



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

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y ROTURA DE ARENA
DE TRONADURA DE TÚNEL MINERO SOMETIDA A
ESFUERZO DE CORTE SIMPLE MONÓTONO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NATALIA ESPERANZA D'ESPESSAILLES TAPIA

**PROFESOR GUÍA:
LEONARDO DORADOR ORTIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CÉSAR PASTÉN PUCHI
LENART GONZÁLEZ LAGOS**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: NATALIA ESPERANZA D'ESPESSAILLES TAPIA
FECHA: 19-08-2014
PROF. GUÍA: SR. LEONARDO DORADOR O.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y ROTURA DE ARENA DE TRONADURA DE TÚNEL MINERO SOMETIDA A ESFUERZO DE CORTE SIMPLE MONÓTONO

La resistencia y el comportamiento tensión-deformación de arenas provenientes de procesos de tronadura de roca o minería de hundimiento masiva (*block caving*) podrían diferir significativamente de las arenas transportadas y que han sufrido procesos de meteorización geológica. Investigaciones relacionadas al comportamiento de arenas de tronadura son muy escasas pero de gran interés en la industria minera.

Estas arenas, al provenir directamente de la desintegración de rocas, poseen una mayor probabilidad de rotura que las arenas transportadas, debido a las microfisuras generadas en el proceso de formación. Esto se traduce en la necesidad de ejecutar una investigación que estudie el comportamiento de este material considerando la rotura de partículas.

En este trabajo se estudiaron 5 muestras de tronadura de túnel provenientes del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS). Estos materiales difieren entre sí por su procedencia geológica y la dureza de sus partículas. Se realizaron 6 ensayos de corte simple monótono en estado seco junto con granulometrías post ensayo para cada material. El tamaño de partículas utilizado es de 2,00 a 4,76 mm, clasificando al suelo como arena pobremente graduada con partículas angulosas. Los ensayos se realizaron a densidades relativas de 0 y 100% y cargas verticales de 1, 3 y 7 kg/cm².

A pesar de utilizar esfuerzos verticales de baja magnitud se observó una cantidad importante de rotura de partículas. Esto se produjo debido a que el material está conformado por partículas angulares no meteorizadas, con una granulometría uniforme, además de la gran deformación alcanzada durante el ensayo de corte simple. En general, el material posee un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento sin un ángulo de fricción *peak* notorio junto con una disminución del ángulo de fricción asociada al aumento del confinamiento. Además, se observa una dependencia del comportamiento volumétrico con respecto a la densidad relativa; la cual no generó mayor influencia en la resistencia del material.

El comportamiento de una arena de tronadura de túnel difiere del observado en una arena natural cuyas partículas sí sufrieron un proceso de transporte y desgaste. Al momento de caracterizar geotécnicamente estos suelos se deben tratar como materiales diferentes.

Agradecimientos:

Primero que todo agradezco a mis padres, quienes se han esforzado toda su vida para salir a delante y darnos a mis hermanos y a mí todo lo que se necesita para ser felices. Agradezco a mi madre, quien con su ejemplo de esfuerzo y perseverancia me ha enseñado que ningún objetivo es imposible. Agradezco a mi padre, quien se ha esforzado toda su vida por nosotros y me ha enseñado a disfrutar las cosas simples de la vida. Gracias a ellos por estar conmigo durante estos seis años y medio de estudio y darme el apoyo necesario para terminar exitosamente esta etapa.

Como no agradecer también a Amanda y a Claudio por soportarme en los momentos de mayor estrés y por alegrarme con sus tonterías cuando más lo necesité. Agradezco a mis hermanos, Amanda y Yerko, por los momentos de risas sin sentido que alegran la vida.

Agradezco a mi grupito de amigos que ya son 6 años y medio que nos conocemos y han hecho que mi paso por la U esté lleno de buenos recuerdos, gracias por ser mis amigos y por estar siempre ahí.

Agradezco a Omar y Mario del laboratorio mecesup por su apoyo mientras estuve realizando los ensayos. También quiero agradecer a toda la gente que con un granito de arena ayudo en la realización de este trabajo, a los geólogos que me apoyaron con las muestras, a la gente de mi trabajo y a todos quien con alguna palabra de apoyo y una conversación me ayudaron a seguir adelante y no rendirme.

A los profesor Cesar y Lenart agradezco por sus comentarios y sugerencias que me permitieron mejorar este trabajo.

Por último, mi mayor agradecimiento es hacia mi profesor Guía, Leonardo Dorador, quien fue fundamental en el desarrollo de esta memoria, me guio en cada etapa y fue un gran apoyo en todo momento. Agradezco su entusiasmo y dedicación con esta investigación.

Muchas gracias!!

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1.	OBJETIVOS GENERALES	2
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.	MARCO TEÓRICO	3
2.1.	COMPORTAMIENTO DE ARENA BAJO ESFUERZO DE CORTE SIMPLE MONÓTONO	3
2.1.1.	Equipo de corte simple	3
2.1.2.	Comportamiento tensión-deformación	6
2.1.3.	Influencia de la rotura de partículas en el comportamiento tensión - deformación	10
2.2.	ROTURA DE PARTÍCULAS EN SUELOS GRANULARES.....	13
2.2.1.	Parámetros del suelo y su relación con la rotura de partículas	13
2.2.2.	Cuantificadores de rotura	19
2.2.3.	Mecanismos de rotura	22
2.2.4.	Rotura de partículas tipo fractal	22
3.	MATERIALES ENSAYADOS	24
3.1.	QIS: Cuarzo Igual a Sericita	28
3.2.	QMS: Cuarzo Mayor a Sericita	29
3.3.	PEK: Pórfido Este Potásico	31
3.4.	PES: Pórfido Este Sericítico	32
3.5.	FRÁGIL	34
4.	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS.....	38
4.1.	PROGRAMA DE ENSAYOS	38
4.2.	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	38
4.2.1.	Aparato de corte simple	38
4.2.2.	Equipo compresión simple	41
4.3.	METODOLOGÍA DE ENSAYOS	42
5.	RESULTADOS	45
5.1.	TENSIÓN-DEFORMACIÓN Y CAMBIO VOLUMÉTRICO.....	46
5.1.1.	Repetitividad de ensayos.....	47
5.1.2.	Resultados de ensayos en cuarzo igual a sericita QIS	48

5.1.3.	Resultados de ensayos en cuarzo mayor a sericita QMS	50
5.1.4.	Resultados de ensayos en pórfido este potásico PEK	51
5.1.5.	Resultados de ensayos en pórfido este sericítico PES.....	53
5.1.6.	Resultados de ensayos en FRÁGIL.....	54
5.2.	ÁNGULO DE FRICCIÓN.....	56
5.3.	ROTURA DE PARTÍCULAS.....	59
5.3.1.	Granulometrías post ensayo según muestra	59
5.3.2.	Granulometrías post ensayo según densidad y carga vertical	68
5.3.3.	Parámetros de rotura.....	70
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
6.1.	COMPARACIÓN ARENA NATURAL VERSUS ARENA ARTIFICIAL	73
6.1.1.	Comportamiento tensión-deformación y volumétrico.....	73
6.1.2.	Ángulo de fricción	79
6.1.3.	Rotura de partículas	80
6.2.	INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS EN LA RESPUESTA DE LOS MATERIALES ENSAYADOS	82
6.2.1.	Carga vertical.....	83
6.2.2.	Densidad relativa	83
6.2.3.	Resistencia de las partículas	84
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
7.1.	CONCLUSIONES.....	85
7.2.	RECOMENDACIONES	87
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	88

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros intrínsecos de los materiales ensayados	26
Tabla 2: Caracterización de curvas granulométricas para las 5 muestras	37
Tabla 3: Porcentaje de minerales por muestra	37
Tabla 4: Denominación de ensayos de corte simple	38
Tabla 5: Densidad relativa post consolidación para todos los ensayos realizados	45

Índice de ilustraciones

Figura 1: Esquema de la probeta utilizada en dos aparatos de corte simple	4
Figura 2: Diagrama de corte simple	4
Figura 3: Diferencia entre corte simple y corte puro.....	4
Figura 4: Distribución de esfuerzos en el aparato NGI (Roscoe, 1953)	5
Figura 5: Zona de ruptura en el aparato cilíndrico de NGI (Budhu, 1984).....	5
Figura 6: Desarrollo de la razón de esfuerzo en tres sectores de la muestra ensayada, aparato NGI (Budhu, 1984)	6
Figura 7: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%). Cole (1967)	7
Figura 8: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%). Cole (1967).....	7
Figura 9: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=4%), Stroud (1971)	8
Figura 10: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=4%), Stroud (1971)	8
Figura 11: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%), Budhu (1979)	9
Figura 12: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%), Budhu (1979).....	9
Figura 13: Componentes del ángulo de fricción máximo (Mitchell, 1993)	12
Figura 14: Influencia de la granulometría inicial en la rotura de partículas (Lee y Farhoomand, 1967).....	14
Figura 15: Influencia de la granulometría inicial en la rotura de partículas en ensayos de compresión isótropa (Lee y Farhoomand, 1967).....	15
Figura 16: Efecto de la forma de las partículas en la rotura de partículas (Lee y Farhoomand, 1967).....	15
Figura 17: Efecto de la forma de las partículas en ensayo de compresión unidimensional (Nakata et al., 2001).....	16
Figura 18: Granulometrías post ensayos triaxiales para óxido de aluminio (izquierda) y piedra caliza (derecha) (Lo y Roy, 1973)	17
Figura 19: Efecto de la presión de confinamiento en la evolución de la curva granulométrica en arena de Cambria en ensayos triaxiales drenados (Lade et al., 1996)	17
Figura 20: Parámetro de rotura relativa de Hardin para diferentes grados de deformación por corte (Valdes y Leleu, 2008).....	19
Figura 21: Definición del Potencial de Rotura Hardin, 1985.....	20
Figura 22: Definición de rotura total Hardin, 1985.....	21

Figura 23: Granulometría post ensayo de corte simple en arena de Ottawa en escala log-log (Guimaraes et al., 2007)	23
Figura 24: Diagrama del rajo abierto de Chuquicamata y los 4 niveles de extracción de la nueva mina subterránea (Codelco, 2009).....	24
Figura 25: Ubicación de las unidades geotécnicas QIS (1), QMS (2), PEK (3) y PES (4) (Codelco, 2009).....	25
Figura 26: Distribución de resultados de compresión individual muestra QIS.....	28
Figura 27: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra QIS ..	29
Figura 28: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material QIS	29
Figura 29: Distribución de resultados de compresión individual muestra QMS.....	30
Figura 30: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra QMS	30
Figura 31: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material QMS.....	30
Figura 32: Distribución de resultados de compresión individual muestra PEK.....	31
Figura 33: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra PEK .	32
Figura 34: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material PEK.....	32
Figura 35: Distribución de resultados de compresión individual muestra PES.....	33
Figura 36: Muestra litológica (arriba), material preparado (abajo), muestra PES	34
Figura 37: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material PES.....	34
Figura 38: Distribución de resultados de compresión individual muestra FRÁGIL	35
Figura 39: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra FRÁGIL	35
Figura 40: Distribución granulométrica inicial de 2 muestras de material FRÁGIL.....	36
Figura 41: Comparación de densidades mínimas y máximas para los 4 materiales	36
Figura 42: Ensayos de prueba en máquina de corte simple	39
Figura 43: Fotografía equipo de corte simple	40
Figura 44: Equipo compresión simple	41
Figura 45: Muestra ensayada en equipo de compresión.....	42
Figura 46: Densidad relativa post consolidación para cada ensayo realizado	46
Figura 47: Repetitividad en ensayos de corte simple, gráfico tensión-deformación	47
Figura 48: Repetitividad en ensayos de corte simple, gráfico de comportamiento volumétrico	48
Figura 49: Curva tensión deformación para la muestra QIS	49
Figura 50: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra QIS	49
Figura 51: Curva tensión deformación para la muestra QMS	51
Figura 52: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra QMS	51
Figura 53: Curva tensión deformación para la muestra PEK	52
Figura 54: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra PEK	53
Figura 55: Curva tensión deformación para la muestra PES	54
Figura 56: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra PES	54

Figura 57: Curva tensión deformación para la muestra FRÁGIL.....	55
Figura 58: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra FRÁGIL	56
Figura 59: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra QIS	57
Figura 60: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra QMS	57
Figura 61: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra PEK	58
Figura 62: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra PES	58
Figura 63: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra FRÁGIL	58
Figura 64: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QIS	60
Figura 65: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QIS (escala log-log)	60
Figura 66: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm ² y DR=100% (derecha) para el material QIS	61
Figura 67: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QMS	61
Figura 68: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QMS (escala log-log)	62
Figura 69: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm ² y DR=100% (derecha) para el material QMS	62
Figura 70: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PEK	63
Figura 71: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PEK (escala log-log)	63
Figura 72: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm ² y DR=100% (derecha) para el material PEK	64
Figura 73: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PES	65
Figura 74: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PES (escala log-log)	65
Figura 75: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm ² y DR=100% (derecha) para el material PES	66
Figura 76: Granulométrica final de los ensayos realizados para muestra FRÁGIL	67
Figura 77: Evolución granulométrica de los ensayos realizados para muestra FRÁGIL (escala log-log).....	67
Figura 78: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm ² y DR=0% (derecha) para el material FRÁGIL	68
Figura 79: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 1 kg/cm ² (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 1 kg/cm ²	69
Figura 80: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 3 kg/cm ² (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 3 kg/cm ²	69
Figura 81: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 7 kg/cm ² (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 7 kg/cm ²	70
Figura 82: Índice de rotura de partículas según Marsal (1965)	71
Figura 83: Rotura relativa según Hardin (1985)	71
Figura 84: Área superficial según Hyodo (2002)	72

Figura 85: Comparación resistencia muestra QIS, ensayos sueltos	74
Figura 86: Comparación comportamiento volumétrico muestra QIS, ensayos sueltos ..	75
Figura 87: Comparación resistencia muestra FRÁGIL, ensayos sueltos	76
Figura 88: Comparación comportamiento volumétrico muestra FRÁGIL, ensayos sueltos	76
Figura 89: Comparación muestra QIS, ensayos densos	77
Figura 90: Comparación muestra QIS, ensayos densos	78
Figura 91: Comparación muestra FRÁGIL, ensayos densos	78
Figura 92: Comparación muestra FRÁGIL, ensayos densos	79
Figura 93: Comparación del ángulo de fricción último obtenidas por Cole (1967) con el material QIS	80
Figura 94: Comparación del ángulo de fricción último obtenidas por Cole (1967) con el material FRÁGIL.....	80
Figura 95: Rotura relativa de Hardin para los ensayos de corte simple realizados por Valdes y Leleu (2008) en estado denso	82
Figura 96: Rotura relativa de Hardin para las muestras de tronadura de túnel en estado denso	82

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Estudios relacionados a la caracterización geotécnica y comportamiento que exhiben las arenas provenientes directamente de la desintegración de un macizo rocoso son escasos. Más aun, investigaciones relacionadas a la rotura de partículas de estas arenas sometidas a esfuerzo de corte simple son casi inexistentes. Por otro lado, estos materiales granulares están cada día siendo más importante en la industria minera ya que por ejemplo son utilizados como material de construcción. Estas arenas están siendo tratadas en la práctica como arenas estandarizadas o naturales. Por lo tanto, el desarrollo de mayor investigación en este tipo de materiales es imperativo.

Para ejecutar este trabajo de título se llevaron a cabo 6 ensayos de corte simple monótono por cada material para esfuerzos verticales de 1, 3 y 7 kg/cm² y densidades relativas de 0 y 100%. Se utilizaron 5 materiales procedentes de tronadura de túnel del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), los cuales se diferencian por su origen geológico, lo que implica principalmente una variación en la resistencia de sus partículas.

Se analizó la evolución de las curvas granulométricas al variar la presión vertical y la densidad relativa inicial del ensayo, manteniendo la distribución granulométrica inicial para cada ensayo.

Es necesario destacar que los resultados de esta investigación podrían ser útiles en una estimación cualitativa de la fragmentación secundaria ocurrida en el método de explotación minera denominado *block caving* y así poder optimizar los diseños de puntos de extracción del mineral que se están llevando a cabo en el proyecto PMCHS.

A continuación se presenta la organización de la tesis:

1. Introducción y objetivos: Se explica la motivación, alcances y objetivos de esta investigación.
2. Marco teórico: Se realiza una revisión bibliográfica de los estudios realizados hasta ahora respecto a rotura de partículas y comportamiento del suelo bajo esfuerzo de corte simple monótono.
3. Materiales ensayados: Se describen los materiales ensayados con sus características principales.
4. Descripción de equipos y procedimientos de ensayos: Se detallan los equipos utilizados, los ensayos propuestos y su metodología.

5. Resultados: Se presentan los resultados de todos los ensayos realizados, tanto los 30 ensayos de cortes simples monótono, como las 35 granulometrías.
6. Análisis de resultados: Se desarrolla un análisis de los resultados obtenidos, incluyendo una comparación con investigaciones anteriores.
7. Conclusiones y recomendaciones: Se explican los principales resultados y conclusiones de la investigación y recomendaciones de estudios a futuro.
8. Bibliografía.

1.1. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de esta investigación es estudiar el comportamiento y la rotura de partículas de un material procedente de tronadura de túnel minero sometido a esfuerzo de corte simple monótono y a cargas verticales bajas. El fin es estudiar y comprender la evolución de la granulometría del material al aumentar la carga vertical y al variar la densidad relativa inicial.

Este nuevo conocimiento, además de ser un aporte a la mecánica de materiales granulares, pretende ser utilizado en un mejor entendimiento del comportamiento y rotura de arenas generadas directamente de una desintegración de la roca, y que por lo tanto no han sido afectados por procesos de meteorización geológica, tales como arenas normalizadas o arenas provenientes de río. Además, los resultados de este trabajo también serán de gran ayuda en un mejor entendimiento del proceso de fragmentación secundaria en minería de *block caving*.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El objetivo específico de esta investigación es cuantificar la rotura de partículas de una arena de tronadura de túnel minero bajo distintos esfuerzos de corte simple monótono. Con esto se apunta a conocer en mejor medida el cambio de la distribución granulométrica para un material artificial como el procedente de tronadura sometido a baja carga vertical.

Junto a lo anterior, se tiene el propósito de analizar el comportamiento tensión-deformación del material y realizar una comparación de este con arenas transportadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. COMPORTAMIENTO DE ARENA BAJO ESFUERZO DE CORTE SIMPLE MONÓTONO

2.1.1. Equipo de corte simple

Las investigaciones relacionadas a ensayos de corte simple en arenas se han desarrollado principalmente en dos tipos de equipos, uno procedente de la Universidad de Cambridge y el otro del Instituto Geotécnico de Noruega (NGI). En sus inicios los equipos se crearon para estudiar el comportamiento geotécnico de arenas transportadas bajo corte simple monótono con el fin de comparar los resultados con ensayos triaxiales. En la actualidad este tipo de ensayo se usa mayoritariamente para estudios de licuefacción bajo la modalidad de corte simple cíclico.

El equipo de corte simple tiene la ventaja de que mientras la muestra sufre deformaciones planas, el eje principal de esfuerzo y deformación está rotando (Oda and Konishi, 1974; Roscoe, Bassett and Cole, 1967; Stroud, 1971). Además, este ensayo permite representar zonas de material granular que efectivamente sufren deformaciones por corte.

Respecto al aparato de Cambridge, éste fue creado por Roscoe (1953) y modificado por varios autores, entre ellos Wroth (1958), Poorooshasb (1961), Bassett (1962), Cole (1967), Stroud (1971) y Budhu (1979). Por otro lado, el aparato de NGI fue creado por Kjellman (1951) y trabajado por Bjerrum y Landva (1966), entre otros. Un diagrama de la probeta en que se depositan las muestras para ambos equipos se muestra en la Figura 1. El aparato NGI utiliza un espécimen circular y está rodeado por una membrana reforzada para impedir la deformación lateral mientras que el aparato de Cambridge utiliza una muestra cuadrada con paredes rígidas unidas por bisagras capaces de rotar.

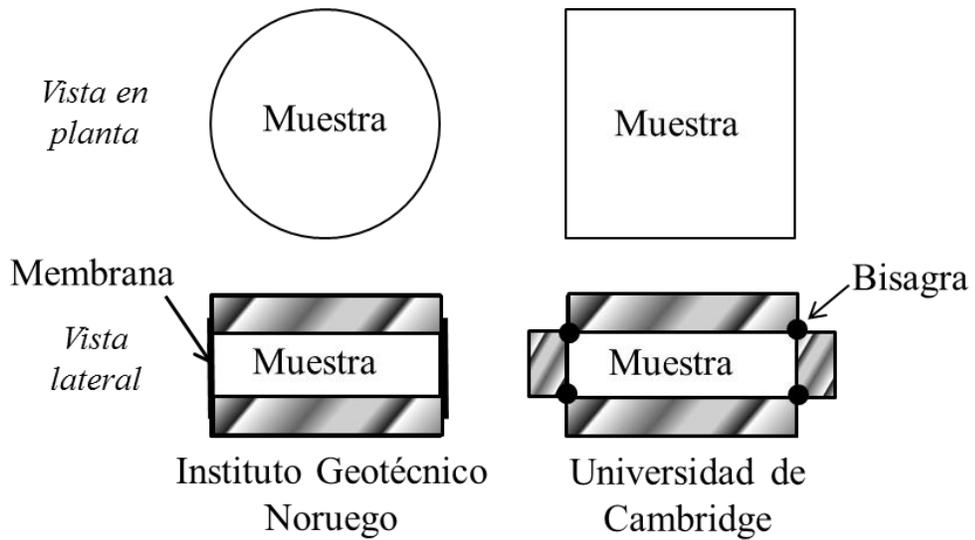


Figura 1: Esquema de la probeta utilizada en dos aparatos de corte simple

El ensayo de corte simple consta de dos etapas; la primera en aplicar una carga vertical (σ_v') con el fin de consolidar la muestra y la segunda es la aplicación de una carga horizontal que genera deformación por corte dentro de toda la muestra cómo se ilustra en la Figura 2. En relación al tipo de corte es usual la confusión entre corte simple y corte puro. En la Figura 3 se observa un diagrama de ambos tipos de corte, el corte simple difiere del corte puro por la ausencia de esfuerzo de corte complementario en el borde de la muestra. Sin embargo, los esfuerzos en el centro de la muestra corresponden aproximadamente a condiciones de corte puro.

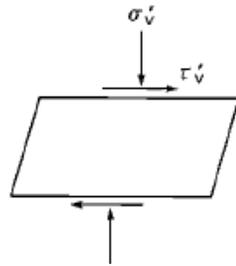


Figura 2: Diagrama de corte simple

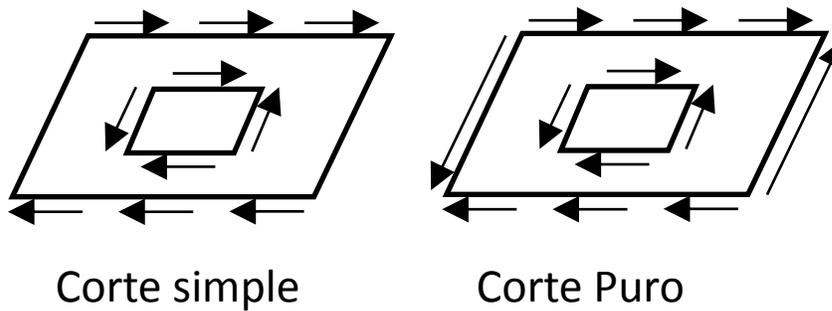


Figura 3: Diferencia entre corte simple y corte puro

Al analizar las deformaciones y los esfuerzos que se desarrollan en la muestra al ser sometida a esfuerzo de corte simple, diversos autores (Roscoe, 1953; Cole, 1967; Stroud, 1971; entre otros) llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se desarrollan deformaciones no uniformes durante el ensayo. Esta no uniformidad es provocada por la distribución desigual de los esfuerzos, y este efecto es más severo cerca de los bordes de la muestra, tal como se muestra en la Figura 4. Budhu (1983) midió los esfuerzos en tres zonas de una muestra densa, tanto para una probeta circular como para una rectangular. En la Figura 6 se muestran sus resultados demostrando las diferencias en la resistencia obtenida en cada sector medido.

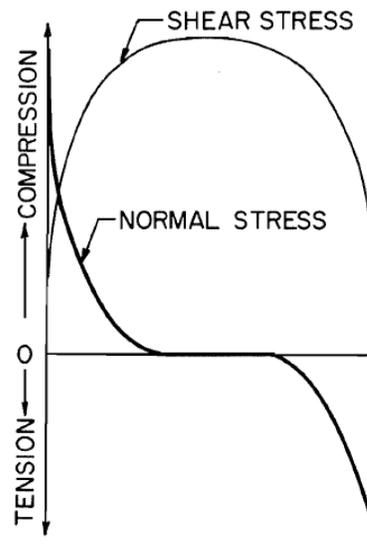


Figura 4: Distribución de esfuerzos en el aparato NGI (Roscoe, 1953)

Bassett (1967) encontró que para muestras densas la deformación es uniforme hasta alcanzar el *peak*, luego de esto se observa mayor dilatación en la base y en la parte superior de la muestra que en el centro de esta (como se ilustra en la Figura 5). Para muestras sueltas se observa una deformación uniforme incluso para grandes deformaciones de corte dado a que no se observa un *peak* notorio.

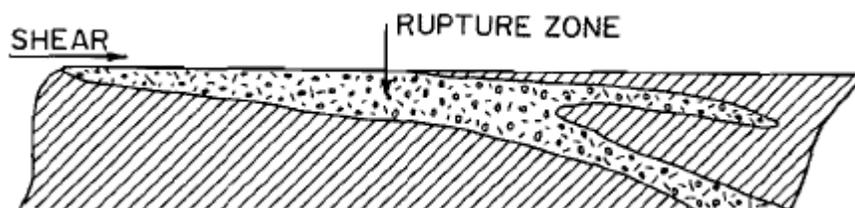


Figura 5: Zona de ruptura en el aparato cilíndrico de NGI (Budhu, 1984)

- Se obtiene que el eje principal de esfuerzo y el eje principal de incrementos de la deformación rotan y coinciden sólo en la deformación plástica (una vez alcanzada la fluencia). Estos ejes coinciden para grandes deformaciones sólo cuando estas son

uniformes. El eje de incremento de esfuerzo y el eje de incremento de deformación coinciden sólo en la etapa elástica.

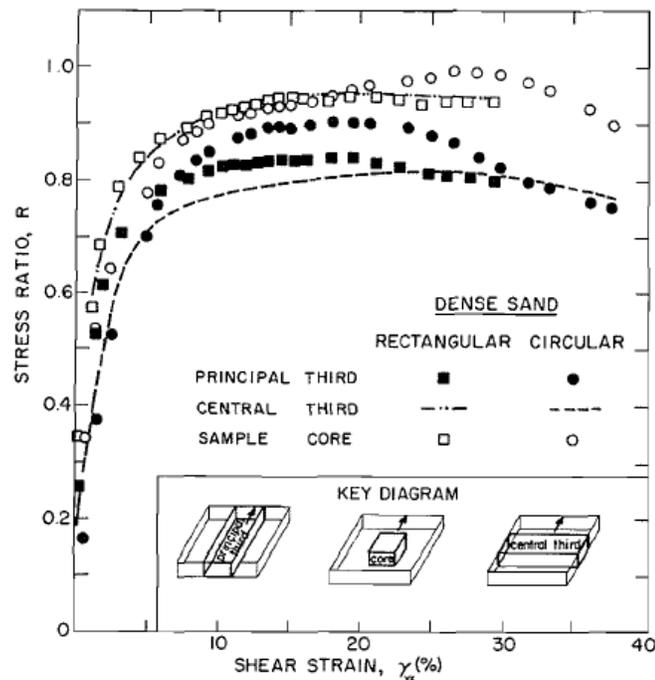


Figura 6: Desarrollo de la razón de esfuerzo en tres sectores de la muestra ensayada, aparato NGI (Budhu, 1984)

2.1.2. Comportamiento tensión-deformación

Como se mencionó anteriormente diversos autores desarrollaron equipos y realizaron ensayos de corte simple para comparar el comportamiento de arenas con lo estudiado en triaxiales.

En esta sección se presentan los resultados de las investigaciones realizadas en la Universidad de Cambridge por Cole (1967), Stroud (1971) y Budhu (1979). Todos estos autores realizaron ensayos utilizando la arena Leighton Buzzard (Inglaterra), la cual posee forma redondeada y sus granos son principalmente de cuarzo. Esta arena tiene una gravedad específica de 2,66; un coeficiente de uniformidad de 1,56; índice de vacíos mínimo de 0,52 y máximo de 0,79. Ellos utilizaron una granulometría inicial entre 0,60 y 1,18 mm, esfuerzos verticales bajos (entre 0,42 y 4,01 kg/cm²) y densidades relativas entre 4 y 96%. Todos utilizaron una probeta cuadrada y equipos de ensayos levemente diferente (cada autor hizo alguna mejora del equipo anterior).

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de corte simple monótono de Cole (Figura 7 y Figura 8), Stroud (Figura 9 y Figura 10) y Budhu (Figura 11 y Figura 12). Se muestran los gráficos de tensión de corte normalizada (dividida por la carga vertical inicial) versus deformación por corte y el cambio en el índice de vacíos versus la deformación por corte. Se presentan los resultados de los ensayos realizados en estado

denso y suelto con el fin de ser utilizados en el capítulo de análisis para comparar con los ensayos desarrollados en esta investigación.

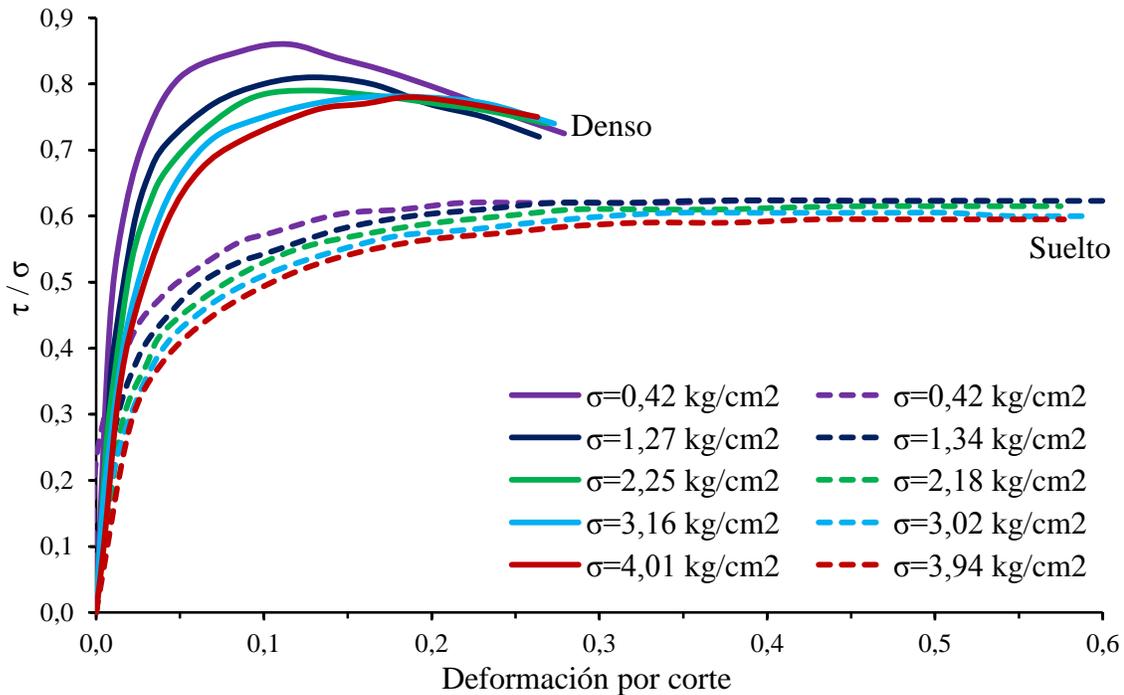


Figura 7: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%). Cole (1967)

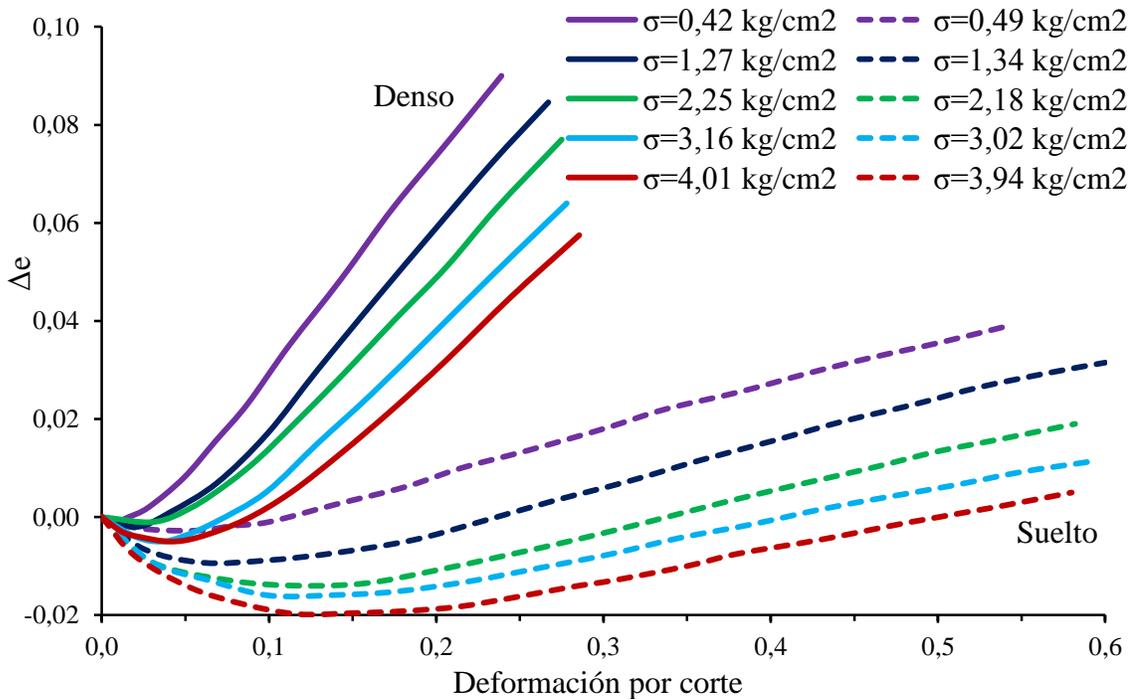


Figura 8: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%). Cole (1967)

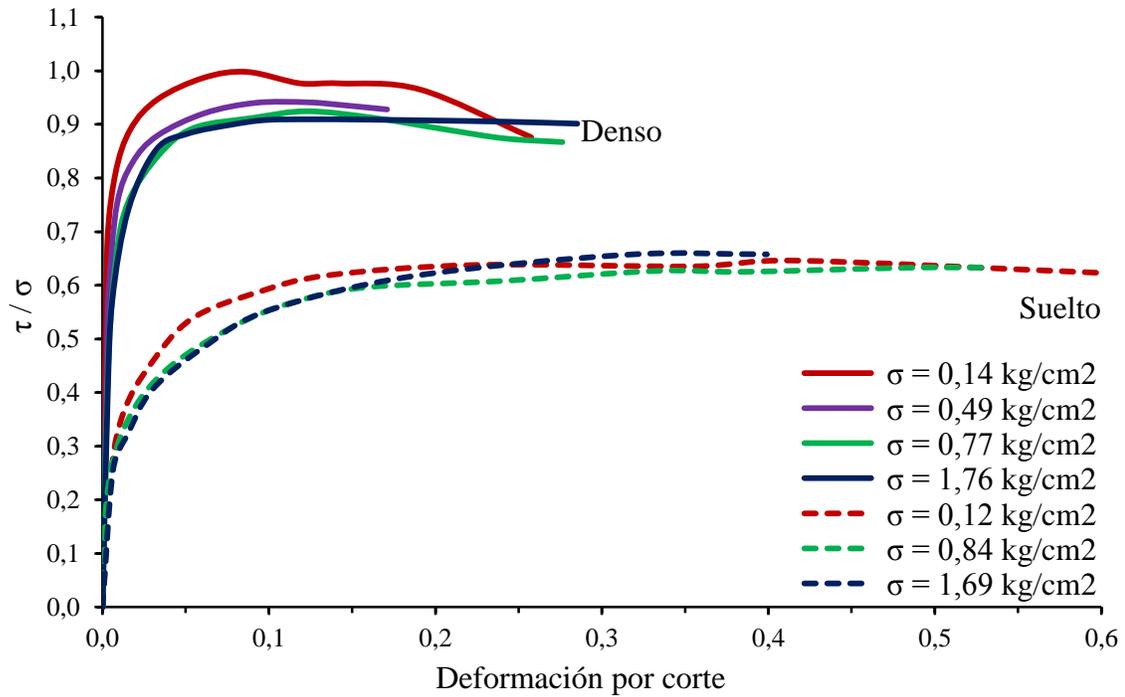


Figura 9: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=4%), Stroud (1971)

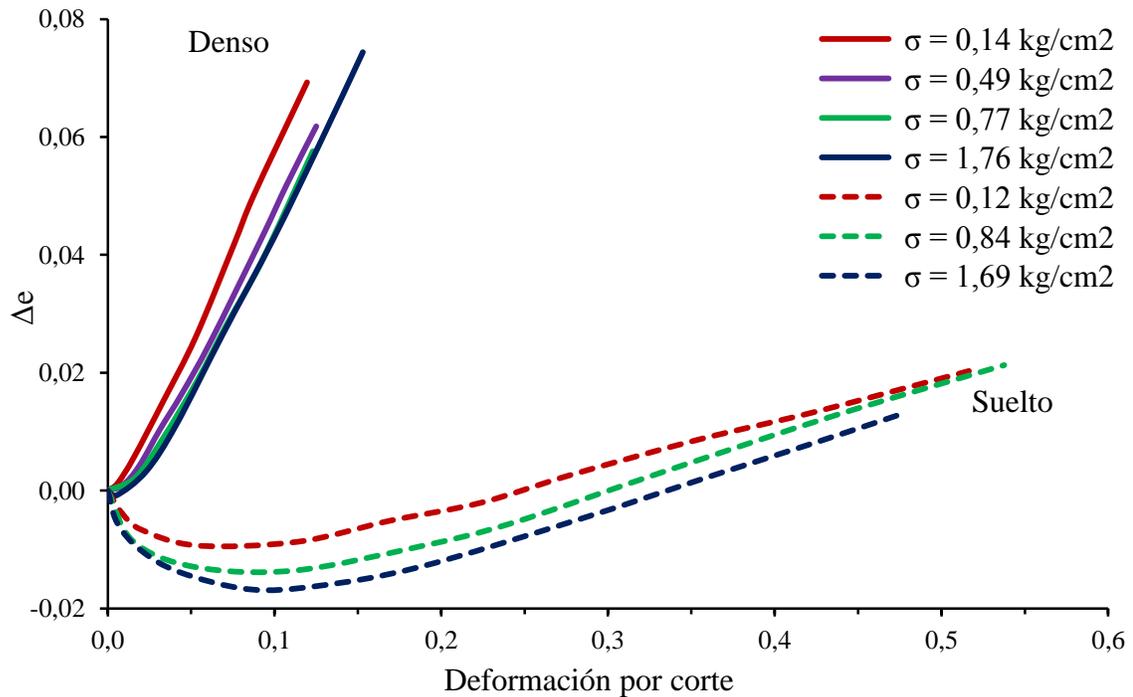


Figura 10: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=4%), Stroud (1971)

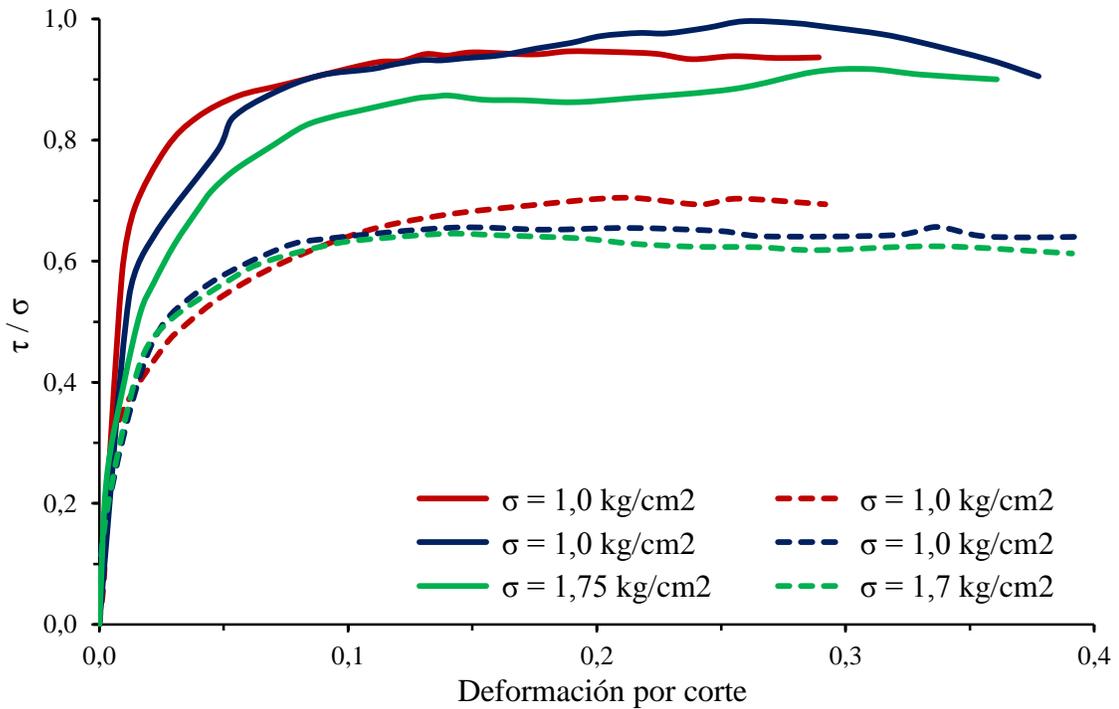


Figura 11: Resultados de tensión-deformación para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%), Budhu (1979)

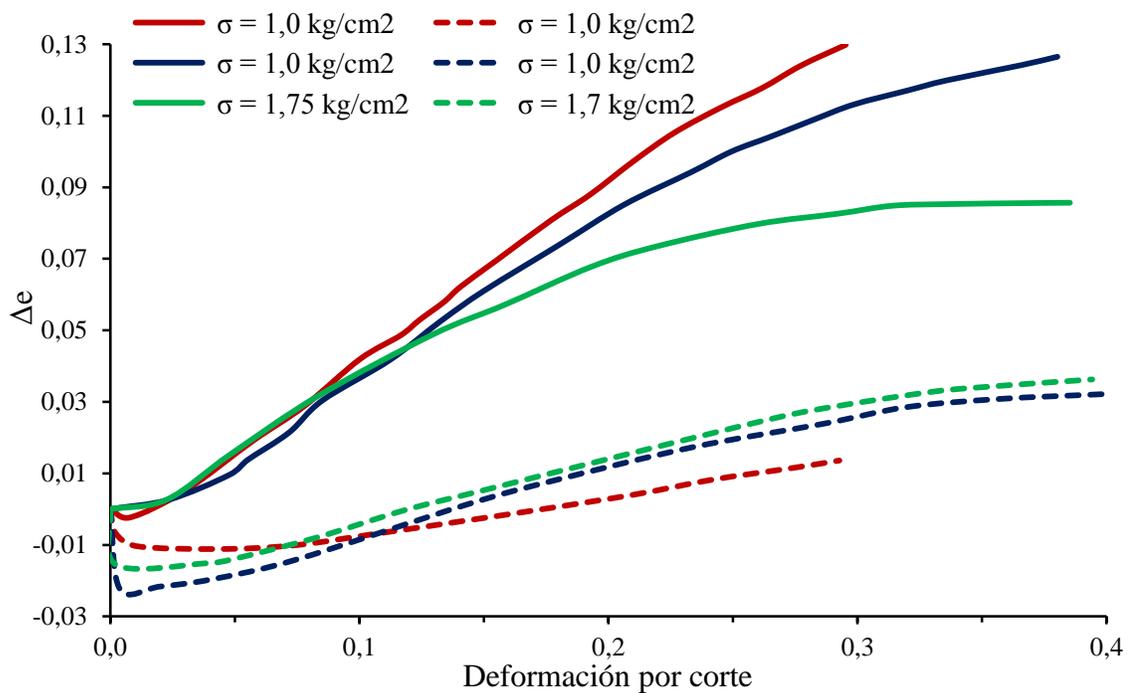


Figura 12: Resultados de diferencia del índice de vacíos versus deformación por corte para arena Leighton Buzzard en estado denso (DR=96%) y estado suelto (DR=16%), Budhu (1979)

Los resultados presentados en la Figura 7, Figura 9 y Figura 11 muestran que a medida que aumenta el esfuerzo normal, el *peak* de la razón de esfuerzos disminuye y este ocurre a una deformación por corte mayor. El grado de dilatancia en la razón de esfuerzos *peak* disminuye al aumentar el esfuerzo normal, demostrando que a mayor resistencia de la muestra hay una disminución de la dilatancia y por ende un aumento en la compresión. De los gráficos se observa que los materiales densos tienen un comportamiento dilatante mientras que los ensayos sueltos presentan un comportamiento contractivo.

Los autores concluyen que la velocidad del ensayo no afecta el comportamiento tensión-deformación de la arena de Leighton Buzzard ensayada. Los datos tensión-deformación obtenidos para ensayos medianamente sueltos son confiables antes del *peak* de la resistencia, pero a mayores deformaciones dejan de ser confiables por las no uniformidades desarrolladas. Se confirma la existencia de un estado crítico en ensayos de corte a grandes deformaciones para la arena ensayada.

Al comparar con ensayos triaxiales se obtiene que los ensayos de corte simple realizados en estas investigaciones desarrollan un ángulo de fricción menor.

La diferencia en el comportamiento entre suelos densos, medianamente densos y sueltos es probablemente debido a las no uniformidades que ocurren a grandes deformaciones en ensayos densos y en menor medida en los medianamente sueltos.

Pareciera que el comportamiento tensión-deformación en ensayos drenados depende de la diferencia entre el índice de vacíos inicial y el existente en el estado crítico para un mismo esfuerzo normal, similar a lo observado por Roscoe y Poorooshasb (1963b).

Roscoe, Schofielf y Wroth (1958) sugirieron que una muestra de suelo en cualquier ensayo de corte eventualmente alcanza un estado crítico en el cual se puede aplicar una deformación por corte ilimitada sin cambios en el índice de vacíos o en la tensión de corte.

2.1.3. Influencia de la rotura de partículas en el comportamiento tensión - deformación

La rotura de partículas es un tema ampliamente estudiado en ingeniería geotécnica, pero principalmente en ensayos triaxiales y compresión unidimensional. Unos de los pocos autores que han estudiado este tema en aparatos de corte simple son Brandes (2011) y Valdes y Leleu (2008), mientras que otros lo han hecho en aparatos de anillos de corte como Luzzani y Coop (2002), Coop et al. (2004) y Sadrekarimi y Olson (2010).

Valdes y Leleu (2008) realizaron ensayos de corte simple monótono en tres materiales diferentes compuestos de arena de Ottawa y arena calcárea. La arena de Ottawa está compuesta por granos de cuarzo redondeados (partículas resistentes), mientras que la arena calcárea está formada por granos de carbonato de calcio subangulares (partículas débiles). El primer material está formado sólo por partículas resistentes; el segundo por un 10% de partículas débiles y el tercero por un 40% de partículas débiles. Se estudió el comportamiento y rotura de partículas con igual distribución granulométrica inicial, y las muestras fueron ensayadas bajo un DR de 80 a 90% y carga vertical de 147 kPa, 468 kPa y 824 kPa.

Los autores concluyeron que a bajos esfuerzos la respuesta de un material granular está controlada por la forma de las partículas, mientras que a altos esfuerzos la respuesta es controlada por la rotura de partículas. La dilatancia disminuye al aumentar la carga vertical tanto por el reordenamiento como por la rotura de partículas. Para un confinamiento de 147 kPa, la dilatancia aumenta para un mayor contenido de partículas débiles. Esto debido probablemente a la forma subangular de las partículas débiles (versus la forma redondeada de los granos de cuarzo). Para las cargas verticales mayores la dilatancia disminuye al aumentar el porcentaje de partículas débiles debido a la rotura de partículas presente.

Concluyendo lo anterior, para carga verticales bajas la respuesta del material está dada por la forma de las partículas, mientras que para cargas mayores el comportamiento lo controlan las partículas débiles.

Luzzani y Coop (2002) también utilizaron arena de carbonato de calcio (Dog's Bay sand) en ensayos de anillo de corte y corte directo. Esta arena está compuesta por partículas débiles de carbonatos biogénicos, angulosas, procedentes del oeste de Irlanda y granulometría inicial uniforme con tamaños entre 0,3 y 0,43 mm. Se estudió el comportamiento y la rotura de partículas para ambos ensayos y estos se realizaron hasta diferentes deformaciones de corte máximo, para así analizar la evolución de la rotura al aumentar la deformación. Se utilizó una carga vertical de 930 kPa y una densidad inicial suelta. Al realizar la granulometría post-ensayo se separó la muestra por tres zonas. La zona 2 es el sector central (plano de falla) con un espesor de 5 mm mientras que la zona 1 y 3 corresponden a sectores sobre y bajo esta zona respectivamente.

Se obtuvo que a pesar de aplicar una gran deformación por corte (sobre 700%) la arena carbonatada no alcanzó un estado crítico al no obtener un volumen constante ni una granulometría estable. Además, la compresión volumétrica al parecer está directamente asociada a la rotura de partículas y se estima que sólo se alcanzaría un volumen constante cuando termine el proceso de rotura. Se identifica que la rotura durante la

aplicación del esfuerzo de corte es mayor al provocado por compresión isotrónica (Luzzani y Coop, 2002).

En los ensayos de compresión isotrónica realizados por McDowell y Bolton (1998) se concluye que las muestras llegan a un nivel estable, donde no hay más rotura de partículas y la deformación volumétrica se estabiliza. Sin embargo, esto no se cumple necesariamente para ensayos de corte. La investigación realizada por Luzzani y Coop (2002) indica que incluso a grandes deformaciones la deformación volumétrica no llega a ser constante y no se alcanza una estabilización ya que el ensayo, por una limitación del equipo, sólo puede ser realizado hasta cierto nivel de deformación.

El comportamiento del material granular depende del nivel de presión vertical aplicada, por esto, en ciertos casos no existe una relación lineal entre la resistencia al corte y la tensión normal. Esto se explica principalmente por la rotura de partículas que modifica la granulometría inicial del ensayo según lo que sugieren Marsal (1967) y Leps (1970) observado en enrocados y suelos granulares gruesos. Así, el clásico criterio de falla de Mohr-Coulomb no sería aplicable en estos casos.

En la Figura 13 se observan los componentes del ángulo de fricción *peak*. Se denota como ϕ_u al ángulo de fricción pura que representa la resistencia al deslizamiento de las partículas, ϕ_f al ángulo de fricción relacionado con la dilatación, ϕ_{cv} al ángulo de fricción en el estado crítico y ϕ_m al ángulo de fricción máximo. A medida que aumenta la dilatación aumenta el ángulo de fricción *peak*.

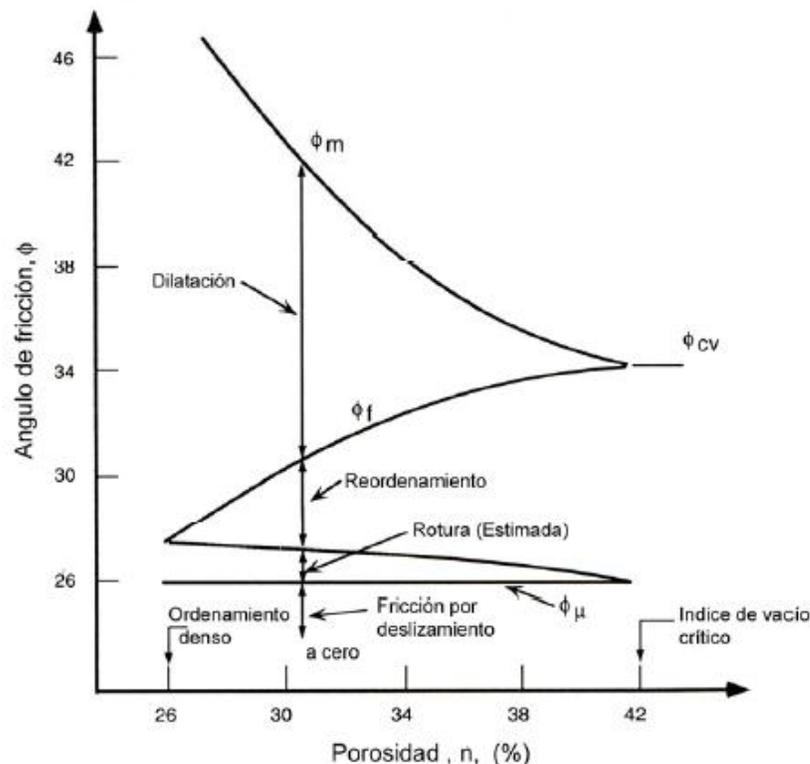


Figura 13: Componentes del ángulo de fricción máximo (Mitchell, 1993)

Durante la aplicación del corte, las muestras densas tienden a dilatar (aumentar su volumen) mientras que los ensayos sueltos a contraer. Se debe tener en cuenta que la angulosidad y rugosidad aumentan la tendencia a la dilatación en muestras densas (Bishop, 1966).

Diversos autores han llegado a la conclusión en ensayos triaxiales, que a mayor densidad inicial, mayor será la resistencia del material para una misma presión de confinamiento. En general se observa que la resistencia residual es independiente de la densidad inicial y por lo tanto se espera que esta teoría se cumpla para ensayos de corte simple.

2.2. ROTURA DE PARTÍCULAS EN SUELOS GRANULARES

En ingeniería geotécnica, la rotura de partículas es un tema que ha sido estudiado principalmente en compresión triaxial por diversos autores como Lee y Farhoomand (1967); Vesic y Clough (1968); Lo y Roy (1973); Marsal (1973), Hardin (1985), Lade y Yamamuro (1996), entre otros. También ha sido estudiada en base a ensayos de corte directo y anillos de corte: Luzzani y Coop (2002), Coop et al. (2004) y Sadrekarimi y Olson (2008).

Sin embargo, el estudio de la rotura de partículas bajo esfuerzos de corte simple es escaso y solo es posible mencionar el trabajo de Valdes y Leleu (2008) tal como fue explicado en la sección 2.1.3.

2.2.1. Parámetros del suelo y su relación con la rotura de partículas

La cantidad de rotura de partículas en un suelo bajo esfuerzos depende principalmente de: la distribución granulométrica, la forma de las partículas, el estado de esfuerzos efectivos, la trayectoria de tensiones efectivas, el índice de vacíos, la dureza de la partícula y la presencia de agua (Hardin, 1985).

Considerando los estudios basados en ensayos triaxiales, la rotura de partículas aumenta al: disminuir la resistencia individual de las partículas, aplicar esfuerzo de corte, utilizar una distribución granulométrica uniforme, ensayar un suelo con partículas angulosas, aumentar la carga vertical o confinamiento aplicado y al aumentar la humedad del material (Lade et al., 1996).

A continuación se presenta la influencia en la rotura de partículas de las variables intrínsecas del material.

- Granulometría inicial

Para un material relativamente uniforme, existe mayor rotura en las partículas más grandes de la muestra dado que éstas tienen mayor probabilidad de defectos y menor número de contactos, lo que implica que la fuerza a resistir, dada una carga, sea mayor (Lee y Farhoomand, 1967).

Comparando suelos uniformes y suelos bien graduados (Figura 14 y 15), con igual tamaño máximo, se aprecia mayor rotura en un suelo uniforme dado que en los suelos bien graduados existe una mejor distribución de esfuerzos al tener mayor número de contacto (Lee y Farhoomand, 1967).

Otros autores como Nakata (2001) postulan que arenas bien graduadas presentan mayor rotura en sus partículas menores. Esto debido a que las partículas menores tienen un número de contacto menor y sufren una mayor concentración de esfuerzos a diferencia de las partículas mayores que tienen un mayor número de contactos en una muestra bien graduada. En un suelo bien graduado las partículas de mayor tamaño tienen una menor probabilidad de rotura debido al número de contactos a pesar de presentar una mayor cantidad de debilidades o microfracturas.

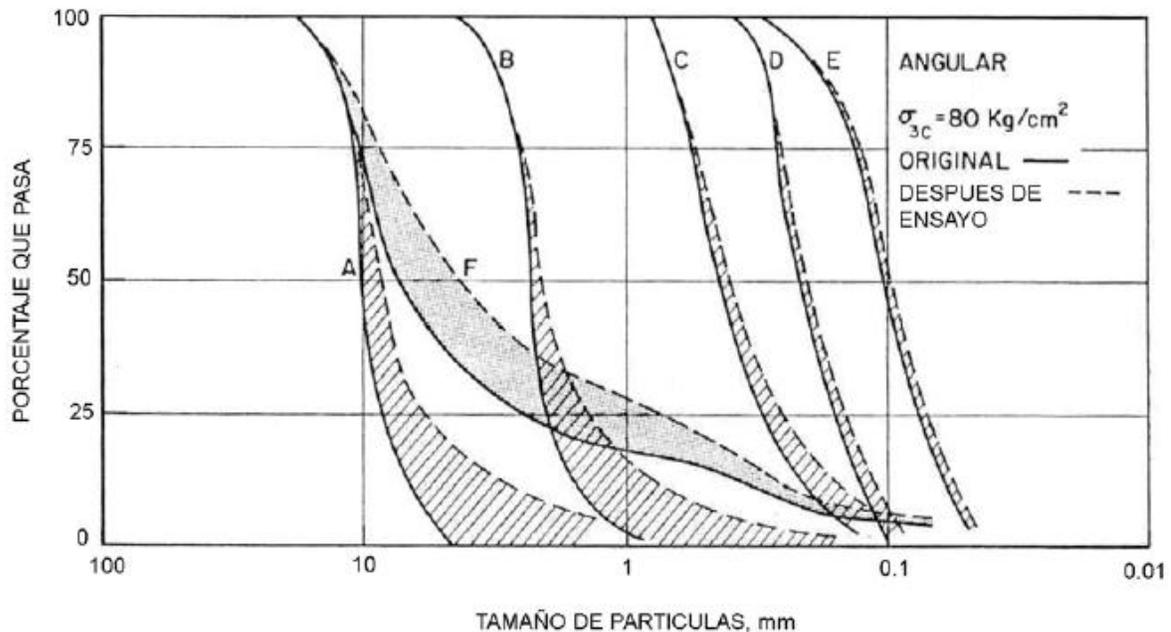


Figura 14: Influencia de la granulometría inicial en la rotura de partículas (Lee y Farhoomand, 1967)

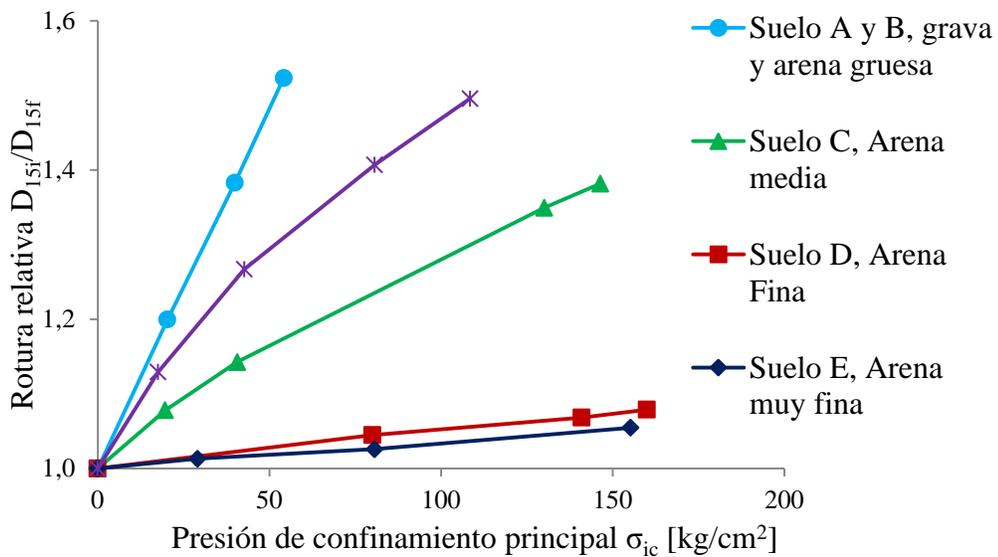


Figura 15: Influencia de la granulometría inicial en la rotura de partículas en ensayos de compresión isotópica (Lee y Farhoomand, 1967)

- Forma de las partículas

En la literatura se observa que las partículas angulosas sufren mayor rotura que las redondeadas para un mismo tamaño y bajo similares niveles de tensión como se puede observar en la Figura 16 (Lee y Farhoomand, 1967). Esto se puede explicar dado que los esfuerzos se concentran en los cantos de las partículas angulares mientras que en las partículas redondeadas los esfuerzos se concentran en el centro (Lade et al. 1996). Otra explicación se encuentra en el hecho que las partículas angulosas se rompen mediante el mecanismo de abrasión (rotura de los cantos) mientras que las redondeadas mediante *crushing* las cuales tienen mayor resistencia y presentan rotura frágil y repentina (Nakata et al., 1999).

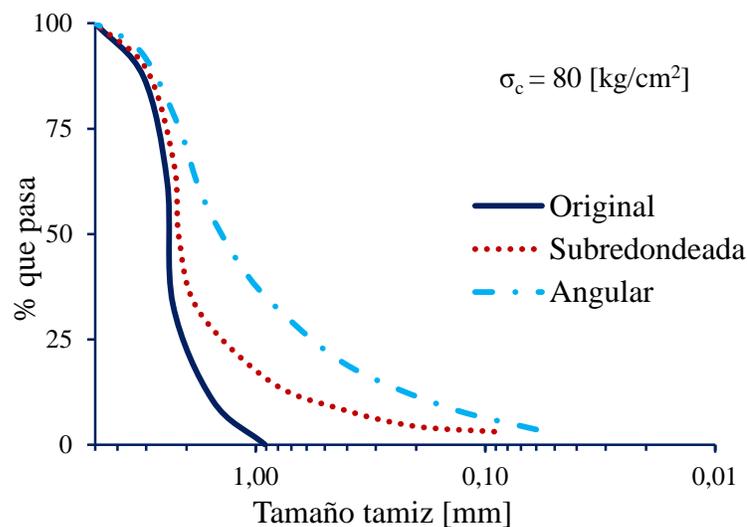


Figura 16: Efecto de la forma de las partículas en la rotura de partículas (Lee y Farhoomand, 1967)

De la Figura 17 es posible concluir que muestras con partículas angulosas presentan una mayor compresión que muestras con partículas redondeadas. El brusco quiebre presente en la curva de partículas redondeadas verifica la teoría de que estas partículas se comprimen de manera brusca y repentina. Esta compresión se asocia a la rotura de partículas producida más que al reacomodo usual provocado en muestras con partículas que no sufren rotura.

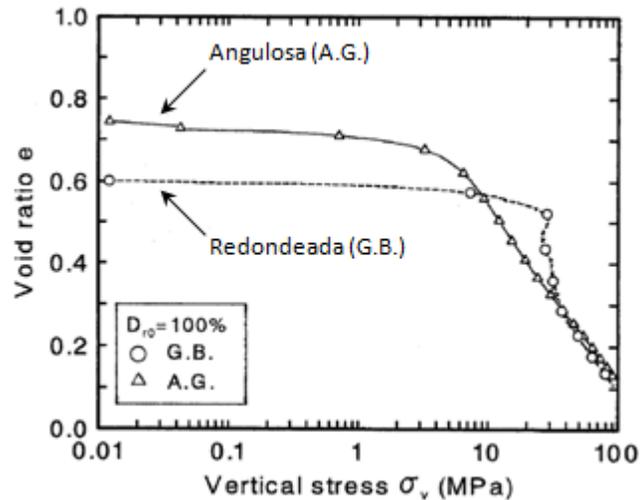


Figura 17: Efecto de la forma de las partículas en ensayo de compresión unidimensional (Nakata et al., 2001)

- Resistencia/Dureza de las partículas

Como es de esperar, varios autores han concluido que al aumentar la dureza de los minerales disminuye la cantidad de rotura de partículas. Lo y Roy (1973) realizaron granulometrías post-ensayo después de haber ejecutado ensayos triaxiales drenados para tres materiales diferentes: óxidos de aluminio, cuarzo y piedra caliza. Utilizaron esfuerzos de confinamiento de $1,8 \text{ kg/cm}^2$ a $112,5 \text{ kg/cm}^2$ con granulometrías iniciales similares y un diámetro máximo de $0,5 \text{ mm}$. Los resultados se muestran en la Figura 18, donde la piedra caliza tiene una dureza menor que el óxido de aluminio y se observa claramente en los gráficos que la muestra de piedra caliza sufre mayor cantidad de rotura.

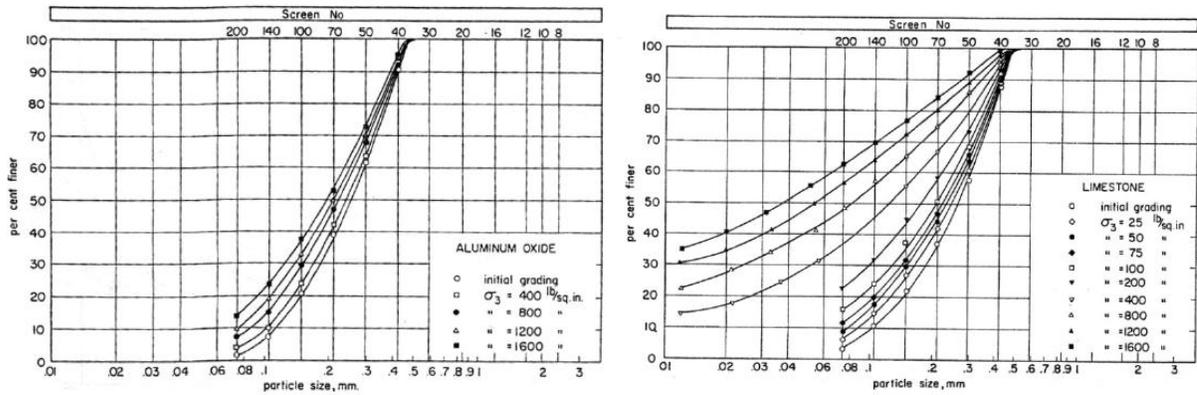


Figura 18: Granulometrías post ensayos triaxiales para óxido de aluminio (izquierda) y piedra caliza (derecha) (Lo y Roy, 1973)

A continuación se presenta la influencia en la rotura de partículas de las variables de estado las cuales son: Estado tensional y trayectoria de tensiones efectiva; índice de vacíos, presencia de agua, deformación aplicada y el tiempo.

- Estado tensional

Varias investigaciones han demostrado que a mayor presión de confinamiento mayor es la rotura observada (Lee y Farhoomand 1967, Marsal 1973 y Hardin 1985). Lade et al. (1996) realizaron ensayos triaxiales drenados en arena de Cambria (granulometría inicial uniforme, con partículas subangulares entre 0,83 a 2 mm de diámetro) a presiones de confinamiento de 2,22 MPa a 80 MPa. Los resultados de las granulometrías post ensayo se presentan en la Figura 19. Se observa claramente lo expuesto en un principio, en que a mayor confinamiento mayor es la rotura de partículas para una misma granulometría y densidad inicial.

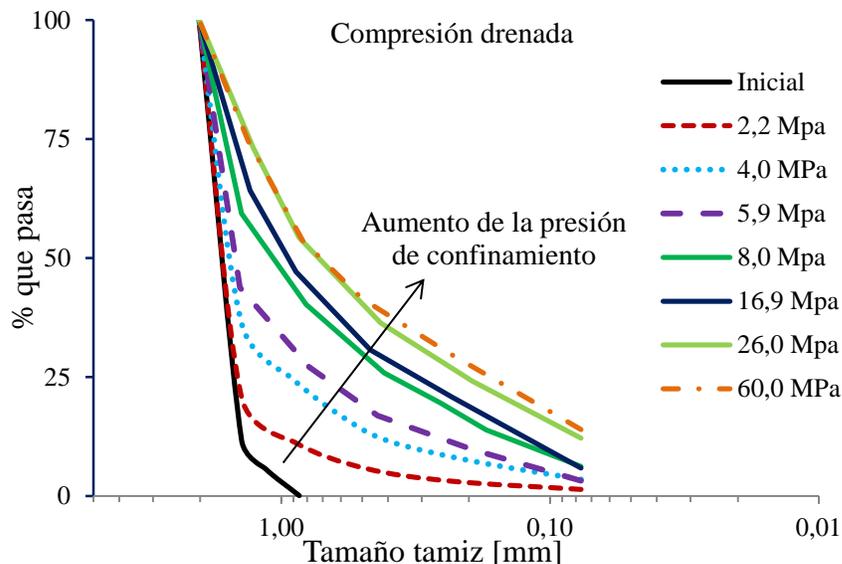


Figura 19: Efecto de la presión de confinamiento en la evolución de la curva granulométrica en arena de Cambria en ensayos triaxiales drenados (Lade et al., 1996)

- Trayectoria de tensiones efectivas

Diversos autores tales como Lee y Farhoomand (1967) y Al Hussaini (1983) han concluido que la mayor cantidad de rotura en un ensayo triaxial se observa en la etapa de esfuerzos de corte más que en la etapa de consolidación. Esto depende de las presiones aplicadas, mientras mayor la presión mayor será la rotura experimentada en esa etapa (Vesic y Clough, 1968).

- Índice de vacíos

Es esperable que la cantidad de rotura generada dada una presión de confinamiento aumente al disminuir el número de contactos de partículas (disminuir la densidad relativa y aumentar el índice de vacíos) dado a que la fuerza a resistir por cada partícula aumenta (Hardin, 1985).

Contrario a lo anterior, se ha observado en ensayos triaxiales que existe mayor rotura en probetas densas que sueltas debido, probablemente, a la dilatación que se observa en los suelos densos generando mayores fuerzas de contacto (Boop y Lade, 2005).

Además, investigaciones en ensayos de compresión isótropa permiten concluir que el efecto de la densidad inicial disminuye al aumentar la presión de confinamiento. Se observó que existe una presión tal que la rotura de partículas llega a ser independiente de la densidad inicial (Boop y Lade, 2005).

- Presencia de agua

Ensayos triaxiales realizados en arena de Toyoura en estado seco y saturado permitieron concluir que las muestras saturadas presentan mayor cantidad de rotura. Una explicación de esto es que el agua se introduce en las microfisuras y genera una presión que facilita la rotura de las partículas (Miura y Yamanouchi, 1975; Lee y Farhoomand, 1967). Coop y Lee (1995) apoyan esta conclusión con su investigación en la arena *Dog's Bay* obteniendo mayor rotura de partículas para ensayos húmedos que en estado seco.

- Deformación por corte

El fenómeno de rotura de partículas aumenta continuamente con la deformación a la que es sometida la muestra (Hyodo et al., 2002). Valdes y Leleu (2008) realizaron ensayos de corte simple para tres cargas verticales diferentes, a diferentes grados de deformación por corte y para tres muestras diferentes. En la Figura 20 se observa en paréntesis el valor de F_c (0; 0,1; 0,4) que representa el porcentaje en volumen de partículas débiles (carbonato de calcio) en relación al

total de la muestra. El otro material componente es arena de Ottawa que posee granos de cuarzo. En esta figura se observa claramente como aumenta la rotura de partículas, al aumentar el parámetro de rotura relativa de Hardin (1985) B_r , al aplicar una mayor deformación por corte.

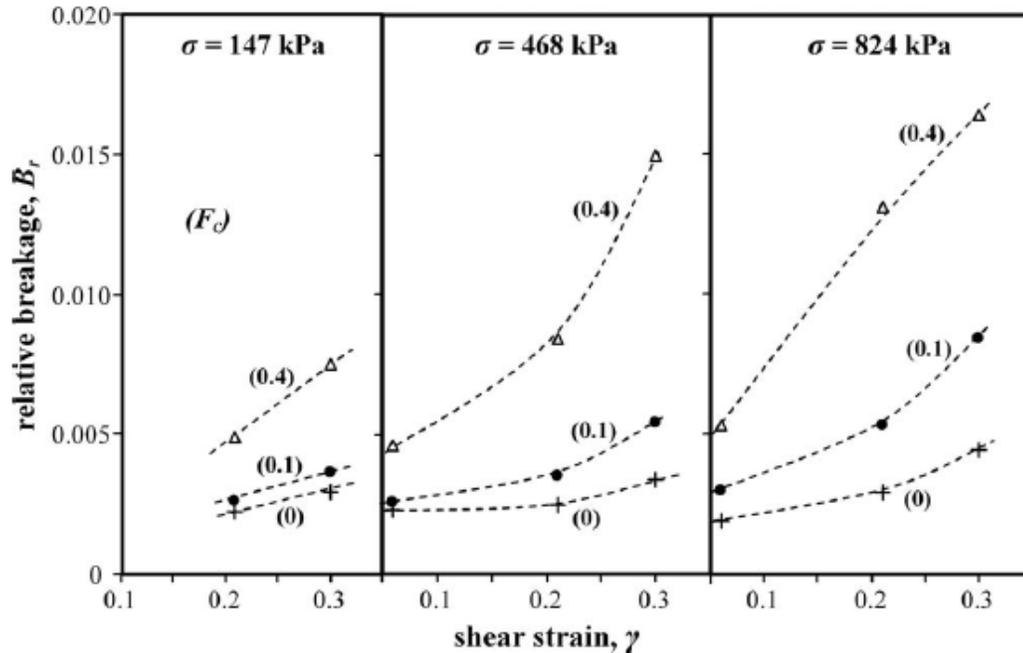


Figura 20: Parámetro de rotura relativa de Hardin para diferentes grados de deformación por corte (Valdes y Leleu, 2008)

- Tiempo

Al mantener la carga en el tiempo se produce un efecto progresivo en la rotura de partículas seguido por un reordenamiento de los fragmentos y una redistribución de los esfuerzos tensionales. Si esta nueva distribución de esfuerzos supera la resistencia individual de alguna partícula y ésta se rompe, se genera un reordenamiento de estas y una redistribución de esfuerzos que puede provocar más rotura y así puede continuar hasta alcanzar una estabilidad (Vesic y Clough, 1968).

2.2.2. Cuantificadores de rotura

Muchos autores han desarrollado parámetros para cuantificar la rotura de partículas. Todos utilizan las granulometrías pre y post ensayo para realizar sus cálculos. Dentro de estos autores algunos sólo consideran partes de la distribución de tamaños como: Leslie (1963, 1975), Lee and Farhoomand (1967), Colliat Dangus et. Al. (1988), Lade et. al. (1996) y Nakata et al. (1999), entre otros.

Los parámetros más utilizados, que corresponden a aquellos que utilizan toda la gama de tamices de la muestra, son definidos por autores como: Marsal (1965), Hardin (1985), Miura y Yamanouchi (1971) e Hyodo et al. (2002).

A continuación se definen los parámetros más utilizados:

- Índice de rotura de partícula, B_g (Marsal, 1965)

Marsal (1965) define el índice de rotura como la sumatoria de las diferencias positivas entre el porcentaje retenido por cada tamiz antes y después de un ensayo. Con esto no se consideran los nuevos tamaños generados por la rotura de las partículas. El límite inferior de este parámetro es 0% y el límite teórico superior es 100%.

- Potencial de rotura, B_p ; Rotura total, B_t y Rotura relativa, B_r (Hardin, 1985)

Hardin (1985) define el Potencial de Rotura B_p como el área tachada de la Figura 21 que corresponde al área superior de la línea de distribución granulométrica y que está delimitada por la línea vertical correspondiente al tamiz #200 (0,074 mm). Esto representa el potencial de rotura que es significativo para el comportamiento del suelo, se considera que tamaños menores afectan en menor medida la respuesta del material.

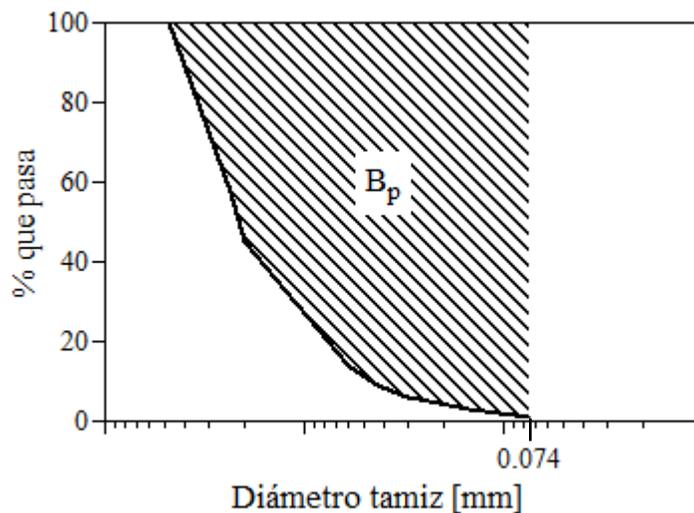


Figura 21: Definición del Potencial de Rotura Hardin, 1985.

La rotura total se define como el área entre la granulometría inicial y la final, como se muestra en la Figura 22.

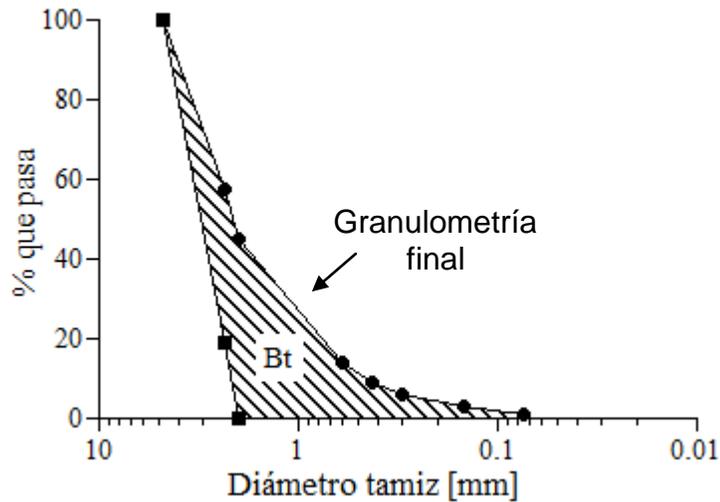


Figura 22: Definición de rotura total Hardin, 1985

La rotura relativa (B_r) se define como:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (1)$$

B_r aumenta con el aumento de rotura de partículas. Tiene un límite teórico de 1 pero el límite fractal (sección 2.2.4) está entre 0,5 y 0,6 (Valdes y Leleu 2008).

- Área superficial. Propuesto por Miura and Yamanouchi (1971) y referenciado por Hyodo et al. (2002).

Este parámetro (S) considera que la rotura de partículas está estrechamente ligada con el aumento de área superficial de los granos de una muestra dada. Se calcula de la siguiente manera:

$$S = S_w \cdot \gamma_d \quad (2)$$

$$S_w = S_{w1} + S_{w2} \quad (3)$$

$$S_{w1} = \frac{F}{100} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_m}{2}\right)^2}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_m}{2}\right)^3 \cdot G_s \cdot \gamma_w} \quad (4)$$

$$S_{w2} = \frac{F}{100} \cdot \frac{S_o \cdot G_c \cdot t \cdot (1 - e_o) \cdot \sqrt{e^3}}{G_s \cdot t_o \cdot \sqrt{e_o^3} \cdot (1 - e)} \quad (5)$$

Donde:

S = Área superficial [L^2/L^3]

S_w = Superficie específica total [L^2/M]

S_{w1} = Superficie específica de partículas mayores a 0,074mm [L^2/M]

S_{w2} = Superficie específica de partículas menores a 0,074mm [L^2/M]

S_o = Superficie específica del cemento [L^2/M]

γ_d = Densidad seca post consolidación [M/L^3]

γ_w = Densidad del agua [M/L^3]

F = Porcentaje en peso retenido en una malla dada

G_s = Gravedad específica del suelo

G_c = Gravedad específica del cemento

d_m = Raíz del producto entre los diámetros de dos mallas consecutivas [M]

t_o = Tiempo de sedimentación del cemento

e_o = Índice de vacíos del cemento, normalmente 1,5

$t y e$ = Tiempo de sedimentación e índice de vacíos del suelo

Los parámetros 'B_g', 'B_r' y 'S' serán utilizados para cuantificar la rotura de partículas en los ensayos de corte simple presentados en los Capítulos 6 y 7.

2.2.3. Mecanismos de rotura

El mecanismo de rotura de las partículas es función del tamaño de la partícula, forma, fragilidad y resistencia. En el contexto de la ingeniería geotécnica Sadrekarimi y Olson (2010) definen dos mecanismos de rotura: abrasión (*abrasion* o *shearing-off of asperities*) y *splitting* (división). Además podría generarse el *crushing* (rotura total) para casos en que la partícula pueda acumular energía y permitir deformación interna.

Además, desde un punto de vista mineralógico, partículas débiles, más angulares y de menor tamaño con un número de contacto bajo tienden a dividirse a lo largo del clivaje natural de cada mineral durante la aplicación del corte. Por otro lado, partículas fuertes, redondeadas, de tamaños mayores con un número de coordinación alto tienden a acumular daño por abrasión de las asperezas (Sadrekarimi y Olson, 2010).

2.2.4. Rotura de partículas tipo fractal

Se ha observado en estudios de fragmentación de rocas, que la distribución de tamaños de fragmentos evoluciona hacia una distribución de tipo fractal (Turcotte, 1986). Posteriormente, McDowell et al. (1996) utilizaron este conocimiento previo y en base a observaciones en ensayos edométricos y modelación numérica concluyeron que para materiales granulares, la rotura de partículas también evoluciona en una distribución fractal de los tamaños de partículas. En otras palabras este comportamiento

de rotura de partículas se traduce en una curva granulométrica de tipo lineal en un gráfico a escala doble logarítmica.

Lo propuesto por McDowell tiene aceptación hoy en día, e incluso nuevas investigaciones demuestran que los materiales granulares sujetos mayoritariamente a esfuerzos de corte (anillo de corte y corte simple) evolucionan en este comportamiento de tipo fractal rápidamente, lo cual espera ser corroborado con los ensayos de laboratorio propuestos en esta investigación.

Como ejemplo, en la Figura 23 se observan los resultados de Guimaraes et al. (2007), quienes realizaron ensayos de corte simple en arena de Ottawa en estado suelto ($DR=18\%$) y denso ($DR=88\%$) con un carga vertical de 14MPa. El gráfico es presentado en escala doble logarítmica denotando la distribución fractal de la granulometría post ensayo al mostrar una tendencia lineal para tamaños de partículas menores a 0,6 mm.

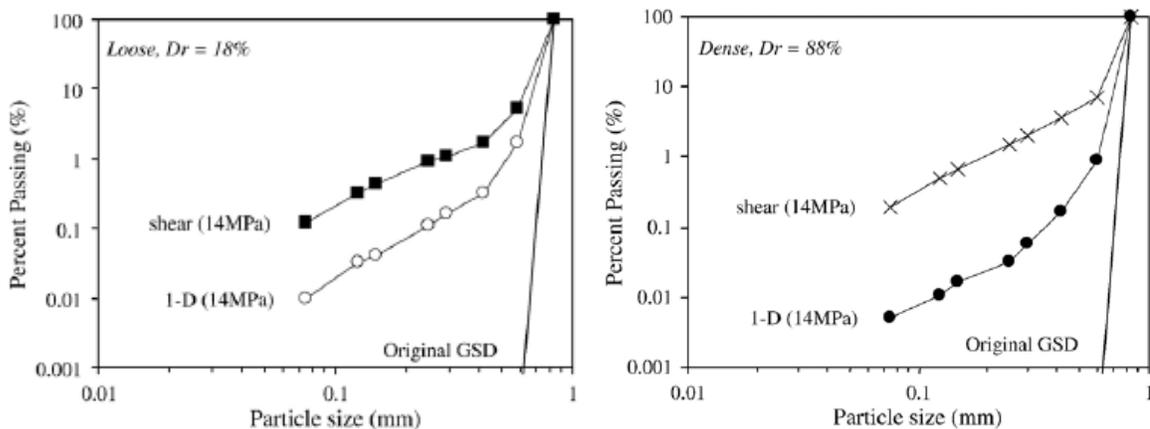


Figura 23: Granulometría post ensayo de corte simple en arena de Ottawa en escala log-log (Guimaraes et al., 2007)

3. MATERIALES ENSAYADOS

Las muestras ensayadas proceden del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS) perteneciente a la División Chuquicamata de Codelco, ubicado a unos 17 km al norte de la ciudad de Calama, Región de Antofagasta.

Chuquicamata actualmente opera como mina a rajo abierto pero debido a la existencia de un volumen importante de recursos minero a mayor profundidad se ha decidido continuar la extracción de esos minerales por el método subterráneo de *block caving*. Dentro del marco de este proyecto se desarrolla esta investigación con materiales procedentes de los túneles de acceso que están siendo desarrollados.

En la Figura 24 se presenta un diagrama de los bloques a extraer de la mina subterránea, los cuales se ubica justo debajo del rajo actual.

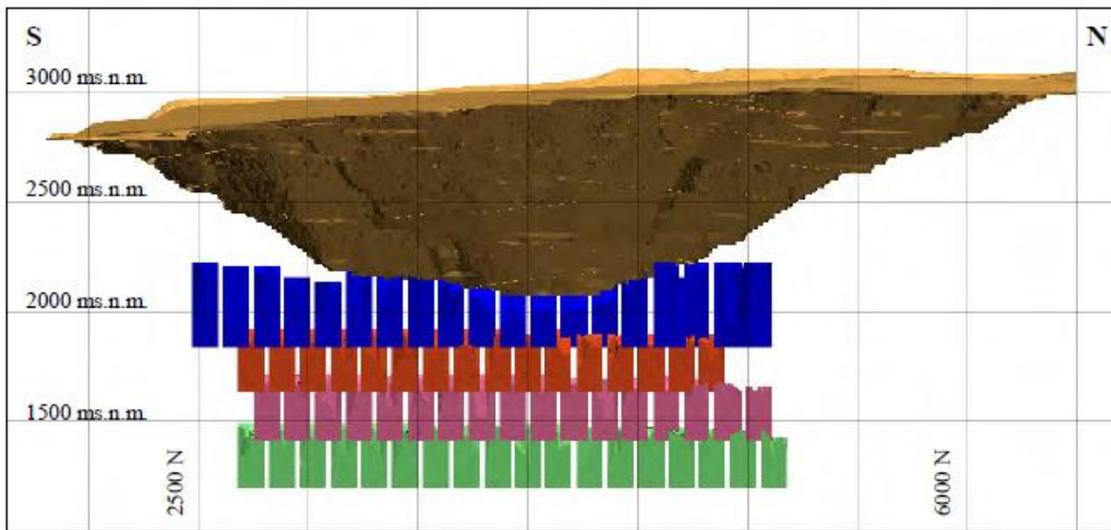


Figura 24: Diagrama del rajo abierto de Chuquicamata y los 4 niveles de extracción de la nueva mina subterránea (Codelco, 2009)

Codelco para su división Chuquicamata define 12 Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB) de las cuales 4 interesan en el área del proyecto subterráneo. En la Figura 25 se presenta la ubicación en relación a los bloques a extraer de las 4 UGTB que serán utilizadas en esta investigación. La unidad QIS (1) se representa en amarillo, QMS (2) y PES (4) en mostaza mientras que PEK (3) se representa en rojo.

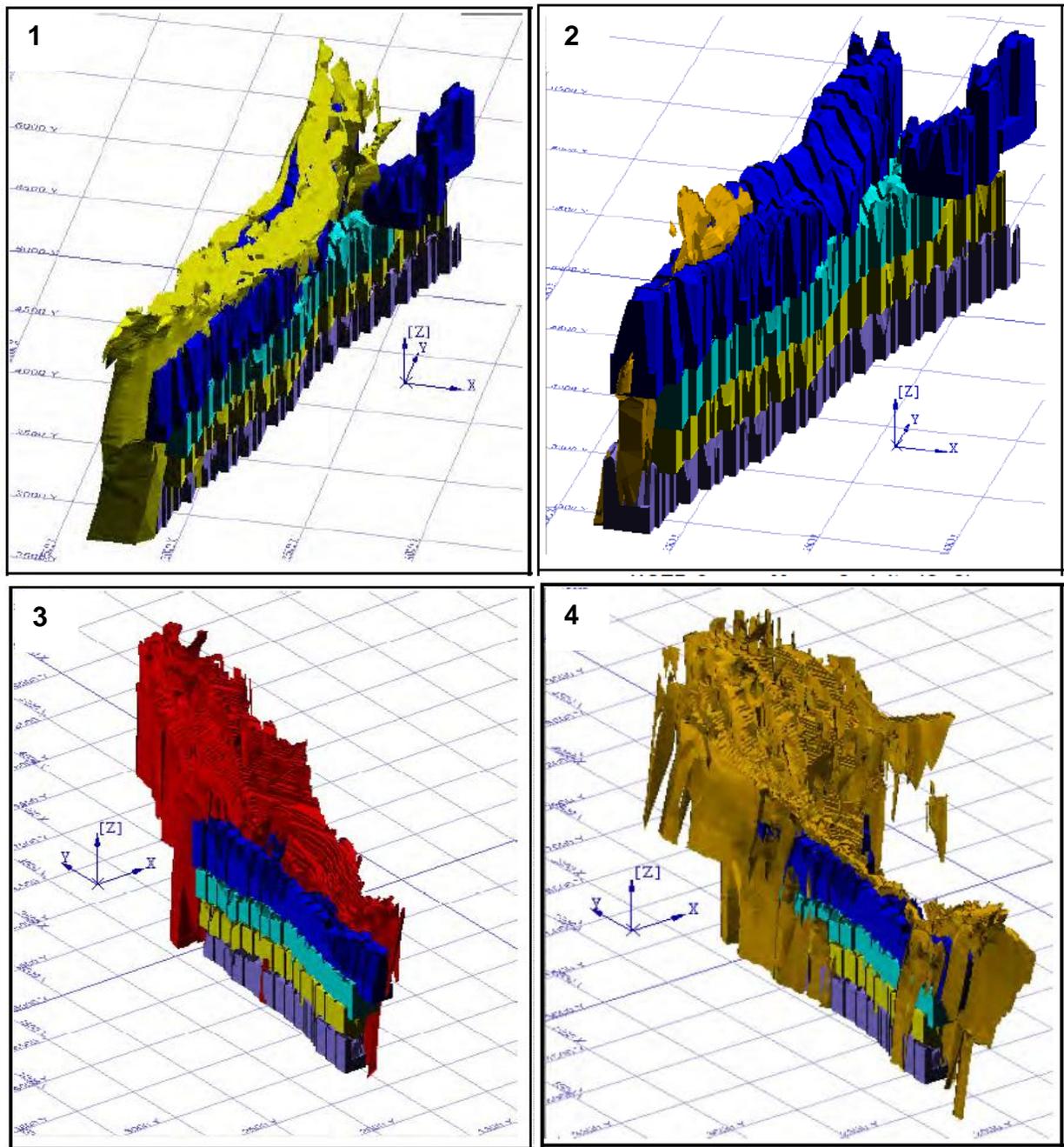


Figura 25: Ubicación de las unidades geotécnicas QIS (1), QMS (2), PEK (3) y PES (4) (Codelco, 2009)

Las muestras ensayadas son materiales de marina proveniente de la tronadura de los túneles del PMCHS, las cuales no tienen valor económico. El material original a ensayar proviene de estas cuatro unidades y contiene tamaños menores a 0,075 mm (finos) hasta partículas de 100 mm.

Debido a la restricción de tamaño máximo de las partículas que presenta la probeta del ensayo de corte simple, se preparó cada material con tamaño entre malla #10 (4,75 mm) y #4 (2,00 mm), posteriormente se lavó y secó para eliminar los finos. Por esto

todas las muestras tienen una curva granulométrica similar. Se utilizó una muestra nueva para cada ensayo.

Dada la necesidad de ensayar un material débil que probablemente genere gran porcentaje de rotura se decidió seleccionar manualmente los granos débiles de la muestra PES para crear la muestra FRÁGIL.

Para los 5 materiales se realizaron ensayos de densidad mínima y máxima, gravedad específica, granulometría inicial y resistencia individual de partículas a la compresión simple. Los resultados para todos los materiales se presentan en la Tabla 1. Para la muestra FRÁGIL se utilizaron los resultados de densidad mínima y máxima y gravedad específica de la muestra PES debido a la imposibilidad de seleccionar la gran cantidad de material FRÁGIL necesaria para estos ensayos. Esto se considera una aproximación aceptable dado que los materiales tienen características similares.

Tabla 1: Parámetros intrínsecos de los materiales ensayados

Muestra	Gs ⁽¹⁾	Y _{min} ⁽²⁾ [gr/cm ³]	Y _{max} ⁽³⁾ [gr/cm ³]	Resistencia individual ⁽⁴⁾ [kg/cm ²]
QIS	2,71	1,377	1,626	107,05
QMS	2,73	1,385	1,64	89,15
PEK	2,69	1,342	1,606	81,67
PES	2,64	1,314	1,565	77,85
FRÁGIL	2,64	1,314	1,565	28,14

(1) ASTM D854-58

(2) ASTM D4254

(3) JSF E161 (Método Japonés)

(4) Wee, B.H. (2004)

A continuación se describe brevemente el procedimiento utilizado en los ensayos realizados para caracterizar el material.

- Gravedad específica (Gs): Se pesaron aproximadamente 30 gr de material. Este material se depositó en un picnómetro, se llenó de agua, luego se aplicó vacío y posteriormente se pesó. A continuación se pesó el picnómetro sólo lleno de agua, asegurándose que no queden burbujas. La gravedad específica es la densidad de los sólidos dividido por la densidad del agua. Todo este procedimiento fue ejecutado en base a la norma ASTM D854-58.
- Densidad mínima y máxima (Y_{min}): La densidad mínima se realizó depositando el material con la ayuda de un embudo dibujando círculos para repartir el material en todo un molde cilíndrico de acero de 2856 cm³, se tuvo especial cuidado en dejar caer el material lo más cerca de la superficie para impedir el acomodo de las

partículas. El molde sin material y luego con material fue pesado y al conocer el volumen se puede obtener la densidad mínima.

La densidad máxima se realizó mediante el método Japonés (JSF E 161) depositando el material dentro del mismo molde especificado para el ensayo de densidad mínima en 10 capas, se golpeó cada capa 100 veces girando el molde. Al momento de golpear se sujeta el molde para impedir su desplazamiento. En la última capa se agrega cantidad de material tal que no falte al terminar de golpear, al final del ensayo se rasa el molde y se pesa. Con el peso y volumen del molde más el peso del molde más el material se obtiene la densidad máxima.

- Granulometría inicial: Luego de cortar la muestra (lavada y secada) entre la malla #4 y #10 se tamizó en seco la malla #8 (2,36 mm). Para cada material se tamizaron 4 muestras de 100 gramos aproximadamente del total del material con el fin de obtener una franja granulométrica.
- Compresión de partículas individuales: Con el fin de conocer la resistencia promedio de las partículas individuales se realizaron ensayos de compresión a las partículas del material listo para ensayar. Se escogieron al azar 20 partículas de cada muestra, se midió el diámetro menor y el mayor de estas y luego en el equipo de compresión simple descrito en la sección 4.2.2, se comprimió cada partícula hasta su rotura total. La resistencia individual se calculó como la fuerza máxima resistida dividido por el promedio de los diámetros al cuadrado. La resistencia final de las partículas para cada muestra se calculó como el promedio de las resistencias individuales de cada ensayo realizado.

A continuación se describe cada material utilizado indicando sus características generales y litológicas. Las muestras se denominan de la siguiente manera: QIS, QMS, PES, PEK y FRÁGIL.

Es importante destacar que los principales atributos de estos materiales son la forma angular de sus partículas y la nula meteorización geológica que han sufrido. Al proceder de tronadura de túnel no han sufrido el proceso de meteorización con respecto a las arenas naturales, no han sido transportadas ni desgastadas por agua, viento u otros agentes externos. Por esto se espera que este suelo artificial sea más débil que uno natural que ya ha sufrido un desgaste, quedándose con partículas redondeadas difíciles de reducir. Junto a lo anterior, se estima que la tronadura provoca microfracturas en las partículas que genera que estas sean más débiles independiente de su mineralogía.

3.1. QIS: Cuarzo Igual a Sericita

Esta unidad proviene de una roca granodiorita de textura obliterada con alteración de cuarzo secundario y sericita, ambos presentes en la misma cantidad. Textura obliterada significa que debido a las alteraciones se perdió la textura original de la roca, el cuarzo secundario se denomina así porque no proviene de la formación de la roca sino de alteraciones posteriores. La sericita es una alteración que debilita principalmente a las plagioclasas de la roca original.

Se estima que la resistencia para ensayos de carga puntual (LPT) en promedio es de 49 MPa (moderadamente resistente a resistente) (Codelco, 2009). Este valor no es necesariamente representativo del material ensayado.

Una vez cortado y lavado el material, entre malla #4 y #10, se obtiene una arena pobremente graduada con partículas angulares y resistencia a la compresión de las partículas individuales promedio de 107,05 kg/cm². En la Figura 26 se presentan los resultados de los 20 ensayos de compresión individual realizados, en rojo se presenta el promedio en fuerza [kgf].

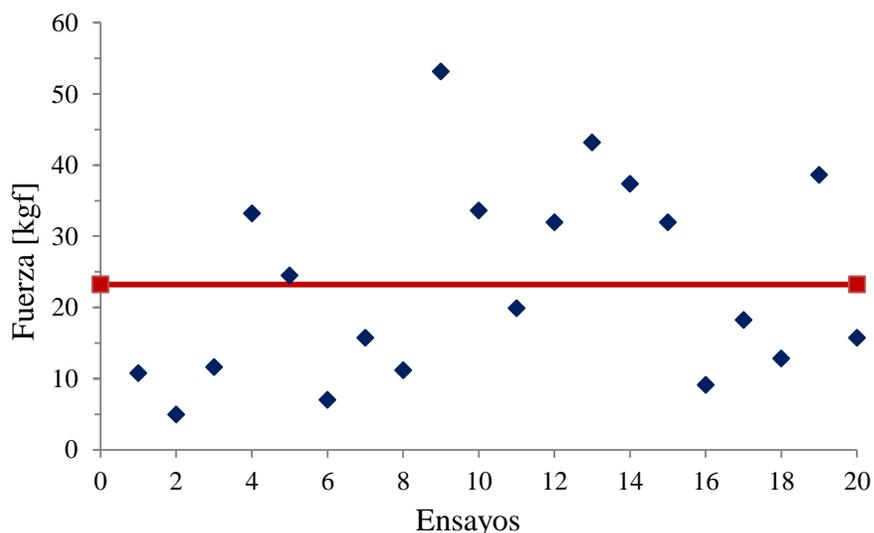


Figura 26: Distribución de resultados de compresión individual muestra QIS

En la Figura 27 se presenta una fotografía del material ensayado junto a una muestra litológica del material original. La franja de distribución granulométrica se presenta en la Figura 28.

La muestra se compone mineralógicamente por un 40% de cuarzo, 40% de plagioclasas, 5% de feldespato potásico (ortoclasa) y en menor grado molibdenita, pirita, entre otros. Presenta alteración cuarzo-sericita y limonita. La sericita está presente en aproximadamente el 35% de las plagioclasas.



Figura 27: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra QIS

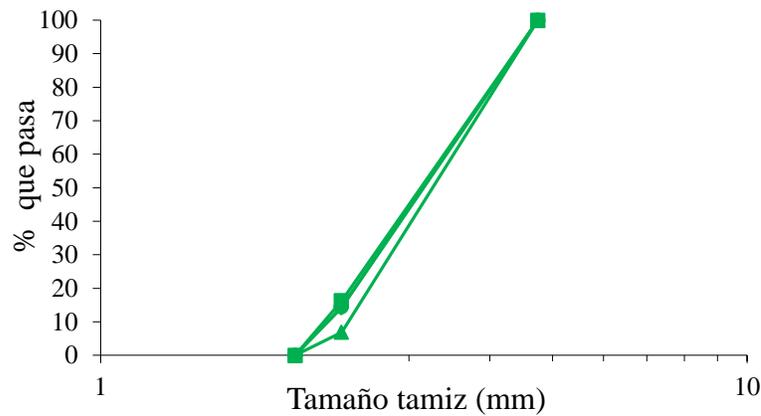


Figura 28: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material QIS

3.2. QMS: Cuarzo Mayor a Sericita

Esta unidad está compuesta por una roca granodiorita totalmente obliterada producto de una intensa alteración cuarzo-sericita.

Se realizaron 880 ensayos de carga puntual a testigos de roca y resultó una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 85 MPa (de resistente a muy resistente) (Codelco, 2009). Esta resistencia no es necesariamente representativa del material ensayado.

El material ensayado clasifica como una arena pobremente graduada con partículas angulares y resistencia a la compresión de las partículas individuales promedio de 89,15 kg/cm². En la Figura 29 se presentan los resultados de los 20 ensayos de compresión individual realizados, en rojo se presenta el promedio en fuerza [kgf].

El material preparado para ensayar y una muestra litológica se presenta en la Figura 30. La distribución granulométrica se muestra en la Figura 31.

3.3. PEK: Pórfido Este Potásico

Este material procede de la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico, la cual es el resultado de la sobre imposición de la alteración potásica a la unidad litológica Pórfido Este (roca entre granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita). Alteración potásica implica una introducción de feldespatos potásicos en la roca original.

Al realizar un total de 1433 ensayos PLT se determinó una resistencia a la compresión uniaxial de 116 MPa (muy resistente) (Codelco, 2009). Este valor no representa necesariamente la resistencia del material ensayado.

El material a ensayar, posterior al tamizado entre malla 4 y 10, y lavado del material, clasifica como una arena pobremente graduada con partículas angulares y resistencia a la compresión de las partículas individuales promedio 81,67 kg/cm². En la Figura 32 se presentan los resultados de los 20 ensayos de compresión individual realizados, en rojo se presenta el promedio en fuerza [kgf].

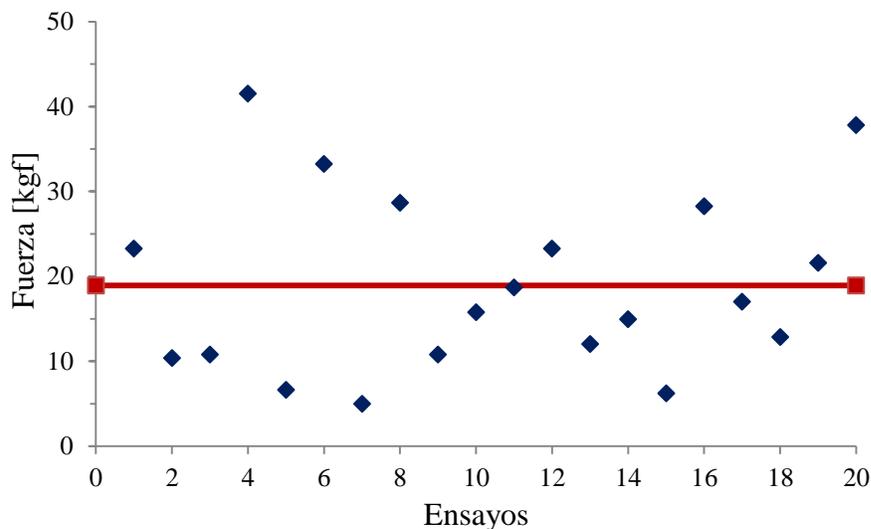


Figura 32: Distribución de resultados de compresión individual muestra PEK

En la Figura 33 se presenta una muestra litológica junto al material listo para ensayar. En la Figura 34 se presenta el gráfico con los resultados de la granulometría inicial.

La muestra se compone mineralógicamente por un 35% de cuarzo, 45% de plagioclasas, 12% de feldespato potásico y en menor grado molibdenita, entre otros. Presenta alteración cuarzo-sericita y limonita. La sericita afecta a un 35% de las plagioclasas.

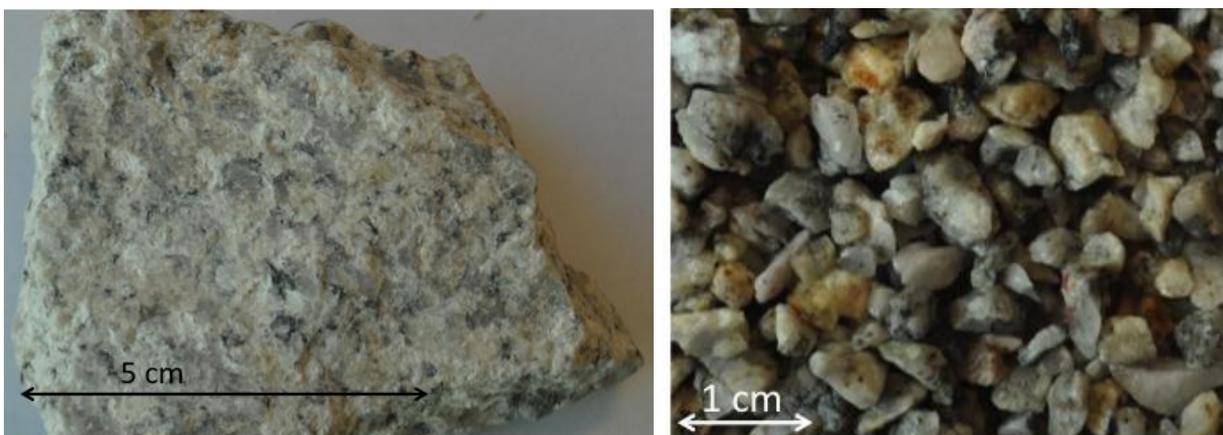


Figura 33: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra PEK

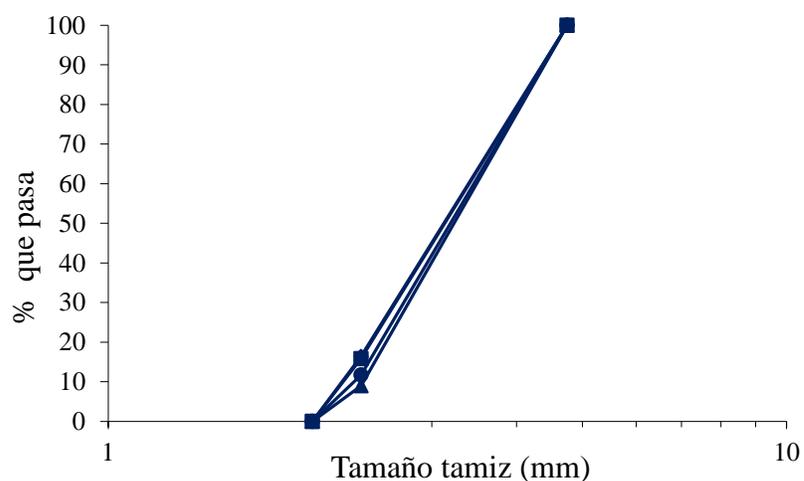


Figura 34: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material PEK

3.4. PES: Pórfido Este Sericítico

Esta unidad es el resultado 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.

Al realizar 832 ensayos para determinar la resistencia promedio a la compresión uniaxial de la unidad que equivale a 97 MPa (roca resistente) (Codelco, 2009). Este valor no representa necesariamente al material facilitado para ensayar.

El material PES está compuesto por un 25% de partículas débiles y 75% de partículas fuertes. La fracción frágil se debe a que la roca original está afectada por una zona de falla, reflejada en las estrías de falla que se presencian en la muestra original.

El material ensayado clasifica como una arena pobremente graduada con partículas angulares y resistencia a la compresión de las partículas individuales promedio de $77,85 \text{ kg/cm}^2$. En la Figura 35 se presentan los resultados de los 15 ensayos de compresión individual realizados a las partículas fuertes. Para las partículas débiles, punto verde en triángulo, se consideró un promedio de 20 ensayos que representan 5 partículas débiles (25% del total), en rojo se presenta el promedio en fuerza [kgf] para la muestra completa.

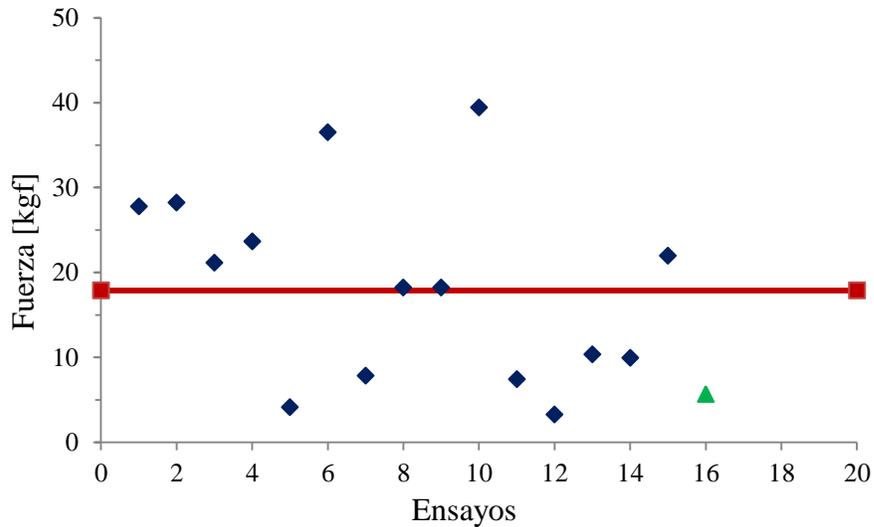
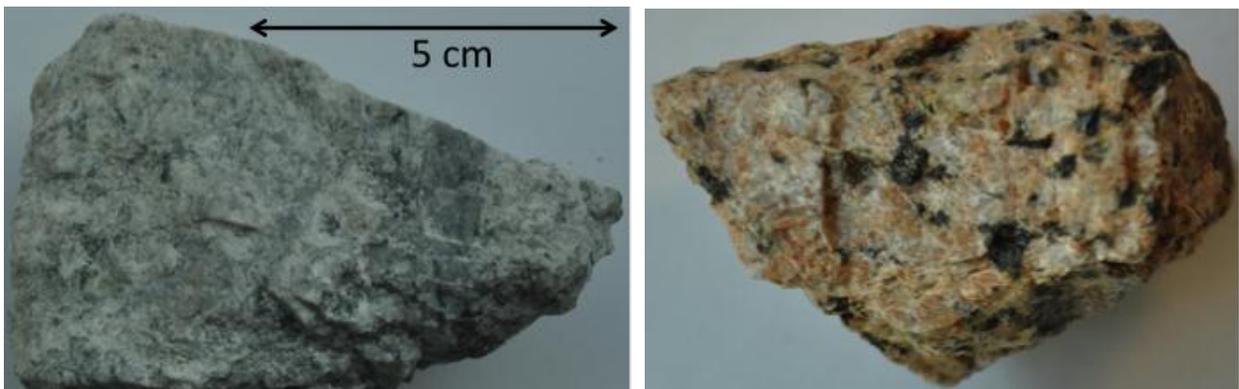


Figura 35: Distribución de resultados de compresión individual muestra PES

En la Figura 36 se presenta una fotografía del material listo para ensayar junto con una muestra litológica. En la Figura 37 se presenta el gráfico con los resultados de la granulometría inicial

La muestra 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.



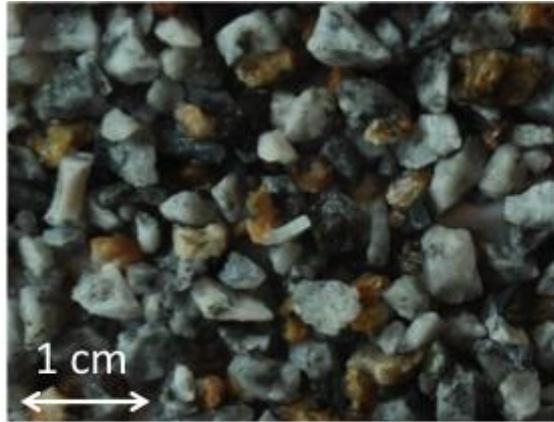


Figura 36: Muestra litológica (arriba), material preparado (abajo), muestra PES

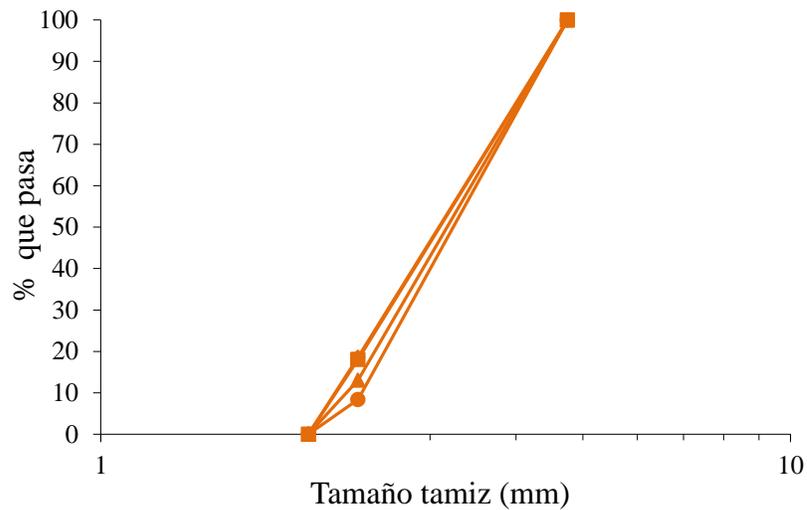


Figura 37: Distribución granulométrica inicial de 4 muestras del material PES

3.5. FRÁGIL

Esta muestra proviene de la selección de los granos débiles de la muestra PES. El material fue elegido manualmente fijándose principalmente en el color, donde los granos de color anaranjados son los más débiles. Estas partículas provienen de una zona afectada por una falla, presentan alteración argílica y epidota-clorita débil además de la alteración cuarzo-sericita. La debilidad de los granos proviene de la falla y no de la meteorización.

Cabe destacar que los granos fuertes producto de la selección de los granos débiles se guardan de forma independiente para no afectar la mineralogía inicial de la muestra PES.

El material obtenido clasifica como arena pobremente graduada con partículas angulares y resistencia promedio 28,14 kg/cm². En la Figura 38 se presentan los

resultados de los 20 ensayos de compresión individual realizados, en rojo se presenta el promedio en fuerza [kgf].

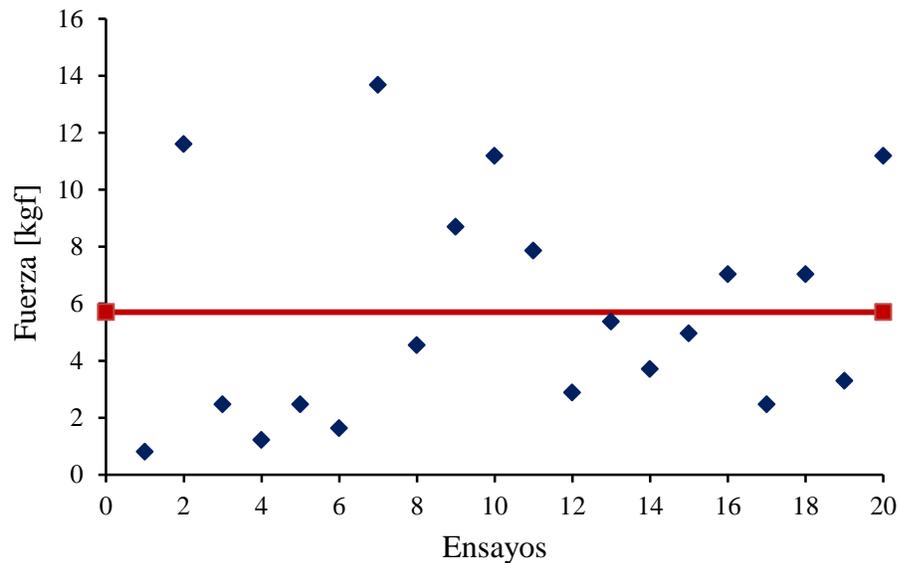


Figura 38: Distribución de resultados de compresión individual muestra FRÁGIL

En la Figura 39 se presenta una fotografía del material seleccionado y listo para ensayar junto a una muestra litológica. En esta última se aprecian las estrías de falla. En la Figura 40 se presenta el gráfico con los resultados del tamizado.

La muestra está compuesta por un 20% de cuarzo, 10% de plagioclasas, 55% de feldespato potásico y 12% de biotita. La sericita afecta a un 8% de las plagioclasas y a un 40% del feldespato potásico.



Figura 39: Muestra litológica (izquierda), material preparado (derecha), muestra FRÁGIL

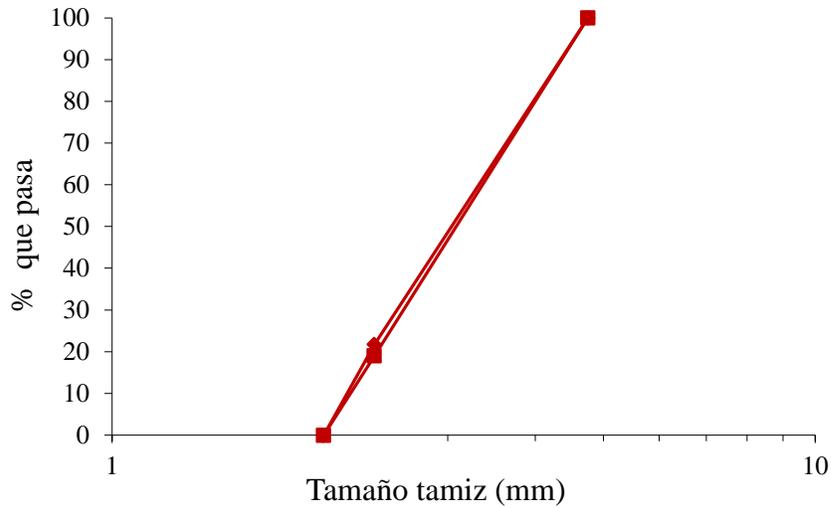


Figura 40: Distribución granulométrica inicial de 2 muestras de material FRÁGIL

En la Figura 41 se observa una diferencia promedio aproximada de $0,25 \text{ gr/cm}^3$ entre la densidad mínima y la máxima, este bajo valor se asocia a la granulometría uniforme y las partículas angulares que poseen estos materiales.

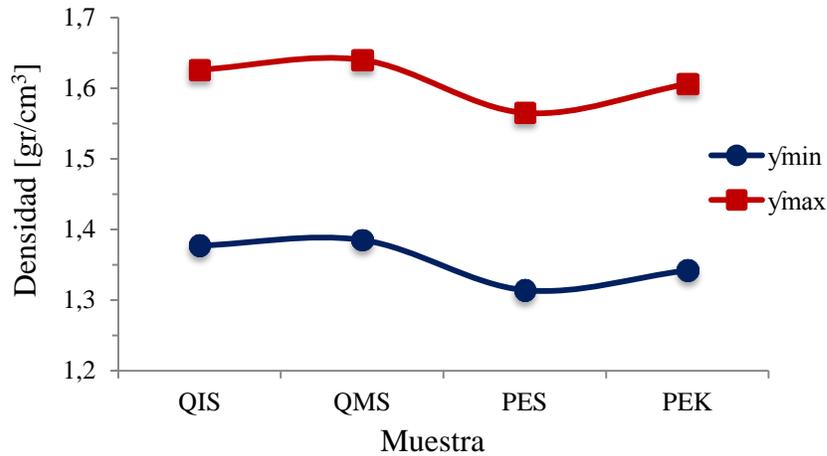


Figura 41: Comparación de densidades mínimas y máximas para los 4 materiales

En la Tabla 2 se muestra las características de la curva granulométrica de las muestras a ensayar: el tamaño medio (D_{50}), el coeficiente de uniformidad (C_u), coeficiente de curvatura (C_c) y clasificación USCS. Dado que todas las curvas son similares, los parámetros mencionados también lo son.

Tabla 2: Caracterización de curvas granulométricas para las 5 muestras

Muestra	D ₅₀ [mm]	Coefficiente de Uniformidad (Cu)	Coefficiente de Curvatura (Cc)	Clasificación USCS
QIS	3,38	1,6	0,96	SP
QMS	3,39	1,59	0,96	SP
PEK	3,37	1,61	0,96	SP
PES	3,35	1,61	0,95	SP
FRÁGIL	3,25	1,63	0,91	SP

En la Tabla 3 se presenta un resumen de la composición mineralógica para cada muestra. Esta se analizó a partir del material preparado y listo para ensayar. En la última fila se agrega la dureza de Mohs promedio obtenida de los porcentajes de minerales y la dureza de Mohs de cada mineral.

Tabla 3: Porcentaje de minerales por muestra

Muestra/ minerales	Porcentaje [%]				
	<i>QIS</i>	<i>QMS</i>	<i>PEK</i>	<i>PES</i>	<i>FRÁGIL</i>
<i>Cuarzo</i>	40	60	35	35	20
<i>Plagioclasa</i>	40	25	45	25	10
<i>Ortoclasa</i>	5	5	12	28	55
<i>Anfíbol</i>	0	0	0	1	0
<i>Biotita</i>	1	0	0	1	12
<i>Pirita</i>	3	2	1	1	0
<i>Calcopirita</i>	1	1	1	1	0
<i>Molibdenita</i>	7	6	5	5	0
<i>Especularita</i>	1	0	0	1	0
<i>Limonita</i>	2	1	1	1	0
<i>Clorita</i>	0	0	0	1	3
Dureza de Mohs promedio	6,14	6,38	6,22	6,09	5,72

4. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

4.1. PROGRAMA DE ENSAYOS

Se realizaron 52 ensayos de corte simple monótono en estado seco, considerando 6 ensayos por material más 22 repeticiones, de las cuales sólo 43 se llevaron a cabo correctamente. Además, se realizaron granulometrías en cada muestra después de haber sido ensayadas.

Cada ensayo se llevó a cabo a una velocidad constante de deformación de 0,12 [mm/min] con una deformación horizontal máxima de 12 mm (deformación por corte de 60%), a densidades relativas iniciales de 0 y 100% y con un esfuerzo vertical de 1, 3 y 7 [kg/cm²]. Se utilizó una probeta circular de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura. Todos los ensayos se realizaron en estado seco y bajo esfuerzo de corte simple monótono. La Tabla 4 muestra la denominación de los ensayos, la primera letra está asociado al estado de la muestras, S para suelto y D para denso, el segundo número denota la carga vertical. En la siguiente sección se describen los equipos utilizados y el procedimiento de los ensayos.

Tabla 4: Denominación de ensayos de corte simple

DR/ σ_v	1 [kg/cm ²]	3 [kg/cm ²]	7 [kg/cm ²]
0%	S1	S3	S7
100%	D1	D3	D7

4.2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

A continuación se describe el equipo de corte simple utilizado en los ensayos y el equipo de compresión usado para determinar la resistencia individual de las partículas. En la sección 4.3 se presentan las metodologías de cada ensayo.

4.2.1. Aparato de corte simple

El equipo de corte simple utilizado es de marca Wykeham Farrance, tipo NGI (Norwegian Geotechnical Institute) con probeta circular, y se encuentra ubicado en el laboratorio de sólidos y medios particulados de la FCFM en la Universidad de Chile. En la Figura 42 se presentan los resultados de prueba realizados en una arena fina de relave con el equipo de corte simple para 2 cargas verticales diferentes.

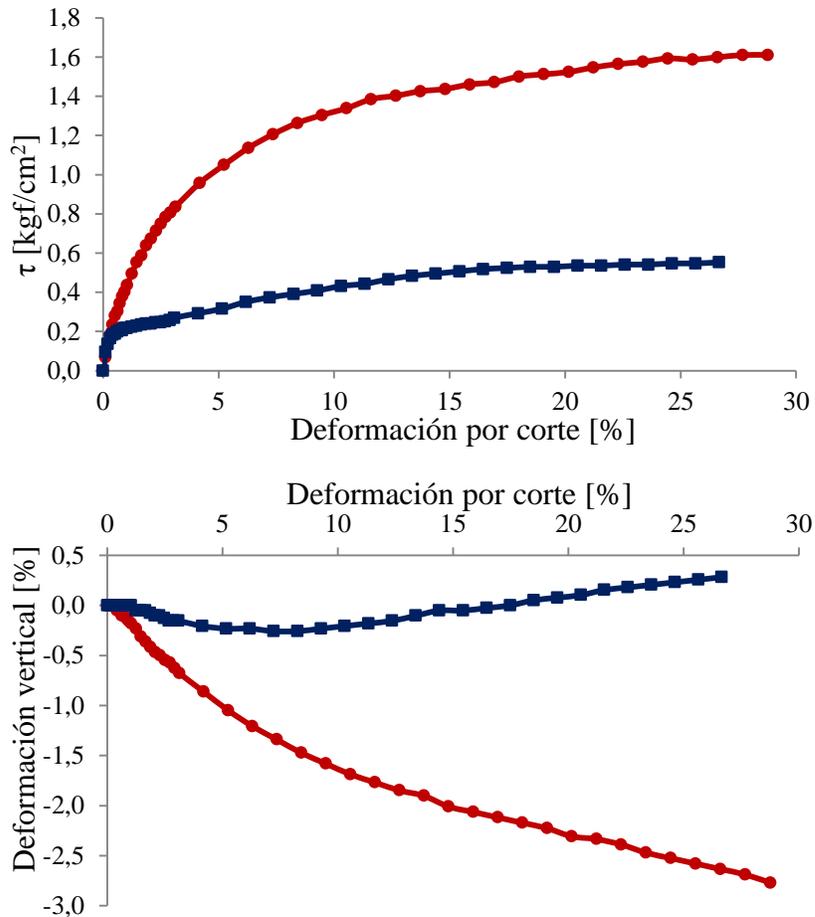


Figura 42: Ensayos de prueba en máquina de corte simple

En la Figura 43 se presenta una imagen del equipo sin la muestra montada y flechas indicando cada elemento de la máquina. A continuación se procede a describir cada parte del aparato.

- Celda de carga vertical: La carga vertical es aplicada mediante presión de aire. Esta se aplica 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. Se realizaron dos calibraciones de la celda mediante pesos conocidos obteniendo la siguiente ecuación:

$$Carga\ vertical\ \left[\frac{kgf}{cm^2}\right] = \frac{(0,124*Voltaje+0,233)}{Área\ probeta\ [cm^2]} \quad (6)$$

- 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 kg/cm² y 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 5kN. Se mide a través del canal 1 del transductor digital en Volt. La conversión es:

$$Carga\ horizontal\ [kgf] = 0,222 * (Voltaje - Voltaje_{inicial}) - 0,0689 \quad (7)$$

- Engranajes de velocidad: Permiten modificar la velocidad del ensayo. El equipo funciona a una velocidad de deformación constante y es automático. Se observan en la parte izquierda de la Figura 43. 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, está ubicado sobre el centro del marco de carga. Tiene una precisión de 0,01 mm y una deformación máxima de 30 mm.

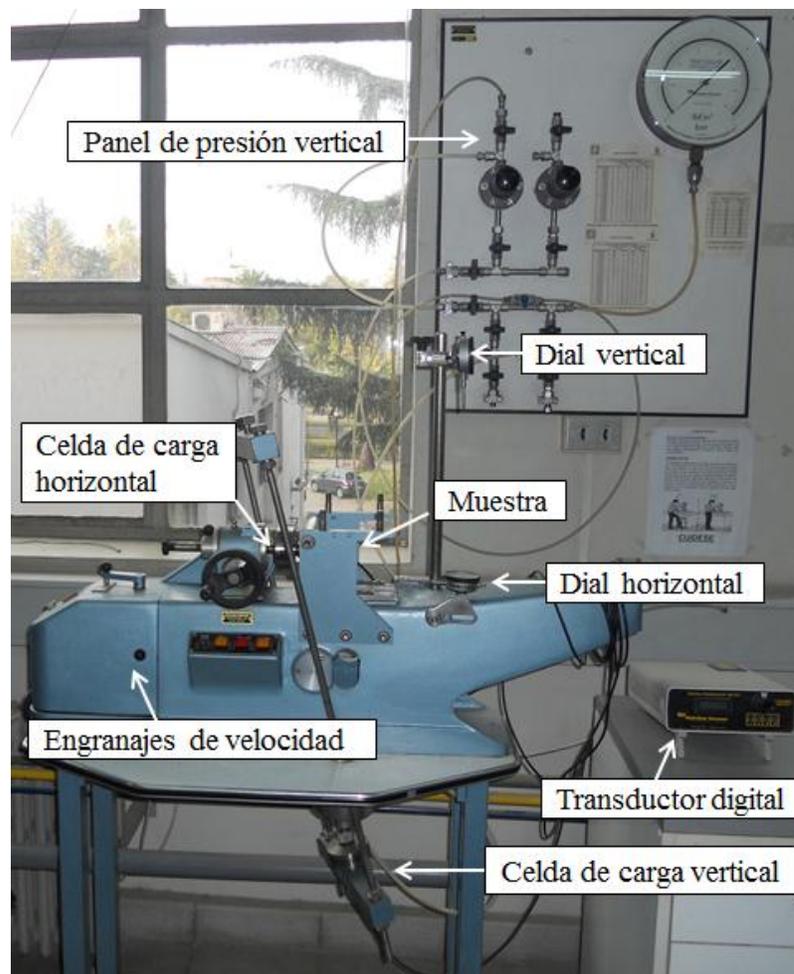


Figura 43: Fotografía equipo de corte simple

Durante el desarrollo de los ensayos se descubrió que cuando la respuesta del material era dilatante el equipo tenía una limitación. Al aumentar de tamaño la muestra, existía un punto en que el marco no se desplazaba y comenzaba a ejercer una fuerza vertical externa. Esto se resolvió chequeando la carga vertical continuamente y regulándola.

4.2.2. Equipo compresión simple

Para estimar la resistencia a la compresión simple de las partículas individuales se utilizó el equipo de compresión simple de marca SOILTEST, modelo U-560. Este aparato posee dos placas planas paralelas y la carga se aplica de forma manual con una manivela. La fuerza aplicada comprime el anillo de carga y se registra en el dial que este posee. La transformación de la lectura a fuerza es la siguiente:

$$Carga [kgf] = Lectura * 0,415 - 0,0253 \quad (8)$$

La fuerza sobre la muestra se ejerce al acortar la distancia entre los dos platos planos, en la Figura 44 se observa una fotografía del equipo. En la Figura 45 se presenta un acercamiento al ensayo mostrando una partícula ensayada entre los dos platos.

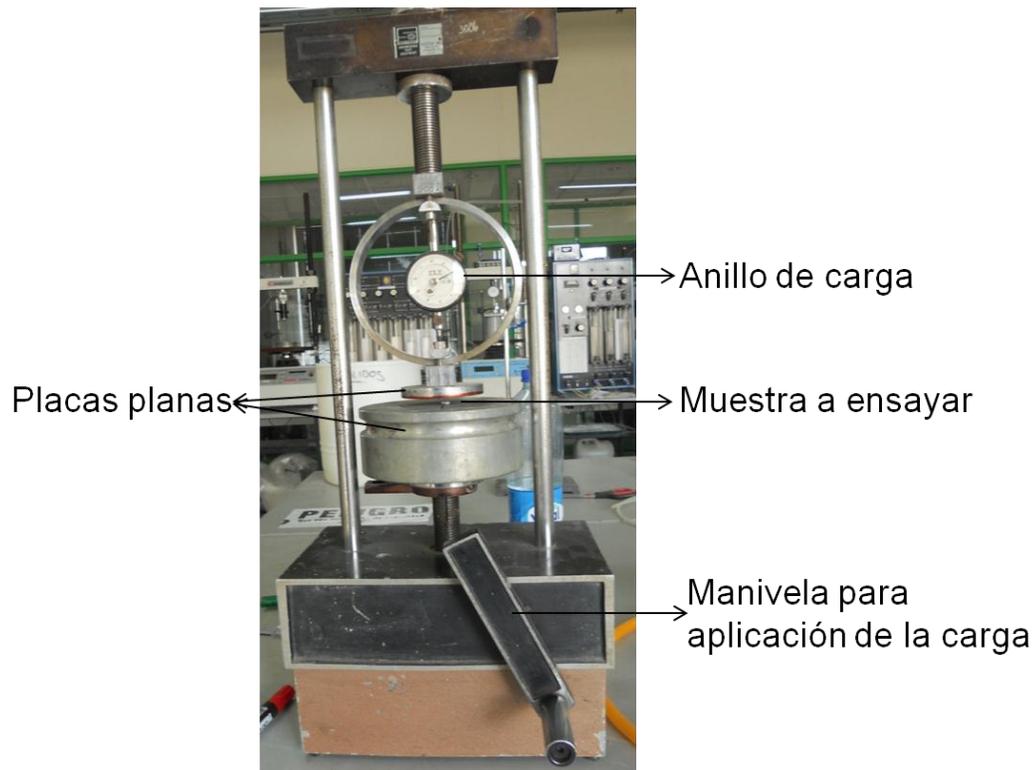


Figura 44: Equipo compresión simple

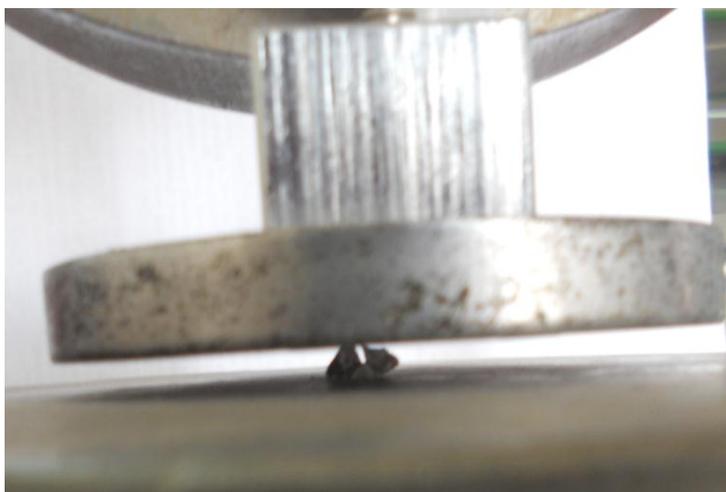


Figura 45: Muestra ensayada en equipo de compresión

4.3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Se realizaron ensayos de gravedad específica, densidad mínima y máxima, granulometría inicial y resistencia individual de las partículas con el fin de caracterizar el material. Esto se realizó para cada una de las 4 muestras en donde se excluye la muestra FRÁGIL. El material FRÁGIL proviene de las partículas débiles de la muestra PES y se consideran los valores de esta como caracterización del material FRÁGIL y por lo tanto no se realizan ensayos de caracterización adicionales.

Como se mencionó anteriormente se realizaron 6 ensayos de corte simple y granulometría post ensayo para cada uno de los 5 materiales. A continuación se explica la metodología utilizada en cada ensayo.

- Corte simple monótono: Este ensayo está compuesto por 3 etapas: preparación y montaje de muestra, consolidación inicial y aplicación del corte.

Para el montaje de la muestra se utilizan los siguientes elementos: una base, una membrana de goma, 4 anillos de goma, un porta anillos de goma, 28 anillos metálicos, una abrazadera, un cuello de aluminio como ayuda para montar la muestra y un *cap* superior.

❖ Preparación y montaje muestra:

- Con todos los elementos necesarios para montar la probeta se procedió a pesar el material según la densidad de montaje deseada.

- En la base inferior se montó la membrana y se sujetó con dos anillos de goma por la parte exterior. Sobre estos se depositaron los 28 anillos. Se colocó y ajustó la abrazadera para darle mayor firmeza a los anillos de tal forma que no se deforme la muestra antes del ensayo. Sobre los anillos se colocó el cuello de aluminio para aumentar la altura y facilitar la confección de la probeta. La membrana se dobla y sujeta por sobre esta pieza.
- Una vez terminado lo anterior se depositó el material. Si era denso se realizó en un promedio de 4 capas, si era suelto se depositó lentamente en una sola capa. Se verificó la altura deseada, luego se retiró el cuello de aluminio y se colocó el *cap* superior sobre el material dejando la membrana alrededor de este.
- Luego de esto se sujetó la membrana alrededor del *cap* superior con dos anillos de goma. Estos se colocaron con ayuda del porta anillos de goma.
- Con el procedimiento anterior se tenía la muestra lista para montar en la máquina de corte simple. Se acomodó sobre el carril deslizante y se conectó la celda horizontal.
- Sobre esto se colocó la segunda base la cual tiene un agujero en el interior para colocar el pistón de carga. Se montó el pistón y se aseguró la base con 4 pernos. Finalmente se fijó con un perno el marco de carga.
- Con el paso anterior el montaje queda terminado, y sólo falta acomodar el dial vertical y ajustarlo en cero, fijar la manivela que aplica automáticamente la deformación de corte y ajustar el dial horizontal y fijarlo en cero también.

❖ Consolidación inicial:

- Con el dial vertical fijado en cero se aplicó la presión deseada revisando el canal 2 del transductor digital. Se esperó hasta que el dial se mantuviera constante y se anotó la deformación vertical obtenida.
- Antes de seguir a la última etapa se sacó la abrazadera de los anillo, se volvió el dial vertical a cero, se cambió al canal 1 del transductor digital y se anotó el valor inicial de la carga horizontal.

❖ Aplicación del corte:

- Con ambos diales en cero, manivela fija y carga horizontal inicial registrada se procedió a revisar los engranajes y colocarlos en el lugar que corresponde según la velocidad de deformación elegida.

- Luego de esto se da inicio al ensayo, se fue anotando la carga horizontal y la deformación vertical cada cierta deformación horizontal. Junto a esto se verificó que la carga vertical se mantuviera constante en todo el ensayo. En los casos que esta carga aumentaba se iba regulando desde el panel de presiones, si esto era insuficiente se regulaba el perno que sujeta el marco de carga.
- Granulometría post ensayo de corte simple: El material post ensayo se pesó y se tamizó entre las mallas #10 y #200. No se lavó el material dada la poca presencia de finos.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de corte simple y granulometría post ensayos descritos en la sección 4.1. Se muestran los gráficos tensión-deformación, deformación vertical versus deformación por corte y los ángulos de fricción secantes. En relación a la rotura de partículas, se presentan las curvas granulométricas post ensayo y los parámetros de rotura descritos en la sección 2.2.2.

En la Tabla 5 y Figura 46 se muestran las densidades post etapa de consolidación para cada ensayo realizado. Se observa que en general la deformación inicial es similar para todas las muestras y se incrementa al aumentar la carga. Sólo la muestra FRÁGIL con DR de 0% y confinamiento 7 kg/cm² presenta una mayor consolidación debido, probablemente a la rotura de partículas.

Cabe destacar que el ensayo D7 de la muestra PES se realizó a una densidad inicial de 77% en vez de 100% debido a la imposibilidad de montar la muestra a la densidad requerida.

Tabla 5: Densidad relativa post consolidación para todos los ensayos realizados

Muestra	Densidad confección		Densidad post consolidación					
			$\sigma_v = 1,0$ [kg/cm ²]		$\sigma_v = 3,0$ [kg/cm ²]		$\sigma_v = 7,0$ [kg/cm ²]	
	DR [%]	γ [gr/cm ³]	DR [%]	γ [gr/cm ³]	DR [%]	γ [gr/cm ³]	DR [%]	γ [gr/cm ³]
QIS	0	1,377	8	1,394	21	1,423	27	1,437
	100	1,626	105	1,641	109	1,652	116	1,674
QMS	0	1,385	6	1,399	18	1,425	29	1,450
	100	1,640	104	1,653	109	1,668	114	1,684
PEK	0	1,342	8	1,360	14	1,374	19	1,386
	100	1,606	105	1,621	107	1,630	114	1,652
PES	0	1,314	6	1,327	16	1,349	19	1,314
	100	1,565	105	1,580	113	1,606	88(*)	1,530
FRÁGIL	0	1,314	9	1,333	22	1,363	41	1,407
	100	1,565	105	1,581	108	1,590	118	1,622

* DR de montaje igual a 77%

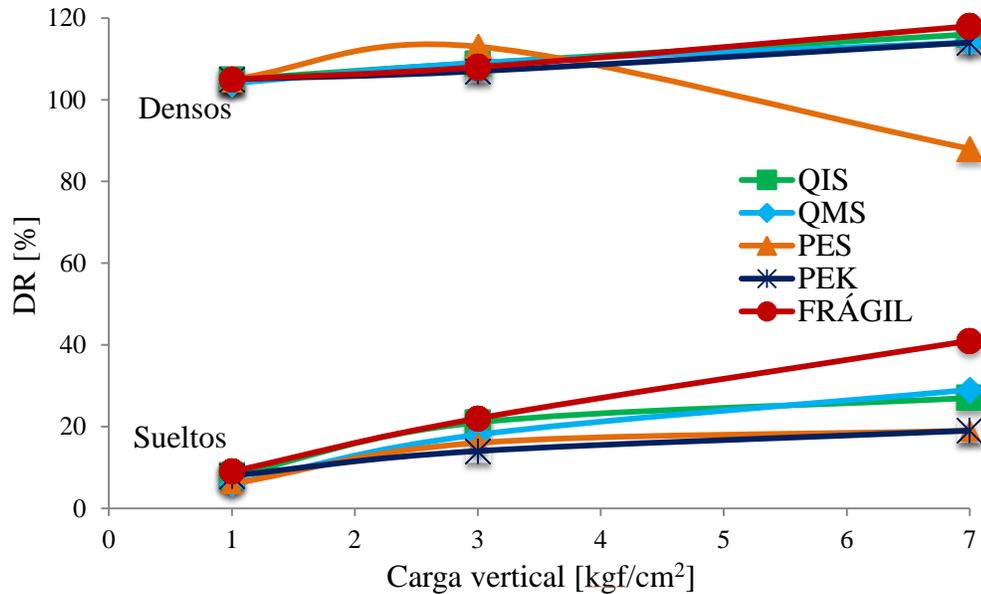


Figura 46: Densidad relativa post consolidación para cada ensayo realizado

5.1. TENSIÓN-DEFORMACIÓN Y CAMBIO VOLUMÉTRICO

A continuación se presentan los gráficos de tensión-deformación y deformación vertical versus deformación por corte. La deformación por corte se calcula de la siguiente manera:

$$Deformación\ por\ corte = \frac{Cambio\ horizontal\ [mm]}{Altura\ post\ consolidación\ [mm] + Cambio\ vertical\ [mm]} \quad (9)$$

Mientras que la deformación vertical:

$$Deformación\ vertical = \frac{Cambio\ vertical\ [mm]}{Altura\ post\ consolidación\ [mm]} \quad (10)$$

Se tiene que el cambio vertical es positivo cuando la muestra dilata y negativo cuando se contrae.

Los resultados se presentan según material y posteriormente una comparación según ensayo. Según lo descrito en el Capítulo 3 se observa que los materiales PEK, QIS y QMS tienen comportamientos similares y son posibles de comparar con PES (25% de partículas frágiles) y FRÁGIL (con un 100% de partículas débiles).

5.1.1. Repetitividad de ensayos

Como se mencionó en la sección 4.1 se realizaron 52 ensayos de corte simple de los cuales se presentan 30 de ellos. Con el fin de mostrar la repetitividad que poseen los ensayos a continuación se presentan las repeticiones de algunos de los ensayos realizados.

En la Figura 47 y Figura 48 se incluyen los gráficos de tensión deformación y comportamiento volumétrico para repeticiones realizadas en diferentes ensayos y muestras. Para cuantificar la repetitividad, se consideró un procedimiento análogo al desarrollado por El Dine et. al (2010), el cual considera la resistencia al corte como comparación en base a la siguiente fórmula.

$$error = \frac{\Delta\tau}{\tau_p} \quad (11)$$

Donde $\Delta\tau$ la diferencia de la resistencia *peak* de cada ensayo y τ_p es la resistencia promedio de ambos ensayos, y según los resultados de la Figura 47 el error varía entre 0 y 13%. Aunque este resultado podría ser considerado relativamente alto, la naturaleza del material ensayado (arenas de tronaduras susceptibles a rotura de partículas) explica este error asociado.

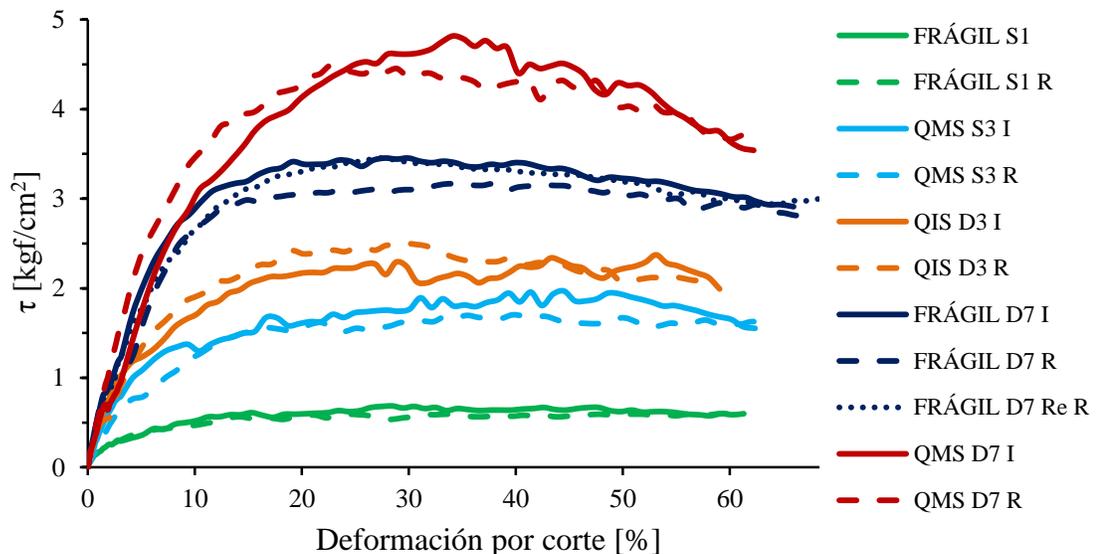


Figura 47: Repetitividad en ensayos de corte simple, gráfico tensión-deformación

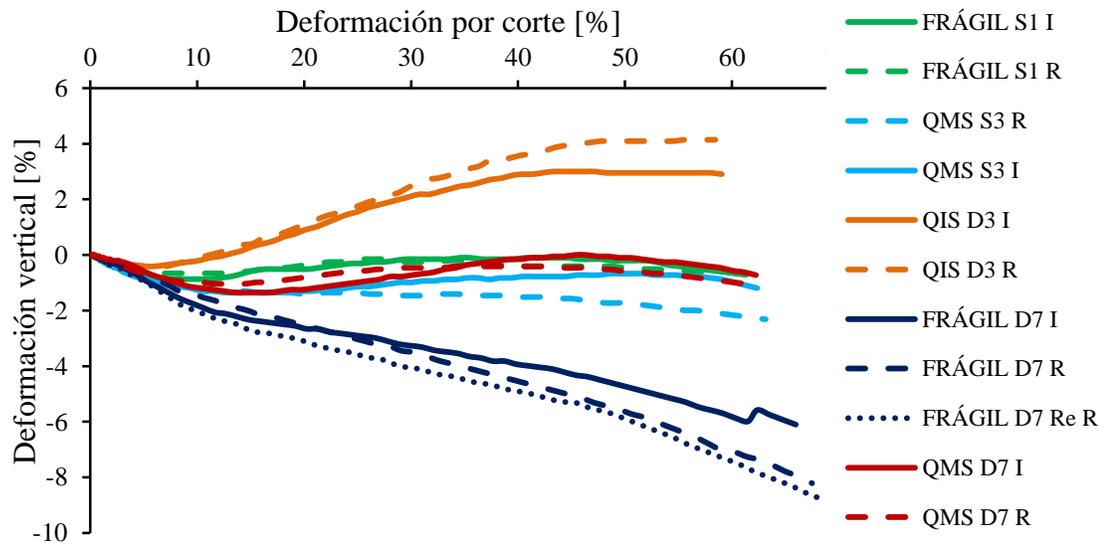


Figura 48: Repetitividad en ensayos de corte simple, gráfico de comportamiento volumétrico

5.1.2. Resultados de ensayos en cuarzo igual a sericita QIS

Según la sección 3.1, la muestra QIS posee un 40% de cuarzo y un 40% de plagioclasas. Además, la resistencia a la compresión promedio es $107,5 \text{ kg/cm}^2$ e indica que sus partículas son las más resistentes entre los 5 materiales. Los resultados se presentan en Figura 49 y Figura 50.

De los gráficos se observa que a mayor carga vertical, mayor es la resistencia alcanzada por la muestra para una misma densidad relativa inicial. Junto a esto, se observa que para una misma carga vertical, a mayor densidad relativa mayor es la resistencia. Además, se aprecia que para igual confinamiento la resistencia a grandes deformaciones depende de la densidad relativa inicial.

En ambas figuras se observa irregularidades en las curvas, destacadas por incrementos y caídas abruptas de resistencia y de cambio volumétrico, lo cual estaría directamente relacionado a rotura de partículas durante el ensayo. Cuando se produce este fenómeno, al romperse una partícula se genera una disminución de la resistencia y un posterior reacomodo en la vecindad donde se encuentra esta partícula. Después de tal reacomodo de partículas, se genera un aumento en la resistencia de la muestra hasta que otra partícula experimenta rotura de partículas y así sucesivamente. Estas irregularidades en las curvas podrían ser explicadas también por la relación de 4,21 entre la altura de la probeta y el tamaño máximo de las partículas.

En la Figura 49 se observa un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento debido a que el material alcanza una resistencia máxima y se mantiene medianamente estable a pesar del aumento de la deformación por corte.

Otro aspecto interesante en estos resultados es la falta de una resistencia *peak* en aquellos ensayos inicialmente densos. Una de las explicaciones puede ser el rompimiento de las partículas dado que cuando el material tiende a dilatar las partículas se intentan montar pero no resisten los esfuerzos efectivos, lo cual provoca que las partículas se rompan y se reacomoden.

Otra explicación puede estar asociada a que el ensayo de corte simple no genera un plano definido de rotura por lo que podría no existir una resistencia *peak* en suelos densos como lo exhibido comúnmente en ensayos triaxiales. En el Capítulo 6 se presenta una comparación con los resultados encontrados en la literatura para cortes simples monótonos realizados en otras arenas. En el Capítulo 6 se discutirá más respecto a este tema.

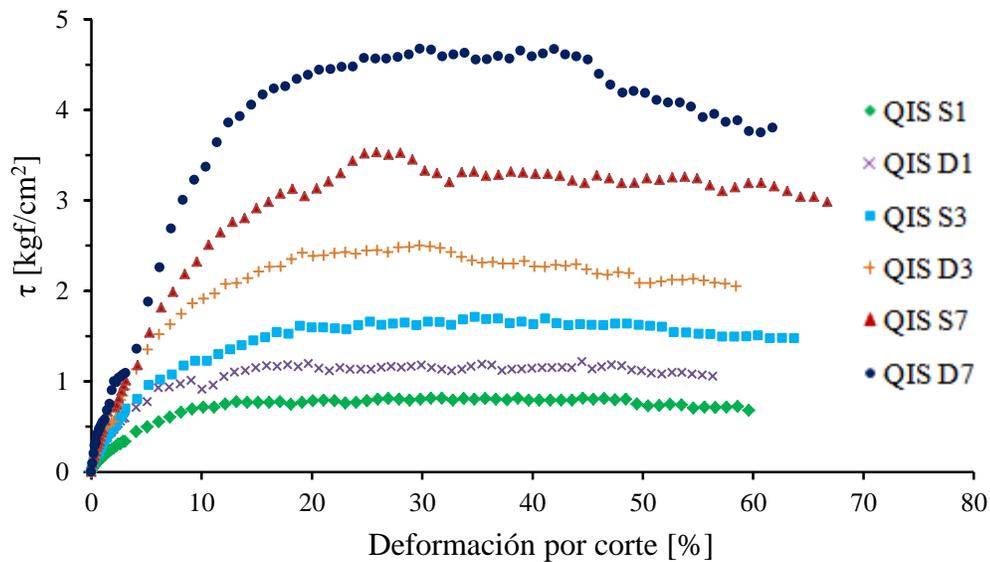


Figura 49: Curva tensión deformación para la muestra QIS

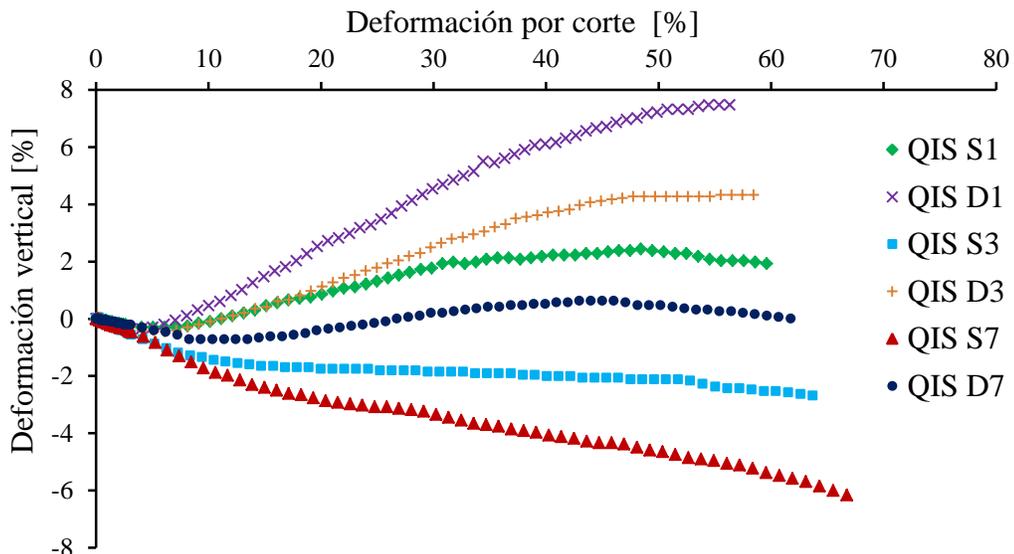


Figura 50: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra QIS

El cambio volumétrico del material se presenta en la Figura 50. En general se observa que las muestras ensayadas a densidades altas tienden a dilatar, esta dilatación disminuye a medida que aumenta la presión vertical. Por otro lado, para suelos inicialmente sueltos el material tiende a contraer a medida que el confinamiento aumenta.

Para una misma carga vertical, el material denso tiende a dilatar más que el suelto y esta diferencia es mayor al aumentar el confinamiento.

En general, se observa que a pesar de llegar a una deformación por corte entre 55% y 65%, no se llega a un estado estable, es decir, el volumen no se estabiliza y se estima que si se ensayara a mayor deformación por corte se generaría una mayor rotura de partículas. Con esto se estima que la resistencia última podría no ser la resistencia residual y esta se alcanzaría a una deformación incluso mayor como la obtenida en ensayos de anillos de corte.

5.1.3. Resultados de ensayos en cuarzo mayor a sericita QMS

Esta muestra posee un 60% de cuarzo y un 25% de plagioclasas. En relación a la resistencia individual de las partículas éstas son las segundas más resistentes de las 5 muestras con un valor de 89,15 kg/cm².

En relación a la resistencia individual promedio de sus partículas y la composición mineralógica de la muestra, el material QMS y QIS son similares. En general se observa un comportamiento similar al de la muestra QIS. En la Figura 51 se aprecia el comportamiento elasto-plástico con endurecimiento y la ausencia de *peak* en las muestras inicialmente densas.

Un aspecto diferente al exhibido en la muestra QIS es la tendencia de las curvas a una misma resistencia última al ser ensayadas a una misma carga vertical pero diferentes densidades. Este comportamiento se manifiesta para cargas verticales de 1 y 3 kg/cm².

Comparando las muestras QMS y QIS se observa una resistencia levemente mayor para QIS, probablemente relacionada con la resistencia de las partículas.

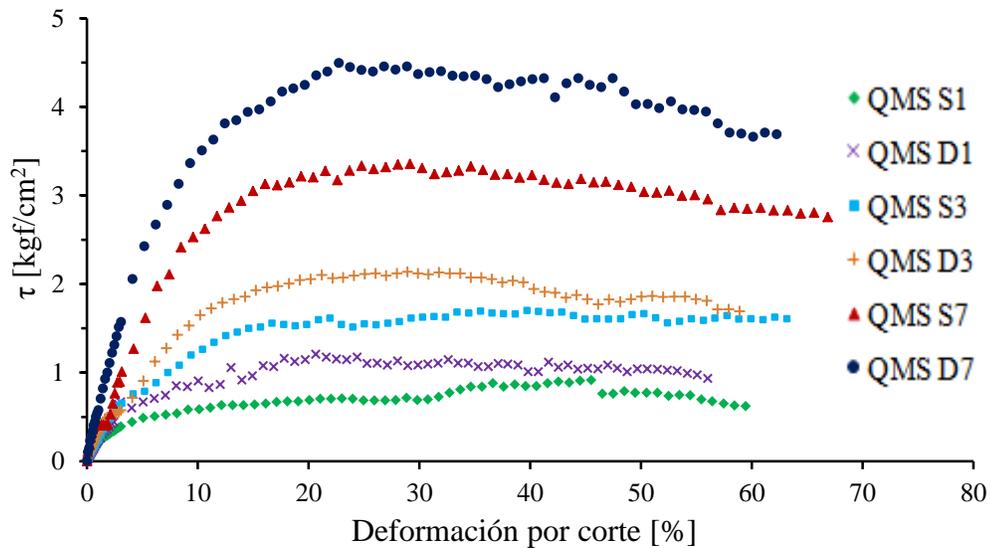


Figura 51: Curva tensión deformación para la muestra QMS

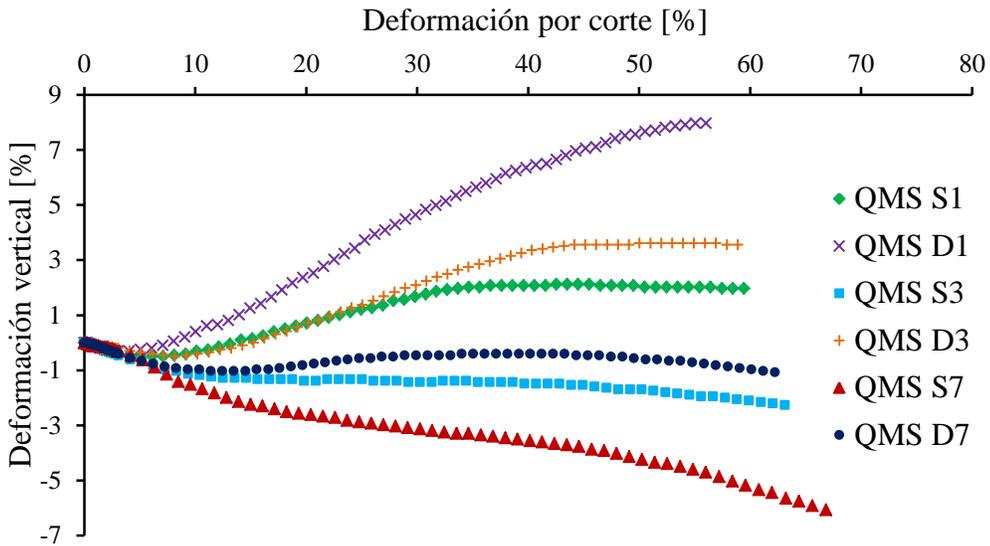


Figura 52: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra QMS

En la Figura 52 se observa la deformación vertical versus la deformación por corte. Al igual que la muestra QIS, para una misma densidad, la dilatación disminuye al aumentar la carga inicial aplicada. También se observa que, en general, no se alcanza un valor constante aún con un 55% a 65% de deformación por corte.

5.1.4. Resultados de ensayos en pórfido este potásico PEK

Esta muestra está compuesta por un 35% de cuarzo y un 45% de plagioclasas, posee una resistencia de las partículas individuales de $81,67 \text{ kg/cm}^2$, menor a los valores de QIS y QMS.

En relación a la influencia de la carga vertical y la densidad relativa en la resistencia, esta muestra se comporta de manera similar a QIS y QMS. Además, presenta un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento y una ausencia de un *peak* para muestras densas al igual que los materiales anteriores.

Se observa que para una misma carga vertical la resistencia a gran deformación de los ensayos es independiente de la densidad inicial. Este comportamiento se observa de manera más notoria en esta muestra que en las anteriores. Para las cargas 1 y 7 kg/cm² se observa que la resistencia a lo largo de la deformación por corte es muy similar; sin embargo, en la Figura 54, el comportamiento volumétrico es ampliamente diferente. De esto se infiere que la densidad relativa no influye de igual manera en la resistencia del material que en el comportamiento volumétrico. Esto implica que dos mecanismos distintos de deformación resultan en una misma resistencia.

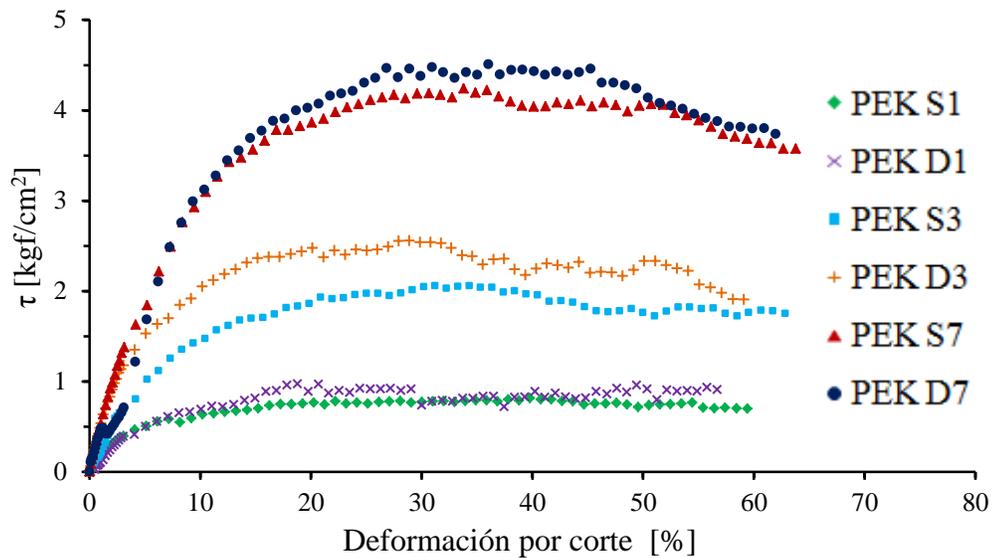


Figura 53: Curva tensión deformación para la muestra PEK

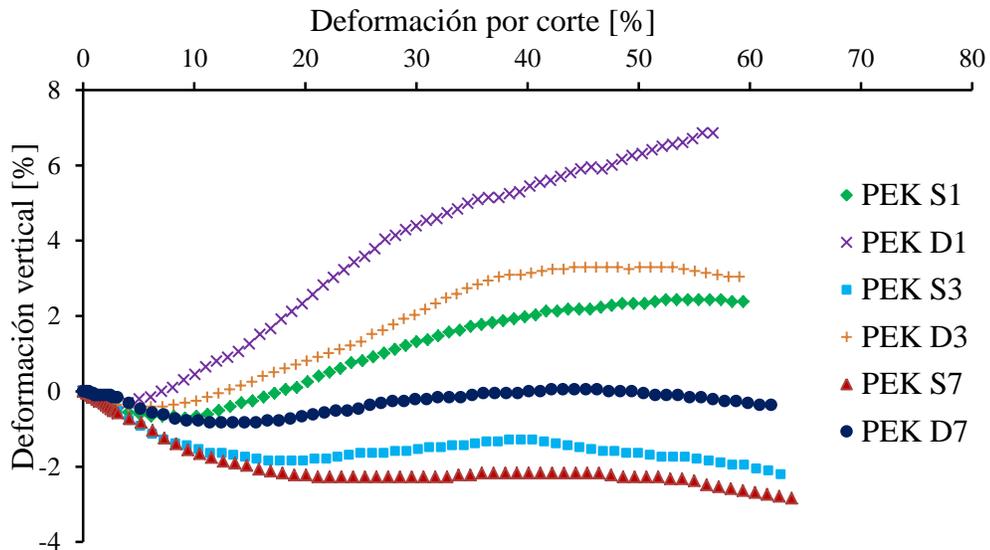


Figura 54: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra PEK

5.1.5. Resultados de ensayos en pórfido este sericítico PES

Este material está constituido por un 35% de cuarzo, un 25% de plagioclasas y un 28% de feldespato potásico. Contiene un 25% de partículas débiles provocando que sus partículas individuales sean menos resistentes que las muestras PEK, QIS y QMS con un valor de $77,85 \text{ kg/cm}^2$. Por lo tanto, se espera que este material sufra mayor porcentaje de rotura.

En la Figura 55 se observa que, al igual que los materiales anteriormente presentados, a mayor carga vertical mayor es la resistencia al corte. Junto a esto, se infiere que la densidad relativa inicial tiene una mínima influencia en la resistencia del ensayo de lo contrario a lo que sucede con el comportamiento volumétrico.

Al igual que en las muestras anteriores, se observa un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento junto con la ausencia de una resistencia *peak* para los materiales inicialmente densos.

Comparando con los materiales ya presentados se observa que este material desarrolla una resistencia al corte y comportamiento similar a QIS, QMS y PEK.

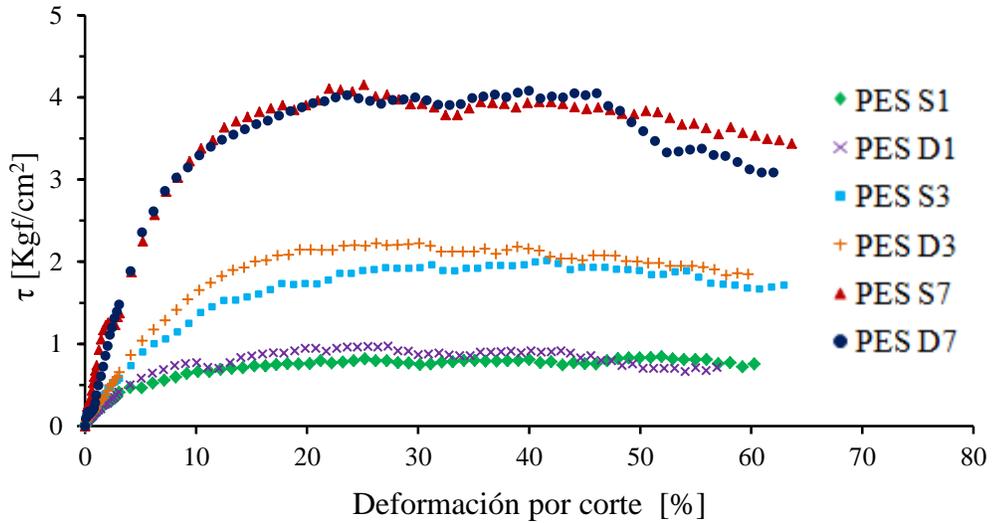


Figura 55: Curva tensión deformación para la muestra PES

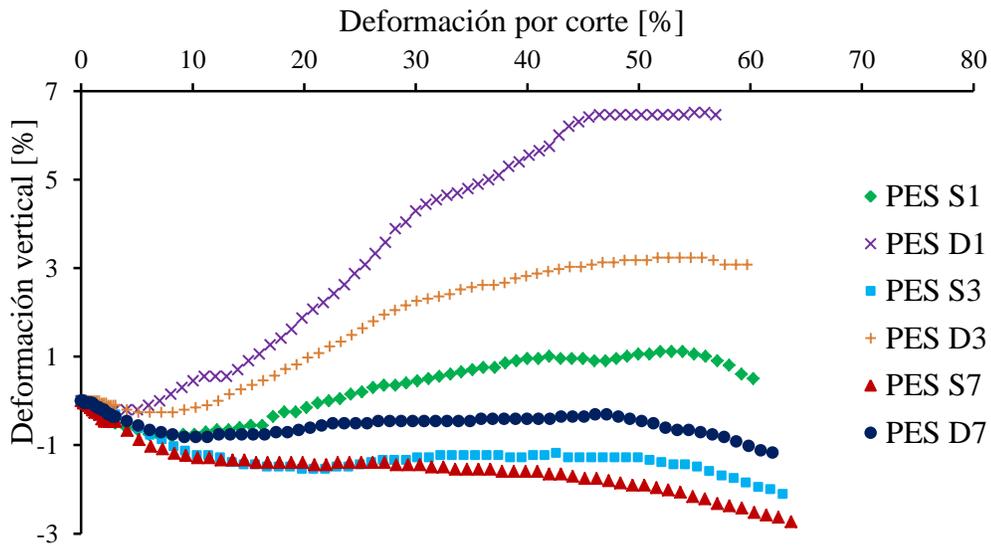


Figura 56: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra PES

5.1.6. Resultados de ensayos en FRÁGIL

Este material está compuesto por un 20% de cuarzo, 10% de plagioclasas y un 55% de feldespato potásico. Al estar compuesto por una selección de partículas débiles que han sido afectadas por una zona de falla se tiene una resistencia a la compresión de las partículas individuales muy inferior a las otras 4 muestras con un valor de 28,14 kg/cm².

En la Figura 57 se presenta la curva de tensión deformación para la muestra FRÁGIL. Tal como es esperado, a mayor carga vertical inicial mayor es la resistencia. Junto a esto, se muestra que a mayor densidad relativa inicial mayor es la resistencia para una

misma carga. También se puede apreciar que la resistencia a gran deformación es independiente de la densidad inicial para una misma carga vertical.

Para los ensayos densos se observa que estos no presentan una resistencia al corte *peak* y que el material tiene un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento.

En la Figura 58 se presenta el gráfico de deformación vertical versus deformación por corte. Para igual densidad se tiene que a mayor carga vertical menor es la dilatación.

Se observa también que las curvas S1 y D3, al igual que las curvas S3 y D7 tienen similar comportamiento volumétrico. Si se comparan estos resultados a los obtenidos de PES se observan que todas las curvas presentan una mayor contracción o una menor dilatación. Específicamente para las curvas de los ensayos D3 y D7 se presenta una mayor contracción comparada a la diferencia observada en las curvas S1 y D1.

Al ser este material el más débil de los 5, se observa una menor resistencia al corte en todos los ensayos realizados. Si se comparan los gráficos de deformación vertical versus deformación por corte se visualiza una diferencia aún más significativa aumentando al incrementar la carga vertical. Una posible explicación de esta diferencia es la mayor rotura de partículas que se espera en el material FRÁGIL, esto será comprobado en la sección 5.3

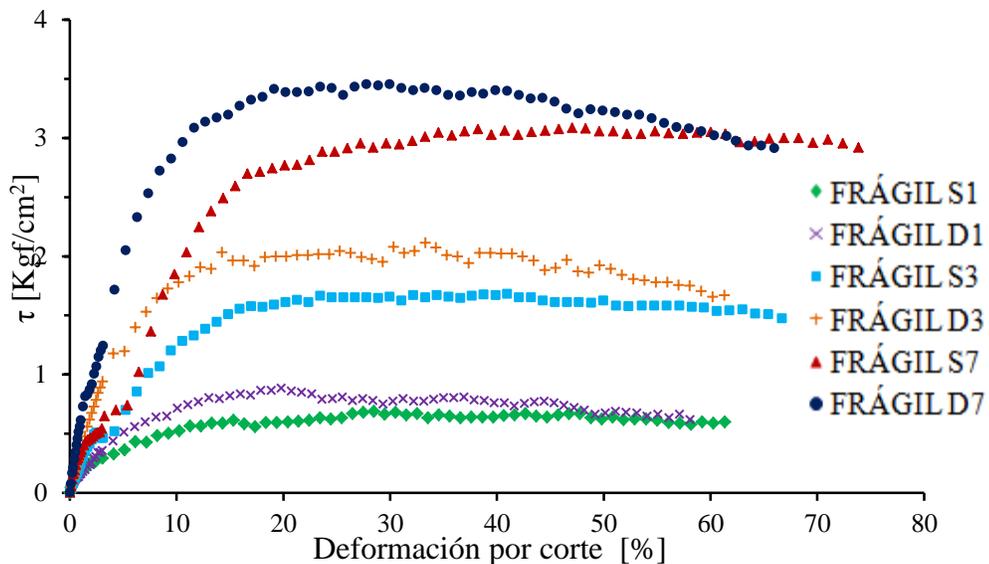


Figura 57: Curva tensión deformación para la muestra FRÁGIL

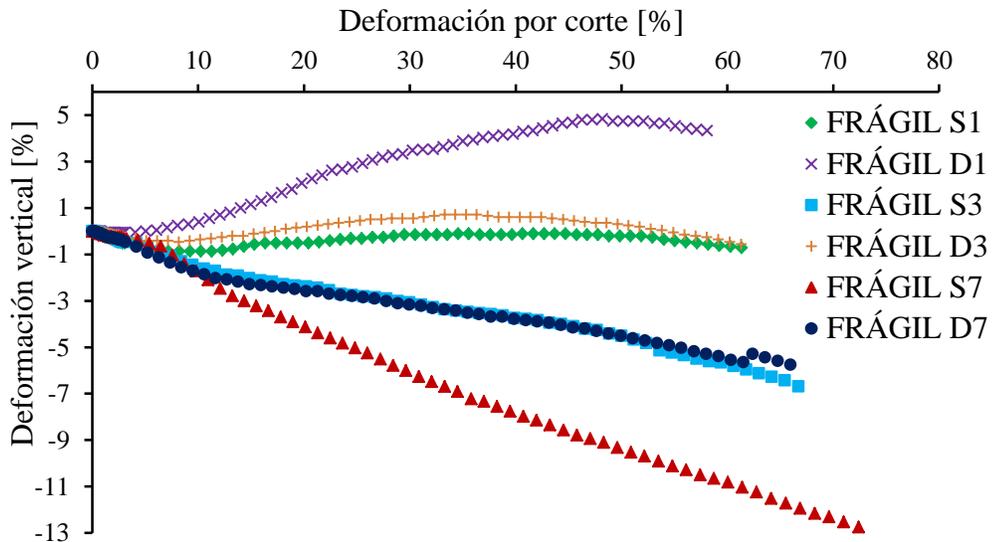


Figura 58: Curva deformación vertical versus deformación por corte para muestra FRÁGIL

5.2. ÁNGULO DE FRICCIÓN

A continuación se presentan los gráficos de los ángulos de fricción secantes calculados. En gráficos de tensión de corte versus presión vertical se obtienen curvas no lineales para cada densidad relativa inicial, por esto se calcularon los ángulos de fricción secante por ensayo y no directamente del gráfico. Este comportamiento se observa en materiales granulares gruesos o materiales que sufren rotura de partículas como se menciona la sección 2.1.

Se calcularon los ángulos de fricción *peak* y a gran deformación. Para el primero, se consideró el valor de la resistencia al corte máxima ocurrida en todo el ensayo, a pesar de que las curvas tensión deformación no muestran un *peak* notorio. Para la resistencia a gran deformación se consideró el último valor registrado.

Entre la Figura 59 y Figura 63 se presentan los ángulos de fricción por material en relación a la carga vertical utilizada. Se observa que a mayor carga vertical, menor es el ángulo de fricción obtenido y esta disminución del ángulo es no lineal.

En general, la tendencia es que los ángulos de fricción *peak* son mayores para densidad relativa de 100% que para los ensayos con DR=0%. Para los ángulos de fricción a gran deformación también se obtiene que estos son más altos para las mayores densidades.

Para los ensayos de densidad relativa inicial igual a 100% se tiene que las muestras QIS, QMS y PEK tienen ángulos de fricción muy similares (*peak* y último), para todas

las cargas verticales. PES y FRÁGIL presentan ángulos menores. Para DR=0% inicial la tendencia no es tan clara aunque sí se puede concluir que QIS, QMS y PEK son similares y FRÁGIL es la que tiene ángulos de fricción menores.

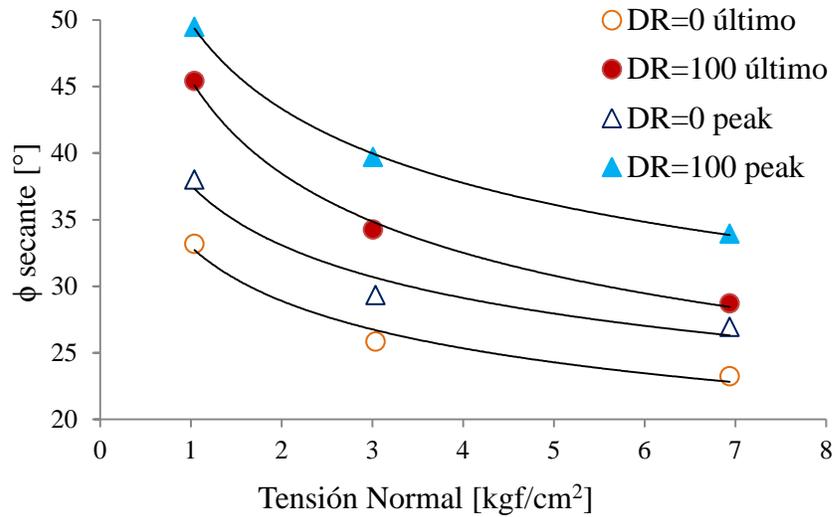


Figura 59: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra QIS

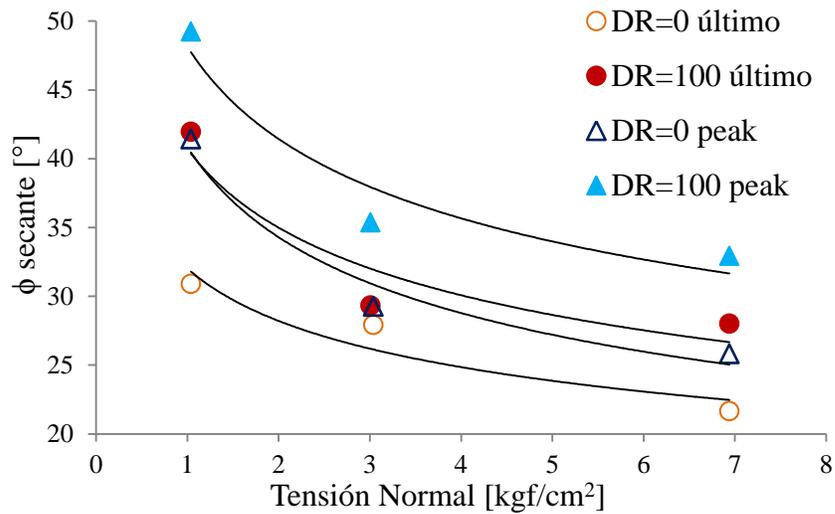


Figura 60: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra QMS

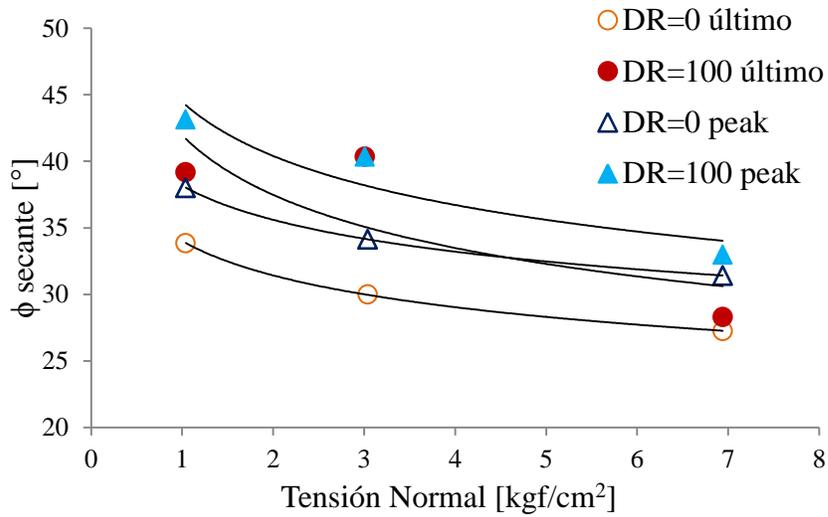


Figura 61: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra PEK

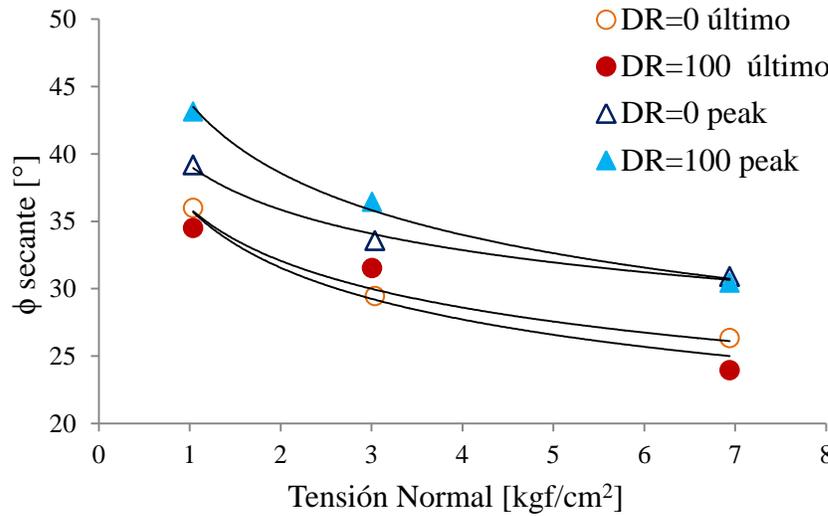


Figura 62: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra PES

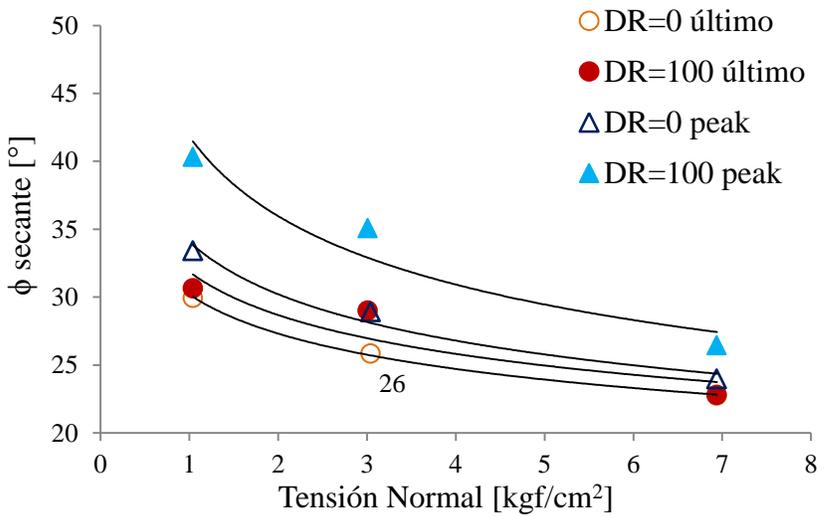


Figura 63: Ángulo de fricción secante versus tensiones normales, muestra FRÁGIL

5.3. ROTURA DE PARTÍCULAS

A pesar de utilizar cargas verticales moderadas (de 1 a 7 kg/cm²) es posible observar una cantidad de rotura importante lo cual se asocia a la ausencia de meteorización geológica de las partículas dada la procedencia del material, forma angular de las partículas, la uniformidad del suelo y la aplicación de corte simple a grandes deformaciones.

A continuación se presentan los resultados de las granulometrías post ensayo, tanto en escala semi logarítmica como a doble logarítmica, junto con el cálculo de los parámetros de rotura más importantes. Los gráficos a escala doble logarítmica se realizan con el fin de analizar la distribución fractal de los tamaños de partículas post ensayos. Los resultados se muestran para cada uno de los 5 materiales.

5.3.1. Granulometrías post ensayo según muestra

A continuación se presentan los gráficos de las granulometrías inicial y post ensayo para todas las muestras y todos los ensayos realizados. Se muestran dos gráficos por material, el porcentaje que pasa versus tamaño tamiz (semi-logarítmica) y otro a escala doble logarítmica para observar la distribución fractal de la curva granulométrica.

❖ QIS

En la Figura 64 se muestra que a mayor carga vertical mayor es la rotura producida llegando a aumentar de 13 a 31% en la malla #8 (2,36 mm) y de 0 a 10% en la malla #10 (2,00 mm) en porcentaje del material que pasa para el ensayo D7. Se observa para los ensayos a 7 kg/cm² que a mayor densidad mayor es la rotura de partículas, para los confinamientos menores no es posible distinguir en este gráfico la diferencia en la cantidad de rotura generada. Más adelante se presentan los parámetros de rotura que permiten con mayor claridad obtener alguna conclusión.

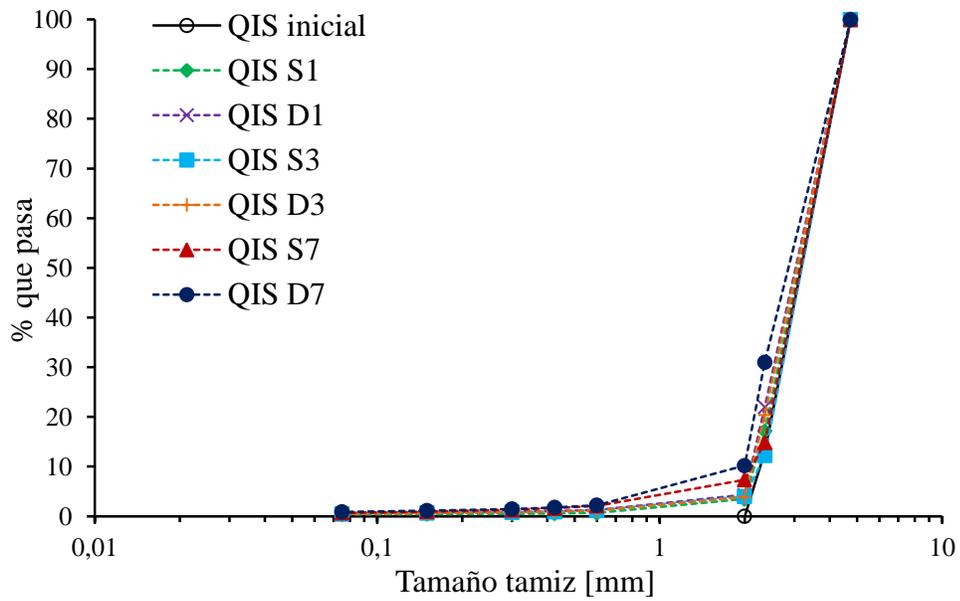


Figura 64: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QIS

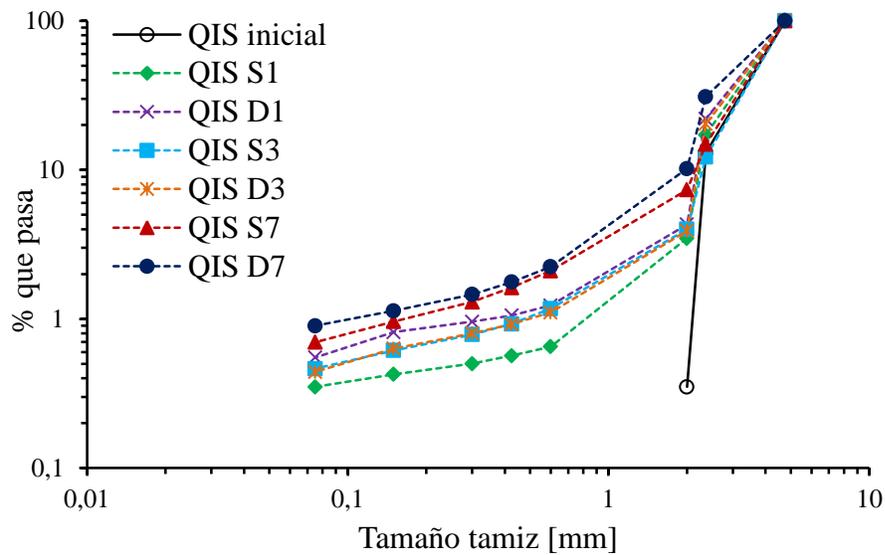


Figura 65: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QIS (escala log-log)

En la Figura 66 se presentan fotografías de la muestra sin ensayar (izquierda) y la muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=100\%$ (derecha) la cual genera la mayor cantidad de rotura. En la imagen post ensayo se observan partículas de menor tamaño (menores a 2,00 mm) probablemente generadas por abrasión más que por *crushing*.



Figura 66: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=100\%$ (derecha) para el material QIS

❖ QMS

En la Figura 67 se muestran las granulometrías post ensayo para la muestra QMS. Se observa que a mayor carga vertical mayor es la rotura de partículas producida. Para la carga vertical de 3 y 7 kg/cm^2 se observa que a mayor densidad relativa inicial mayor es la cantidad de rotura. Para el ensayo D7 que presenta la mayor cantidad de fragmentación se tiene un aumento del porcentaje que pasa la malla #8 de 12 a 35% mientras que para la malla #10 aumenta de 0 a 11%.

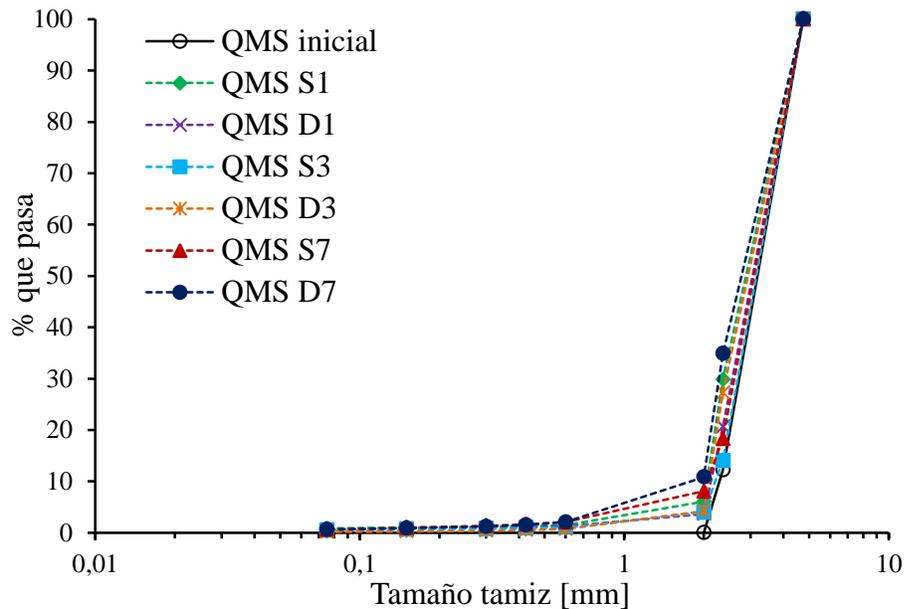


Figura 67: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QMS

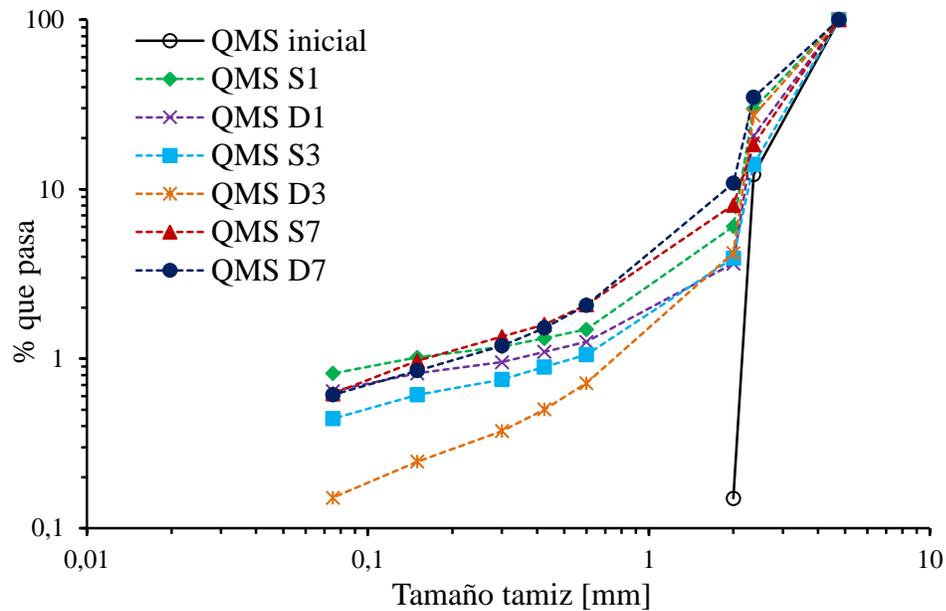


Figura 68: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra QMS (escala log-log)

En la Figura 69 se presentan fotografías del material inicial (izquierda) y de la muestra post ensayo D7 (derecha) el cual generó la mayor cantidad de rotura. Al igual que para la muestra QIS, se observa partículas de menor tamaño (menor a malla #10) generadas probablemente por abrasión, las partículas mayores no muestran signos de daño importante.



Figura 69: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=100\%$ (derecha) para el material QMS

❖ PEK

En la Figura 70 se presentan las curvas granulométricas post ensayo para cada ensayo realizado. Se observa que en general a mayor carga vertical mayor es la rotura aunque esta conclusión será confirmada al evaluar los parámetros de rotura. Se aprecia en

general una mayor cantidad de rotura para las muestras densas que para los ensayos sueltos a comparar a igual carga vertical.

Para el ensayo D7 que generó la mayor cantidad de rotura, se cuantifica un porcentaje que pasa la malla #8 de 26% versus el 12% del material inicial, y para la malla #10 se produce un 13% versus el 0% de original.

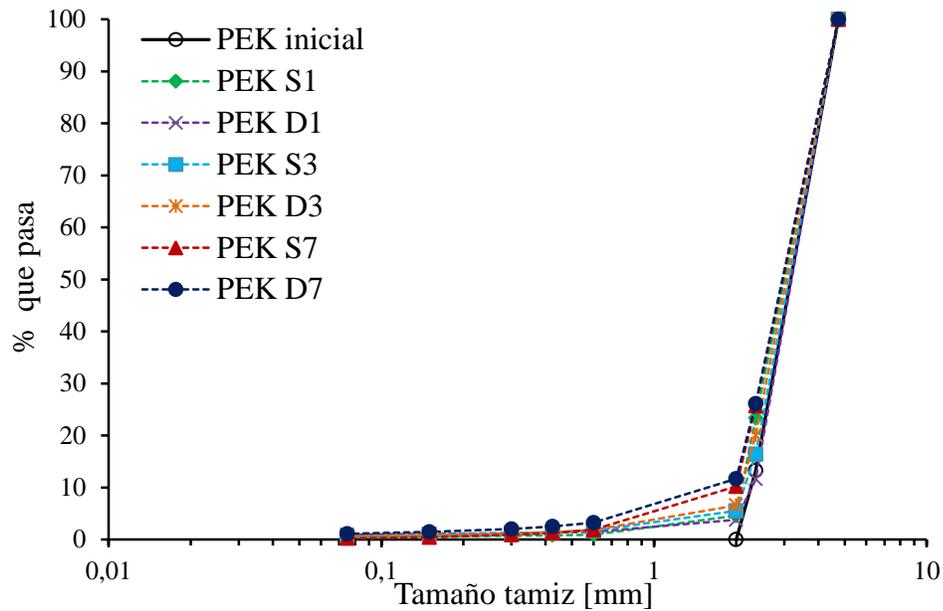


Figura 70: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PEK

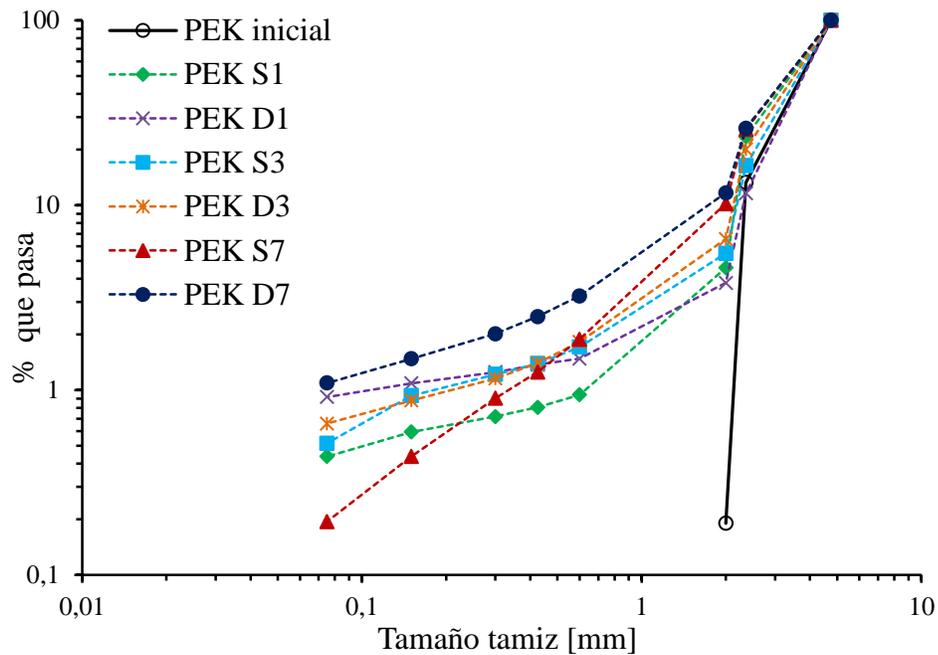


Figura 71: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PEK (escala log-log)

En la Figura 72 se presentan dos fotografías, la primera (izquierda) representa la muestra inicial mientras que la figura de la derecha representa el material post ensayo D7. En la imagen post ensayo se observan partículas menores a 2,00 mm (malla #10) generadas principalmente por abrasión de los cantos angulares. En las partículas mayores no se observa un daño importante.



Figura 72: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=100\%$ (derecha) para el material PEK

❖ PES

En la Figura 73 se presentan las curvas granulométricas post ensayo para cada ensayo realizado. Dado que este material posee un 25% de partículas débiles se observa mayor rotura que la producida en las muestras anteriormente presentadas. Para el ensayo D7 se cuantifica un aumento en el porcentaje que pasa la malla #8 de 15 a 40% mientras que para la malla #10 el incremento es de 0 % a 22%.

Se observa que a mayor carga vertical mayor es la cantidad de rotura producida, y la influencia de este factor es más notoria para esta muestra. Es posible obtener de las curvas que a mayor densidad relativa mayor es la rotura. Estas conclusiones serán confirmadas con el resultado de los parámetros de rotura.

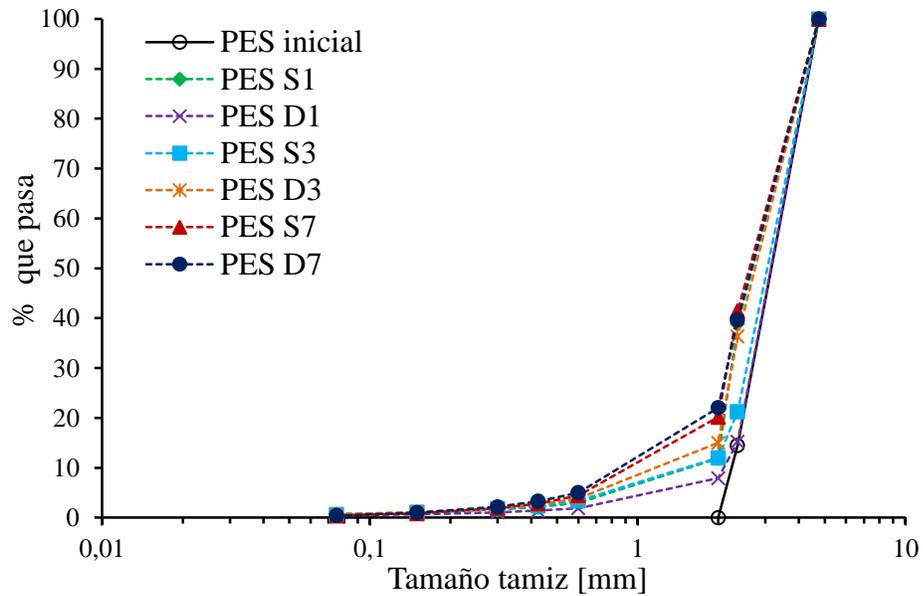


Figura 73: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PES

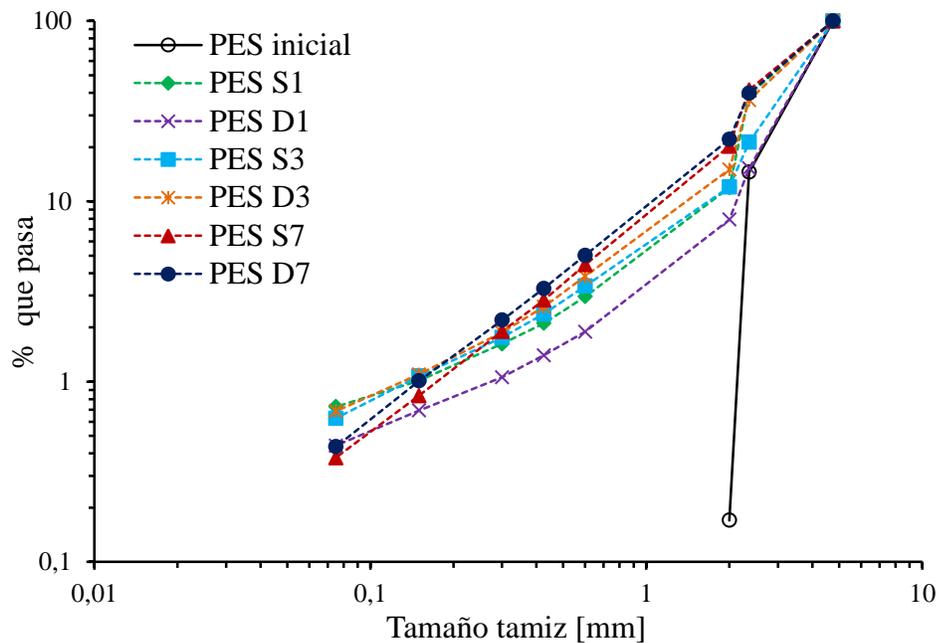


Figura 74: Granulometría final de los ensayos realizados para muestra PES (escala log-log)

En la Figura 75 se presentan dos fotografías, en la izquierda se exhibe la muestra inicial mientras que en la imagen de la derecha se presenta el material post ensayo D7. Dado que este material posee un 25% de partículas débiles (color café claro) se observa en la imagen post ensayo que éstas partículas son las que sufren mayor rotura.

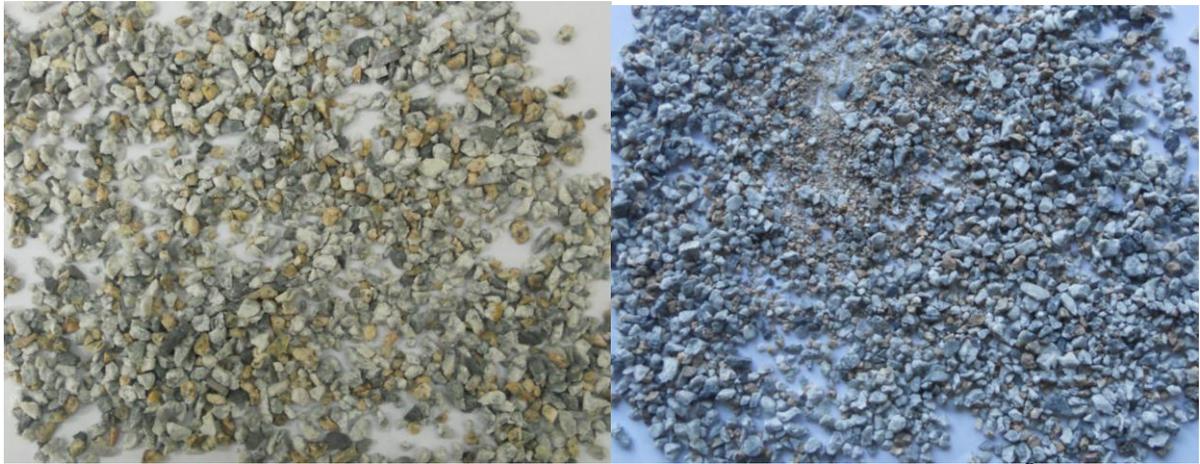


Figura 75: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=100\%$ (derecha) para el material PES

❖ FRÁGIL

Este material está compuesto por partículas débiles, su baja resistencia se debe a que proceden de una zona afectada por una falla. Se observa un aumento en la rotura presente a medida que se aumenta la carga vertical. En la Figura 76 se aprecia una clara influencia de este parámetro en la rotura generada. Contrario a lo observado en las muestras anteriores, para los ensayos a 7 kg/cm^2 se observa que el estado suelto produce mayor cantidad de rotura que el estado denso. Para las otras dos cargas verticales se observa mayor rotura en estado denso que suelto.

Para el ensayo S7 se cuantifica un aumento en el porcentaje que pasa antes y después del ensayo que va desde 20% a 58% para la malla #8 y de 0% a 45% para la malla #10. En el caso del ensayo S1, el cual genera la menor cantidad de rotura se tiene que el porcentaje que pasa en la malla #8 aumenta de 20% a 24% mientras que para la malla #10 este incremento va de 0% a 9%.

En la Figura 77 se presentan las curvas granulométricas en un gráfico a escala doble logarítmica. Se observa, en especial para el ensayo S7 que posee la mayor cantidad de rotura, una línea recta que indica una distribución fractal de la granulometría post ensayo para este material.



Figura 78: Muestra inicial (izquierda) versus muestra ensayada a 7 kg/cm^2 y $\text{DR}=0\%$ (derecha) para el material FRÁGIL

En general, se observa que para confinamientos bajos y resistencia de las partículas alta se genera una baja rotura probablemente generada por abrasión más que por *splitting* o *crushing*. Al aumentar el confinamiento se continúa produciendo rotura por abrasión de las partículas pero empieza a ser importante el mecanismo de *splitting* (más que por *crushing*). Para las cargas verticales altas y las muestras con partículas débiles se observa que domina el *crushing* dada por la generación de partículas pequeñas hasta finos. Estas observaciones se realizaron a partir de la diferencia entre los porcentajes retenidos en cada malla antes y después de un ensayo.

5.3.2. Granulometrías post ensayo según densidad y carga vertical

A continuación se presentan gráficos comparativos de la rotura de partículas según densidad y carga vertical para todas las muestras.

En las Figura 79 se presentan las curvas granulométricas post ensayos S1 y D1. Para el ensayo en estado suelto no se observa mayor diferencia en la cantidad de rotura al variar la resistencia de las partículas (cada muestra tiene una composición mineralógica diferente que afecta a la resistencia de las partículas como se mencionó en el Capítulo 3). Para el estado denso sí se observa que el material FRÁGIL posee una rotura mayor a las otras muestras.

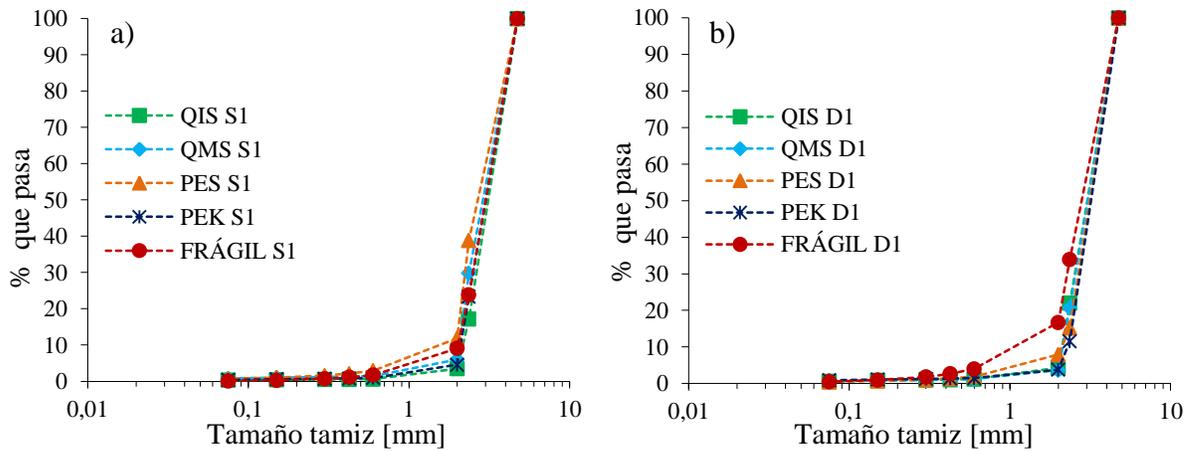


Figura 79: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 1 kg/cm^2 (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 1 kg/cm^2 .

En la Figura 80 se presentan las curvas granulométricas post ensayos S3 y D3. Para ambas densidades se observa claramente que el material FRÁGIL genera la mayor cantidad de rotura. También es posible observar que la muestra PES tiene mayor rotura que QIS, QMS y PEK aunque no es tan notorio como para el material FRÁGIL. Se observa que para los materiales QIS, QMS y PEK la cantidad de rotura producida en cada ensayo es prácticamente igual.

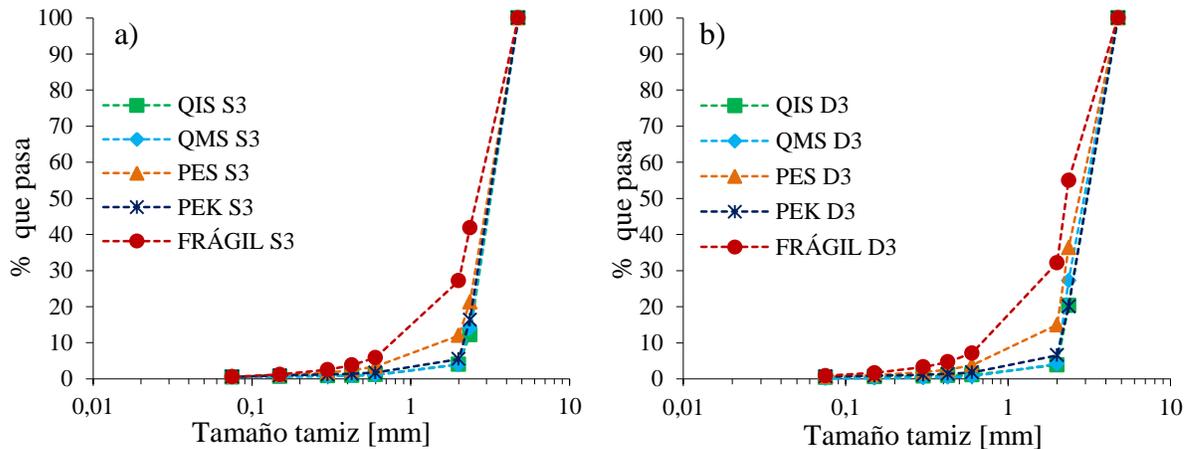


Figura 80: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 3 kg/cm^2 (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 3 kg/cm^2 .

En la Figura 81 se presentan las granulometrías post ensayos S7 y D7. Se observa una mayor rotura en la muestra FRÁGIL para ambos ensayos. Respecto a la muestra PES esta presenta una cantidad de rotura menor a FRÁGIL pero claramente mayor a QIS, QMS y PEK.

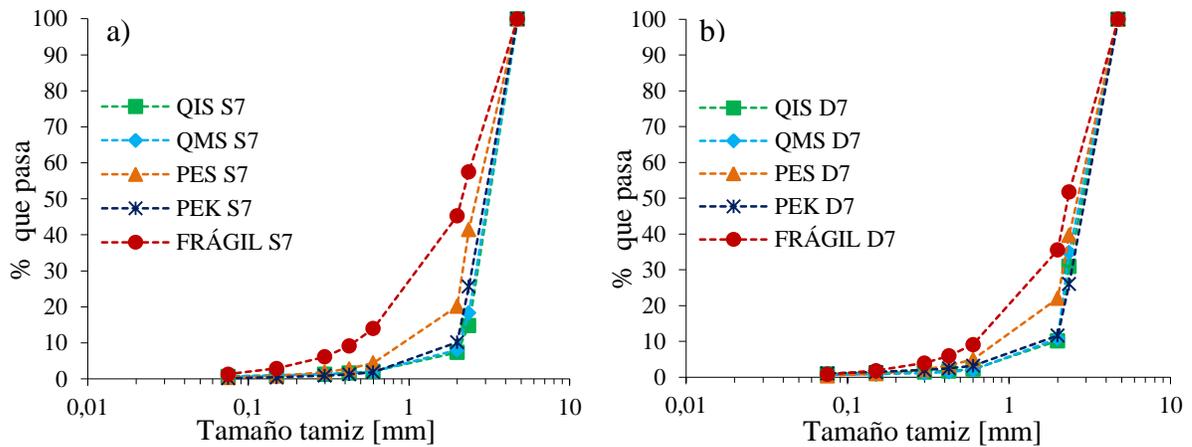


Figura 81: (a) Muestras sueltas sometidas a esfuerzo vertical de 7 kg/cm^2 (b) Muestras densas sometidas a esfuerzo vertical de 7 kg/cm^2 .

En general se observa que al aumentar la carga vertical la diferencia en cuanto a cantidad de rotura generada por las muestras FRÁGIL y PES se hace más clara y se separan de los otros tres materiales. Las muestras QIS, QMS y PEK presentan valores similares para todos los ensayos.

5.3.3. Parámetros de rotura

Se calcularon los parámetros más importantes y utilizados de rotura de partículas. Se presentan en las siguientes figuras el índice de rotura de Marsal (Figura 82), rotura relativa de Hardin (Figura 83) y el Área superficial de Hyodo (Figura 84).

Para las muestras QIS, QMS y PEK se puede concluir que las muestras densas presentan mayor rotura que las sueltas, excepto para la carga vertical de 1 kg/cm^2 . Para los ensayos sueltos se tiene una mayor rotura para la carga vertical menor, obteniendo valores similares para las cargas iniciales de 3 y 7 kg/cm^2 . Para los ensayos densos se obtiene mayor rotura al aumentar la carga vertical.

En relación a la muestra PES se tiene para la carga de 1 y 7 kg/cm^2 que el suelo suelto genera mayor rotura de partículas que el denso, para los ensayos 3 kg/cm^2 esta relación es inversa. Para los ensayos sueltos se tiene que S1 y S7 producen una cantidad similar de rotura mientras que para S3 este valor es menor. Para los ensayos densos se tiene que al incrementar la carga vertical inicial aumenta la cantidad de rotura generada. Se observa que la diferencia entre D1 y D3 es mucho mayor que entre D3 y D7.

Analizando la muestra FRÁGIL se concluye que para las cargas verticales de 1 y 3 kg/cm^2 el suelo denso presenta mayor rotura que el suelto, para la carga de 7 kg/cm^2 esta relación es inversa. Para los ensayos sueltos se tiene que la rotura aumenta al aumentar la carga vertical al igual que en los suelos densos. Para los ensayos densos

se observa algo similar a lo denotado en la muestra PES ya que al aumentar de 1 a 3 kg/cm² la carga vertical se produce una gran diferencia entre la rotura de partículas generada mientras que al aumentar de 3 a 7 kg/cm² esta diferencia es mínima.

En general los parámetros calculados confirman lo observado en las curvas de distribución granulométrica en relación a que las muestras QIS, QMS y PEK generan cantidades similares de rotura de partículas. Además se observa también que la muestra PES genera mayor cantidad que las otras tres mencionadas y la muestra FRÁGIL es la que produce la mayor cantidad de rotura.

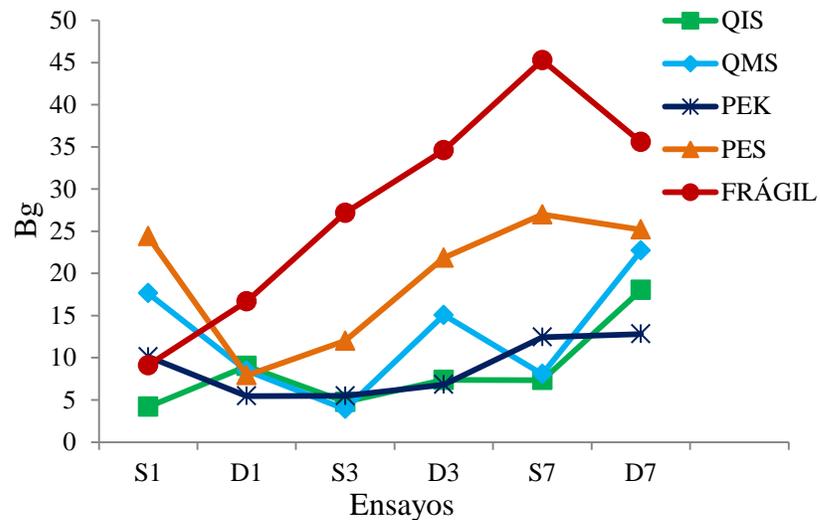


Figura 82: Índice de rotura de partículas según Marsal (1965)

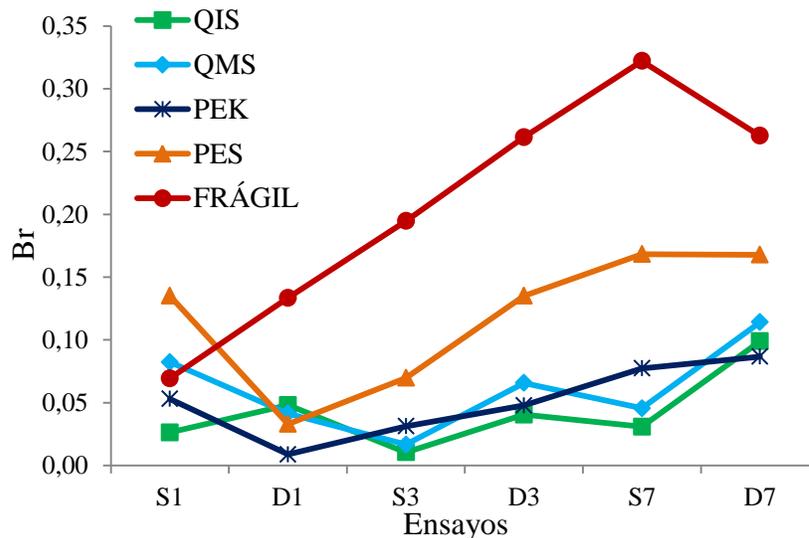


Figura 83: Rotura relativa según Hardin (1985)

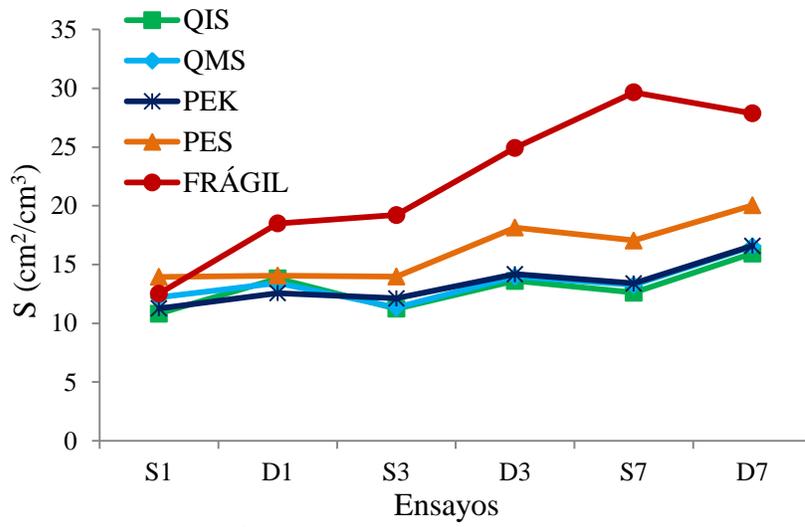


Figura 84: Área superficial según Hyodo (2002)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se presentaron los gráficos y resultados generados a partir de los ensayos de corte simple y las granulometrías post ensayos realizadas. El cálculo del ángulo de fricción, parámetros de rotura y comparación entre las muestras ensayadas también se exhibieron en ese capítulo. Se analizaron los resultados por muestra y luego por ensayo en relación a la influencia de densidad relativa, carga vertical aplicada, resistencia de las partículas y rotura de partícula producida.

En este capítulo se realizará un análisis comparativo de los resultados obtenidos para los materiales granulares utilizados en esta investigación en relación al comportamiento de arenas naturales en condiciones de ensayo similares.

6.1. COMPARACIÓN ARENA NATURAL VERSUS ARENA ARTIFICIAL

En la sección 2.1.2 se presentaron los resultados de tres autores de la Universidad de Cambridge: Cole (1967), Stroud (1971) y Budhu (1979). Todos ellos realizaron ensayos de corte simple monótono en estado seco con probeta cuadrada en arena de Leighton Buzzard. Este suelo que procede de la ciudad de Leighton Buzzard, Inglaterra y posee partículas redondeadas de cuarzo, se ensayó con una granulometría entre 0,6 y 1,18 mm, utilizando densidades sueltas, medias y altas. La probeta utilizada medía 100 mm por 100 mm de base y 20 mm de altura.

En este capítulo se presenta una comparación de los resultados obtenidos por estos tres autores con los generados en esta investigación para las muestras QIS y FRÁGIL. Se eligieron estos dos materiales dado que cada uno de ellos posee las partículas más fuertes y más débiles, respectivamente. Los gráficos se presentan por material y se separan en ensayos sueltos y densos con el fin de no generar confusión dada la gran cantidad de datos presentados.

6.1.1. Comportamiento tensión-deformación y volumétrico

En las Figura 85 y Figura 86 se presentan los resultados de la muestra QIS en comparación con los resultados de la Universidad de Cambridge para el estado suelto, estos autores utilizaron una densidad relativa de 16% y se utilizan sólo las cargas verticales similares a 1, 3 y 7 kg/cm². Los gráficos presentados son la tensión de corte normalizada por la carga vertical versus deformación por corte y el cambio en el índice de vacíos versus deformación por corte.

La arena de cuarzo presenta un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento al alcanzar una resistencia y mantenerla hasta el fin del ensayo. El material QIS presenta el mismo comportamiento pero la resistencia última la alcanza a una mayor deformación por corte.

Destaca también que los ensayos de Cambridge no poseen ni irregulares ni saltos a lo largo del ensayo como sí lo presenta la muestra QIS, los cuales se asociarían al rompimiento de las partículas y a la trabazón provocadas por los cantos angulares. Esto también se puede relacionar a la proporción de 4,21 entre la altura de la probeta y el tamaño máximo de las partículas para los ensayos de esta investigación en comparación al valor de 16,95 utilizado por los investigadores de Cambridge.

La gran diferencia entre estos materiales es el hecho de que la arena de cuarzo conduce a un ángulo de fricción final que es independiente de la carga vertical utilizada ($\tau / \sigma \approx 0,59$). El material QIS varía notoriamente su ángulo de fricción final al variar la carga vertical dado principalmente a la rotura de partículas generadas a mayor presión.

En relación al gráfico de comportamiento volumétrico de los materiales se aprecia que QIS presenta un comportamiento más dilatante para la carga de 1 kg/cm² que la arena de cuarzo mientras que al aumentar el confinamiento (3 kg/cm²) el material QIS presenta una mayor compresibilidad que la arena natural.

Se concluye que para el material procedente de tronadura de túnel la carga vertical tiene un gran efecto en su deformación volumétrica mientras que para la arena natural analizada esta influencia es menor.

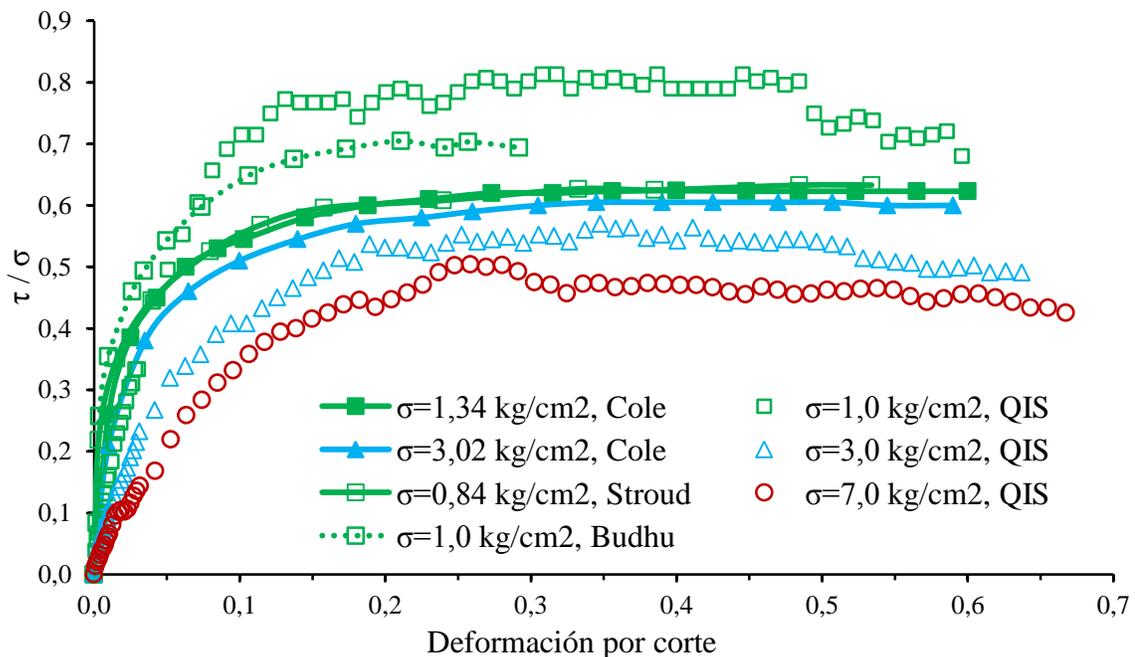


Figura 85: Comparación resistencia muestra QIS, ensayos sueltos

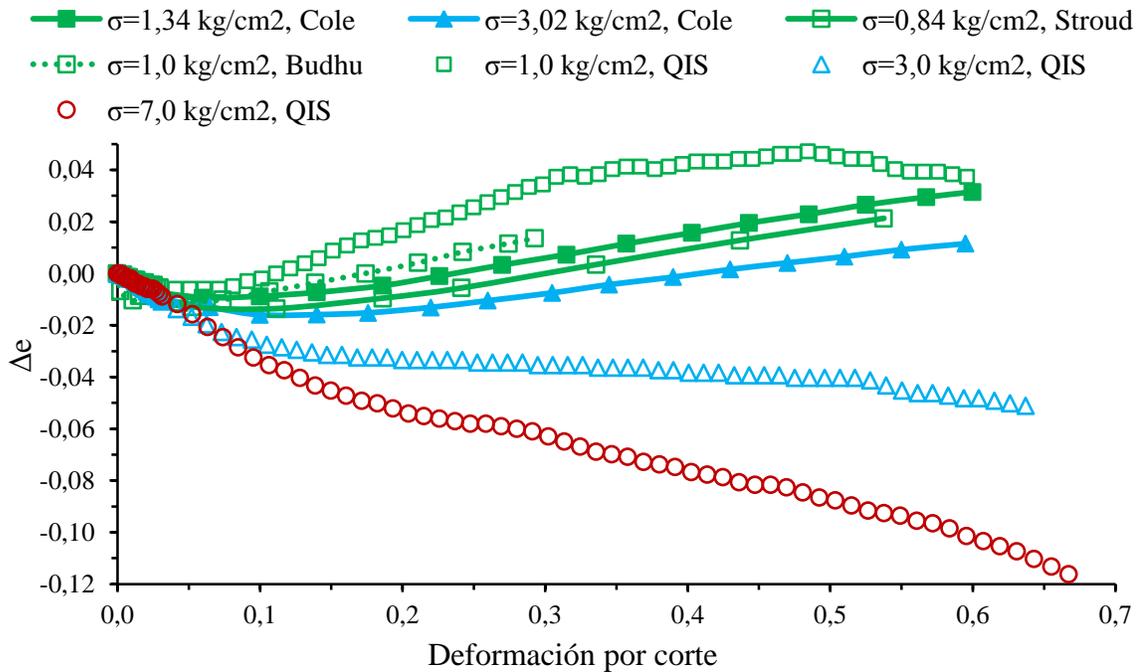


Figura 86: Comparación comportamiento volumétrico muestra QIS, ensayos sueltos

En las Figura 87 y Figura 88 se presenta la comparación de la arena de la muestra FRÁGIL. Como se presentó en la sección 5.2 se observa que el ángulo de fricción para esta muestra es menor que para QIS lo que se asocia principalmente a la rotura de partículas y posterior reacomodo de estas.

En la muestra FRÁGIL se observa que la resistencia última se alcanza a una mayor deformación por corte. Para la muestra FRÁGIL se aprecia una disminución del ángulo de fricción al aumentar la carga, esta disminución es mayor a la producida en QIS dada a la mayor cantidad de rotura generada (ver Figura 83).

Al observar la Figura 87 se concluye que el material FRÁGIL es mucho más compresible que la arena de cuarzo y que la influencia de la carga vertical es más notoria.

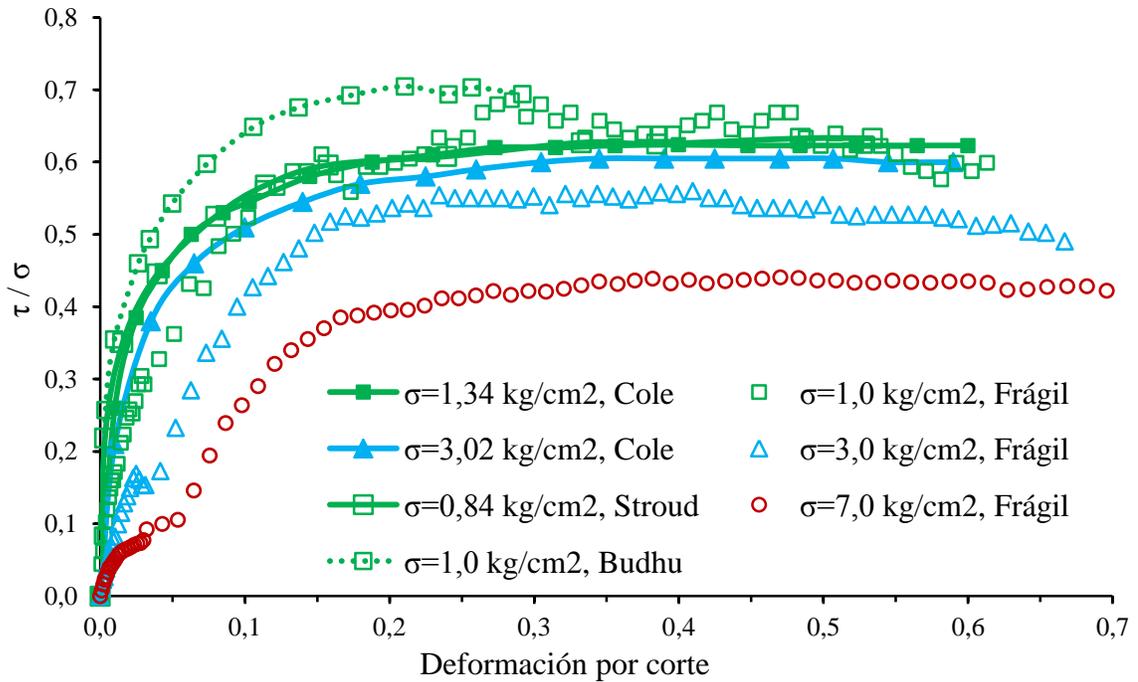


Figura 87: Comparación resistencia muestra FRÁGIL, ensayos sueltos

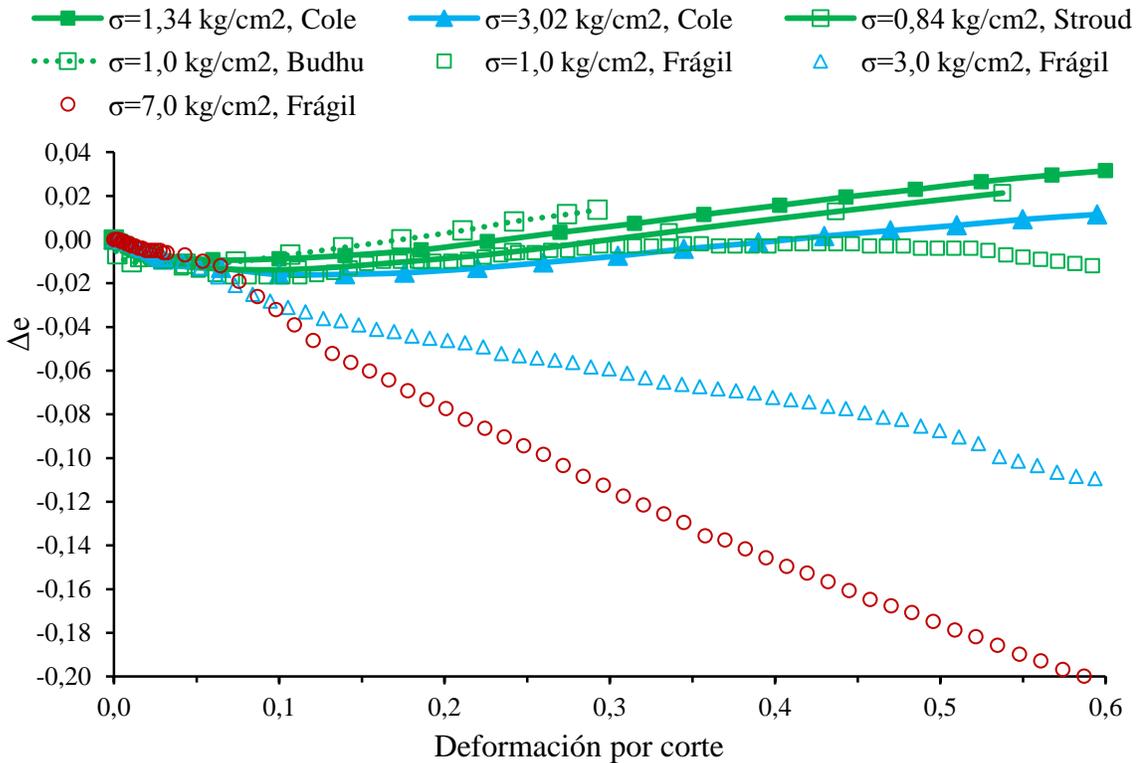


Figura 88: Comparación comportamiento volumétrico muestra FRÁGIL, ensayos sueltos

En las Figura 89 y Figura 90 se presentan los resultados de los ensayos realizados en la arena de Leighton Buzzard en estado denso junto a los resultados obtenidos en esta investigación para el material QIS. Mientras que en la Figura 91 y Figura 92 se comparan los resultados con el material FRÁGIL.

A diferencia del comportamiento suelto se observa para la arena natural que presenta un ángulo de fricción *peak* notorio, sobre todo para los resultados de Cole. Al igual que para las muestras sueltas se observa que la arena natural tiene un ángulo de fricción final independiente de la carga aplicada. También se observa un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento que alcanza la resistencia última a menor deformación que para la arena artificial.

De forma cualitativa es posible concluir que el módulo de deformación secante del material de tronadura de túnel es menor al obtenido para la arena de cuarzo.

En comparación con los ensayos sueltos, se observa que los densos presentan una mayor resistencia. Para el comportamiento volumétrico se tiene que, al igual que los sueltos, el material artificial sufre una notoria menor dilatación asociada al reacomodo y rotura de las partículas.

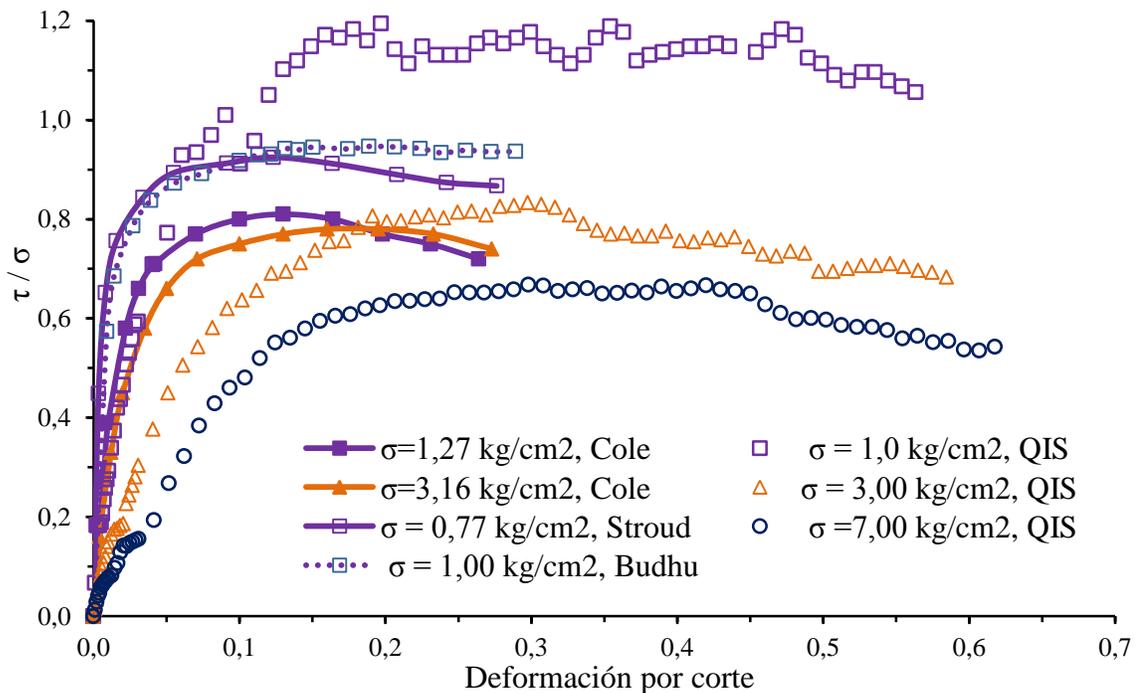


Figura 89: Comparación muestra QIS, ensayos densos

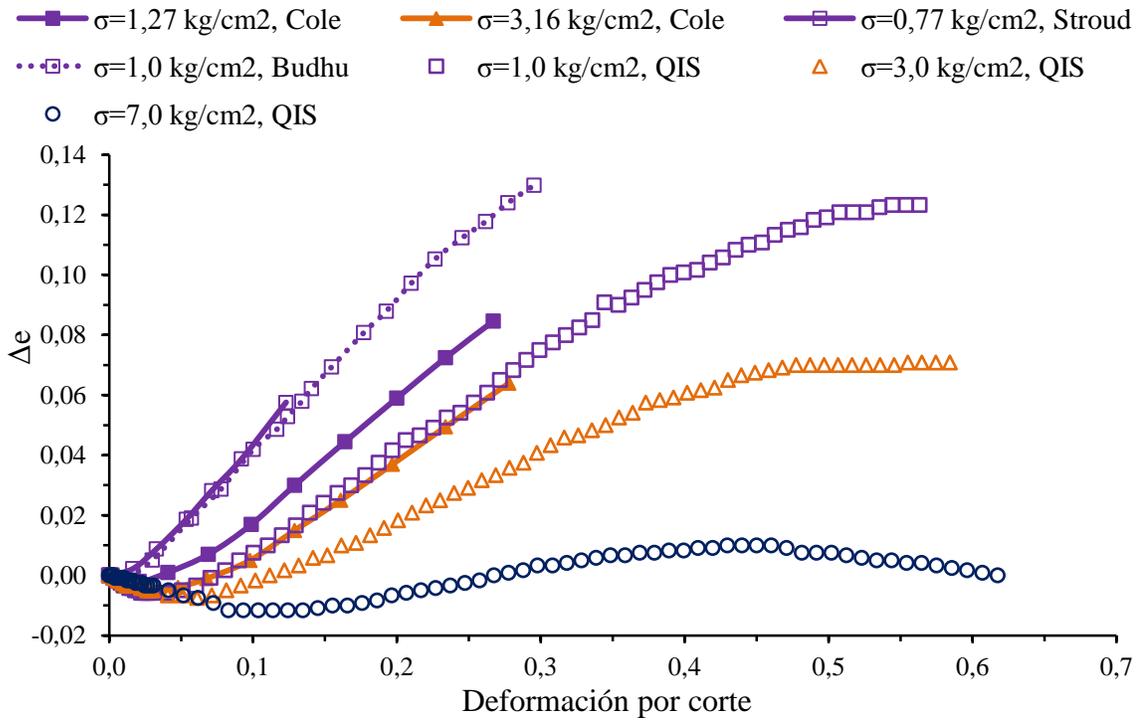


Figura 90: Comparación muestra QIS, ensayos densos

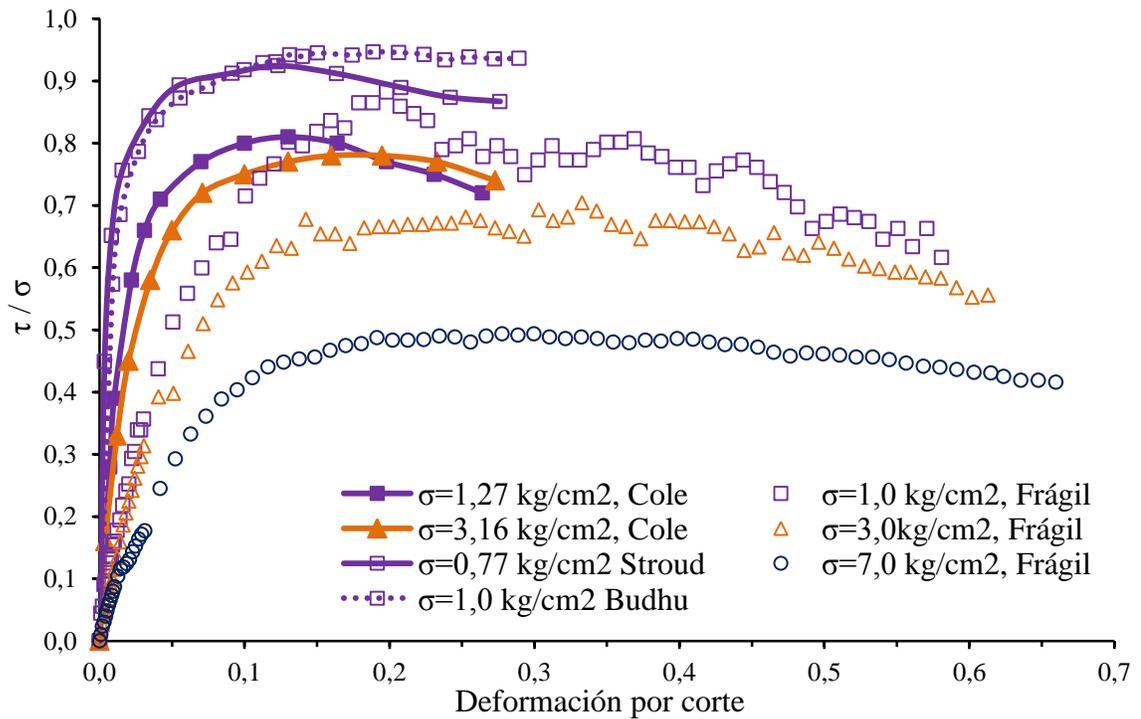


Figura 91: Comparación muestra FRÁGIL, ensayos densos

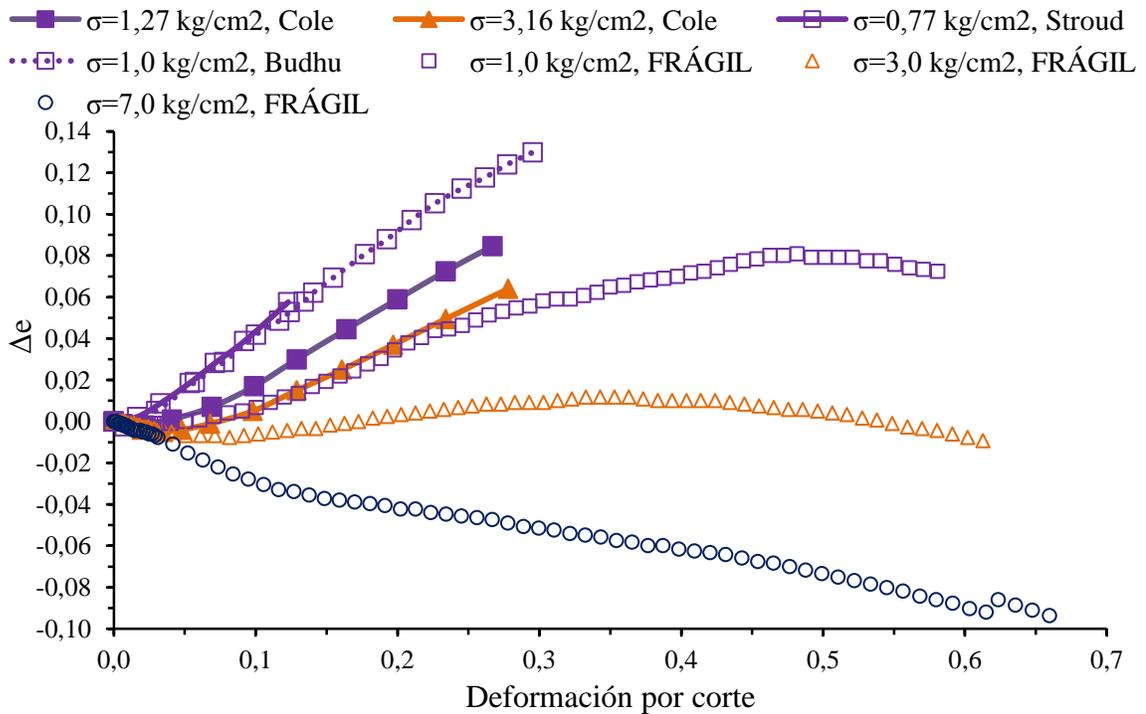


Figura 92: Comparación muestra FRÁGIL, ensayos densos

6.1.2. Ángulo de fricción

En las Figura 93 y Figura 94 se presenta una comparación de los ángulos de fricción a gran deformación para las muestras QIS y FRÁGIL con los resultados de Cole (1967). Como se mencionó anteriormente este autor utilizó una arena de cuarzo con partículas redondeadas y la ensayó a corte simple monótono.

La principal y más importante conclusión de estos gráficos es que para la arena natural, que no sufre una cantidad importante de rotura de partículas, el ángulo de fricción para ensayos sueltos y densos se mantiene prácticamente constante al aumentar la carga inicial utilizada en cada ensayo. Se observa un aumento leve para los ensayos densos y una disminución mínima para los ensayos sueltos al aumentar la carga.

Contrario al comportamiento observado en las muestras de arena natural, las arenas de tronadura de túnel disminuyen notoriamente su ángulo de fricción secante al aumentar la carga vertical aplicada. Esto también se explicaría principalmente por la rotura y reacomodo de las partículas que se genera en este material artificial.

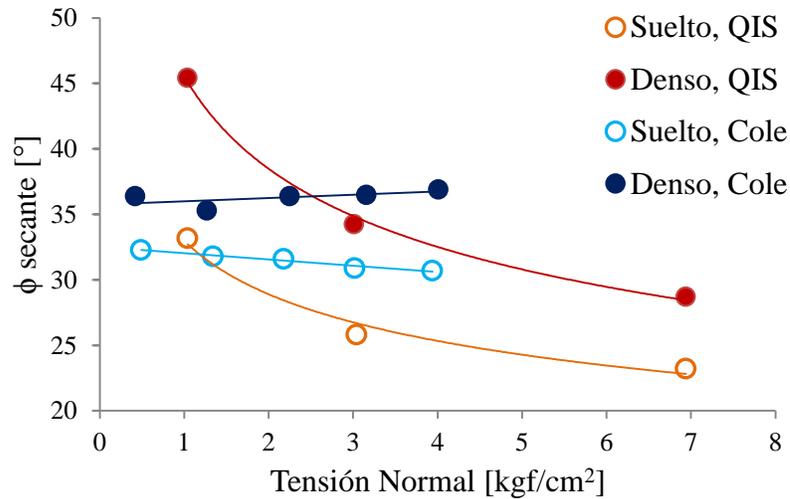


Figura 93: Comparación del ángulo de fricción última obtenidas por Cole (1967) con el material QIS

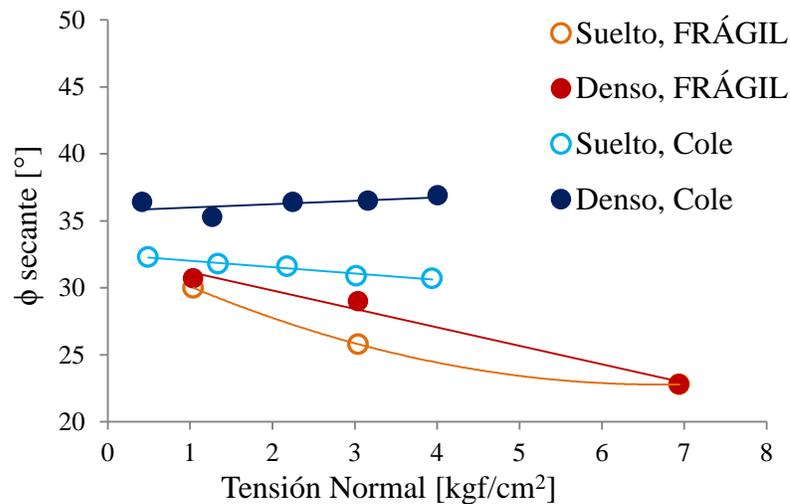


Figura 94: Comparación del ángulo de fricción última obtenidas por Cole (1967) con el material FRÁGIL

6.1.3. Rotura de partículas

Como se mencionó en la sección 2.2 existen escasas investigaciones en torno a la rotura de partículas producidas en el aparato de corte simple. Uno de los pocos trabajos es el de Valdes y Leleu (2008). En anillo de corte y corte directo es posible encontrar algunas investigaciones adicionales tales como las de Sadrekarimi y Olson (2010), Luzzani y Coop (2002) y Coop et al. (2004).

Como se explicó en el Capítulo 2, en la investigación realizada por Valdes y Leleu utilizaron una mezcla de arena de Ottawa (partículas de cuarzo redondeadas) con una arena calcárea (partículas subangulares de carbonato de calcio). Se crearon tres muestras con diferente porcentaje en peso de partículas débiles, el primero considera

sólo partículas fuertes ($F_c=0$), el segundo contiene un 10% de partículas débiles ($F_c=0,1$) y el tercero posee un 40% de arena calcárea ($F_c=0,4$).

En la Figura 95 se presentan los parámetros de rotura relativa de Hardin obtenidos por Valdes y Leleu (2008) para los tres materiales ensayados. En la Figura 96 se presentan los valores del parámetro B_r de Hardin para todos los materiales ensayados en estado denso. Las muestras QIS, QMS y PEK tienen un 0 % de partículas débiles por lo que pueden ser comparadas con la muestra $F_c=0$. En ambos se observa que al aumentar la carga vertical aumenta la rotura de partículas.

Si bien la tendencia en ambas figuras es similar, también es importante destacar que los gráficos no están a igual escala (con el fin de apreciar los resultados de mejor manera). Con esta comparación se puede concluir que efectivamente la rotura producida en el material de tronadura de túnel es importante y muy superior a la producida en materiales naturales. El valor del parámetro de B_r de Hardin encontrado por Valdes y Leleu es de un orden de magnitud menor que el obtenido para los materiales ensayados en esta investigación.

El material PES tiene un porcentaje de 25% de partículas débiles mientras que para la muestra FRÁGIL este valor es de un 100%. En la Figura 95 se observa que el rol de la carga vertical varía al aumentar el porcentaje de partículas débiles. Para $F_c=0,1$ se tiene que hay un gran aumento de rotura al pasar de 4,68 a 8,24 kg/cm^2 mientras que para $F_c=0,4$ el cambio importante se obtiene al pasar de 1,47 a 4,68 kg/cm^2 y luego el aumento a 8,24 kg/cm^2 no genera un aumento tan importante.

En la Figura 96 se observa un similar comportamiento para los materiales PES y FRÁGIL, denotando que para ensayos densos con partículas débiles se alcanza una carga vertical que genera la mayor cantidad de rotura de partículas, cargas mayores generan un incremento menos significativo.

Es importante destacar que Valdes y Leleu (2008) utilizaron una deformación por corte de 30% mientras que en esta investigación se alcanzó un valor promedio del 65%.

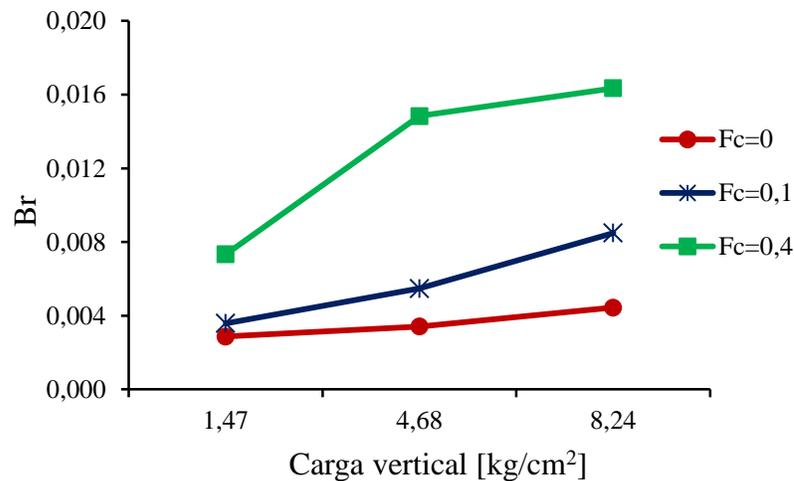


Figura 95: Rotura relativa de Hardin para los ensayos de corte simple realizados por Valdes y Leleu (2008) en estado denso

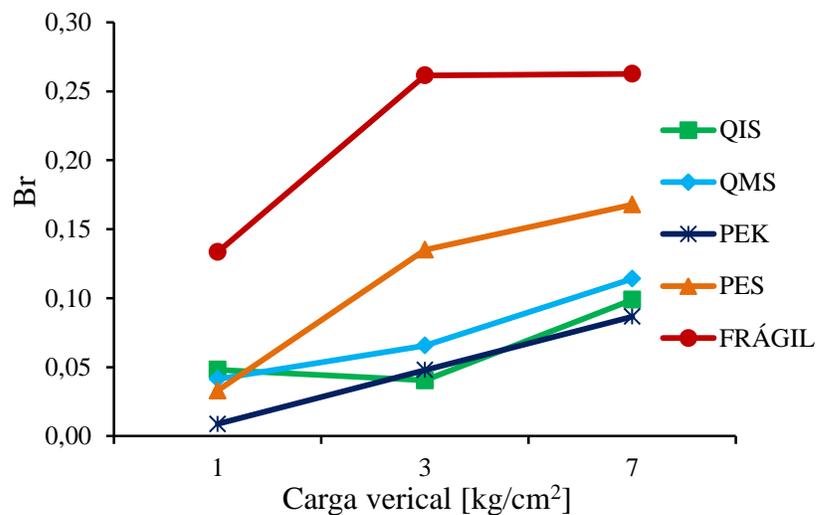


Figura 96: Rotura relativa de Hardin para las muestras de tronadura de túnel en estado denso

6.2. INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS EN LA RESPUESTA DE LOS MATERIALES ENSAYADOS

En el Capítulo 5 se presentaron los resultados de todos los ensayos realizados en esta investigación, analizando en detalle los comportamientos tensión deformación y volumétrico, los ángulos de fricción resultantes y las granulometrías post ensayos.

En la sección 6.1 se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para el material de tronadura de túnel minero utilizado en esta investigación con arena de procedencia natural obtenida de la literatura.

A continuación se analizará la influencia de la carga vertical inicial, densidad relativa y resistencia individual de las partículas en la respuesta del material sometido a corte simple y en la generación de rotura de partículas.

6.2.1. Carga vertical

Dados los gráficos de tensión-deformación se concluye que a mayor carga vertical mayor es la resistencia obtenida tanto para los ensayos sueltos como para los densos. En relación al cambio volumétrico se obtiene una disminución de la dilatación al aumentar la carga vertical incluso hasta convertirla en solo contracción para ensayos densos en el material con partículas débiles.

En relación al ángulo de fricción secante se puede concluir que se ve influenciado por la carga vertical aplicada, disminuyendo al aumentar esta carga debido a la reducción en la dilatación producida por la abrasión de los cantos angulares y la rotura de partículas que produce un reajuste y densificación de la muestra ensayada.

Al analizar los parámetros de rotura calculados se puede concluir que en general la cantidad de rotura generada aumenta al elevar la carga vertical excepto en el ensayo S1 el cual genera mayor rotura que el S3. Una posible explicación se encuentra en el hecho de que para el confinamiento de 1 kg/cm^2 se produce dilatación lo que implica que las partículas se montan una sobre otra generando una concentración de esfuerzos por una disminución en el número de contactos que llevaría a rotura de partículas. Para los ensayos D3 y D7 se tiene un menor efecto de la carga vertical dado que generan una cantidad de rotura similar.

6.2.2. Densidad relativa

La densidad relativa inicial cumple un rol más complicado de definir. Dado que el material ensayado posee una granulometría uniforme, se obtuvieron densidades mínimas y máximas con una diferencia menor a la esperada en arenas naturales uniformes.

En general, una mayor densidad implica una mayor resistencia peak. Sólo en algunos ensayos se pudo observar que la resistencia a gran deformación es independiente de la densidad inicial para una misma carga vertical. Es posible que esto se deba a que a pesar de realizar los ensayos hasta una deformación por corte de 65% no se alcanzó el estado crítico.

En materiales como el PEK, PES y FRÁGIL se obtuvo que la densidad inicial prácticamente no afecta a la resistencia del ensayo pero sí al comportamiento

volumétrico. En relación al ángulo de fricción, se obtiene que para mayores densidades el ángulo de fricción secante calculado es mayor. En cuanto a la influencia en la rotura de partículas generada se concluye que en general a mayor densidad mayor es la cantidad producida.

6.2.3. Resistencia de las partículas

Si bien los resultados de esta investigación revelan que la densidad relativa y la carga vertical influyen en la cantidad de rotura generada se puede concluir que la resistencia de las partículas es un factor fundamental.

Los resultados demuestran que independiente de la carga vertical y a la densidad relativa, las muestras con partículas débiles generan una cantidad notoriamente mayor de rotura de partículas. La máxima diferencia en el parámetro de rotura relativa de Hardin B_r para el ensayo S7 entre las muestras QIS y FRÁGIL fue de 0,29, la muestra FRÁGIL tiene un $B_r=0,32$ (Figura 83).

En relación a la resistencia obtenida en cada ensayo se obtiene que el material FRÁGIL resiste una menor tensión de corte que el resto de los materiales. Para los ensayos densos se tiene que al aumentar la cantidad de partículas débiles disminuye el ángulo de fricción. En el caso de los ensayos sueltos se tiene que la muestra FRÁGIL genera el menor ángulo de fricción mientras que PES produce los mayores valores, dejando a las muestras QIS, QMS y PEK entre ambas.

Al analizar el comportamiento volumétrico de las muestras, se concluye que las muestras con partículas débiles sufren mayor contracción en ensayos sueltos y una reducción en la dilatancia para ensayos densos. Lo anterior se observa claramente al comparar PES con FRÁGIL ensayadas bajo las mismas condiciones. Se tiene que la curva de deformación vertical versus deformación por corte para FRÁGIL está siempre por debajo de la curva de PES debido principalmente a las rotura de partículas que se demuestra con los parámetros calculados.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En esta investigación se realizaron ensayos de corte simple monótono en estado seco para una arena procedente de una tronadura de un túnel. Se seleccionaron 5 materiales procedentes del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo que se diferencian por su mineralogía y dureza de partículas.

La característica principal de los materiales ensayados es que poseen partículas con cantos angulosos que no sufrieron un proceso de meteorización geológica que las haya degradado y deteriorado. Para las partículas débiles del material PES se adiciona el hecho de que proceden de una zona afectada por falla que debilita aún más las partículas.

Se estudió la influencia de la carga vertical, densidad relativa y resistencia de las partículas, tanto en el comportamiento del suelo (tensión-deformación y cambio volumétrico) como en la generación de rotura de partículas. Se utilizaron cargas verticales de 1, 3 y 7 kg/cm² y densidades relativas de DR=0 y 100%. Para todos los ensayos se utilizó una curva granulométrica inicial uniforme y una deformación por corte máxima entre 55 y 65%.

En términos generales se observa un comportamiento tensión-deformación habitual en relación que a mayor densidad inicial mayor es la resistencia del ensayo. Junto a esto, los gráficos de deformación vertical versus deformación por corte muestran que a mayor carga vertical menor es la dilatancia de la muestra.

De forma particular se observa para las muestras PEK, PES y FRÁGIL una respuesta tensión-deformación similar mientras su respuesta volumétrica es notoriamente diferente para igual carga vertical. Esto implica un rol diferenciado de la densidad relativa en el comportamiento del material demostrado por la baja influencia de este parámetro en la resistencia del material contrario al rol que ejerce sobre el cambio volumétrico.

A pesar de realizar los ensayos a una gran deformación por corte se observa que al término del ensayo no se alcanza un estado crítico dado que la muestra no se estabiliza, sigue deformándose, y se espera que al aumentar la deformación se genere mayor rotura de partículas.

En relación al ángulo de fricción a grandes deformaciones se obtiene que éste disminuye notoriamente al aumentar la carga vertical al igual a lo observado en enrocados. En promedio se tiene una disminución de $8,5^\circ$ entre la carga vertical 1 y 7 kg/cm^2 para los ensayos realizados con $\text{DR}=0\%$ y un promedio de 12° para los ensayos a $\text{DR}=100\%$.

De acuerdo a los resultados de las granulometrías post ensayo realizadas se observa una cantidad no despreciable de rotura a pesar de aplicar presiones de confinamiento bajas (entre 1 y 7 kg/cm^2). Esto se atribuye a varios factores que facilitan la fragmentación de las partículas, como lo son: aplicación de corte simple y grandes deformaciones por corte, suelo uniforme, forma de partículas angular y partículas sin historia de erosión y/o transporte. Se estima que el principal factor que genera la rotura de partículas es la procedencia del material ya que permite que el material presente debilidades como las microfracturas. Junto a esto se tiene la existencia de partículas frágiles producidas por la zona de falla.

Se aprecia que mientras más débil son las partículas y mayor la carga vertical aplicada mayor es la rotura de partículas que se genera. Al comparar los resultados de los parámetros de rotura calculados con investigaciones en arena natural en condiciones similares se obtiene una gran diferencia. Incluso los materiales QIS, QMS y PEK sufren mayor rotura que las arenas naturales.

Otra conclusión importante es la obtenida a partir de los gráficos de la distribución granulométrica en escala doble logarítmica para la muestra FRÁGIL. Este gráfico presenta una línea recta de la granulometría post ensayo S7 lo que permite concluir que este material tiene una distribución fractal de sus tamaños de partículas. Este resultado es muy importante para así poder entender en mejor medida el fenómeno de fragmentación secundaria en *block caving*, el cual está sumamente ligado a la rotura de partículas bajo esfuerzos de corte simple de medios granulares.

Debido a la particularidad de este material artificial, se escogió de la literatura ensayos de corte simple realizados en arenas naturales (transportadas y meteorizadas) en condiciones similares a las utilizadas en esta investigación. Se realizó una comparación para ambos materiales. Respecto a la comparación de la respuesta tensión-deformación, para ambos materiales se observa un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento, en el caso de la arena natural esta alcanza su resistencia última a menor deformación por corte que la arena de tronadura.

Una de las conclusiones más importantes obtenida de la comparación anterior es el hecho de que la arena natural genera ángulos de fricción relativamente independientes de la carga vertical para una misma densidad, mientras que en el caso de la arena artificial el ángulo de fricción disminuye al aumentar la carga vertical.

Finalmente, dadas las características singulares de las arenas de tronaduras, estas no deberían ser comparadas a las arenas naturales, transportadas y que han sufrido procesos de erosión, en términos de resistencia, deformabilidad y rotura de partículas. Por lo cual, en caso que sea necesaria una caracterización geotécnica de estas arenas de tronadura, es imperativo ejecutar un programa de ensayos de laboratorio.

7.2. RECOMENDACIONES

Dado el alcance de la investigación, hay variables que no son posibles de considerar, por lo cual se recomienda realizar las siguientes investigaciones.

1. Extender la investigación de esta tesis considerando esta vez arena de tronadura para diferentes deformaciones de corte máximas, por ejemplo hasta 20 y 40% y analizar cómo varía la rotura de partículas. Esto permitiría comprobar que al aumentar la deformación aumenta la rotura de partículas. También sería interesante estudiar más a fondo la influencia de la DR utilizando un valor de 50%. Estos ensayos deberían ser manteniendo la granulometría y cargas verticales utilizadas en esta investigación.
2. Sería interesante comparar el comportamiento de estos materiales con ensayos triaxiales, compresión edométrica y corte directo dado que estos tipos de arena no han sido muy investigadas en el pasado. El objetivo sería analizar su respuesta de tensión-deformación y cambio volumétrico incluyendo la cantidad de rotura que producen. Así sería posible comprobar que los ensayos de corte son los que generan una mejor distribución fractal de los tamaños de partículas post ensayo. Junto a esto se puede demostrar que en ensayos de corte se genera mayor rotura que en ensayos edométricos y triaxiales.
3. Además, otro tema que debería ser estudiado en conjunto con los puntos 1 y 2 es la influencia del tamaño máximo de las partículas con la altura de la probeta. En general, se acepta la relación diámetro probeta v/s tamaño máximo partícula de 6:1 en ensayos triaxiales, Sin embargo, debido a que esta investigación considera una razón de 4,2 entre la altura de la probeta y tamaño máximo partícula, entonces es necesario estudiar diferentes proporciones para así corroborar la influencia de este factor en los resultados de comportamiento y rotura de las arenas analizadas en esta investigación.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. **Al Hussaini, M.** (1983). Effect of particle size and strain conditions on the strength of Crushed Basalt. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20 (4), pp. 706-717.
2. **ASTM Standard D4254** (2006). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International.
3. **ASTM Standard D854-58** (2014). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International.
4. **Atkinson J.H. & Lau H.W.** (1990). Measurement of soil strength in simple shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28 (2), pp. 255-262.
5. **Bandini, V. & Coop, M.R.** (2011). The influence of particle breakage on the location of the critical state line of sands. *Soils and foundations*, Vol. 51 (4), pp. 591-600.
6. **Bassett R. H.** (1967). The Behaviour of granular materials in the simple shear apparatus. PhD thesis. University of Cambridge.
7. **Bishop, A. W.** (1966). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*, Vol. 16 (2), pp. 91-130.
8. **Bjerrum & Landva** (1966). Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay. *Géotechnique*, Vol. 16 (1), pp. 1-20.
9. **Boop, P.A. & Lade, P.V.** (2005). Relative density effects on undrained sand behavior at high pressures. *Soils and Foundations*, Vol. 45 (1), pp. 15-26.
10. **Brandes, H.G.** (2011). Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, Vol. 29 (1), pp. 113-126.
11. **Bridgwater, J.; Utsumi, R.; Zhang, Z. & Tuladhar T.** (2003). Particle attrition due to shearing - the effects of stress, strain and particle shape. *Chemical Engineering Science*, Vol. 48 (20), pp. 4649-4665.
12. **Budhu, M.** (1979). Simple shear deformation of sands. PhD thesis. Cambridge University.
13. **Budhu, M.** (1984). Nonuniformities imposed by simple shear apparatus. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21 (1), pp. 125-137.
14. **Chik, Z.** (2004). The effect of fragmentation on the engineering properties of granular materials, laboratory and fractal analyses. PhD thesis. University of Pittsburgh.
15. **Codelco** (2009). Caracterización geotécnica estructural, Proyecto Mina Subterránea Chuquicamata.
16. **Cole, E.R.L.** (1967). The behaviour of soils in the simple shear apparatus. PhD thesis. Cambridge University.
17. **Colliat-Dangus, J.L.; Desrues, J. & Foray, P.** (1988). Triaxial testing of granular soil under elevated cell pressure. *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM, STP 977, pp. 290-310.

18. **Copp, M.R.; Sorensen, K.K.; Bodas Freitas, T. & Georgoutsos G.** (2004). Particle breakage during shearing of carbonate sand. *Géotechnique*, Vol. 54 (3), pp. 157-163.
19. **Gudehus, G. & Nübel, K.** (2004). Evolution of shear band in sand. *Géotechnique*, Vol. 54 (3), pp. 187-201.
20. **Guimaraes, M.; Valdes, J.; Palomino, A. & Santamarina, J.** (2007). Aggregates production-fines generation during rick crushing. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 81 (4), pp. 237-247.
21. **Gutierrez, M.; Wang, J. & Yoshimine M.** (2009). Modeling of the simple shear deformation of sand: effects of principal stress rotation. *Acta Geotechnica*, Vol. 4 (3), pp. 193-201.
22. **Hardin, B.O.** (1985). Crushing of Soil Particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111 (10), pp. 1177-1192.
23. **Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Aramaki, N. & Nakata, Y.** (2002). Undrained monotonic and cyclic shear behavior of sand under low and high confining stresses. *Soils and Foundations*, Vol. 42 (3), pp. 63-76.
24. **JIS A 1224 Standard** (2009). Test method for minimum and maximum densities of sands. Japanese Geotechnical Society.
25. **Karimpour, H & Lade, P.V.** (2010). Time effects relate to crushing in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136 (9), pp. 1209–1219.
26. **Lade, P.V.; Yamamuro, J.A. & Boop, P.A.** (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122 (4), pp. 309-316.
27. **Lee, K.L. & Farhoomand, I.** (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 4 (1), pp. 68- 99.
28. **Leps, T.** (1970). Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 96 (4), pp. 1159-1170.
29. **Leslie, D.D.** (1963). Large scale triaxial test on gravelly soils. *Proc. 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil*, Vol. 1, pp. 181-202.
30. **Lo, K.Y. & Roy, M.** (1973). Response of particulate materials at high pressures. *Soils and Foundations*, Vol. 13 (1), pp. 61-76.
31. **Luzzani L. & Coop M.R.** (2002). On the relationship between particle breakage and critical state of sands. *Soils and foundations*, Vol. 42 (2), pp. 71-82.
32. **Marsal, R.J.** (1965). Discussion of shear strength. *Proc. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal*, Vol. 3, pp. 310-316.
33. **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.

34. **Matsushima, T.; Saomoto, H.; Tsubokawa, Y. & Yamada, Y.** (2003). Grain rotation versus continuum rotation during shear deformation of granular assembly. *Soils and foundations*, Vol. 43 (4), pp. 95-106.
35. **McDowell, G.R.; Bolton M.D. & Robertson D.** (1996). The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solid*, Vol. 44 (12), pp. 2079–2102.
36. **McDowell, G.R. & Bolton, M.D.** (1998). On the micromechanics of crushable aggregates. *Geotechnique*, Vol. 48 (5), pp. 667-679.
37. **McDowell, G.R. & Daniell, C.M.** (2001). Fractal compression of soil (Technical note). *Géotechnique*, Vol. 51 (2), pp. 173-176.
38. **Mitchell, J.K.** (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, Second Edition, John Wiley & Sons, pp. 437.
39. **Miura, N. & Yamanouchi T.** (1975). “Effect of water on the behavior of a quartz-rich sand under high stresses”. *Soils and Foundations*, Vol. 15 (4), pp. 23-34.
40. **Nakata, Y., Hyde, A.F.L., Hyodo, M. & Murata, H.** (1999). A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test. *Geotechnique*, Vol. 49 (5), pp. 567-583.
41. **Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L. & Murata, H.** (2001). One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength. *Soils and Foundations*, Vol. 41 (2), pp. 39-51.
42. **Oda, M y Konishi J.** (1974). Microscopic deformation mechanism of granular material is simple shear. *Soil and foundations*, Vol. 14 (4), pp. 25-38.
43. **Roscoe, K.H.** (1953). An apparatus for the application of simple-shear to soil samples. *Proc. 3rd International Conference on soil Mechanics*, Vol. 1, pp. 186-191.
44. **Roscoe K.H., Schofield A.N. y Wroth C.P.** (1958). On the yielding of soils. *Géotechnique*, Vol. 8 (1), pp. 22-52.
45. **Roscoe K.H. y Poorooshasb H.B.** (1963). A fundamental principle of similarity in model tests for earth pressure problems. *Proc. 2nd Asian Conference on Soil Mechanics* Vol. 1, pp. 134-140.
46. **Sadrekarami A. & Olson S.M.** (2008). Particle damage observed in ring shear tests on sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47 (5), pp. 497- 515.
47. **Stroud, M. A.** (1971). The behaviour of sands at low stress level in the simple shear apparatus. PhD thesis. Cambridge University.
48. **Turcotte, D. L.** (1986) Fractals and Fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91 (2), pp. 1921-1926.
49. **Ueng, T. & Chen, T.** (2000). Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands. *Géotechnique*, Vol. 50 (1), pp. 65-72.
50. **Valdes, J. & Leleu, S.** (2008). Influence of mineral composition on the simple shear response of sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134 (12), pp. 1820–1824.

51. **Vesic, A. S. and Clough, G. W.** (1968). Behavior of granular materials under high stresses. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 94 (3), pp. 661-688.
52. **Wee, B. H.** (2004). Mechanics of railway ballast behavior. PhD thesis. University of Nottingham.

