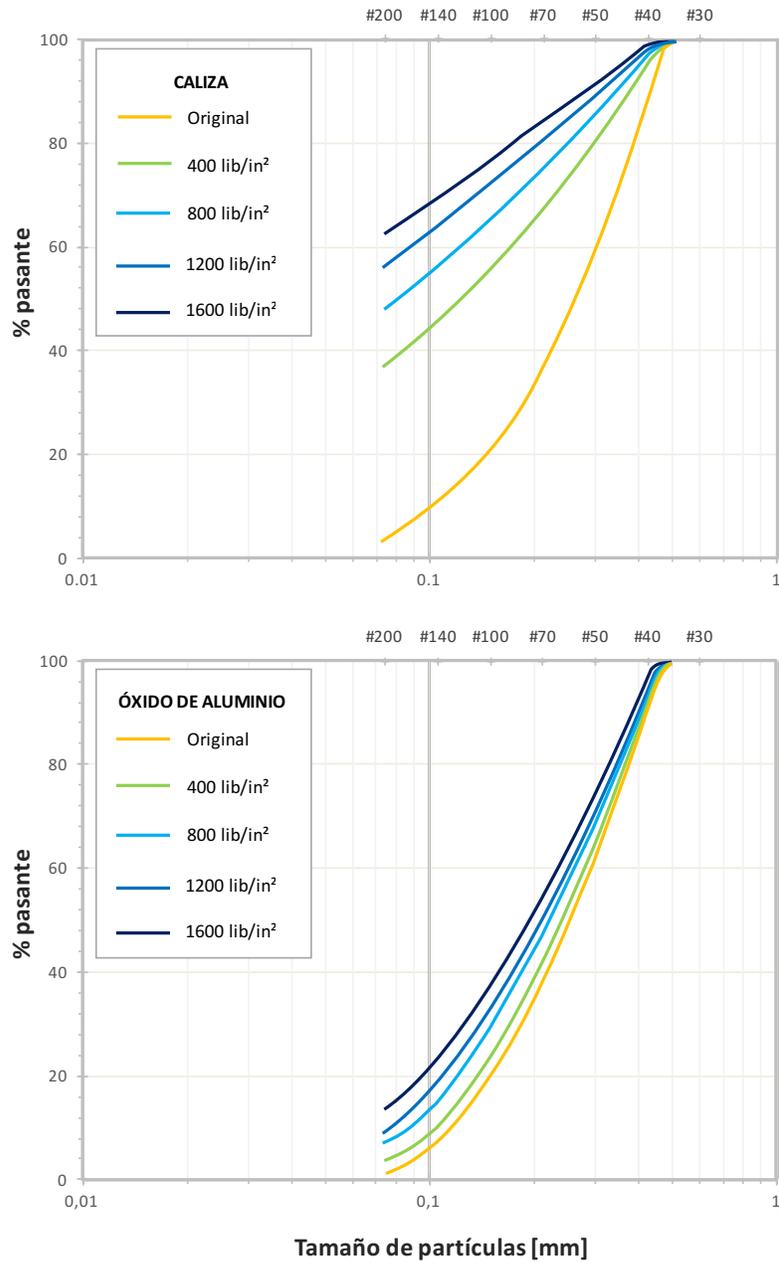


Figura 11: influencia de la dureza de las partículas en la cantidad de rotura. Adaptado de Lo & Roy (1973)

2.4.4 Presión de confinamiento

Se espera que una muestra sometida a mayores presiones de confinamiento, presente mayor cantidad de rotura. Por ejemplo, Lade et al. (1996) realiza varios ensayos de compresión triaxial empleando arenas densas de Cambria, a los cuales les aplica distintas compresiones de confinamiento (Figura 12) observando un aumento de la rotura de la partículas, el cual queda expresado en el ascenso de las curvas de distribución de tamaños post ensayo.

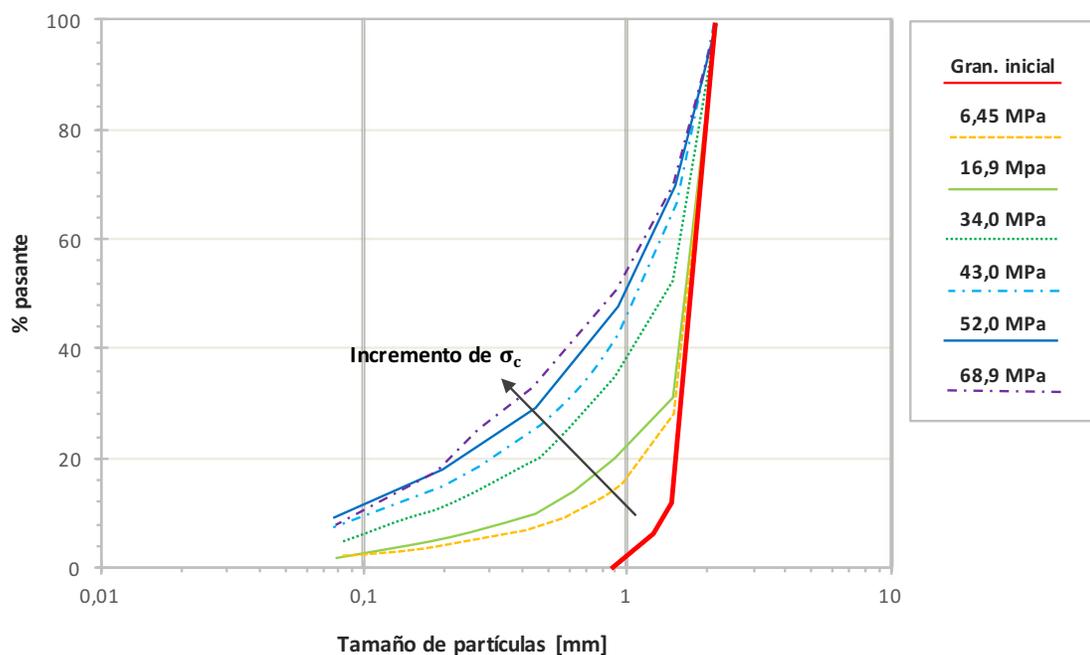


Figura 12: efecto del confinamiento (Lade et al. 1996)

2.5. Estimación de la rotura de partículas

La rotura de partículas que sufre un determinado espécimen ensayado puede ser cuantificada mediante factores que relacionan el nivel de esfuerzo aplicado con los cambios en las granulometrías pre y post ensayo. Marsal (1967) propone el factor de rotura de granos (B_g), el cual considera la diferencia (positiva) entre los porcentajes retenidos en cada tamiz para las curvas granulométricas de pre y post ensayo (Ecuaciones 3 y 4)

$$\Delta W_k = W_{ki} + W_{kf} \quad (3)$$

$$B_g = \sum \Delta W_{k \text{ positivos}} \quad (4)$$

El factor de rotura B_g corresponde a una metodología ampliamente usada en ingeniería geotécnica, pero presenta algunas falencias con respecto a otros factores. Por ejemplo, al cuantificar la rotura de partículas de una muestra con granulometría inicial uniforme, el que luego se ve sometido a presiones altas, produce una gran cantidad de rotura que B_g no considerará en la suma final, al ser un parámetro sujeto a las limitaciones que impone la granulometría inicial (Figura 13).

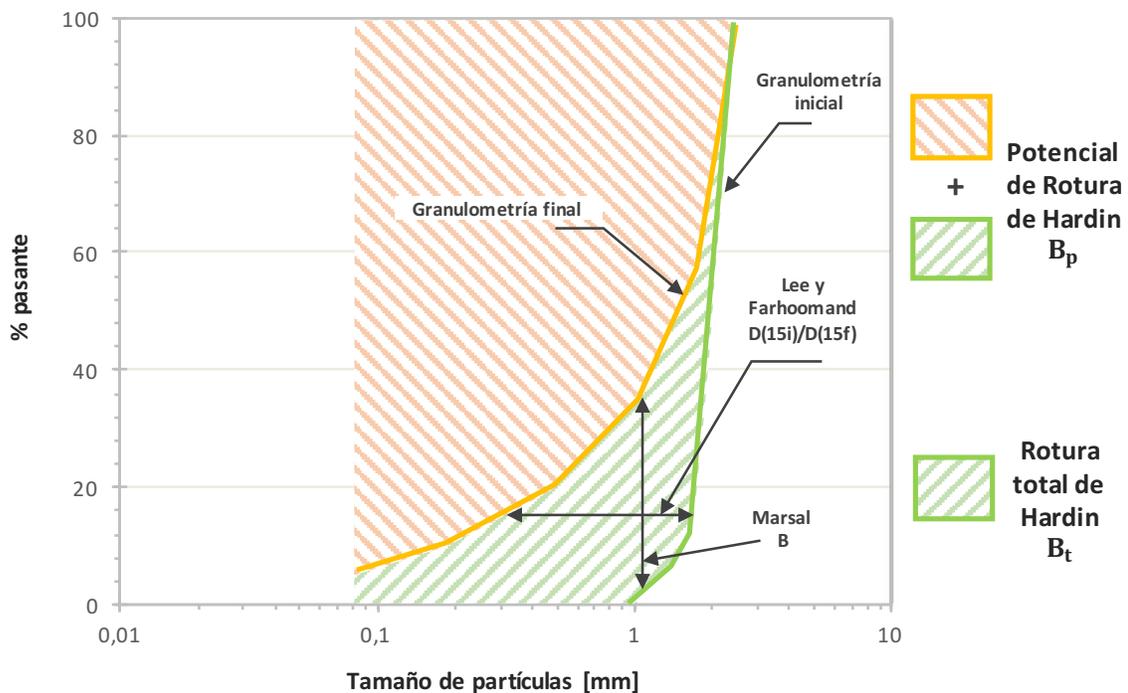


Figura 13: esquema de cuantificadores de rotura (Lade et al. 1996)

Por otro lado, Hardin (1985) define el potencial de rotura (B_p) como toda el área contenida entre la curva inicial y la malla 0,074mm (Figura 14). Luego define la rotura total (B_t) como el

área ubicada entre la curva inicial y la final. Finalmente calcula el parámetro relativo de rotura (B_r) de la forma:

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

La metodología propuesta por Hardin (1985) resulta ser más acertada al momento de cuantificar la rotura, al considerar la rotura en un rango más amplio de tamaños.

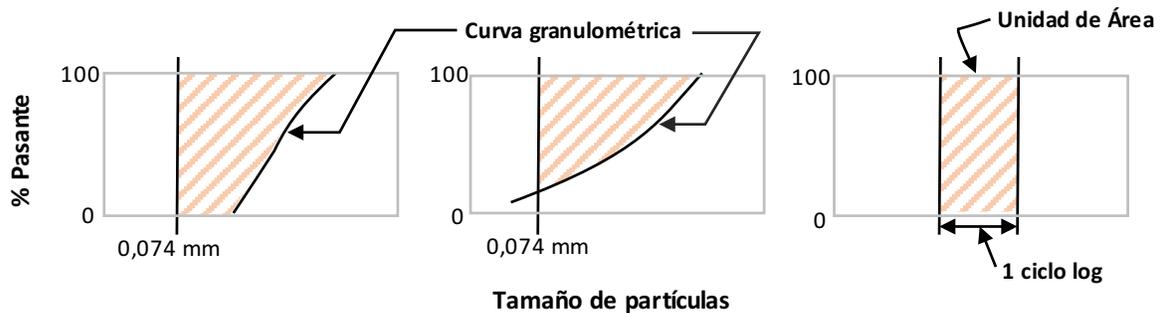


Figura 14: esquema de cálculo del parámetro B_r de Hardin (1985)

2.6. Método de gradación paralela o curvas homotéticas

Dado el gran tamaño de partículas que puede encontrarse en las columnas de material quebrado, es sumamente complejo realizar ensayos que consideren un tamaño de muestras ajustado a la realidad. Las probetas más grandes (180cm de altura, 100cm de diámetro) permiten ensayar partículas de hasta 7" (17.5 cm), mientras que en las columnas se pueden encontrar partículas que superan largamente el metro de diámetro.

Por lo tanto, definir una metodología que permita escalar el fenómeno en estudio, sin afectar las variables de estudio es esencial. En esta memoria se empleará el método de gradación paralela o curvas homotéticas.

Este método fue aplicado en un principio por Lowe (1964), y ha sido largamente empleado por diversos autores (Marachi et al. 1972; Thiers y Donovan 1981; Gesche 2002; De la Hoz 2007). Consiste en escalar la curva granulométrica original a una curva de menor tamaño, conservando el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de gradación (C_c). Características intrínsecas del material tales como la dureza, forma y peso específico del

material tienen que ser mantenidas hacia la muestra escalada. Por ejemplo, en términos de resistencia al corte, realizando ensayos triaxiales CID con 3 materiales de presas de enrocados, se ha observado que el ángulo de fricción disminuye al aumentar el tamaño de partículas (Marachi et al. 1972; Thiers y Donovan 1981).

Sin embargo, el problema principal del escalamiento entre un material quebrado a muestras más pequeñas es la significativa reducción de resistencia de partículas tales como gravas hacia bloques de más de 1m de diámetro. Aunque el efecto del tamaño en la resistencia y fragmentación en rocas ha sido destacado por diferentes autores como por ejemplo Hoek & Brown (1980) y Yoshinaka et al. (2008), este efecto de escala depende directamente del tipo de roca, siendo las rocas duras las más afectas a esta caída de resistencia y mayor fragmentación, mientras que rocas sedimentarias por ejemplo no dependen de manera importante en este efecto de escala. Así, nuevas investigaciones relacionadas a este tema son altamente recomendadas.

3. Materiales ensayados

Para los ensayos triaxiales de grandes dimensiones desarrollados en esta memoria se utilizaron materiales de tronadura provenientes del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS) perteneciente a la división Chuquicamata de Codelco. Por este motivo es correspondiente comentar algunas generalidades del estado actual del yacimiento y la necesidad de iniciar su transición a Block Caving.

La mina de Chuquicamata se ubica 15 km al norte de la ciudad de Calama, Chile. A lo largo de sus casi 100 años de operación ha empleado el método de extracción de cielo abierto o rajo, convirtiéndose en una de las minas más grandes del mundo de este tipo, con aproximadamente 4.5 km de largo, 2.3 km de ancho y 1 km de profundidad. Esta característica se traduce en grandes costos asociados al transporte de material: actualmente un camión debe transitar cerca de 11 km entre el fondo del rajo y la superficie. A esto hay que agregar que la relación de material estéril sobre mineral aumenta sostenidamente: si en 2004 se obtenían 2.4 toneladas de lastre por 1 tonelada de mineral, en 2018 se obtendrán 4 toneladas de lastre por 1 tonelada de mineral. (Codelco, 2009b). Por estos motivos no es rentable económicamente continuar con el actual método de extracción, a pesar de que aún existe una gran cantidad de mineral por debajo del actual rajo, los cuales se estiman en 1700 millones de toneladas de Cobre y Molibdeno.

El proyecto de mina subterránea busca aprovechar estos recursos, que equivalen a cerca del 60% de lo explotado por Codelco en Chuquicamata durante los últimos 90 años. El método escogido por la minera para continuar las faenas en el yacimiento es el de Block Caving, posibilitando concentrar actividades similares en áreas limitadas, favoreciendo la flexibilidad para adaptar la operación frente a contingencias como colapsos u otros y permitiendo la incorporación de cambios de diseño de acuerdo a los avances tecnológicos (Codelco, 2009b).

El diseño de la mina subterránea contempla 4 niveles de producción, los cuales son caracterizados por las cotas de los respectivos niveles de hundimiento, que corresponden a las elevaciones 1.841 m, 1.625 m, 1.409 m y 1.193 m. La altura promedio de los macro bloques se estima en 216 m, siendo los del nivel de explotación superior los que alcanzan las mayores alturas de columna media (entre 100 m y 650 m) debido a la topografía del rajo actual (Codelco, 2009b)

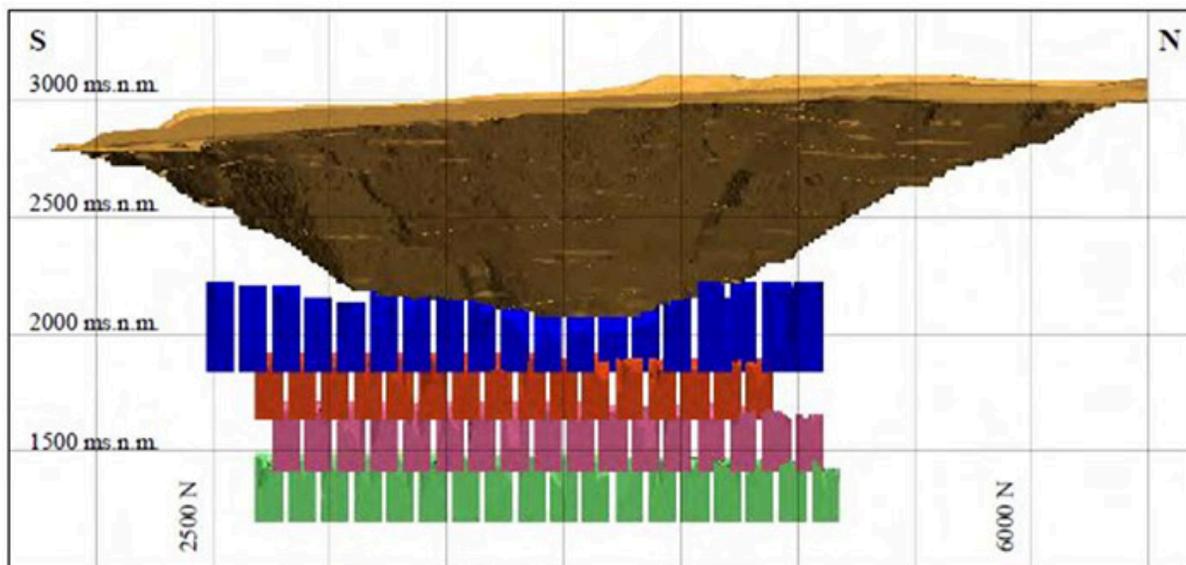


Figura 15: esquema de niveles de mina y Macro Bloques PMCHS (Codelco, 2009a)

De las 12 unidades geotécnicas básicas (UGTB) que Codelco identifica como existentes bajo el subsuelo de la mina, en esta memoria se emplearon solo 2: unidades PES (Pórfido Este Sericítico) y unidad PEK (Pórfido Este Potásico). La razón del uso de estos materiales es que debido a su ubicación, son de fácil acceso dado el estado de avance de la tunelería del proyecto de mina subterránea. (Codelco, 2009a)

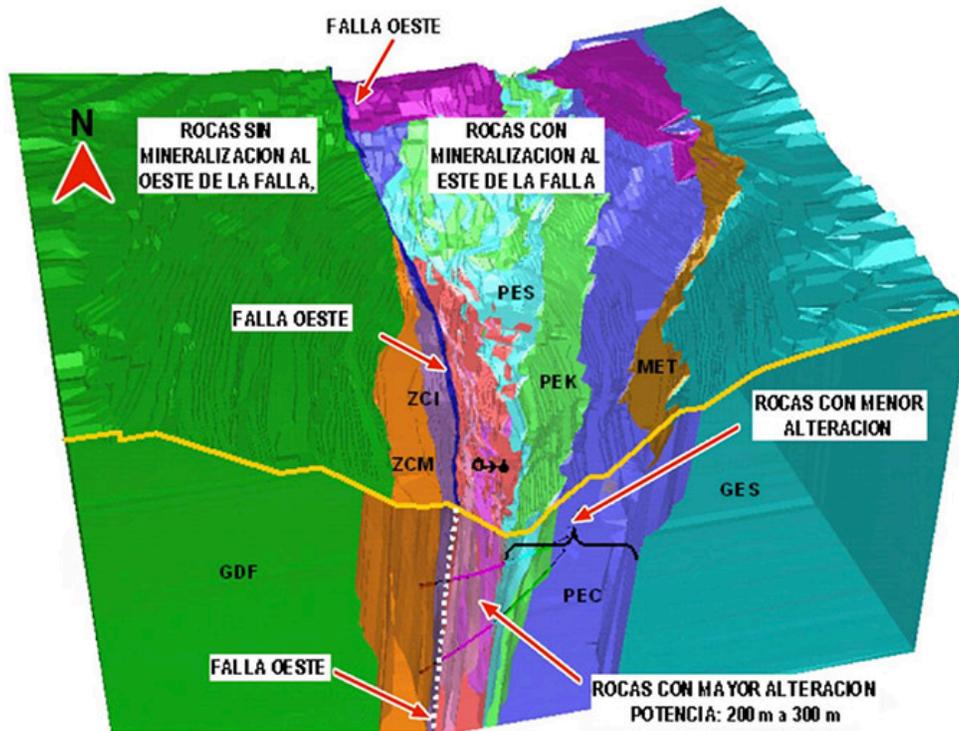


Figura 16: esquema de ubicación de unidades geotécnicas, Chuquicamata (Codelco, 2009b)

En las siguientes páginas se describirán las muestras PES y PEK utilizadas en los ensayos de esta memoria. De cada una de estas unidades se cuenta con 2 envíos. El envío N°1 data del año 2013, siendo usado por D'Espessailles (2014) en su estudio de rotura de materiales quebrados en ensayos de corte simple. En la presente memoria, las muestras correspondientes a este envío serán sometidas a una prueba triaxial con la finalidad de verificar la cantidad de rotura generada en este aparato y comparar con la obtenida en el equipo de corte simple por D'Espessailles (2014).

Para los ensayos de grandes dimensiones se utilizaron muestras PES y PEK provenientes del envío N°2, que data del año 2015.

3.1. PES (Pórfido Este Sericítico)

Material que resulta de la imposición de la alteración sericítica-potásica a la unidad litológica Pórfido Este. Corresponde a una roca de granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita (D'Espessailles 2014).

Luego de realizar un total 832 ensayos de carga puntual sobre este material, se obtiene una resistencia a la compresión uniaxial de 97 MPa, la cual se considera como resistente (Codelco, 2009a). Además, se estima una gravedad específica (ASTM D127-12) del material en 2.67 (Urbina 2015).

3.1.1 Material PES (2014)

D'Espessailles (2014) establece que una muestra de material PES (Figura 10) se compone mineralógicamente por un 35% de cuarzo, 25% de plagioclasas, 28% de feldespato potásico y en menor grado molibdenita, entre otros. Presenta alteración cuarzo-sericita y limonita. La sericita afecta a un 15% de las plagioclasas.

Este material contiene un 25% de partículas débiles las cuales provienen de una zona afectada por una falla y no de algún tipo de meteorización de la muestra PES. Estas partículas débiles presentan alteración argílica y epidota-clorita débil además de la alteración cuarzo-sericita. El material débil se denominó muestra Frágil, y se determinó que está compuesta por un 20% de cuarzo, 10% de plagioclasas, 55% de feldespato potásico y 12% de biotita. La alteración de sericita afecta al 8% de las plagioclasas y 40% de los Feldespatos (D'Espessailles 2014).

Se someten las muestras a pruebas de compresión simple, tanto la unidad PES total y una selección de partículas débiles denominadas material Frágil (Figura 17). Los resultados se presentan en un gráfico de histograma. (Figura 18)

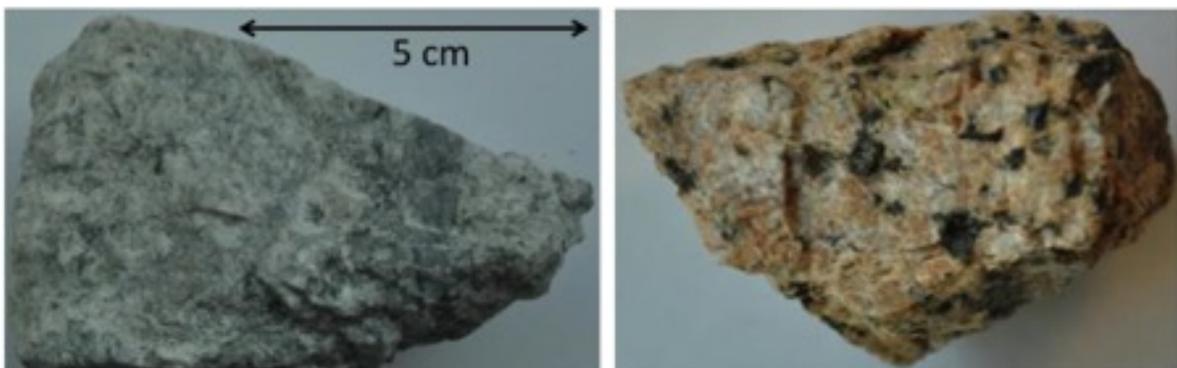


Figura 17: muestra de unidad PES (izquierda) y muestra Frágil (derecha)

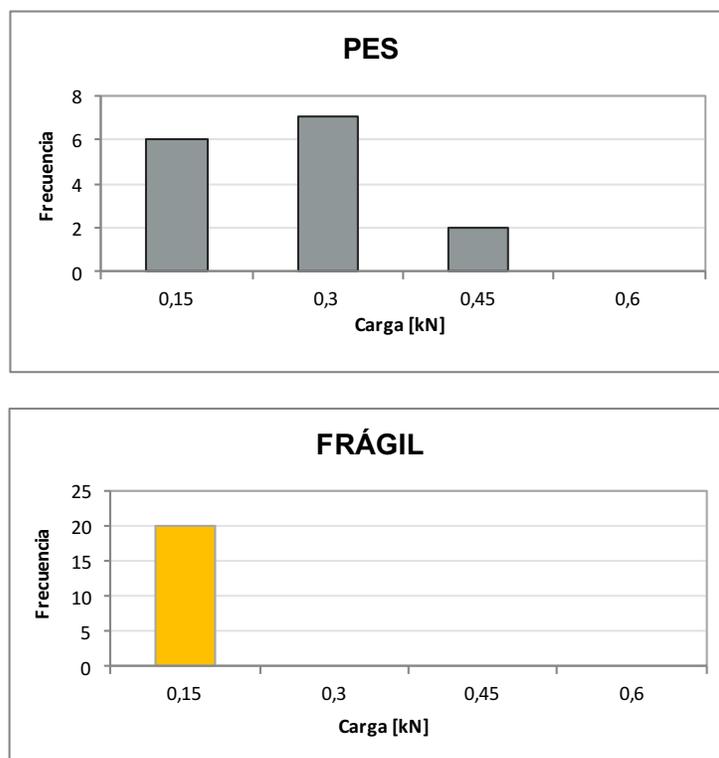


Figura 18: histograma de ensayos de compresión simple sobre material PES y muestra FRÁGIL (D'Espessailles 2014)

Tabla 2: resumen de pruebas de compresión simple sobre material PES y muestra Frágil

Resistencia [kN]	PES	FRÁGIL
Promedio	0,18	0,06
Des. Estándar	0,11	0,04
Mediana	0,18	0,05

3.1.2 Material PES (2015)

Mediante inspección visual, Urrutia (2015) identifica cuatro unidades litológicas principales que componen este material: 40% de Cuarzo (de origen secundario); 20% de Sericita; 15% de Arcilla como material de alteración; 25% de Masa Fundamental, presente en 2 variedades; 5% de minerales como Feldespatos, Plagioclasas, Calcopirita y Bornita. Cada una de estas variedades litológicas fueron individualizadas (Figura 19) y se les aplicaron pruebas de compresión simple, cuyos resultados se presentan en la Figura 20 y Figura 21.

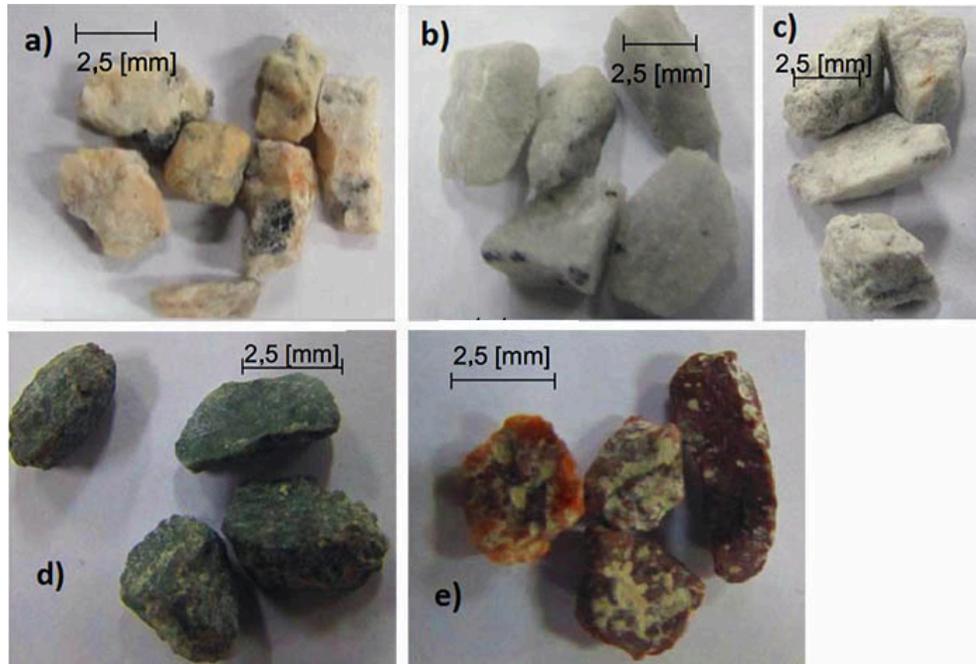


Figura 19: muestra litológica. a) Arcilla de Alteración, b) Cuarzo, c) Sericita, d) Masa Fundamental 1, e) Masa Fundamental 2 (Urrutia 2015)

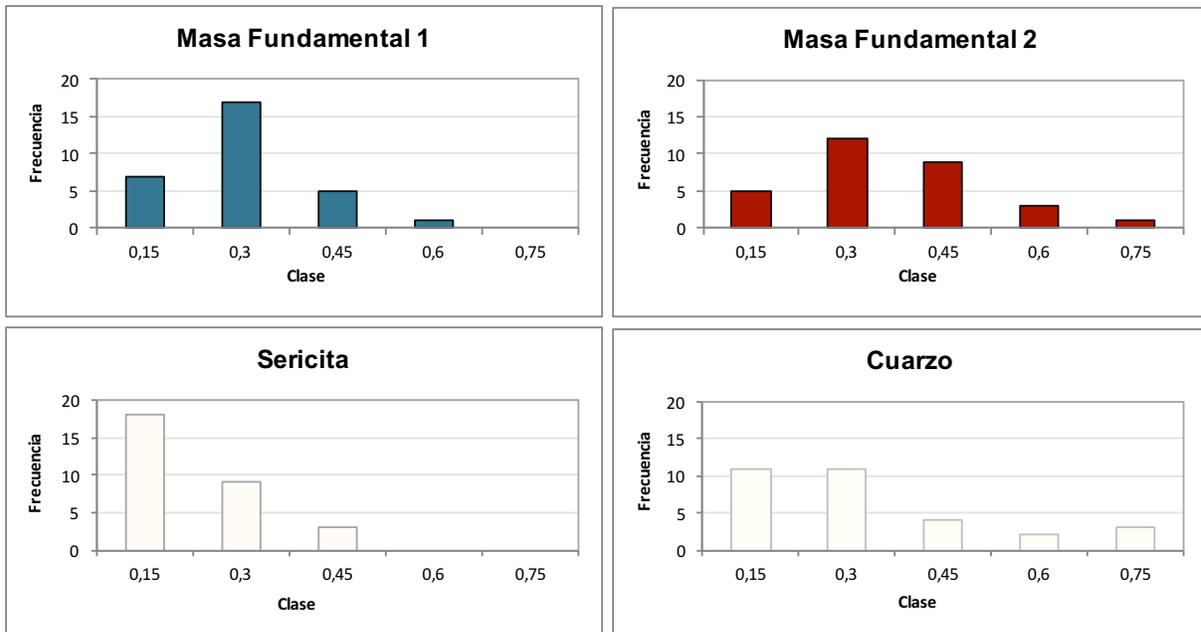


Figura 20: histograma de ensayos de compresión simple a unidades de la muestra PES (Urrutia 2015)

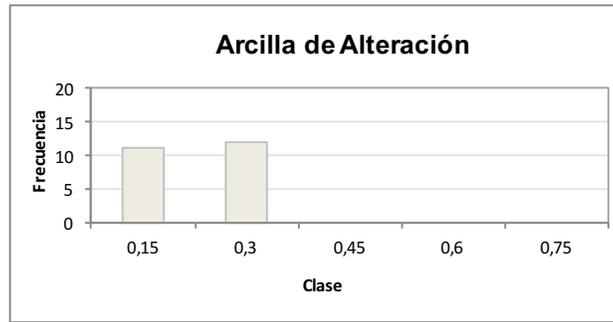


Figura 21: histograma de ensayos de compresión simple a unidades de la muestra PES. Continuación (Urrutia 2015)

Tabla 3: resumen de ensayos de compresión simple a unidades de muestra PES (Urrutia 2015)

Resistencia [kN]	Masa Fundamental 1	Masa Fundamental 2	Sericita	Cuarzo	Arcilla de Alteración
Promedio	0,23	0,28	0,14	0,25	0,13
Des. Estándar	0,11	0,13	0,10	0,20	0,08
Mediana	0,22	0,28	0,12	0,19	0,16

3.2. PEK (Pórfido Este Potásico)

Material perteneciente a la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico. Es el resultado de una alteración potásica de la unidad litológica Pórfido Este; rocas entre granodiorita y monzodiorita cuarcífera de biotita, a la cual se le introducen feldespatos potásicos (D'Espessailles 2014).

Codelco (2009a), luego de realizar un total de 1433 ensayos de carga puntual sobre este material, una resistencia a la compresión uniaxial de 116 MPa, la cual se considera como muy resistente. La gravedad específica (ASTM D127-12.) del material se estima en 2.64 (Urbina 2015)

3.2.1 Material PEK (2014)

D'Espessailles (2014) determina que una muestra de material PEK (Figura 22) se compone mineralógicamente por un 35% de cuarzo, 45% de plagioclasas, 12% de feldespato potásico y en menor grado molibdenita, entre otros. Además presenta alteración cuarzo-sericita y limonita, con la sericita afectando a un 35% de las plagioclasas. Los resultados de ensayos de compresión simple sobre muestras de este material se presentan en la Figura 23.



Figura 22: muestra de material PEK correspondiente al envío N°1 (2014) (D'Espessailles 2014)

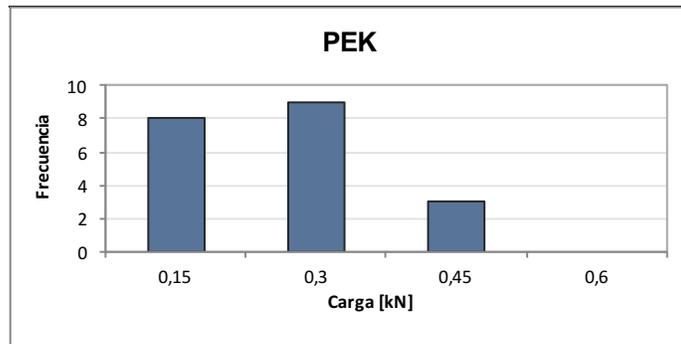


Figura 23: histograma de ensayos de compresión simple sobre muestra PEK (2014) (D'Espessailles 2014)

Tabla 4: resumen de pruebas de compresión simple sobre muestra PEK (2014) (D'Espessailles 2014)

Resistencia [kN]	PEK
Promedio	0,18
Des. Estándar	0,11
Mediana	0,15

3.2.2 Material PEK (2015)

Urrutia (2015) identifica unidades litológicas similares a las encontradas en el material PES (2015), la gran diferencia es que la cantidad de Cuarzo es bastante menor, siendo menor al 5%. De esta forma el material PES está compuesto por: 40% de Sericita; 30% de Arcilla de Alteración; 25% de Masa Fundamental; 5% de Cuarzo.

En la Figura 24 se presentan los resultados de las pruebas de compresión simple ejecutadas sobre este material, en las cuales se desestimó realizarlas sobre el Cuarzo debido a su poca presencia es la muestra.

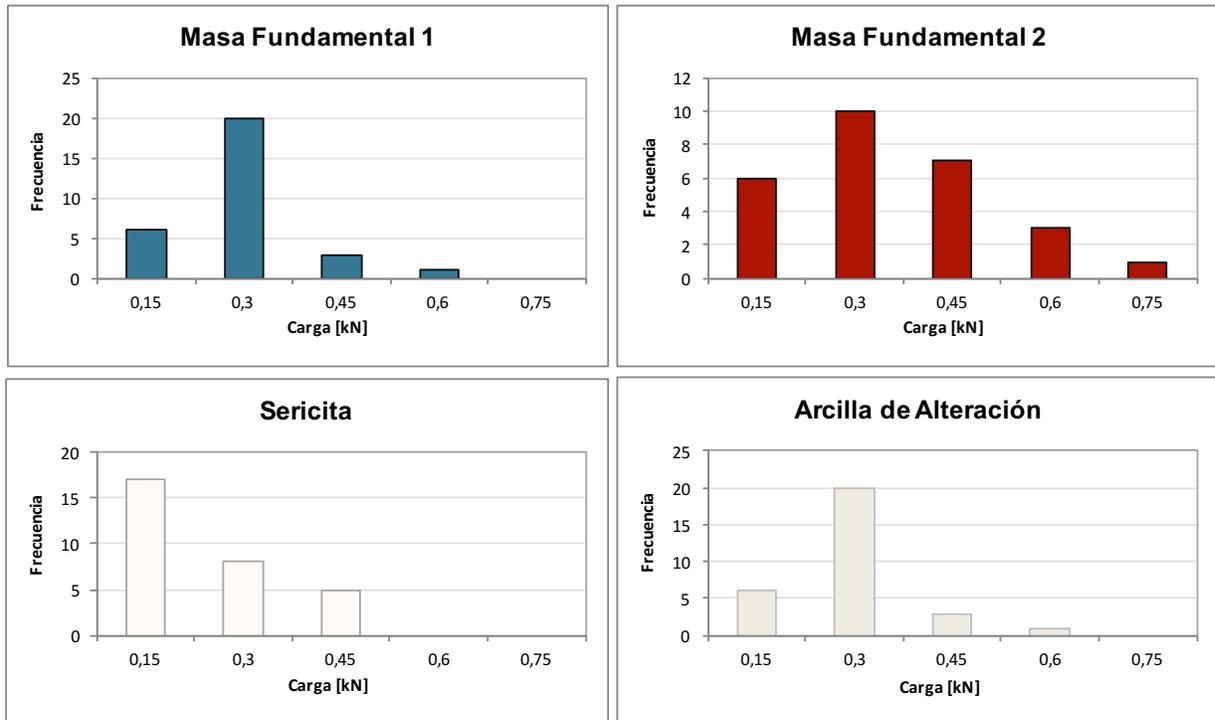


Figura 24: histograma de compresión simple sobre unidades litológica, muestra PEK (Urrutia 2015)

Tabla 5: resumen de resultados de compresión simple sobre muestra PEK (Urrutia 2015)

Resistencia [kN]	Masa Fundamental 1	Masa Fundamental 2	Sericita	Arcilla de Alteración
Promedio	0,25	0,17	0,32	0,21
Des. Estándar	0,18	0,12	0,21	0,09
Mediana	0,24	0,15	0,27	0,19

4. Ensayos triaxiales de grandes dimensiones

De forma de estudiar en detalle el fenómeno de la rotura de partícula y los mecanismos que la gobiernan, esta memoria considera el análisis de los resultados de 4 ensayos triaxiales de grandes dimensiones sobre el material de marina previamente descrito. De este grupo de ensayos se obtuvieron 3 resultados exitosos, resultando uno de los especímenes defectuoso.

4.1. Descripción del equipo y del ensayo

El Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM) cuenta dentro de sus instalaciones con un equipo triaxial de gran tamaño, el cual responde a la necesidad de estudiar el comportamiento mecánico de materiales granulares gruesos. Fue construido en el año 2001, siendo capaz de ensayar probetas de hasta 180 cm de altura y 100 cm de diámetro. A continuación se detallan las características principales del equipo triaxial de gran escala (Verdugo et al. 2007).

- Ensayos de probetas cilíndricas de 60 y 100 cm de diámetro y alturas de 120 y 180 cm, respectivamente. Por tanto, permite ensayar partículas de hasta 7" de diámetro (ASTM D-4767).
- Alcanza una presión efectiva de confinamiento máxima de 30 kg/cm^2 .
- Carga axial máxima de trabajo de 2000 ton. Principales componentes: marco de reacción, cámara de presión, sistema de aplicación de carga axial y confinamiento y sistema de medición de parámetros del ensayo.
- El marco de reacción se compone de 2 bases cuadradas de acero, los que constituyen los elementos de reacción. El traspaso de fuerza lo ejercen 4 columnas de acero cilíndrico macizo de 200 mm de diámetro y 6000 mm de altura.
- La cámara de presión triaxial se compone de un cilindro metálico y una tapa que actúa como sello y pistón de carga axial.
- La carga axial es aplicada mediante gatos hidráulicos de doble acción, los cuales tienen una capacidad 500 ton y una carrera de 40 cm. Los 4 gatos permiten aplicar hasta 2000 ton de carga axial.

- La presión de confinamiento es ejercida mediante la presión de agua controlada por una bomba de impulsión hidráulica de pistones triple de alta presión, la cual está equipada con manómetro y una válvula reguladora de presión.
- La medición de variables de cada ensayo se efectúa mediante sensores electrónicos conectados a un computador que almacena la información. La carga axial se mide con celdas de carga de 500 ton de capacidad, las cuales se ubican directamente sobre la probeta, lo cual evita correcciones por roce de pistón. La deformación axial se mide mediante un sistema compuesto por tres LVDT.

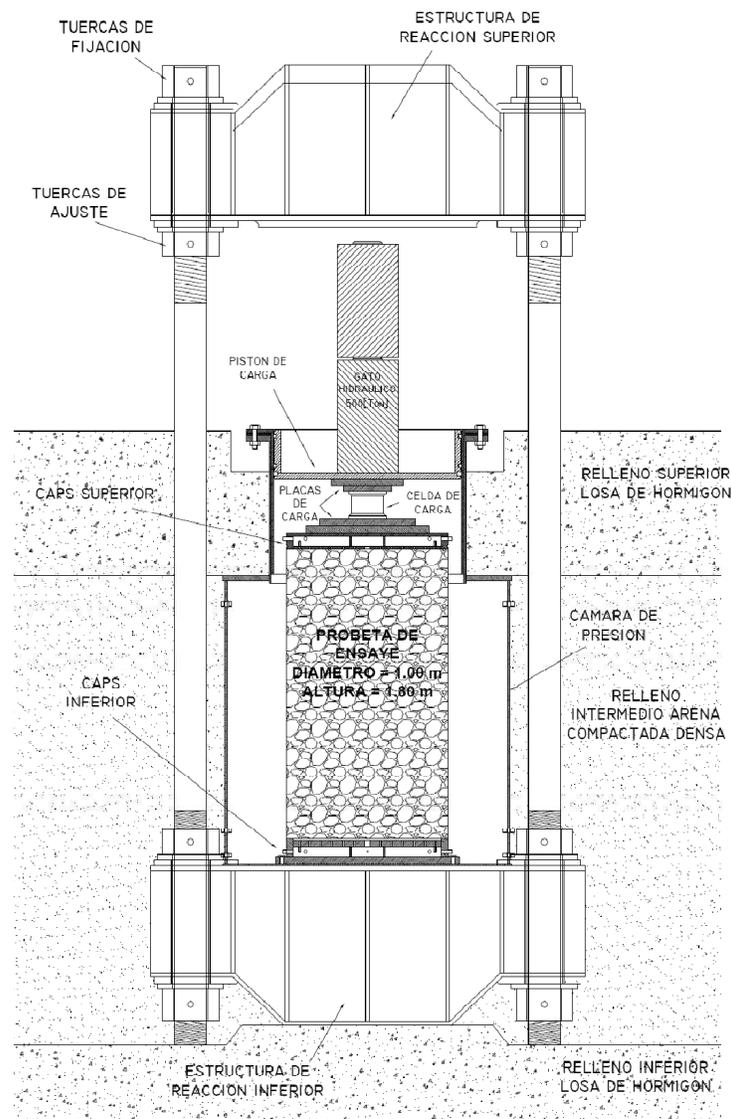


Figura 25: aparato triaxial de grandes dimensiones (Verdugo et al. 2007)

4.2. Metodología de armado de probetas triaxiales de grandes dimensiones para ensayos con granulometrías uniformes



Figura 26: material de volteo PES correspondiente al envío N°2

Conocida la densidad de confección de cada probeta, la cual fue estimada en $1,6 \text{ ton/m}^3$, se procedió a tamizar el material para cada uno de los test. Se emplearon mallas entre las 6" (150 mm de apertura) y la #4 (4,75 mm de apertura). Un punto a destacar de la etapa de tamizado es que a medida que el material se iba separando en tamaños este se iba pintando de acuerdo a un color. Luego, cada banda (tamaños de partículas entre 6"-5", 4"-3", etc.) poseía un color determinado. El principal motivo era poder generar post-granulometrías por tamaño, pero en la etapa posterior al ensayo cumplió un papel muy importante en la inspección visual de rotura de partículas. Lo referente a granulometría inicial de cada probeta, y los colores utilizados se comenta en detalle en los siguientes subcapítulos.

4.2.1 Criterios considerados para la protección de la geomembrana

Para evitar roturas de la geomembrana por punzonamiento estas deben ser protegidas mediante la colocación de geotextiles que estén en contacto directo con las partículas del material. Para que la protección sea efectiva, otra geomembrana es añadida a la probeta, colocándose una segunda capa de geotextil entre medio (Figura 27).

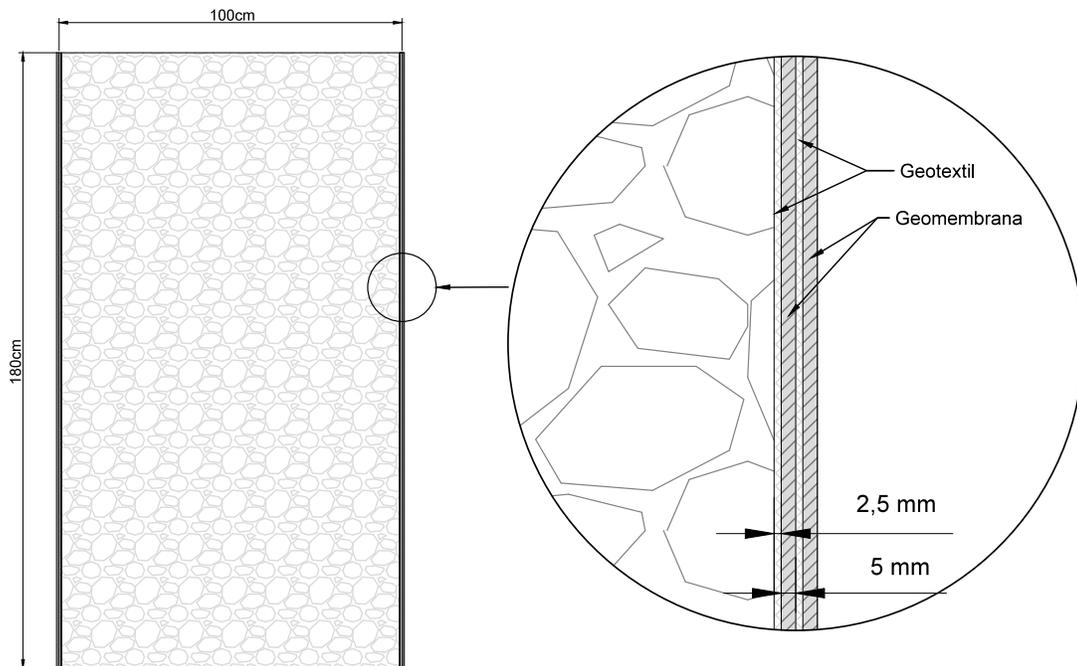


Figura 27: esquema geomembrana-geotextil para un espécimen triaxial

Los geotextiles que se encuentran en contacto directo con el material son recortados en segmentos de aproximadamente 25 cm de ancho y 60 cm de largo, de forma de evitar que estos ejercieran algún tipo de trabajo mecánico al interior de la probeta. Tal como se muestra en la Figura 28, los geotextiles son pegados a la geomembrana con cinta adhesiva.



Figura 28: colocación de geotextil

Una de las problemáticas asociadas a la confección de las probetas tuvo que ver con las características del material y el bajo coeficiente de uniformidad (C_u) que las granulometrías iniciales presentaban. En lo referente a las características del material se apreciaba que las partículas eran bastante angulosas (Figura 29) las cuales en contacto con la geomembrana podían generar un riesgo de rotura por punzonamiento. Esto se vuelve aún más peligroso considerando el gran tamaño de las muestras y el bajo C_u (valores entre 1 y 2) con que fueron confeccionadas las granulometrías iniciales.



Figura 29: forma de las partículas

Tal como se observa en la Figura 30, en el armado de la probeta N°1, compuesta de material proveniente de la unidad PES, con dimensiones 100 cm de diámetro y 180 cm de altura, las partículas de gran tamaño de color ocre (tamaños entre 3" y 2") y de color blancas (tamaños entre 2" y 1") tienen contacto directo con los bordes de la probeta, generando grandes vacíos que eran rellenados por la geomembrana cuando se aplicó el vacío inicial.

La probeta N°1 PES 100x180 terminó fallando prematuramente en la etapa de aumento de presión de consolidación debido a una rotura de la geomembrana por punzonamiento. Lo interesante es que en el material rescatado de la probeta, podía observarse rotura de partículas producida en la etapa de consolidación anisotrópica, la cual en su mayoría

correspondía a lajamiento de los bordes de las partículas de gran tamaño, y pulverización de algunas partículas de menor tamaño. Mayores detalles son entregados en el capítulo de discusión de resultados.

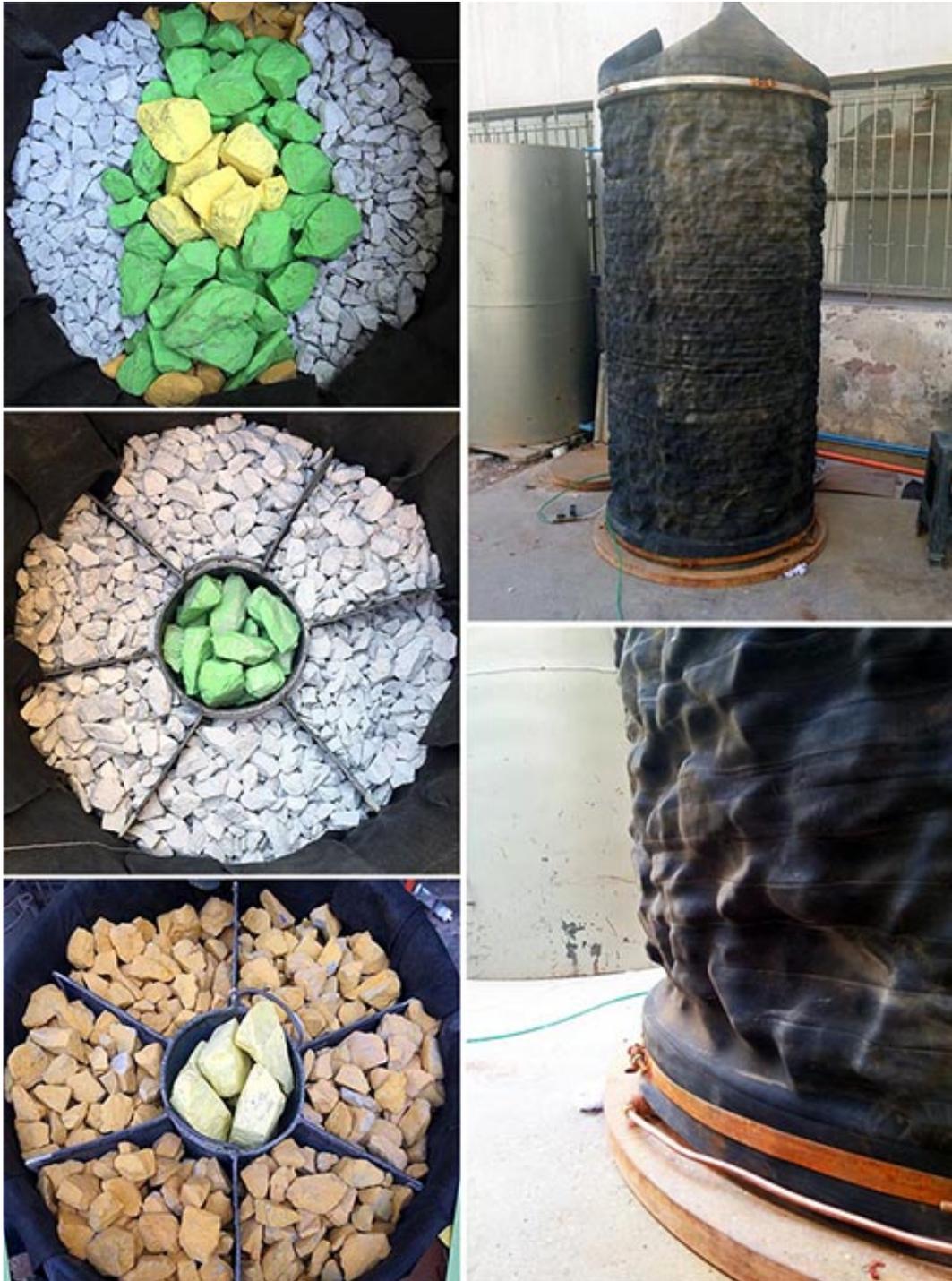


Figura 30: probeta PES (100 cm x 180 cm). Los moldes de acero son retirados a medida que se formaban las capas.

La solución acordada, de forma de evitar roturas de membrana en los ensayos posteriores, sería la de colocar una matriz protectora constituida de material más fino que protegiera la geomembrana del núcleo. En los ensayos N°2 y N°3, llevados a cabo en probetas de 60 cm de diámetro y 120 cm de altura, la matriz estuvo compuesta de dos zonas: una de material intermedio con partículas tamizadas entre las mallas 1" y #4, y una zona de material aún más fino con partículas de tamaño entre las mallas #4 y #40.

El ensayo de la probeta N°4 fue ligeramente distinto. Como este fue realizado en la probeta de mayor tamaño (100 cm de diámetro y 180 cm de altura), el material que debía tamizarse alcanzaba los 500 kilos. Por este motivo se decidió cortar el material de volteo en la malla $\frac{3}{4}$ ", con lo cual todo el material pasante pasaría a ser parte de la matriz protectora, asumiendo una granulometría conocida. Mayores detalles son entregados en el sub-capítulo de confección de probetas.

En la Figura 31 se puede observar como la nueva configuración permite una drástica reducción de las deformaciones de la geomembranas, permitiendo que los ensayos se desarrollaran de manera adecuada.



Figura 31: probeta armada con la capa protectora, se observa una reducción importante de la deformación de la geomembrana.

4.2.2 Evaluación de la erosión interna: criterio de Kezdi

Reviste gran importancia para el estudio de la rotura de partículas, en los ensayos realizados en este trabajo, que los materiales de núcleo y matriz protectora no se mezclaran durante la ejecución de las pruebas. Si se llegaba a desarrollar erosión interna, esta podía afectar la veracidad de las curvas granulométricas post-ensayo de la zona del núcleo.

El fenómeno puede ser comparado con el de inestabilidad interna en suelos, el cual corresponde al arrastre y migración de material fino a través de material grueso debido a la existencia de un gradiente hidráulico (Kezdi, 1979).

Kezdi (1979) propone un criterio para evaluar la inestabilidad interna de un suelo que consiste en separar la curva granulométrica en una fracción gruesa y otra fina en algún punto arbitrario. Posteriormente calcula el factor d'_{85} que corresponde al tamaño de partículas para el cual pasa el 85% del material de la fracción gruesa. De la misma manera, calcula el parámetro D'_{15} para la fracción gruesa (Figura 32). Finalmente debe cumplirse:

$$\text{Sí } \frac{D'_{15}}{d'_{85}} \leq 4 \Rightarrow \text{suelo estable internamente} \quad (6)$$

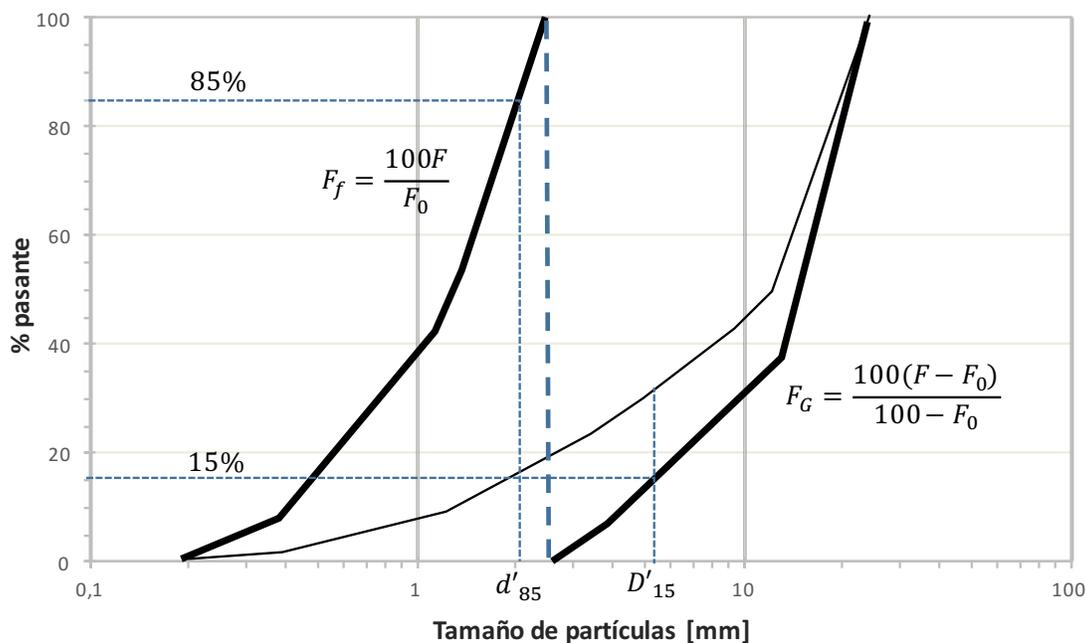


Figura 32: criterio de Kezdi. Adaptado de Kezdi (1979)

4.3. Confección de probetas

Las granulometrías originales PES y PEK que se utilizan en esta memoria corresponden al promedio de una serie de curvas obtenidas en distintos sectores del proyecto PMCHS para cada unidad (Codelco, 2011). Debido a las limitaciones de tamaño de partículas a considerar para la confección de las probetas triaxiales, las curvas granulométricas fueron escaladas mediante el método de gradación paralela, tal como se observa en la Figura 33 y Figura 34. Se puede observar como las curvas originales para las unidades PES y PEK estiman tamaños máximos de partículas superiores a los 4 metros de longitud máxima.

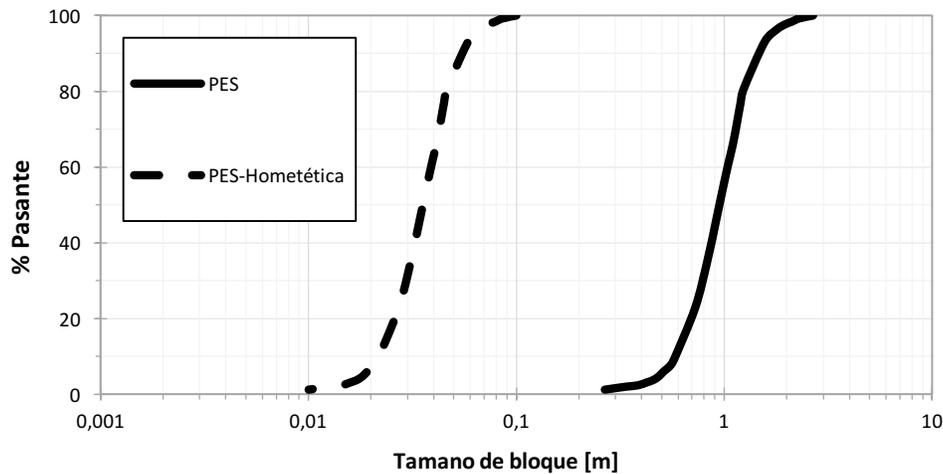


Figura 33: curva granulométrica de unidad PES (Codelco, 2011) y la homotética considerada para los ensayos triaxiales de grandes dimensiones

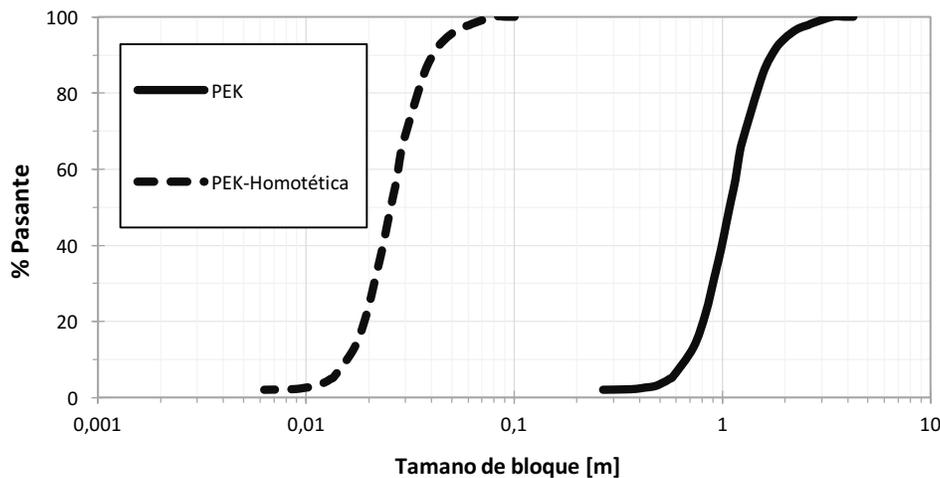


Figura 34: curva granulométrica de unidad PEK (Codelco, 2011) y la homotética considerada para los ensayos triaxiales de grandes dimensiones

A modo de resumen se presenta una tabla con los parámetros iniciales de confección de cada uno de los ensayos triaxiales de grande dimensiones.

Tabla 6: resumen de parámetros de confección

Ensayo	Material	Dimensiones probeta [cm]x[cm]	Densidad de confección [T/cm³]	Cu
2	PES	60x120	1,6	1,78
3	PES-PEK	60x120	1,6	2,29
4	PEK	100X180	1,6	2,21

Para las 3 probetas ensayadas el material se dividió en 5 capas, y fueron armadas procurando mantener la densidad de confección elegida. Para la división de las zonas se emplearon moldes del aluminio como el de la Figura 30, los cuales eran retirados cuando se terminaba cada capa. Un esquema de la disposición interna del material es presentado en cada una de las probetas descritas a continuación.

4.3.1 Ensayo N° 2: unidad PES

En la Figura 35 se presentan las curvas granulométricas del núcleo de material en estudio, que corresponde a la homotética de la granulometría de la unidad PES. Sobre el mismo gráfico se presentan las curvas del material de protección, que consta de una zona denominada de transición (T) y una de matriz fina (MF).

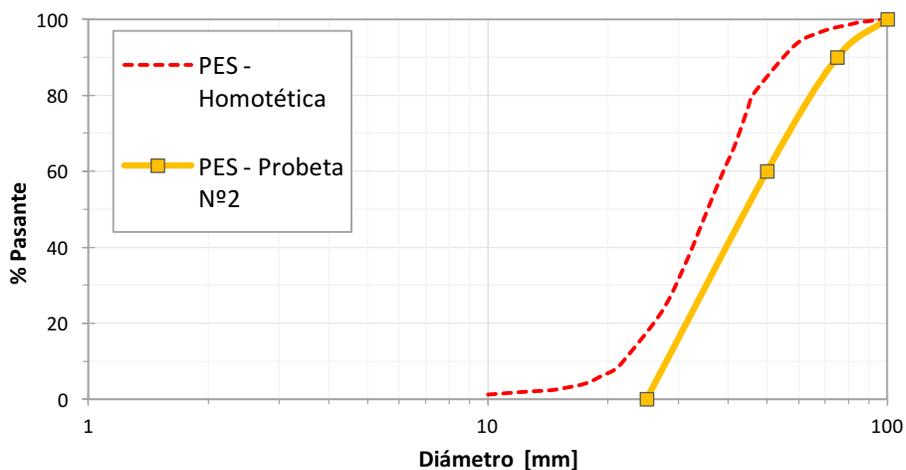


Figura 35: granulometría ensayo N°2 PES y homotética

Tabla 7: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos. PES.

Rango	Cantidad de material [kg]	Color
4" - 3"	31,9	Verde
3" - 2"	95,7	Ocre
2" - 1"	191,5	Blanco
1" - 3/4"	61,5	-
3/4" - 1/2"	46,1	-
1/2" - 3/8"	15,4	-
3/8" - #4	30,8	-
#4 - #10	28,0	-
#10 - #40	42,0	-

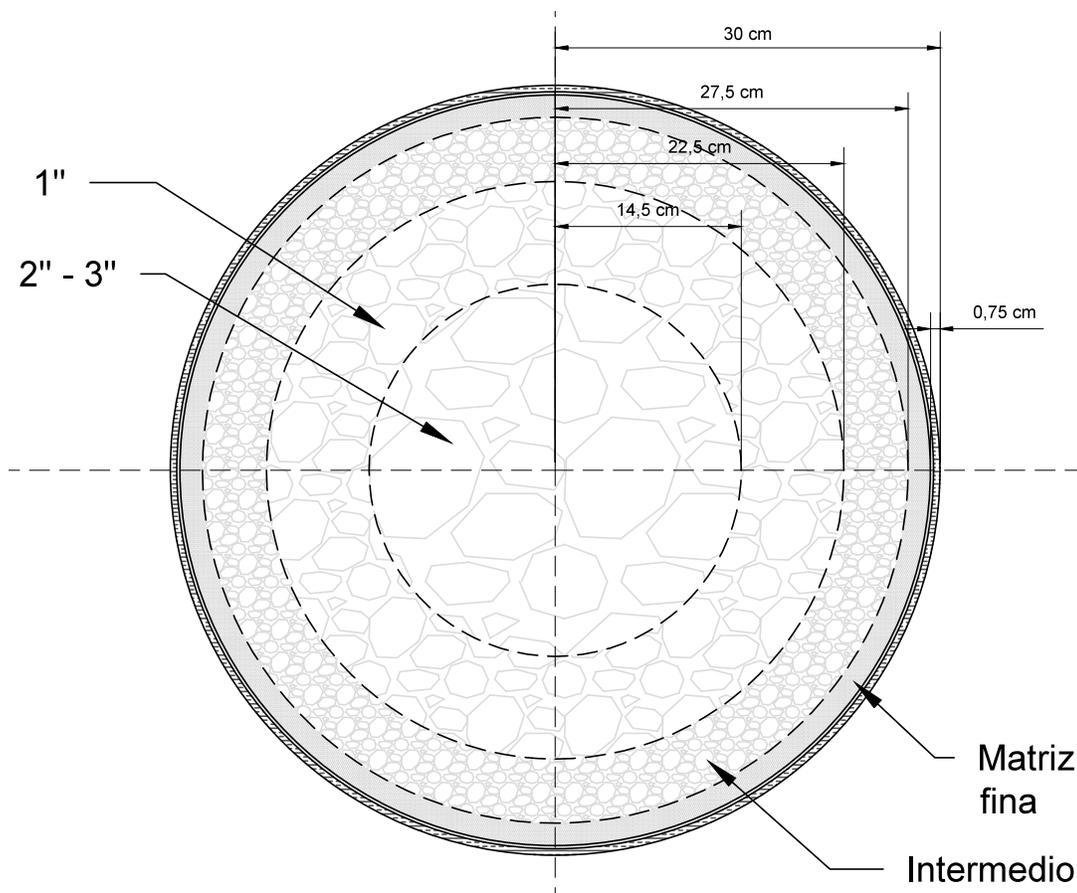


Figura 36: esquema de planta probeta PES



Figura 37: colocación del material para una capa PES

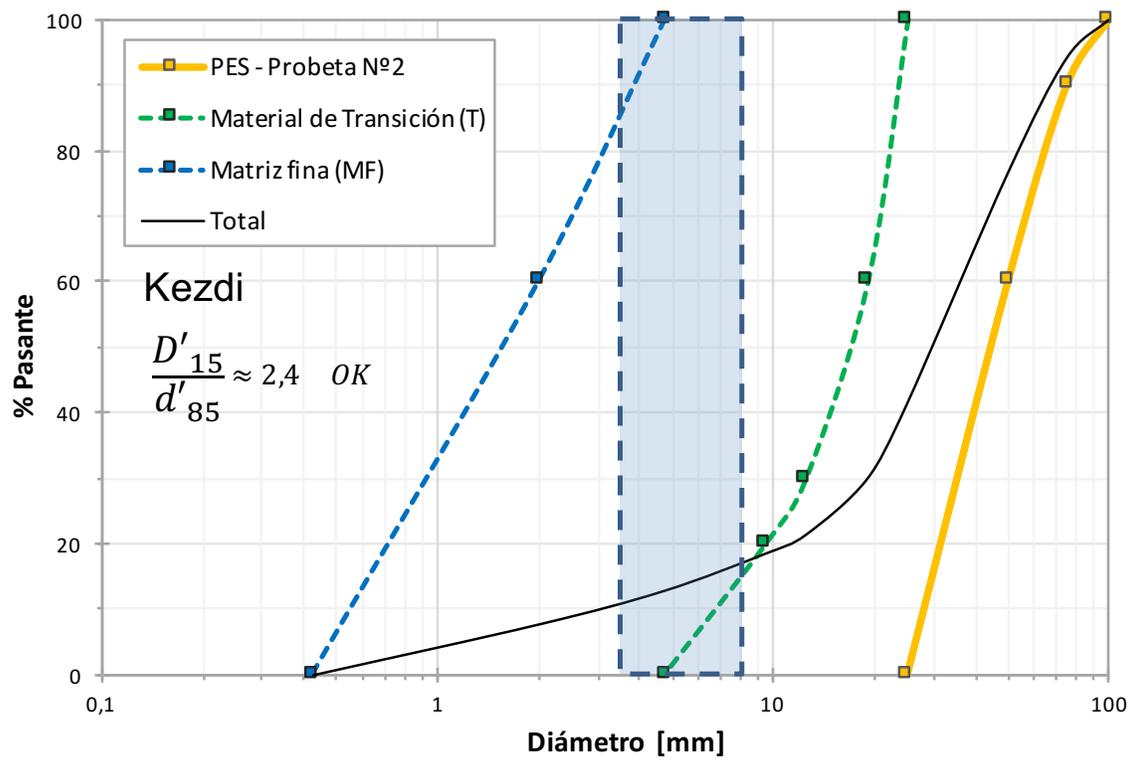


Figura 38: criterio de Kezdi, PES60x120

4.3.2 Ensayo N° 3: mezcla PES-PEK

La confección de esta probeta es similar a la probeta PES, la diferencia es que el material de transición forma parte de la curva homotética empleada para la confección de la granulometría final (Figura 39). En la Tabla 8 se presenta un resumen de los materiales incluidos de las dos unidades geotécnicas y sus respectivos colores.

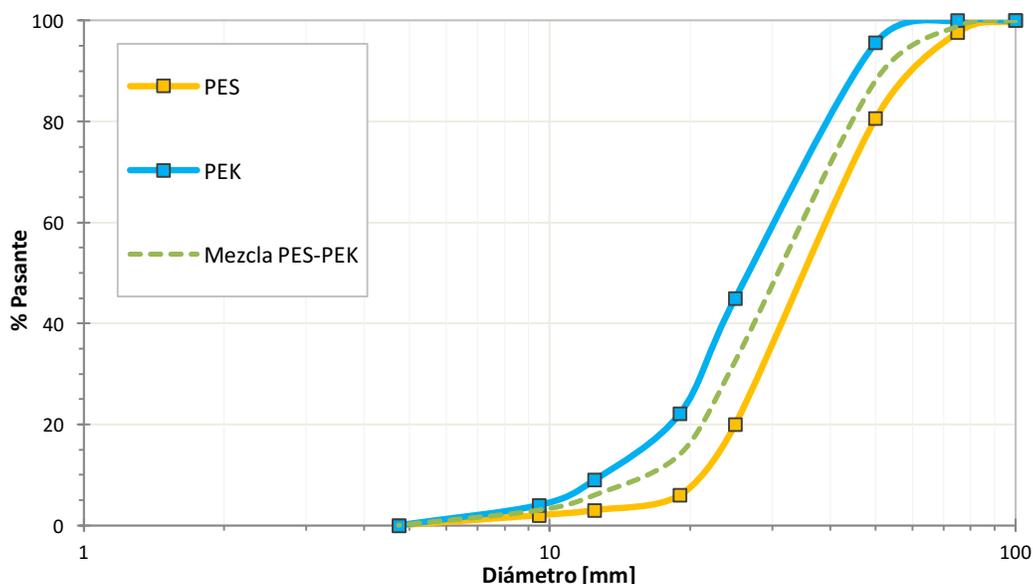


Figura 39: granulometrías ensayo N°2 mezcla PES-PEK

Tabla 8: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos.
Mezcla PES-PEK

Rango	Cantidad de material PES [kg]	Color PES	Cantidad de material PEK [kg]	Color PEK	Cantidad de material Mezcla [kg]
4" - 3"	5,4	Verde	-	-	5,4
3" - 2"	40,4	Ocre	10,4	Azul	50,8
2" - 1"	143,3	Blanco	119,6	Rosado	262,9
1" - 3/4"	33,1	-	53,9	-	87,0
3/4" - 1/2"	7,1	-	31,2	-	38,3
1/2" - 3/8"	2,4	-	11,8	-	14,2
3/8" - #4	4,7	-	9,5	-	14,2
#4 - #10	14,0	-	14,0	-	28,0
#10 - #40	21,0	-	21,0	-	42,0



Figura 40: capa mezcla PES-PEK60x120

En la Figura 41 se observa que la probeta no cumpliría el criterio de Kezdi, pero se ensayó de todos modos debido al éxito del Ensayo N°2.

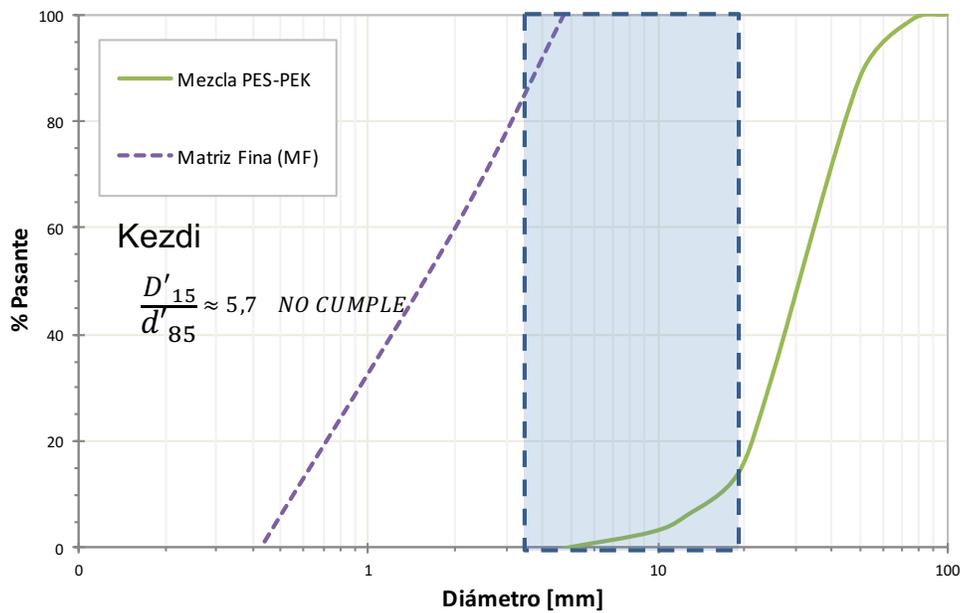


Figura 41: criterio Kezdi, PES-PEK60x120

4.3.3 Ensayo N° 4: unidad PEK

El armado de esta probeta difiere un poco de las anteriores. Al tratarse de la probeta más grande que se armó de las que incluyeron material de transición y matriz fina, el material total a tamizar para conformar estas zonas de protección ascendía a los 510 kg. Para cumplir las fechas fijadas para la realización de los ensayos se decidió fusionar las zonas de transición y matriz fina en una sola donde zona, donde se incluyó material bajo la malla ¾". Los detalles de la granulometría inicial se presentan en la Figura 42 y un resumen de materiales es presentado en la Tabla 9.

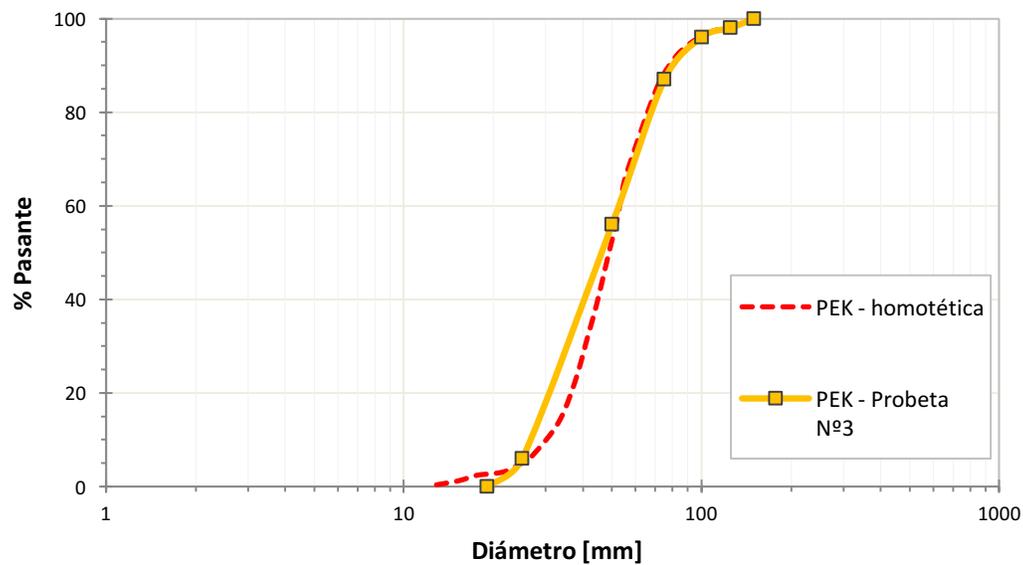


Figura 42: granulometría ensayo N°3 PEK y homotética.

Tabla 9: resumen de cantidad de material utilizado por rango de tamaños y colores escogidos. PEK.

Rango	Cantidad de material [kg]	Color
6" - 5"	35,0	Celeste
5" - 4"	35,0	Amarillo
4" - 3"	157,6	Verde
3" - 2"	543,0	Blanco
2" - 1,5"	455,4	-
1,5" - ¾"	525,5	Ocre
<¾"	510,3	-

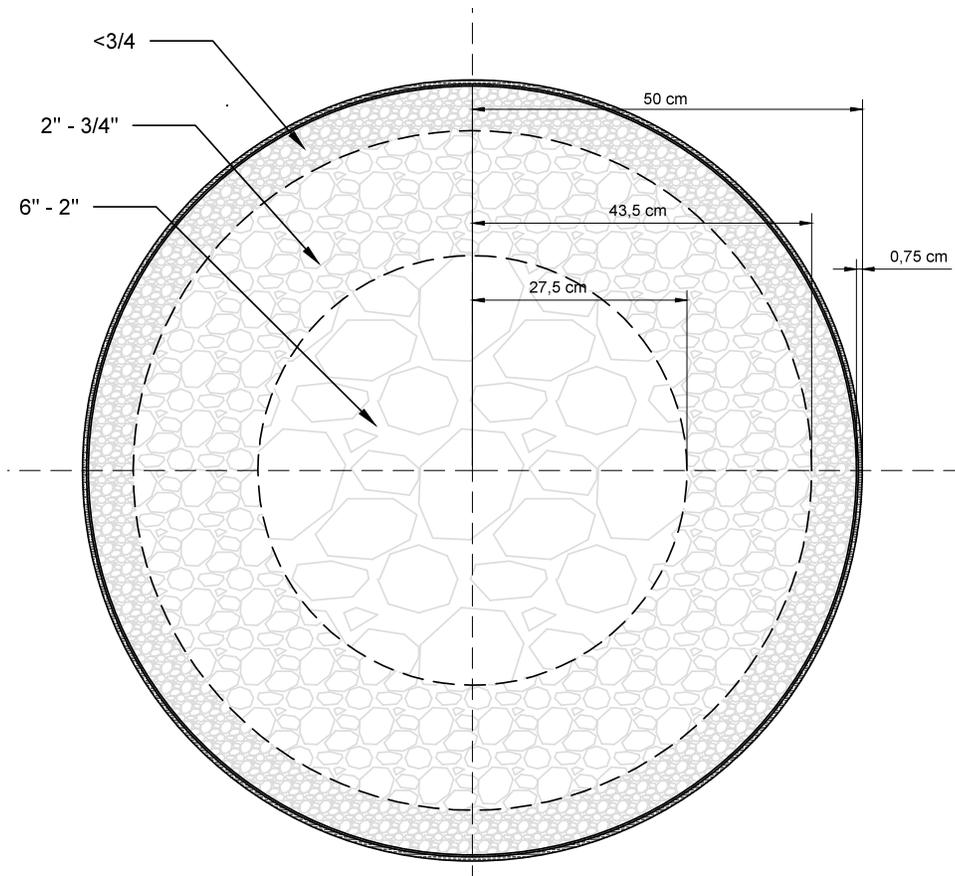


Figura 43: planta PEK100x180



Figura 44: capa PEK100x180

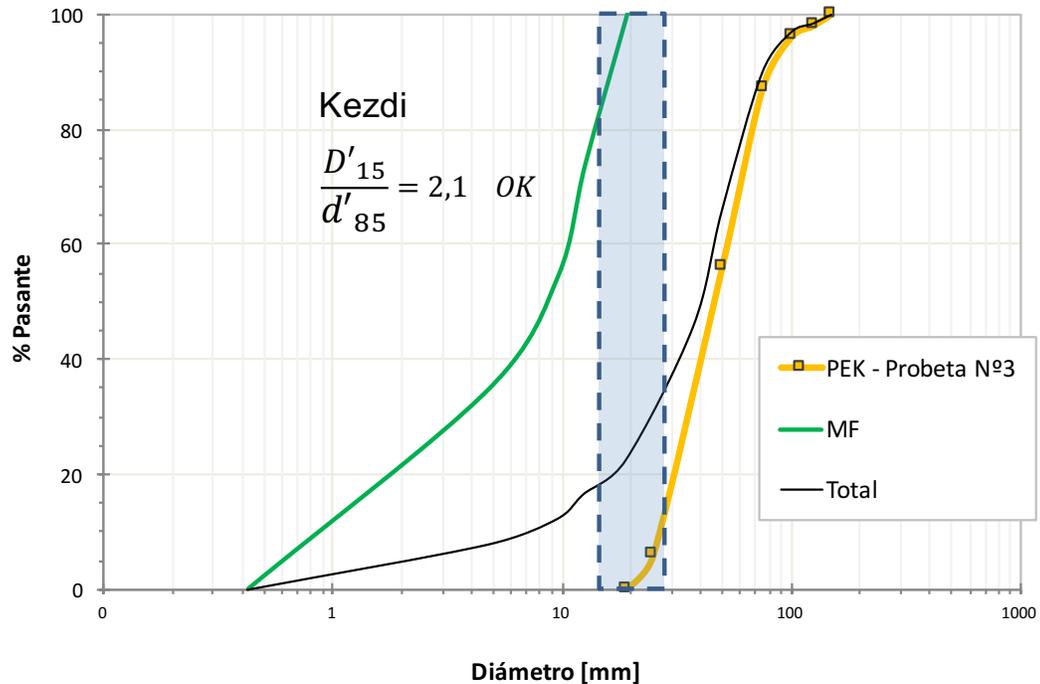


Figura 45: cumplimiento del criterio de Kezdi, PEK100x180

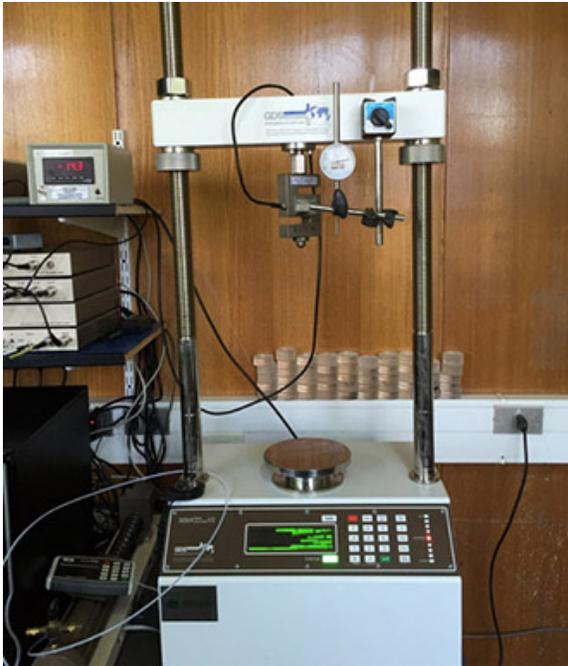
5. Otros ensayos de laboratorio

De manera de indagar aún más en la rotura de partículas y los mecanismos que la dominan, se realizaron ensayos triaxiales sobre las unidades PES y PEK del envío N°1 (2014), las cuales fueron estudiadas por D'Espessailles (2014) en ensayos de Corte Simple. De esta manera se busca conocer y comparar la cantidad de rotura en ambas pruebas. Esta información se complementará con ensayos triaxiales de laboratorio recopilados de otros autores sobre el material del envío N°2 (2015)

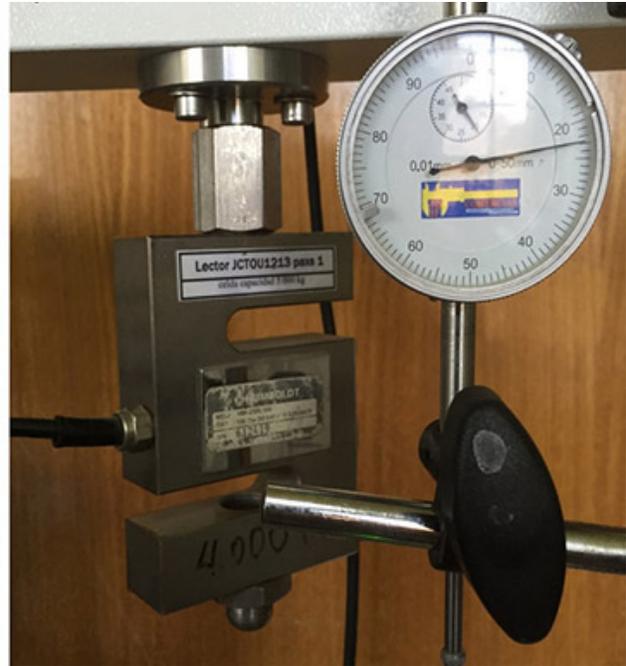
5.1. Equipo triaxial

A continuación se entregan detalles del equipo triaxial usado para los ensayos:

- una prensa de carga GDS 50kN Load Frame con capacidad para 50kN de carga; una placa de carga de 4000 kN (Figura 46).



(a)



(b)

Figura 46: (a) prensa de carga GDS 50KN Load Frame (GDSL50). (b) placa de carga.

- Un panel de control de presión Humboldt con capacidad para 9 kgf/cm² ().



(a)



(b)

Figura 47: (a) panel de control de presiones. (b) cámara triaxial

5.2. Metodología de Ensayo

5.2.1 Preparación de material

Se seleccionaron materiales provenientes del envío N°1 de las unidades PES y PEK. Estos se tamizaron de acuerdo a la granulometría utilizada por D'Espessailles (2014) en sus ensayos de Corte Simple. La densidad de confección será la mínima reportada por D'Espessailles (2014) por tanto se trata de probetas de arena suelta (DR = 0%). Los parámetros iniciales para los ensayos sobre el material se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10: parámetros iniciales de ensayos triaxiales sobre material PES y PEK del envío N°1 (2014)

Ensayo	Material	Dimensiones probeta [cm]x[cm]	σ_c [kgf/cm ²]	γ [gr/cm ³] (DR = 0%)	Cu
1	PES	5x10	6	1,314	1,44
2	PEK	5x10	6	1,342	1,47

5.2.2 Confección de probetas

- Primero se aconseja limpiar la base de la cámara triaxial de todas aquellas impurezas que se encuentran en sus conductos y puedan afectar el correcto desarrollo del ensayo.
- Sobre la base de la cámara triaxial se fija una geomembrana mediante o-rings. Luego de esto, se coloca un molde de cobre y se sella a base con cinta para evitar filtraciones de aire. Entre el molde y la geomembrana debe existir una lámina de papel filtro, la cual permite la libre circulación de aire alrededor de la geomembrana, logrando que la geomembrana se adhiera perfectamente al molde. Esto último se logra mediante una bomba de vacío.
- Luego de verificar que no existan filtraciones, se coloca un geotextil en la base y se comienza a depositar el material en su interior. Se divide la muestra en 5 capas las cuales se compactan hasta alcanzar la densidad requerida. Ambas probetas se confeccionaron con DR = 0 (muestras sueltas) así que la colocación del material debía ser cuidadosa, de forma de evitar una sobre-compactación, y por consiguiente, una densidad mayor a la pretendida. Una vez compactada la última capa, se coloca

otro geotextil y encima de este el cap superior, el cual se cubre con la geomembrana y se sella mediante o-rings.

- La última etapa del armado considera el retiro de la bomba de vacío y el molde. Finalmente se procede a limpiar la base de todo aquel material que cayó durante el armado.

5.2.3 Etapa de CO₂

- Una vez armada la probeta, se sella la cámara triaxial y se llena de agua. Es importante que se le aplique una pequeña presión (alrededor de 0,2 kgf/cm²) para evitar que la probeta se hinche cuando se le aplique CO₂. Posteriormente se abren las llaves de base y top de la probeta y se hace pasar CO₂ a través de ella. La función del CO₂ es desplazar las moléculas del aire de los poros del material y debe hacerse por al menos 30 minutos.

5.2.4 Saturación

- Se hace pasar 200 ml de agua destilada y desaireada a través de la probeta, lo cual asegura que los poros del material estén saturados de manera correcta.

5.2.5 Verificación de saturación

- La cámara se conecta al panel de control de presiones y se aplican las presiones de cámara y contrapresión (back pressure) en forma gradual hasta alcanzar 2,2 kgf/cm² y 2,0 kgf/cm² respectivamente. Se cierran las válvulas internas de la probeta y se mide la presión de poros inicial, luego se aumenta la presión de cámara hasta alcanzar la presión de consolidación. Ambas probetas se ensayaron a 6 kgf/cm² por lo cual la presión de cámara se aumentó hasta los 8 kgf/cm².
- Entremedio se hicieron mediciones de presión de cámara y presión de poros para obtener el parámetro de Skempton (Ecuación 7). En ambos ensayos se obtuvo valores sobre 0,95.

$$B = \frac{\Delta U}{\Delta \sigma_3} \quad (7)$$

5.2.6 Consolidación

- Alcanzada la presión de consolidación, y verificada la saturación, se inicia el proceso de consolidación de la muestra abriendo las válvulas de la probeta. Debido a que la muestra se trata de una arena gruesa, la consolidación se alcanza en alrededor de 15 minutos.

5.2.7 Corte

- Finalmente la cámara triaxial se coloca en la prensa de carga, luego se ajusta de modo que calce con el carril del pistón y se fijan en cero los valores iniciales de carga y deformación axial. Se elige una velocidad de deformación de 0,13 mm/min y se inicia la etapa la corte.

5.3. Aparato de Corte Simple

El equipo marca Wykeham Farrance empleado por D'Espessailles es del tipo NGI (Norwegian Geotechnical Institute). Consta de una probeta circular y está ubicado en el laboratorio Mecesus, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. A continuación se describe el equipo de acuerdo a lo presentado en la memoria de D'Espessailles (2014)

5.4. Descripción de equipo de Corte Simple

- Celda de carga vertical: se aplica la carga vertical empleando presión de aire. Esta se acciona en el panel de presión vertical mediante una manilla y se lee en el transductor digital (canal 2) en unidad de voltaje. La celda tiene una capacidad máxima de 5kN. La celda fue calibrada empleando dos pesos conocidos, con lo que se obtuvo la siguiente relación:

$$carga\ vertical\ \left[\frac{kgf}{cm^2}\right] = \frac{0,124 \cdot Voltaje + 0,233}{\text{área de probeta } [cm^2]} \quad (8)$$

- Panel de presión vertical: sirve para aplicar la presión vertical inicial del ensayo, esta se transfiere a través de la celda de carga al marco de carga y luego a la muestra a través del pistón. El aparato tiene una carga límite de 7 kgf/cm² la fuerza aplicada se puede leer en el canal 2 del transductor digital que da un valor en Volt.

- Celda de carga horizontal: tiene una capacidad máxima de 5 kN. Se mide a través del canal 1 del transductor digital en Volt. La conversión es:

$$carga\ horizontal\ [kgf] = 0,222 \cdot (Voltaje - Voltaje_{inicial}) - 0,0689 \quad (9)$$

- Engranajes de velocidad: permiten modificar la velocidad de ensayo. El equipo funciona a una velocidad de deformación constante y es automático. Se observan en la parte izquierda de la Figura 48. En la parte interior de la tapa se incluye una tabla donde se elige la velocidad y luego se indica la posición de los engranajes.
- Dial horizontal: mide la deformación horizontal de los anillos en la base de la probeta y posee una precisión de 0,002 mm. Acepta una deformación máxima de 12 mm.
- Dial vertical: mide la deformación vertical de la probeta, se ubica sobre el centro del marco de carga. Cuenta con una precisión de 0,01 mm y una deformación máxima de 30 mm.

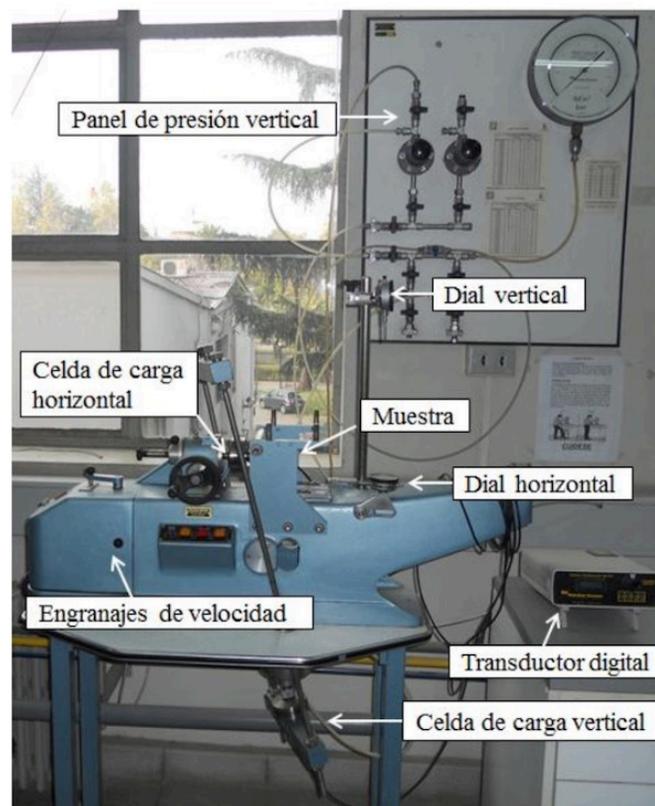


Figura 48: Equipo de corte simple, Mecesup (D'Espessailles 2014)

6. Resultados

En este capítulo se reportan los resultados más relevantes de los ensayos triaxiales CID realizados durante esta memoria. En particular se presentan respuestas al corte, cambio volumétrico y curvas granulométricas pre y post ensayo.

6.1. Ensayos de grandes dimensiones

6.1.1 Curvas de tensión-deformación

En la Figura 49 se presentan las curvas tensión-deformación obtenidas de los ensayos triaxiales de grandes dimensiones.

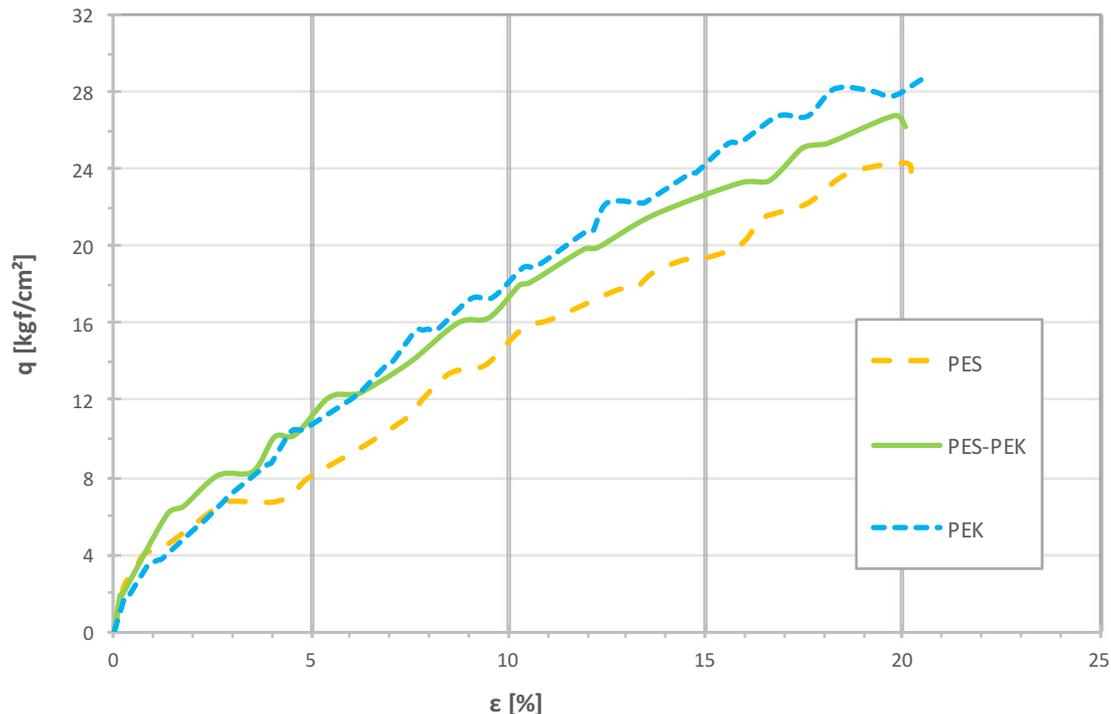


Figura 49: curva q v/s ϵ , ensayos de grandes dimensiones

Del gráfico de la Figura 49 se observa que el material presenta un comportamiento tensión-deformación típico de un material granular suelto en condiciones drenadas, ya que no presenta un *peak* de esfuerzo a una deformación menor a la de falla.

El material PEK genera la mayor resistencia al corte, y el material PES la menor. Resulta coherente que la mezcla de material PES y PEK presente una resistencia al corte cercana al promedio de las muestras ensayadas por separado.

6.1.2 Curvas de cambio volumétrico – deformación

En las Fig. 41 se presentan las curvas de cambio volumétrico v/s deformación obtenidas de los ensayos triaxiales de grandes dimensiones.

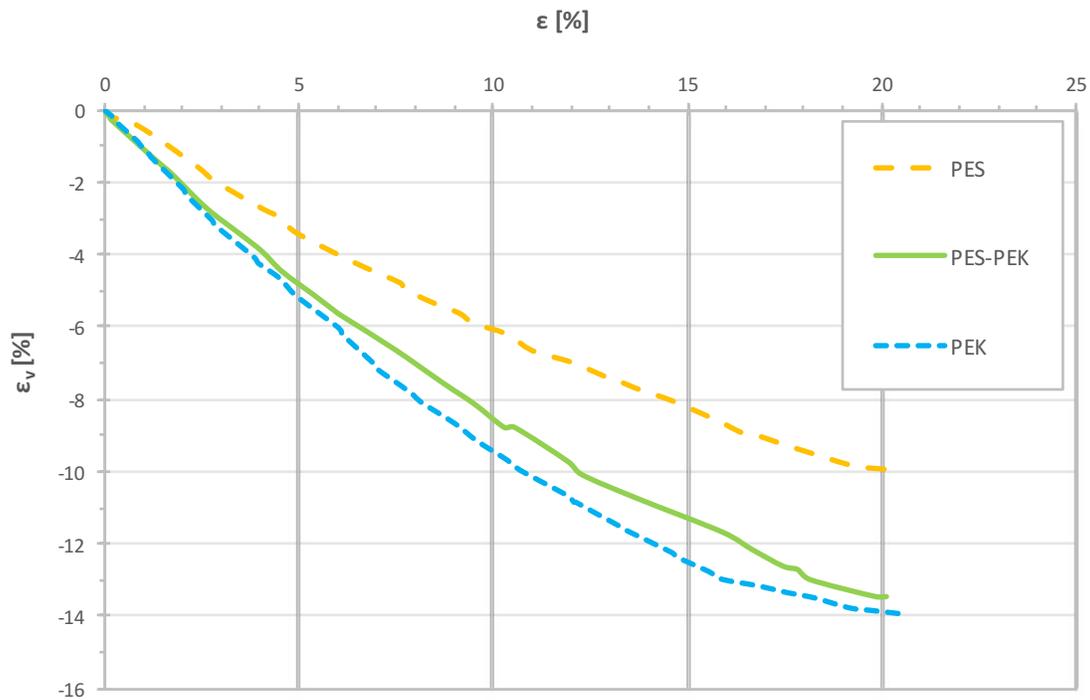


Figura 50: curvas ϵ v/s ϵ_v , ensayos de grandes dimensiones

Se observa claramente el comportamiento contractivo de las muestras ensayadas. Además las curvas cambian levemente su pendiente a medida que la deformación axial aumenta.

6.1.3 Rotura de partículas

A continuación se presentan las curvas granulométricas pre y post ensayo.

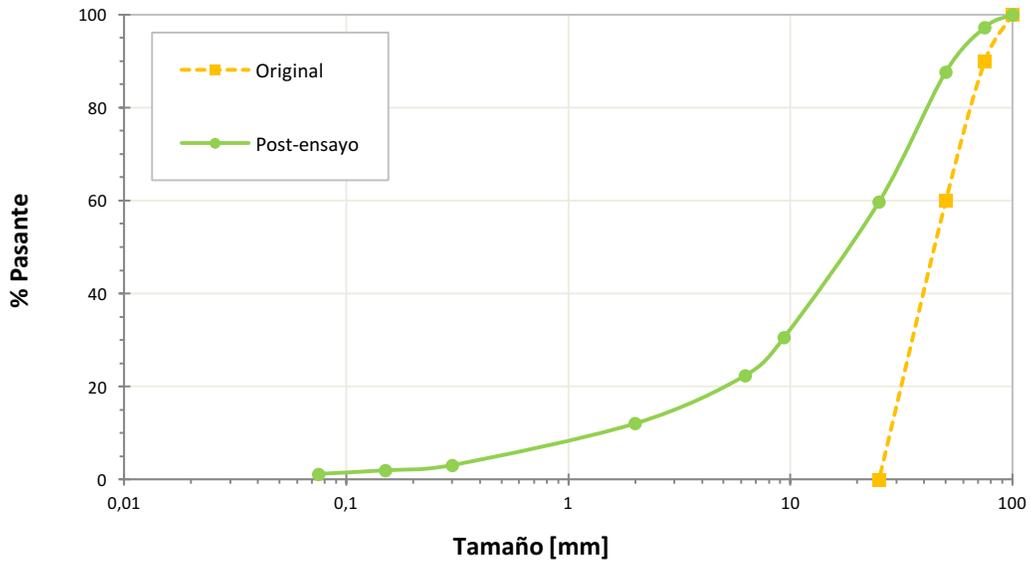


Figura 51: granulometrías ensayo N°2 PES

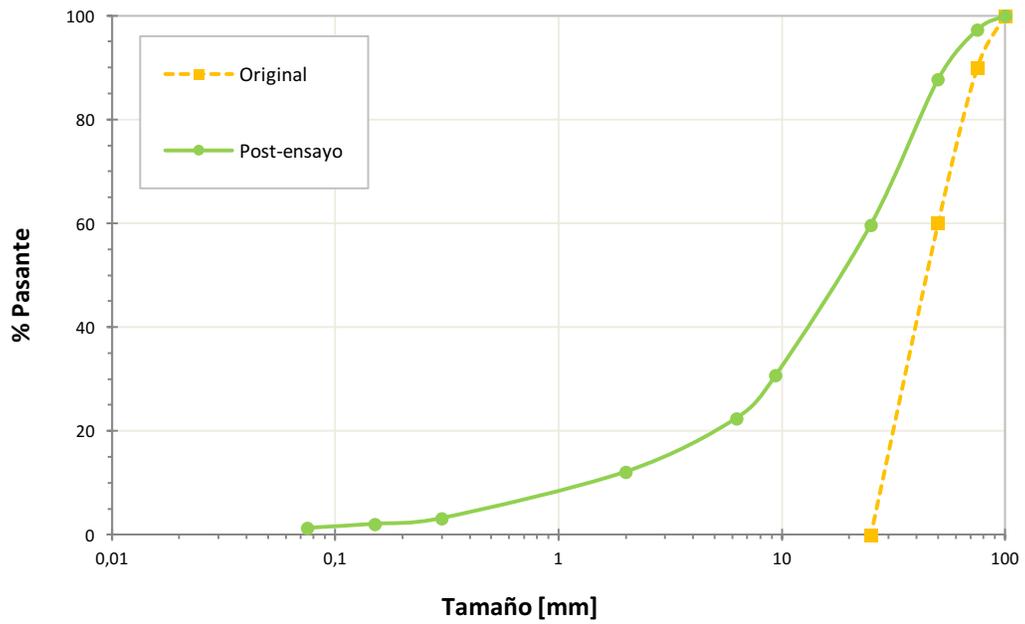


Figura 52: granulometrías ensayo N°3 PES-PEK

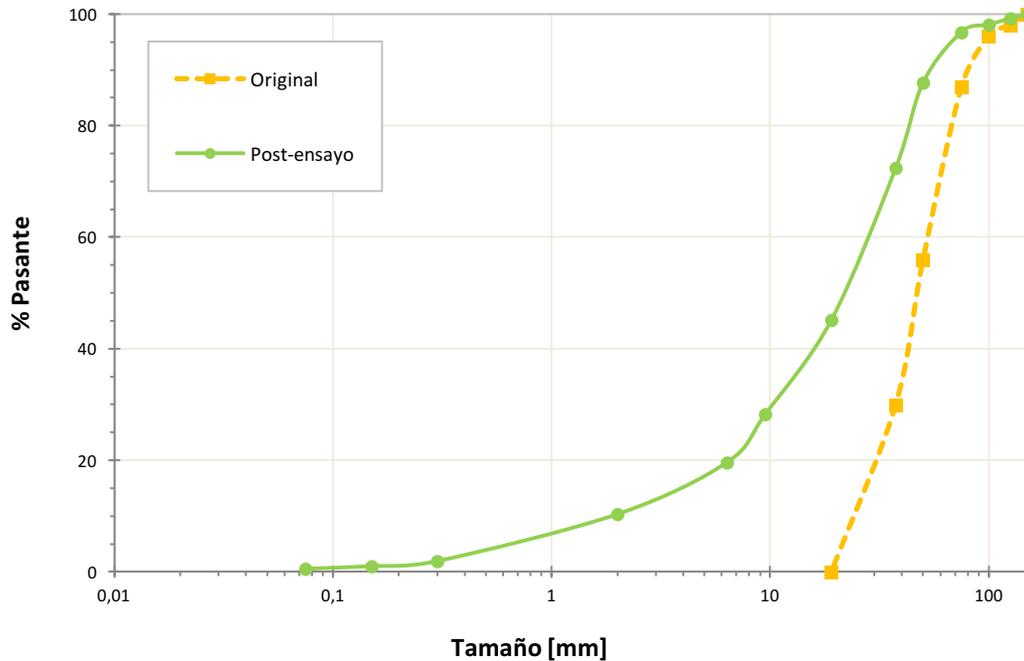


Figura 53: granulometrías ensayo N°4 PEK

Finalmente los resultados más importantes se presentan en la siguiente tabla, en particular se calculan los parámetros de rotura de Marsal (1965) y Hardin (1985)

Tabla 11: resumen de resultados de ensayos de grandes dimensiones

Ensayo	Material	Dimensiones probeta [cm]x[cm]	σ_c [kgf/cm ²]	$q_{m\acute{a}x}$ [kgf/cm ²]	$p_{m\acute{a}x}$ [kgf/cm ²]	σ_1/σ_3	Bg [%]	Br [%]
2	PES	60x120	20	23,64	35,76	3,36	59,7	20,4
3	PES-PEK	60x121	20	26,23	37,49	3,62	20,2	16,4
4	PEK	100X180	20	28,61	39,07	3,86	45,2	18,2

6.2. Ensayos de laboratorio

A continuación se presentan los resultados para las pruebas triaxiales realizadas sobre el material PES y PEK (2014).

6.2.1 Curvas de tensión deformación

En la Fig. 45 se presenta la curva tensión-deformación para los ensayos de triaxiales CID para las pruebas realizadas a 6 kgf/cm^2 en probetas de $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$.

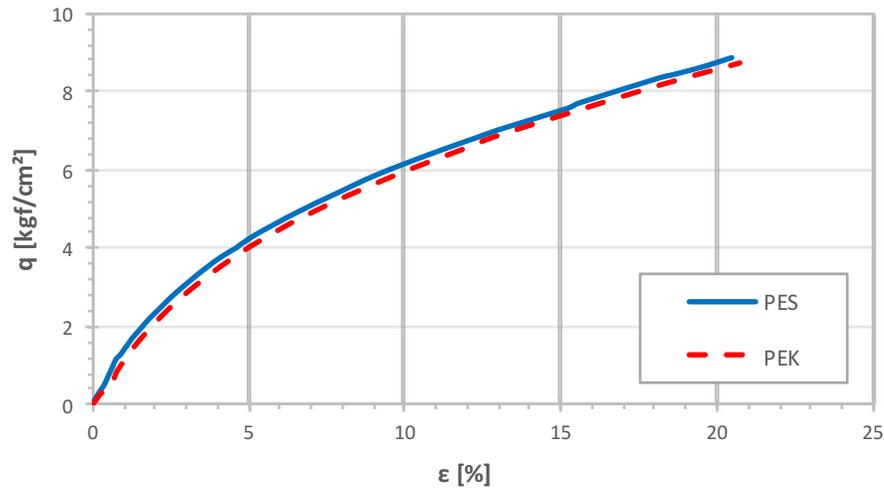


Figura 54: gráfico ϵ v/s q de ensayo Triaxial sobre material del envío N°1 (2014)

Se observa nuevamente un comportamiento típico de materiales granulares sueltos, sin *peak* de resistencia. Ambas unidades parecen generar la misma resistencia al corte durante el ensayo.

6.2.2 Curvas de cambio volumétrico – deformación

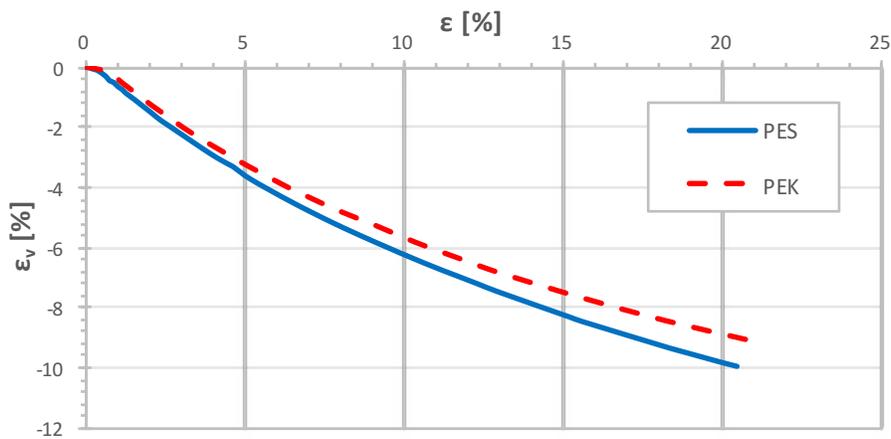


Figura 55: curvas ϵ v/s ϵ_v , ensayos de laboratorio sobre material del envío N°1 (2014)

Las muestras ensayadas presentan un comportamiento contractivo, lo cual es coherente con lo observado en el gráfico anterior.

6.2.3 Rotura de partículas

A continuación se presentan los resultados de rotura de partículas de las pruebas realizadas.

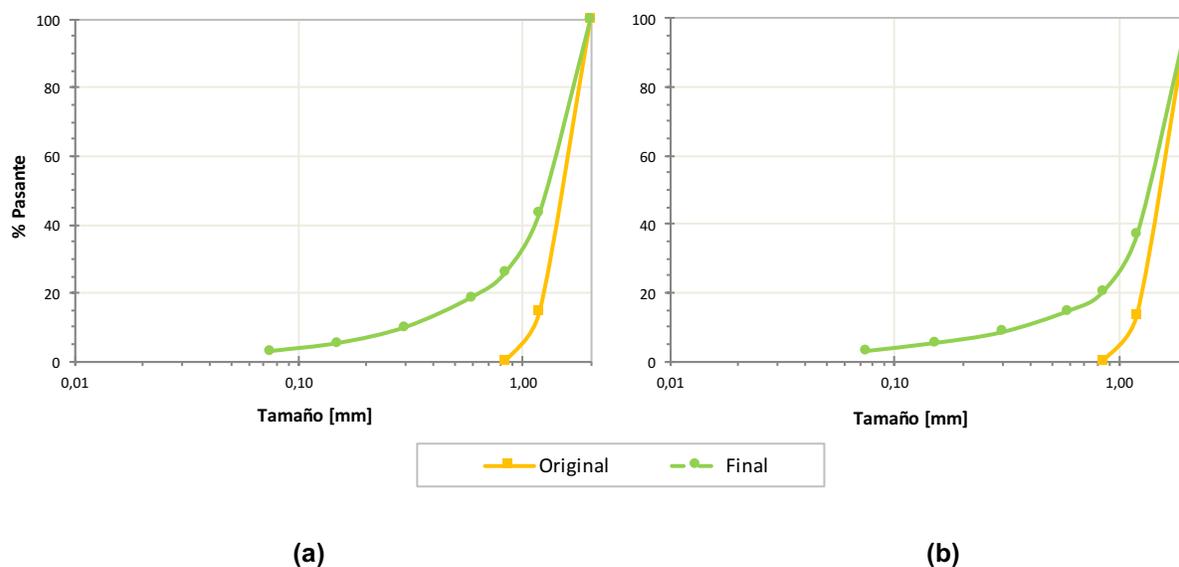


Figura 56: granulometrías post-ensayo triaxial sobre material del envío N°1 (2014). (a) unidad PES, (b) Unidad PEK

Finalmente un resumen con los valores más relevantes en la siguiente tabla.

Tabla 12: resumen de resultados de ensayos triaxiales

Ensayo	Material	Dimensiones probeta [cm]x[cm]	σ_c [kgf/cm ²]	$q_{m\acute{a}x}$ [kgf/cm ²]	$p_{m\acute{a}x}$ [kgf/cm ²]	σ_1/σ_3	B_g [%]	B_r [%]
1	PES	5x10	6	8,87	11,91	3,96	29,2	14,4
2	PEK	5x10	6	8,73	11,82	3,91	23,6	12,1

7. Análisis de resultados

7.1. Comparación de ensayos triaxiales CID convencionales con data obtenida de ensayos de corte simple.

En este subcapítulo se buscará generar una correlación que permita verificar la relevancia que los distintos mecanismos de fragmentación tienen en la rotura de partículas. En particular se busca profundizar en lo referente al esfuerzo de corte, y como este afecta la cantidad de rotura en dos tipos de ensayos convencionales de laboratorio: ensayo triaxial CID (consolidado isotrópicamente drenado) y ensayo de corte simple. Para dicho propósito se recolectaron resultados de ensayos triaxiales y de corte simple en los cuales se emplearon los materiales descritos en esta memoria. En la Figura 57 se observa la rotura de partícula obtenida por D'Espessailles al efectuar ensayos de corte simple en las muestras PES y PEK.

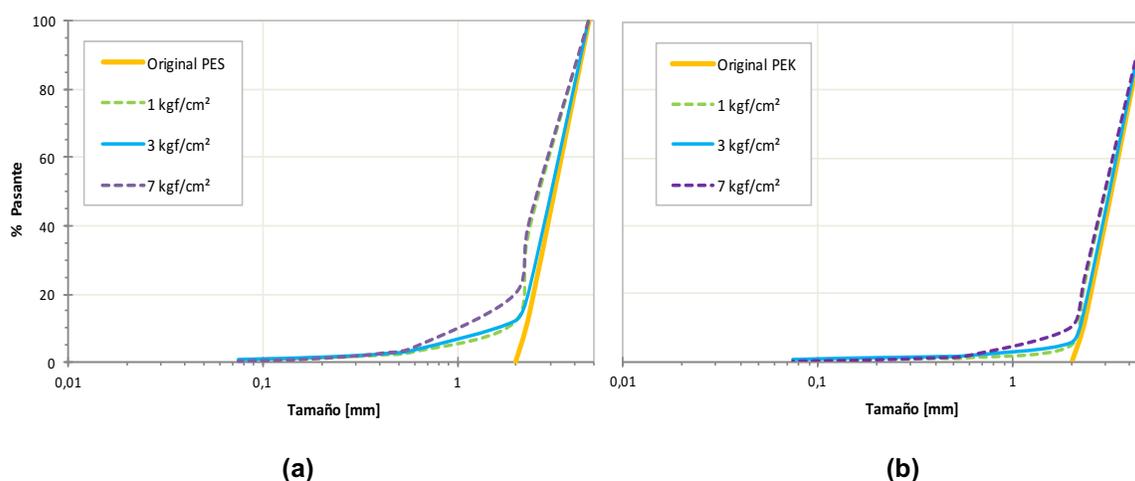


Figura 57: granulometrías de post-ensayos de Corte Simple (D'Espessailles 2014). (a) Muestra PES (b) Muestra PEK

Estos resultados resultan interesantes de analizar, no solo por los resultados obtenidos, sino que también por la escasa información de ensayos de corte simple realizados con la finalidad de estudiar rotura de partículas. En la Tabla 13 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos durante los ensayos.

Tabla 13: resumen de resultados obtenidos en ensayos de corte simple (D'Espessailles 2014)

Ensayo N°	Material	σ_c [kgf/cm ²]	ε [%]	γ [%]	τ [kgf/cm ²]	B_g [%]	B_r [%]
1	PES	1	0,5	60,30	0,76	24,40	6,30
3	PES	3	2,10	62,93	1,72	12,01	12,01
5	PES	7	2,73	63,70	3,44	26,97	8,46
1	PEK	1	2,38	59,40	0,70	10,11	2,53
3	PEK	3	2,10	62,80	1,76	5,49	2,24
5	PEK	7	2,84	63,80	3,58	12,44	4,03

Como una manera de poder ejercer una comparación entre estos dos tipos de ensayos, se empleará el concepto de trabajo aplicado por las fuerzas externas de cada ensayo. De esta forma se busca poder

El trabajo (energía) realizado por unidad de volumen de suelo puede ser calculado como sigue (Shahnazari & Rezvani, 2013; Atkinson & Bransby, 1978)

$$\delta W = q \cdot \delta \varepsilon_s + p \cdot \delta \varepsilon_v \quad (10)$$

La idea es poder generar una comparación mediante la energía que es traspasada al sistema y por consiguiente empleada en fragmentar el material en ambos ensayos. La componente $q \cdot \delta \varepsilon_s$ se asocia a la energía disipada por el sistema producto de deformaciones mayores en el rango plástico que generan corte en el material. Mientras que la componente está $p \cdot \delta \varepsilon_v$ está relacionada con las deformaciones elásticas del material.

Para obtener el trabajo externo para los ensayos de corte simple, se empleara la siguiente ecuación (Scott, 2013):

$$\delta W = \tau \cdot \gamma + \sigma_n \cdot \varepsilon_n \quad (11)$$

En la Figura 58 y Figura 59 se presentan los valores obtenidos de trabajo externo aplicado versus rotura producida en ambos tipos de ensayo de acuerdo al parámetro B_r .

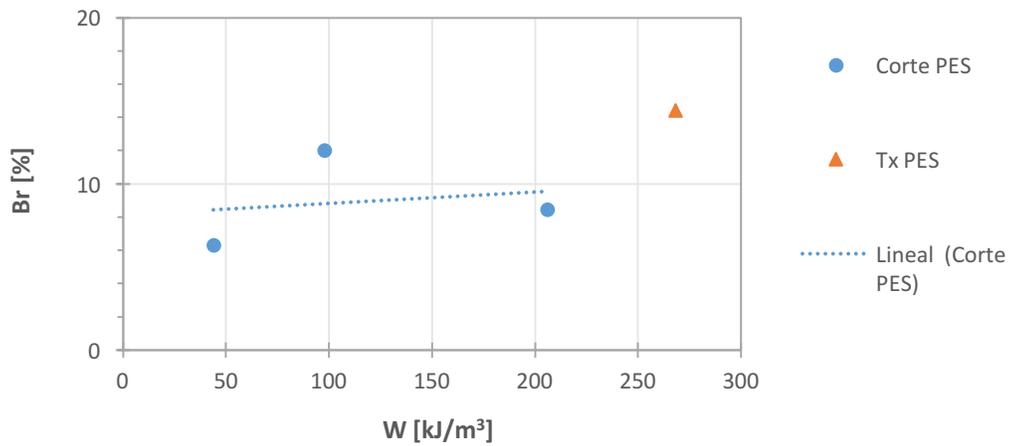


Figura 58: trabajo externo aplicado v/s rotura de Hardin (Br). Material PES.

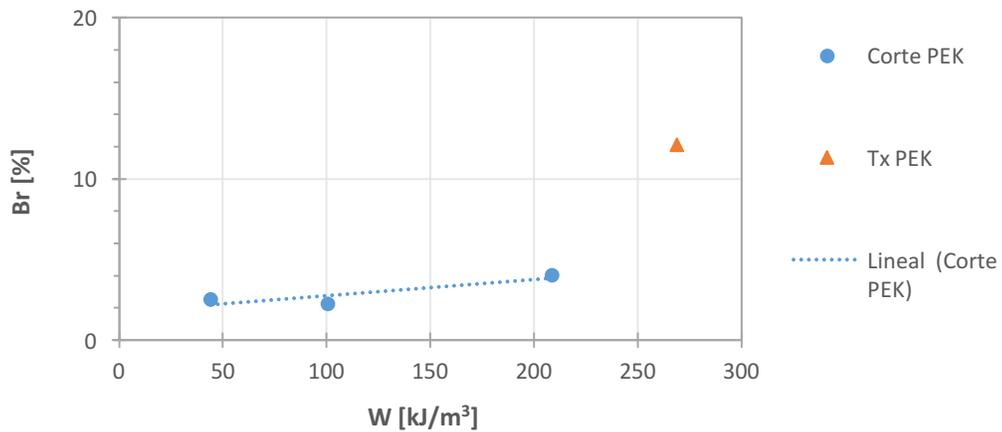


Figura 59: trabajo externo aplicado v/s rotura de Hardin (Br). Material PEK

En la Figura 58 se observa que los resultados de rotura en la prueba triaxial se encuentran en la misma tendencia de los resultados en las pruebas de corte simple, sin apreciarse mayor diferenciación en ambos resultados. En cambio en la Figura 59 se observa una mayor diferencia a favor de la prueba triaxial.

7.2. Comparación geotécnica entre un material quebrado y un material de marina (lastre)

Estudiar un material quebrado es bastante difícil, lo cual se debe principalmente a que la obtención de materiales de los puntos de extracción para uso de investigación es sumamente difícil. En general los proyectos mineros ejecutan estudios durante el diseño y posteriormente se enfocan netamente en la producción. En el caso de los materiales utilizados en esta memoria, al no haber aún puntos de extracción en ejecución estos provienen de la voladura de túneles (marinas).

Al provenir directamente de la acción de la tronadura, los materiales podrían estar afectos a una reducción de su resistencia, y por ende, mayor posibilidad de sufrir fragmentación en comparación a un material quebrado que sólo se genera por rotura entre bloques. Además, los materiales de marina, al provenir de tronadura de túneles, poseen tamaños medios de partículas menores a los que poseen los materiales quebrados en columnas de extracción. Así, estos 2 temas deben ser considerados en futuras compañías de caracterización y estudio de fragmentación de materiales quebrados,

Lo que sigue a continuación son comparaciones de la fragmentación obtenida en estos ensayos, mediante estimaciones de parámetros de B_g de Marsal (1965) y B_r de Hardin (1985), con distintos materiales ensayados por una larga cantidad de autores. Evaluación de parámetros de resistencia como ϕ_{sec} , σ_1/σ_3 son incluidas.

7.2.1 Data recopilada de ensayos de grandes dimensiones

Se recopilaron resultados de ensayos triaxiales de distintos orígenes (enrocados de *rockfill*, material de lastre, etc.) de modo de poder comparar la rotura generada en los triaxiales realizados en esta memoria con esta extensa data. A modo de ejemplo se presentan las curvas granulométricas de ensayos desarrollados por Marsal (1973) sobre enrocados utilizados en presas de tierra.

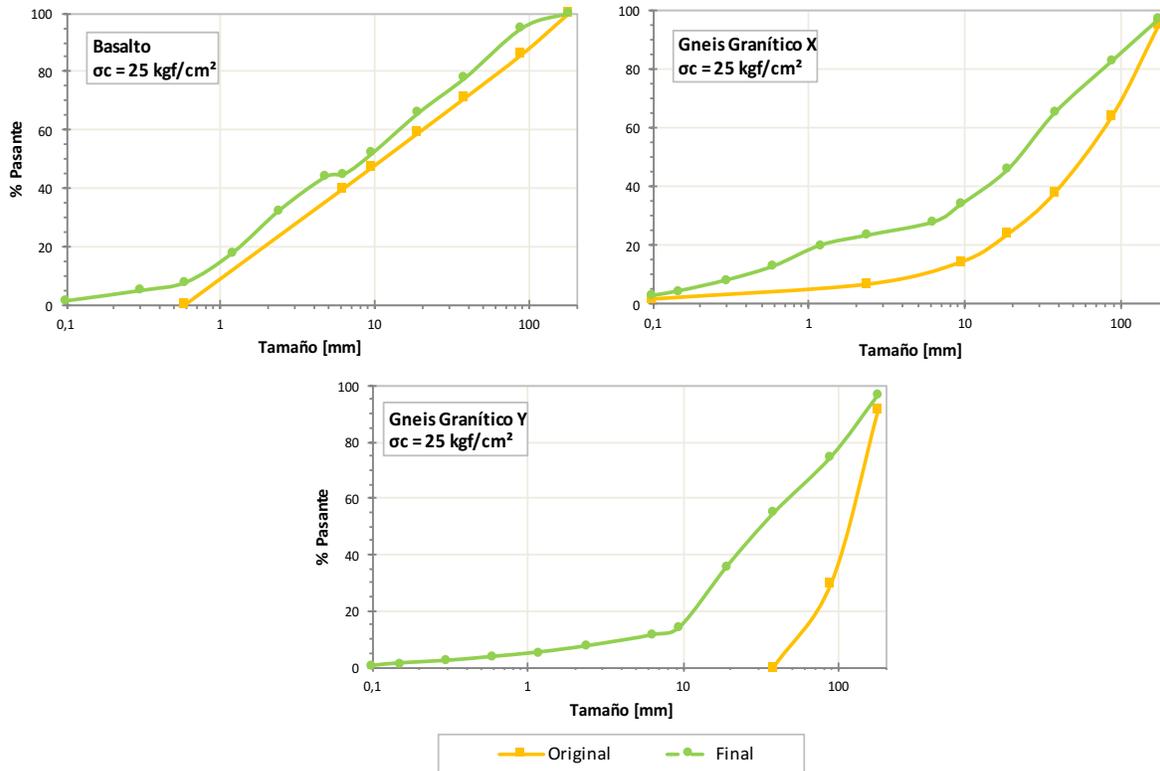


Figura 60: Ensayos triaxiales (Marsal 1973)

Resulta interesante poder comparar la rotura obtenida de los ensayos de esta memoria con los obtenidos por diversos autores sobre distintos tipos de materiales, de forma de evaluar el nivel de resistencia que las unidades PES y PEK presentan. A continuación se presenta análisis de la fragmentación de ensayos triaxiales utilizando el parámetro B_g y B_r .

7.2.2 Resultados de σ_1/σ_3 versus rotura de partículas

Al graficar los valores de σ_1/σ_3 v/s el parámetro B_g (Figura 61) se observa cómo las unidades PES y PEK ensayadas presentan una alta cantidad de rotura en comparación con los otros materiales. En cambio el ensayo para la mezcla PES-PEK se ubica en una zona cercana al promedio de rotura. Esta diferencia está claramente inducida por la granulometría inicial de estos ensayos, ya que si bien poseen un coeficiente de uniformidad C_u bajo (entre 1 y 3), la curva granulométrica inicial del ensayo de mezcla PES-PEK tiende a ser más horizontal en la rama de partículas de menor tamaño. Además, se observa una buena correlación del C_u y la rotura obtenida, obteniéndose que para granulometrías iniciales de menor C_u mayor rotura es generada.

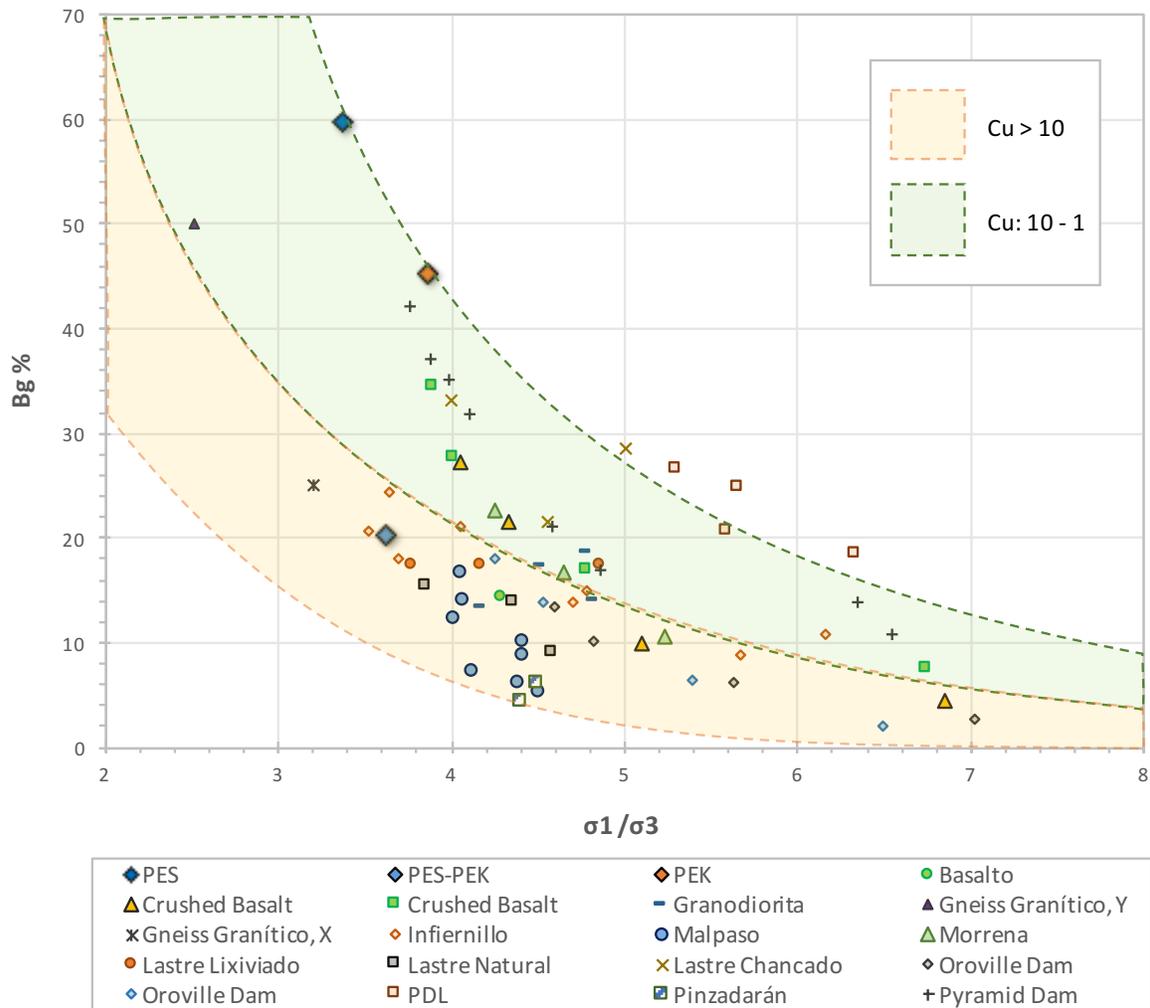


Figura 61: parámetro de rotura de Marsal “Bg” v/s “ σ_1/σ_3 ”

Tanto en la Figura 61 como en la Figura 62 es posible constatar que la resistencia desarrollada por los materiales, en términos de σ_1/σ_3 baja si se compara con otros ensayos sobre enrocados, como los resultados clásicos de Marsal.

Se observa como los datos de Figura 61 presentan mayor dispersión que los presentados en la Figura 62, esto debido a la manera en que el parámetro de Marsal obtiene sus valores, al ejercer una comparación solo en el rango que permite la granulometría inicial, ponderando aún más las granulometrías más uniformes. En la Figura 62 se observa un gran descenso de la estimación de rotura de los ensayos N°2 PES y N°4 PEK si se compara con lo obtenido mediante estimación de Marsal.

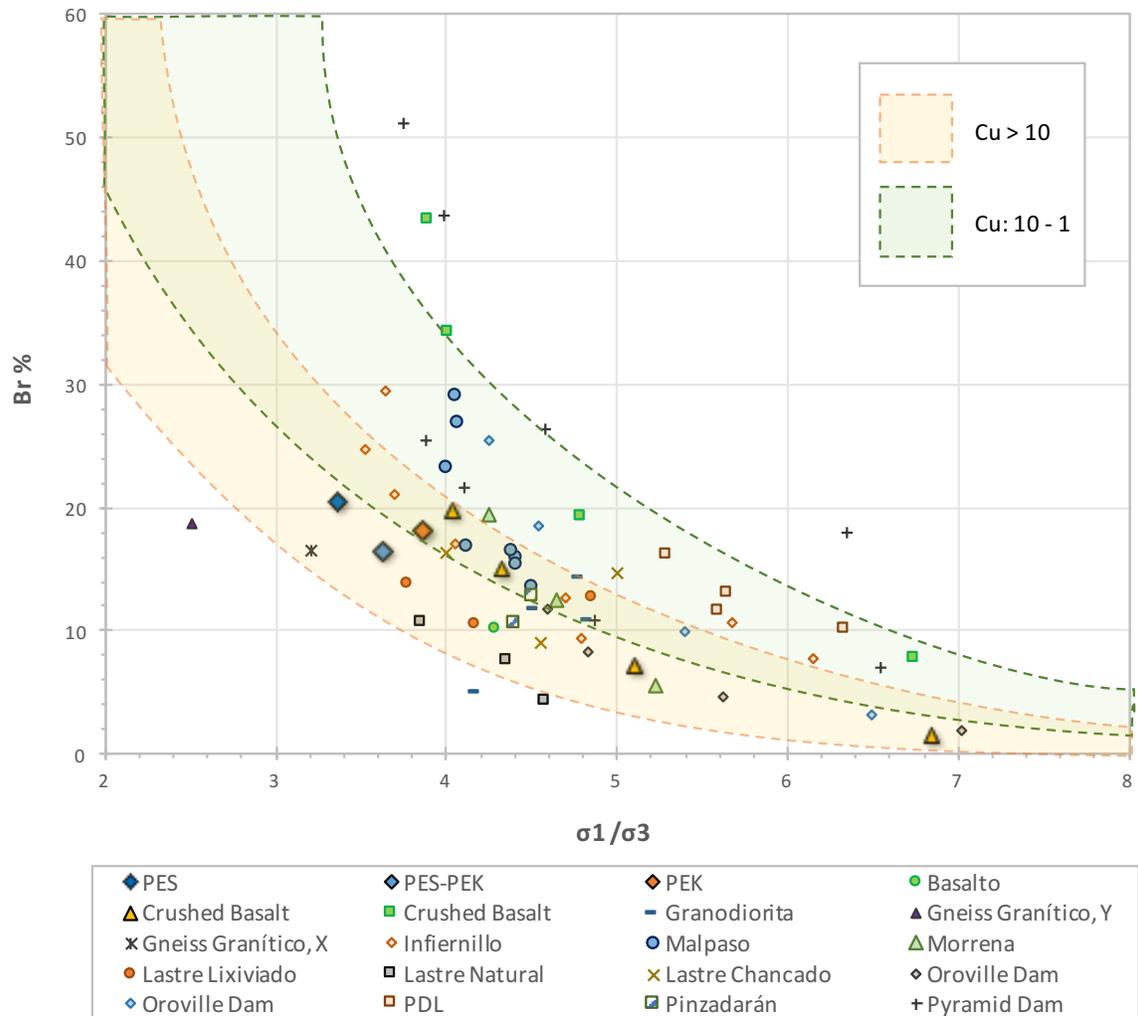


Figura 62: parámetro de rotura de Hardin “Br” v/s “ σ_1/σ_3 ”

7.2.3 Ángulo de fricción secante ϕ_{sec} versus rotura de partículas

En materiales afectados a rotura, como los materiales quebrados de esta memoria, la línea de estado último en el espacio σ - τ se comienza a curvar, por lo tanto el ángulo de fricción varía de acuerdo a la variación del estado de esfuerzos. Se emplea entonces el ángulo de fricción secante ϕ_{sec} , que se obtiene de la forma:

$$\text{sen}(\phi_{sec}) = \frac{1/2(\sigma_1 - \sigma_3)}{c \cdot \text{ctg}(\phi_{sec}) + 1/2(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (12)$$

Donde la cohesión “c” es cero por tratarse de materiales granulares. En la Figura 63 se observa como los materiales ensayados desarrollaron un bajo parámetro de ϕ_{sec} en comparación con los demás materiales que conforman la data de ensayos. La regresión lineal aplicada a la nube de datos (línea punteada central de la Figura 63) permite generar una zona donde se concentran los resultados. Considerando el parámetro B_g los resultados de los ensayos de las muestras PES y PEK se encuentran por encima de estas curvas ratificando la alta estimación de la rotura que hace B_g de los resultados.

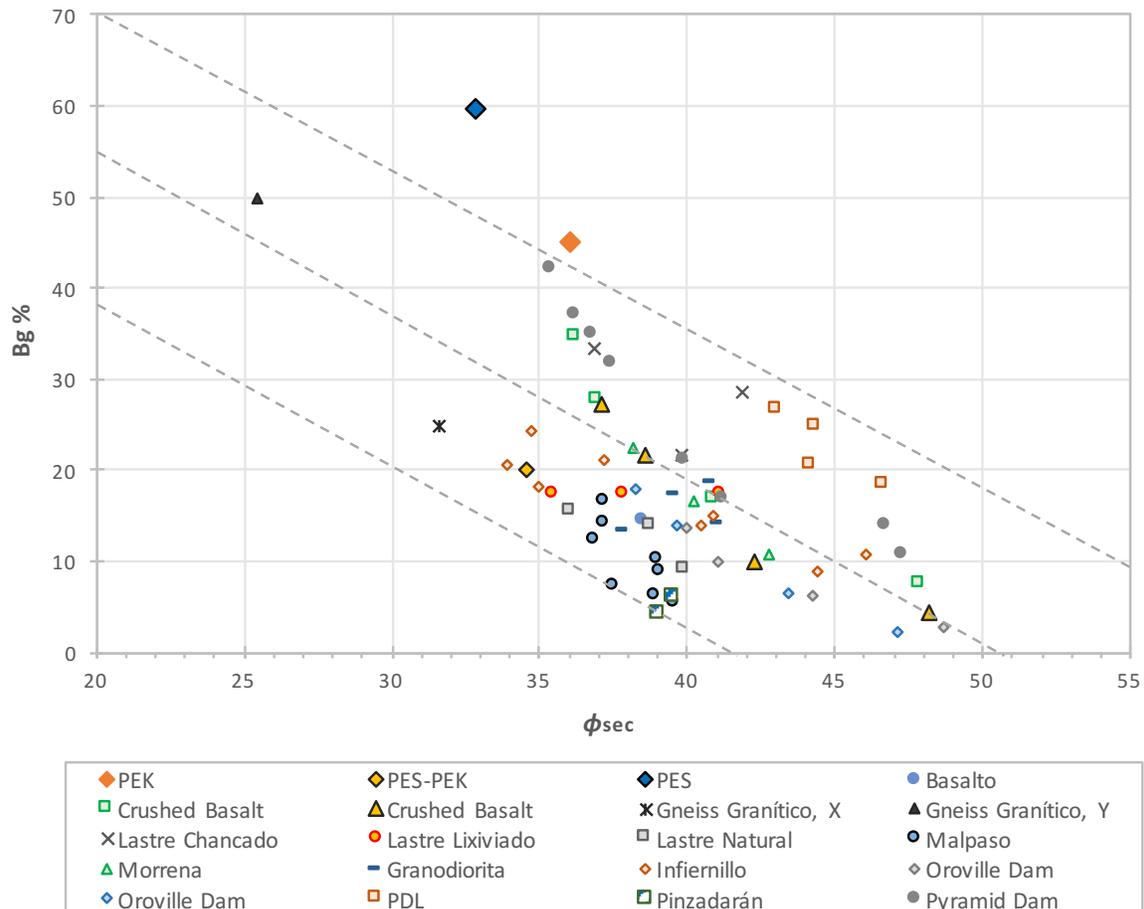


Figura 63: parámetro de rotura de Marsal “Bg” v/s “ ϕ_{sec} ”

7.3. Rotura de partículas en ensayos de grandes dimensiones

El proceso de desarme de las probetas triaxiales después de su ejecución fue planificado de forma de poder observar visualmente lo que ocurrió con el material en cada zona de la

probeta a medida que se iba retirando. Esto permitió obtener fotografías que logran describir algunos fenómenos de rotura de partículas descritos en la literatura.

En la Fig. 53 se observan 2 tipos de fragmentación, en la Figura 64 (a) se ve cómo un clasto celeste de tamaño entre 6" y 5" del ensayo PEK (100 cm x 180 cm) presenta desgaste por abrasión, sin observarse fracturas significativas en la partícula. El material alrededor del clasto presenta fragmentación de distintos niveles. En la Figura 64 (b) el clasto de tamaño entre 3" y 2" presenta fragmentación por *splitting*, observándose claramente la fractura que divide la partícula en dos.

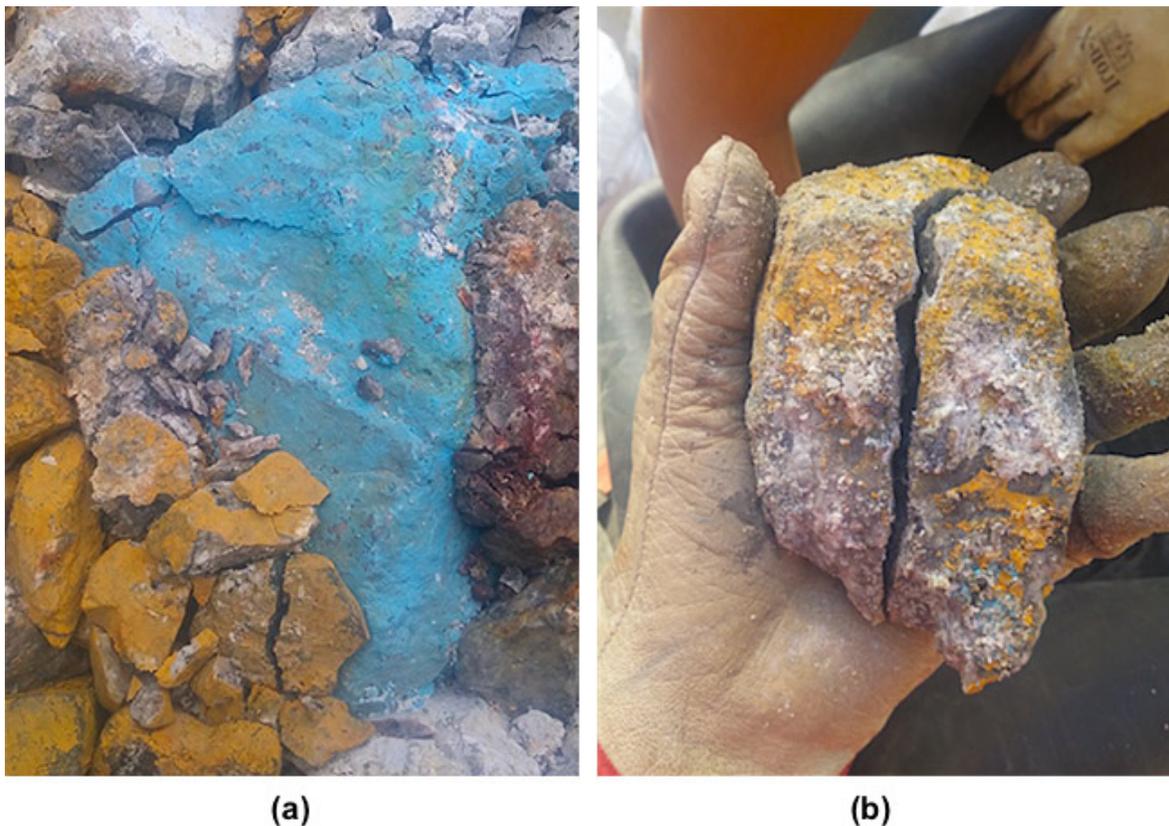


Figura 64: (a) Rotura no significativa de clasto entre 6" y 5", (b) *splitting* de clasto entre 3" y 2"

En la Figura 65 se observa como una partícula de tamaño entre 3" y 2" del ensayo de mezcla PES-PEK se encuentra parcialmente fragmentado. Si bien la partícula se encontraba bastante fragmentada, esta mantenía su forma. Esta es una característica encontrada a lo largo de toda la probeta, y no se observaron movilizaciones importantes del material de mayor tamaño. Es interesante de destacar que un fenómeno similar ha sido observado en

columnas de extracción, en la cual algunos bloques incluso pueden experimentar *desintegración* (Encina 2015), afectando considerablemente la distribución de tamaños de bloques en puntos de extracción.

Otra observación interesante es que la rotura de partículas en cada uno de los 3 ensayos se pudo apreciar no solo en las bandas de corte sino de manera generalizada en toda la probeta triaxial (apéndice - capítulo 12) Este resultado es de sumo interés en el fenómeno de fragmentación secundaria en Block Caving ya que en general se asocia una mayor fragmentación solo a lo que experimenta el material quebrado en las bandas de corte (Figura 3)

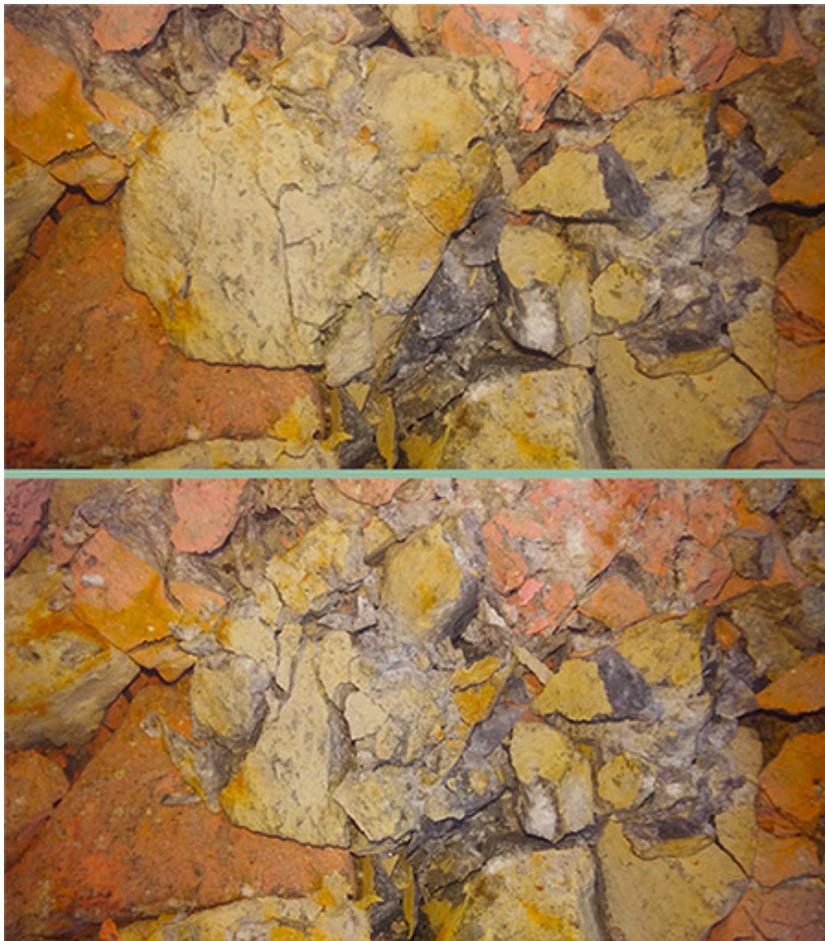


Figura 65: fragmentación casi total de clasto entre 2” y 3”

En la Figura 66 (a) se presenta una partícula de tamaño entre 2” y 1” que sufrió fragmentación total. Es interesante destacar que un alto porcentaje de partículas cuyos

tamaños se encontraban en el rango comprendido entre los tamices 2" y 1" sufrieron rotura casi total, representando un porcentaje bastante menor aquellas partículas que experimentaron *splitting*. En la misma imagen es posible observar cómo el material alrededor se encuentra altamente fragmentado. Esta situación también es posible visualizarla en la Figura 66 (b), donde una partícula ocre que inicialmente tenía un tamaño entre 3" y 2" se encuentra rodeado de material más fino.

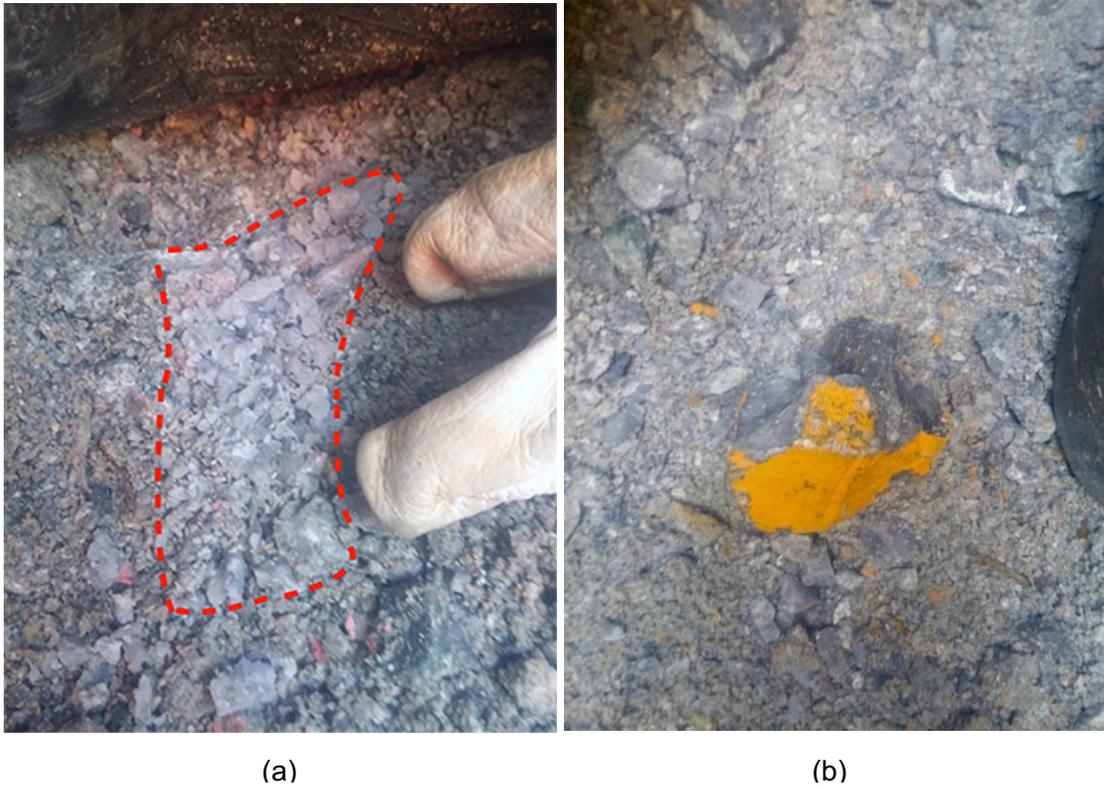


Figura 66: (a) fragmentación total de clasto entre 1" y 2". (b) partícula de tamaño 2" a 3" rodeada de partículas con alta cantidad de rotura

8. Discusión

- Varios son los autores que sostienen que ensayar muestras de suelos granulares en equipos de corte simple permite generar mucha fragmentación debido a rotura por *splitting* y abrasión. Con respecto a la falta de rotura encontrada en los ensayos de corte simple en comparación con las muestras ensayadas en ensayos triaxiales CID, el tema no parece estar del todo resuelto. Por un lado se podría decir que si a una muestra de suelo granular se le aplica un elevado confinamiento y poca deformación

de corte resulta muy eficiente la fragmentación por mecanismo de *splitting* (Mairs & Abe, 2011). Si por el contrario se continúa aumentando la deformación, las partículas comienzan a rotar y se desplazan, lo que se traduce en una pérdida de la trabazón de partículas que existía en la condición inicial y que permitían generar rotura por el mecanismo de *splitting*. En esta situación las partículas sufren solo rotura por abrasión y la generación de nueva rotura se vuelve bastante ineficiente.

- Considerando otras trayectorias de esfuerzos, por ejemplo en ensayos de compresión edométrica, estos están afectos a diferentes tipos de fragmentación; división de grano por efectos de compresión uniaxiales y mecanismos de desintegración de partículas, debido a la imposibilidad de desplazamiento interno. En este tipo de ensayos se generan muchos finos, generando una rama de granulometría fina extensa. Además se puede inferir que en los ensayos de corte simple no se van a generar tantos finos, ya que si bien hay ruptura de los bordes de las partículas (mecanismo de rotura por abrasión), una mayor cantidad de finos debe provenir de desintegración de partículas o *splitting*, lo cual debido al continuo movimiento interno del material sujeto a deformaciones por corte, es restringido en este tipo de camino de esfuerzos.
- Respecto a los ensayos triaxiales de grandes dimensiones, los cuales fueron ejecutados bajo un $\sigma_c = 20 \text{ kgf/cm}^2$ se ha podido concluir que la rotura de partículas ha sido generalizada dentro de toda la probeta sin distinguir alguna zona con mayor fragmentación que otra. Este resultado es muy interesante porque se podría inferir que el nivel de confinamiento también es significativo en cómo se generan los nuevos fragmentos luego de haber rotura. Por ejemplo, se tiene conocimiento en ensayos triaxiales CID de grandes dimensiones a presiones de confinamiento moderadas que la muestra experimenta mayor fragmentación en la parte superior que en las zonas media e inferior.
- Además, en los tres ensayos triaxiales CID de grandes dimensiones se observó un fenómeno de amortiguamiento, en el cual partículas grandes quedaban rodeadas de material fragmentado provenientes de otras partículas que configuraban una matriz fina que protegía al clasto del fracturamiento, observándose que sólo experimentaban fragmentación en los bordes de la partícula y cuyo fenómeno

reconocido en minería de block caving como *cushioning* (amortiguamiento) por Laubscher (2003).

9. Conclusiones

Esta memoria contempló el análisis de ensayos triaxiales CID de gran escala, además de ensayos de corte simple y triaxiales CID de pequeña escala, con el objetivo de analizar los mecanismos de rotura en las partículas y de estudiar el rol de los esfuerzos de corte en la rotura de partículas aplicada al fenómeno de fragmentación secundaria de materiales quebrados en minería de hundimiento masivo (Block Caving).

- Respecto a los ensayos triaxiales de grandes dimensiones, estos fueron ejecutados bajo una granulometría uniforme, presión de consolidación de 20 kgf/cm^2 y densidad suelta (1.6 t/m^3), lo cual representó un gran desafío durante la preparación y ejecución del programa de ensayo. Los resultados de estos ensayos indicaron una alta rotura de partículas debido a la uniformidad de la muestra, nivel de confinamiento, y calidad del material (material de tronadura de túnel). Sin embargo, lo más interesante obtenido es que la rotura de partículas ha sido observada en todas las zonas de la probeta después del ensayo, por lo cual, la rotura de partículas en las bandas de corte no sería significativamente diferente a las otras zonas de la probeta. Por otro lado, se espera que bajo menores confinamientos, la probeta si pueda experimentar rotura de partículas en zonas específicas de la probeta (posiblemente *splitting* en las bandas de corte y desintegración en la zona de compresión). Estos ensayos de grandes dimensiones han permitido además, corroborar algunos fenómenos observados en puntos de extracción, tal como el *cushioning* (Lauschber 2003) o *desintegración* de bloques (Encina 2015)
- Se cumplió el criterio de Kezdi en 2 de las 3 probetas confeccionadas. Para corroborar empíricamente si existió movilización de finos al interior de la probeta en todos los ensayos fueron pesados los materiales provenientes del núcleo y de la matriz fina protectora. La interfaz entre estas dos zonas quedaba fácilmente reconocible debido a la diferencia de colores (partículas pintadas del núcleo). Se encontraron variaciones leves que no superaban los +/-3 kilos. De todos modos, el desarrollo de este tipo de ensayos con granulometrías uniformes puede seguir

optimizándose, y descartar el uso de material bajo malla $\frac{3}{4}$ " procurando evitar que grandes partículas queden en contacto directo con la geomembrana.

- También se ha analizado el funcionamiento del parámetro B_g y B_r en enrocados bajo compresión triaxial CID, obteniendo que el parámetro B_g funcionaría mejor ya que entregaría menor dispersión de resultados.
- Finalmente, los resultados de ensayos de pequeña escala no permiten afirmar que en un ensayo donde primen deformaciones por corte se obtenga mayor rotura de partículas. El problema parece estar en la alta distorsión que sufre la muestra de suelo, haciendo que las partículas que lo conforman pierdan la trabazón inicial.

Por lo tanto, esta tesis experimental, en conjunto con futuras investigaciones tanto experimentales como de modelación numérica, contribuirán a un mejor entendimiento del fenómeno de fragmentación secundaria, ayudando considerablemente a mejorar los diseños de planificación en minería de Block Caving.

10. Recomendaciones

- Los materiales quebrados pueden tener formas de partículas bien particulares (cubicas, trapezoidales y planares) por lo cual se recomendarían futuros programas experimentales de ensayos edométricos y triaxiales utilizando partículas confeccionadas artificialmente en base a concreto. De ser posible sería interesante confeccionar partículas con diversos colores de forma íntegra, no solo en su exterior. Esto permitiría estimar la generación de partículas por cada rango de tamaño, y verificar patrones de fragmentación dependiendo de la forma de partículas.
- Continuar estudios relacionados a la influencia del escalamiento de tamaño de materiales quebrados a partículas de menor tamaño en base a los avances proporcionados por Hoek & Brown (1980) y Yoshinaka et al. (2008).

11. Bibliografía

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate" Annual Book of ASTM Standards, D127-12.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" Annual Book of ASTM Standards, D136-06.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) "Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table" Annual Book of ASTM Standards, D4253-00.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) "Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density" Annual Book of ASTM Standards, D4254-00.
- [5] ATKINSON, J. H., & BRANSBY, P. L., The Mechanics of Soils — An Introduction to Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1978.
- [6] BRADY, B. H., & BROWN, E. T. (2013). Rock mechanics: for underground mining. Springer Science & Business Media. Third edition.
- [7] CASTRO R. (2006). Study of the mechanisms of granular flow for block caving. Tesis de doctorado, University of Queensland, Australia
- [8] CHIK, Z. (2004) The Effect Of Fragmentation On The Engineering Properties Of Granular Materials; Laboratory And Fractal Analyses. Tesis de doctorado, University of Pittsburgh. USA.
- [9] CODELCO (2009a). Caracterización geotécnica estructural, Proyecto Mina Subterránea Chuquicamata.
- [10] CODELCO (2009b). Informe de principales decisiones. Estudio de prefactibilidad Proyecto Mina Subterránea Chuquicamata. Rev P.
- [11] CODELCO (2011). Estimación De Curvas de Fragmentación Primaria y Secundaria para el Primer Nivel de Explotación – Mina Chuquicamata Subterránea. Vicepresidencia De Proyectos Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Mayo.
- [12] CONTRERAS, L. (2011). Comportamiento friccionante de materiales granulares gruesos. Tesis Para Optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- [13] D'ESPESSAILLES, N. (2014). Estudio de la rotura de arena de tronadura de túnel minero sometida a esfuerzo de corte simple monótono. Tesis de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [14] DE LA HOZ, K. (2007). Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos, Tesis de Ingeniero Civil y Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [15] DORADOR, L., EBERHARDT, E., ELMO, D. & AGUAYO, A. (2014). Influence of secondary fragmentation and column height on block size distribution and fines migration reaching drawpoints. 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving. Santiago, Chile.
- [16] DUPLANCIC, P. & BRADY, B.H. (1999). Characterization of caving mechanisms by analysis of seismicity and rock stress, Proceedings 9th International Congress on Rock Mechanics (Paris, 1999), Vol. 2, pp. 1049-1053. Rotterdam: Balkema.
- [17] ENCINA V. (2015). Comunicación personal.
- [18] FLORES, G., KARZULOVIC, A. BROWN, E T, (2004). Current practices and trends in cave mining. En Proceedings MassMin 2004, Santiago, Chile.
- [19] GESCHE, R. (2002). Metodología de evaluación de parámetros de resistencia al corte de suelos granulares gruesos. Tesis de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [20] HANCOCK W. (2013). Gravity flow of rock in caving mines: Numerical modelling of isolated, interactive and non-ideal draw. Tesis de doctorado. The University of Queensland, Australia.
- [21] HARDIN, B. (1985). Crushing of Soil Particles. Journal of Geotechnical Engineering, 111(10):1177-1192, October.
- [22] HOEK, E y BROWN, ET (1980). Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [23] KOERNER R. (1970). Effect of Particle Characteristic on Soil Strength. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, No. 4, pp. 1221-1234
- [24] LAUBSCHER D., (1994). Cave mining – the state of the art. The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, pp 279-293.
- [25] LAUBSCHER, D.A. (2003). Cave Mining Handbook. De Beers, Johannesburg.
- [26] LADE, P. V., YAMAMURO, J. A. & BOPP, P. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. Journal of Geotechnical Engineering, 122(4):309-316.

- [27] LAMBE, W. T., & WHITMAN, R. V. (1989). *Mecánica de suelos*. Instituto Tecnológico de Massachussets, 7a reimpresión de la 2a edición, Editorial Limusa. México
- [28] LEE, K. y FARHOOMAND, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical journal*, 4(1):68-86.
- [29] LEPS, T. (1970). Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 96 (4), pp. 1159-1170.
- [30] LO, K.Y. & ROY, M. (1973). Response of particulate materials at high pressures. *Soils and Foundations*, 13(1):61-76.
- [31] LOWE, J. (1964), "Shear Strength of Coarse Embankment Dam Materials ", Proc. 8th International Congress on Large Dams, 3, 745-761
- [32] MAIRS K. & ABE S. (2011). Breaking Up: Comminution Mechanisms in Sheared Simulated Fault Gouge. *Pure Applied Geophysics* 168: 2277–2288
- [33] MARACHI, N.D., CHAN, C.K., SEED, H.B. & DUNCAN, J.M. (1969). "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials", Report No. TE-969-5, State of California Department of Water Resources, University of California, Berkeley. USA.
- [34] MARSAL, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division*. ASCE, Vol. 94 (2), pp. 22-43.
- [35] MARSAL, R.J. (1973). Mechanical properties of rockfill. Hirschfeld, R. y Poulos, S., *Embankment-dam engineering: Casagrande Volumen*. New York, Wiley, 454p.
- [36] MARSAL, R.J. (1980). *Contribución a la mecánica de medios granulares*. México, D.F., Comisión Federal de Electricidad.
- [37] MCDOWELL, G.R., BOLTON, M.D. & ROBERTSON, D. (1996). The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(12), 2079-2101.
- [38] MORRIS, H. C. (1956). Effect of particle shape and texture on the strength of noncohesive aggregates. *American society for testing and materials*, Special Technical Publication Number 254, pp. 350-363.
- [39] MOSS, A. (2011). *An Introduction to Block and Panel Caving*. Global Metals & Mining Conference. Hollywood, Florida, USA.
- [40] PIERCE, M. (2009). *Model for Gravity Flow of fragmented rock in Block Caving Mines*. PhD Thesis, The University of Queensland. Australia.
- [41] POWERS, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of sedimentary petrology* 23: 117–119.

- [42] ROWE, P.W. (1962). The stress- Dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particle in contact. Proc. Of Royal Society of London, 269 (Serie A):500-527
- [43] SCOTT, C. R. (2013). An introduction to soil mechanics and foundations. Springer.
- [44] SHAHNAZARI, H. & REZNAVI, R. (2013). Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study. Engineering Geology, 159, 98–105.
- [45] TERZAGHI, K. (1943). Theoretical soil mechanics. Wiley, 510 pp.
- [46] THIERS, G.R. & DONOVAN, T.D. (1981). Field Density Gradation and Triaxial Testing of Large- Size Rockfill for Little Blue Run Dam, Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, STP 740, R.N. Yong and F.C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, 315-325.
- [47] URBINA, F. (2015). Uso del método de gradación paralela en la determinación del comportamiento mecánico y rotura de partículas de materiales quebrados del proyecto chuquicamata subterráneo (PMCHS). Tesis de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [48] URRUTIA, J. (2016). Caracterización geotécnica y rotura de partículas bajo compresión triaxial CID de mezcla de materiales granulares de distinta resistencia aplicado a minería de block caving. Tesis de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- [49] VERDUGO, R, PETERS, G, & BEJARANO, I (2007), Evaluación de parámetros geomecánicos de suelos gruesos. VI Chilean Geotechnical conference, Valparaíso Chile
- [50] VESIC, A. S. & CLOUGH, W. (1968). Behavior of granular materials under high stresses. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94(3):661-688, May.
- [51] YOSHINAKA R., OSADA M., PARK H., SASAKI T. y SASAKI K. (2008) Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect. Engineering Geology 96 pp. 173–186.

12. Anexo: Ensayos y cálculo de parámetros de rotura.

En el presente anexo datos relevantes de cada ensayo realizado son presentados. Se muestra además como se obtuvieron algunos parámetros de rotura de los enrocados de Marsal.

12.1. Ensayos triaxiales de grandes dimensiones

12.1.1 Material PES

Altura Inicial de Confección	120	[cm]
Diámetro Inicial de Confección	61,17	[cm]
Variación Volumen drenado etapa consolidación	35991	[cm ³]
Densidad Seca de Confección	1,6	[gr/cm ³]
Humedad de Confección	0	[gr/cm ³]
Contrapresión	2	[kg/cm ²]
Presión de Cámara Total	22	[kg/cm ²]

ϵ	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$	$\Delta V/V$
[%]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[%]
0	0	20	0
0,24	2,34	22,34	-0,22
0,50	3,03	23,03	-0,28
0,75	3,99	23,99	-0,37
1,33	4,47	24,47	-0,75
2,43	6,17	26,17	-1,59
2,86	6,71	26,71	-1,97
4,06	6,69	26,69	-2,72
4,59	7,27	27,27	-3,00
4,91	7,93	27,93	-3,37
6,43	9,73	29,73	-4,21
7,63	11,38	31,38	-4,78
7,75	11,88	31,88	-4,96
8,50	13,37	33,37	-5,34
9,16	13,6	33,6	-5,62
9,52	13,97	33,97	-5,90
10,35	15,69	35,69	-6,18
11,03	16,13	36,13	-6,65
11,94	16,96	36,96	-6,93
12,77	17,71	37,71	-7,30
13,16	17,77	37,77	-7,49
13,26	17,84	37,84	-7,49
13,68	18,63	38,63	-7,68
14,45	19,26	39,26	-7,96
14,89	19,30	39,30	-8,15
15,86	20,01	40,01	-8,61
16,37	21,33	41,33	-8,89
16,82	21,70	41,70	-8,99
17,59	22,20	42,20	-9,27
18,44	23,58	43,58	-9,55
19,30	24,12	44,12	-9,83
20,10	24,26	44,26	-9,92
20,20	23,64	43,64	-10,02

12.1.2 Material PES-PEK

Altura Inicial de Confección	120	[cm]
Diámetro Inicial de Confección	61,17	[cm]
Variación Volumen drenado etapa consolidación	43255	[cm ³]
Densidad Seca de Confección	1,6	[gr/cm ³]
Humedad de Confección	0	[gr/cm ³]
Contrapresión	2	[kg/cm ²]
Presión de Cámara Total	22	[kg/cm ²]

ε [%]	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ [kgf/cm ²]	$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ [kgf/cm ²]	$\Delta V/V$ [%]
0	0	20	0
0,14	1,85	21,85	-0,19
0,19	1,85	21,85	-0,28
1,34	6,07	26,07	-1,40
1,75	6,47	26,47	-1,78
2,63	8,09	28,09	-2,72
3,52	8,29	28,29	-3,46
4,07	10,09	30,09	-3,93
4,59	10,20	30,20	-4,49
5,42	12,10	32,10	-5,15
5,99	12,30	32,30	-5,62
6,26	12,39	32,39	-5,81
7,49	13,95	33,95	-6,65
8,73	16,02	36,02	-7,58
9,52	16,29	36,29	-8,15
10,29	17,98	37,98	-8,80
10,56	18,12	38,12	-8,80
11,92	19,84	39,84	-9,74
12,29	19,95	39,95	-10,11
13,72	21,65	41,65	-10,77
15,90	23,30	43,30	-11,70
16,64	23,42	43,42	-12,17
17,45	25,07	45,07	-12,64
17,82	25,28	45,28	-12,73
18,14	25,37	45,37	-13,01
19,82	26,80	46,80	-13,48
20,10	26,23	46,23	-13,48

12.1.3 Material PEK

Altura Inicial de Confección	120	[cm]
Diámetro Inicial de Confección	61,17	[cm]
Variación Volumen drenado etapa consolidación	192171	[cm³]
Densidad Seca de Confección	1,6	[gr/cm²]
Humedad de Confección	0	[gr/cm²]
Contrapresión	2	[kg/cm²]
Presión de Cámara Total	22	[kg/cm²]

ϵ [%]	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ [kgf/cm²]	$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ [kgf/cm²]	$\Delta V/V$ [%]
0	0	20	0
0,27	1,81	21,81	-0,23
0,3	1,81	21,81	-0,26
0,35	1,81	21,81	-0,35
0,38	1,87	21,87	-0,4
0,88	3,52	23,52	-0,89
0,98	3,57	23,57	-1,03
1,12	3,69	23,69	-1,19
1,17	3,69	23,69	-1,24
1,21	3,75	23,75	-1,31
2,06	5,35	25,35	-2,22
2,12	5,41	25,41	-2,36
2,8	6,79	26,79	-3,08
2,84	6,91	26,91	-3,18
3,87	8,63	28,63	-4,09
3,97	8,7	28,7	-4,25
4,47	10,35	30,35	-4,62
4,72	10,42	30,42	-4,9
4,95	10,65	30,65	-5,16
6,03	12,07	32,07	-6,03
6,1	12,19	32,19	-6,12
6,12	12,15	32,15	-6,21
6,96	13,94	33,94	-7,05
7,04	13,96	33,96	-7,19
7,64	15,61	35,61	-7,64
7,81	15,61	35,61	-7,78
7,95	15,66	35,66	-7,89
8,16	15,61	35,61	-8,10
9,03	17,24	37,24	-8,69
9,58	17,3	37,3	-9,16
10,36	18,87	38,87	-9,69
10,69	18,92	38,92	-9,97
11,9	20,66	40,66	-10,67
12,08	20,72	40,72	-10,86
12,13	20,77	40,77	-10,86
12,48	22,22	42,22	-11,07
13,28	22,21	42,21	-11,54
13,41	22,20	42,2	-11,63
14,61	23,77	43,77	-12,26

Continuación

ε [%]	q [kgf/cm ²]	p [kgf/cm ²]	$\Delta V/V$ [%]
14,73	23,77	43,77	-12,38
15,55	25,3	45,3	-12,78
15,88	25,38	45,38	-12,99
16,81	26,72	46,72	-13,17
17,56	26,71	46,71	-13,36
18,24	28,14	48,14	-13,5
19,15	28,03	48,03	-13,78
19,72	27,75	47,75	-13,85
20,44	28,61	48,61	-13,94

12.2. Ensayos triaxiales de laboratorio

12.2.1 PES

ε [%]	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ [kgf/cm ²]	$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ [kgf/cm ²]	$\Delta V/V$ [%]
0	0	6	0
0,13	0,20	6,13	-0,03
0,26	0,36	6,24	-0,07
0,39	0,51	6,34	-0,11
0,52	0,75	6,50	-0,20
0,65	0,97	6,65	-0,31
0,78	1,19	6,79	-0,46
0,91	1,29	6,86	-0,52
1,04	1,44	6,96	-0,66
1,17	1,57	7,05	-0,75
1,30	1,72	7,15	-0,88
1,55	1,95	7,30	-1,08
1,82	2,20	7,46	-1,30
2,08	2,40	7,60	-1,51
2,34	2,61	7,74	-1,74
2,60	2,81	7,87	-1,93
3,12	3,16	8,11	-2,30
3,64	3,50	8,33	-2,67
4,15	3,79	8,53	-3,02
4,67	4,05	8,70	-3,33
5,23	4,35	8,90	-3,74
6,49	4,90	9,26	-4,49
7,79	5,40	9,60	-5,18
9,09	5,88	9,92	-5,81
10,66	6,36	10,24	-6,51
11,69	6,66	10,44	-6,94
12,99	7,03	10,68	-7,47
15,59	7,71	11,14	-8,44
18,18	8,36	11,57	-9,28
20,45	8,87	11,91	-9,93

12.2.2 PEK

ε [%]	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ [kgf/cm ²]	$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ [kgf/cm ²]	$\Delta V/V$ [%]
0	0	6	0
0,13	0,13	6,09	-0,02
0,26	0,28	6,19	-0,04
0,39	0,37	6,25	-0,07
0,52	0,38	6,26	-0,10
0,65	0,56	6,37	-0,14
0,78	0,83	6,55	-0,22
0,91	0,99	6,66	-0,30
1,04	1,16	6,77	-0,41
1,16	1,30	6,87	-0,52
1,30	1,43	6,96	-0,63
1,55	1,69	7,13	-0,84
1,82	1,93	7,28	-1,05
2,07	2,15	7,43	-1,26
2,34	2,36	7,58	-1,45
2,59	2,55	7,70	-1,64
3,12	2,92	7,95	-2,03
3,64	3,26	8,17	-2,39
4,15	3,56	8,37	-2,70
4,67	3,84	8,56	-3,02
5,19	4,11	8,74	-3,33
6,49	4,69	9,13	-4,05
7,78	5,21	9,47	-4,69
9,08	5,66	9,77	-5,24
10,38	6,08	10,05	-5,82
11,89	6,53	10,36	-6,41
12,97	6,87	10,58	-6,81
15,57	7,52	11,02	-7,65
18,16	8,16	11,44	-8,40
20,76	8,73	11,82	-9,04

12.3. Estimación de parámetros de rotura, data recopilada.

Tabla 14: ensayo de corte simple en muestra PEK (D'Espessailles 2014)

PEK		Original	$\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$		$\sigma_c = 3 \text{ kgf/cm}^2$		$\sigma_c = 7 \text{ kgf/cm}^2$	
Malla	mm	% P	% P	ΔW	% P	ΔW	% P	ΔW
#4	4,75	100	100	-	100	-	100	-
#6	2,36	13,25	23,36	10,11	16,35	3,10	25,69	12,44
#8	2	0	4,59	-5,53	5,49	2,39	10,20	-2,24
#10	0,6		0,94		1,71		1,88	
#16	0,425		0,81		1,39		1,25	
#20	0,3		0,72		1,21		0,90	
#30	0,15		0,59		0,93		0,44	
#50	0,075		0,44		0,51		0,19	
			Bp	329,8	Bp	329,8	Bp	329,8
			Bt	19,0	Bt	10,9	Bt	27,9
			Br	5,8%	Br	3,3%	Br	8,5%
			Bg	10,1%	Bg	5,5%	Bg	12,4%

Tabla 15: ensayo de corte simple en muestra PES (D'Espessailles 2014)

PES		Original	$\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$		$\sigma_c = 3 \text{ kgf/cm}^2$		$\sigma_c = 7 \text{ kgf/cm}^2$	
Malla	mm	% P	% P	ΔW	% P	ΔW	% P	ΔW
#4	4,75	100	100	-	100	-	100	-
#6	2,36	14,50	38,90	24,40	21,24	6,74	41,47	26,97
#8	2	0	11,91	-12,49	12,01	5,27	20,17	-6,80
#10	0,6		2,96		3,38		4,44	
#16	0,425		2,11		2,37		2,83	
#20	0,3		1,62		1,76		1,90	
#30	0,15		1,01		1,07		0,83	
#50	0,075		0,73		0,62		0,38	
			Bp	328,1	Bp	328,1	Bp	328,1
			Bt	47,0	Bt	23,2	Bt	59,1
			Br	14,3%	Br	7,1%	Br	18,0%
			Bg	24,4%	Bg	12,0%	Bg	27,0%

Tabla 16: muestra Infiernillo (a) (Marsal 1965)

Infiernillo		N° 34, $\sigma_c = 0,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 37, $\sigma_c = 1,88 \text{ kgf/cm}^2$			N° 40, $\sigma_c = 4,88 \text{ kgf/cm}^2$			N° 53, $\sigma_c = 4,88 \text{ kgf/cm}^2$		
		% que pasa			% que pasa			% que pasa			% que pasa		
Malla	mm	Original	Final	ΔW	Original	Final	ΔW	Original	Final	ΔW	Original	Final	ΔW
8"	203,04	100	100	-	100	100	-	100	100	-	100	100	-
7"	177,8	95	97	2	95	97,9	2,9	91,6	95,2	3,6	93,9	96,7	2,8
3 1/2"	88,9	58,6	68,8	8,2	58,6	66,7	5,2	45,6	60,7	11,5	50,1	64,1	11,2
1 1/2"	38,1	31,7	38,5	-3,4	31,7	40,5	0,7	19	26,6	-7,5	21,2	34,7	-0,5
3/4"	19,05	15,8	17,8	-4,8	15,8	23,7	-0,9	7,3	11,9	-3	9,2	16,4	-6,3
3/8"	9,5	8,6	10,3	-0,3	8,6	13,5	-3	4,7	6,2	-3,1	4,7	8,6	-3,3
1/4"	6,3	6	8,3	0,6	6	8,8	-2,1	4	4,4	-1,1	3,2	5,8	-1,3
<1/4"	-	0	0	-2,3	0	0	-2,8	2	0	-2,4	0	0	-2,6
		Bp	7499,7		Bp	7499,7		Bp	9194,9		Bp	8646,6	
		Bt	1107		Bt	1187		Bt	1602		Bt	1741	
		Br	15%		Br	16%		Br	17%		Br	20%	
		Bg	10,8%		Bg	8,8%		Bg	15,1%		Bg	14,0%	

Tabla 17: muestra Infiernillo (b) (Marsal 1965)

Infiernillo		N° 44, $\sigma_c = 9,98 \text{ kgf/cm}^2$			N° 57, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 58, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 73, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$		
		% que pasa			% que pasa			% que pasa			% que pasa		
Malla	mm	Original	Final	ΔW									
8"	203,04	100	100	-	100	100	-	100	100	-	100	100	-
7"	177,8	97,3	98,4	1,1	95,8	97,3	1,5	97	99	2	95,6	98,4	2,8
3 1/2"	88,9	47,4	68,6	20,1	60,8	78,2	15,9	62,7	84,2	19,5	58,2	78,9	17,9
1 1/2"	38,1	20,5	37,2	-4,5	32,2	50,3	0,7	33,2	57,6	2,9	31,2	51,4	-0,5
3/4"	19,05	9,5	19,4	-6,8	14,9	30	-3	17,9	38,6	-3,7	14,9	32,4	-2,7
3/8"	9,5	5,3	10,7	-4,5	7,7	17,2	-5,6	10,6	25,1	-6,2	8,1	20,2	-5,4
1/4"	6,3	3,7	7,3	-1,8	5,2	11,9	-2,8	7,1	18,6	-3	5,6	14,6	-3,1
<1/4"	-	0	0	-3,6	0	0	-6,7	0	0	-11,5	0	0	-9
		Bp	8656,7		Bp	7302,8		Bp	7002,2		Bp	7527,5	
		Bt	2309		Bt	2220		Bt	2875		Bt	2653	
		Br	27%		Br	30%		Br	41%		Br	35%	
		Bg	21,2%		Bg	18,1%		Bg	24,4%		Bg	20,7%	

Tabla 18: muestra Malpaso (a) (Marsal 1965)

Malpaso		N° 47, $\sigma_c = 9,98 \text{ kgf/cm}^2$			N° 48, $\sigma_c = 9,98 \text{ kgf/cm}^2$			N° 50, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 54, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$		
		% que pasa			% que pasa			% que pasa			% que pasa		
Malla	mm	Original	Final	ΔW									
8"	203,04	100	100	-	100	100	-	100	100	-	100	100	-
7"	177,8	95	96,9	1,9	94,8	97,3	2,5	93,7	98,5	4,8	92,3	97,4	5,1
3 1/2"	88,9	80	83,8	1,9	76,8	84,7	5,4	74,4	83,9	4,7	72,3	84,4	7
1 1/2"	38,1	61,2	69,7	4,7	59,7	68,6	1	56,1	67,8	2,2	54,5	71,2	4,6
3/4"	19,05	45,1	55,4	1,8	46,4	53,2	-2,1	40,5	52,8	0,6	39,3	55,5	-0,5
3/8"	9,5	34,2	40,8	-3,7	36,1	39,9	-3	30,4	41,6	-1,1	29,2	43,1	-2,3
1/4"	6,3	28,5	31,7	-3,4	31,1	32,9	-2	25,3	35,4	-1,1	24,2	35,6	-2,5
<1/4"	-	0	0	-3,2	0	0	-1,8	0	0	-10,1	0	0	-11,4
		Bp	4356,4		Bp	4608,8		Bp	5095,0		Bp	5404,0	
		Bt	865		Bt	1130		Bt	1610		Bt	2058	
		Br	20%		Br	25%		Br	32%		Br	38%	
		Bg	10,3%		Bg	8,9%		Bg	12,3%		Bg	16,7%	

Tabla 19: muestra Malpaso (b) (Marsal 1965)

Malpaso		N° 64, $\sigma_c = 29,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 66, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 67, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$			N° 68, $\sigma_c = 24,9 \text{ kgf/cm}^2$		
		% que pasa			% que pasa			% que pasa			% que pasa		
Malla	mm	Original	Final	ΔW									
8"	203,04	100	100	-	100	100	-	100	100	-	100	100	-
7"	177,8	97,5	99,4	1,9	99,5	99,9	0,4	99,9	99,9	0	99,4	99,6	0,2
3 1/2"	88,9	81,8	90	6,3	90,1	92,7	2,2	91,9	94	2,1	92,8	94,5	1,5
1 1/2"	38,1	63,1	75	3,7	78,8	82,9	1,5	82,2	85,7	1,4	84	86,4	0,7
3/4"	19,05	45	59,2	2,3	60,9	68,2	3,2	66	72,2	2,7	70,4	74,6	1,8
3/8"	9,5	33,2	46,4	-1	48,7	55,6	-0,4	53,8	60	0	57,9	63,3	1,2
1/4"	6,3	27	38,8	-1,4	41,4	47,4	-0,9	46,1	52	-0,3	49,3	52,8	-1,9
<1/4"	-	0	0	-11,8	0	0	-6	0	0	-5,9	0	0	-3,5
		Bp	4031,8		Bp	2440,4		Bp	2060,1		Bp	1868,7	
		Bt	1403		Bt	506		Bt	407		Bt	314	
		Br	35%		Br	21%		Br	20%		Br	17%	
		Bg	14,2%		Bg	7,3%		Bg	6,2%		Bg	5,4%	

Tabla 20: otros ensayos (Marsal 1973)

$\sigma_c = 25 \text{ kgf/cm}^2$		Basalto			Gneis Granítico, X			Gneis Granítico, Y		
		% que pasa			% que pasa			% que pasa		
Malla	mm	Original	Final	ΔW	Original	Final	ΔW	Original	Final	ΔW
7"	177,8	100	100	-	95	97,3	-	92	97	-
3 1/2"	88,9	86	95	9	64	83	16,7	30	75	40
1 1/2"	38,1	71	78	-2	38	65,3	8,3	0	55	10
3/4"	19,05	59	66	0	24	46	-5,3		36	
3/8"	9,5	47	52	-2	14,5	34	-2,5		14,5	
1/4"	6,3	40	45	0	11,2	28	-2,7		11,5	
#4	4,76	35	44	4	7	23,5	-0,3		7,6	
#8	2,38	23,5	32,5	0	5,8	20,1	-2,2		5,4	
#16	1,19	11,5	18	-2,5	4,7	13	-6		3,8	
#30	0,595	0	7,9	1,4	3,6	8,3	-3,6		2,4	
#50	0,30		5		2,5	4,6			1,5	
#200	0,1		1,5		2	3			0,6	
		Bp	3479,3		Bp	7256,8		Bp	11585,1	
		Bt	1061		Bt	2930		Bt	5950	
		Br	31%		Br	40%		Br	51%	
		Bg	14,4%		Bg	25%		Bg	50%	

Tabla 21: resumen de parámetros de rotura de data recopilada para ensayos de grandes dimensiones.

Autor	Material	Diám. [cm]	σ_3 [kgf/cm²]	B_r [%]	B_g [%]	C_u	σ_1/σ_3
Marsal	Malpaso	113	24,9	19,7	6,2	112,0	4,4
Marsal	Pinzadarán	113	16,9	16,1	6,3	107,0	4,5
Marsal	Pinzadarán	113	25,9	13,9	4,5	92,0	4,4
Marsal	Malpaso	113	24,9	16,8	5,4	91,0	4,5
Marsal	Malpaso	113	24,9	20,7	7,3	82,8	4,1
Marsal	Malpaso	113	9,9	24,5	8,9	77,0	4,4
Marsal	Malpaso	113	24,9	34,8	14,2	49,3	4,1
Marsal	Malpaso	113	24,9	38,1	16,7	37,8	4,1
Marachi	Oroville Dam	31	2	3,5	2,7	36,7	7,0
Marachi	Oroville Dam	31	10	9,0	6,3	36,7	5,6
Marachi	Oroville Dam	31	30	16,0	10,1	36,7	4,8
Marachi	Oroville Dam	31	45	22,3	13,6	36,7	4,6
Marsal	Malpaso	113	24,9	31,6	12,3	35,6	4,0
Marsal	Malpaso	113	9,9	19,9	10,3	33,5	4,4
SRK	Granodiorita	100	8	16,4	13,5	29,6	4,2
SRK	Granodiorita	100	15	22,8	14,3	29,6	4,8
SRK	Granodiorita	100	20	30,1	17,5	29,6	4,5
SRK	Granodiorita	100	25	32,2	18,9	29,6	4,8
SRK	Morrena	100	10	9,2	10,7	28,8	5,2
SRK	Morrena	100	15	29,1	16,7	28,8	4,6
SRK	Morrena	100	20	37,9	22,6	28,8	4,2
Marsal	Basalto	113	25	30,5	14,4	18,6	4,3
SRK	Lastre Lixiviado	100	10	28,4	15,8	17,5	4,2
SRK	Lastre Lixiviado	100	15	33,1	18,8	17,5	4,9
SRK	Lastre Lixiviado	100	25	32,6	18,4	17,5	3,8
SRK	Lastre Natural	100	5	16,5	9,2	16,9	4,6
SRK	Lastre Natural	100	10	26,9	13,9	16,9	4,4
SRK	Lastre Natural	100	20	28,1	15,5	16,9	3,9
Marachi	Oroville Dam	92	2	5,5	2,2	14,4	6,5
Marachi	Oroville Dam	92	10	14,4	6,4	14,4	5,4
Marachi	Oroville Dam	92	30	23,3	14,0	14,4	4,5
Marachi	Oroville Dam	92	45	32,1	18,0	14,4	4,3
Marsal	Gneiss Granítico, X	113	25	40,4	25,0	13,4	3,2
SRK	Lastre Chancado	100	10	33,9	21,6	9,2	4,6
SRK	Lastre Chancado	100	16	42,6	28,6	9,2	5,0

Continuación

Autor	Material	Diám. [cm]	σ_3 [kgf/cm²]	B_r [%]	B_g [%]	C_u	σ_1/σ_3
SRK	Lastre Chancado	100	25	48,0	33,3	9,2	4,0
Marachi	Pyramid Dam	92	2	26,1	14,0	8,5	6,3
Marachi	Pyramid Dam	92	10	35,3	21,1	8,5	4,6
Marachi	Pyramid Dam	92	30	53,7	35,1	8,5	4,0
Marachi	Pyramid Dam	92	45	61,7	42,1	8,5	3,8
Marachi	Crushed Basalt	92	2	12,9	7,6	8,5	6,7
Marachi	Crushed Basalt	92	10	28,2	17,0	8,5	4,8
Marachi	Crushed Basalt	92	30	46,4	27,7	8,5	4,0
Marachi	Crushed Basalt	92	45	58,8	34,6	8,5	3,9
Marsal	Infiernillo	113	0,9	14,8	10,8	8,4	6,2
Marsal	Infiernillo	113	1,9	15,8	8,8	8,4	5,7
Marsal	Infiernillo	113	24,9	41,1	24,4	8,4	3,6
SRK	PDL	100	10	29,3	18,5	8,1	6,3
SRK	PDL	100	15	31,1	20,7	8,1	5,6
SRK	PDL	100	20	36,3	24,9	8,1	5,6
SRK	PDL	100	25	41,6	26,7	8,1	5,3
Marachi	Pyramid Dam	31	2	14,1	10,8	7,2	6,5
Marachi	Pyramid Dam	31	10	28,1	17,0	7,2	4,9
Marachi	Pyramid Dam	31	30	49,0	31,9	7,2	4,1
Marachi	Pyramid Dam	31	45	53,7	37,2	7,2	3,9
Marachi	Crushed Basalt	31	2	2,9	4,5	7,2	6,8
Marachi	Crushed Basalt	31	10	15,5	9,9	7,2	5,1
Marachi	Crushed Basalt	31	30	33,5	21,6	7,2	4,3
Marachi	Crushed Basalt	31	45	41,3	27,2	7,2	4,0
Marsal	Infiernillo	113	24,9	35,2	20,7	7,1	3,5
Marsal	Infiernillo	113	24,9	30,4	18,1	6,8	3,7
Marsal	Infiernillo	113	4,9	20,1	14,0	5,2	4,7
Marsal	Infiernillo	113	9,9	26,7	21,2	5,0	4,1
Marsal	Infiernillo	113	4,9	17,4	15,1	4,9	4,8
Marsal	Gneiss Granítico, Y	113	25	51,4	50,0	2,5	2,5
PMCHS	PES-PEK	60	20	36,1	20,2	2,3	3,6
PMCHS	PEK	100	20	48,0	45,2	2,2	3,9
PMCHS	PES	60	20	50,0	59,7	1,8	3,4

13. Anexo: Fotografías ensayos triaxiales grandes dimensiones



Figura 67: desarme ensayo N°3 PES-PEK (60x120)



Figura 68: desarme ensayo N°4 PEK (100x180)

En la Figura 68 se observa como la cohesión aparente del material más fino permite que el desarme se realice quitando la geomembrana; esto permite retirar la capa de finos protectora por lonjas de material como se aprecia en la última imagen.