



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DEL CONFINAMIENTO Y EL CONTENIDO DE FINOS NO  
PLÁSTICOS EN EL COMPORTAMIENTO MONÓTONO DRENADO  
DE ARENAS DE RELAVE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MIGUEL ANGEL BRAVO PARDO

PROFESOR GUÍA

FELIPE OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

RAMÓN VERDUGO ALVARADO

MARCELO VARGAS GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL

**POR:** Miguel Angel Bravo Pardo

**FECHA:** 13/04/18

**PROFESOR GUIA:** Felipe Ochoa Cornejo

### **Efecto del confinamiento y el contenido de finos no plásticos en el comportamiento monótono drenado de arenas de relave**

Este trabajo es una investigación experimental sobre el efecto del confinamiento y el contenido de finos en el comportamiento monótono drenado de las arenas del tranque de relaves “El torito”, en un amplio rango de presiones que varían desde 0.1 MPa a 5 MPa. El contexto que motiva este estudio es la gran producción y baja ley de los yacimientos mineros en Chile, lo que implica la construcción de tranques de relave por sobre los 150 m, induciendo cargas que superan 1 MPa. Este nivel de tensiones podría generar rotura de partículas, aumentando la compresibilidad, y la pérdida de resistencia.

El programa experimental consiste en ensayos triaxiales drenados en el material de relaves variando el contenido de finos no plásticos en 1%, 5%, 10% y 20%. Los ensayos fueron realizados a presiones de confinamiento isótropo inicial desde 0.2 MPa hasta 5 MPa.

Los resultados evidencian que a bajas presiones de confinamiento se tiene un crecimiento de la compresibilidad al aumentar la dosificación de fino, puesto que estos contribuyen en el deslizamiento de los granos gruesos de arena. En la medida que aumenta el confinamiento efectivo, desaparecen las diferencias en deformación volumétrica, tendiendo a la formación de una meta estructura estable. Por otro lado el ángulo de fricción interna peak disminuye con la presencia de finos en bajas presiones de confinamiento, debido a que los finos contrarrestan la trabazón mecánica. El aumento del confinamiento provoca la pérdida del trabazón peak y un pulido de cantos angulosos que se traduce en una disminución del ángulo de fricción interna peak

Por último, se demuestra experimentalmente que las arenas de relave, para un 20% de deformación axial, no sufren una rotura explosiva hasta confinamientos de 5 MPa, sino que un pulido de los cantos angulosos. Se observa que este pulido es mayor, y se acentúa, en la etapa de corte que en consolidación isótropa

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Contexto general.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivos generales .....	2
1.2.2.	Objetivos específicos .....	2
1.2.3.	Metodología.....	3
1.3.	Organización de la memoria.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1.	Comportamiento monótono drenado.....	4
2.1.1.	Estado último o estado estacionario .....	6
2.2.	Rotura de partículas .....	8
2.2.1.	Medición de la rotura de partículas.....	8
2.2.2.	Factores que influyen en la rotura de partículas.....	11
2.2.2.1.	Mineralogía .....	11
2.2.2.2.	Tamaño máximo de partícula .....	12
2.2.2.4.	Trayectoria de tensiones .....	13
2.2.2.5.	Agua.....	14
2.2.2.6.	Tiempo.....	14
2.3.	Contenido de finos en medios granulares.....	15
3.	EQUIPOS,MATERIALES Y METODOLOGÍAS.....	21
3.1.	Equipos .....	21
3.1.1.	Triaxial de bajas presiones .....	21
3.1.2.	Triaxial de altas presiones .....	22
3.1.3.	Mastersizer 2000, Análisis granulométrico.....	24
3.2.	Materiales .....	25
3.2.1.	Procedencia del material .....	25
3.2.2.	Clasificación geotécnica del suelo .....	25
3.2.3.	Clasificación mineralógica de la arena natural de relaves .....	29
3.3.	Metodología de los Ensayos .....	29

3.3.1.	Análisis pre ensayo .....	29
3.3.2.	Preparación de las probetas .....	29
3.3.3.	Consolidación isotrópica.....	31
3.3.4.	Desviador de corte.....	31
3.3.5.	Índice de vacíos final del ensayo .....	31
3.3.6.	Análisis post ensayo.....	32
3.4.	Programa experimental .....	32
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	35
4.1.	Resultados experimentales.....	35
4.1.1.	Variación del índice de vacíos según el contenido de finos.....	35
4.1.2.	Consolidación isotrópica.....	36
4.1.3.	Comportamiento monótono drenado .....	38
4.1.4.	Rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento .....	47
4.1.5.	Rotura de partículas a altas presiones de confinamiento .....	49
4.2.	Discusión.....	51
4.2.1.	Variación de índices de vacíos según el contenido de finos .....	51
4.2.2.	Consolidación isotrópica.....	52
4.2.3.	Comportamiento monótono drenado .....	54
4.2.4.	Rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento .....	59
4.2.5.	Rotura de partículas a altas presiones de confinamiento .....	60
5.	CONCLUSIONES .....	64
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Comportamiento monótono drenado en una arena de sacramento en estado denso (DR=100%) y estado suelto (DR=38%),(Lee & Seed, 1967).(a) Razón de tensiones principales en muestra suelta. (b) Razón de tensiones principales en muestra densa. (c) Deformación volumétrica en muestra suelta. (d) deformación volumétrica en muestra densa.....	5
Figura 2.Parámetro de estado en el plano e-log (p'), (Been & Jefferies, 1985) .....	6
Figura 3.Estado inicial y estado último en el plano e-p' (verdugo 1992).....	7
Figura 4. Línea de Estado último en el plano q/2 -p' (Verdugo & Ishihara, 1996).....	7
Figura 5. Compilado de variaciones del ángulo de fricción interna según la presión de confinamiento en materiales de enrocados (Indraratna, 1993) .....	8
Figura 6.Resumen de métodos de estimación de rotura de partículas, Hardin (1985).....	9
Figura 7.Superficie específica en función del radio de una partícula esférica para 3 casos de gravedad específica, Gs.....	10
Figura 8.Efecto de la presión de confinamiento en la rotura de partículas en materiales de cuarzo, oxido de aluminio y caliza. (a) Distribución granulométrica del cuarzo. (b) Distribución granulométrica del óxido de aluminio. (c) Distribución granulométrica de la caliza. (d) Variación del ángulo de fricción secante máximo con la presión de confinamiento.....	12
Figura 9. Rotura relativa según la presión de confinamiento para materiales sub redondeados y angulares bajo distintas razones de corte Kc. (Lee and Farhoomand, 1967) .....	13
Figura 10.Efecto del contenido de agua en consolidaciones isotropas. ....	14
Figura 11.Evolución de Rc, contractividad relativa, según el contenido de finos (Verdugo , 1996) .....	15
Figura 12.Índice de vacío mínimo para una mezcla con dos tamaños de partícula con diferentes contenidos de finos (Lade, 1998) .....	16
Figura 13.Variaciones de índice de vacío máximo e índice de vacío mínimo en la arena de relaves El Torito, Cordova (2017).....	16
Figura 14.Variaciones del índice de vacío según el contenido de finos (Yang et al., 2006). .....	17
Figura 15.Estado último de la arena de Foundry con finos no plásticos. (a) Estado estacionario con índice de vacío total para cada contenido de finos. (b)Estado último con índice de vacío intergranular para cada contenido de finos (Rahman et al, 2002).....	20
Figura 16.Triaxial de bajas presiones. (a) Marco de carga. (b) Panel de control de presión de cámara y contrapresión. ....	21
Figura 17.Triaxial de altas presiones (Maureira, 2012) .....	23
Figura 18.Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Mastersizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012) .....	24
Figura 19. Distribución granulométrica de la arena de relaves extraída del muro.....	25
Figura 20.Microscopia óptica de la arena de relaves natural. (a) Fila malla #30. (b) Fila malla #40. (c) Fila malla #50. (d) Fila malla #100. (e) Fila malla #200 .....	26
Figura 21. Distribución granulométrica por tamizado de la arena de relaves al 1%, 5%, 10% y 20% del contenido de finos .....	27

Figura 22.Comparación entre partículas de arena de relaves y partículas lavadas por malla. (a) Columna de arena de relaves natural. (b) Columna de arena de relaves lavada. ....	28
Figura 23.Cabezales lubricados.....	30
Figura 24.Índice de vacíos máximos e índice de vacío mínimo según el contenido de finos.....	36
Figura 25.Consolidación isótropa al 65% de la densidad relativa. (a) Escala lineal. (b) Escala logarítmica.....	37
Figura 26.Compresibilidad de las arenas de relave. (a) índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial. (b) Modulo de compresibilidad.....	38
Figura 27.Tensión deformación en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	39
Figura 28. Módulo de deformación secante al 50% del desviador de corte medio para distintas presiones de confinamiento y contenidos de finos.....	40
Figura 29. Angulo de fricción movilizado en triaxial en compresión. (a) 1% del contenido de finos. (b) 5% del contenido de fino. (c) 10% del contenido de finos. (d) 20% del contenido de finos. ..	41
Figura 30.Deformación volumétrica-deformación axial en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino. ....	42
Figura 31.Desarrollo del índice de vacío según la deformación axial en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	43
Figura 32.Presión media efectiva- desviador de corte medio. (a) 1% Contenido de fino. (b) 5% Contenido de fino. (c) 10% Contenido de fino. (d) 20% Contenido de fino .....	44
Figura 33.Presión media efectiva-índice de vacío en ensayo triaxial drenado en compresión, <i>escala lineal</i> . (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	44
Figura 34. Presión media efectiva- índice de vacío en ensayo triaxial drenado en compresión. Escala lineal. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	45
Figura 35.Presión media efectiva- índice de vacío en ensayo triaxial drenado en compresión, <i>escala logarítmica</i> . (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	46
Figura 36. Contractividad en muestras ensayadas a confinamientos efectivos de 2 kgf/cm <sup>2</sup> a un contenido de finos el 1%. (a) Esfuerzo de corte - deformación axial. (b) Deformación volumétrica-deformación axial.....	47
Figura 37.Análisis granulométrico pre-ensayo y post ensayo de muestras a confinamiento de 0.2 Mpa para un contenido de finos del 1%.....	48
Figura 38.Granulometrias por tamizado pre-ensayo y post-ensayo. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.....	49
Figura 39. Granulometrías por difracción laser pre y post ensayo. (a) 1% contenido de finos. (b) 5% contenido de finos. (c) 10% Contenido de finos. (d) 20% Contenido de finos. ....	50
Figura 40.Variación del índice de vacío máximo y mínimo para diferentes arenas de relave.....	52

Figura 41.Presión media efectiva-índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en muestras a una densidad relativa de confección del 65%. Comparación con los resultados de Córdova, (2017). (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino. ....	53
Figura 42.Esquema del mecanismo de ordenamiento de partículas en el estado denso al aumentar el contenido de finos (Cordova, 2017) .....	54
Figura 43.Esquema del mecanismo de ordenamiento de partículas en el estado suelto al aumentar el contenido de finos (Córdova, 2017) .....	54
Figura 44. Ángulo de fricción secante peak según la presión de confinamiento efectivo. ....	55
Figura 45.Ángulo de fricción secante peak en altas y bajas presiones de confinamiento efectivo. (a) ángulo secante peak a bajo 0.7 Mpa. (b) Ángulo secante peak sobre 0.7 Mpa. ....	56
Figura 46.Deformación volumétrica según el contenido de finos para cada presión de confinamiento. (a) Deformación volumétrica a 0.2 Mpa. (b) Deformación volumétrica a 0.4 Mpa. (c) Deformación volumétrica a 0.7 Mpa .....	57
Figura 47.Deformación volumétrica según el contenido de finos para cada presión de confinamiento.(a) Deformación volumétrica a 1.5 Mpa.(b) Deformación volumétrica a 2.0 Mpa.(c) Deformación volumétrica a 3.5 Mpa.(d) Deformación volumétrica a 5.0 Mpa.....	58
Figura 48.Contractividad según el contenido de fino .....	59
Figura 49. Razón de contenido de finos final con respecto al contenido de finos inicial. (a) 1% del contenido de finos. (b) 5% del contenido de finos. (c) 10% del contenido de finos. (d) 20% del contenido de finos .....	61
Figura 50. Incremento de área superficial específica según el confinamiento efectivo. Parámetro relativo de rotura de partículas. ....	63
Figura 51. Incremento del área superficial específica para el material lavado .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del triaxial de bajas presiones .....	21
Tabla 2. Características del triaxial de altas presiones .....	23
Tabla 3. Caracterización geotécnica de arenas 1%, 5%, 10% y 20 % de finos (Cordova, 2017) ....	27
Tabla 4. Programa experimental .....	34
Tabla 5. Área superficial específica en análisis de rotura a bajas presiones de confinamiento .....	59
Tabla 6. Razón teórica de contenido de finos final respecto al contenido de finos inicial en corte puro.....	62

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1.Contexto general

La disminución en la ley del cobre chileno ha aumentado su producción, incrementando el volumen de residuos provenientes del proceso de flotación de los sulfuros de cobre, conocidos como material de relave. Este, es transportado hidráulicamente hacia los llamados botaderos o tranques de relaves (Ministerio de Minería, 2007). Geotécnicamente, dicho material se clasifica, como una arena limosa o limo arenoso de baja plasticidad .

El año 2013, Chile alcanzó el record de producción de cobre, extrayendo 5,7 M de toneladas (SONAMI, 2013). Producto de esto, fue necesario aumentar el tamaño de los depósitos. Actualmente, algunas de estas estructuras, superan los 150 m de altura, induciendo cargas superiores a 1 MPa.

Existen dos tipos de depósito: los embalses de relave y los tranques de relave. En los del primer tipo, el muro de contención se construye con material de empréstito y en el segundo, es construido con la fracción gruesa del relave (arenas).

La gran producción de material de relaves y correspondiente aumento de las geoestructuras para contenerlos, justifica la comprensión del comportamiento de las arenas de relaves sometidas a presiones de confinamiento efectivo, sobre 1 MPa. Esto aplicado tanto para estados de carga estáticos como sísmicos.

El estudio del comportamiento de medios granulares a altas presiones es de interés para estados tensionales isótropos y anisótropos, ya que, por ejemplo, se ha encontrado que existe mayor rotura por efecto del corte que por efecto de cargas isótropas (Bishop, 1966). En particular, se ha estudiado el efecto de la trayectoria de tensiones anisotrópicas sobre muestras de arenas sub-redondeadas y angulares. Lee & Farhoomand, (1967) encontró que mientras más aumenta la pendiente de la trayectoria, mayor es la rotura de partículas.

Este estudio pretende ampliar los conocimientos de Solans, (2010), Maureira, (2012), Vargas, (2015) y Cordova, (2017) bajo la misma arena de relaves. En este contexto, este trabajo se enfoca en el comportamiento drenado de arenas de relave, para varios contenidos de finos , y tiene el propósito de indagar el efecto de esto en la rotura de partículas para altas presiones de confinamiento.

## **1.2.Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos generales**

El objetivo global de este estudio es evaluar experimentalmente el efecto del corte en el comportamiento mecánico drenado, así como la potencial rotura de partículas de una arena de relave sometida a un amplio rango de presiones, para cuatro contenidos de finos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar geotécnicamente el material de relave con 1%, 5%, 10%, y 20% de finos.
- Estudiar la respuesta mecánica de arena de relaves con 1%, 5%, 10% y 20% a diferentes confinamientos efectivos.
- Relacionar el nivel de rotura de partículas con el confinamiento efectivo y el corte.
- Comparar los resultados con aquellos de la literatura.

### 1.2.3. Metodología

La metodología experimental considera la realización de ensayos de laboratorio para caracterizar el material. En particular, los ensayos a realizar son:

- Ensayo triaxial monótono en arena con 1%, 5%, 10%, y 20% de finos no plásticos preparados por medio de compactación húmeda y confinamientos efectivos entre 0,2 MPa y 5 MPa.
- Ensayos de microscopía óptica
- Granulometría por difracción
- Granulometría por tamizado

### 1.3. Organización de la memoria

La memoria de título tiene seis capítulos que organizan el trabajo realizado en el laboratorio de sólidos y medios particulados de la Universidad de Chile. También se conectan las evidencias empíricas con un análisis teórico según las bibliografías más reconocidas en el área. A continuación se detallan los capítulos del trabajo de investigación.

**Capítulo 1:** Introducción que explica la motivación y objetivos de esta investigación. También se incluyen los tipos de ensayos que se desarrollan.

**Capítulo 2:** Revisión bibliográfica. Se define un marco teórico, contextualizando las investigaciones realizadas en esta área.

**Capítulo 3:** Se detallan equipos, materiales, y metodologías para realizar el trabajo.

**Capítulo 4:** Presentación y análisis de los resultados experimentales. Se discuten los resultados obtenidos comparando con resultados de la literatura.

**Capítulo 5:** Se presentan conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

**Capítulo 6:** Presentación de la bibliografía utilizada en la investigación

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Comportamiento monótono drenado

En un ensayo triaxial drenado, al aplicar carga axial, y por ende corte, se permite que el fluido intersticial pueda evacuar o ingresar del espacio granular, lo cual induce variaciones volumétricas en el material, sin que exista cambio en la presión de poros (Vargas, 2015). La Figura 1 presenta los resultados de ensayos triaxiales drenados para la arena de Sacramento bajo presiones de confinamiento de 1 atm a 116 atm, a densidades relativas de confección de 100% y 38%, hechos por (Lee & Seed, 1967).

A una densidad relativa del 100%, se evidencia un dominio en dilatación que se va perdiendo a medida que aumenta la presión de confinamiento, en otras palabras, existe un cambio de dilatación a contractividad marcada desde los 19 atm de presión de confinamiento, Figura 1a.

En el caso del 38% de la densidad relativa, se aprecia un comportamiento contractivo para todo el rango de presiones, excepto en el caso de 1 atm, en el que se observa una leve dilatación, Figura 1b. Lo anterior resulta evidente al observar el plano de razón de esfuerzos principales, ya que los ensayos dilatantes presentan un peak de resistencia. Además, las variaciones volumétricas, en estado dilatante, comienzan a tomar valores positivos a medida que aumenta la deformación axial, Figura 1c y Figura 1d.

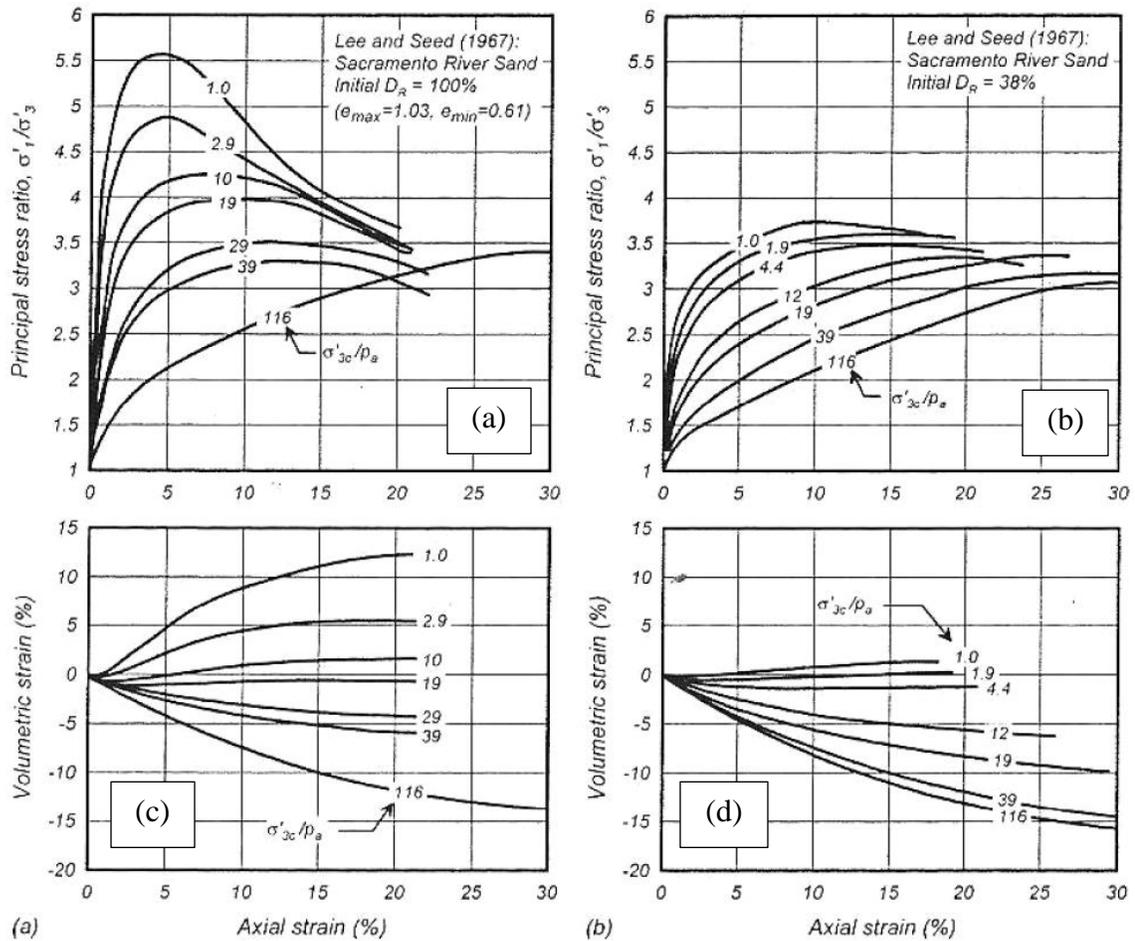


Figura 1. Comportamiento monótono drenado en una arena de sacramento en estado denso ( $DR=100\%$ ) y estado suelto ( $DR=38\%$ ), (Lee & Seed, 1967). (a) Razón de tensiones principales en muestra suelta. (b) Razón de tensiones principales en muestra densa. (c) Deformación volumétrica en muestra suelta. (d) deformación volumétrica en muestra densa.

En resumen, se tiene un efecto directo, (Contractividad y dilatancia) de la densidad relativa en el comportamiento del material a una misma presión de confinamiento. Sin embargo, al momento de variar el estado tensional isótropo existe un efecto acoplado entre la densidad relativa y la presión de confinamiento. Es así como Been & Jefferies definen el parámetro de estado  $\phi$  para un suelo con diferentes contenidos de finos, presiones de confinamiento e índices de vacíos (Been & Jefferies, 1985). Se entiende  $\phi$  como la diferencia entre el índice de vacío post consolidación y el índice de vacío en el estado último, ecuación (1)

$$\varphi = e_{\lambda} - e_{ss} \quad (1)$$

Donde;

$e_{\lambda}$ : Índice de vacío post consolidación, previo a la aplicación del corte

$e_{ss}$ : Índice de vacío en el estado último, una vez alcanzada la falla

En la Figura 2 se observa el plano e-log (p'), en el cual se evidencia que a una determinada presión de confinamiento es posible evaluar el parámetro de estado  $\varphi$ .

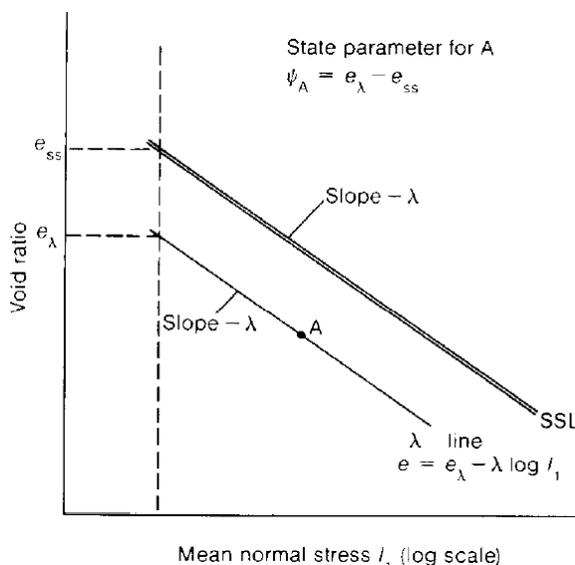


Figura 2. Parámetro de estado en el plano e-log (p'), (Been & Jefferies, 1985)

### 2.1.1. Estado último o estado estacionario

Un medio granular alcanza su estado último cuando no hay variación volumétrica ante una sollicitación de corte constante a tasa de deformación axial constante (Castro & Poulos, 1977). En un suelo homogéneo es posible identificar una “línea de estado último”, dada por el efecto combinado de la presión media efectiva, esfuerzo desviador, e índice de vacíos (Verdugo, 1992)

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en la arena de Toyoura en ensayos triaxiales en condición drenada y no drenada. Los cuadrados blancos representan el estado de compacidad inicial del suelo, y los puntos negros el estado último. Se evidencia que la línea de estado último es independiente del índice de vacío inicial, puesto que todos los estados finales viven en ella. La Figura 4 representa la independencia de la presión de confinamiento y la fábrica, en el estado

último, el material moviliza el mismo ángulo de fricción representado por la acumulación de los puntos en la línea de estado estacionario del plano esfuerzo desviador medio y presión media efectiva. (Verdugo & Ishihara, 1996)

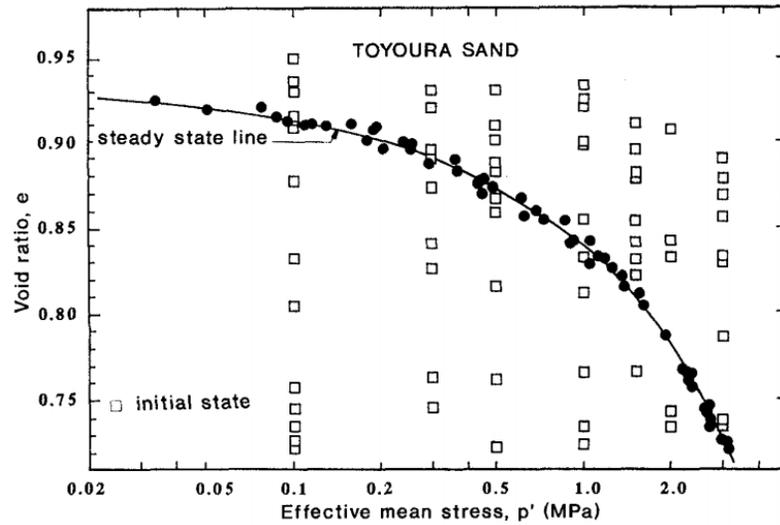


Figura 3. Estado inicial y estado último en el plano  $e$ - $p'$  (verdugo 1992)

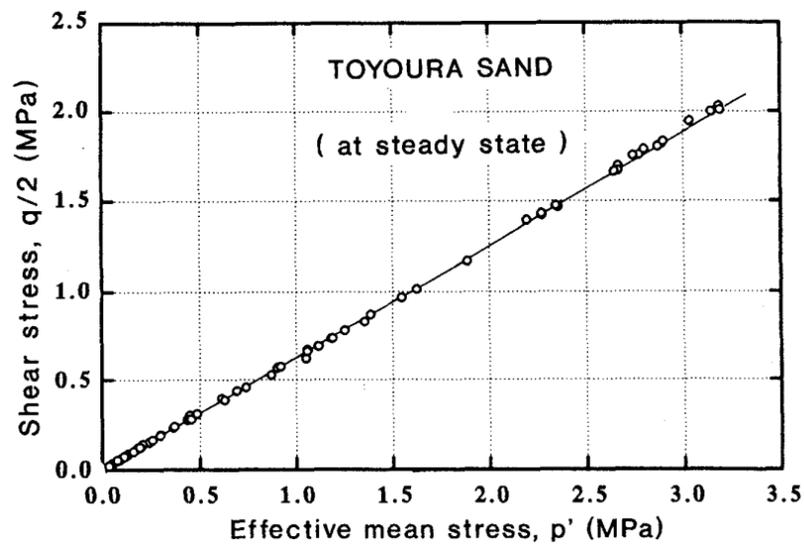


Figura 4. Línea de Estado último en el plano  $q/2$  - $p'$  (Verdugo & Ishihara, 1996)

## 2.2. Rotura de partículas

La rotura de partículas es el fenómeno asociado a medios granulares en el cual a cierto nivel tensional (sobre 1MPa) se inducen cambios en la forma de las partículas, modificando el comportamiento mecánico del material. La rotura de partículas implica un aumento en la compresibilidad, disminución de la dilatancia, y una disminución del ángulo de fricción interna (Idrarranta,1983), (Maureira, 2012), .

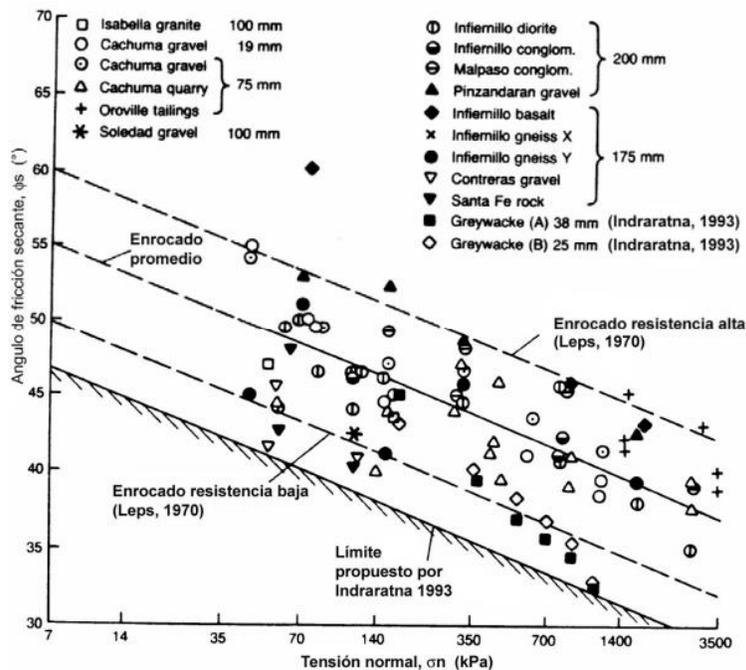


Figura 5. Compilado de variaciones del ángulo de fricción interna según la presión de confinamiento en materiales de enrocados (Indrarratna, 1993)

### 2.2.1. Medición de la rotura de partículas

Uno de los métodos tradicionales para medir rotura de partículas es la realización de granulometrías hechas pre y post ensayo. Si existe dicha rotura, habrá una variación en la distribución granulométrica de material post ensayo (Campaña, 2011), Figura 6.

Diversos autores han desarrollado parámetros de rotura de partículas enfocados en algunos puntos de las curvas granulométricas pre y post ensayo. Alguno de los parámetros más relevantes se definen a continuación:

Lee & Farhoomand (1967) desarrollaron un parámetro de la razón de tamaños del 15% de la muestra más fina y el 15% de la muestra más fina finalizado el ensayo. Marsal (1965) estimó el

nivel de rotura a partir de las sumas positivas en los porcentajes retenidos en cada tamiz. Luego, el mismo autor, cuantificó la rotura a través del parámetro  $B_{10}$  que se define en la ecuación (2).

$$B_{10} = 1 - D_{10f}/D_{10i} \quad (2)$$

Donde;

$D_{10i}$ : Tamaño de partículas del 10% más fino de la muestra inicial pre ensayo

$D_{10f}$ : Tamaño de partículas del 10% más fino de la muestra inicial post ensayo

Hardin (1985) define el parámetro de rotura relativa,  $B_t$ , siendo el primer parámetro que relaciona la forma de la curva granulométrica pre y post ensayo. El parámetro  $B_t$  es igual al área encerrada por las curvas granulométricas antes y después del ensayo, para diámetros mayores a 0.075 mm (sobre malla #200). En la Figura 6 se tiene un resumen de algunos métodos de parámetros de rotura de partículas descritos anteriormente (Hardin, 1985)

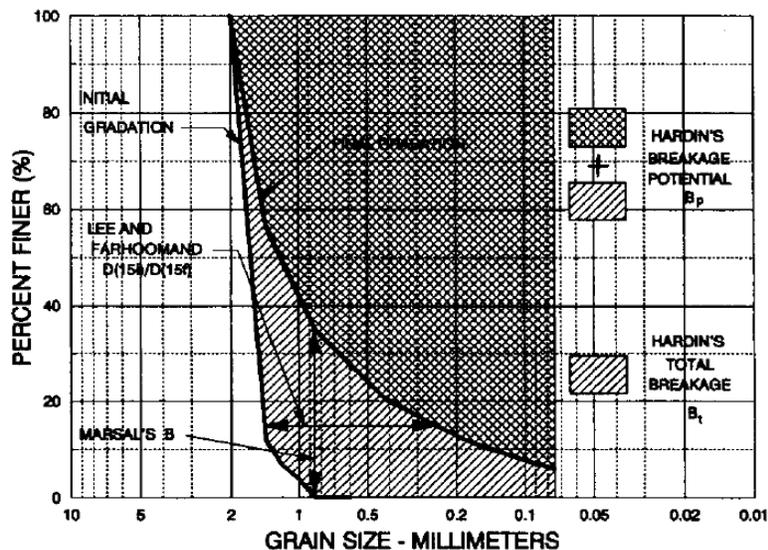


Figura 6. Resumen de métodos de estimación de rotura de partículas, Hardin (1985)

Otro método es el propuesto por Miura & Yamanouchi (1975), que evalúa el nivel de rotura cuantificando el área superficial de las partículas. Lo anterior se define según la ecuación (3)

$$S = S_w \gamma_d \quad (3)$$

Donde;

S: Área superficial

$S_w$ : Superficie específica

$\gamma_d$ : Densidad seca

Un concepto importante que utiliza la ecuación (3) es la superficie específica, la que se define como la relación entre el área y la masa de una partícula. Este concepto es vital, ya que muchos procesos físicos se llevan a cabo en la superficie. La Figura 7 muestra la superficie específica de una esfera de radio variable para algunos casos de gravedad específica. En ella se observa que para tamaños pequeños de radio (menores a  $10^{-5}$  mm) la superficie específica crece abruptamente.

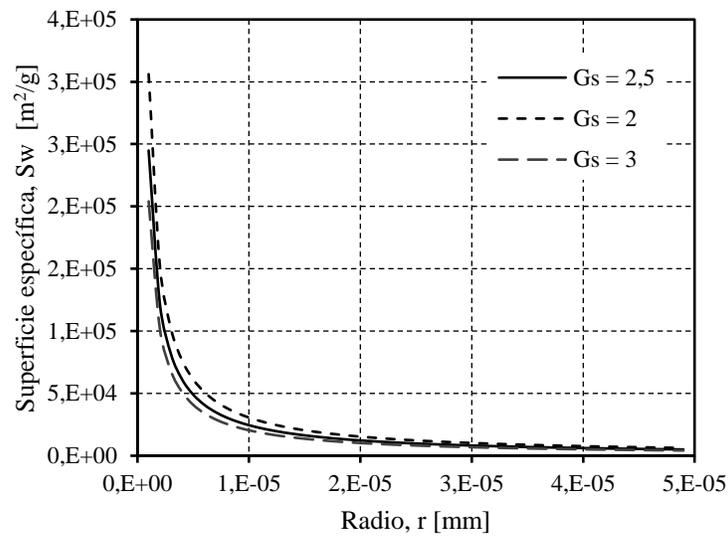


Figura 7. Superficie específica en función del radio de una partícula esférica para 3 casos de gravedad específica,  $G_s$ .

Además, se pueden encontrar valores de superficie específica a través de los resultados de granulometría, como se define en las siguientes relaciones (Miura & Yamanouchi, 1975),

$$S_w = S_{w1} + S_{w2} \quad (4)$$

$$S_{w1} = \sum \frac{F}{100} \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \quad (5)$$

$$S_{w2} = \sum \frac{F}{100} \frac{S_o G_c t (1 - e_o) \sqrt{e^3}}{G_s t_o \sqrt{e_o^3} (1 - e)} \quad (6)$$

Donde;

$S_{w1}$ : Superficie específica de partículas mayores a 74  $\mu\text{m}$

$S_{w2}$ : Superficie específica de partículas menores a 74  $\mu\text{m}$

F: Porcentaje en peso retenido en una malla específica

$G_s$ : Gravedad específica del suelo

$S_o$ : Superficie específica del cemento

$t_o$ : Tiempo de sedimentación del cemento

t: Tiempo de sedimentación del suelo

e: Índice de vacío del suelo

### 2.2.2. Factores que influyen en la rotura de partículas

Varios factores afectan el nivel de rotura de partículas, en directa relación con los tres estados que componen un medio granular: sólido, líquido, y gaseoso. Otros efectos están relacionados con la organización de los granos y el estado tensional.

#### 2.2.2.1. Mineralogía

El tipo de minerales del cual está compuesto el medio granular afecta la rotura de partículas. Se analizaron tres tipos de mineralogías distintas, óxido de aluminio, cuarzo y caliza en ensayos triaxiales drenados. Tras los ensayos, se observó en las curvas granulométricas un mayor nivel de rotura en las muestras de caliza, luego en las muestras de cuarzo y un menor nivel de rotura en el óxido de aluminio, Figura 8 (Lo & Roy, 1973). En la Figura 8d se observa el desarrollo del ángulo de fricción interno máximo con el aumento de la presión de confinamiento. En ella se deja en

evidencia que la caliza posee menor variación del ángulo de fricción, a diferencia del óxido de aluminio donde la pendiente tiene una caída más abrupta desde los 400 lb/sq in.

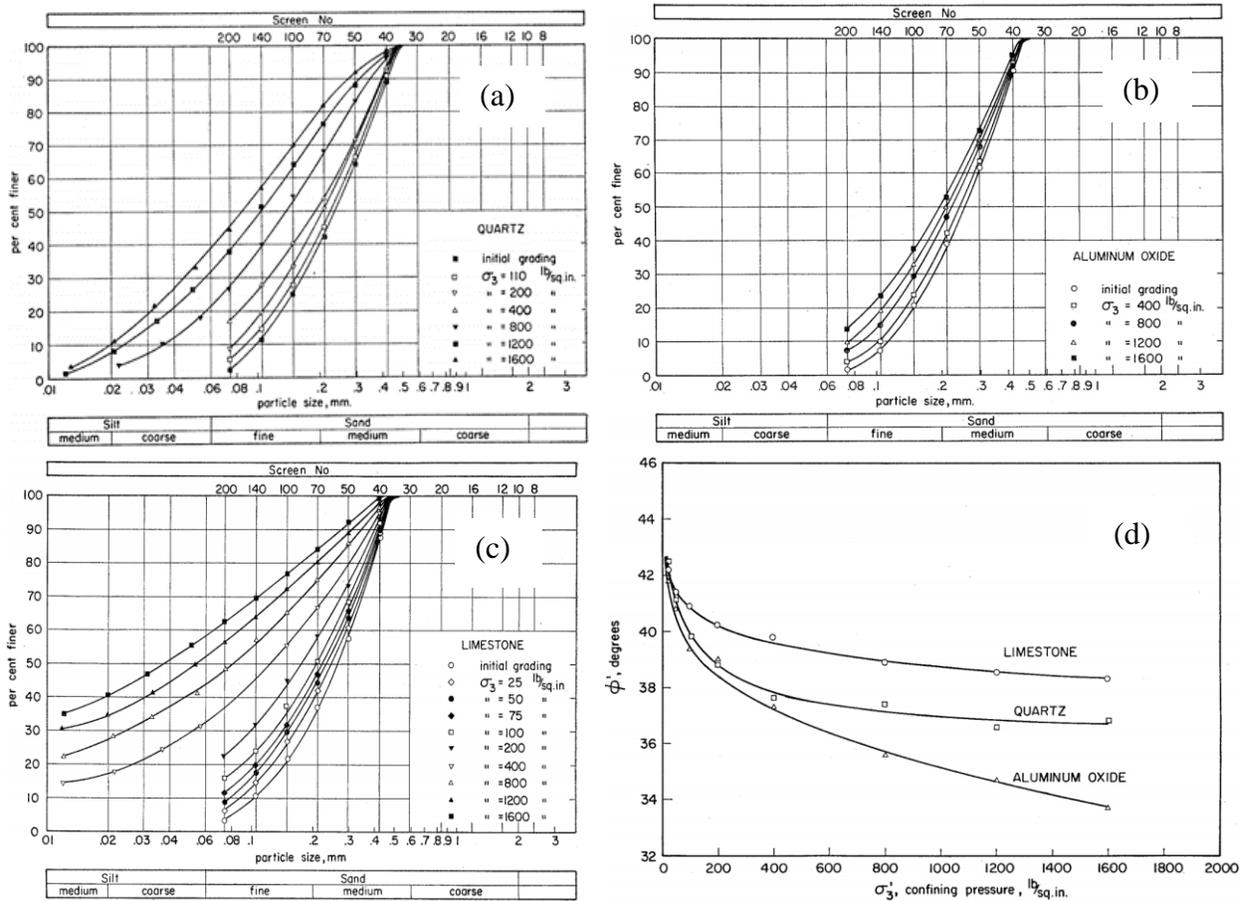


Figura 8. Efecto de la presión de confinamiento en la rotura de partículas en materiales de cuarzo, óxido de aluminio y caliza. (a) Distribución granulométrica del cuarzo. (b) Distribución granulométrica del óxido de aluminio. (c) Distribución granulométrica de la caliza. (d) Variación del ángulo de fricción secante máximo con la presión de confinamiento.

### 2.2.2.2. Tamaño máximo de partícula

Lee & Farhoomand (1967) observaron que materiales con mayor tamaño máximo de partículas tienden a sufrir mayor nivel de rotura. Lo anterior se debe a que las partículas grandes poseen planos de discontinuidades que favorecen la rotura. Partículas de menor tamaño han sufrido procesos previos de rotura, llegando a un tamaño estable, siendo la estructura más resistente (Lee & Farhoomand, 1967)

### 2.2.2.3. Angulosidad

Partículas más angulosas poseen mayor tendencia a la rotura, puesto que las tensiones inter partículas tienden a concentrarse en una menor área de contacto. En la Figura 9, se observa que las partículas sub angulosas presentan más rotura relativa que las partículas angulares. A altas presiones, y ante igualdad de mineralogía, partículas redondeadas y angulosas llegarán al mismo esqueleto granular. Además, las partículas angulosas tienen una ruptura progresiva, en cambio las partículas redondeadas tienen una ruptura explosiva del grano (Lee & Farhoomand, 1967)

### 2.2.2.4. Trayectoria de tensiones

Bishop (1966) determinó una relación entre el nivel de rotura y el estado tensional. Mientras mayor sea el nivel de corte, mayor nivel de rotura, (Bishop, 1966). Observó un aumento de la rotura cuando se acrecienta el coeficiente de anisotropía. Se observó tanto en partículas angulosas como en partículas redondeadas, Figura 9 (Lee & Farhoomand, 1967).

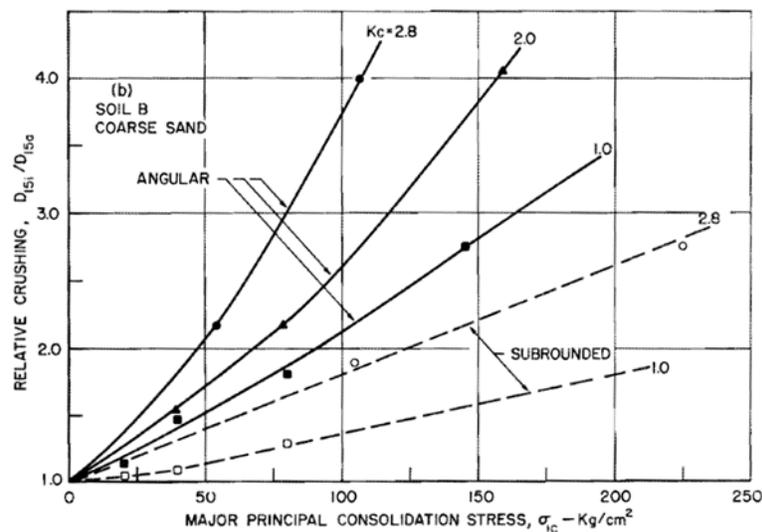


Figura 9. Rotura relativa según la presión de confinamiento para materiales sub redondeados y angulares bajo distintas razones de corte  $K_c$ . (Lee and Farhoomand, 1967)

### 2.2.2.5. Agua

Miura & Yamanouchi (1975) realizaron ensayos de consolidaciones isotrópicas en arena de Toyoura, bajo condiciones saturadas y secas, a confinamientos de hasta  $500 \text{ kgf/cm}^2$ . Se evidenció que las muestras saturadas presentaban mayor nivel de rotura. Lo anterior se explica porque las grietas provocadas por la alta concentración de tensiones en los contactos son llenadas por fluido, generando una cohesión intra - partícula, lo que conlleva en un aumento de la rotura de partículas. Se realizaron estudios con varios fluidos, siendo el agua la que posee mayor nivel de rotura, por su alta polaridad y baja viscosidad.

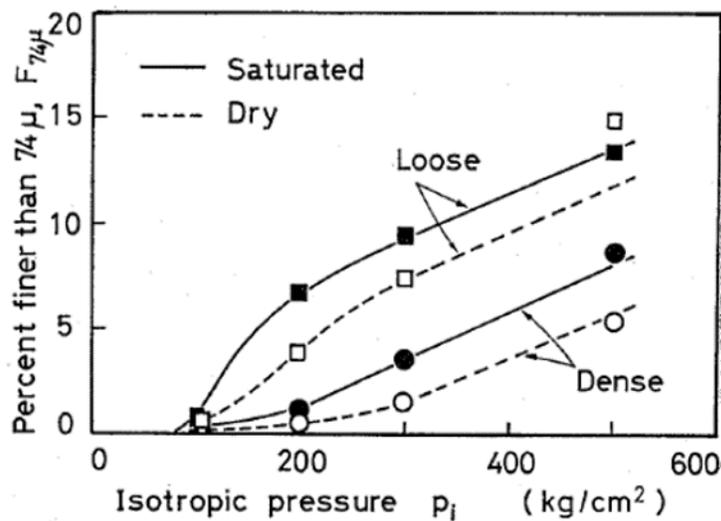


Figura 10. Efecto del contenido de agua en consolidaciones isotrópicas.

### 2.2.2.6. Tiempo

A un estado tensional fijo, existe mayor nivel de rotura de partículas a medida que aumenta el tiempo. El efecto del tiempo en la rotura se conoce como “creep” (Lade et al 1996). Se estudiaron muestras bajo el mismo nivel tensional en tiempos de 1 a 24 hrs de ensayo, correlacionando el nivel de rotura con el tiempo. Se determinó un aumento del nivel de rotura decrece con el tiempo. (Colliat-Dangus et al 1988)

### 2.3. Contenido de finos en medios granulares

Variaciones en el comportamiento se observan cuando el suelo posee altos o bajos contenidos finos no plásticos. Verdugo (1996) definió un parámetro de contractividad relativa para analizar el potencial intrínseco de licuación. Este índice mide la contractividad de un medio granular para una presión media efectiva. Estudios en arena de Toyoura, bajo diferentes contenidos de finos, evidencian que hay un aumento del parámetro de contractividad a medida que aumenta la cantidad de finos, Figura 11.

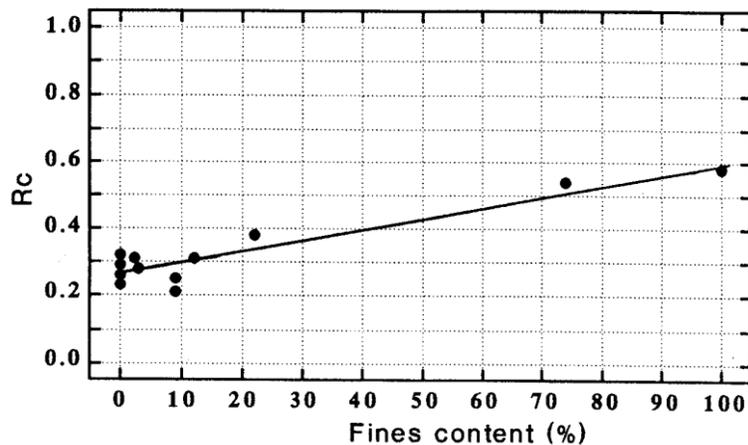


Figura 11. Evolución de  $R_c$ , contractividad relativa, según el contenido de finos (Verdugo, 1996)

Los resultados del comportamiento intrínseco determinado por Verdugo (1996) invitan a estudiar el efecto del contenido de finos en el esqueleto granular. Lade et al (1998) analiza las variaciones en el índice de vacío para un material con dos tamaños de partícula. En dicho material concluye que el índice de vacíos mínimo es alcanzado cuando el espacio intergranular está completamente lleno con los finos, Figura 12. El punto de separación del comportamiento de los finos con los gruesos se denomina “Contenido de finos en transición”. Luego, los finos comienzan a ubicarse en los contactos de las partículas de mayor tamaño, aumentando el índice de vacío.

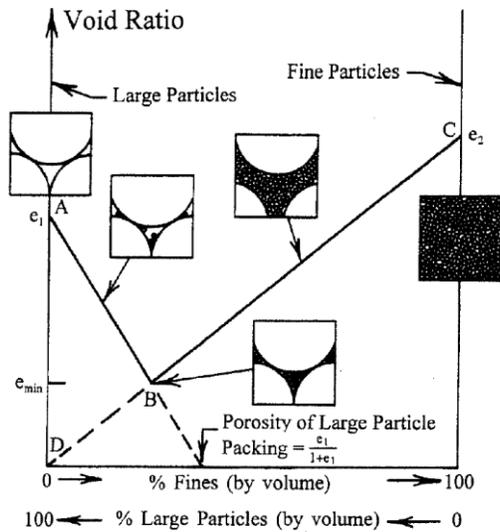


Figura 12. Índice de vacío mínimo para una mezcla con dos tamaños de partícula con diferentes contenidos de finos (Lade, 1998)

Cordova (2017) realizó el análisis de índice de vacío máximo e índice de vacío mínimo para la arena de relaves, denominado “El Torito”. Este estudio, determinó que el índice de vacío máximo disminuye hasta un 30% del contenido de finos no plásticos, luego la curva presenta un leve crecimiento hasta un 50% del contenido de finos. A diferencia del índice de vacío mínimo que disminuye a medida que aumenta el contenido de finos

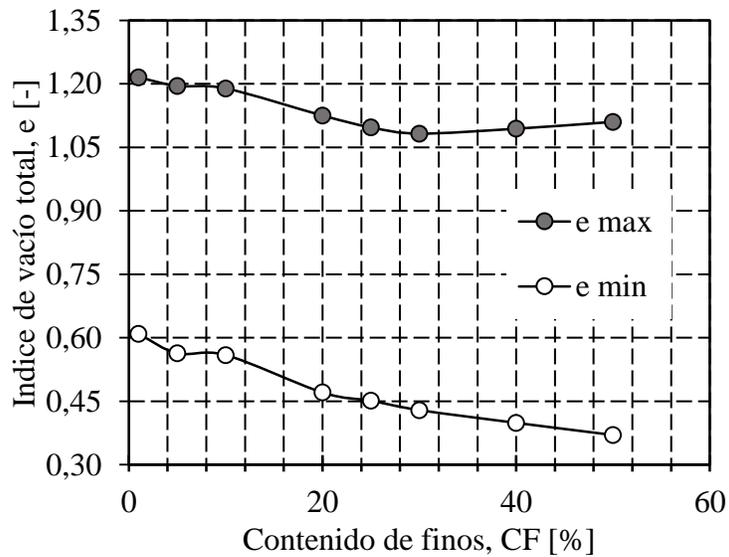


Figura 13. Variaciones de índice de vacío máximo e índice de vacío mínimo en la arena de relaves El Torito, Cordova (2017)

La Figura 14 muestra las variaciones de consolidaciones isotrópicas para contenidos de finos desde 0% a 100%. Se observa la misma tendencia encontrada por Cordova (2017) en los estados más sueltos y estado más densos, es decir, que hasta un 30 % del contenido de finos, las curvas decrecen y luego aumentan en índice de vacío. Además, un incremento en el contenido de finos, hasta un 30%, moviliza las curvas de consolidación a índices de vacíos menores. Luego, las curvas se desplazan hacia índices de vacío mayores, a medida que aumenta la dosificación de finos (Yang et al, 2006).

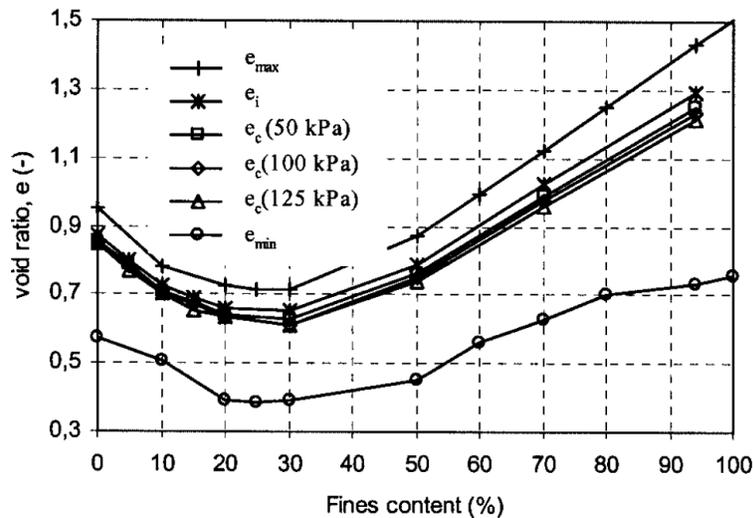


Figura 14. Variaciones del índice de vacío según el contenido de finos (Yang et al., 2006).

Estudios de la línea de estado último en el plano  $e-p'$  para contenidos de finos hasta un 25%, muestran una movilización de la curva de estado último a índices de vacío menores., (Yang et al, 2006). En la Figura 15 se observan las variaciones de las líneas de estado último.

En lo que respecta a las tensiones que se generan en el esqueleto granular, los esfuerzos distribuidos entre los granos cambian dependiendo de cómo se acomodan los finos en los espacios inter granulares. Muchos de los finos que están en el espacio generado por los granos más gruesos no participan en la distribución de tensiones. En 1998, se propuso el concepto de índice de vacío intergranular o índice de vacío skeleton, el cual no considera los finos que están dentro de los intersticios de los granos. La ecuación (7) representa el índice de vacío descrito anteriormente. (Thevanayagam, 1998)

$$e_{\text{intergranular}} = (e + f_c)/(1 - f_c) \quad (7)$$

Donde;

e: Índice de vacío total.

$f_c$ : Contenido de finos

Esta definición es solo aplicable a un bajo contenido de finos, aproximadamente menor al 30% de finos no plásticos. A medida que estos van aumentando, comienzan a tomar actividad dentro de la matriz granular, lo que significa que se van posicionando entre los contactos de las partículas más grandes. Según lo anterior, se define el índice de vacío para mayores contenidos de finos, ecuación (8) (Thevanayagam & Mohan, 2000)

$$e_{\text{intergranular}} = (e + (1 - b)f_c)/(1 - (1 - b)f_c) \quad (8)$$

Donde;

e: Índice de vacío total.

$f_c$ : Contenido de finos.

b : fracción de finos activa dentro de la matriz granular.

El parámetro “b” ha sido controversial en diversos trabajos, dado que varios autores no consideran el efecto de la razón de tamaño de las partículas (Zlatovic & Ishihara ,1995). Para contrarrestar lo anterior, se definió una relación empírica del parámetro “b”, basada en la calibración de un set de datos de estados últimos. Dicha calibración se muestra en la ecuación (9) (Rahman et al, 2002)

$$b = \left(1 - e^{-nf_c^n/k}\right) \left(r \frac{f_c}{f_{thre}}\right)^r \quad (9)$$

Donde;

- $e$  : Índice de vacío total
- $f_c$  : Contenido de finos
- $r = d_{50}/d_{10}$  : Razón de tamaño de partículas
- $f_{thre}$  : Contenido de finos en transición
- $n, k$  : Valores de ajustes del parámetro “b”

Además, se verificó el parámetro “b” para varios estados últimos. En la Figura 15 se observa una de sus aplicaciones a un set de resultados de líneas de estado estacionario en el plano de índice de vacío y presión media efectiva. En ella, se evidencia que las de líneas de estado último se concentran en un mismo lugar geométrico al utilizar el índice de vacío intergranular.

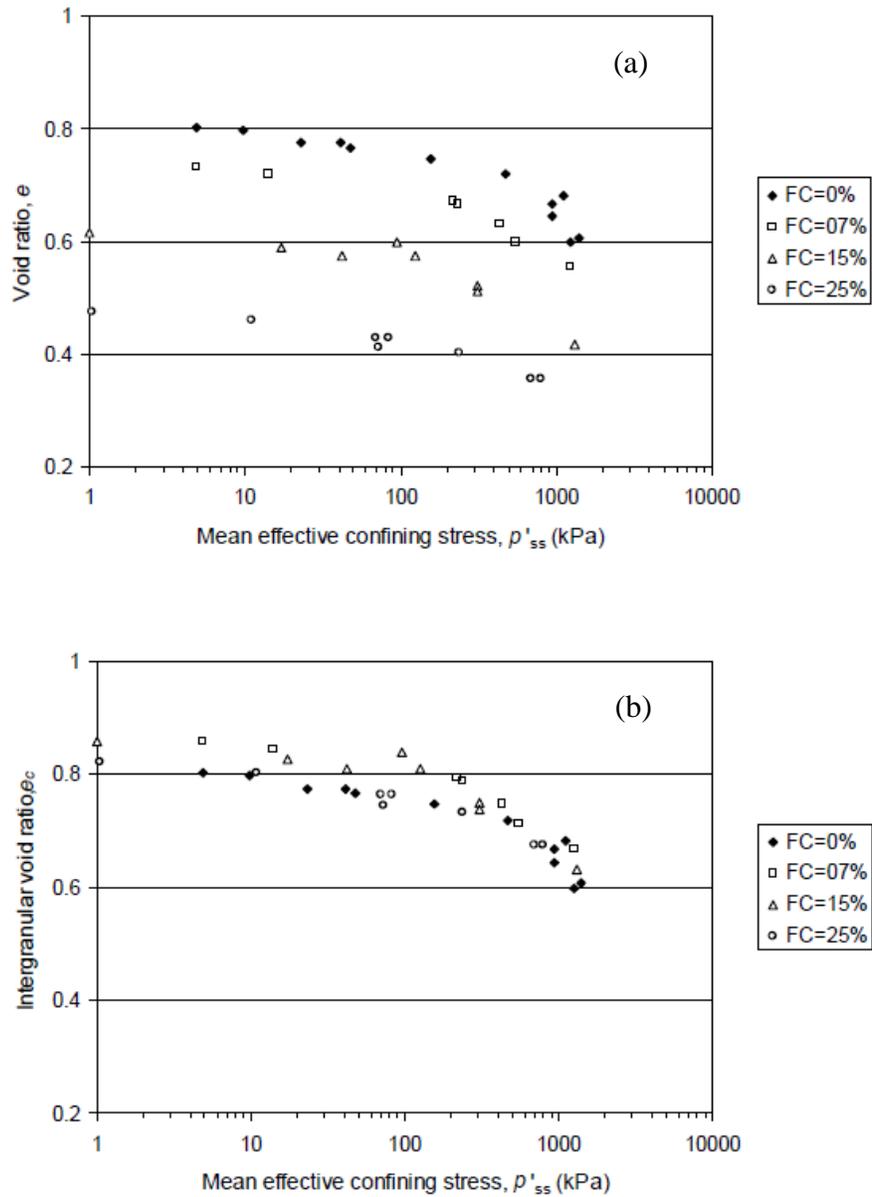


Figura 15. Estado último de la arena de Foundry con finos no plásticos. (a) Estado estacionario con índice de vacío total para cada contenido de finos. (b) Estado último con índice de vacío intergranular para cada contenido de finos (Rahman et al, 2002)

### 3. EQUIPOS, MATERIALES Y METODOLOGÍAS

#### 3.1. Equipos

##### 3.1.1. Triaxial de bajas presiones

El equipo triaxial de bajas presiones está en el laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. Este equipo posee una línea de presión aire presurizado máxima de 0.7 MPa. El sistema puede llegar hasta 0.6 MPa de presión efectiva en probetas de 5cm de diámetro, y 10 cm de altura, Figura 16. El resumen de las características de la máquina se puede observar en la Tabla 1.

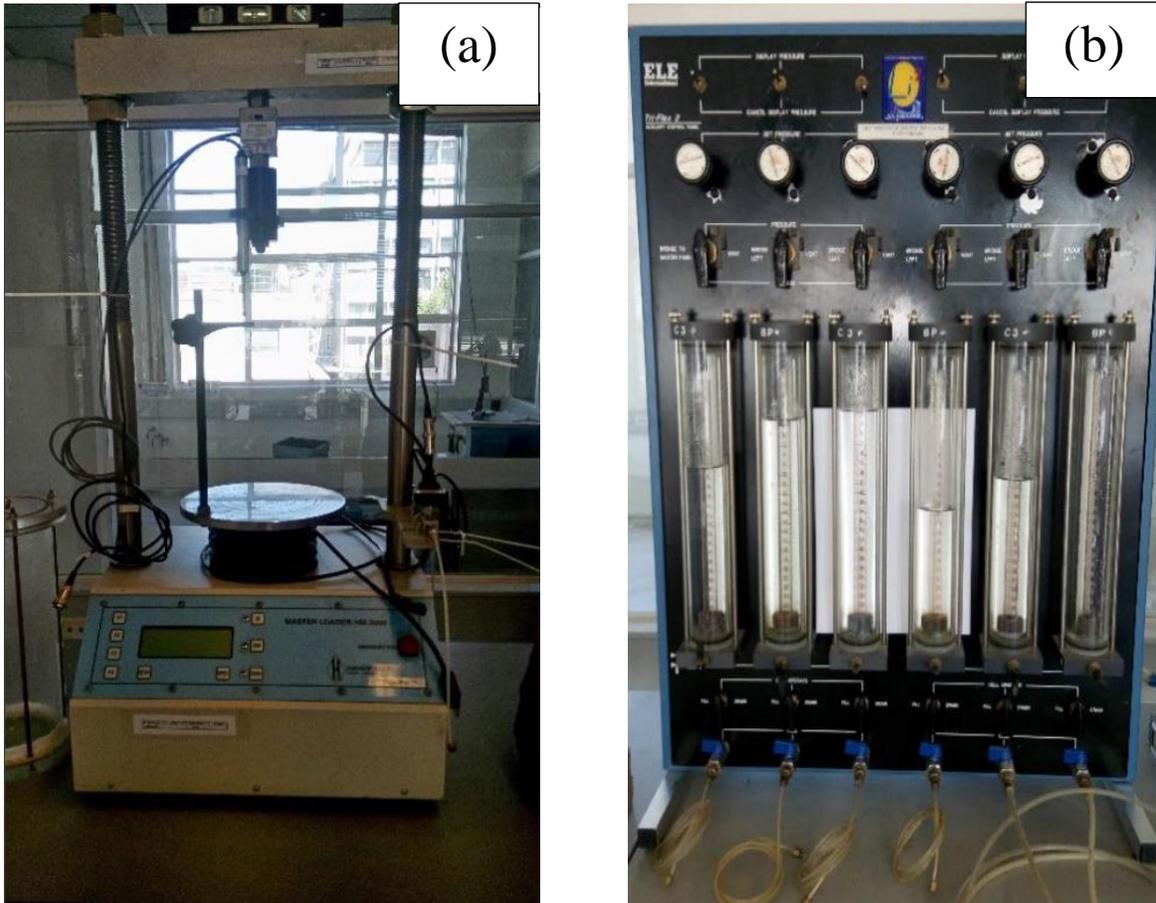


Figura 16. Triaxial de bajas presiones. (a) Marco de carga. (b) Panel de control de presión de cámara y contrapresión.

Tabla 1. Características del triaxial de bajas presiones

Características	
Tipos de ensayo	-Tx CIU y CID en compresión y extensión
Tipo de carga	-Deformación controlada en tx monótonos -Carga controlada en tx cíclicos
Rango de presión de cámara (MPa)	0-0.7
Rango de contrapresión (MPa)	0-0.7
Carga axial máxima (ton)	1
Rango de velocidad de deformación(mm/min)	0.12-0.20
Dimensión de las probetas d/h (cm/cm)	5/10
Tamaño máximo de partículas (mm)	16
Deformación axial máxima (mm)	50

### 3.1.2. Triaxial de altas presiones

Los ensayos con tensiones sobre 1MPa se realizaron en el triaxial de altas presiones en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile ; Figura 17 (Solans, 2010). Las características generales del triaxial se resumen en la Tabla 2

Presiones por sobre 0.7 MPa se aplican con una bomba hidráulica, capaz de entregar una presión de 6 MPa. Para presiones de cámara menores de 0.7MPa y contrapresión se utiliza una línea de aire presurizado alimentada por un compresor de aire. Los ensayos monótonos se realizan a deformación controlada. El sistema que permite esto es un motorreductor que se encuentra conectado a una variador de frecuencia que regula la tasa de deformación del pistón.

Otra particularidad del equipo, es la posibilidad de realizar ensayos cíclicos en condición drenada y no drenada. El sistema consiste en la aplicación de carga controlada manualmente a partir de una manivela conectada al motorreductor. Toda la información obtenida a partir de los transductores de presión, celda de carga, LVDT y el transductor de presión diferencial es llevada a un acondicionador de señal, una tarjeta de conversión análoga digital y un programa de adquisición de datos (“LabView”).

Cabe destacar que el equipo fue modificado en el sistema de contrapresión, debido a que producto de los años, hubo un envejecimiento del acrílico que soportaba la presión de aire presurizado. Se modificó el sistema con una cámara de triaxial utilizada en los ensayos de bajas presiones.



Figura 17. Triaxial de altas presiones (Maureira, 2012)

Tabla 2. Características del triaxial de altas presiones

Características	
Tipos de ensayo	-Tx CIU y CID en compresión y extensión -Tx cíclico CIU y CID
Tipo de carga	-Deformación controlada en tx monótonos -Carga controlada en tx cíclicos
Rango de presión de cámara (MPa)	0-6
Rango de contrapresión (MPa)	0-0.7
Carga axial máxima (ton)	20
Rango de velocidades de deformación (mm/min)	0.12-0.20
Dimensión de las probetas d/h (cm/cm)	5/10 y 10/20
Tamaño máximo de partículas (mm)	16
Deformación axial máxima (mm)	50

### 3.1.3. Mastersizer 2000, Análisis granulométrico

El análisis granulométrico pre-ensayo y post ensayo se realizó con el equipo Mastersizer 2000 ubicado en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Figura 18a.

El equipo se basa en el paso de partículas entre dos cristales circulares suspendidas en un líquido dispersante. Se incide un láser calibrado y según el tipo de dispersante y tamaño de las partículas, se genera una difracción del láser, es decir, que cambia la dirección del láser. La dispersión se mide por medio de un arreglo de celdas fotosensibles. Con lo anterior, el equipo entrega una frecuencia de distribución de tamaños con respecto al volumen total de la muestra. A su vez, si se asume que las partículas son esféricas y lisas, el equipo obtiene una superficie específica equivalente, Figura 18b (Maureira, 2012).

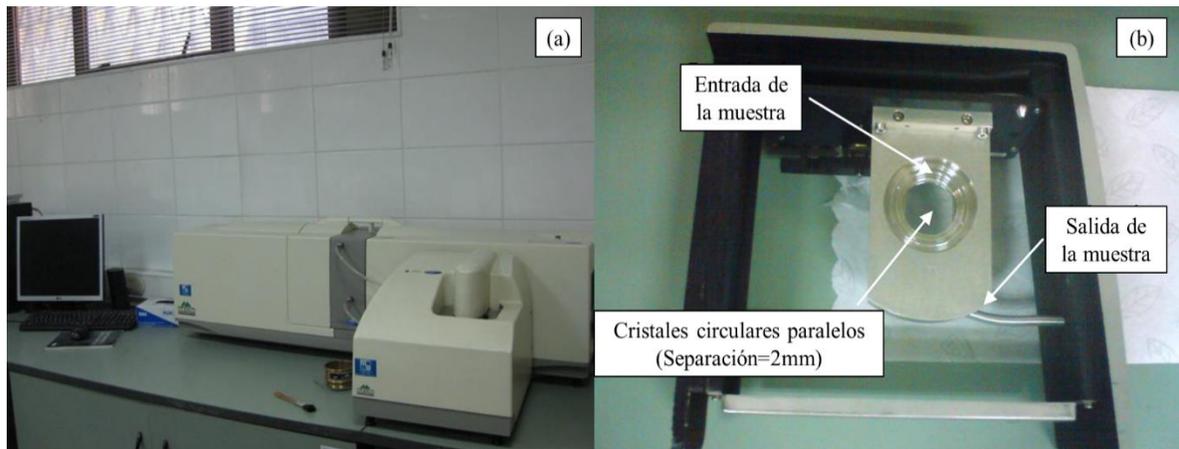


Figura 18. Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Masterzsizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012)

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Procedencia del material

El material es la arena proveniente del muro del tranque de relaves “El Torito”, de la mina de cobre “El Soldado”, ubicada en la comuna de Nogales, V región. Este equivale a la fracción gruesa del material generado de la tronadura, chancado, y molienda de las rocas con minerales de cobre.

### 3.2.2. Clasificación geotécnica del suelo

La arena de relaves clasifica como una arena fina bien graduada de color gris con partículas angulosas y sub angulosas. El análisis granulométrico indica que es una arena limosa (SM), mal graduada, con un 19% de finos no plásticos, un tamaño medio de partículas ( $D_{50}$ ) de 0.149 mm, un coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) de 5.710, un coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) de 1.360. Además, la arena posee un índice de vacío máximo de 1.010, un índice de vacío mínimo de 0,510 y una gravedad específica ( $G_s$ ) de 2.81. La Figura 19 muestra la curva granulométrica del material y la Figura 20 muestra la microscopia óptica de partículas en distintas mallas de tamizado.

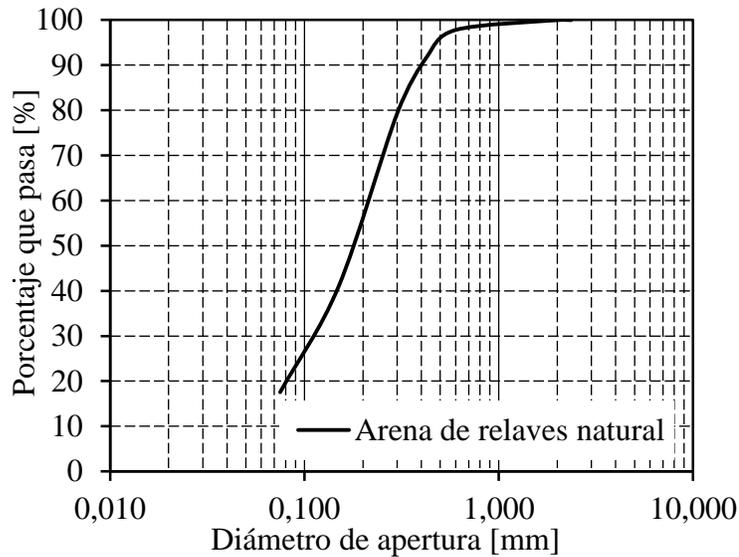


Figura 19. Distribución granulométrica de la arena de relaves extraída del muro

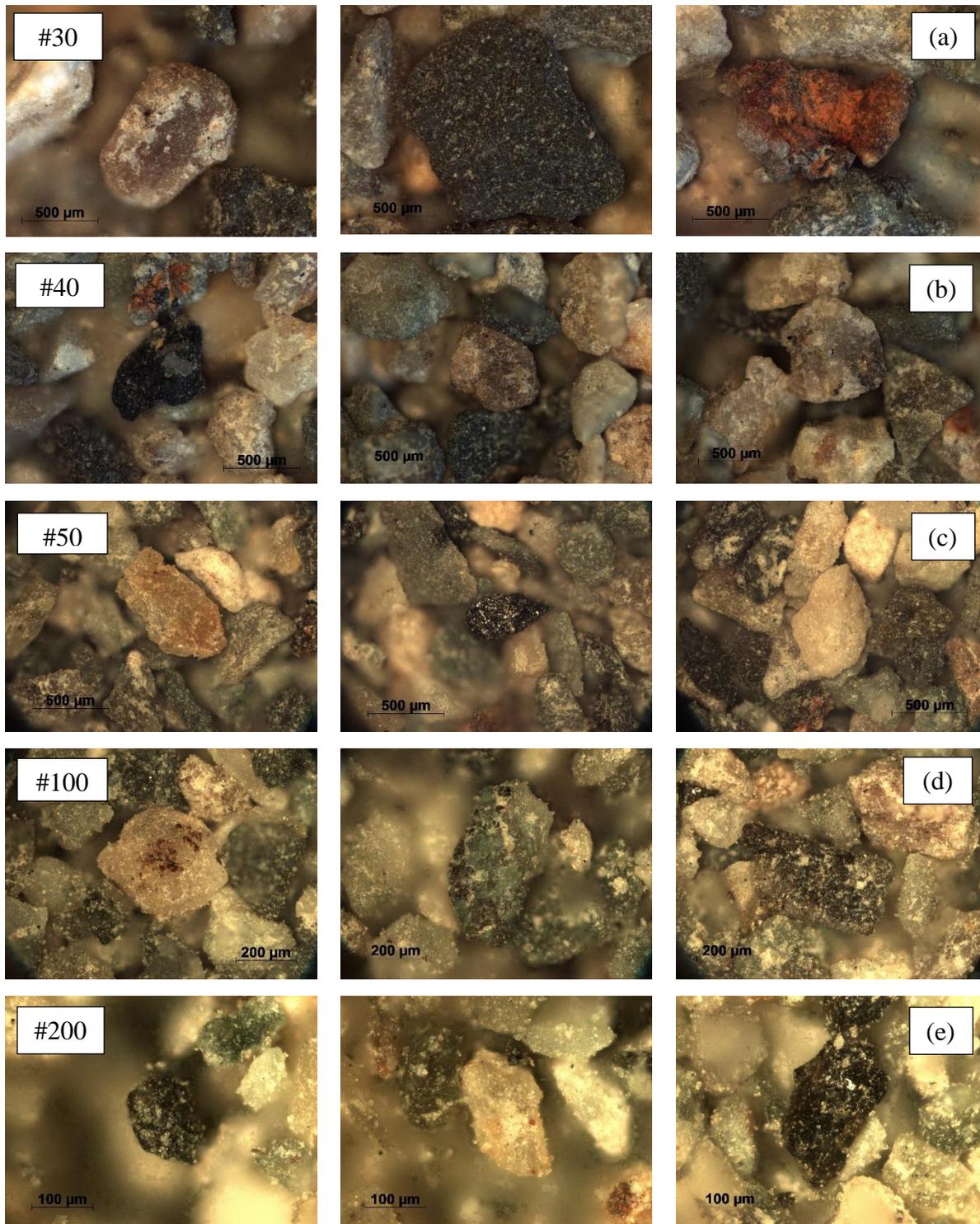


Figura 20. Microscopia óptica de la arena de relaves natural. (a) Fila malla #30. (b) Fila malla #40. (c) Fila malla #50. (d) Fila malla #100. (e) Fila malla #200

Al material extraído desde el muro se le realiza un tamizado por sobre la malla #200 para obtener la fracción fina. Posteriormente, la arena restante se lava para eliminar la mayor cantidad de finos.

Después del lavado se obtuvo una arena con un 1% de finos no plásticos. En la Figura 22 se observa una comparación de las partículas extraídas del muro y las partículas lavadas. Se evidencia que en ambas los finos se encuentran dentro de la porosidad de las partículas, en la que los granos lavados tienen una menor cantidad de finos que los granos provenientes del muro del tranque de relaves.

Con este material lavado, y los finos obtenidos del tamizado, se componen materiales de arenas con 1%, 5%, 10% y 20% de finos no plásticos, como se observa en las granulometrías de la Figura 21. Los resultados obtenidos de las densidades máximas, densidades mínimas, parámetros de las curvas granulométricas y gravedad específica, se resumen en la Tabla 3 (Cordova, 2017).

Tabla 3. Caracterización geotécnica de arenas 1%, 5%, 10% y 20 % de finos (Cordova, 2017)

Parámetros	Contenido de finos (%)			
	1	5	10	20
$D_{50}$ (mm)	0.216	0.215	0.202	0.187
$C_u$	2.525	2.703	3.064	4.982
$C_c$	0.943	1.045	0.998	1.091
$e_{max}$	1.215	1.195	1.189	1.125
$e_{min}$	0.609	0.563	0.559	0.502
$G_s$	2.81	2.81	2.81	2.81

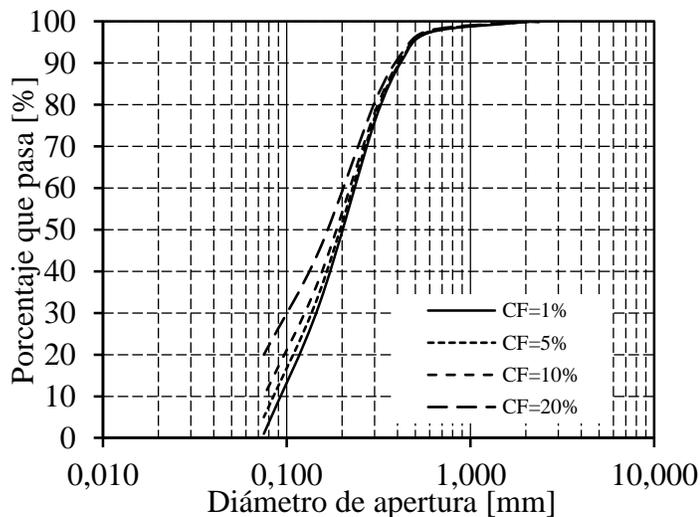


Figura 21. Distribución granulométrica por tamizado de la arena de relaves al 1%, 5%, 10% y 20% del contenido de finos

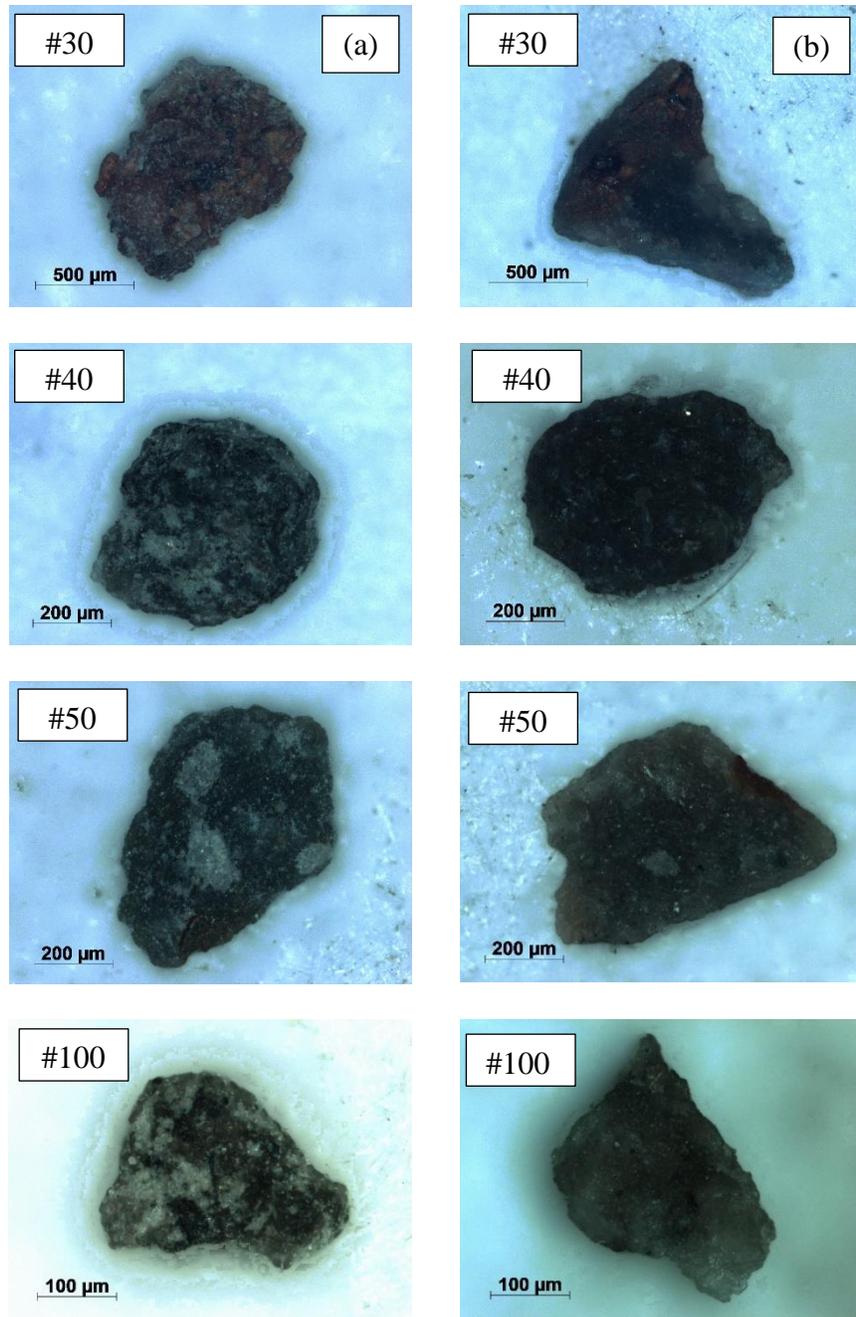


Figura 22. Comparación entre partículas de arena de relaves y partículas lavadas por malla. (a) Columna de arena de relaves natural. (b) Columna de arena de relaves lavada.

### **3.2.3. Clasificación mineralógica de la arena natural de relaves**

La muestra de relave natural presenta un 20% de cuarzo, 15% de feldespato potásico, 20% de material volcánico, y 30% de partículas ígneas. Además, el 5% corresponde a minerales máficos (anfíbolos y piroxenos) con diámetro medios menores a 0.5 mm. También se observan cristales de magnetita de tamaños menores a 0.5 mm de forma angulosa (Vargas, 2015).

## **3.3. Metodología de los Ensayos**

### **3.3.1. Análisis pre ensayo**

De la arena lavada a un 1% del contenido de finos no plástico se llevan a cabo dosificaciones con 5%, 10% y 20% del contenido de finos. En las muestras se realizaron granulometrías por tamices y por difracción laser de porciones de 500gr de cada arena, aproximadamente. Además de análisis de microscopía óptica de la arena de relaves obtenidas del muro y la arena lavada a un 1% del contenido de finos.

### **3.3.2. Preparación de las probetas**

Las probetas se construyen con el método de compactación húmeda, por lo que se mezcla suelo seco con agua destilada. Las muestras se diseñaron con un 5% de humedad para generar cohesión aparente suficiente y así poder modelar los cilindros de arena. Una vez realizada la mezcla, se calcula la densidad relativa deseada a partir de los índices de vacíos máximos y mínimos, la gravedad específica y las dimensiones de la probeta. En el presente trabajo se diseñaron probetas al 65% de la densidad relativa para los distintos contenidos de finos (1, 5, 10 y 20%). Ya generada la mezcla, se procede a la formación de la muestra: se montan los moldes en la base de la cámara del triaxial de bajas presiones con una abrazadera que mantiene unidas las dos piezas del molde. A continuación, se coloca la lámina de acrílico por dentro del molde para que el material no se adhiera a la superficie interna de este. Se ubica el geotextil en la cara inferior del recipiente y se comienza a rellenar con el material, apisonando cada capa con la ayuda de una varilla graduada según el número de capas, que en este caso fueron 10 capas.

Una vez completadas las capas, se desmonta el molde y se coloca una membrana de latex. Este proceso consta de colocar la membrana en un porta-membrana que contiene una válvula con la cual se puede generar vacío. Con lo anterior, la membrana se adhiere a la superficie interna. Luego, se cubre la probeta con la membrana y se elimina el vacío.

Posteriormente, se tienen dos opciones, según el equipo que se desea utilizar. En el caso de realizar un ensayo en el triaxial de bajas presiones, se utiliza la misma base de la celda para continuar con el montaje. Si se desea utilizar la máquina de altas presiones, se requiere trasladar la probeta, con cuidado, hacia el equipo. En ambos casos se debe ajustar la membrana de la probeta tanto al cap superior como al cap inferior (con sus respectivos set de extremos lubricados, Figura 23), asegurando con anillos elásticos la membrana a los caps. La finalidad, de lo anterior, es evitar el ingreso de agua desde la cámara del triaxial hacia la probeta.



Figura 23. Cabezales lubricados

Terminado el montaje, se llena la cámara del triaxial con agua de la llave y se presiona la cámara aproximadamente con  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ . Una vez preparada la cámara del triaxial, se aplica dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$  para desplazar el aire contenido en los vacíos de la probeta. El proceso se lleva a cabo por 30 minutos.

Finalmente, se comienza a saturar la probeta. El procedimiento, consta de pasar 200 ml, de agua destilada y desaireada. Esta cantidad de agua es, en volumen, suficiente para llenar la mayor parte de los vacíos total de la probeta. Terminando el paso de agua, se comienza la “rampla de saturación”, en la que se aplica  $1.2 \text{ kg/cm}^2$  de presión de cámara, con las válvulas internas de la probeta cerrada. Luego, se genera una contrapresión de  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , se cierran las válvulas de la probeta y se aumenta la presión de cámara a  $2.2 \text{ kg/cm}^2$  y se acrecienta la contrapresión a  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ . Por último, se cierran las válvulas de la probeta y se aumenta la presión de cámara hasta  $3.0 \text{ kg/cm}^2$  tomando lectura de la respuesta en presión de poros de la muestra.

Con los resultados anteriores, se logra comprobar la saturación de la muestra a partir del parámetro “B” de Skempton, ecuación (10). Esta relación da un indicador de la saturación mecánica en términos de presión. A continuación, se analiza el exceso de presión de poros a partir de una variación de presión de confinamiento, al obtener un 95% la probeta se considera saturada. En caso

contrario, es posible aumentar la presión de cámara y la contrapresión y volver a evaluar el parámetro

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3 \quad (10)$$

Donde;

$\Delta u$  : Exceso de presión de poros

$\Delta \sigma_3$  : Incremento de la presión de cámara

### **3.3.3. Consolidación isotrópica**

Terminado el montaje experimental, comienza la consolidación isótropa, aplicando un estado tensional igual en todas las direcciones, permitiendo así, el drenaje de agua desde la probeta al exterior. El proceso se realiza aumentando la presión de cámara de 1 kg/cm<sup>2</sup> partiendo de una presión efectiva inicial de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>, esperando disipar las presiones de poros en cada aumento de presión de cámara, para tomar lecturas de variación de volumen y deformación.

### **3.3.4. Desviador de corte**

Una vez que se alcanza isotrópicamente la presión efectiva requerida para el ensayo, se aplica el desviador de corte, generando una deformación axial, a una tasa de 0.13 mm/minuto. El material responde, en términos de esfuerzo, induciéndose un estado tensional anisotrópico. El proceso se realiza hasta llegar a un 20% de deformación axial.

### **3.3.5. Índice de vacíos final del ensayo**

Desde la fabricación de la probeta hasta la etapa de consolidación la muestra inicial varió su densidad relativa, es decir, que el índice de vacíos medido en la etapa de confección de la probeta es diferente al índice de vacío al comienzo del ensayo. Esta variación, dependiendo del equipo que se utilice, se mide con poca precisión. Así, para determinar el índice de vacíos se utilizó el método de Verdugo & Ishihara, quien propuso una metodología post-ensayo para determinar el índice de hueco. La metodología usa las variaciones volumétricas para determinar la densidad de la probeta post-consolidación e conjunto del índice de vacío post ensayo. El método se describe a continuación:

1. Al término del ensayo se cierran las válvulas de la probeta (condición no drenada)
2. Se saca la contrapresión de las líneas de presión, para evitar errores por la expansión o contracción de las mangueras que conectan la probeta con la bureta de medición.
3. Se registra el valor de la bureta de medición como  $V_i$
4. Se abren las válvulas de la probeta
5. Se eleva la presión de confinamiento y se aumenta el desviador de corte ( el aumento de ambas variables debe ser dentro de un rango acotado, puesto que se necesita evitar cualquier pinchamiento de la membrana y cualquier variación considerable de la muestra post ensayo)
6. Estabilizada la presión, se cierran las válvulas de drenaje y se toma la medida del volumen final en la bureta de medición,  $V_f$
7. Se saca la presión de cámara y se desmonta, con cuidado, la muestra de la cámara del triaxial. Todo el material es sacado de la membrana y se deposita en un recipiente con peso conocido. Se mide el peso del material húmedo,  $W_w$ .
8. Se lleva al horno la muestra.
9. Cuando el material haya evaporado todo su contenido de agua. Se pesa nuevamente, obteniendo  $W_d$ .
10. Finalmente, el índice de vacíos queda definido por la ecuación (11).

$$e_{post\ ensayo} = [(V_f - V_i)\gamma_w + (W_w - W_d)] G_s / W_d \quad (11)$$

### 3.3.6. Análisis post ensayo

Tras realizar el método del índice de vacío post ensayo, las muestras consolidadas desde 1.5MPa hasta 5MPa de confinamiento fueron llevados al laboratorio de sedimentología del departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se realizaron granulometrías por difracción laser. Con la información obtenida pre y post ensayo, se analizó la rotura de partículas de las muestras.

### 3.4. Programa experimental

El programa fue diseñado para abarcar un amplio rango de presiones de confinamiento para cada uno de los contenidos de finos. Se estudia el comportamiento en bajas presiones de confinamiento (menores a  $7 \text{ kg/cm}^2$ ), así como en altas presiones (sobre  $15 \text{ kg/cm}^2$ ). En este contexto, se ideó un plan experimental de 28 ensayos triaxiales drenados a una densidad relativa del 65 %, con respecto a cada índice de vacío máximo e índice vacío mínimo para cada dosificación de finos

Dada la gran cantidad de ensayos, se presenta un código para identificar cada resultado en el desarrollo del trabajo, los cuales se explicitan en la Tabla 4, donde se muestra el resumen de los ensayos.

CIYYCFZZ

Donde;

CI: Consolidación Isotrópica de la muestra

CF: Contenido de finos de la muestra

Tabla 4. Programa experimental

ID	Tipo de ensayo	DR confección	Confinamiento	Contenido de finos
(-)	(-)	(%)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(%)
CI2CF1	Triaxial drenado a bajas presiones	65	2	1
CI2CF5		65	2	5
CI2CF10		65	2	10
CI2CF20		65	2	20
CI4CF1		65	4	1
CI4CF5		65	4	5
CI4CF10		65	4	10
CI4CF20		65	4	20
CI7CF1		65	7	1
CI7CF5		65	7	5
CI7CF10		65	7	10
CI7CF20		65	7	20
CI15CF1		Triaxial drenado a altas presiones	65	15
CI15CF5	65		15	5
CI15CF10	65		15	10
CI15CF20	65		15	20
CI20CF1	Granulometrías por tamizado	65	20	1
CI20CF5		65	20	5
CI20CF10		65	20	10
CI20CF20		65	20	20
CI35CF1		65	35	1
CI35CF5		65	35	5
CI35CF10		65	35	10
CI35CF20		65	35	20
CI50CF1	Granulometrías por difracción	65	50	1
CI50CF5		65	50	5
CI50CF10		65	50	10
CI50CF20		65	50	20

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Resultados experimentales

El proceso experimental consiste en ensayos triaxiales drenados desarrollados en dos equipos: uno de ellos llega a presiones de confinamiento máxima de 0.7MPa. El otro, de altas presiones, no supera los 5MPa. En ambos se analizarán dos etapas experimentales, a saber: consolidación isótropa, y corte. Estos ensayos se complementan con otros de índices de vacíos máximos, índices de vacíos mínimos, granulometrías por difracción laser y granulometrías por tamizado.

El análisis de los resultados triaxiales considera el comportamiento de la arena de relaves utilizando la definición de presión media efectiva como la media aritmética del tensor principal, ecuación (12). Por otra parte, se define el desviador de corte medio como la diferencia entre el estado tensional mayor y menor dividido en dos, ecuación (13)

$$p' = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (12)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (13)$$

En las ecuaciones 12 y 13, se tiene que:

- $p'$  : Presión media efectiva
- $q$  : Desviador medio de corte
- $\sigma_1$  : Esfuerzo mayor
- $\sigma_2$  : Esfuerzo medio
- $\sigma_3$  : Esfuerzo menor

#### 4.1.1. Variación del índice de vacíos según el contenido de finos

La variación del contenido de finos en un material granular genera un cambio en los índices de vacíos máximos y mínimos. Existen numerosos estudios acerca de los cambios de índices de vacíos en arenas naturales (Thevanayagam, 1998). El presente trabajo se enfoca las variaciones de estos parámetros en las arenas de relaves.

El programa experimental consta de ensayos de densidad máxima por medio del método japonés (JSSMFE), y depositación lenta del material seco (ASTM D 4254-00). Esta parte del estudio se concentró en evaluar los índices de vacíos máximos y mínimos para un amplio espectro de contenidos de finos, que van desde 1% hasta el 100%. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 24.

De los resultados se observa una disminución de los índices de vacíos máximos y mínimos hasta un determinado contenido de finos. El menor índice de vacío mínimo se presenta en el punto más bajo alrededor del 60% del contenido de finos. En cambio, el menor de los índices de vacío máximo se encuentra en torno al 30% y 60% del contenido de finos. A continuación, hay un aumento del índice de vacío para ambos estados al aumentar la dosificación de finos. La tasa de índice de vacío crece más rápido para estados más sueltos.

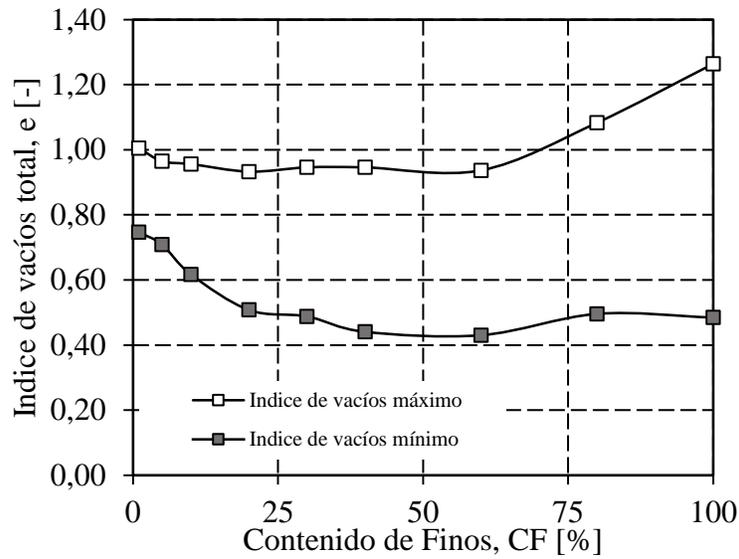


Figura 24. Índice de vacíos máximos e índice de vacío mínimo según el contenido de finos.

#### 4.1.2. Consolidación isótropa

En la Figura 25 se muestran las consolidaciones isótropas hasta 5 MPa de la arena de relave lavada con las diferentes dosificaciones de finos en escala lineal (a) y escala logarítmica (b). En ambas se observa que no existe una gran diferencia en las pendientes de las muestra para cada contenido de finos. A diferencia de un material en estado suelto, el cual posee una caída abrupta en el índice de vacíos a medida que aumenta la presión de confinamiento (Cordova, 2017).

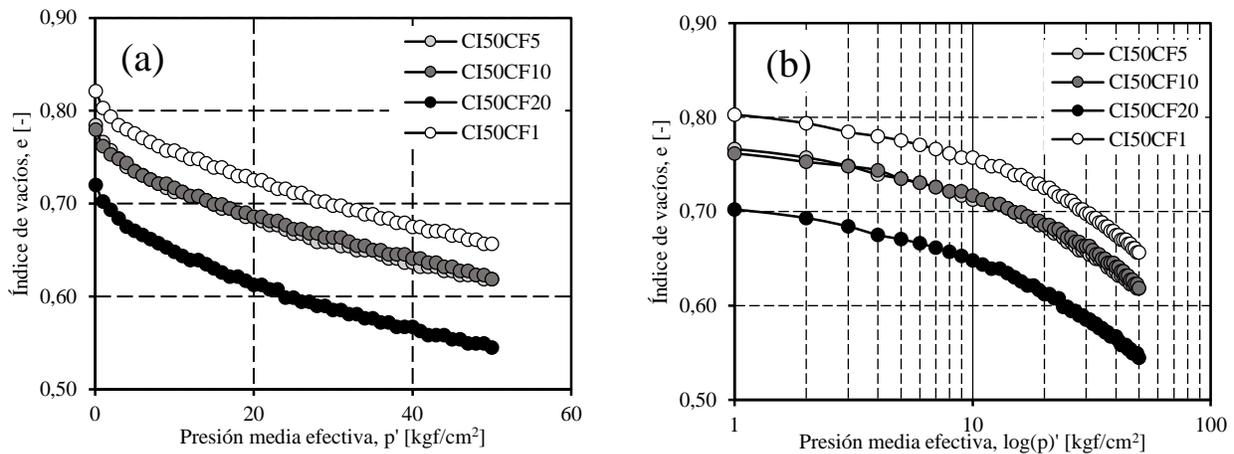


Figura 25. Consolidación isotrópica al 65% de la densidad relativa. (a) Escala lineal. (b) Escala logarítmica

Las diferencias en los índices de vacíos al inicio de las consolidaciones no permiten comparar el grado de compresibilidad para cada contenido de finos. En la Figura 26 se muestra el índice de vacío normalizado por el índice de vacíos inicial para cada porcentaje de finos. En ella, se observa que todas las curvas tienen una pendiente similar, excepto la curva de 20% de contenido de finos, en donde se presenta mayor compresibilidad.

Otra manera de analizar la contractividad en consolidación isotrópica es por medio del módulo de compresibilidad. Este parámetro evalúa las pendientes entre variaciones del índice de vacío producto del aumento de la presión de confinamiento, normalizado por el volumen inicial. Se determina con la ecuación (14)

$$m_v = (\Delta e / \Delta p') * (1 / (1 + e_o)) \tag{14}$$

De los resultados observados en la Figura 26b no se aprecian diferencias en la rigidización volumétrica a medida que aumenta la presión de confinamiento.

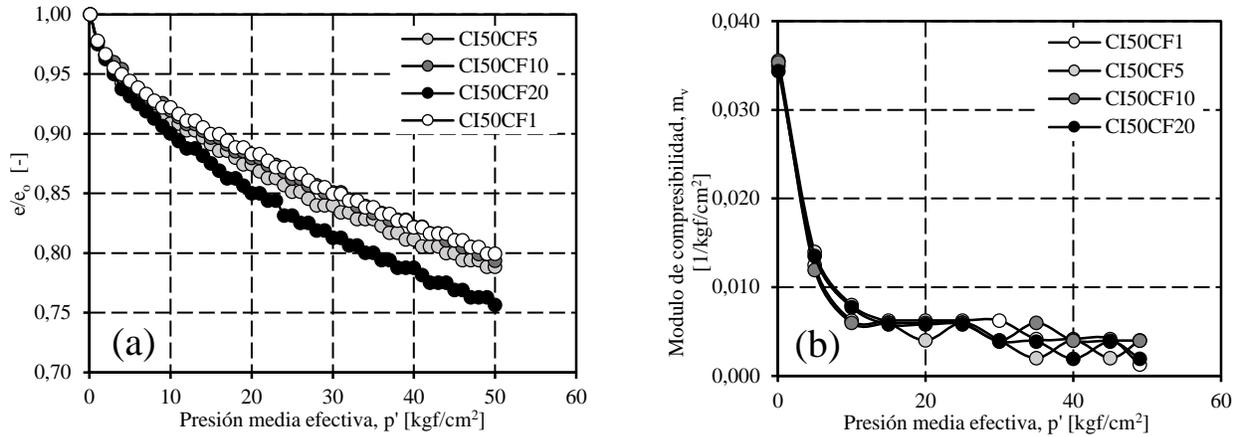


Figura 26. Compresibilidad de las arenas de relave. (a) índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial. (b) Modulo de compresibilidad

#### 4.1.3. Comportamiento monótono drenado

La caracterización del comportamiento monótono drenado en un amplio rango de presiones (0.2 MPa a 5 MPa) se realiza a través de ensayos triaxiales en muestras con contenidos de finos que varían entre 1% y 20%. El corte se aplica a partir de un nivel de confinamiento isótropo.

En la Figura 27 se presentan las curvas de tensión-deformación axial para los diferentes contenidos de finos y presiones de confinamiento. Se observa un crecimiento en la resistencia a una tasa constante de deformación axial para todo el rango de presiones y las diferentes dosificaciones de finos.

El aumento del confinamiento desarrolla curvas con mayor crecimiento en el desviador de corte, en el tramo inicial. Luego, la gran mayoría de las curvas tienden a estabilizarse hasta un plateau de resistencia desde el 15% de deformación axial. En los ensayos de 5 MPa, no es posible observar la estabilización en resistencia.

En los ensayos de 0.2 MPa y 0.4 MPa, se evidencia un peak característico del comportamiento dilatante. Se puede observar que, a grandes deformaciones, (desde 13% de deformación, aproximado) las curvas se estabilizan hasta un plateau de resistencia, al 20% de deformación axial.

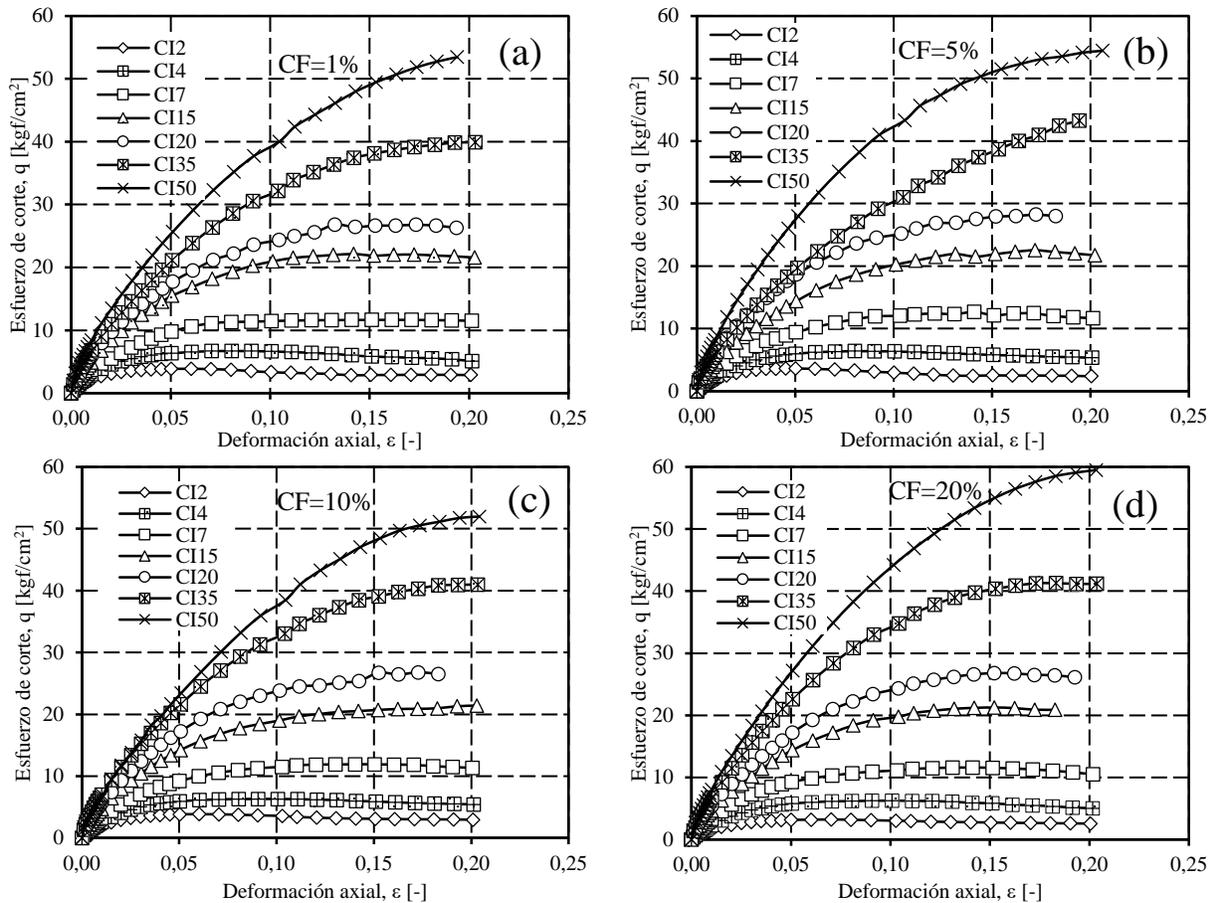


Figura 27. Tensión deformación en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino

Del desarrollo de las curvas tensión - deformación se puede obtener la rigidez asociada al “rango lineal”. Se utiliza el módulo secante asociada a la mitad del nivel de tensiones de la resistencia máxima, denominado como  $E_{50}$ . En la Figura 28 se aprecian las variaciones de los módulos a diferentes confinamientos en cada uno de los contenidos de finos.

No es posible observar una diferencia considerable en los módulos de deformación para cada contenido de fino. A pesar de la semejanza del rango que se encuentran los módulos de deformación, existe una diferencia entre las muestras con bajo contenido de finos (1%) y las muestras con mayor dosificación de finos (20%). Se observa que hay una rigidización menor en los ensayos al 20 % del contenido de finos.

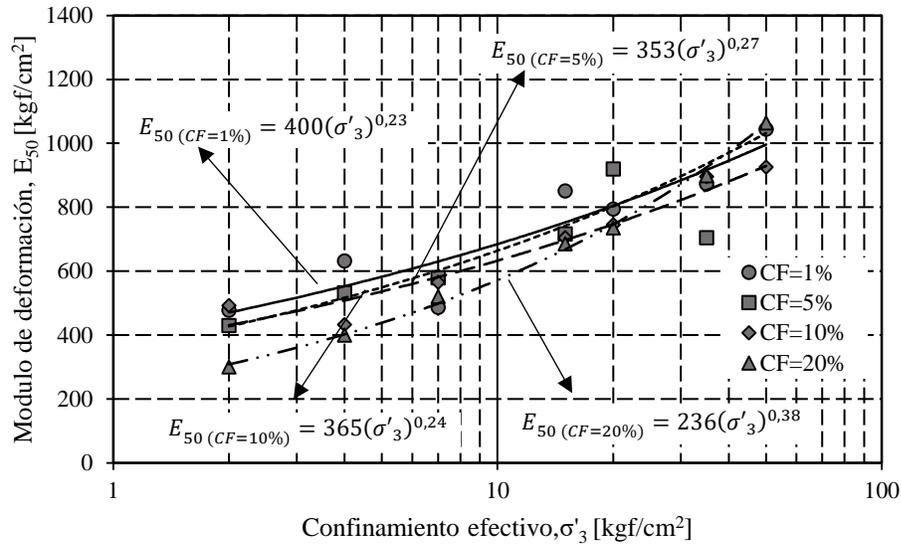


Figura 28. Módulo de deformación secante al 50% del desviador de corte medio para distintas presiones de confinamiento y contenidos de finos.

Relacionando los resultados observados con el criterio de falla de Mohr Coulomb, es posible analizar la evolución del ángulo de fricción interna que, en otras palabras, evidencia la relación que existe entre la presión media efectiva y el desviador de corte. En la Figura 29 se aprecia que a bajos niveles de deformación axial hay un menor incremento en el ángulo de fricción interna, a medida que crece la presión de confinamiento.

En deformaciones cercanas al 20% hay una concentración del ángulo de fricción interna entre  $33^\circ$  y  $36^\circ$  para los ensayos a bajas presiones de confinamiento, excepto en las muestras de 0.7MPa que presentan un ángulo residual cercano a los  $38^\circ$ .

En presiones de confinamiento por sobre 2 MPa se observa un decaimiento del ángulo de fricción movilizado a valores que fluctúan entre  $30^\circ$  y  $33^\circ$ .

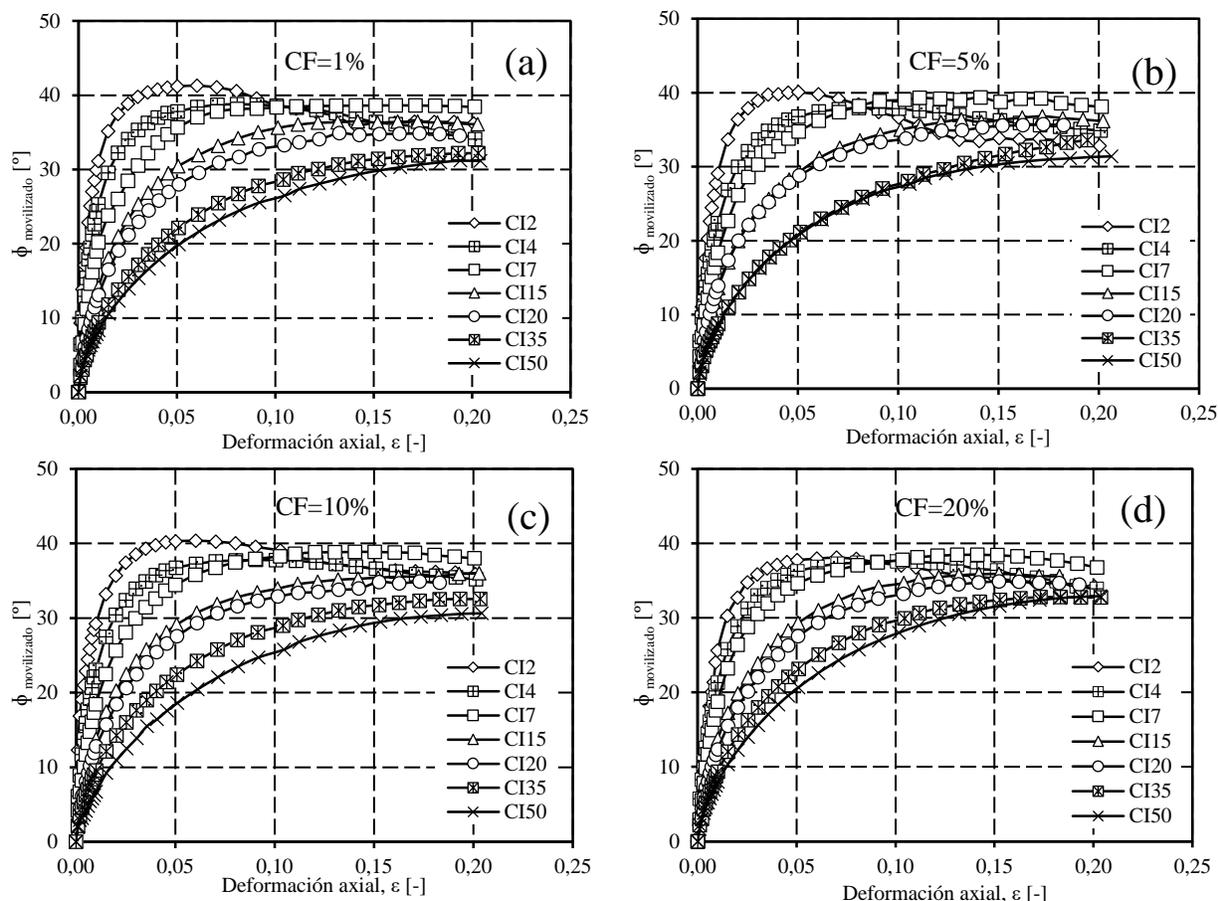


Figura 29. Angulo de fricción movilizado en triaxial en compresión. (a) 1% del contenido de finos. (b) 5% del contenido de fino. (c) 10% del contenido de finos. (d) 20% del contenido de finos.

Las deformaciones volumétricas, mostradas en la Figura 30, presentan mayores cambios de volumen; al aumentar la presión de confinamiento para todos los contenidos de finos (crecimiento de la compresibilidad). Además, se evidencia una clara estabilización de la deformación volumétrica para presiones de 0.2, 0.4 y 0.7 MPa. Similar al análisis de esfuerzo desviador y deformación axial, las muestras de 0.2 y 0.4 MPa presentan una leve dilatación desde un 3% de deformación axial aproximado.

Entre los contenidos de finos de 1%, 5% y 10% no se observan grandes diferencias en las curvas, para cada confinamiento en altas presiones de confinamiento. En cambio al 20% de deformación axial existe una disminución de la dilatación en el ensayo de 0.2 MPa. También se observan menores deformaciones volumétricas en los ensayo a 3.5MPa y 5 MPa.

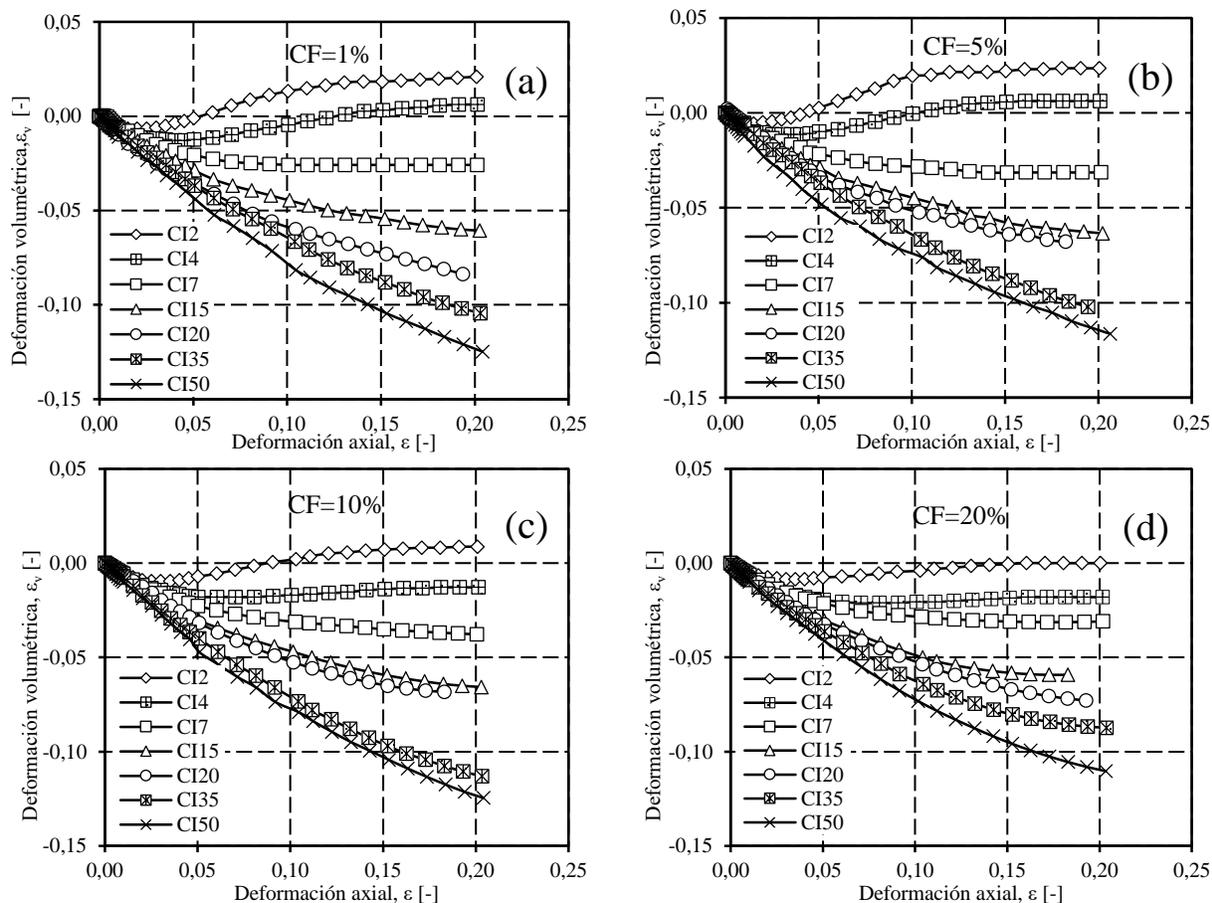


Figura 30. Deformación volumétrica-deformación axial en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

Si se utilizan las variaciones volumétricas, es posible observar cómo cambia el índice de vacío post consolidación en función de la deformación axial. El desarrollo del índice de vacío según la deformación axial se observa en la Figura 31. Se evidencia que, los ensayos se concentran en índices de vacíos post consolidación que van desde los 0,55 a 0,8.

Al igual que los resultados de deformación volumétrica-deformación axial, las muestras que disminuyen su índice de vacíos en todo el rango de deformación axial, muestran un comportamiento contractivo, en cambio los ensayos de 0.2 MPa y 0.4 MPa presentan un aumento del índice de vacíos a un determinado rango de deformación axial, característico del comportamiento dilatante. También se observa la estabilización del índice de vacío para los ensayos bajo 1 MPa.

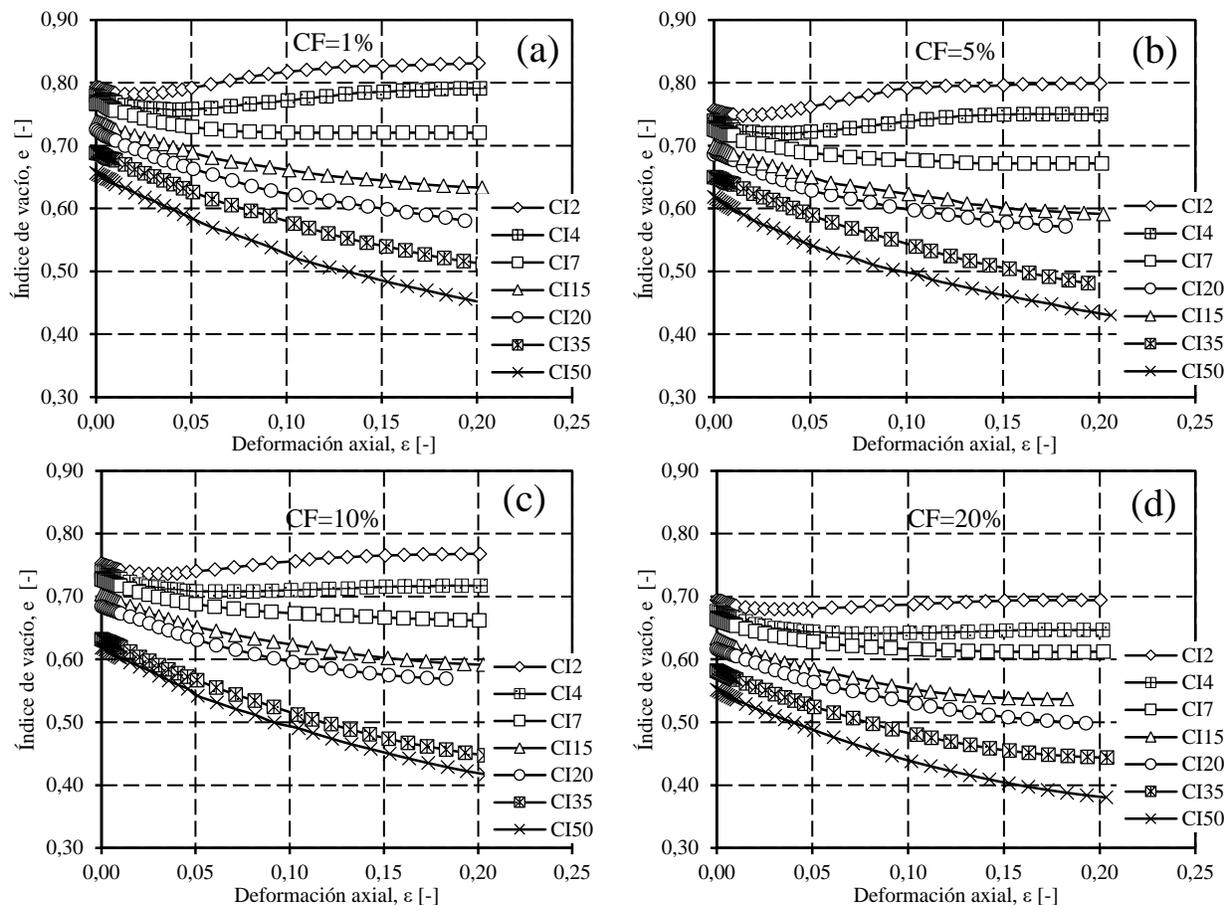


Figura 31. Desarrollo del índice de vacío según la deformación axial en triaxial drenado en compresión. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

De la Figura 32 se presentan las trayectorias de tensiones totales desde el plano p-q. Las curvas describen rectas con pendientes de  $2/3$  sobre las cuales se traza las “líneas de estado último” obtenidas de las regresiones lineales de los valores de p y q generados al 20% de deformación para cada dosificación de fino. Del análisis de las pendientes se obtuvieron los valores de ángulos de fricción interna en el “estado estacionario” resumidos en la Figura 32. En ella, se observa que el ángulo de fricción interna a bajos niveles de confinamiento, representado por la recta de color roja con mayor pendiente, se encuentra dentro de un rango de  $36^\circ$  y  $37^\circ$  para cada contenido de finos.

En confinamientos por sobre 2 MPa se trazó la línea de estado último para cada ensayo en particular. Se aprecia que las líneas de estado último decaen a mayores presiones de confinamiento, lo que se traduce en una disminución del ángulo de fricción interna.

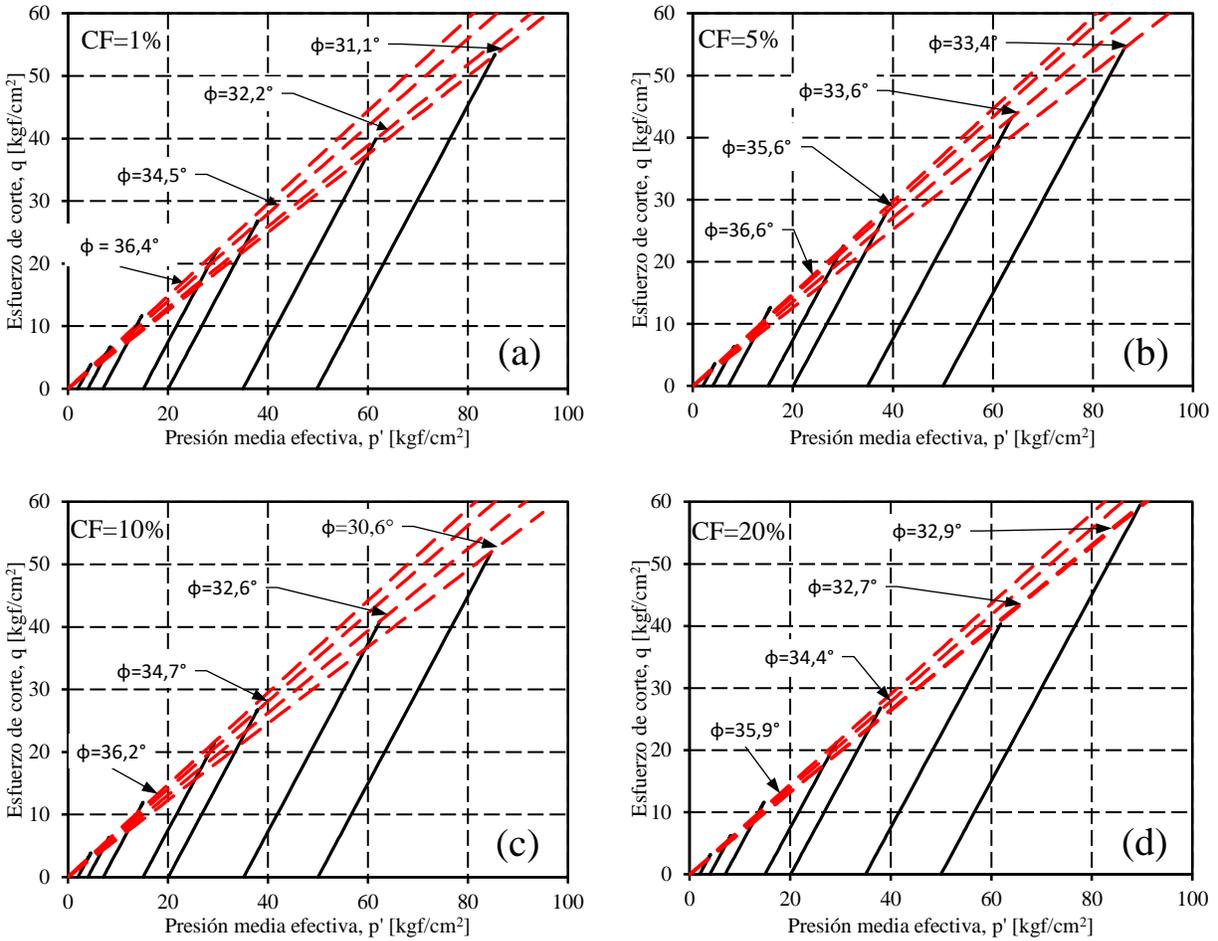


Figura 32. Presión media efectiva- desviador de corte medio. (a) 1% Contenido de fino. (b) 5% Contenido de fino. (c) 10% Contenido de fino. (d) 20% Contenido de fino

En la Figura 33 y Figura se evidencia el desarrollo del índice de vacío según la presión media efectiva para todos los confinamientos y contenidos de fino en escala lineal y logarítmica, respectivamente. Además, se aprecian las curvas de consolidación isótropa del estado más denso y más suelto obtenido por Cordova (2017).

Las curvas disminuyen su índice de vacío inicial producto del proceso de consolidación. En los ensayos dilatantes, se observa que las curvas caen (contraen hasta cierta presión media efectiva) y a una determinada presión media comienzan aumentar su índice de vacío. Contrariamente, los ensayos a mayores confinamientos presentan un constante decaimiento en su índice de vacío.

Si se junta cada grupo de ensayos con diferente contenido de fino, es posible definir una "líneas de estado último" en el plano  $e-p'$  para cada dosificación (curvas rojas, Figura 33 y Figura ). Además, se evidencia que desde los ensayos de 2 MPa de confinamiento el arreglo granular se ordena de tal manera que el índice de vacío para ese estado tensional es menor que lo estipulado por el estado más denso obtenido de las consolidaciones isotrópicas.

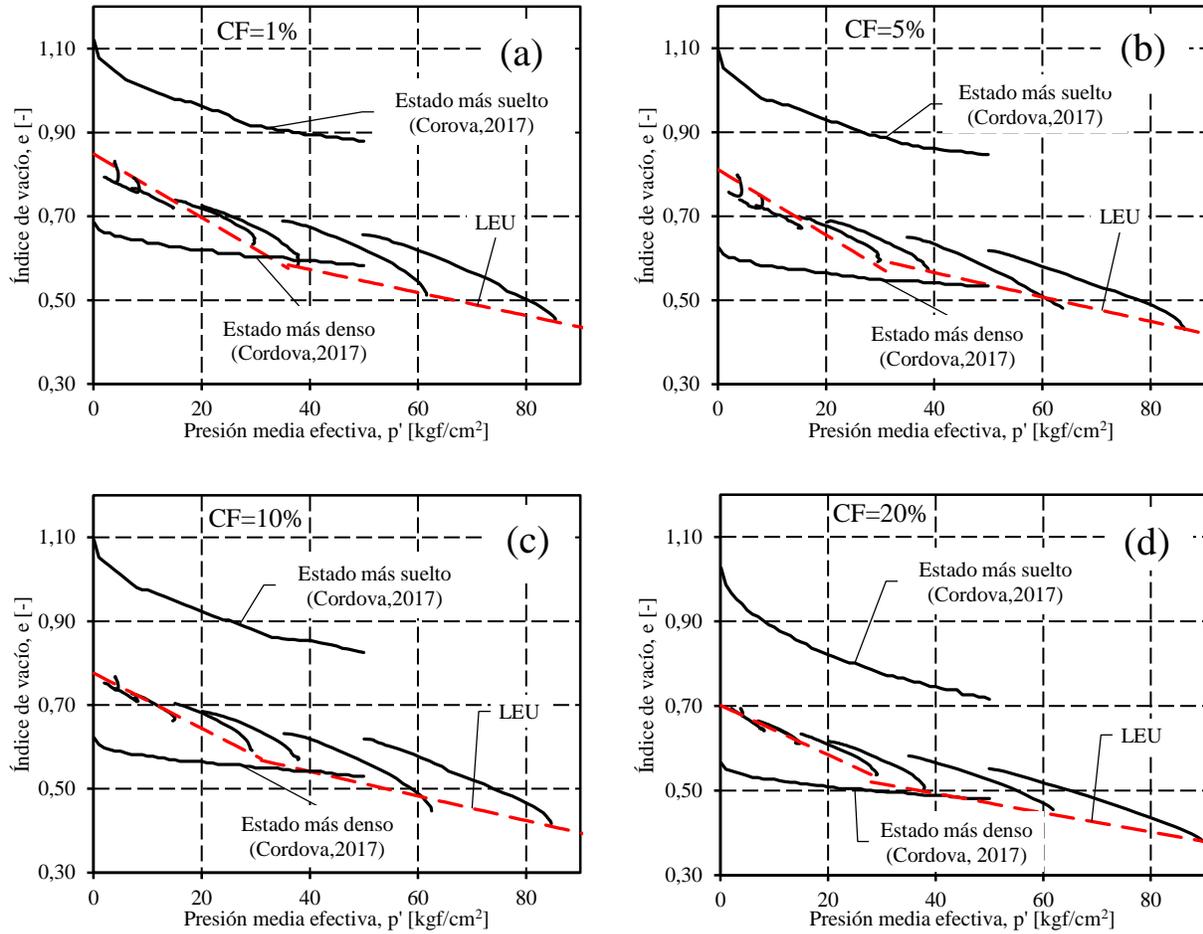


Figura 34. Presión media efectiva- índice de vacío en ensayo triaxial drenado en compresión. Escala lineal. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino

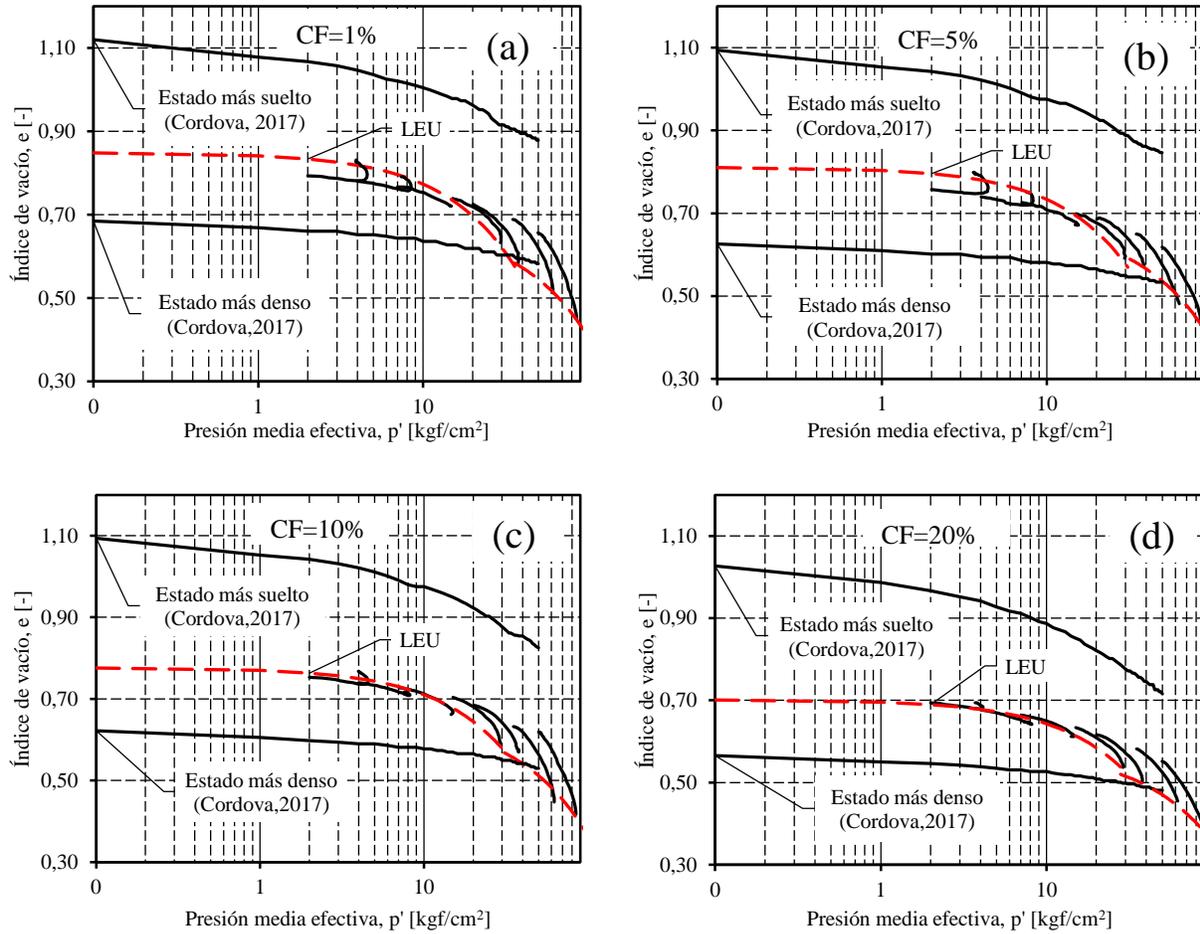


Figura 35. Presión media efectiva- índice de vacío en ensayo triaxial drenado en compresión, escala logarítmica. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino

#### 4.1.4. Rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento

En ensayos a bajas presiones de confinamiento, a densidades relativas densas, es posible que el comportamiento del material presente dilatancia en un determinado nivel de deformación. A nivel de partículas, este comportamiento se da por el reacomodo de las mismas de tal manera que aumenta el índice de vacíos. Este cambio de re-organización de los granos puede generar una fricción inter partícula, provocando un pulido del material. Este programa experimental pretende dejar en evidencia dicha posibilidad.

Para analizar si existe rotura en bajas presiones de confinamiento se realiza un ensayo adicional a los presentados en el programa experimental. Este último, es una muestra al 65% de densidad relativa a un confinamiento de 0.2MPa. Se ensaya hasta un nivel de deformación axial tal, que se evidencie el inicio de la dilatancia. En la Figura 36 se tienen los resultados del ensayo en conjunto con la muestra de las mismas características al 20% de deformación axial. Se observa que ambas curvas siguen la misma tendencia, tanto en corte como en deformación volumétrica

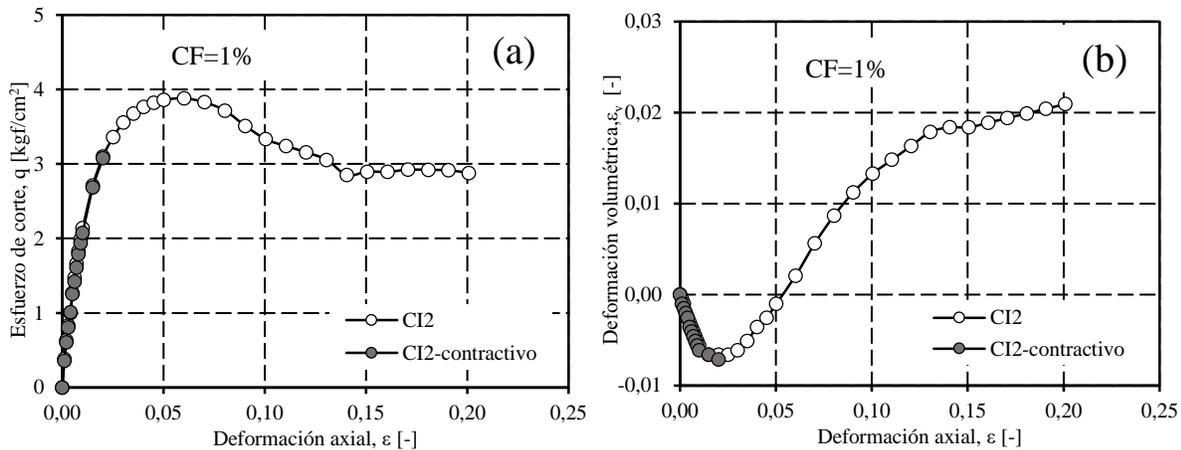


Figura 36. Contractividad en muestras ensayadas a confinamientos efectivos de 2  $\text{kgf/cm}^2$  a un contenido de finos el 1%. (a) Esfuerzo de corte - deformación axial. (b) Deformación volumétrica-deformación axial

El estudio de rotura se llevó a cabo analizando granulometrías pre-ensayo y post-ensayo de ambas muestras para observar posibles variaciones en la curvas. En la Figura 37 se observan las granulometrías obtenidas por difracción laser. En esta figura no se aprecian diferencias en la forma de las curvas, lo que implicaría que no existe dicha rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento.

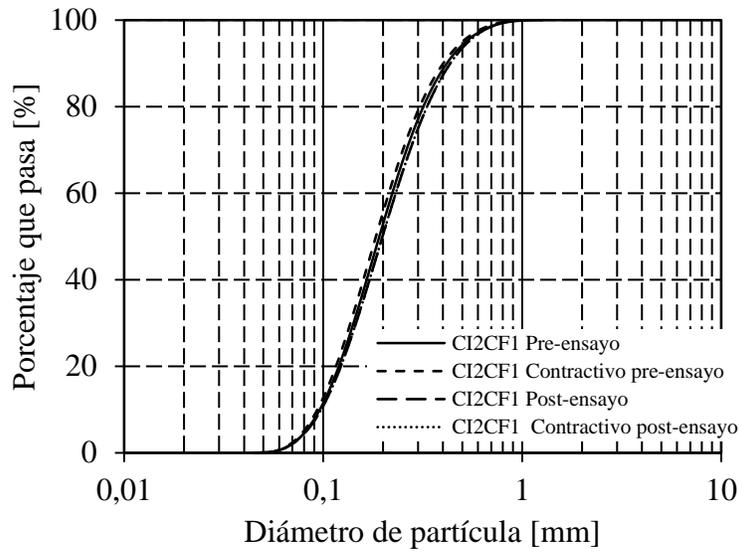


Figura 37. Análisis granulométrico pre-ensayo y post ensayo de muestras a confinamiento de 0.2 MPa para un contenido de finos del 1%.

#### 4.1.5. Rotura de partículas a altas presiones de confinamiento

En las muestras ejecutadas mediante un triaxial monótono drenado por sobre 1.5 MPa se realizan análisis granulométrico por medio de tamices y por difracción laser. Este programa compara las granulometrías pre y post-ensayos para observar variaciones en las curvas con contenidos de finos de 1%, 5%, 10%, y 20% y presiones de confinamiento desde 1.5 MPa a 5 MPa. En la Figura 38 y Figura 39 se presenta el resultado de los ensayos realizado con granulometría por tamices y por granulometrías mediante difracción.

En ambas figuras se muestra que, a mayores presiones de confinamiento, hay mayor variación de la curva post- ensayo con respecto al pre- ensayo. Además, para menores contenidos finos existe mayor variación de las curvas granulométricas en todo el rango de presiones estudiado.

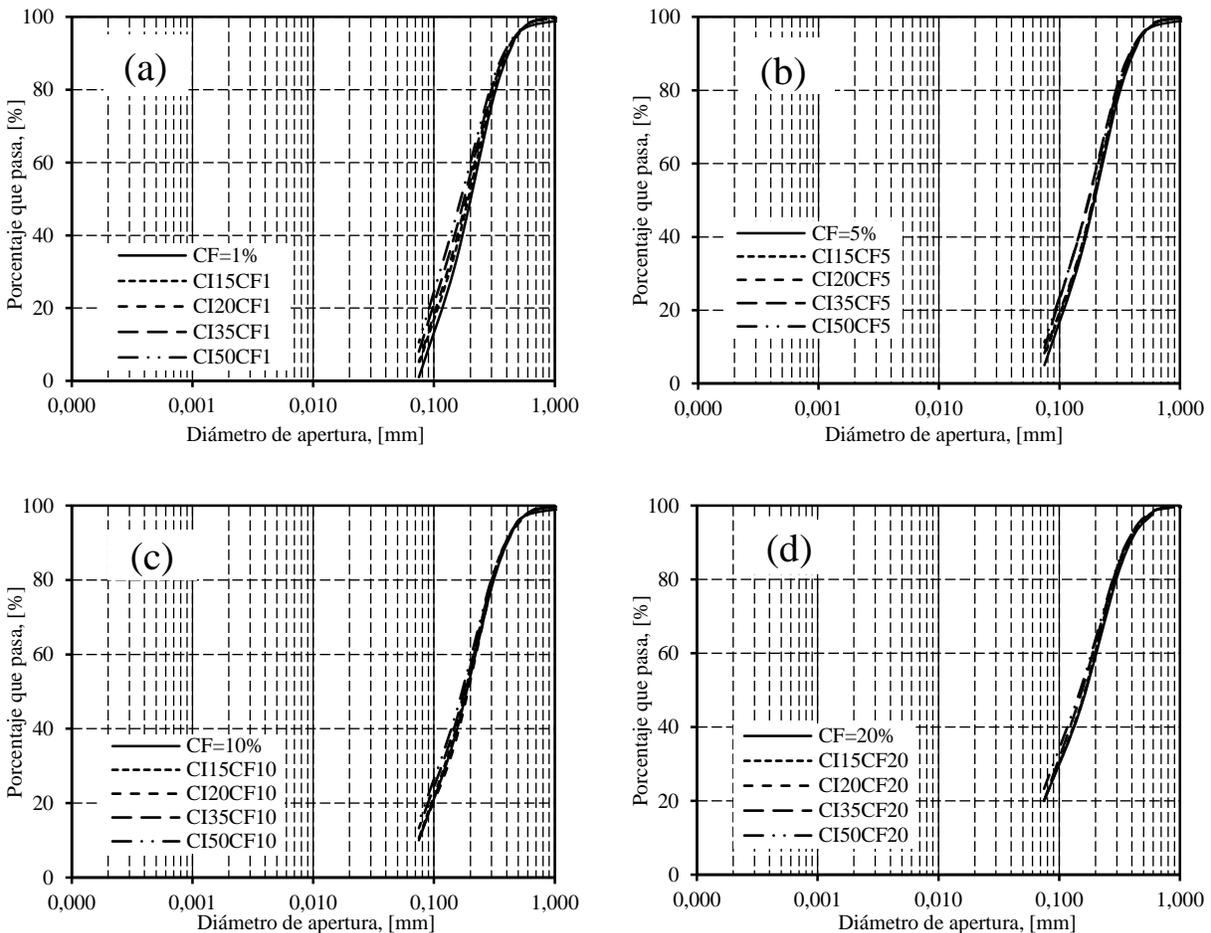


Figura 38. Granulometrías por tamizado pre-ensayo y post-ensayo. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

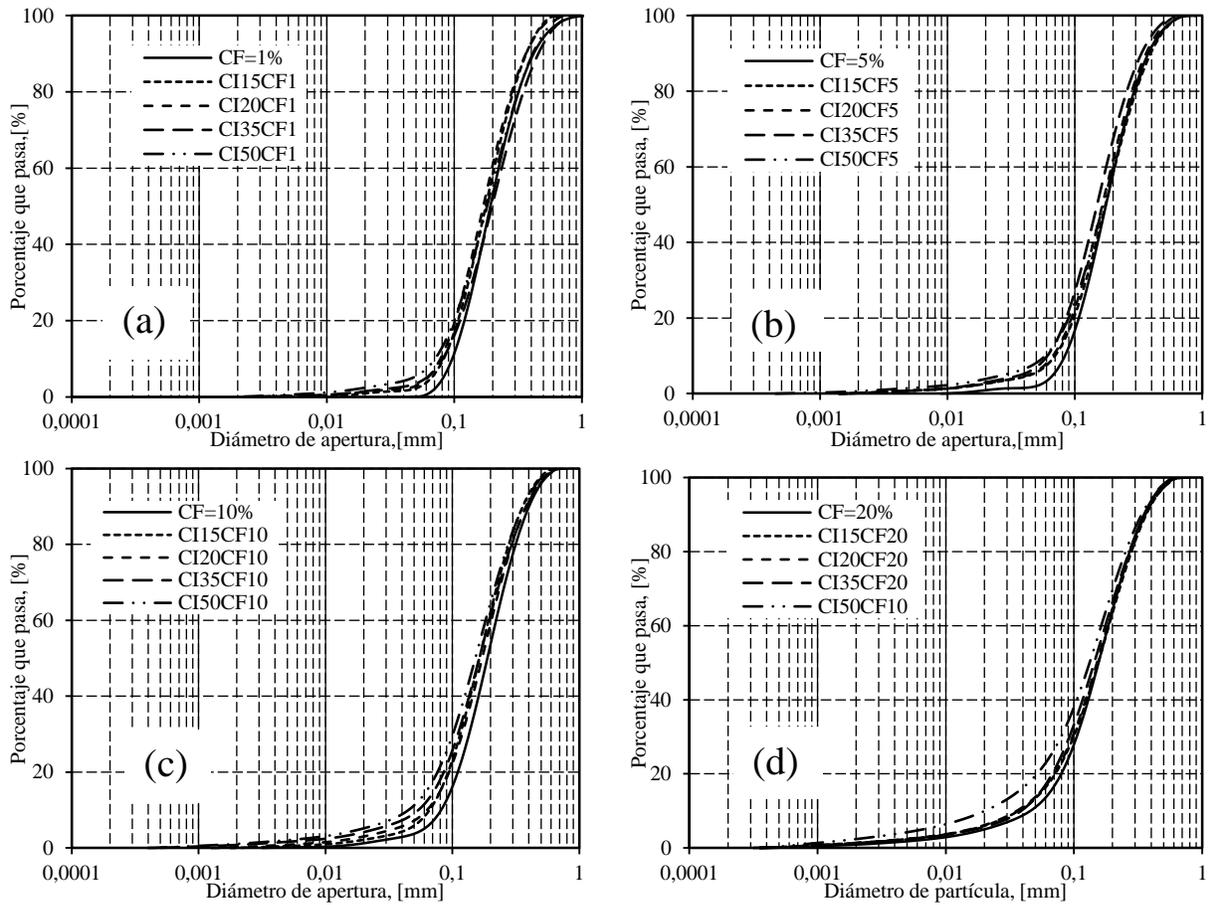


Figura 39. Granulometrías por difracción laser pre y post ensayo. (a) 1% contenido de finos. (b) 5% contenido de finos. (c) 10% Contenido de finos. (d) 20% Contenido de finos.

## **4.2.Discusión**

### **4.2.1. Variación de índices de vacíos según el contenido de finos**

En la Figura 40 se observa que los estados más sueltos presentan una disminución del índice de vacío hasta un 30%- 40% del contenido de finos, luego, existe una tendencia a aumentar el índice de vacíos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Yang et al (2006) en los que, el índice de vacíos máximo, se encuentra en torno a 20% y 30%. A bajos contenidos de finos existe un constante acomodo de la arena en conjunto con el acomodo de los finos en el espacio intergranular. A medida que aumenta el contenido de finos, el índice de vacío máximo crece, puesto que los finos ingresan en los contactos entre las partículas de arenas, induciendo un aumento en el índice de vacío por la “separación” de las partículas. Cordova (2017) realizó este mismo análisis hasta un 50% del contenido de finos, obteniendo una curva con índices de vacíos mayores que los observado en ese estudio, presentando una leve estabilización cercana al 30% del contenido de finos, como se observa en la Figura 43. La diferencia entre la curva de Cordova (2017) y la de este estudio puede ser por la menor energía en la depositación del material en el recipiente. Además de lo anterior, Verdugo et al (1994) realizó ensayos similares en dos arenas de relave, en los que se observa que la arena denominada R1-F1 tiene una tendencia similar a la presentada en este estudio como se ve en la Figura 40.

En estados más densos la curva decrece hasta un 60% del contenido de finos, a continuación, la curva aumenta en índice de vacío al incrementar la dosificación de finos. A diferencia del estado más suelto, el menor índice de vacío en los diferentes contenidos de fino, se obtiene a mayor cantidad de estos. En este último caso, el alto nivel de energía sigue movilizandolos granos a los vacíos del material y los finos continúan acomodándose en el interior del esqueleto formado por la arena gruesa de relave. Lo anterior se explicaría porque las estructuras formadas por las arenas de relave generan mayores índices de vacíos, lo que produce más espacio para movilización de los granos y el acomodo de los finos en el interior de este espacio. Cordova (2017) y Verdugo et al (1994) obtuvieron resultados muy similares a los presentados en este estudio para la misma arena y para la arena R1-F1, respectivamente.

La arena R2-L2 obtenida por Verdugo et al (1994) no presenta similitudes comparada con la arena de Torito. Puede explicarse por posibles diferencias mineralógicas o de forma de partículas, lo que generaría una variación en las estructuras desarrolladas ante diferentes contenidos de finos.

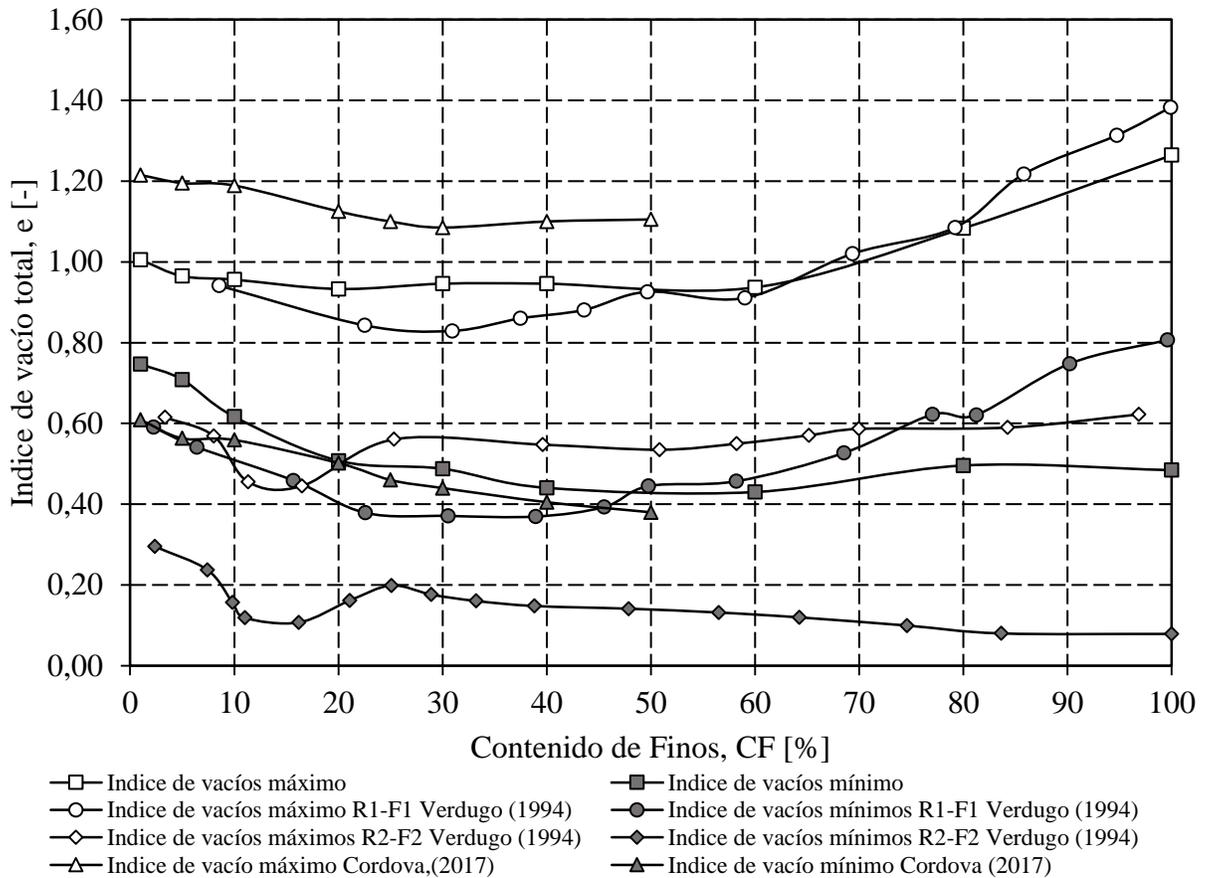


Figura 40. Variación del índice de vacío máximo y mínimo para diferentes arenas de relave.

#### 4.2.2. Consolidación isótropa

Cordova (2017) analizó el mismo material de relaves de este estudio, considerando iguales dosificaciones de finos. En su trabajo observó que no existen variaciones en la compresibilidad en muestras en estado denso, es decir, en probetas con una densidad relativa por sobre, el 65%, aproximadamente.

Se realiza una comparación gráfica de los índices de vacíos normalizado por el índice de vacío inicial para observar similitudes o diferencias en las curvas entre el estudio de Cordova (2017) y el presente trabajo. La Figura 41 muestra el análisis comparativo sobre lo dicho anteriormente.

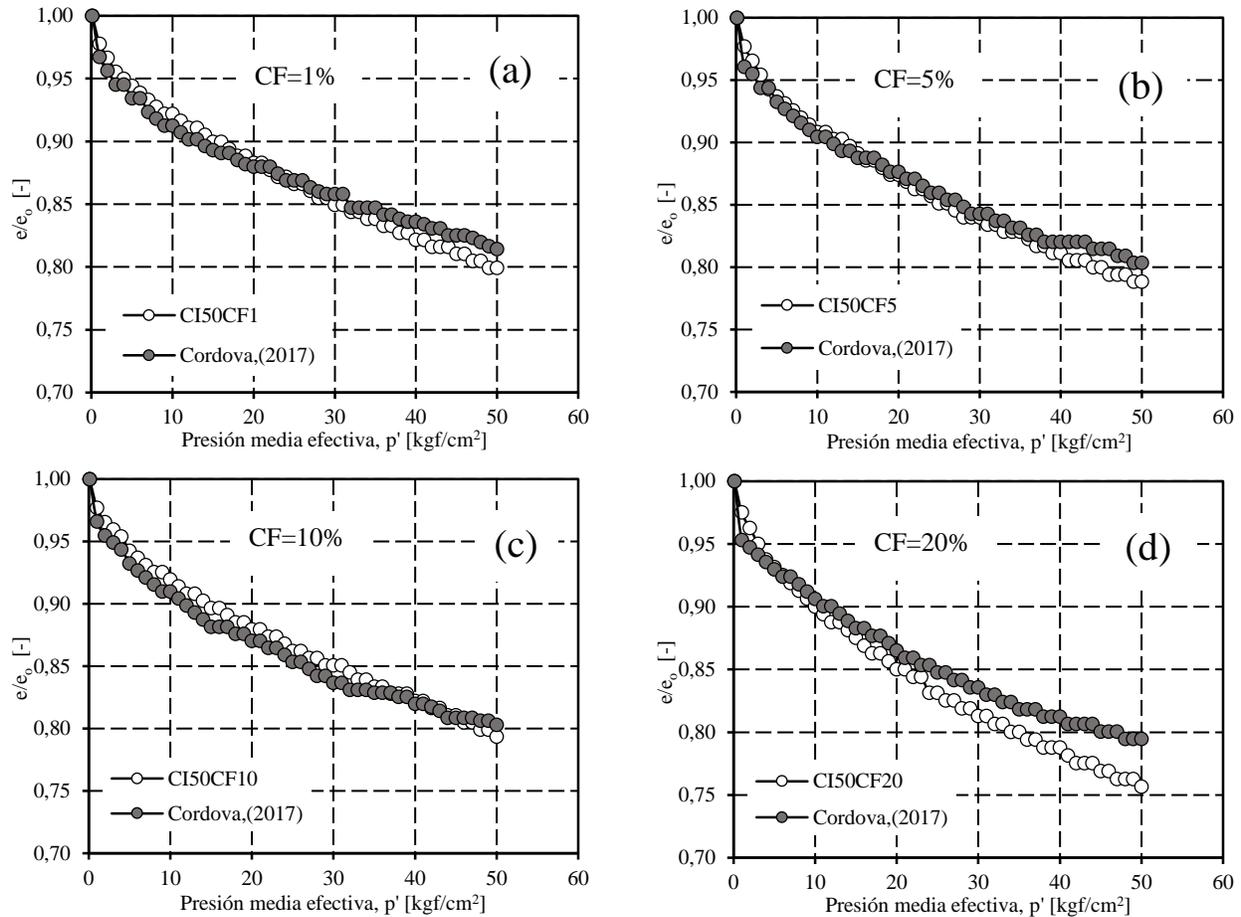


Figura 41. Presión media efectiva-índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en muestras a una densidad relativa de confección del 65%. Comparación con los resultados de Córdova, (2017). (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

Las muestras con contenidos de fino de 1%, 5%, y 10% evidencian una similitud en el desarrollo del índice de vacío hasta presiones de confinamiento de 5 MPa. La única diferencia se presenta al 20% de contenido de fino, donde hay una divergencia a partir de los 2MPa, lo que se traduce en un pequeño aumento en la compresibilidad en comparación de los resultados de Cordova (2017). Con estos resultados, se verifica el modelo de meta estructura para arenas de relaves densas, propuestos por Cordova (2017).

En el estado más denso, las partículas finas ya están acomodadas dentro del esqueleto granular formado por las partículas más gruesas, generando una meta estructura estable, con lo cual no habría un aporte de los finos en el reordenamiento de las partículas y, por consiguiente, no habrían cambios volumétricos, Figura 42

En cambio, en el estado más suelto, las partículas finas tienden a colaborar en la rotación de las partículas gruesas, contribuyendo en la deformación volumétrica, Figura 43.

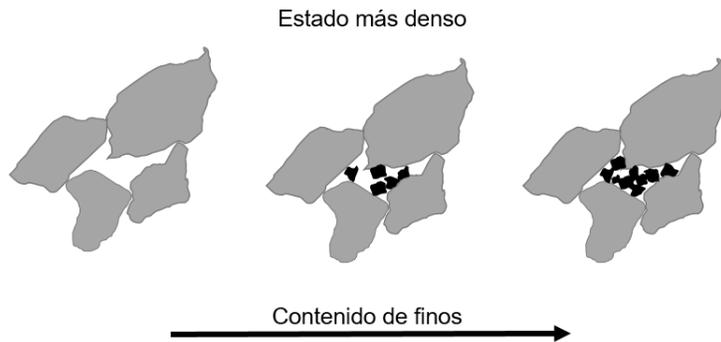


Figura 42. Esquema del mecanismo de ordenamiento de partículas en el estado denso al aumentar el contenido de finos (Córdova, 2017)

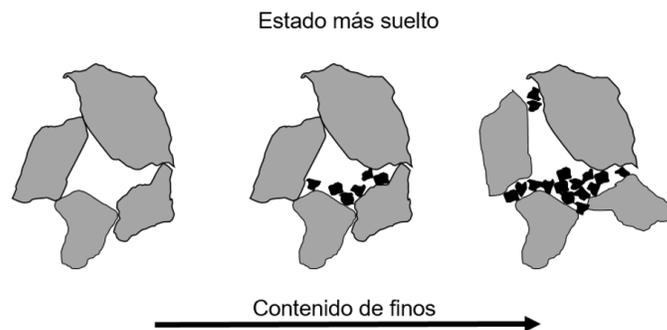


Figura 43. Esquema del mecanismo de ordenamiento de partículas en el estado suelto al aumentar el contenido de finos (Córdova, 2017)

#### 4.2.3. Comportamiento monótono drenado

Luego de la consolidación, se aplica un desviador de corte a las 28 probetas con las dosificaciones de 1%, 5%, 10% y 20% de contenido de finos, y a presiones de confinamiento de 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.7 MPa, 1.5 MPa, 2 MPa, 3.5 MPa y 5 MPa. En esta etapa de los ensayos, hay una estrecha relación entre la resistencia y el volumen desplazado en la medida que se deforma verticalmente la probeta.

En términos de la resistencia, como se describió en la Figura 27, hay un crecimiento en la medida que aumenta la presión de confinamiento. Si se asocia el criterio de falla morh-coulomb a la razón del desviador de corte medio con la presión media efectiva, se puede analizar el ángulo interno en el peak del material. En la Figura 44 se analiza las variaciones de este parámetro según la presión de confinamiento para cada contenido de finos. De los resultados se evidencia que hay una concentración del ángulo secante peak entre  $38^\circ$  y  $41^\circ$ . En altas presiones de confinamiento se

evidencia una disminución del ángulo peak, producto de posible rotura de partículas en estos niveles de tensiones.

En la Figura 45 se separan los resultados de bajas y altas presiones de confinamiento efectivo. Se observa en la Figura 45a que en bajas presiones se tienen ángulos secantes peak mayores a bajos contenidos de finos. A medida que aumenta la presión de confinamiento, estos valores confluyen a un ángulo residual común. En altas presiones de confinamiento, como se aprecia en la Figura 45b se observa que al 1% del contenido de fino se obtienen los ángulos más bajos. Esto puede ocurrir por una posible mayor rotura de partículas en bajos contenidos de finos, puesto que son material con menor graduación en relación a mayores contenidos de finos. Respecto al resto de contenidos de finos no es posible observar una clara tendencia

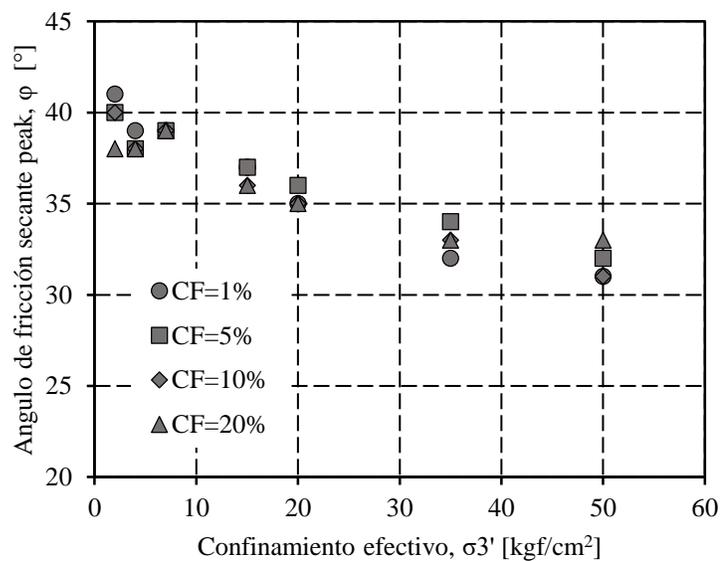


Figura 44. Ángulo de fricción secante peak según la presión de confinamiento efectivo.

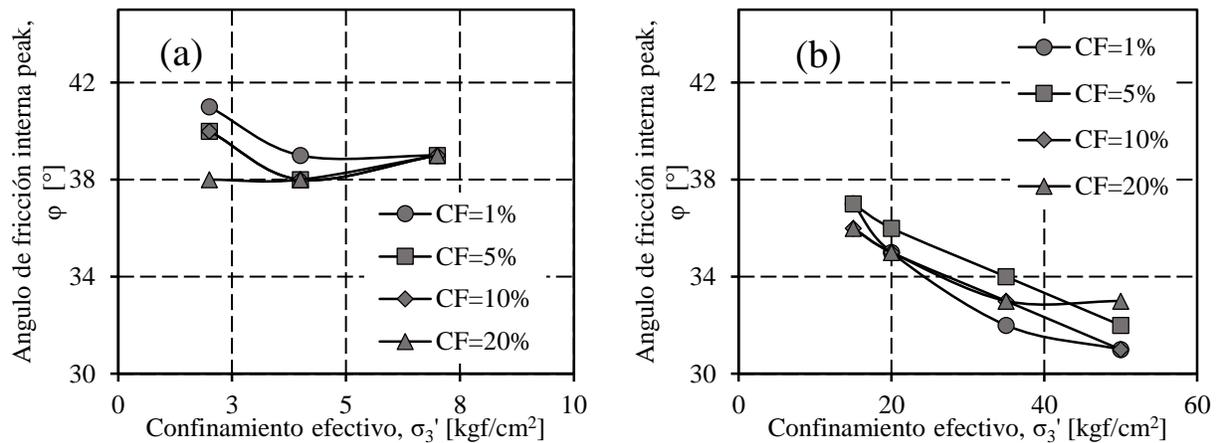


Figura 45. Ángulo de fricción secante peak en altas y bajas presiones de confinamiento efectivo. (a) ángulo secante peak a bajo 0.7 MPa. (b) Ángulo secante peak sobre 0.7 MPa.

Con respecto a las variaciones volumétricas, se tiene que al aumentar el confinamiento, hay un aumento de la contractividad como se evidenció en la Figura 30. Si se toma la presión de confinamiento como variable constante se puede estudiar el efecto del contenido de finos en la deformación volumétrica. En la Figura 46 y Figura 47 se tiene el desarrollo de la deformación volumétrica para deformaciones axiales de 0%, 5%, 10% y 18% para cada contenido de finos y a presión de confinamiento constante.

En ellas se observa que a bajas presiones de confinamiento el contenido de finos juega un rol importante en la deformación volumétrica, aumentando a mayores dosificaciones de finos. A altas presiones de confinamiento los finos no contribuyen al aumento de la contractividad, es decir, que no afectan las deformaciones. Lo anterior implica que a bajas presiones de confinamiento los finos ayudan al deslizamiento y rotación de los granos gruesos de arena, en cambio, a altas presiones de confinamiento, los finos forman una meta estructura estable con el material más grueso.

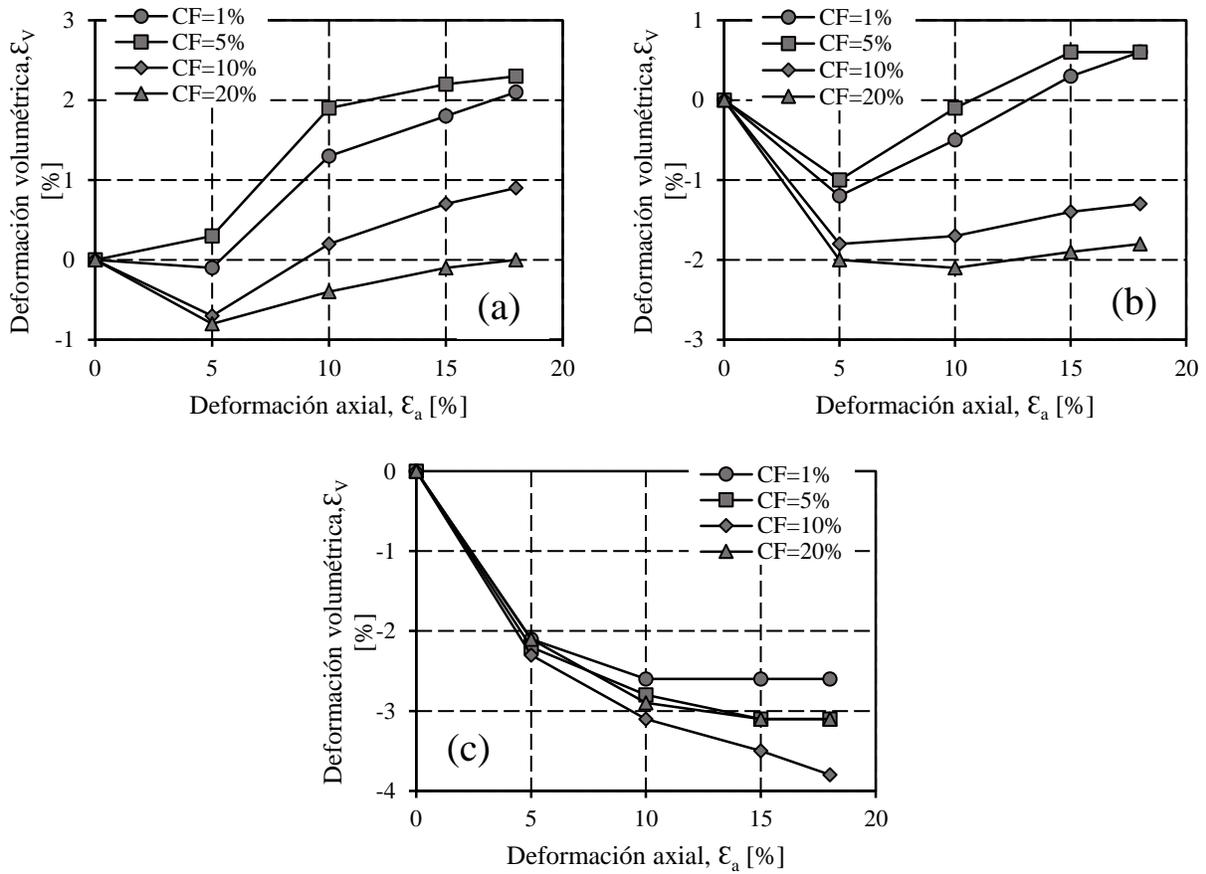


Figura 46. Deformación volumétrica según el contenido de finos para cada presión de confinamiento. (a) Deformación volumétrica a 0.2 MPa. (b) Deformación volumétrica a 0.4 MPa. (c) Deformación volumétrica a 0.7 MPa

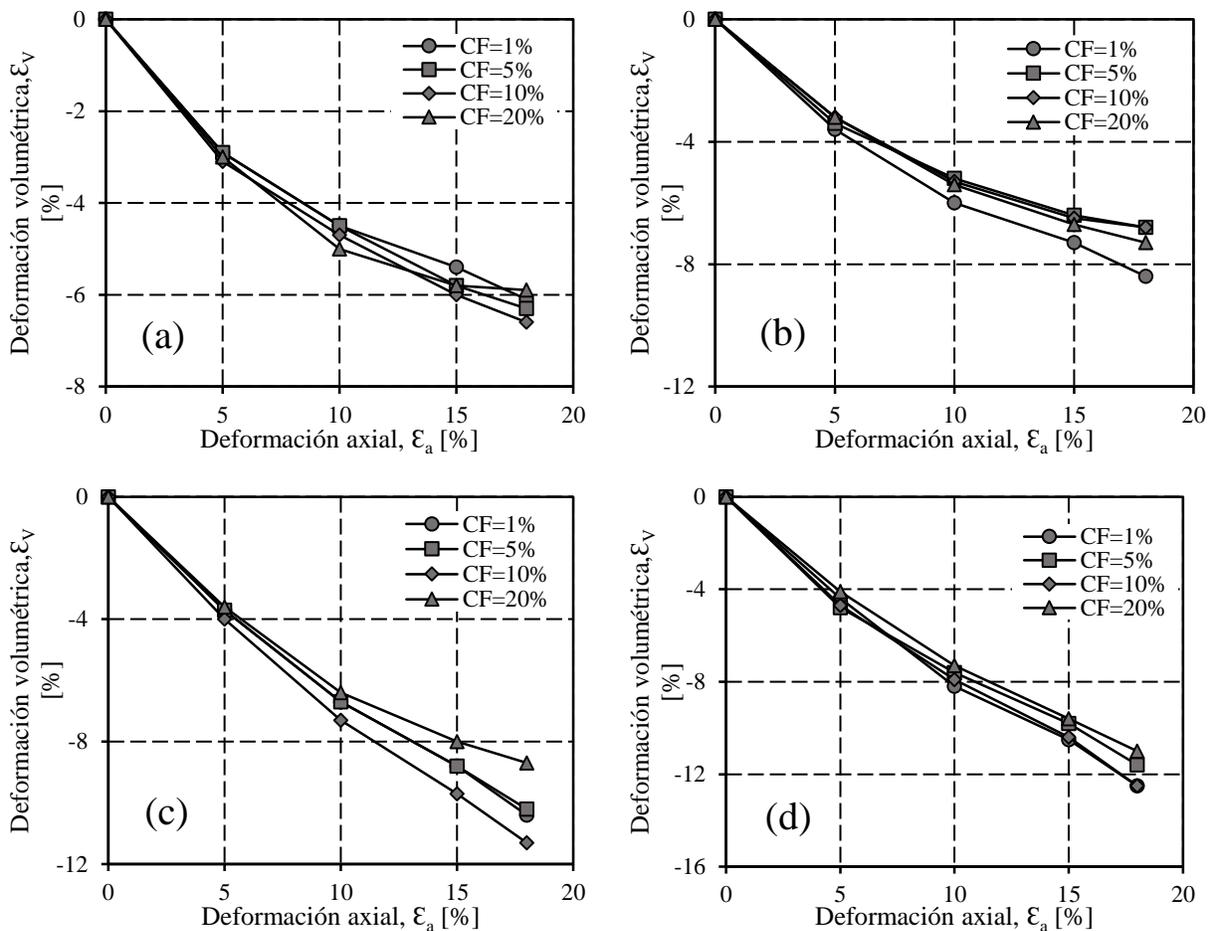


Figura 47. Deformación volumétrica según el contenido de finos para cada presión de confinamiento. (a) Deformación volumétrica a 1.5 MPa. (b) Deformación volumétrica a 2.0 MPa. (c) Deformación volumétrica a 3.5 MPa. (d) Deformación volumétrica a 5.0 MPa.

Otra mirada del aumento de la contractividad se observa en la Figura 48. En ella se compara la compresibilidad de la arena de relaves para cada contenido de fino con la arena natural de Toyoura. A partir del parámetro de contractividad  $R_c$ , definido por Verdugo (1996). Los resultados evidencian que la arena de relaves el Torito presenta una mayor contractividad que la arena de Toyoura para el rango de contenido de finos estudiado. En otras palabras, este resultado evidencia lo que se ha conocido en muchos otros estudios donde muestran que las arenas de relave presentan mayor compresibilidad que las arenas naturales en bajas presiones de confinamiento.

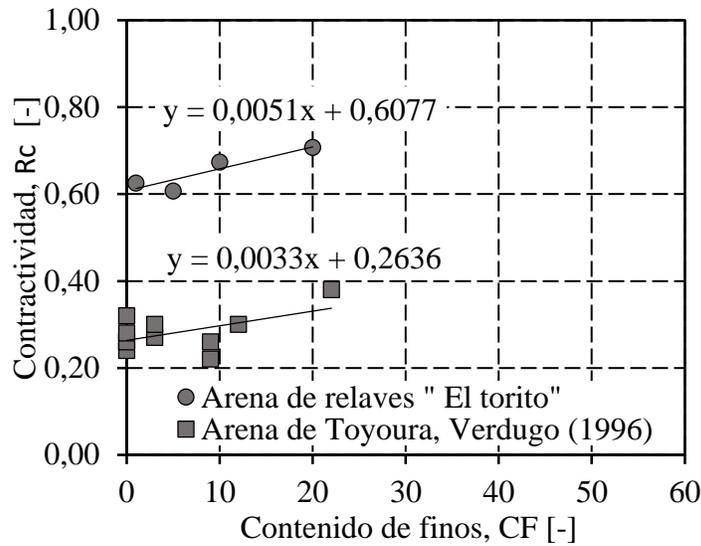


Figura 48. Contractividad según el contenido de fino

#### 4.2.4. Rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento

De los resultados de las granulometrías no se observan diferencias en las curvas para los distintos ensayos. Además, se calcula las diferencias pre y post ensayo del área superficial específica para cada set de ensayo, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Área superficial específica en análisis de rotura a bajas presiones de confinamiento

$\Delta A_{s_{contractivo}} [cm^2/cm^3]$	40
$\Delta A_{s_{20\% de deformación axial}} [cm^2/cm^3]$	12

Se observa en las diferencias de área superficial específica que no hay variaciones considerables para referirnos a rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento. Se propone realizar el mismo análisis para confinamientos menores para obtener mayores niveles de dilatación y/o aumentando la densidad relativa de confección.

#### 4.2.5. Rotura de partículas a altas presiones de confinamiento

De las curvas granulométricas observadas en la Figura 38 y Figura 39 se aprecia una variación pre y post-ensayo en la medida que se aumenta la presión de confinamiento. Los resultados evidencian una variación muy notoria para un 1% del contenido de finos. Al crecer la dosificación de finos, estas variaciones disminuyen, es decir, que los finos inciden en la disminución del nivel de rotura de partículas.

Para estudiar el efecto del contenido de finos y la presión de confinamiento se considerará la razón de contenido de finos final del ensayo con respecto al contenido inicial de la muestra. Cabe destacar que este es uno de los parámetros que se puede utilizar para el análisis. Se escoge porque entrega una medida directa del nivel de contenido de finos. El problema que presenta el parámetro es que asume que la rotura de partículas sobre la malla 200 es despreciable. Según Solans (2010) y Maureira (2011) la arena de relave estudiada presenta un pulido en los cantos angulosos y no una rotura explosiva del grano, lo que se traduce en una mayor variación del contenido de finos sin cambiar mucho la forma de la partícula de arena de relave, lo que validaría su uso.

De los resultados se observa que para mayores contenidos de finos, disminuye el parámetro de rotura. Estos indicios muestran que al tener una mayor cantidad de finos, incrementa la superficie de contacto entre partículas, distribuyendo de mejor manera las tensiones. Un menor nivel de tensiones entre las partículas desarrolla un menor nivel de rotura.

Además, a mayor presión de confinamiento, la razón del contenido de finos aumenta para todas las dosificaciones de finos. Lo anterior, es lógico puesto que un mayor nivel de confinamiento se traduce en un incremento del nivel tensional en los contactos de las partículas.

La Figura 49 muestra las razones de contenidos de finos obtenidas por Cordova (2017) para ensayos de consolidación isótropa a presiones de confinamiento que van desde 1 MPa a 5 MPa. Se aprecia que la razón de contenidos de finos tiene valores mayores en los ensayos de corte que los ensayos de consolidación isótropa. Estos resultados concuerdan con la literatura, donde se dice que a mayor nivel de corte, mayor rotura de partículas Bishop (1976). El corte induce un aumento en la presión media efectiva y el esfuerzo de corte, que tiene directa relación con el estado tensional entre partículas.

Es interesante analizar lo que ocurriría con un supuesto caso de trayectoria de corte puro, es decir, una trayectoria donde no varía la presión media efectiva y sólo hay un aumento en el esfuerzo de corte. En este análisis se consideró una estimación lineal de la razón de contenido de finos y la presión media efectiva como se aprecia en la Figura 49. De las regresiones lineales se comparan las razones de contenido de finos a la misma presión media efectiva. Los resultados se resumen en la Tabla 6. Se propone comparar estos resultados con ensayos experimentales en trayectorias de corte puro.

Además, las estimaciones de rotura de partículas, por medio de regresión lineal, invitan a realizar ensayos a distintos niveles de deformación. Con esto se podría conocer el nivel de rotura bajo un amplio rango de confinamientos, niveles de corte, y niveles de deformación. Se puede

proponer el diseño de un ábaco donde el valor de entrada sería el contenido de finos inicial, la presión de confinamiento, y el nivel de deformación axial.

Cabe destacar que la aproximación lineal es una estimación que no debe salirse del rango analizado de presiones de confinamiento. Más allá se desconoce si el material se estabiliza en el nivel de rotura de partículas o seguiría aumentando

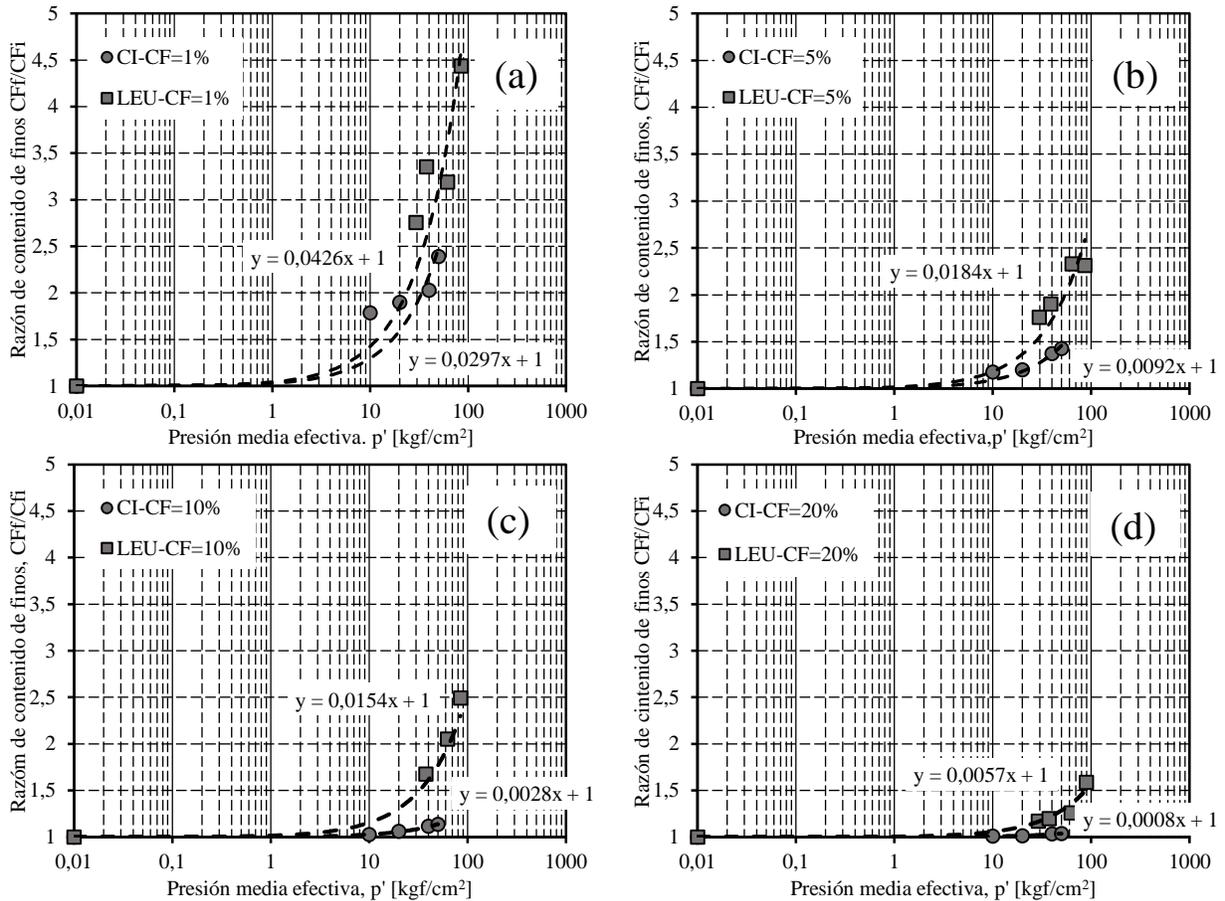


Figura 49. Razón de contenido de finos final con respecto al contenido de finos inicial. (a) 1% del contenido de finos. (b) 5% del contenido de finos. (c) 10% del contenido de finos. (d) 20% del contenido de finos

Tabla 6. Razón teórica de contenido de finos final respecto al contenido de finos inicial en corte puro

Confinamiento efectivo, $\sigma_3'$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	CF <sub>f</sub> /CF <sub>i</sub> en corte puro			
	CF=1%	CF=5%	CF=10%	CF=20%
0	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,129	0,092	0,450	0,049
20	0,258	0,184	0,559	0,103
40	0,516	0,368	0,907	0,194
50	0,645	0,460	1,240	0,249

Una mirada distinta de la rotura de partículas se puede observar en la Figura 50. En ella se analiza la razón de área superficial específica como la diferencia del área superficial específica pre y post-ensayo. Se calcula el parámetro para cada presión de confinamiento y contenido de finos. De los resultados se observa que la razón de área superficial específica aumenta con la presión de confinamiento.

Además, se aprecia un aumento del parámetro con el contenido de finos. Esto último se contradice con lo expuesto en este estudio, con la razón entre el contenido de finos final y el contenido de finos inicial. Los resultados anteriores se explican porque el área superficial específica se ve fuertemente influenciada por la zona de tamaño de partículas bajo 0,075 mm. Pequeñas variaciones del contenido de finos a grandes dosificaciones de finos se ven amplificadas en el parámetro de área superficial específica. Esto último provoca que las diferencias cercanas a 0,075 mm en las granulometrías pre y post-ensayo no tengan relevancia en los resultados.

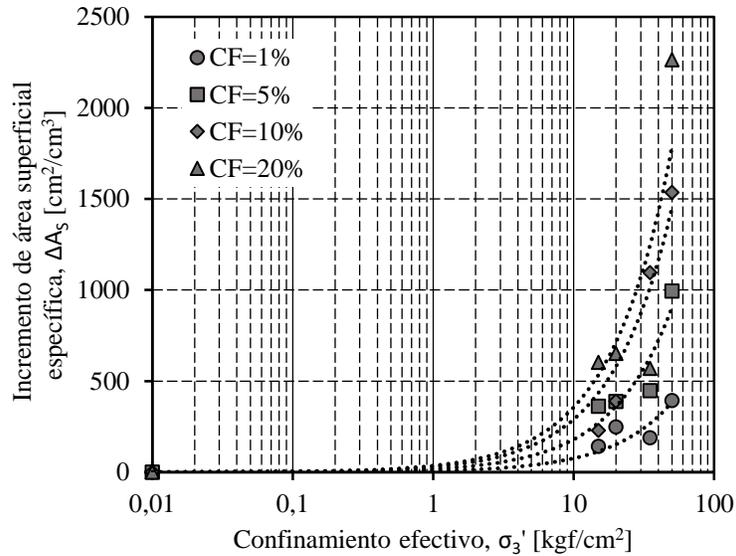


Figura 50. Incremento de área superficial específica según el confinamiento efectivo. Parámetro relativo de rotura de partículas.

Una manera de corregir este detalle en el incremento de área superficial específica es realizar un lavado a las muestras y estudiar la rotura de partículas desde la granulometría por sobre malla #200. En la Figura 51 se observa los resultados obtenidos luego del proceso de lavado. Se aprecia que el incremento de área superficial específica es similar en todas las dosificaciones de finos y muy inferior al obtenido al 1% del contenido de finos sin lavar. Con lo anterior y con los indicios del aumento de contenido de finos en las granulometrías por difracción se demuestra que no existe una rotura explosiva del material granular sino un pulido de los granos gruesos.

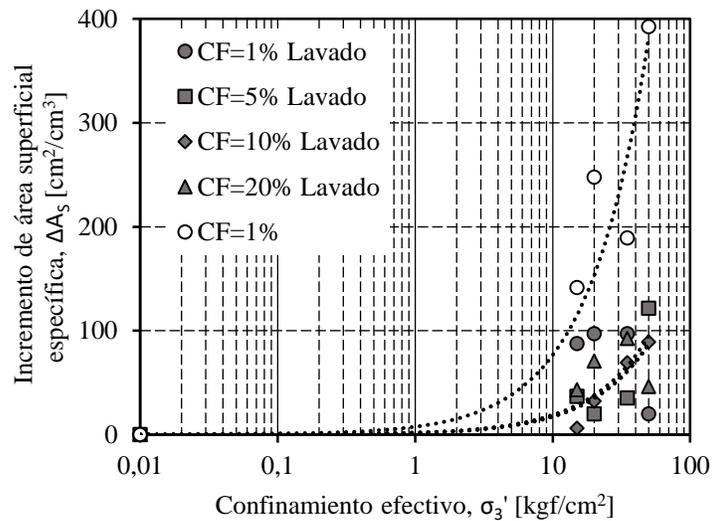


Figura 51. Incremento del área superficial específica para el material lavado

## 5. CONCLUSIONES

A partir del plan experimental realizado y de los análisis de resultados, se puede concluir que para muestras con densidades de confección del 65% de la densidad relativa se tiene lo siguiente:

En consolidación isótropa no se observa una diferencia notoria en compresibilidad del material bajo distintos contenidos de finos, excepto para 20%. En el caso de las muestras a un 20% del contenido de finos, es posible que haya participación de los finos en los contactos de los granos, lo cual mejora los deslizamientos y rotación de la arena de relaves

En corte drenado se observa que al aumentar la presión de confinamiento, hay una pérdida de dilatancia, un aumento de la rigidización inicial y un incremento de la resistencia drenada al 20% de deformación axial. Con respecto al contenido de finos, se destaca que hay una disminución del ángulo de fricción interna peak a bajos confinamientos en las mayores dosificaciones de finos. A medida que aumenta el confinamiento, se pierde la diferencia en dichos ángulos. En altas presiones de confinamiento, desaparece la trabazón mecánica peak y comienza la rotura de partículas que llevan a una caída en el ángulo peak en todos los contenidos de finos.

En el ángulo de fricción interna movilizado se tiene que a confinamientos bajo 1.5 MPa se evidencian a ángulos que se concentra en torno a los 33° a 36° para los distintos contenidos de finos. Sobre un 1.5 MPa se observa que el crecimiento del ángulo de fricción es más paulatino al aumentar la deformación axial llegando hasta valores entre 30° y 32° al 20% de deformación axial.

Con respecto a las deformaciones volumétricas se tiene que en bajos confinamientos efectivos, hay un aumento de la deformación volumétrica en altos contenidos de fino, es decir que los finos están aportando en el desplazamiento y rotación de los granos gruesos. En altas presiones las variaciones en deformación volumétrica tienen anularse, llegando a una meta estructura desplazada estable y acomodada.

Los resultados vistos desde el plano e-p' no muestran una caída abrupta en el "estado último" en altas presiones de confinamiento. De esto se concluye que la rotura de partículas no está afectando de manera considerable el reordenamiento del esqueleto granular, mostrando indicios de que no existe rotura explosiva de las partículas.

También se observa en el plano e-p' que se supera el estado más denso obtenido por Cordova (2017) en los ensayos por sobre 2 MPa, lo que da indicios que se puede generar una estructura más compacta que el método Japonés, considerando que la rotura en 2 MPa es prácticamente despreciable.

Con respecto a la rotura de partículas a bajas presiones de confinamiento, no se observaron cambios en las granulometrías por difracción pre y post ensayo, es decir, no se evidencia rotura de partículas a 0.2 MPa de confinamiento y a una densidad relativa del 65%.

Por otro lado, se evidencia una disminución de la rotura de partículas a altas presiones de confinamiento a medida que incrementa la dosificación de finos por medio del parámetro de razón entre el contenido de finos inicial y el contenido de finos final. Lo anterior se debe a que los finos

mejoran la gradación de la arena gruesa, otorgando una mejor distribución de tensiones en la matriz granular.

También, se utilizó el área superficial específica para analizar rotura de partículas en los materiales con distinto contenido de finos. Este último parámetro, entrega valores consistentes para cada material si se analiza la presión de confinamiento pero, al comparar entre las distintas dosificaciones de finos, se ve fuertemente influenciado por la cantidad de finos. Para corregir lo anterior, se lavan las muestras con la finalidad de analizar la rotura de partículas sobre malla #200, demostrando que sólo hay pulido de canto anguloso y no rotura explosiva de los granos.

Algunas recomendaciones en futuros trabajos son:

- Realizar ensayos bajo las mismas dosificaciones de fino y presiones de confinamiento, midiendo rotura de partículas a distintos niveles de deformación axial.
- Hacer ensayos de corte puro con medición de rotura de partículas y comparar empíricamente el análisis presentado en este trabajo.
- Comparar los resultados con arenas naturales ensayadas a altas presiones de confinamiento.
- Realizar ensayos los mismos ensayos presentados en esta memoria en condición no drenada. Así analizar el efecto de la presión de poros en la rotura de partículas.
- Analizar microscopia S.E.M por tamices para observar indicios de pulido de cantos angulosos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Been, K., & Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands, (October).
- Bishop, A. W. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*.
- Campaña, J. (2011). Comportamiento de arenas de relave a altas presiones. Universidad de Chile.
- Castro, G., & Poulos, S. J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(6).
- Cordova, C. (2017). Efecto del contenido de finos no plásticos en la compresibilidad y rotura de partículas de arenas de relave.
- Hardin, B. (1985). Crushing of Soil Particles, 9410(June).
- Lade, R. (1998). Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand.
- Lade, B. P. V, Yamamuro, J. A., & Bopp, P. A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials, 122(April), 309–316.
- Lee, K. L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 4(1), 68–86.
- Lee, K. L., & Seed, H. B. (1967). Drained strength characteristics of sands. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Lo, K. Y., & Roy, M. (1973). Response of particulate materials at high pressures.
- Marsal, R. J., & de Arellano, L. R. (1965). Presa el infiernillo: observaciones en la cortina durante el periodo de construcción y primer llenado del embalse. Comisión federal de electricidad.
- Maureira, S. (2012). Respuesta cíclica de arena de relaves en un amplio rango de presiones.
- Ministerio de Minería. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, Pub. L. No. 248 (2007). Chile.
- Rahman, M M; Robert Lo, Sik-Cheung; Cubrinovski, M. (2002). Equivalent granular void ratio and behaviour of loose sand, (March), 1–9.
- Solans, D. (2010). Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves.
- Thevanayagam, S. (1998). Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sand, 124(June), 479–491.
- Thevanayagam, S., & Mohan, S. (2000). Intergranular state variables and stress–strain behaviour of silty sands. *Geotechnique*, 50(1), 1–23.
- Vargas, M. (2015). Efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial en la resistencia cíclica de arena de relaves.
- Verdugo, R. (1992). Characterization of sandy soil behaviour under large deformation. thesis, in

Department of Civil Engineering. University of Tokyo: Tokyo.

Verdugo, R., & Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*.

Yang, S., Lacasse, S., & Sandven, R. (2006). Determination of the Transitional Fines Content of Mixtures of Sand and Non-plastic Fines. *Journal, Geotechnical Testing*.