



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

# **EFFECTO DE LOS FINOS NO PLÁSTICOS EN LA RESPUESTA NO DRENADA DE UNA ARENA A ALTAS PRESIONES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y  
GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO IGNACIO SILVA CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:

FELIPE AGUSTÍN OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

CÉSAR PASTÉN PUCHI

RAMÓN VERDUGO ALVARADO

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto FONDECYT 11181252

SANTIAGO DE CHILE

2020

## **Efecto de los de finos no plásticos en la respuesta no drenada de una arena a altas presiones**

El presente trabajo consiste en una investigación experimental que trata sobre el efecto del contenido de finos no plásticos en el comportamiento monótono no drenado de la arena de relaves “El Torito”, para presiones de confinamiento inicial de hasta 50 kgf/cm<sup>2</sup>. El contexto que motiva este estudio es la gran producción minera y baja en la ley del cobre en los yacimientos de Chile, lo cual demanda la construcción de tranques de relaves con muros de alturas por sobre los 250 m., induciendo cargas que exceden los 10 kgf/cm<sup>2</sup>.

Las arenas de relaves clasifican comúnmente como arenas limosas o limos arenosos de baja plasticidad. Se ha encontrado que este tipo de material está presente en la mayoría de las fallas por licuefacción estática o sismo-inducida, como Barahona (1928), El Cobre (1965) y Las Palmas (2010), ocurridas en Chile. Además, diversos autores han sugerido que cuando el contenido de finos es del orden del 30%, se aprecia un cambio evidente del comportamiento mecánico, ya que pasaría de estar controlado por la fracción gruesa a ser controlado por la fracción fina.

El programa experimental ejecutado compara la respuesta no drenada para distintos contenidos de finos en un amplio rango de presiones, para evidenciar el cambio de comportamiento. Para ello, se realizaron ensayos triaxiales no drenados en el material de relaves para contenidos de finos de 1%, 20% y 40%, en un amplio rango de densidades iniciales y a presiones de confinamiento inicial entre 1 – 50 kgf/cm<sup>2</sup>.

Los resultados evidencian que la arena con 40% de finos muestra un significativo cambio de comportamiento en comparación con las arenas con 1% y 20% de finos. Esto se ve reflejado en una mayor compresibilidad, donde el cambio volumétrico sería producto del reordenamiento de los finos, y el paralelismo en el plano e-p' de la línea de estado último con las líneas de consolidación isotrópica, fenómeno visto en materiales finos como limos y arcillas.

Además, se observa que la participación de los finos en la transmisión de tensiones aumenta con el incremento del contenido de finos y el nivel tensional. En arenas con menos de 20% de finos, es posible definir una ecuación para la fracción de finos activos, porción de los finos que participa en la transmisión de tensiones, y así determinar una única línea de estado, independiente del porcentaje de finos.

Por último, los resultados experimentales sugieren que, bajo las condiciones de este estudio, esta arena de relaves sufre una abrasión de su superficie y un pulido de los cantos angulosos, y no un aplastamiento de la partícula, siendo mayor para un menor contenido de finos y en estados densos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi mamá Romané Contreras, porque gracias a ella llegué hasta aquí y me convertí en lo que soy.

A mis abuelas Ana y María Eugenia por su cariño y apoyo en todo momento.

A mi pareja Javiera, por su apoyo en toda mi carrera universitaria y a lo largo de todos los años juntos.

A mi hermana Trinidad que llegó a alegrarnos la vida, consolidar lazos y entregarnos su amor.

A mi familia, gracias por su amor y paciencia, por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi profesor Dr. Felipe Ochoa-Cornejo, por permitir el desarrollo de este trabajo, abrirme las puertas, compartir sus conocimientos, animarme en este campo de estudio y su rectitud como docente.

A Omar González y Mario Carrillo por su paciencia, enseñanza y colaboración, y por las risas y buenos momentos durante las largas sesiones de laboratorio.

A Miguel Bravo, por ayudarme de manera desinteresada, por sus consejos y buena disposición.

A mis amigos, Christian, Sebastián, Nicolás, Eduardo, Marcos y Rodrigo por enseñarme el significado e importancia de la amistad, por los gratos momentos y viajes.

Agradecer el financiamiento del proyecto FONDECYT 11181252 que permitió la realización de esta tesis.

Dedico este trabajo a estas personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación como profesional y como ser humano, por enseñarme que con apoyo, amor, paciencia y trabajo duro se alcanzan de mejor manera las metas.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. CONTEXTO GENERAL .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	1
1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	1
1.2.3. METODOLOGÍA .....	2
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. COMPORTAMIENTO MONÓTONO DE ARENAS .....	3
2.1.1. COMPORTAMIENTO NO DRENADO .....	3
2.1.2. LICUEFACCIÓN ESTÁTICA .....	8
2.2. EFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS .....	9
2.2.1. EFECTO SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA ARENA ( $e_{max}$ y $e_{min}$ ) Y EL CONTENIDO DE FINOS LÍMITE .....	9
2.2.2. EFECTO SOBRE LA RESPUESTA MECANICA .....	10
2.3. ROTURA DE PARTÍCULAS .....	15
2.3.1. FACTORES QUE AFECTAN LA ROTURA DE PARTÍCULAS .....	15
2.3.2. CUANTIFICACIÓN DE LA ROTURA DE PARTÍCULAS .....	18
3. EQUIPOS, MATERIAL ENSAYADO Y METODOLOGÍA .....	20
3.1. EQUIPOS UTILIZADOS .....	20
3.1.1. TRIAXIAL DE BAJAS PRESIONES .....	20
3.1.2. TRIAXIAL DE ALTAS PRESIONES .....	21
3.1.3. MASTERSIZER 2000 .....	22
3.2. MATERIALES UTILIZADOS .....	23
3.2.1. CLASIFICACIÓN GEOTECNICA MATERIAL BASE .....	23
3.2.2. CLASIFICACIÓN GEOTECNICA DE LA ARENA CON DISTINTOS CONTENIDOS DE FINOS .....	24
3.3. METODOLOGÍA ENSAYOS TRIAXIALES .....	25
3.3.1. CONFECCIÓN DE LA PROBETA .....	25
3.3.2. MONTAJE DE LA PROBETA EN EQUIPO TRIAXIAL .....	26
3.3.3. PASO DE CO <sub>2</sub> Y SATURACIÓN .....	28
3.3.4. CONSOLIDACIÓN .....	28
3.3.5. APLICACIÓN DEL DESVIADOR .....	29
3.3.6. EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VACÍOS FINAL .....	29
3.4. ANÁLISIS POST-ENSAYO .....	30

4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	31
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	31
4.1.1.	CONSOLIDACIONES ARENA CON CF=40%.....	31
4.1.2.	COMPORTAMIENTO MONÓTONO NO DRENADO .....	34
4.1.3.	GRANULOMETRÍAS POST-ENSAYO .....	50
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	52
5.1.	VARIACIÓN DE $e_{max}$ Y $e_{min}$ CON EL CONTENIDO DE FINOS .....	52
5.2.	COMPRESIBILIDAD ISOTRÓPICA .....	54
5.3.	LÍNEA DE ESTADO ÚLTIMO ESPACIO $q-p'$ .....	55
5.3.1.	EFFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES .....	55
5.3.2.	EFFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS.....	57
5.3.3.	MÓDULO DE DEFORMACIÓN .....	59
5.3.4.	RESISTENCIA NO DRENADA $S_u$ .....	60
5.4.	INESTABILIDAD Y TRANSFORMACIÓN DE FASE.....	62
5.5.	LÍNEA DE ESTADO ÚLTIMO ESPACIO $p'-e$ (DIAGRAMA DE ESTADO) .	67
5.5.1.	FINOS ACTIVOS .....	70
5.6.	ROTURA DE PARTÍCULAS.....	79
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema del comportamiento monótono no drenado de arenas a una misma densidad relativa. a) Diagrama de estado ( $p'-e$ ). b) Trayectorias de tensiones ( $p'-e$ ) (Alarcón-Guzmán et al., 1988). .....	3
Figura 2.2: Estados característicos del comportamiento no drenado de arenas: Estado Último (CS), Estado de Transformación de Fase (PTS), Pseudo Estado Último (QSS) y Estado de Inestabilidad No Drenada (UIS) (Murthy et al., 2007).....	4
Figura 2.3: Definición de estado último propuesto por Casagrande (1936) y Roscoe et al. (1958) en condición drenada y no drenada (Maureira, 2012). .....	4
Figura 2.4: a) Representación de la Línea de Estado Último (Verdugo, 1992). b) Esquema de SSL y comportamientos contractivo y dilatante (Yamamuro & Lade, 1998).....	5
Figura 2.5: Respuesta monótona no drenada de arena Toyoura con una caída temporal de resistencia (Alarcón-Guzmán et al., 1988). .....	6
Figura 2.6: a) Línea de pseudo estado último en espacio $p'-e$ para arena Toyoura. b) Línea de pseudo estado último en el espacio $q-p'$ (Verdugo & Ishihara, 1996). .....	6
Figura 2.7: Diagrama esquemático de la locación de la línea de inestabilidad (Lade & Bopp, 1997).....	7
Figura 2.8: Diagrama esquemático del estado de transformación de fase en solicitaciones no drenadas sobre arenas (Lade & Ibsen, 1997). .....	8
Figura 2.9: a) Trayectorias no drenadas para falla de flujo y movilidad cíclica en el espacio $p'-e$ (Castro & Poulos, 1977). b) Trayectorias monótona y cíclica para falla de flujo en el espacio $p'-q$ (Poulos et al., 1985). .....	9
Figura 2.10: Variación de los índices de vacío máximo y mínimo con el contenido de finos (Cubrinovsky & Ishihara, 2002). .....	10
Figura 2.11: Efecto del contenido de finos y densidad relativa en la compresibilidad volumétrica de la arena de Nevada (Lade, Liggio, & Yamamuro, 1998). .....	11
Figura 2.12: Diagrama esquemático estructuras para arenas con finos, a la izquierda: antes del ensayo, a la derecha: después del ensayo: a) Arenas sueltas con bajo contenido de finos. b) Arenas sueltas con alto contenido de finos (Yamamuro & Covert, 2001)....	12
Figura 2.13: Curvas de esfuerzo-deformación para ensayos monótonos no drenados en arenas con diferentes contenidos de finos (Cubrinovsky & Rees, 2008). .....	12
Figura 2.14: Trayectorias no drenadas de esfuerzos efectivos para arenas con finos (Lade & Yamamuro, 1997). .....	13
Figura 2.15: a) Líneas de estado último para muestras de arena con contenido de finos entre 0%-94%. b) Líneas de Estado Último para muestras de arena con contenido de finos entre 0%-94% considerando el índice de vacíos corregido ( $e_s$ y $e_r$ según corresponda). (Yang et al., 2006). .....	14
Figura 2.16: Diagrama de fase mostrando los conceptos de índice de vacíos intergranular ( $e_g$ ) y el índice de vacíos equivalente ( $e^*$ ) (Cubrinovsky & Rees, 2008) .....	14
Figura 2.17: Dirección de las fuerzas de contacto entre: a) Partículas angulosas, b) Partículas redondeadas (Maureira, 2012). .....	16
Figura 2.18: Efecto de la consolidación isotrópica y la aplicación del corte en la rotura de partículas (Vesic & Clough, 1968).....	17
Figura 2.19: Rotura de partículas para distintos índices de vacío iniciales: a) Confinamiento inicial de 2MPa, b) Confinamiento inicial de 1MPa (Yu, 2017). .....	17
Figura 2.20: Relación entre dos parámetros de rotura y la energía total por unidad de volumen aplicada para ensayos drenados y no drenados; a) Parámetro de rotura de	

Hardin (1985), b) Parámetro rotura de Lade, Yamamuro & Bopp (1996) (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996).	18
Figura 2.21: a) Resumen de los parámetros de rotura de partículas propuestos por Marsal (1967), Lee & Farhoomand (1967) y Hardin (1985) (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996). b) Superficie específica en función del radio de una partícula esférica para 3 casos de gravedad específica, Gs (Bravo, 2018).	19
Figura 3.1: Triaxial de bajas presiones. a) Maco de carga. b) Panel de control de presiones de cámara y contrapresión.	20
Figura 3.2: Equipo triaxial de altas presiones (Maureira, 2012).	22
Figura 3.3: Equipo de análisis granulométrico. a) Equipo Mastersizer 2000. b) Sistema de circulación de mezcla arena-agua (Maureira, 2012).	23
Figura 3.4: Fotografía microscópica de arena de relaves "El Torito" (Maureira, 2012).	24
Figura 3.5: Curva granulométrica de la arena extraída del muro.	24
Figura 3.6: Curvas granulométricas de las arenas con 1%, 20% y 40% de finos.	25
Figura 3.7: a) Molde de bronce para probetas montado sobre base triaxial de bajas presiones. b) Probeta desmoldada. c) Probeta cubierta por la membrana y el portamembrana.	26
Figura 3.8: Bordas deslizantes.	27
Figura 3.9: a) Probeta montada en equipo triaxial de altas presiones. b) Probeta montada en equipo triaxial de bajas presiones.	27
Figura 4.1: Consolidaciones isotrópicas en arena de relaves "El Torito" con contenido de finos de 40%, para densidades de confección de 15%, 65% y 90%. Escala aritmética a la izquierda y escala logarítmica a la derecha.	31
Figura 4.2: Curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial en arena de relaves "El Torito" con contenido de finos de 1%, 5%, 10%, 20% y 40% para tres densidades de confección: 15%, 65% y 90%. a) Curvas CF=1%-40%, DR=15%. b) Curvas CF=1%-40%, DR=65%. c) Curvas CF=1%-40%, DR=90%. d) Curvas para arena con 40% de finos.	32
Figura 4.3: Módulo de compresibilidad volumétrica "m <sub>v</sub> " para la arena "El Torito" con contenido de finos cf=1, 5, 10, 20 y 40% para las tres densidades de confección DR=15, 65 y 90%.	33
Figura 4.4: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a DR=15% para arena "El Torito" con cf=1%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'.	36
Figura 4.5: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas e=0,765 ± 0,045 para arena "El Torito" con CF=1%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'.	37
Figura 4.6: Respuesta monótona no drenada de muestras de arena "El Torito" con CF=1%. Para p'=30, 40 y 50 kgf/cm <sup>2</sup> índice de vacíos de ensayo e=0,660 ± 0,005, para p'=10 kgf/cm <sup>2</sup> , e=0,770 y p'=20 kgf/cm <sup>2</sup> , e=0,720. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'.	38
Figura 4.7: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con CF=1%.	39
Figura 4.8: Línea de Estado Último (SSL) en espacio q-p' para arena "El Torito" con contenido de finos 1%. a) Arreglo lineal con ensayos CIU. b) Arreglo lineal agregando ensayos CID realizados por Bravo (2018).	39

Figura 4.9: Línea de Estado Último (LEU) en espacio e-p' para arena "El Torito" 1% de finos. a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica. ....	40
Figura 4.10: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a DR=15% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	41
Figura 4.11: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=84%-100% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	42
Figura 4.12: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=90%-98% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	43
Figura 4.13: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con CF=20%. ....	44
Figura 4.14: Línea de Estado Último (SSL) en espacio q-p' para arena "El Torito" con contenido de finos 20%. a) Arreglo lineal con ensayos CIU. b) Arreglo lineal agregando ensayos CID realizados por Bravo (2018). ....	44
Figura 4.15: Línea de Estado Último (SSL) en espacio e-p' para arena "El Torito" con contenido de finos 20% considerando ensayos CIU y CID (Bravo, 2018). a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica. ....	45
Figura 4.16: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a DR=15% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	46
Figura 4.17: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=63%-85% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	47
Figura 4.18: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=72%-95% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'. ....	48
Figura 4.19: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con CF=40%. ....	49
Figura 4.20: Línea de Estado Último (LEU) en espacio q-p' para arena "El Torito" con 40% de finos. ....	49
Figura 4.21: Línea de Estado Último (LEU) en espacio e-p' para arena "El Torito" con 40% de finos. a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica. ....	50
Figura 4.22: Granulometrías post-ensayos para arena "El Torito" con 1% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=73-92%. ....	50
Figura 4.23: Granulometrías post-ensayos arena "El Torito" con 20% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=75-90. ....	51
Figura 4.24: Granulometrías post-ensayos para arena "El Torito" con 40% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=72%-95%. ....	51
Figura 5.1: Variación de los índices de vacíos máximo y mínimo para arena "El Torito" con el contenido de finos no plásticos. Resultados de Córdova (2017) y Bravo (2018). ....	52

Figura 5.2: Variación de los índices de vacíos máximo (a) y mínimo (b) normalizados por los índices de vacíos correspondientes a la arena limpia. ....	53
Figura 5.3: Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más suelto para arena angulosa al aumentar el contenido de finos (Modificado de Córdova, 2017). ....	55
Figura 5.4: Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más denso para arena angulosa al aumentar el contenido de finos (Modificado de Córdova, 2017). ....	55
Figura 5.5: Comparación ajustes lineal y polinómico para las líneas de estado último de las arenas con distintos contenidos de finos: a) Arena-Finos 1%. b) Arena-Finos 20%. c) Arena-Finos 40%.....	56
Figura 5.6: Variación del ángulo de fricción secante medido en el estado último ( $\phi_{ult}$ ) con la presión media efectiva en el estado último.....	57
Figura 5.7: Comparación Líneas de Estado Último para los tres contenidos de finos considerando ensayos CIU. ....	58
Figura 5.8: Comparación Líneas de Estado Último para los tres contenidos de finos considerando ensayos CIU y CID. ....	58
Figura 5.9: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación $E_{0,1\%}$ con la presión de confinamiento inicial ( $p'_0$ ) en doble escala logarítmica, para los tres contenidos de finos ensayados. ....	59
Figura 5.10: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación axial ( $E_{0,1\%}$ ) con el índice de vacíos ( $e$ ) para los tres contenidos de finos ensayados .....	60
Figura 5.11: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación axial ( $E_{0,1\%}$ ) con la densidad relativa de ensayo (DR) para los tres contenidos de finos ensayados. ....	60
Figura 5.12: Variación de la resistencia última no drenada $S_u$ con el índice de vacíos para arena "El Torito" con contenidos de finos $cf=1, 20$ y $40\%$ . ....	61
Figura 5.13: Variación de la resistencia última no drenada $S_u$ con la densidad relativa DR, para arena "El Torito" con contenido de finos $cf=1, 20$ y $40\%$ .....	62
Figura 5.14: Trayectoria de tensiones para arena "El Torito" con contenido de finos $1\%$ , $20\%$ y $40\%$ , en probetas confeccionadas a $DR=15\%$ . ....	62
Figura 5.15: Trayectorias de tensiones de tensiones para arena "El Torito" con distintos contenidos de finos, aumentando la densidad de confección de izquierda a derecha. ...	63
Figura 5.16: Variación de la deformación para el punto de inestabilidad con la presión de confinamiento inicial para arena "El Torito" con $1$ y $20\%$ de finos. ....	64
Figura 5.17: Variación de la presión media en el punto de inestabilidad con el confinamiento inicial para arena El Torito con $1\%$ y $20\%$ de finos, y arena Toyoura (Ishihara, 1993). ....	65
Figura 5.18: Líneas de Inestabilidad para la arena "El Torito" con $1\%$ y $20\%$ de contenido de finos.....	65
Figura 5.19: Líneas de Transformación de Fase para la arena "El Torito" con $1\%$ , $20\%$ y $40\%$ de contenido de finos. ....	66
Figura 5.20: Comparación ángulos de Estado Último, Transformación de Fase e Inestabilidad para la arena "El Torito" con los tres contenidos de finos ensayados. ....	67
Figura 5.21: Líneas de estado último en espacio $e-p'$ para arena "El Torito" con distintas dosificaciones de finos. a) Escala lineal. b) Escala logarítmica. ....	68
Figura 5.22: Áreas de contractancia y dilatancia hasta $p'=50$ $\text{kgf/cm}^2$ para la arena "El Torito" con las tres dosificaciones de finos ensayadas. a) $cf=1\%$ . b) $cf=20\%$ . c) $cf=40\%$ . ....	69
Figura 5.23: Líneas de Estado Último para la arena "El Torito" con contenidos de finos $1\%$ y $20\%$ considerando el Índice de Vacíos Intergranular " $e_g$ ".....	70

Figura 5.24: Líneas de Estado Último para la arena con 1% y 20% de finos, considerando el índice de vacíos equivalente y el parámetro b propuesto por Rahman et al. (2008).	71
Figura 5.25: Líneas de Estado Último para arena "El Torito" con dosificaciones de finos de 1% y 20% considerando el índice de vacíos intergranular equivalente para distintos valores de b.	72
Figura 5.26: Evolución de los finos activos con la presión media efectiva.	73
Figura 5.27: Líneas de Estado Último para arena "El Torito" con dosificaciones de finos de 1% y 20% considerando el Índice de Vacíos Intergranular Equivalente y un porcentaje de finos activos dependiente de la presión media de acuerdo con la ecuación 5-2.	74
Figura 5.28: Comparación líneas de estado último para arena El Torito con 1%, 5%, 10% y 20% de finos.	74
Figura 5.29: Variación de los finos activos con la presión media efectiva para contenidos de finos 5%, 10% y 20%.	75
Figura 5.30: Variación del porcentaje de finos activos a bajas presiones ( $b_0$ ) con el porcentaje de finos total (CF).	76
Figura 5.31: Líneas de estado último considerando el índice de vacíos intergranular equivalente $e^*$ para los contenidos de finos 1%, 5%, 10% y 20%.	77
Figura 5.32: Líneas de estado último considerando el índice de vacíos granular equivalente para contenidos de finos 1, 5, 10, 20 y 40%.	78
Figura 5.33: Variación de la resistencia no drenada $S_u$ con el índice de vacíos equivalente $e^*$ para contenidos de finos 1, 20 y 40%.	78
Figura 5.34: Evolución del parámetro de rotura de Hardin con la presión de confinamiento inicial para arena "El Torito" con distintos contenidos de finos. a) CF=1%. b) CF=20%. c) CF=40%.	80
Figura 5.35: Comparación del parámetro de Hardin para los tres contenidos de finos ensayados. a) Probetas sueltas. b) Probetas densas.	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características del equipo Triaxial de bajas presiones.	21
Tabla 3.2: Características del equipo Triaxial de altas presiones.	21
Tabla 3.3: Caracterización geotécnica de arenas 1%, 20% y 40% de finos.	25
Tabla 4: Resumen ensayos triaxiales no drenados.	34
Tabla 5.1: Resumen de las características de las arenas utilizadas en estudios del efecto del contenido de finos en los índices de vacíos máximo y mínimo por diversos autores.	53

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. CONTEXTO GENERAL**

En Chile, el incremento de la producción minera y la baja en la ley del cobre ha aumentado la necesidad de tranques de relaves de grandes dimensiones para poder almacenar los extensos volúmenes de desechos generados por la minería. Los tranques de relaves, contruidos a partir de la fracción gruesa del material de desecho de los procesos de chancado y molienda, pueden alcanzar alturas de hasta 300 m (Campaña, 2011). Lo anterior, conlleva a niveles de carga solicitantes que superan ampliamente las tensiones convencionales de hasta 10 kgf/cm<sup>2</sup> encontradas en obras de menor magnitud, afectando las propiedades mecánicas producto de posibles cambios significativos en la densidad y en el contenido de finos, entre otros aspectos (Barrera et al., 2008). En este contexto, se requieren más estudios para caracterizar las arenas de relaves a altos confinamientos.

En general, el material de relaves clasifica como arena limosa o limo arenoso de baja plasticidad, siendo este tipo de material el que se encuentra involucrado en la mayoría de las fallas por licuefacción estática o sismo-inducidas (Yamamuro & Lade, 1998). Sin embargo, las investigaciones se han concentrado en arenas relativamente limpias, cuyo comportamiento no se correlaciona directamente con aquellas que contienen finos no plásticos (Thevanayagam & Mohan, 2000). Diversos autores (Cubrinovsky & Ishihara, 2002; Yang et al. 2005, 2006; Polito & Martin, 2001, 2003) indican que a partir de cierto nivel de finos denominado “contenido de finos transicional”, el cual oscila entre 20% y 40%, el comportamiento del material pasa de estar controlado por la fracción gruesa a depender de la fracción fina.

En este contexto, este trabajo se enfoca en el comportamiento monótono no drenado de una arena de relaves con distintos contenidos de finos no plásticos, con el propósito de estudiar posibles cambios de comportamiento, bajo un amplio rango de presiones de confinamiento.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal de este estudio es evaluar experimentalmente el efecto del contenido de finos en la respuesta monótona no drenada de una arena de relaves en un amplio rango de densidades iniciales. Los experimentos están enfocados en observar si existe un cambio desde un comportamiento dominado por la fracción gruesa del suelo, a uno controlado por la fracción fina, bajo un amplio rango de presiones.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar la respuesta mecánica no drenada de una arena de relaves en un amplio rango de contenido de finos y presiones de confinamiento.

- Estudiar el efecto del contenido de finos y la presión de confinamiento sobre las trayectorias no drenadas.
- Estudiar el efecto del contenido de finos en la compresibilidad de una arena de relaves.
- Cuantificar y caracterizar la rotura de partículas bajo trayectorias no drenadas.

### 1.2.3. METODOLOGÍA

La metodología experimental considera la realización de ensayos de laboratorio para caracterizar el material. En particular se realizan los siguientes ensayos:

- Ensayos de consolidación isotrópica en arena con 40% de contenido de finos no plásticos en muestras preparadas por compactación húmeda para densidades relativas de 15%, 65% y 90% hasta un confinamiento efectivo de 50 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Ensayos triaxiales monótonos no drenados en arenas con 1%, 20% y 40% de contenido de finos no plásticos, en muestras preparadas por compactación húmeda y confinamientos efectivos isotropos entre 1 y 50 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Ensayos de granulometría por difracción.

### 1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente documento consta de siete capítulos que organizan el trabajo realizado y conectan los resultados con la bibliografía más reconocida del área. A continuación, se detalla cada capítulo.

**Capítulo 1:** Resumen, motivaciones y objetivos del trabajo de título. También se presenta la metodología general de los ensayos de laboratorio.

**Capítulo 2:** Revisión bibliográfica de los estudios y publicaciones atinentes al trabajo, definiendo así el marco teórico. La revisión está centrada en: comportamiento monótono no drenado de arenas, el efecto del contenido de finos no plásticos y la rotura de partículas en medios granulares.

**Capítulo 3:** Detalla los materiales, equipos y metodología utilizada en la investigación.

**Capítulo 4:** Presentación y análisis de los resultados experimentales obtenidos.

**Capítulo 5:** Análisis y discusión de los resultados obtenidos en comparación con aquellos encontrados en la literatura.

**Capítulo 6:** Presentación de las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

**Capítulo 7:** Presenta la bibliografía utilizada en la investigación.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. COMPORTAMIENTO MONÓTONO DE ARENAS

El comportamiento mecánico de arenas depende, principalmente, del índice de vacíos “e”, la presión media efectiva “p”, y la condición de drenaje durante la aplicación de corte (Been & Jefferies, 1985; Mohamad & Dobry, 1988; Verdugo & Ishihara, 1996). Ante la aplicación de carga; en condición drenada, existirá cambio volumétrico, sin presentar exceso de presión de poros. En condición no drenada, el volumen se mantendrá constante y se generarán excesos de presión por sobre la hidrostática (Vargas, 2015). Según la combinación de índice de vacíos y carga iniciales del suelo, este presentará comportamiento contractivo o dilatante, movilizándose desde su (p',e) inicial hasta una combinación única de p' y e críticos, independiente de la condición de drenaje (Yamamuro & Lade, 1998). Estas condiciones son las que definen como un suelo alcanza el estado crítico de falla, o estado de deformación última, también conocido como Steady State (Poulos et al., 1985).

#### 2.1.1. COMPORTAMIENTO NO DRENADO

Alarcón-Guzmán et al. (1988) concluyeron que el comportamiento monótono no drenado de arenas está caracterizado por tres regiones en el espacio p'-e (Figura 2.1). La primera es aquella en la cual la arena exhibe un comportamiento en donde el corte se desarrolla monótonamente hasta un máximo de resistencia, seguido por una disminución monótona de ésta hasta alcanzar el estado último (trayectorias D, E y F). Este tipo de respuesta, se denomina respuesta inestable o falla de flujo. Los puntos de máxima resistencia caen sobre una línea denominada Línea de Inestabilidad o CSR line (Critical State Ratio). En segundo lugar, se tiene una región de transición, donde el suelo presenta un máximo de resistencia local, seguido de una caída temporal, hasta alcanzar el punto de transformación de fase y aumentar hasta llegar al estado último (trayectoria C), denominado comportamiento temporalmente inestable o flujo con deformación limitada. La tercera región se caracteriza por un aumento monótono de la resistencia hasta el estado último (trayectorias A y B), denominado comportamiento estable, o dilatante.

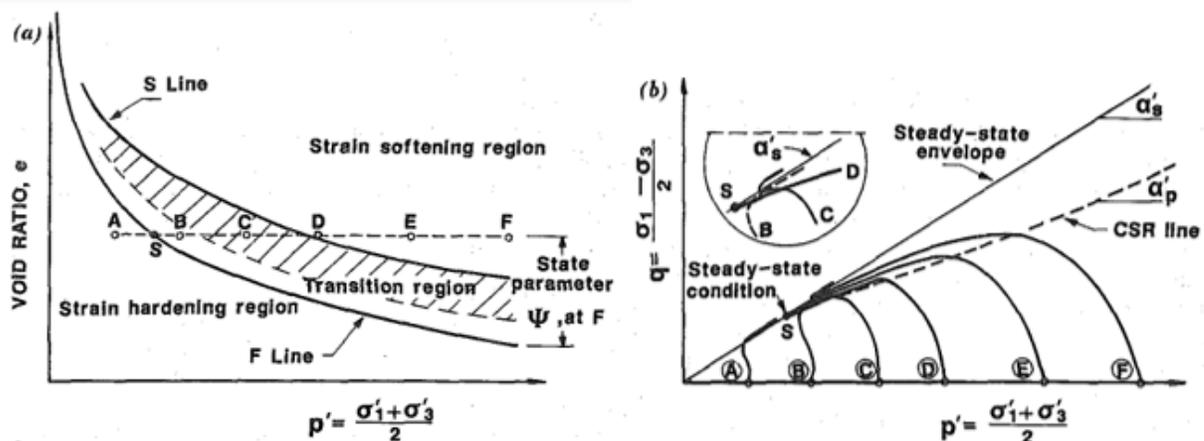


Figura 2.1: Esquema del comportamiento monótono no drenado de arenas a una misma densidad relativa. a) Diagrama de estado (p'-e). b) Trayectorias de tensiones (p'-q) (Alarcón-Guzmán et al., 1988).

La Figura 2.2 (Murthy et al., 2007) ilustra los estados característicos que puede presentar una arena bajo carga monótona no drenada, y su aparición dependerá del tipo de comportamiento que presente el suelo. Estos corresponden a: 1) Estado Último, Steady State o Critical State (CS), 2) Pseudo Estado Último (Quasi Steady State o QSS), 3) Inestabilidad No Drenada (Undrained Inestability State o UIS) y 4) Transformación de Fase (Phase Transformation State o PTS).

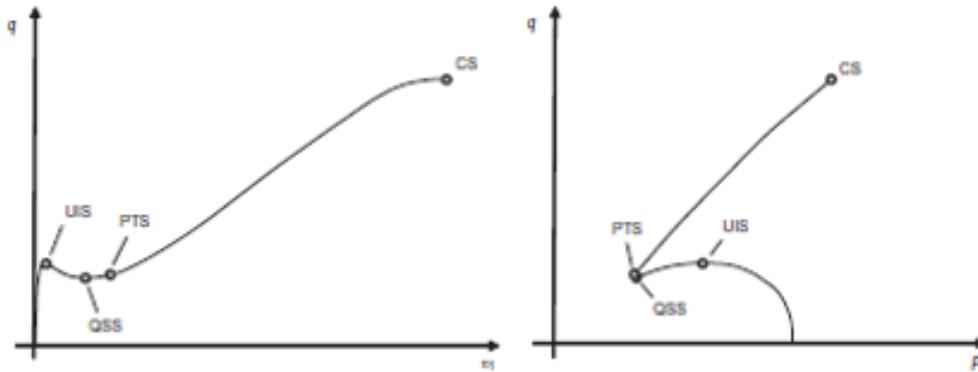


Figura 2.2: Estados característicos del comportamiento no drenado de arenas: Estado Último (CS), Estado de Transformación de Fase (PTS), Pseudo Estado Último (QSS) y Estado de Inestabilidad No Drenada (UIS) (Murthy et al., 2007).

### 2.1.1.1. STEADY STATE O ESTADO ÚLTIMO

El Steady State o Estado Último es la condición en la cual el suelo se deforma a volumen, velocidad, presión media y corte constantes (Figura 2.3), independiente de su estructura inicial (Poulos, 1981), y se observa tanto en arcillas como en arenas (Roscoe et al., 1958). Generalmente, en un ensayo triaxial, el estado último es alcanzado para deformaciones axiales entre 20 y 30% (Verdugo & Ishihara, 1996).

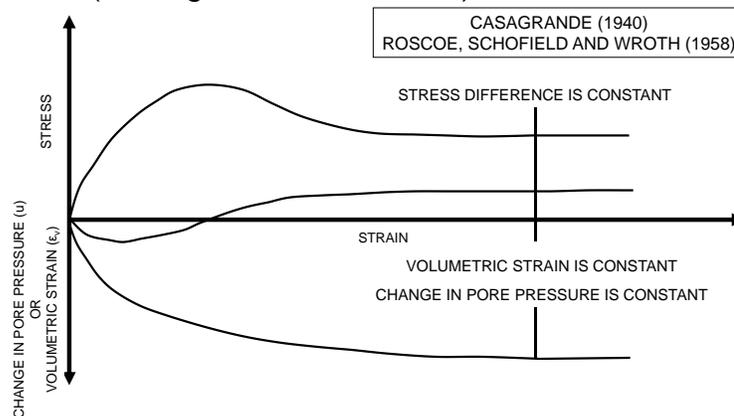


Figura 2.3: Definición de estado último propuesto por Casagrande (1936) y Roscoe et al. (1958) en condición drenada y no drenada (Maureira, 2012).

La combinación de  $(p', e)$  en el estado último es única e independiente de las condiciones iniciales y tipo de drenaje con la que es alcanzada (Verdugo & Ishihara, 1996). Junto con la resistencia "q", generan una línea en el espacio  $(p'-e-q)$  denominada Línea de Estado Último, LEU o SSL (Steady State Line), como esquematiza la Figura 2.4a. En el espacio

( $p'$ - $e$ ), la Línea de Estado Último actúa como frontera entre las respuestas contractiva y dilatante. Si el estado inicial está por sobre la línea, el suelo contraerá, mientras que todos los estados ubicados por debajo mostrarán respuesta dilatante (Been & Jefferies, 1985; Yamamuro & Lade, 1998). Sin embargo, a una presión lo suficientemente alta, la LEU cruza la línea que define los estados más densos posibles en una arena, por ende, a partir de esta presión, todos los estados presentarán un comportamiento contractivo, ya que siempre estarán por sobre el estado último.

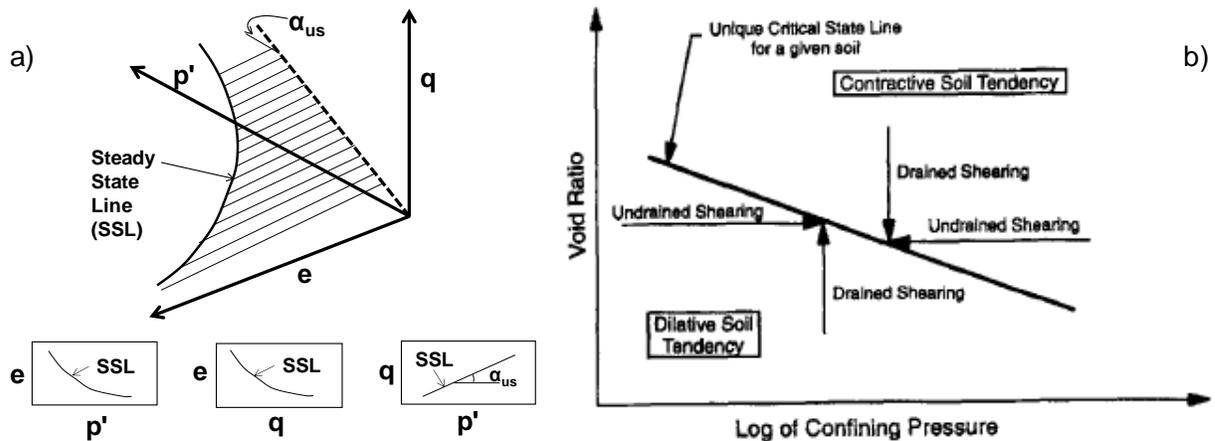


Figura 2.4: a) Representación de la Línea de Estado Último (Verdugo, 1992). b) Esquema de SSL y comportamientos contractivo y dilatante (Yamamuro & Lade, 1998).

### 2.1.1.2. PSEUDO ESTADO ÚLTIMO

El pseudo estado último es definido como el estado en el cual el esfuerzo desviador " $q$ " alcanza un mínimo local durante carga no drenada y presenta condiciones de estado último de manera temporal. Luego, comienza a dilatar y alcanza una resistencia última mayor a la mínima, como muestra la Figura 2.5a (Alarcón-Guzmán et al., 1988). Para que una arena muestre esta clase de comportamiento, el estado al final de la consolidación debe estar a la derecha del estado último, pero no lo suficientemente lejos como para producir una respuesta totalmente contractiva (Mohamad & Dobry, 1986).

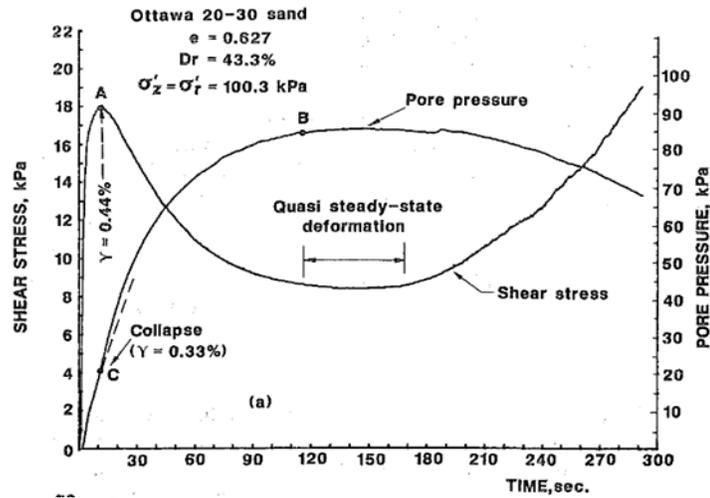


Figura 2.5: Respuesta monótona no drenada de arena Toyoura con una caída temporal de resistencia (Alarcón-Guzmán et al., 1988).

Verdugo e Ishihara (1996) mostraron que el estado tensional para el estado de mínimo esfuerzo sigue una relación directa en los espacios  $p'$ - $e$  y  $p'$ - $q$ , como muestra la Figura 2.6. A pesar de existir una clara correlación entre el índice de vacíos y la presión media efectiva (Figura 2.6a), la aparente dispersión se debe a que la mínima resistencia movilizada es afectada por la presión de consolidación, la fábrica y estructura iniciales. Por otra parte, en el espacio  $p'$ - $q$  los resultados definen una única línea recta pasando por el origen, esto se atribuye a que el esfuerzo de corte movilizado en esta etapa se debe a la fricción entre las partículas, por esto se observa un único ángulo de fricción.

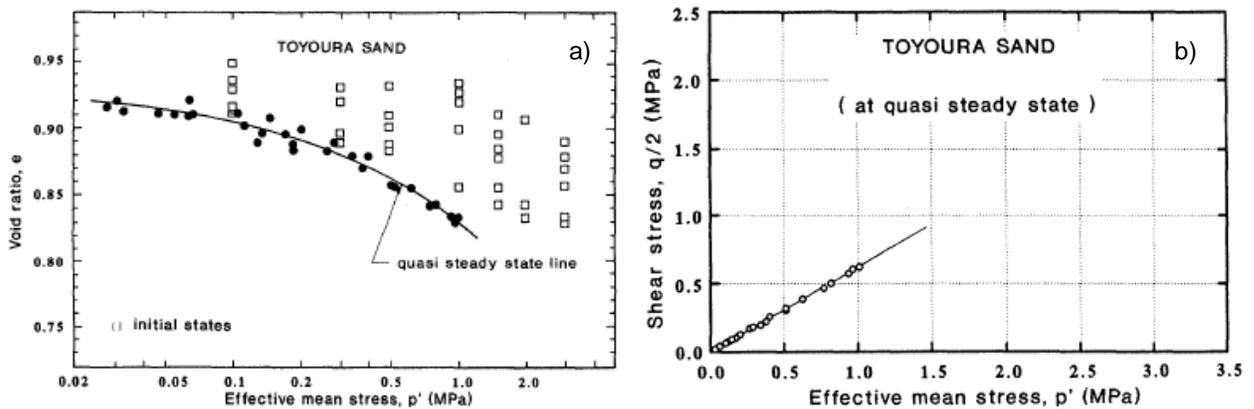


Figura 2.6: a) Línea de pseudo estado último en espacio  $p'$ - $e$  para arena Toyoura. b) Línea de pseudo estado último en el espacio  $q$ - $p'$  (Verdugo & Ishihara, 1996).

### 2.1.1.3. INESTABILIDAD NO DRENADA Y TRANSFORMACIÓN DE FASE

El estado de inestabilidad no drenada está asociado con el comienzo de la deformación de flujo o licuefacción, en otras palabras; es el punto en que la resistencia alcanza un máximo local y temporal (Murthy et al., 2007). La Figura 2.7 muestra que, al unir los puntos de inestabilidad en el espacio  $p'$ - $q$ , se define una única línea denominada Línea de Inestabilidad No Drenada (Yamamuro, 1993; Bopp, 1994; Yamamuro & Lade, 1997).

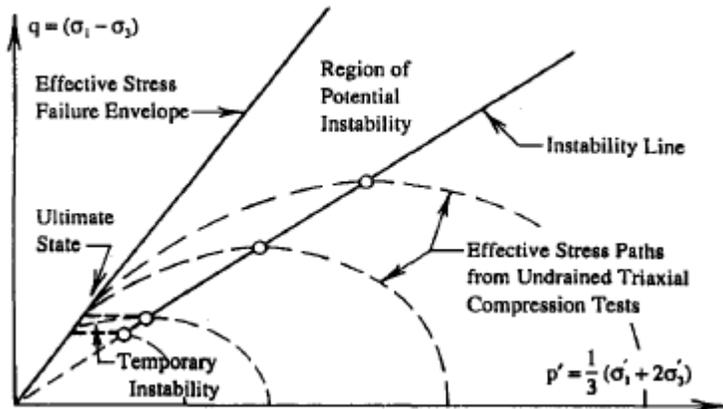


Figura 2.7: Diagrama esquemático de la locación de la línea de inestabilidad (Lade & Bopp, 1997)

Pasado el punto de máximo “q”, la arena se vuelve inestable (Yamamuro & Lade, 1998) y puede mantener esa inestabilidad hasta la falla, presentando una “*falla de flujo*”. Para que el suelo exhiba este tipo de comportamiento, el estado al final de la consolidación debe estar significativamente a la derecha del correspondiente estado último (Mohamad & Dobry, 1988), como ocurre con los puntos D, E y F en la Figura 2.1, aumentando la caída de resistencia con la presión de confinamiento (Yamamuro & Lade, 1998). Por otra parte, para los estados que no se encuentran lo suficientemente lejos del estado último (punto C en Figura 2.1) la arena muestra una inestabilidad temporal, alcanzando el pseudo estado último, y posterior al punto de transformación de fase comienza a dilatar, volviéndose estable nuevamente, mostrando una “*falla con deformación limitada*” (Mohamad & Dobry, 1988).

El punto de transformación de fase corresponde al estado en que una arena pasa de mostrar un comportamiento contractivo a uno dilatante y se caracteriza como el cambio de dirección de la trayectoria efectiva, como esquematiza la Figura 2.8. Primeramente, el suelo al ser cargado de forma no drenada responde contractivamente, generando un aumento de la presión de poros, hasta alcanzar un mínimo valor de presión efectiva, el cual está asociado al estado de transformación de fase (Ishihara et al., 1975). Desde este punto en adelante, la respuesta en términos de tensión-deformación muestra un incremento en la resistencia hasta alcanzar el estado último.

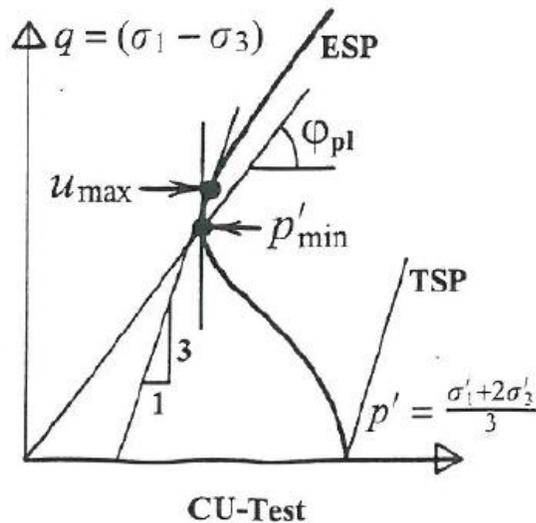


Figura 2.8: Diagrama esquemático del estado de transformación de fase en solicitaciones no drenadas sobre arenas (Lade & Ibsen, 1997).

### 2.1.2. LICUEFACCIÓN ESTÁTICA

En lo referente a licuefacción de arenas, existen -al menos- dos diferentes fenómenos que deben ser distinguidos: 1) falla de flujo o licuefacción verdadera, y 2) movilidad cíclica (Verdugo & Ishihara, 1996). El fenómeno definido como licuefacción verdadera está caracterizado por un rápido incremento de la presión de poros, seguido de una repentina pérdida de resistencia hasta alcanzar un valor residual (Figura 2.9b). El término movilidad cíclica denota la respuesta cíclica no drenada de un suelo, donde no hay pérdida de resistencia, pero sí una pérdida significativa de rigidez.

La Figura 2.9a presenta un resumen de los estados iniciales sujetos a falla de flujo y movilidad cíclica en el espacio  $p'$ - $e$ . La trayectoria C-A corresponde a una muestra que presenta licuefacción verdadera, la cual puede ser gatillada bajo carga cíclica o monótona, como esquematiza la Figura 2.9b, siendo en este último modo de carga cuando se denomina Licuefacción Estática (Kramer & Seed, 1988). Este fenómeno ocurre solo en muestras contractivas y para estados ubicados significativamente a la derecha del correspondiente estado último (Mohamad & Dobry, 1988). Por otra parte, la trayectoria D-B corresponde a movilidad cíclica, donde el efecto de una carga cíclica en una muestra densa lleva a un decrecimiento de la presión media hasta alcanzar el cero (Castro & Poulos, 1977).

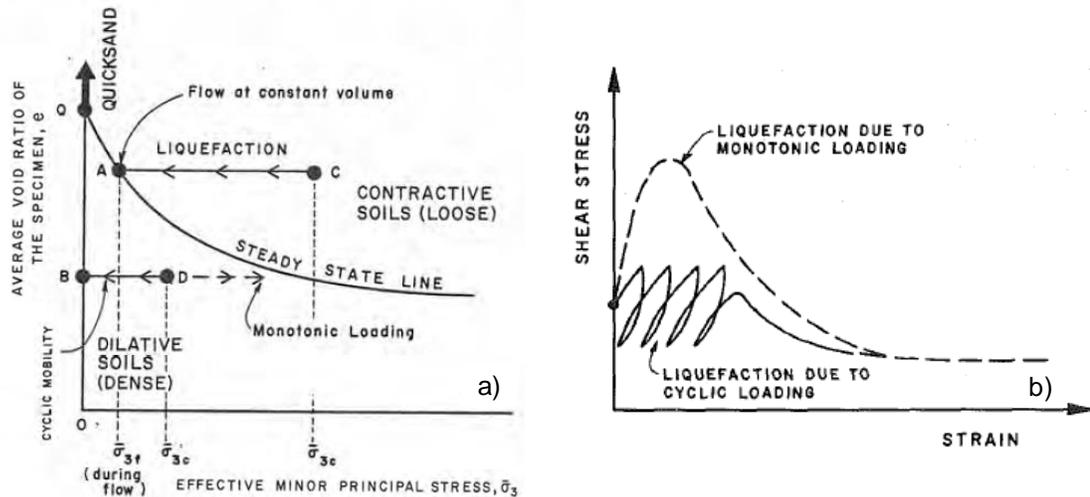


Figura 2.9: a) Trayectorias no drenadas para falla de flujo y movilidad cíclica en el espacio  $p'$ - $e$  (Castro & Poulos, 1977). b) Trayectorias monótona y cíclica para falla de flujo en el espacio  $p'$ - $q$  (Poulos et al., 1985).

## 2.2. EFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS

En la naturaleza, y también en relaves, los suelos arenosos contienen una significativa cantidad de finos. Sin embargo, los principales estudios en comportamiento de arenas se limitan a arenas relativamente limpias (Thevanayagam & Mohan, 2000). Por esto, diversos autores (Polito & Martin, 2001, 2003; Thevanayagam, 2000, 2002; Thevanayagam & Mohan, 2000; Thevanayagam, 1998; Yamamuro & Lade, 1998; Yamamuro & Covert, 2001; Lade & Yamamuro, 1997; Lade et al., 1998; Lade, 1998; Cubrinovski & Ishihara, 2002) se han enfocado en estudiar cómo la presencia de finos no plásticos afecta características de la arena como la fábrica, compresibilidad, respuesta tensión-deformación, estado último y potencial de licuefacción.

### 2.2.1. EFECTO SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA ARENA ( $e_{max}$ y $e_{min}$ ) Y EL CONTENIDO DE FINOS LÍMITE

Dependiendo del contenido de finos con respecto a un denominado *contenido de finos límite* o  $f_{cth}$  (finos content threshold), el comportamiento de mezclas arena-finos puede ser separado en dos: 1) Cuando el contenido de finos es menor al  $f_{cth}$ , el comportamiento mecánico estará controlado por la fracción gruesa, y 2) Cuando el contenido de finos es mayor al  $f_{cth}$ , es gobernado por la fracción fina. Se ha propuesto que el valor del  $f_{cth}$  está entre 20% y 40% (Thevanayagam & Mohan, 2002; Yang et al., 2005, 2006; Polito & Martin, 2001, 2003).

La transición en comportamiento se puede relacionar directamente con el comportamiento de los índices de vacío máximo y mínimo con la variación del contenido de finos. Diversos autores (Lade et al., 1998; Yang et al., 2006; Cubrinovsky & Ishihara, 2002; Polito & Martin, 2001; 2003) se han enfocado en estudiar el efecto del contenido de finos sobre estos estados límites reportando un comportamiento similar. Primero, al aumentar el contenido de finos, inicialmente los valores de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  decrecen hasta un

valor mínimo. Luego, al seguir incrementando el porcentaje de finos, comienzan a crecer constantemente hasta alcanzar su valor máximo para 100% de finos.

La Figura 2.10 muestra la variación de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  para arena de Cambria con distintos contenidos de finos no plásticos, donde se observa el comportamiento descrito. Se propone que, en un principio, los finos llenan los espacios vacíos entre las partículas de arena, disminuyendo el índice de vacíos, pero no participando en la cadena de esfuerzos, lo cual explicaría porque para contenidos de finos menores al  $f_{cth}$ , es la fracción gruesa la que controla el comportamiento. Posteriormente, los índices de vacío alcanzan su mínimo en una zona de transición entre un 20% y 40% de finos, coincidente con el rango donde estaría el  $f_{cth}$ . En esta zona, los finos comienzan a separar a los granos de arena, ubicándose entre los contactos, aumentando  $e_{max}$  y  $e_{min}$ . Posterior a esta zona de transición, el valor de los índices de vacío continúa aumentando y las partículas de arena ya no se encuentran en contacto, explicando porque para contenidos de finos mayores al  $f_{cth}$  es la fracción fina quien gobierna el comportamiento (Yamamuro & Covert, 2001; Cubrinovski & Ishihara, 2002; Biscontin et al., 2017).

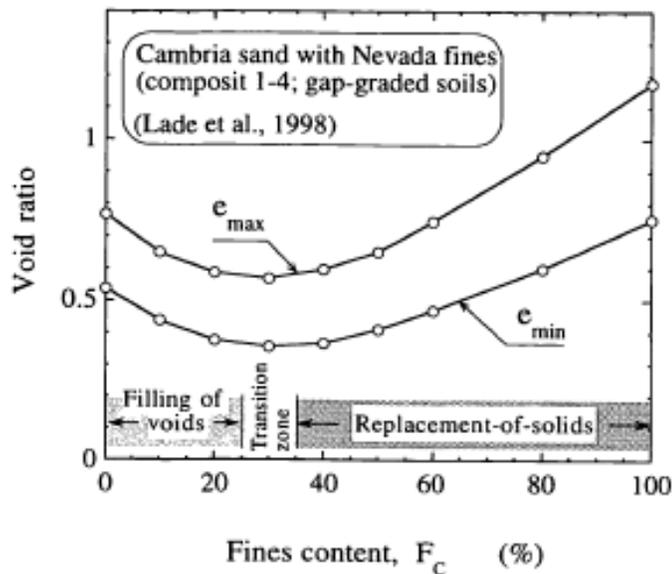


Figura 2.10: Variación de los índices de vacío máximo y mínimo con el contenido de finos (Cubrinovsky & Ishihara, 2002).

## 2.2.2. EFECTO SOBRE LA RESPUESTA MECANICA

### 2.2.2.1. COMPRESIBILIDAD

Ensayos previos de compresión unidimensional (Lade et al., 1998) y compresión isotrópica (Bandini & Sathiskumar, 2009; Yamamuro & Covert, 2001) en arenas con finos, han mostrado que, al aumentar el contenido de finos, aumenta la compresibilidad del suelo. La Figura 2.11 muestra la compresibilidad volumétrica para distintos contenidos de finos obtenida a través de ensayos de compresión vertical realizados por Lade et al. (1998), donde se observa claramente que, al aumentar el contenido de finos, independiente de la densidad relativa, aumenta la compresibilidad, sin embargo, el efecto de los finos se hace menor al aumentar la densidad.

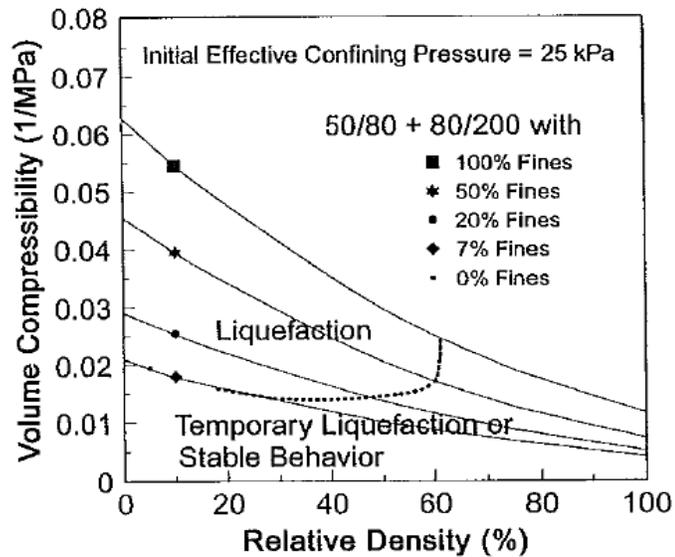


Figura 2.11: Efecto del contenido de finos y densidad relativa en la compresibilidad volumétrica de la arena de Nevada (Lade, Liggio, & Yamamuro, 1998).

Yamamuro y Covert (2001) indican que el aumento en la compresibilidad producto de los finos se debe separar en dos fenómenos distintos: uno para un bajo contenido de finos y otro para un alto contenido de finos. Para un bajo contenido de finos (menor al  $f_{cth}$ ), y en estado suelto, se genera una estructura meta-estable, propuesta por Terzaghi en 1956, donde las partículas finas se ubican en los contactos de los granos de arena, como se esquematiza en la Figura 2.12a, generando un esqueleto colapsable. Al momento de aplicar un esfuerzo, los finos se moverán hacia los espacios vacíos, provocando grandes cambios volumétricos en condición drenada o un rápido aumento en la presión de poros en condición no drenada (Yamamuro & Covert, 2001; Yamamuro & Lade, 1998; Lade & Yamamuro, 1997a, 1997b). En estados más densos, los finos estarían ubicados en una estructura más estable, no aportando significativamente a la compresibilidad (Yamamuro & Covert 2001; Córdova, 2017).

Para un alto contenido de finos (sobre el  $f_{cth}$ ), la estructura generada en depositaciones sueltas se esquematiza en la Figura 2.12b. Se observa que los granos de arena se encuentran distanciados sin contacto entre ellos, por lo tanto, al aplicar un esfuerzo, el cambio volumétrico será atribuido en mayor medida a la compresibilidad de las partículas finas. Una vez densificada la muestra, se tiene que las partículas de arena siguen sin un contacto completo, por lo que son las partículas finas quienes conforman la matriz resistente.

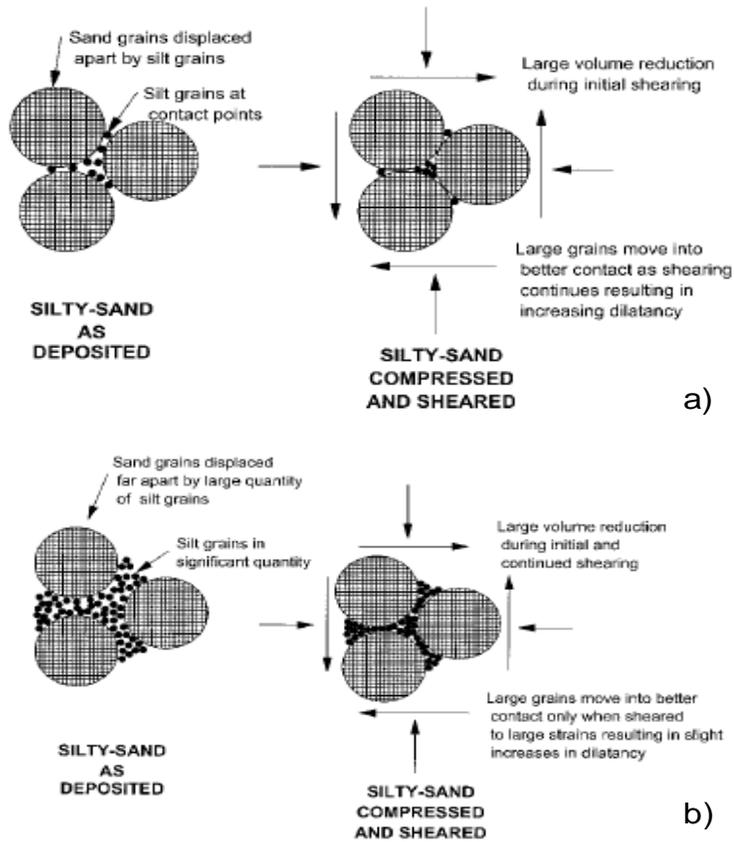


Figura 2.12: Diagrama esquemático estructuras para arenas con finos, a la izquierda: antes del ensayo, a la derecha: después del ensayo: a) Arenas sueltas con bajo contenido de finos. b) Arenas sueltas con alto contenido de finos (Yamamuro & Covert, 2001).

### 2.2.2.2. LICUEFACCIÓN ESTÁTICA E INESTABILIDAD NO DRENADA

El aumento del contenido de finos, por debajo del  $f_{c_{th}}$ , conduce a un incremento de la inestabilidad y del potencial de licuefacción en arenas (Cubrinovsky & Rees, 2008; Yamamuro & Covert, 2001; Yamamuro & Lade, 1997). La Figura 2.13 muestra ensayos en una arena natural con 1% de finos (FBM-1), 10% de finos (FBM-10) y 30% de finos (FBM-30) realizados por Cubrinovski y Rees (2008).

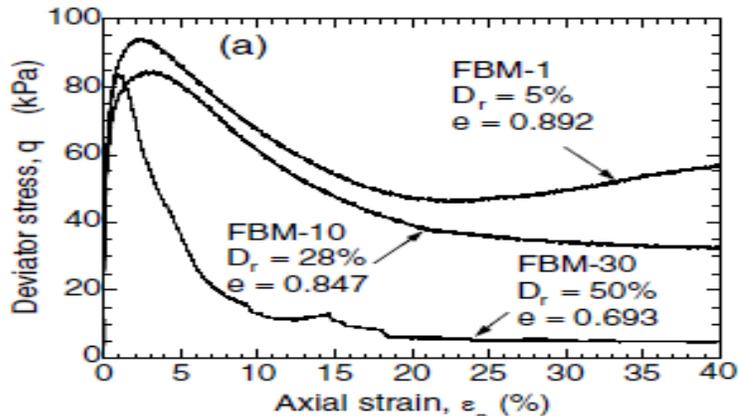


Figura 2.13: Curvas de esfuerzo-deformación para ensayos monótonos no drenados en arenas con diferentes contenidos de finos (Cubrinovski & Rees, 2008).

Se observa que la mezcla con 30% de finos (FBM-30) presenta la mayor caída de resistencia, seguida por la muestra con 10% de finos (FBM-10) y luego la arena limpia (FBM-1), pese a que las dos primeras cuentan con una mayor densidad relativa. Esto se explica a través de la misma estructura meta-estable, donde los finos se ubican entre los contactos de los granos de arena, promoviendo el deslizamiento relativo entre partículas más gruesas, lo cual se traduce en un mayor incremento de la presión de poros al no poder variar el volumen.

Por otra parte, hay autores (Yamamuro & Lade, 1997, 1998; Lade & Yamamuro, 1997; Yamamuro & Covert, 2001) que proponen que las arenas limosas exhiben un comportamiento no drenado distinto al de arenas limpias. Para un rango medio de presiones, las arenas con finos exhiben un comportamiento estable, y a medida que la presión se aleja de esta vecindad, ya sea hacia mayores o menores confinamientos, aumenta la inestabilidad como esquematiza la Figura 2.14.

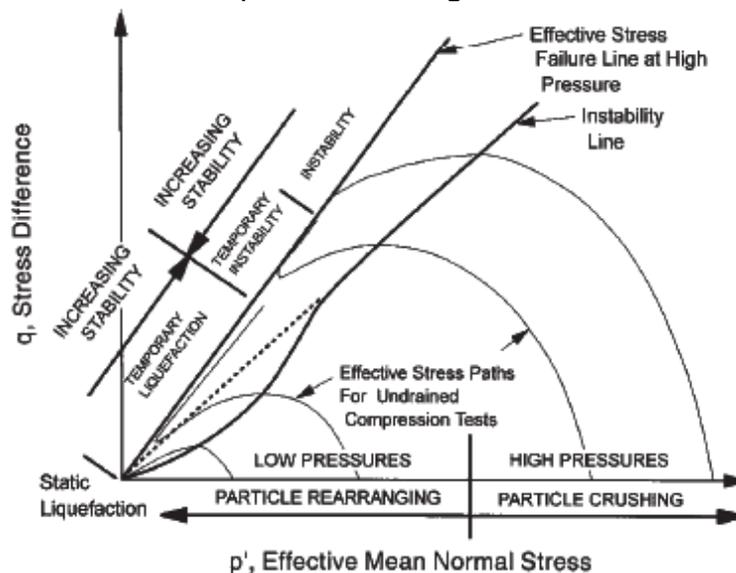


Figura 2.14: Trayectorias no drenadas de esfuerzos efectivos para arenas con finos (Lade & Yamamuro, 1997).

### 2.2.2.3. ESTADO ÚLTIMO

Estudios experimentales realizados por diversos autores (Yang et al., 2006; Cubrinovsky & Rees, 2008; Yang et al., 2005; Murthy et al., 2007) muestran que al agregar finos hasta un porcentaje menor al 30%, la línea de estado último se desplaza hacia menores índices de vacíos en el espacio  $e-p'$ , mientras que si se sigue aumentando el porcentaje de finos, esta comienza a desplazarse hacia mayores índices de vacío, como muestra la Figura 2.15a. Sin embargo, las partículas finas, sea por su tamaño, naturaleza o posición, pueden no participar en la transmisión de tensiones, por lo tanto, el espacio que estas ocupan debiese considerarse como vacío. A partir de esto, es posible deducir el concepto de índice de vacíos intergranular ( $e_g$ ), el cual considera a las partículas finas como vacíos y se obtiene con la Ecuación 2-1 (Ni et al., 2004).

$$e_g = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad 2-1$$

A su vez, Thevanyagam y Mohan (2000) propusieron el índice interfino ( $e_f$ ), análogo al índice intergranular, pero para contenidos de finos superiores al  $f_{c_{th}}$ , donde estos componen la matriz resistente y los gruesos no contribuirían significativamente en el comportamiento. La Figura 2.15b muestra los mismos ensayos que la Figura 2.15a pero considerando los índices de vacío intergranular e interfino. Se observa que para contenidos de finos entre 0-30%, los estados últimos caen sobre una única línea. Lo mismo pasa para contenidos de finos entre 50%-94%: Por lo tanto, podría considerarse una línea de estado último para bajos contenidos de fino, ósea menores al  $f_{c_{th}}$  y otra para porcentajes de finos mayores.

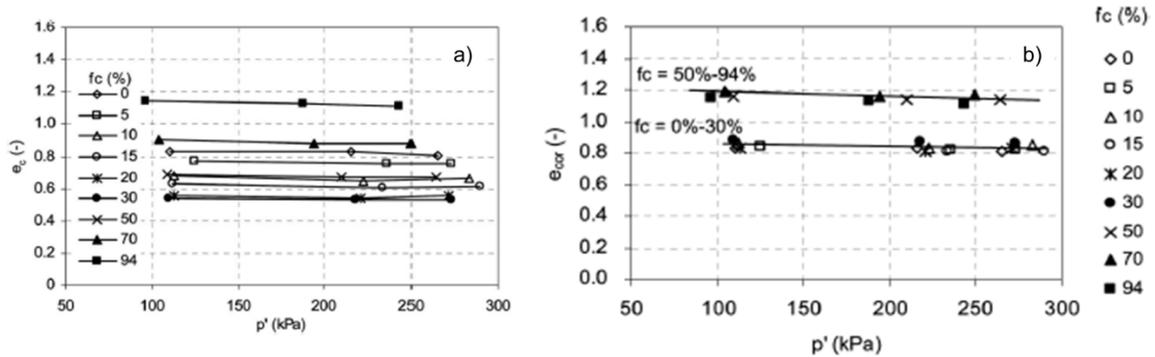


Figura 2.15: a) Líneas de estado último para muestras de arena con contenido de finos entre 0%-94%. b) Líneas de Estado Último para muestras de arena con contenido de finos entre 0%-94% considerando el índice de vacíos corregido ( $e_s$  y  $e_f$  según corresponda). (Yang et al., 2006).

Sin embargo, el índice de vacíos intergranular considera toda la fracción fina como no activa, lo cual no siempre es válido (Thevanayagam, 1998). Así, se introdujo el concepto de finos activos representados a través del parámetro “b”, el cual corresponde a la fracción de los finos que participaría en la transmisión de tensiones. Se propuso el índice de vacíos equivalente ( $e^*$ ), el cual se obtiene con la Ecuación 2-2. La Figura 2.16 esquematiza los conceptos de índices intergranular y equivalente.

$$e^* = \frac{e + (1 - b)f_c}{1 - (1 - b)f_c} \quad 2-2$$

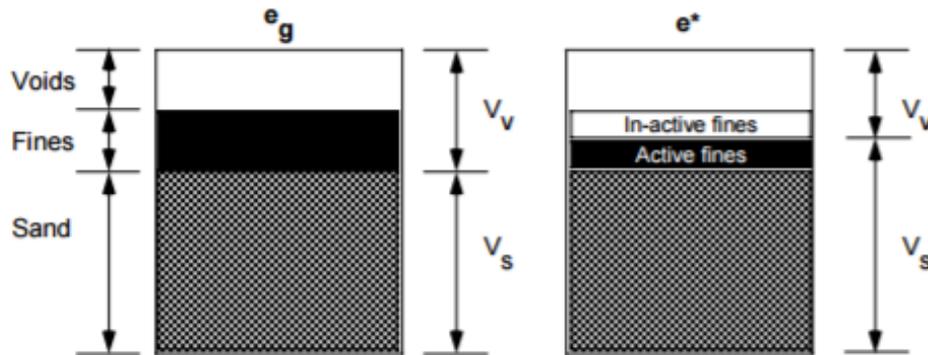


Figura 2.16: Diagrama de fase mostrando los conceptos de índice de vacíos intergranular ( $e_g$ ) y el índice de vacíos equivalente ( $e^*$ ) (Cubrinovský & Rees, 2008)

Este índice de vacíos equivalente podría utilizarse como variable de estado en vez del índice de vacíos comúnmente utilizado, y poder predecir el comportamiento de arenas con distintos contenidos de finos. Sin embargo, la predicción del parámetro  $b$ , clave en el cálculo de  $e^*$ , ha sido problemática y controversial y, en la mayoría de los casos, los valores reportados son determinados con el fin de correlacionar las líneas de estado último o resistencia cíclica para distintos contenidos de finos. Lo anterior significa que dichos valores son obtenidos a través de retro-análisis y específicos para esos casos, y no predichos (Rahman et al., 2008). Por lo tanto, es fundamental primero entender este parámetro y su comportamiento antes de poder predecir la respuesta de mezclas arena-finos en base a este.

## **2.3. ROTURA DE PARTÍCULAS**

La rotura de partículas es uno de los principales fenómenos en medios particulados sometidos a altas presiones (Miura & Yamanouchi, 1975). Las propiedades ingenieriles de estos materiales, como el comportamiento tensión – deformación, resistencia, compresibilidad y desarrollo de presión de poros, y variación en la permeabilidad, dependen de la integridad de las partículas o la cantidad de rotura de partículas que ocurre producto de un cambio en el estado tensional (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996).

### **2.3.1. FACTORES QUE AFECTAN LA ROTURA DE PARTÍCULAS**

Existen diversos factores que afectan el comienzo, desarrollo y nivel de la rotura de los granos en un material granular. Estos están directamente relacionados con los tres estados que lo componen: sólido, líquido y gaseoso, además de la organización de los granos y el estado tensional (Mesri & Vardhanabuthi, 2002; Coop & Lee, 1993; Hagerty et al., 1993).

#### **2.3.1.1. MINERALOGÍA**

El comienzo y la cantidad de rotura de partículas, está directamente relacionada con la dureza de la partícula (Coop & Lee, 1992; Lade, Yamamuro & Coop, 1996; Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005). Mientras mayor sea la dureza de la partícula, mayor será la resistencia de esta, por lo tanto, menor será la rotura (Lo & Roy, 1973). Mesri y Vardhanabuthi (2002) reportan que, en compresión isotrópica, una arena carbonítica presenta rotura explosiva de partículas a 0,3 MPa de confinamiento, mientras que para una arena de cuarzo ocurre a 30 MPa.

#### **2.3.1.2. TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA Y GRANULOMETRÍA INICIAL**

La cantidad de rotura de partículas aumenta al incrementar el tamaño de las partículas (Lee & Farhoomand, 1967; Hardin, 1985; Hagerty et al., 1993). Esto resulta del hecho que, a mayor tamaño de partícula, aumenta la probabilidad de encontrar fallas o defectos en la superficie, siendo así más propensa a la rotura (Lade, Yamamuro & Bopp, 1996; Hardin, 1985). Por otra parte, para un mismo tamaño de partícula máximo, un material bien graduado presenta un mayor número de interacción entre partículas, disminuyendo las tensiones de contacto, por ende, presentará menor cantidad de rotura que un material

mal graduado, donde existen menos contactos (Lee & Farhoomand, 1967; Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005).

### 2.3.1.3. ANGULOSIDAD DE LAS PARTÍCULAS

Para un mismo tamaño medio, al aumentar la angularidad de una partícula, la rotura también aumenta (Lee & Farhoomand, 1967; Lade, Yamamuro & Bopp, 1996; Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005). Las partículas angulares se rompen más fácilmente porque la transmisión de fuerzas se genera en sus cantos angulosos, zonas de menor área, concentrando las tensiones. Además, Hagerty et al. (1993) proponen que en partículas angulares se generan cargas excéntricas que producen esfuerzos de tracción y corte, no así en partículas redondeadas donde la transmisión de tensiones es a través de esfuerzos de compresión que van directo a los centros de las partículas. La Figura 2.17 esquematiza esto último.

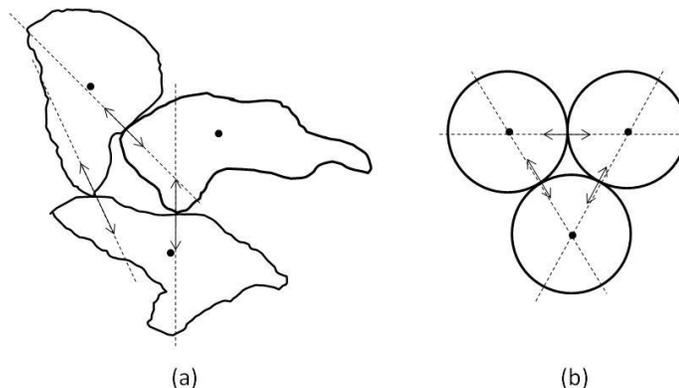


Figura 2.17: Dirección de las fuerzas de contacto entre: a) Partículas angulosas, b) Partículas redondeadas (Maureira, 2012).

### 2.3.1.4. DENSIDAD INICIAL

Se espera que la cantidad de rotura de partículas decrezca al aumentar la densidad del material (Hardin, 1985; Lade, Yamamuro y Bopp, 1996). También, se ha observado que la rotura comienza a un menor esfuerzo en materiales sueltos (Hagerty et al., 1993). Los dos fenómenos anteriores se deben a que, a mayor densidad, incrementa el número de contactos entre partículas lo cual disminuye las tensiones de contacto.

### 2.3.1.5. NIVEL TENSIONAL Y TRAYECTORIA DE TENSIONES

La cantidad de rotura es afectada por el nivel, la magnitud y la trayectoria de esfuerzos (Lade, Yamamuro y Bopp, 1996; Gupta, 2009). Diversos autores (Bishop, 1966; Lee & Farhoomand, 1967; Coop, 1993; Bopp & Lade, 1997) han mostrado que la cantidad de rotura es mayor durante la etapa de corte que en la de consolidación.

La Figura 2.18 muestra las granulometrías post consolidación y post corte para un mismo material y para dos niveles de confinamiento. Se observa primero que, a mayor confinamiento, mayor la rotura, y para un mismo confinamiento, la rotura es mayor para la etapa de corte.

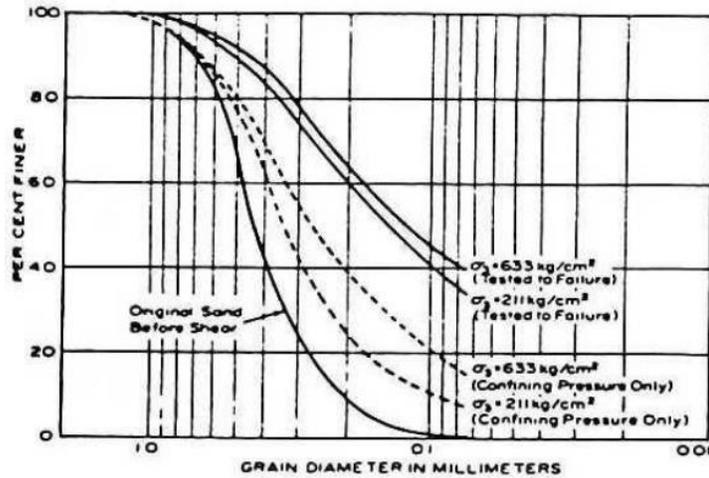


Figura 2.18: Efecto de la consolidación isotrópica y la aplicación del corte en la rotura de partículas (Vesic & Clough, 1968)

El drenaje juega un rol importante en la rotura de partículas. La Figura 2.19 muestra ensayos triaxiales drenados y no drenados en una arena de sílice natural, realizados por Yu (2017). Aquí, se observa que la rotura es mayor en ensayos drenados. Este se debe a que el esfuerzo efectivo impuesto sobre las partículas es mucho mayor en este tipo de ensayos en comparación con ensayos no drenados.

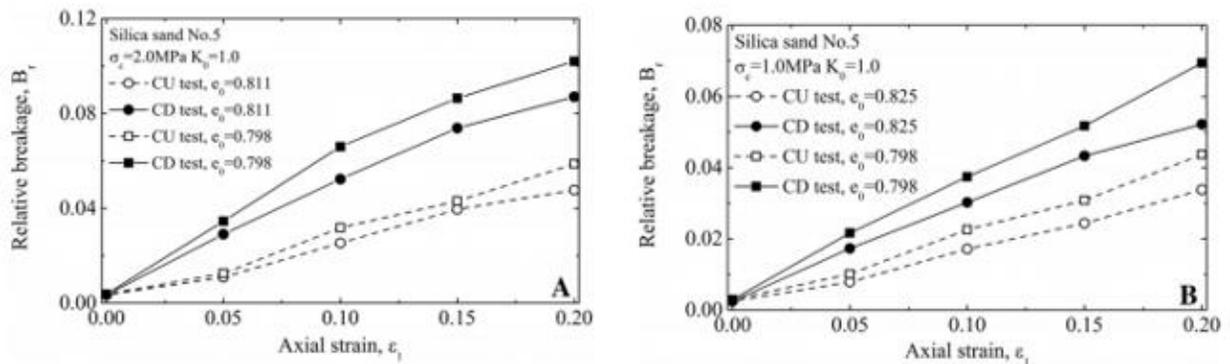


Figura 2.19: Rotura de partículas para distintos índices de vacío iniciales: a) Confinamiento inicial de 2MPa, b) Confinamiento inicial de 1MPa (Yu, 2017).

### 2.3.1.6. ENERGÍA

Se ha demostrado que, al aumentar el nivel de confinamiento, de corte o de deformaciones, el nivel de rotura de partículas aumenta, independiente del tipo de ensayo (Bopp & Lade, 2005). La energía total aplicada es calculada en base a los esfuerzos y deformaciones producidas durante un ensayo, por lo que este parámetro incluiría el efecto de la trayectoria de tensiones y el tipo de ensayo. Es así, que diversos autores (Miura & O-hara, 1979; Lade, Yamamuro & Bopp, 1996; Bopp & Lade, 2005) han encontrado una clara correlación entre el nivel de rotura de partículas y la cantidad de energía total aplicada, como muestran la Figura 2.20.

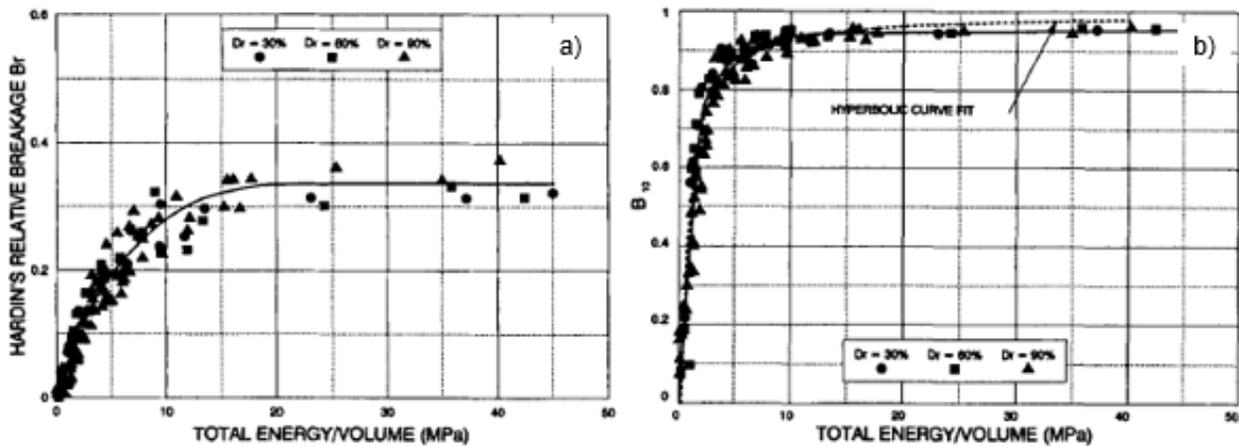


Figura 2.20: Relación entre dos parámetros de rotura y la energía total por unidad de volumen aplicada para ensayos drenados y no drenados; a) Parámetro de rotura de Hardin (1985), b) Parámetro rotura de Lade, Yamamuro & Bopp (1996) (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996).

### 2.3.2. CUANTIFICACIÓN DE LA ROTURA DE PARTÍCULAS

Diversos autores han desarrollado cuantificadores de rotura basados en las granulometrías pre y post ensayo. Si existe rotura, habrá una variación en la distribución granulométrica del material post ensayo (Campaña, 2011). Marsal (1965) desarrollo su parámetro de rotura como la suma de las diferencias en peso retenido en cada tamiz pre y post ensayo. Lee & Farhoomand (1967) desarrollaron el parámetro  $B_{15}$ , el cual corresponde a la razón de tamaños del 15% de las muestras más finas pre y post ensayo. En base a este, Lade et al. (1996) desarrollaron el parámetro  $B_{10}$  que compara los tamaños del 10% más fino pre y post ensayo como indica la Ecuación 2-3.

$$B_{10} = 1 - \frac{D_{10f}}{D_{10i}} \quad 2-3$$

Donde:

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

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

Hardin (1985) definió su parámetro de rotura como la razón entre la rotura potencial y la rotura total. La rotura potencial corresponde al área entre la curva granulométrica original y una vertical trazada para un tamaño de partícula de 0,075mm. La rotura total corresponde al área encerrada por la curva granulométrica inicial y la curva granulométrica después del ensayo. La Figura 2.21a muestra estas dos áreas y además resume los parámetros antes descritos. Otro parámetro propuesto por Miura y Yamanuichi (1975) que permite medir el nivel de rotura, es el área superficial de las partículas. Este parámetro considera la superficie específica de las partículas, la cual es altamente sensible al tamaño de partícula. La Figura 2.21b muestra la variación de la superficie específica de una esfera en función de su radio  $r$ .

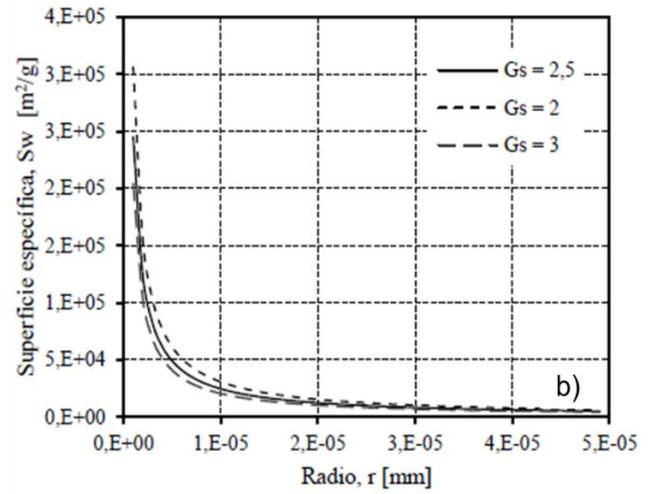
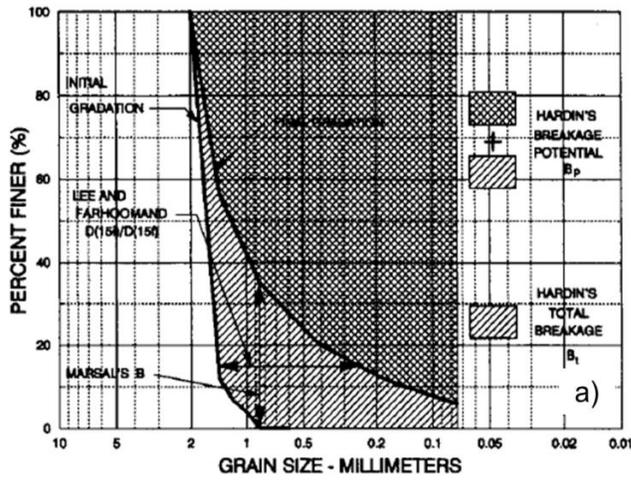


Figura 2.21: a) Resumen de los parámetros de rotura de partículas propuestos por Marsal (1967), Lee & Farhoomand (1967) y Hardin (1985) (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996). b) Superficie específica en función del radio de una partícula esférica para 3 casos de gravedad específica,  $G_s$  (Bravo, 2018).

### 3. EQUIPOS, MATERIAL ENSAYADO Y METODOLOGÍA

#### 3.1. EQUIPOS UTILIZADOS

##### 3.1.1. TRIAXIAL DE BAJAS PRESIONES

El equipo triaxial de bajas presiones disponible en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile, permite realizar ensayos triaxiales monótonos en compresión y extensión. El sistema cuenta con una línea de presión de aire presurizado máxima de 0.7 MPa y es posible ensayar probetas de 5cm de diámetro y 10cm de altura hasta presiones de confinamiento efectivo de 0.6 MPa.

La Figura 3.1 muestra el marco de carga y el panel de control de presiones de cámara y contrapresión. La Tabla 3.1 resume las características del equipo.

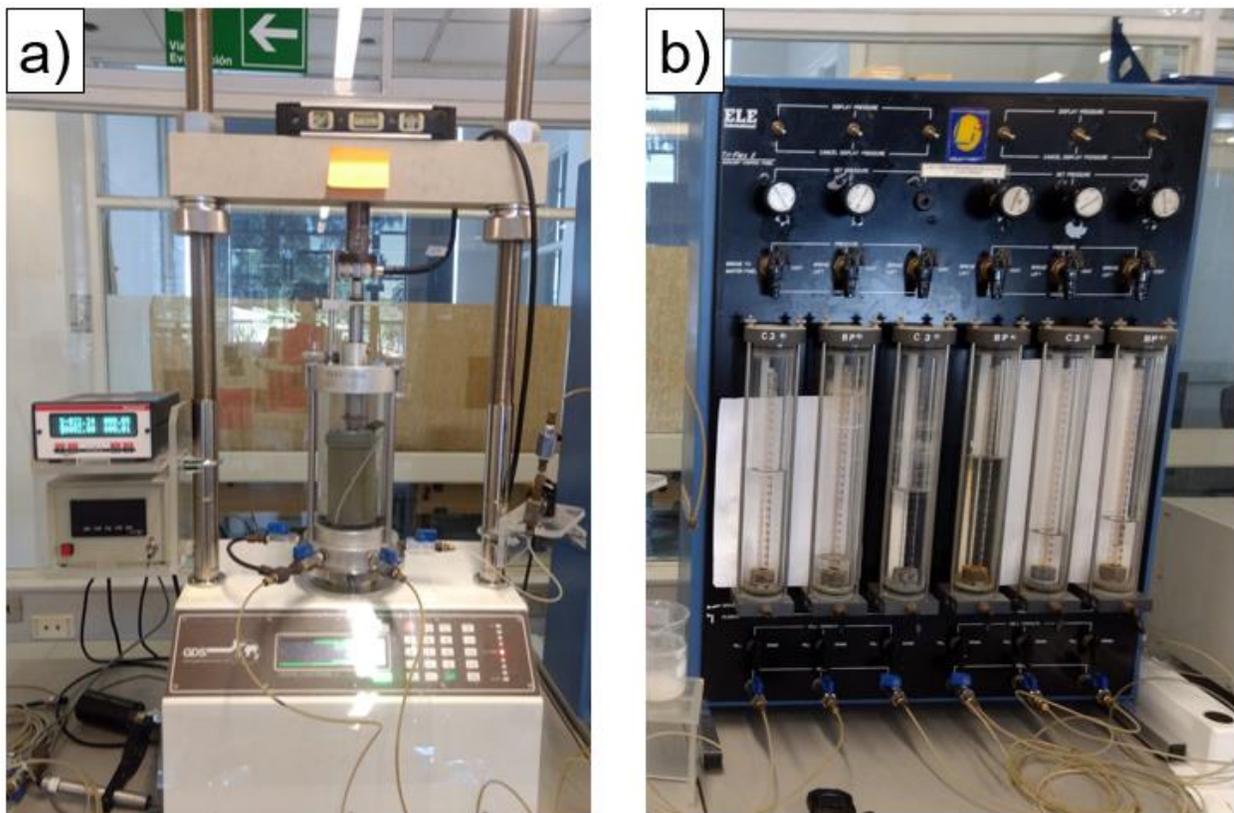


Figura 3.1: Triaxial de bajas presiones. a) Maco de carga. b) Panel de control de presiones de cámara y contrapresión.

Tabla 3.1: Características del equipo Triaxial de bajas presiones.

Características	
Tipo de ensayo	Tx CIU y CID en compresión y extensión
Tipo de carga	Deformación controlada
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]	0.12-40
Dimensión de las probetas d/h [cm/cm]	5/10
Tamaño máximo de partículas [mm]	16
Deformación axial máxima [mm]	25

### 3.1.2. TRIAXIAL DE ALTAS PRESIONES

Los ensayos realizados con confinamiento efectivo inicial mayor a 0.5 MPa, se realizaron en el equipo triaxial de altas presiones (Figura 3.2) diseñado e implementado por Solans (2010). Disponible en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. El equipo permite realizar ensayos triaxiales monótonos en compresión y extensión a deformación controlada, y ensayos cíclicos a carga controlada.

El sistema cuenta con una bomba hidráulica capaz de entregar presiones de hasta 6 MPa, y para presiones de cámara menores a 0.7 MPa y contrapresión, se utiliza la línea de aire presurizado disponible en el laboratorio. El equipo permite ensayar probetas con confinamientos efectivos máximos de 5MPa. La Tabla 3.2 resume las características del equipo.

Tabla 3.2: Características del equipo Triaxial de altas presiones.

Características	
Tipo de ensayo	- Tx CIU y CID en compresión y extensión - Tx. Cíclico
Tipo de carga	- Tx Monótono: Deformación controlada - Tx Cíclico: Carga controlada
Rango de presión de cámara [MPa]	0-7
Rango de contrapresión [MPa]	0-0.7
Carga axial máxima [ton]	20
Rango de velocidad de deformación [mm/min]	0.12-0.20
Dimensión de las probetas d/h [cm/cm]	5/10 – 10/20
Tamaño máximo de partículas [mm]	16
Deformación axial máxima [mm]	50



Figura 3.2: Equipo triaxial de altas presiones (Maureira, 2012).

### 3.1.3. MASTERSIZER 2000

El análisis granulométrico pre y post ensayo se realizó con el equipo Mastersizer 2000 (Figura 3.3) disponible en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

El equipo se basa en el paso de partículas entre dos cristales circulares suspendidas en un líquido dispersante, en este caso agua. Se incide un láser calibrado y según el tipo de dispersante y tamaño de las partículas, se genera una difracción del láser, es decir, un cambio en su dirección. 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 (Maureira, 2012).

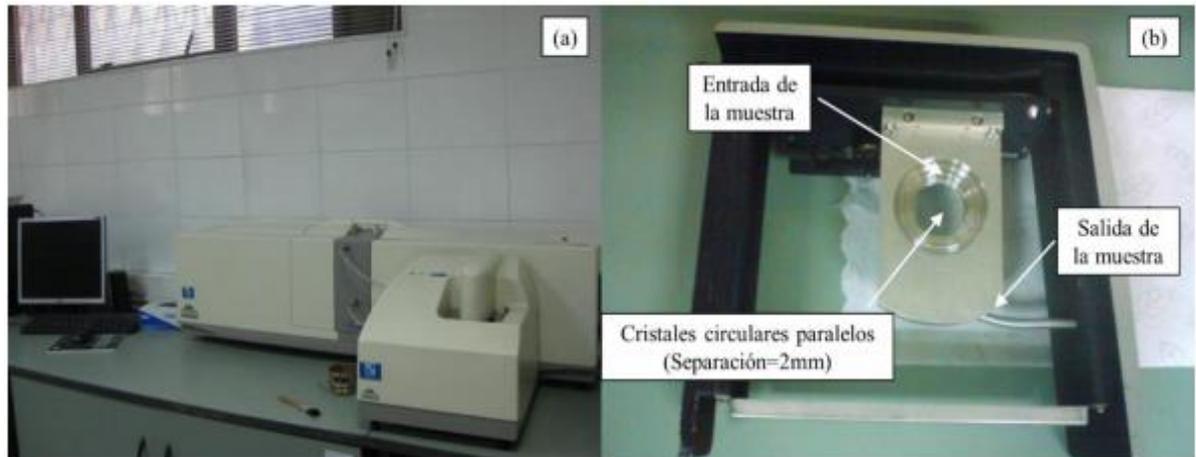


Figura 3.3: Equipo de análisis granulométrico. a) Equipo Mastersizer 2000. b) Sistema de circulación de mezcla arena-agua (Maureira, 2012).

## 3.2. MATERIALES UTILIZADOS

El material base es la arena proveniente del muro del tranque de relaves “El Torito”, de la mina de cobre “El Soldado” perteneciente a Angloamerican, ubicada en la V Región. Este corresponde a la fracción gruesa del proceso de tronadura, chancado y molienda de las rocas con minerales de cobre.

### 3.2.1. CLASIFICACIÓN GEOTECNICA MATERIAL BASE

El material 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 18% de finos no plásticos. La Figura 3.4 presenta una fotografía microscópica de la arena, mientras que la Figura 3.5 muestra la curva granulométrica obtenida a través de dos métodos: difracción laser y tamizado, además de los parámetros de clasificación geotécnica de la arena.

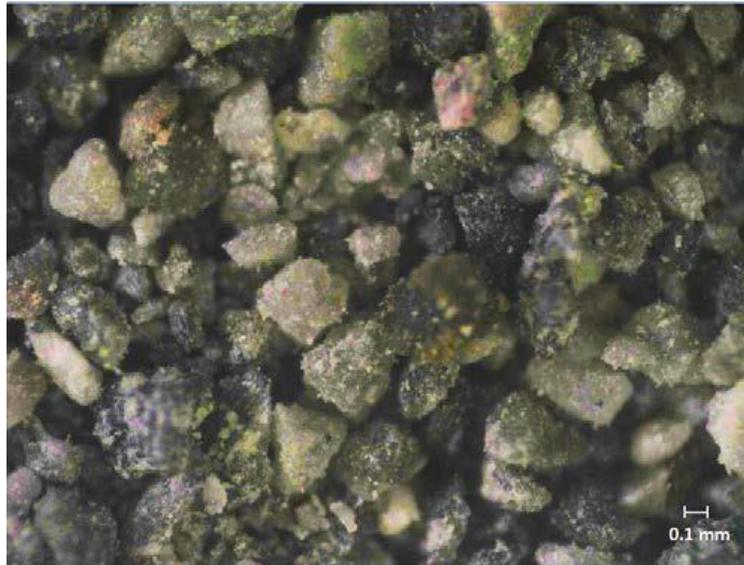


Figura 3.4: Fotografía microscópica de arena de relaves "El Torito" (Maureira, 2012).

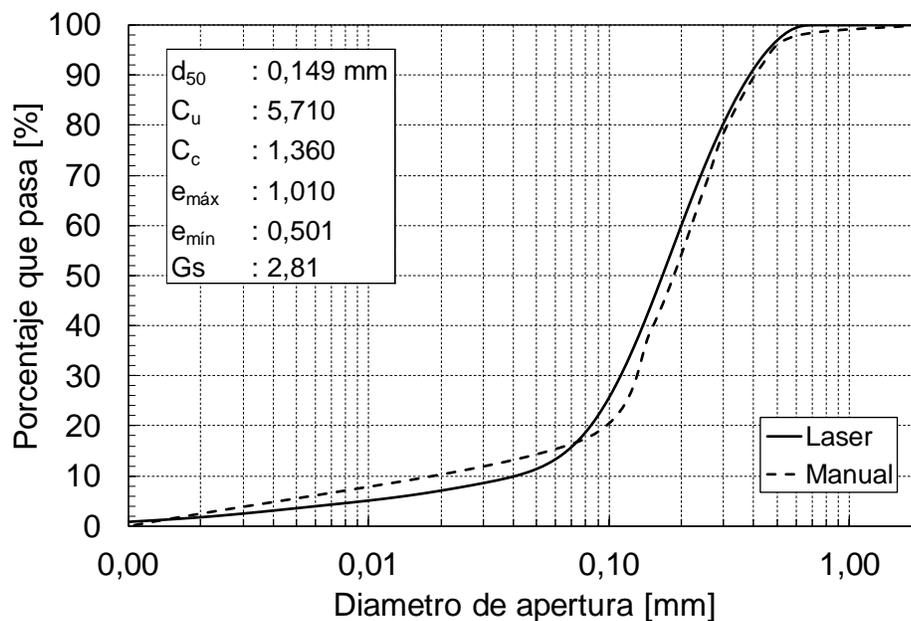


Figura 3.5: Curva granulométrica de la arena extraída del muro.

### 3.2.2. CLASIFICACIÓN GEOTECNICA DE LA ARENA CON DISTINTOS CONTENIDOS DE FINOS

Al material base se le realizó un tamizado por sobre la malla #200 para separar las fracciones fina y gruesa. Luego, la arena retenida se lavó para eliminar la mayor cantidad de finos. Después del lavado se obtuvo una arena limpia con un 1% de finos no plásticos. Con el material lavado y la fracción fina, se componen materiales arenosos con 1%, 20% y 40% de contenido de finos. La Figura 3.6 muestra las curvas granulométricas de los tres materiales y la Tabla 3.3 presenta su caracterización geotécnica.

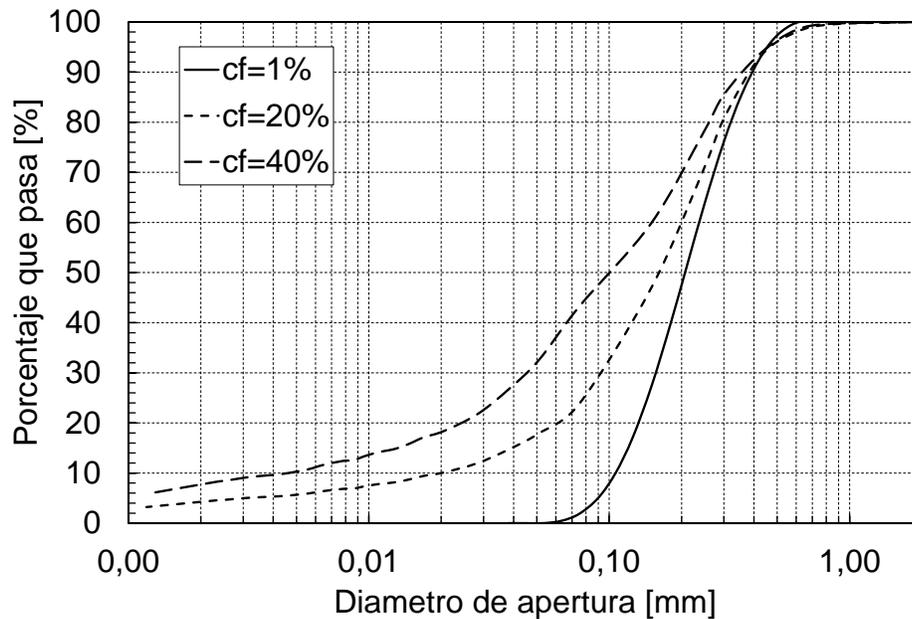


Figura 3.6: Curvas granulométricas de las arenas con 1%, 20% y 40% de finos.

Tabla 3.3: Caracterización geotécnica de arenas 1%, 20% y 40% de finos.

Parámetros	Contenido de finos [%]		
	1	20	40
d <sub>50</sub> [mm]	0.216	0.187	0.106
C <sub>u</sub> [-]	2.525	4.982	2.957
C <sub>c</sub> [-]	0.943	1.091	32.433
e <sub>máx</sub> [-]	1.215	1.125	1.090
e <sub>mín</sub> [-]	0.609	0.502	0.397
G <sub>s</sub> [-]	2.81	2.81	2.81

### 3.3. METODOLOGÍA ENSAYOS TRIAXIALES

#### 3.3.1. CONFECCIÓN DE LA PROBETA

La confección se lleva a cabo utilizando el método de compactación húmeda, el cual consiste en compactar capas de igual peso dentro del volumen determinado por el molde (Figura 3.7a). El peso de cada capa se obtiene de acuerdo con la densidad de confección, el volumen del molde y la humedad de confección. La humedad con la cual se elaboran las probetas es de 5%. Se ha reportado, que muestras confeccionadas a través de este método de compactación presentan comportamiento más contractivo en comparación con otras confecciones (Della et al., 2014; Juneja & Raghunandan, 2010). Además, Córdova (2017) reporta para el mismo material en estudio, que a través de este método de confección, se obtienen probetas de baja anisotropía.

La compactación se realiza utilizando una vara de madera, la cual cuenta con la altura de cada capa. Para probetas de baja densidad ( $DR < 50\%$ ) se compacta en cinco capas, mientras que, para obtener altas densidades ( $DR > 50\%$ ) en 10 capas. La última de ellas

se compacta utilizando unacrílico en forma de disco, el cual busca dejar la cara superior de la probeta lisa y horizontal. El peso de cada capa dependerá de la densidad relativa de confección deseada.

Ya finalizada la compactación de la probeta, se retira el molde, obteniendo una probeta cilíndrica de dimensiones aproximadas de 5cm de diámetro y 10cm de alto como se muestra en la Figura 3.7b. Luego, se cubre la probeta con la membrana de látex, ayudándose del porta-membrana (Figura 3.7c). A partir de la configuración de la Figura 3.7c se procede dependiendo del equipo triaxial a utilizar.

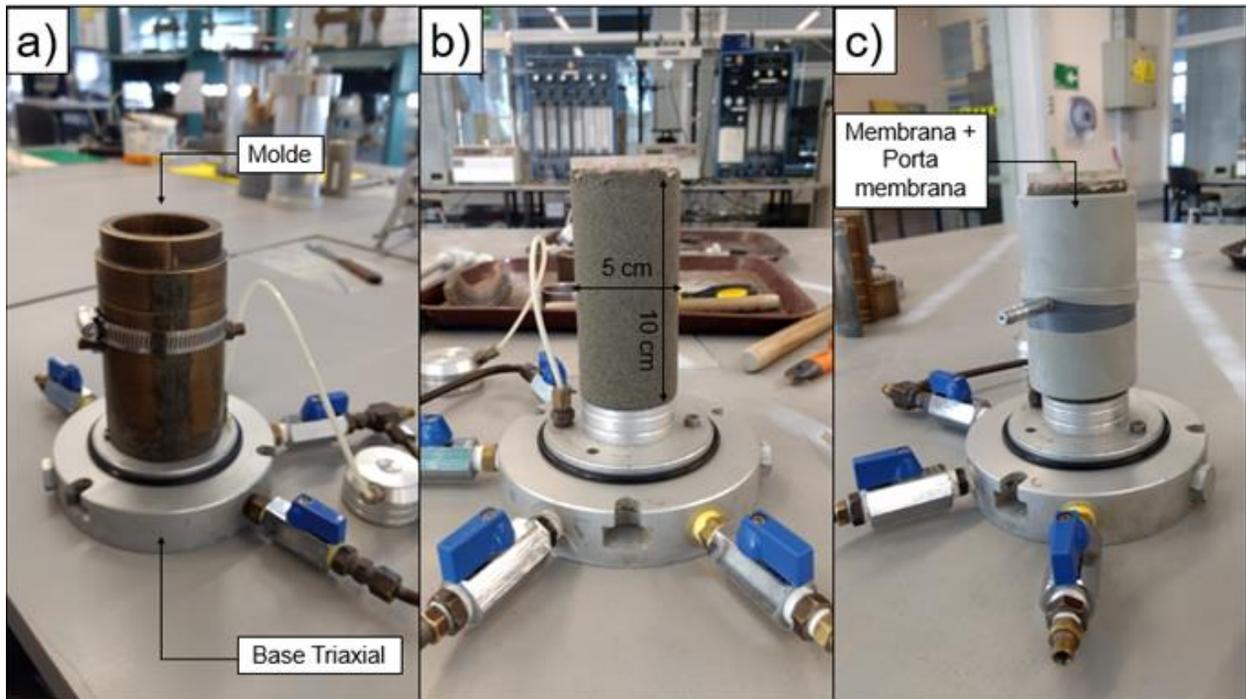


Figura 3.7: a) Molde de bronce para probetas montado sobre base triaxial de bajas presiones. b) Probeta desmoldada. c) Probeta cubierta por la membrana y el porta-membrana.

### 3.3.2. MONTAJE DE LA PROBETA EN EQUIPO TRIAXIAL

Se cuenta con dos equipos triaxiales que se utilizarán dependiendo del nivel de confinamiento deseado.

Triaxial de bajas presiones: Se utiliza para confinamientos efectivos de hasta  $5 \text{ kgf/cm}^2$ .

Como la probeta se elabora sobre la base de este triaxial, desde la configuración mostrada en la Figura 3.7c, se quita el porta-membrana y se monta la probeta en el equipo triaxial de bajas presiones. La Figura 3.9b muestra la probeta montada.

Triaxial de altas presiones: Se utiliza para confinamiento efectivos sobre  $5 \text{ kgf/cm}^2$  y hasta  $50 \text{ kgf/cm}^2$ .

Se traslada la probeta de la base del triaxial de bajas presiones hacia la base del triaxial de altas presiones, con el porta-membrana aún cubriendo la probeta, se ubica sobre el

cabezal inferior. Previamente, en cada cabezal se dispusieron bordes deslizantes para disminuir el roce de la probeta en los extremos y geotextiles cubriendo los conductos de agua (Figura 3.8).

Luego, se quita el porta-membrana, se baja el cabezal superior y se dispone la membrana sellando la probeta en ambos extremos con anillos elásticos (Figura 3.9a). Finalmente, se coloca el serpentín de cobre que conecta ambos extremos de la probeta y se baja la cubierta de acero completando la instalación de la probeta.

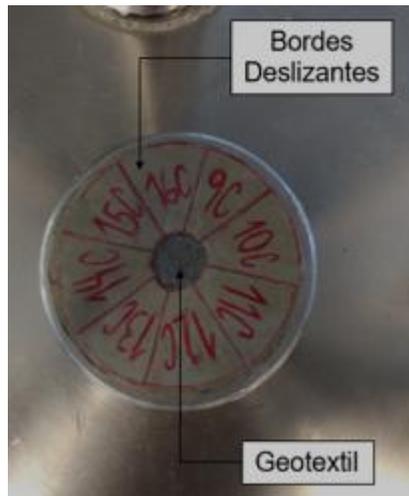


Figura 3.8: Bordes deslizantes.

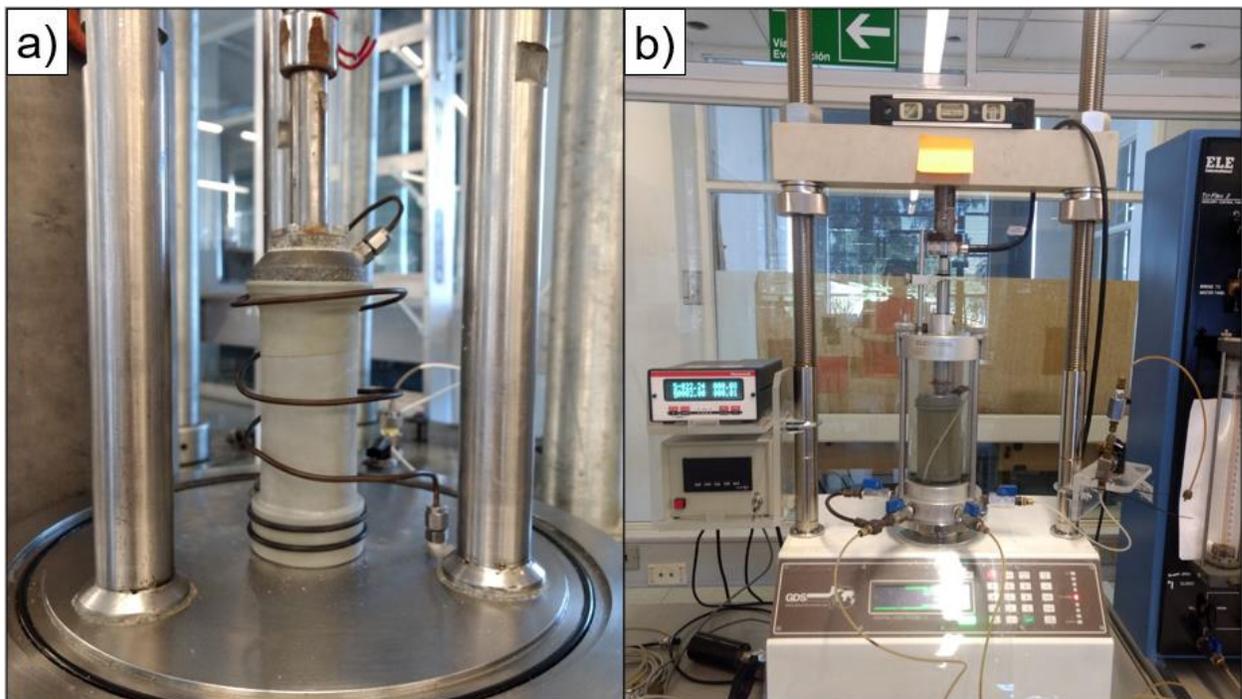


Figura 3.9: a) Probeta montada en equipo triaxial de altas presiones. b) Probeta montada en equipo triaxial de bajas presiones.

### 3.3.3. PASO DE CO<sub>2</sub> Y SATURACIÓN

Terminado el montaje, se llena la cámara triaxial con agua y se impone una presión de cámara de 0.2 kgf/cm<sup>2</sup> (las válvulas de drenaje permanecen cerradas). Ya con la cámara preparada, se aplica dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con el propósito de desplazar el aire contenido en los vacíos de la probeta. Este proceso tiene una duración de 30 minutos.

La saturación consiste en pasar 200 ml de agua destilada y desaireada a través de la probeta. Este volumen de agua es, en cantidad, suficiente para llenar la mayor parte de los vacíos de la muestra.

Una vez percolados los 200 ml de agua, se comienza con la aplicación de la contrapresión. Esto se realiza de manera escalonada, aplicando 1.2 kgf/cm<sup>2</sup> de presión de cámara, con las válvulas de drenaje cerradas. Luego, se aplica una contrapresión de 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> y se abren las válvulas de drenaje. De esta manera la probeta mantiene el confinamiento efectivo inicial de 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>. Para llegar a la contrapresión de ensayo, se debe repetir el proceso aumentando la presión de cámara y la contrapresión en intervalos de 1kgf/cm<sup>2</sup>.

Alcanzada la contrapresión deseada se procede a comprobar la saturación de la probeta a través del parámetro B (Ecuación 3-1). Para esto se cierran las válvulas de drenaje de la probeta y se aplica un aumento de la presión de cámara, el cual se registra como  $\Delta\sigma_c$ . Producto del aumento de presión de cámara, se genera una variación de la presión de poros, la que se registra como  $\Delta u$ . Si se cumple que  $B \geq 0.95$ , se considera la probeta saturada y se prosigue con el ensayo. En caso contrario, es posible aumentar la contrapresión y presión de cámara, y volver a evaluar.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad 3-1$$

Donde:

$\Delta u$ : exceso de presión de poros.

$\Delta \sigma_c$ : aumento de la presión de cámara.

### 3.3.4. CONSOLIDACIÓN

Esta etapa corresponde a cuando la muestra alcanza el estado tensional inicial previo al ensayo. Esta condición se logra de manera drenada e isótropa.

El proceso consiste en aumentar la presión de cámara en intervalos de 1kgf/cm<sup>2</sup> partiendo desde una presión efectiva de 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>, esperando disipar el exceso de presión de poros en cada aumento para registrar la variación volumétrica y la deformación axial.

### 3.3.5. APLICACIÓN DEL DESVIADOR

Alcanzada isotrópicamente la presión de confinamiento efectivo inicial del ensayo y finalizada la consolidación, se aplica el desviador de corte a través de una tasa de deformación axial constante de 0.13mm/min (0.13%/min). El material responde, en términos de esfuerzos, induciéndose un estado tensional anisotrópico. El proceso se termina cuando se ha alcanzado un 20% de deformación axial.

### 3.3.6. EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VACÍOS FINAL

Desde la confección de la probeta hasta la etapa de consolidación, la muestra sufre variaciones volumétricas que se miden con poca precisión. Producto del cambio de volumen, el índice de vacíos con el que se confeccionó la probeta es distinto al del comienzo del ensayo. Por lo tanto, para determinar el índice de vacíos del ensayo se utiliza el método de Verdugo & Ishihara (1996), quienes propusieron una metodología post-ensayo que permite obtener el índice de vacíos al término de éste. A través de las variaciones volumétricas registradas durante el ensayo es posible determinar, a partir del índice de vacíos final, el índice de vacíos inicial de ensayo.

La metodología se describe a continuación:

- Al término del ensayo se cierran las válvulas de la probeta (condición no drenada)
- 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.
- Se registra el valor de la bureta de medición como  $V_i$ .
- Se abren las válvulas de la probeta.
- 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).
- Estabilizada la presión, se cierran las válvulas de drenaje y se toma la medida del volumen final en la bureta de medición,  $V_f$ .
- 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 cabezales, y se deposita en un recipiente con peso conocido. Se mide el peso del material húmedo,  $W_m$ .
- Se lleva al horno la muestra.
- Cuando el material haya evaporado todo su contenido de agua. Se pesa nuevamente, obteniendo  $W_d$ .
- Finalmente, el índice de vacíos queda definido por la Ecuación 3-2.

$$e_{final} = \frac{(V_f - V_i) \cdot \gamma_{agua} + (W_m - W_d)}{W_d} \cdot G_s \quad 3-2$$

### **3.4. ANÁLISIS POST-ENSAYO**

Posterior al ensayo, todas las muestras fueron guardadas para luego llevarlas al laboratorio de Sedimentología del departamento de Geología de la Universidad de Chile con el fin de realizar granulometrías laser y analizar la rotura de partículas de las muestras.

## 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 4.1.1. CONSOLIDACIONES ARENA CON CF=40%

Se cuentan con resultados de consolidaciones isotrópicas hasta confinamientos efectivos de  $50 \text{ kgf/cm}^2$  obtenidos por Córdova (2017) para arena "El Torito" con contenidos de finos de 1, 5, 10 y 20% a densidades relativas iniciales de DR=15, 65 y 90%. Con la finalidad de extender el conocimiento aportado por este autor, se realizan consolidaciones isotrópicas para la misma arena con 40% de finos, además de poder comparar el comportamiento en compresión.

La Figura 4.1 muestra las consolidaciones isotrópicas hasta un confinamiento efectivo de  $50 \text{ kgf/cm}^2$  realizadas en arena "El Torito" con contenido de finos de 40%, para densidades relativas de confección de 15%, 65% y 90% con respecto a los índices de vacío máximo y mínimo presentados en la Tabla 3.3, en escala lineal (a) y logarítmica (b). Se observa, para la densidad inicial DR=15% una rápida disminución del índice de vacíos hasta una presión de confinamiento  $p'=3 \text{ kgf/cm}^2$ , donde la curva se vuelve paralela con las correspondientes a las otras dos densidades. También, se tiene que para DR=65 y 90% se alcanzan índices de vacíos menores al valor mínimo obtenido a través del método japonés (JGS, 2000), a partir de confinamientos efectivos de  $35 \text{ kgf/cm}^2$  y  $7 \text{ kgf/cm}^2$  respectivamente.

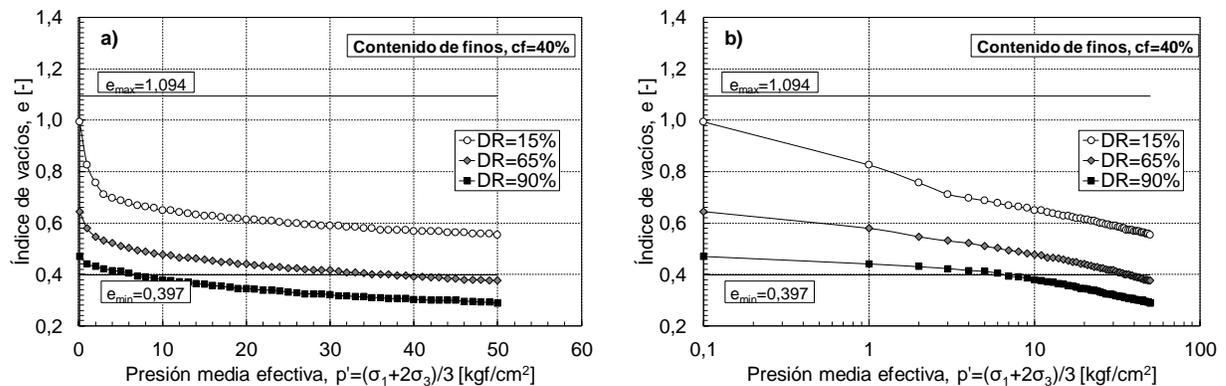


Figura 4.1: Consolidaciones isotrópicas en arena de relaves "El Torito" con contenido de finos de 40%, para densidades de confección de 15%, 65% y 90%. Escala aritmética a la izquierda y escala logarítmica a la derecha.

Con el fin de comparar la compresibilidad de la arena con 40% de finos con las ensayadas por Córdova (2017), la Figura 4.2 presenta las curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial para contenidos de finos entre 1% y 40%. Las curvas para 1%, 5%, 10% y 20% corresponden a las realizadas por Córdova (2017). Se aprecia que, para las tres densidades de confección, la arena con un 40% de finos es la más compresible y parece converger a un valor único de  $e/e_0=0,58$  a altas presiones (Figura 4.2a). Por su parte, las arenas con finos entre 1 y 20% muestran un aumento de la compresibilidad con el contenido de finos en el estado más suelto, mientras que para mayores densidades de confección, el cambio volumétrico se independiza de los finos.

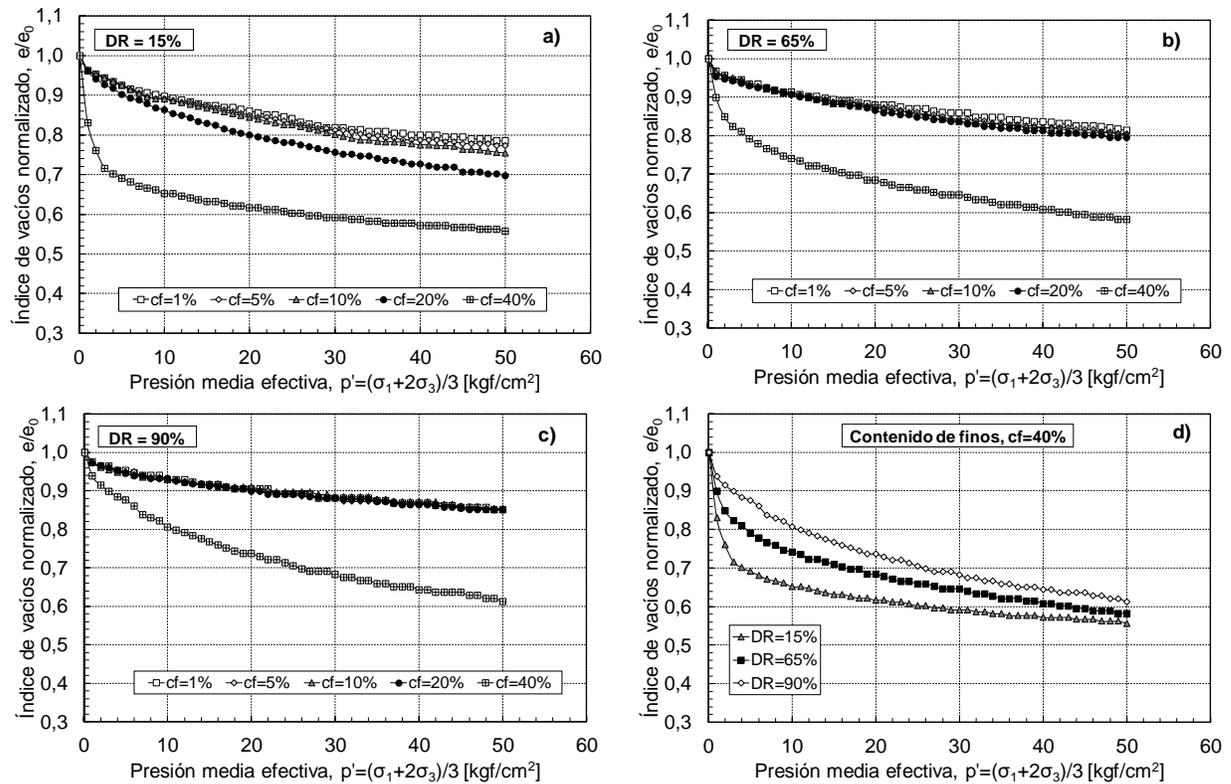


Figura 4.2: Curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial en arena de relaves "El Torito" con contenido de finos de 1%, 5%, 10%, 20% y 40% para tres densidades de confección: 15%, 65% y 90%. a) Curvas CF=1%-40%, DR=15%. b) Curvas CF=1%-40%, DR=65%. c) Curvas CF=1%-40%, DR=90%. d) Curvas para arena con 40% de finos

Otra manera de analizar la compresibilidad en consolidación isotrópica es por medio del módulo de compresibilidad volumétrica " $m_v$ ". Este parámetro evalúa las pendientes entre variaciones del índice de vacíos producto del aumento de la presión de confinamiento, normalizado por el volumen inicial, utilizando la Ecuación 4-1.

$$m_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \cdot \frac{1}{1 + e_0} \quad 4-1$$

Las Figura 4.3 muestra la variación del módulo de compresibilidad al aumentar la presión de confinamiento efectivo para densidades relativas iniciales DR=15, 65 y 90%. Se utiliza un valor de  $\Delta p=1 \text{ kgf/cm}^2$  para el cálculo de  $m_v$ , además, dada la sensibilidad del equipo para la medición del cambio volumétrico, algunos valores de  $\Delta e$  son nulos, arrojando valores de  $m_v=0$ , los cuales se omitieron de la gráfica. Se observa que, para las tres densidades de confección, la arena con cf=40% presenta un mayor módulo a bajas presiones, diferencia que se ve reducida en estados iniciales más densos. Al incrementar el confinamiento, y a partir de  $p'=10 \text{ kgf/cm}^2$ , todos los materiales llegan a un valor común y estable de  $m_v=0,002 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}^{-1}$ .

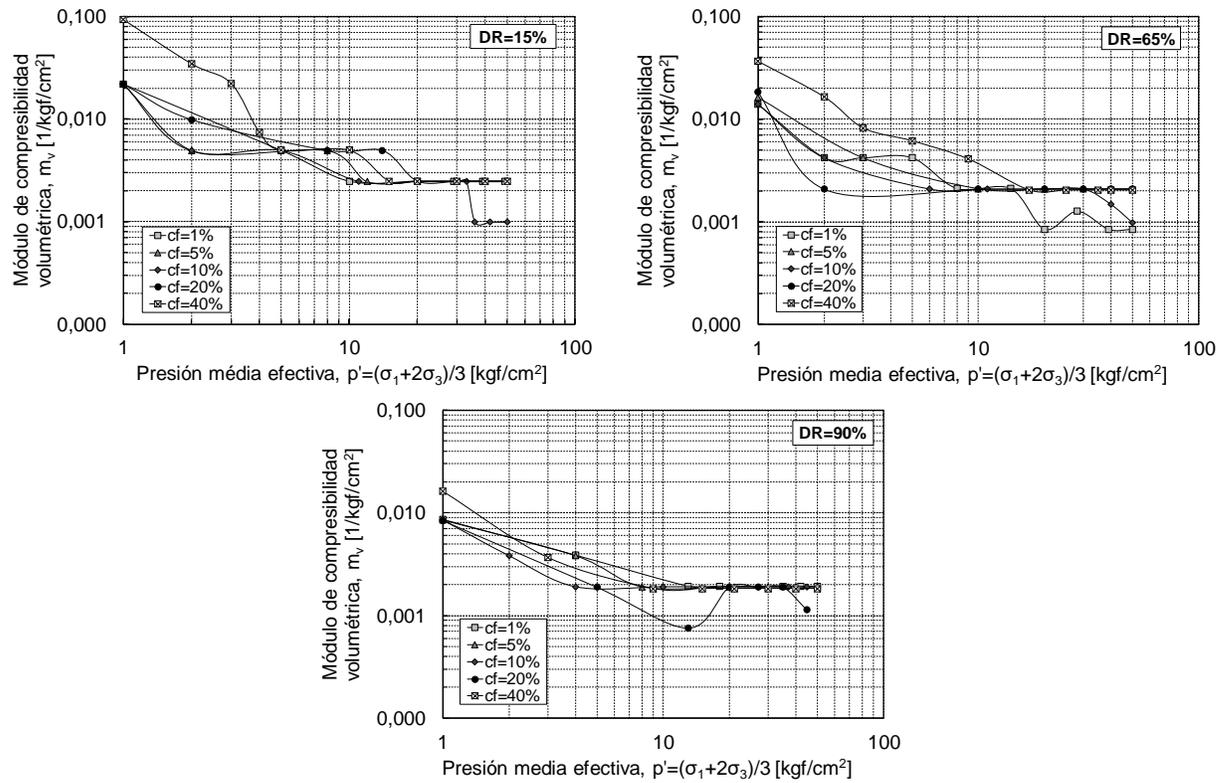


Figura 4.3: Módulo de compresibilidad volumétrica “ $m_v$ ” para la arena "El Torito" con contenido de finos  $cf=1, 5, 10, 20$  y  $40\%$  para las tres densidades de confección  $DR=15, 65$  y  $90\%$ .

#### 4.1.2. COMPORTAMIENTO MONÓTONO NO DRENADO

La Tabla 4 presenta un resumen de todos los ensayos triaxiales no drenados realizados con la arena El Torito con contenidos de finos de 1, 20 y 40%.

Tabla 4: Resumen ensayos triaxiales no drenados.

cf [%]	DR <sub>confección</sub>	e <sub>ensayo</sub>	DR <sub>ensayo</sub>	$\sigma'_{co}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	p <sub>f</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	q <sub>f</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	15	1,17	7	0,5	0	0
	15	1,12	16	1	0	0
	15	0,98	39	2	0,3	0,2
	15	1,02	32	5	1,7	1,0
	15	0,79	71	7	2,8	1,9
	15	0,79	71	10	4,6	3,4
	15	0,76	75	15	6,4	4,6
	15	0,73	81	30	10,5	8,2
	15	0,69	86	50	18,5	12,4
	58	0,85	60	5	7,1	5,4
	90	0,80	68	2	9,7	7,9
	87	0,79	70	5	12,2	8,8
	61	0,76	76	10	12,0	8,6
	55	0,76	75	20	10,6	7,8
	50	0,76	75	30	12,8	8,9
	41	0,72	82	50	16,6	10,9
	84	0,77	73	10	13,4	9,9
	80	0,72	82	20	14,4	9,1
	76	0,67	90	30	19,8	14,6
	73	0,66	92	40	20,2	13,9
69	0,65	92	50	21,0	14,5	
20	15	0,83	58	2	0	0
	15	0,75	70	5	1,4	0,9
	15	0,67	83	10	4,2	2,9
	15	0,65	86	15	6,0	4,2
	15	0,63	89	30	12,7	7,9
	76	0,66	84	2	2,4	1,9
	68	0,65	86	5	3,5	2,5
	65	0,67	83	10	6,6	4,9
	58	0,64	88	20	9,5	7,1
	48	0,58	98	35	15,7	11,4
	40	0,55	103	50	21,6	15,5
	81	0,63	90	5	5,8	4,3
	79	0,67	83	10	7,6	5,7
	76	0,60	95	15	9,3	7,0
	70	0,57	98	30	15,3	11,5

cf [%]	DR <sub>confección</sub>	e <sub>ensayo</sub>	DR <sub>ensayo</sub>	$\sigma'_{co}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	p <sub>f</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	q <sub>f</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]
20	66	0,59	95	40	19,1	13,9
	62	0,59	95	50	21,7	13,4
40	15	0,61	69	1	0,3	0,2
	15	0,53	81	5	3,0	1,9
	15	0,53	80	10	6,1	4,1
	15	0,53	82	20	10,1	7,1
	15	0,50	85	35	14,0	9,5
	15	0,47	90	50	20,5	13,6
	82	0,59	72	2	1,9	1,3
	77	0,51	84	5	3,9	2,7
	67	0,50	85	10	6,2	4,6
	60	0,47	90	20	12,8	9,6
	51	0,43	95	35	16,7	11,6
	44	0,44	94	50	23,3	16,9
	56	0,65	63	2	0,4	0,2
	51	0,60	71	5	3,3	2,0
	44	0,60	70	10	5,1	3,7
	36	0,56	76	20	9,1	6,6
	25	0,53	81	35	15,2	10,5
16	0,50	85	50	24,9	14,1	

#### 4.1.2.1. RESULTADOS CF1%

Las Figuras Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6 muestran el comportamiento monótono no drenado de la arena "El Torito" con 1% de contenido de finos para todas las densidades ensayadas y un rango de presiones de confinamiento efectivo desde 1 kgf/cm<sup>2</sup> hasta 50 kgf/cm<sup>2</sup>.

La Figura 4.4 presenta los resultados para muestras con densidad de confección inicial DR=15%. Las curvas tensión-deformación muestran que, en todas las presiones de confinamiento efectivo inicial, el suelo presenta inestabilidad no drenada. Para ensayos entre 1 kgf/cm<sup>2</sup> y 5 kgf/cm<sup>2</sup>, la disminución de la resistencia ocurre hasta alcanzar la falla, presentándose una "falla de flujo". Lo mismo ocurre para los ensayos con confinamiento inicial superior a 35 kgf/cm<sup>2</sup>, mientras que para los ensayos con confinamientos entre 5 y 35 kgf/cm<sup>2</sup>, la caída de resistencia es temporal y esta vuelve a aumentar una vez alcanzado el punto de transformación de fase, mostrando un comportamiento "temporalmente inestable".

Con respecto a la variación de la presión de poros, todas las muestras exhiben una estabilización del exceso de presión luego del marcado incremento inicial. Esta estabilización se produce a mayor deformación axial a medida que aumenta el confinamiento inicial, en los menores confinamientos (1–5 kgf/cm<sup>2</sup>) ocurre a partir de una deformación axial de 1%, mientras que para el mayor confinamiento ocurre a partir de  $\epsilon_a=15\%$ . Por su parte, las trayectorias de tensiones efectivas muestran que todas las

probetas exhiben un notorio comportamiento contractivo, incluso en aquellas que alcanzan el punto de transformación de fase y comienzan a dilatar, la contractividad es quien domina.

La línea de estado último en el espacio  $p'$ - $e$  alcanza presión media nula ( $p'=0$ ) para un índice de vacíos  $e=1$  y a partir de este la curva presenta una caída abrupta hasta un valor de  $p'=1 \text{ kgf/cm}^2$  y posterior a esta presión la curva se suaviza con una pendiente menor.

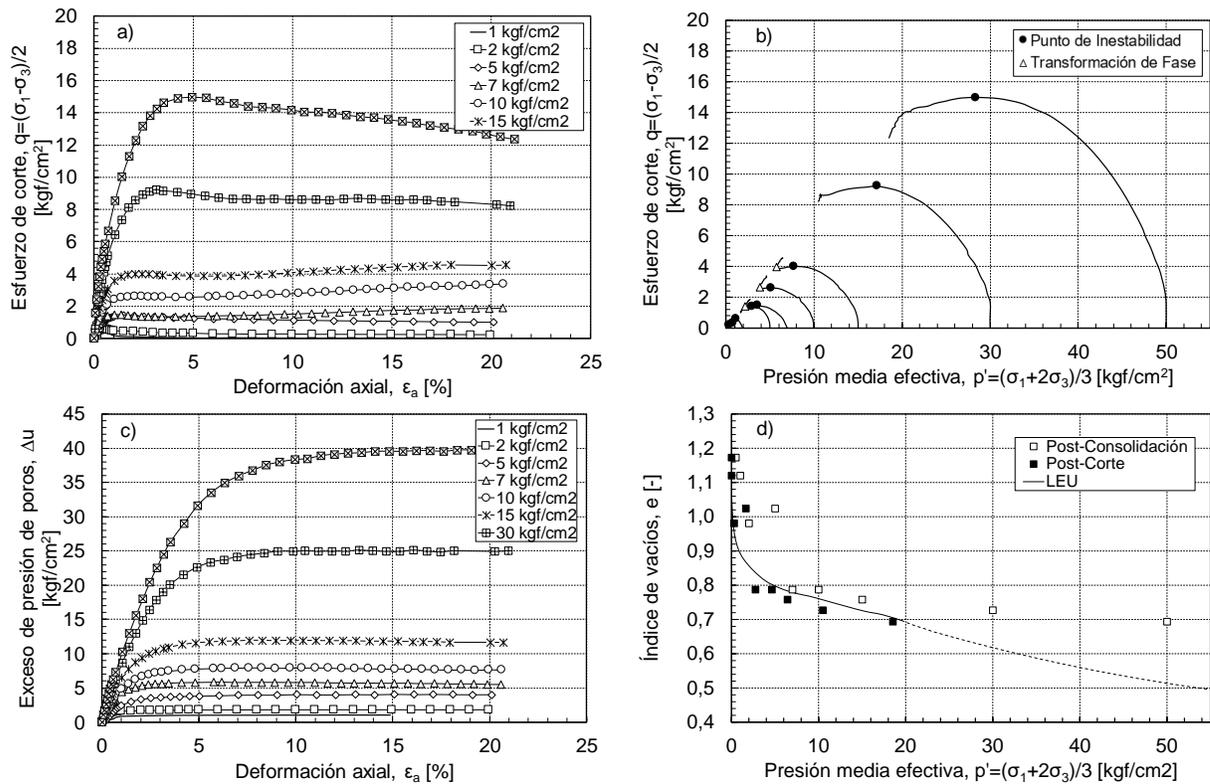


Figura 4.4: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a  $DR=15\%$  para arena "El Torito" con  $cf=1\%$ . a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e$ - $p'$ .

La Figura 4.5 presenta los resultados para muestras con índice de vacíos de ensayo  $e=0.765 \pm 0.045$  ( $DR_{\text{ensayo}}=75\% \pm 7\%$ ). En las curvas tensión-deformación, las muestras al tener un índice de vacíos similar, tienden también a una misma resistencia última de  $q=8$ - $10 \text{ kgf/cm}^2$ .

Las trayectorias de tensiones efectivas sugieren un cambio desde un comportamiento netamente dilatante para presiones hasta  $p'=10 \text{ kgf/cm}^2$ , a uno totalmente contractivo para presiones superiores a  $20 \text{ kgf/cm}^2$ , y en estas últimas aparece la inestabilidad no drenada. Esto viene acompañado de la variación de la presión de poros, donde para muestras con confinamientos de  $2 \text{ kgf/cm}^2$  y  $5 \text{ kgf/cm}^2$  se tiene una variación neta de la presión de poros negativa, mientras que a partir de confinamientos de  $10 \text{ kgf/cm}^2$  se vuelve positiva. Un ensayo que llama particularmente la atención es aquel a confinamiento inicial de  $10 \text{ kgf/cm}^2$ , el cual presenta una trayectoria de esfuerzos efectivos casi vertical, asociada a una respuesta de corte puro, donde solo aumenta  $q$  y  $p'$  permanece casi constante. Esto se explica debido a que, en el espacio  $p'$ - $e$ , el ensayo

parte próximo a la LEU, por lo que la variación de la presión media para alcanzar el estado último es casi nula.

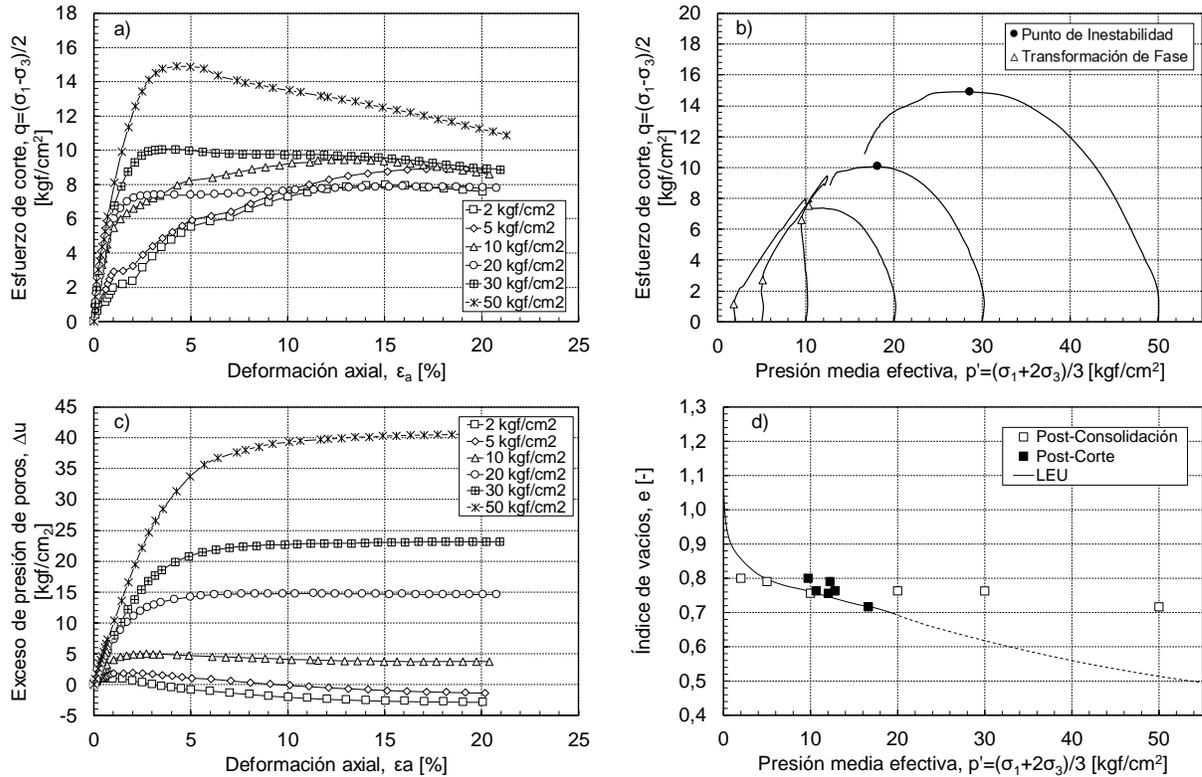


Figura 4.5: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas  $e=0,765 \pm 0,045$  para arena "El Torito" con  $CF=1\%$ . a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e-p'$ .

La Figura 4.6 muestra los resultados para probetas ensayadas con índice de vacíos  $e=0.660 \pm 0.05$  ( $DR=92\%$ ), salvo las muestras a 10 kgf/cm<sup>2</sup> y 20 kgf/cm<sup>2</sup>, para las cuales se lograron índices de vacíos de 0,770 y 0,720 respectivamente. A rasgos generales se observa la misma tendencia observada en la Figura 4.5, pero con una mayor tendencia dilatante. Al aumentar la densidad de ensayo, la tendencia a presentar un comportamiento dilatante aumenta y la contractividad se ve disminuida, mientras que aquellos ensayos con un índice de vacíos similar ( $p'_0=30, 40$  y  $50$  kgf/cm<sup>2</sup>) convergen a la misma resistencia última  $q=14$  kgf/cm<sup>2</sup>.

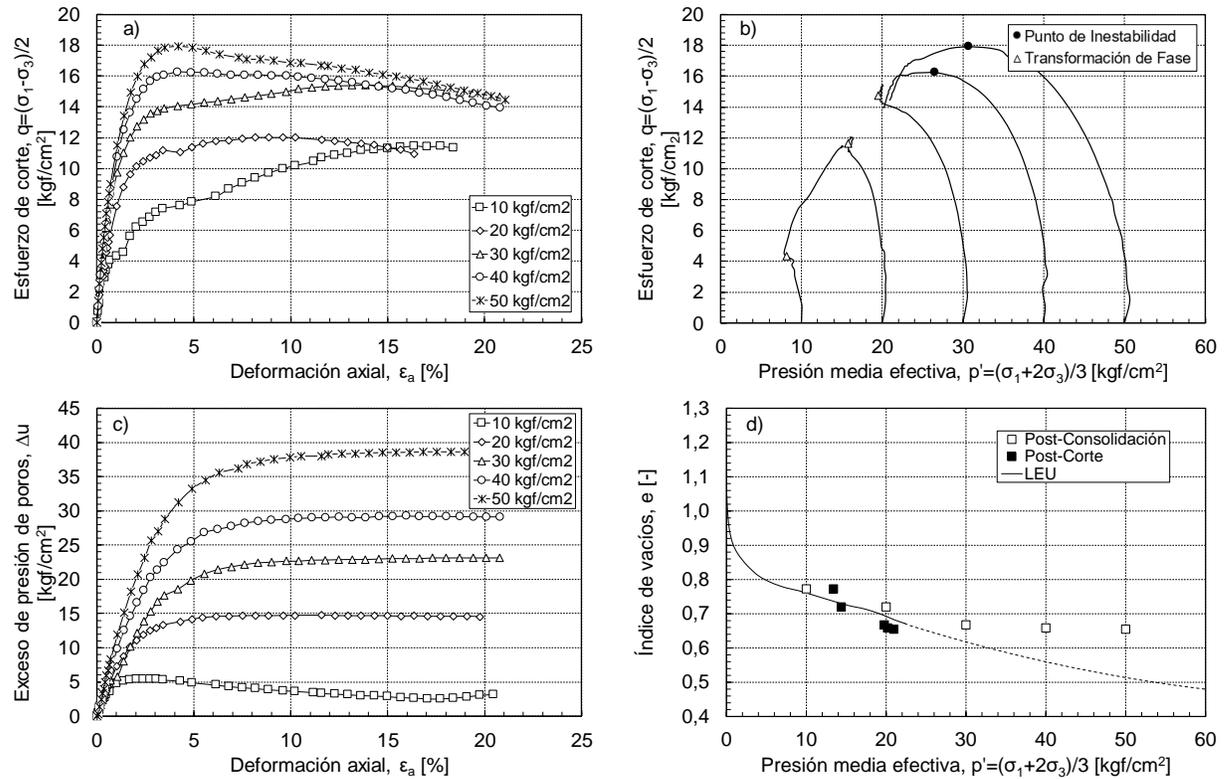


Figura 4.6: Respuesta monótona no drenada de muestras de arena "El Torito" con CF=1%. Para  $p'=30$ , 40 y 50 kgf/cm<sup>2</sup> índice de vacíos de ensayo  $e=0,660 \pm 0,005$ , para  $p'=10$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $e=0,770$  y  $p'=20$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $e=0,720$ . a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e$ - $p'$ .

La Figura 4.7 presenta el ángulo de fricción movilizado para todos los ensayos realizados en arena "El Torito" con 1% de finos. Se utiliza una leyenda donde se indica el confinamiento inicial y la densidad relativa de confección (ej: CID02DR76: confinamiento inicial de 2 kgf/cm<sup>2</sup> y densidad relativa de confección 76%). Se observa que algunos ensayos presentan un valor máximo, seguido de una caída hasta alcanzar el valor residual. Este peak desaparece al aumentar la presión de confinamiento, donde para altas presiones el ángulo de fricción interna presenta un crecimiento monótono hasta su valor último. A partir de un 15% de deformación axial, todas las muestras alcanzan un valor estable alrededor de  $\phi=35^\circ$ .

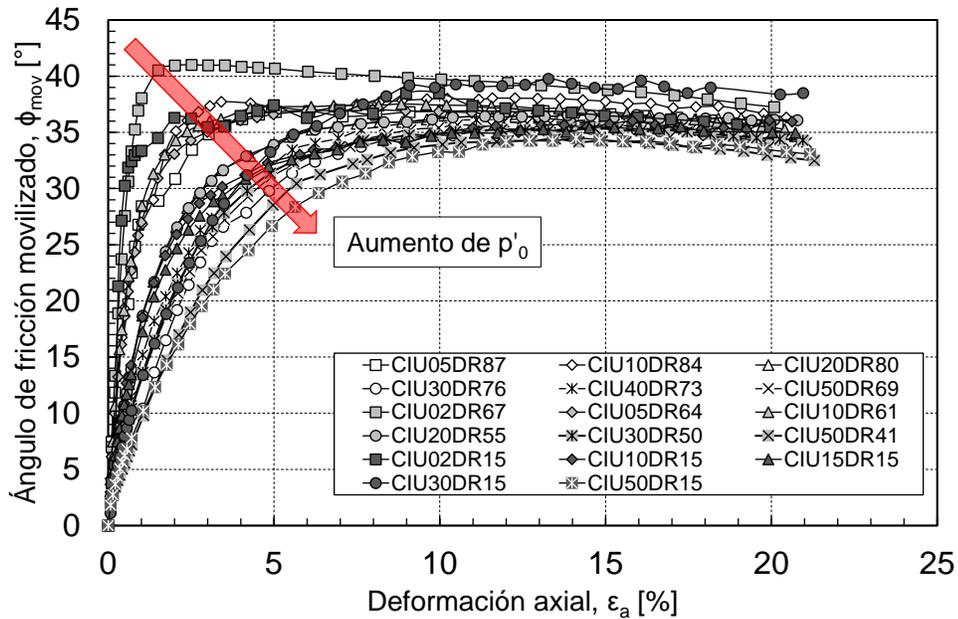


Figura 4.7: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con  $CF=1\%$ .

Lo anterior se observa también al graficar la Línea de Estado Último en el espacio  $p'$ - $q$ . La Figura 4.8 muestra la regresión lineal realizada con los estados tensionales últimos para los ensayos triaxiales no drenados realizados en la arena con 1% de finos. Se obtiene una pendiente  $M=0.70$  correspondiente a un ángulo de fricción interna de  $35^\circ$ , coincidente con lo observado en la Figura 4.7.

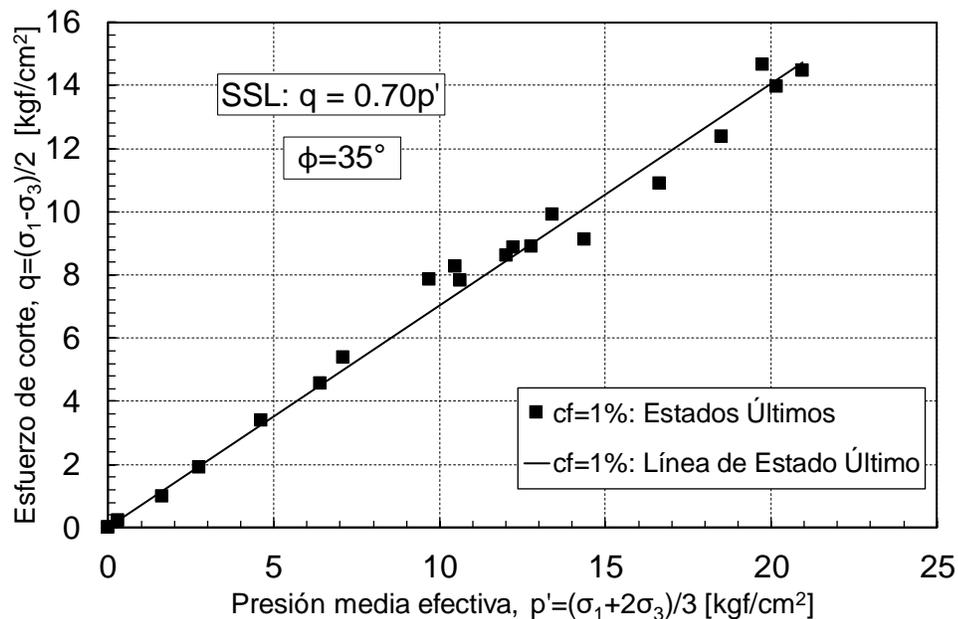


Figura 4.8: Línea de Estado Último (SSL) en espacio  $q$ - $p'$  para arena "El Torito" con contenido de finos 1%. a) Arreglo lineal con ensayos CIU. b) Arreglo lineal agregando ensayos CID realizados por Bravo (2018).

La Figura 4.9 presenta la Línea de Estado Último en el espacio  $p'$ - $e$  en escalas lineal y logarítmica. A pesar de la dispersión, se observa una clara correlación entre la presión media efectiva y el índice de vacíos final. Se aprecia en escala lineal una rápida disminución del índice de vacíos para presiones de confinamiento menores a  $1 \text{ kgf/cm}^2$ , luego se tiene una curva más suavizada con menor pendiente. En escala logarítmica se observa un comportamiento lineal hasta  $p'=10 \text{ kgf/cm}^2$ , y a mayores presiones comienza a curvarse, aumentando su pendiente.

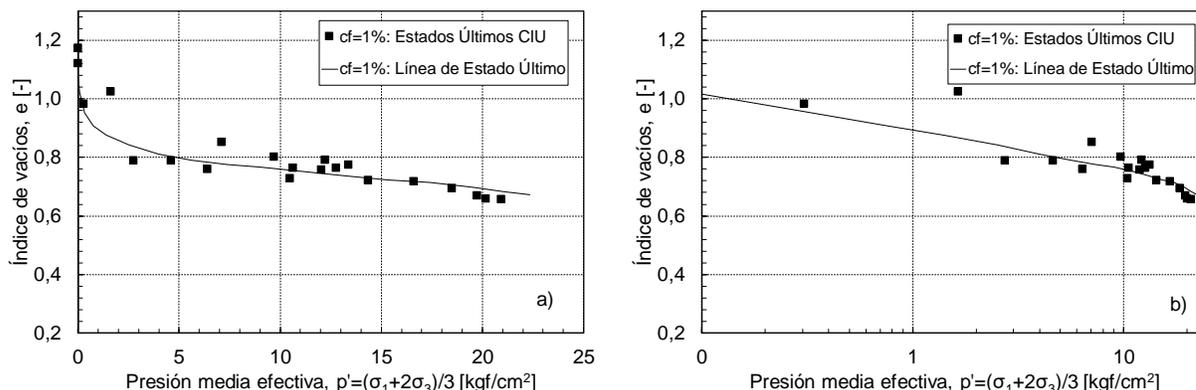


Figura 4.9: Línea de Estado Último (LEU) en espacio  $e$ - $p'$  para arena "El Torito" 1% de finos. a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica.

#### 4.1.2.2. RESULTADOS CF20%

Las Figuras Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12 muestran el comportamiento monótono no drenado de la arena "El Torito" con 20% de contenido de finos para todas las densidades de ensayo y un rango de presiones de confinamiento efectivo desde  $1 \text{ kgf/cm}^2$  hasta  $50 \text{ kgf/cm}^2$ .

La Figura 4.10 presenta los resultados para muestras con densidad de confección inicial  $DR=15\%$ , y confinamientos entre  $2$  y  $30 \text{ kgf/cm}^2$ . Las curvas tensión-deformación evidencian que, para todas las presiones de confinamiento efectivo inicial, el suelo presenta inestabilidad no drenada. Para ensayos entre  $2 \text{ kgf/cm}^2$  y  $5 \text{ kgf/cm}^2$ , la disminución de la resistencia ocurre hasta alcanzar la falla, mostrando "falla de flujo". Lo mismo ocurre para el ensayo confinamiento inicial  $p'=30 \text{ kgf/cm}^2$ . Para ensayos con confinamientos entre  $5$  y  $30 \text{ kgf/cm}^2$  la caída de la resistencia es temporal y esta vuelve a aumentar una vez alcanzado el punto de transformación de fase, mostrando un comportamiento temporalmente inestable.

Con respecto a la variación de la presión de poros, se tiene que todas las muestras exhiben una estabilización del exceso de presión luego del marcado incremento inicial. Dicha estabilización se produce a mayor deformación axial a medida que aumenta el confinamiento inicial, viéndose desde un 5% de deformación para las menores presiones, hasta un 15% de deformación para el ensayo a mayor confinamiento. Por su parte, las trayectorias de tensiones efectivas muestran que todas las probetas exhiben un notorio comportamiento contractivo, incluso en aquellas que alcanzan el punto de transformación de fase y comienzan a dilatar, el comportamiento contractivo es el predominante.

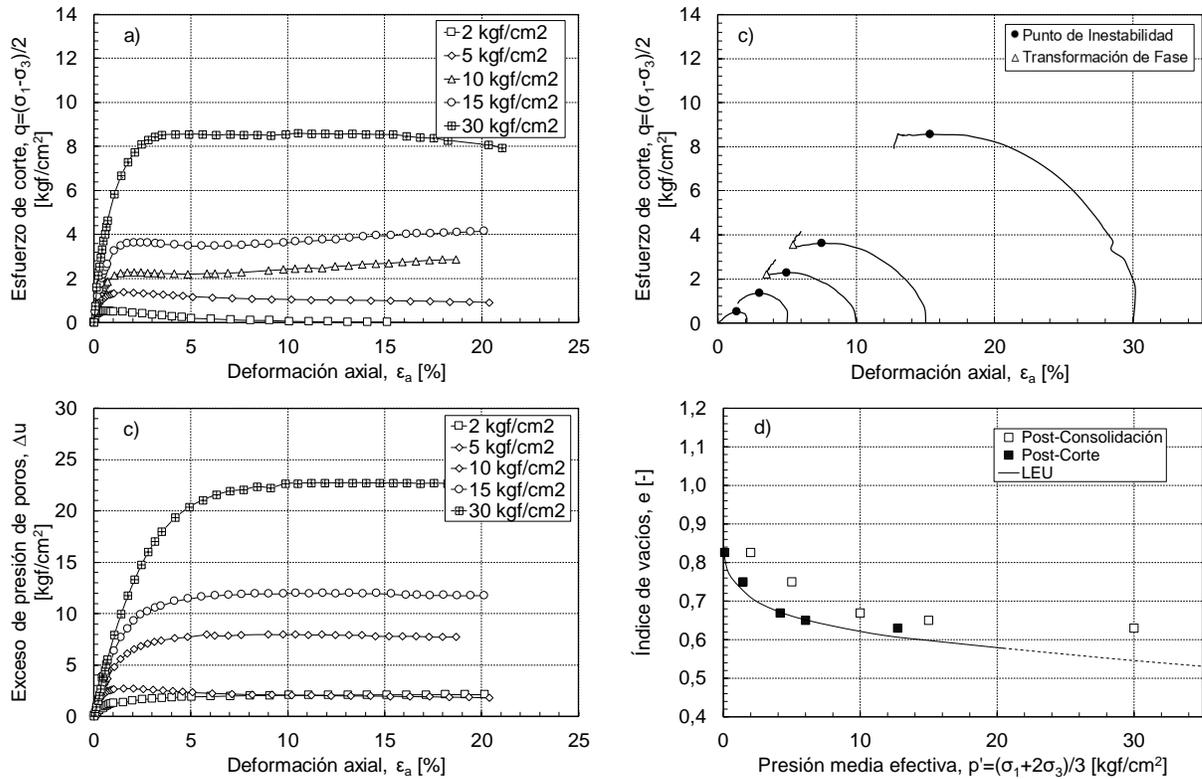


Figura 4.10: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a DR=15% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e-p'$ .

La Figura 4.11 presenta los resultados para muestras con densidades de ensayo entre DR=84%-100% ( $e=0,55-0,67$ ). Se aprecia que, al aumentar la densidad de ensayo, a bajas presiones comienza a dominar la dilatancia hasta confinamientos de 5 kgf/cm<sup>2</sup>. A partir de  $p'=10$  kgf/cm<sup>2</sup> es la contractividad quien comienza a dominar. Ya para presiones de 35 kgf/cm<sup>2</sup> prácticamente no existe dilatancia en toda la trayectoria de tensiones y aparece la inestabilidad no drenada.

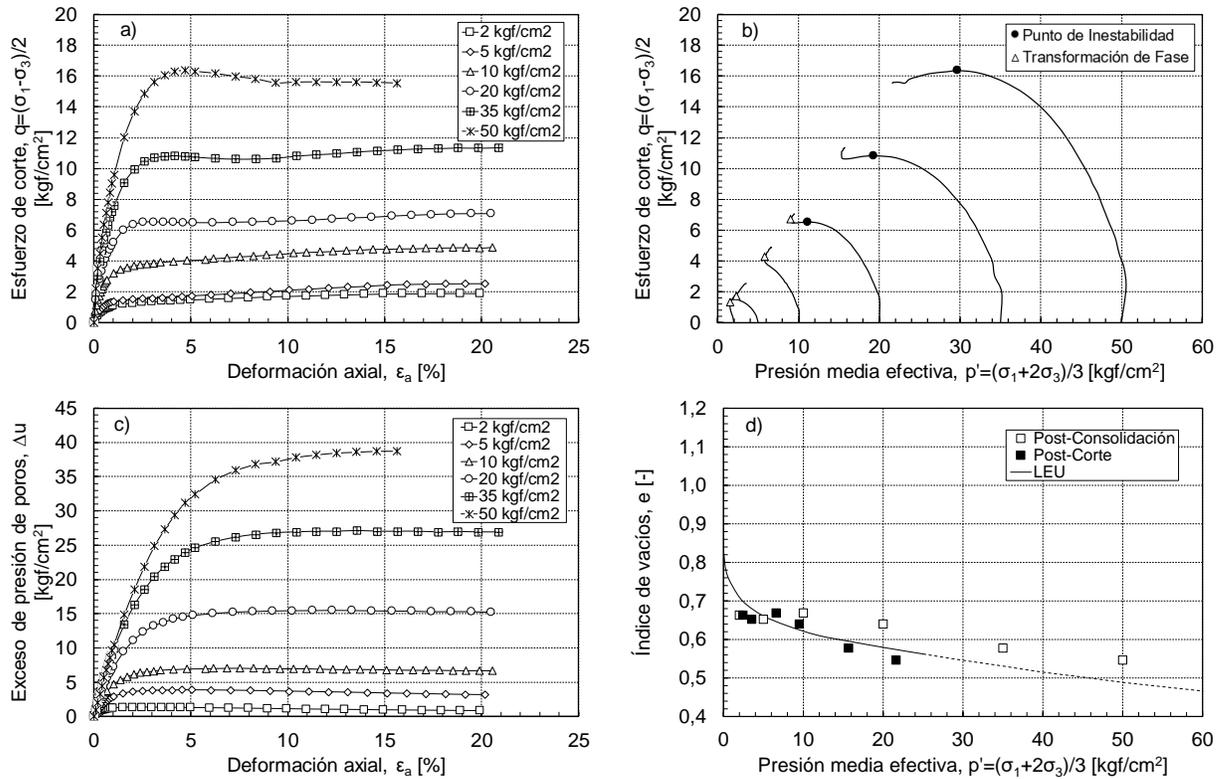


Figura 4.11: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=84%-100% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e-p'$ .

La Figura 4.12 presenta los resultados para muestras con densidades de ensayo entre DR=90%-98% ( $e=0,57-0,63$ ) y se observa un comportamiento similar al mostrado en la Figura 4.11, con un aumento de tendencia hacia una respuesta dilatante. A partir de un confinamiento inicial de  $p'=30$  kgf/cm<sup>2</sup> aparece la inestabilidad no drenada.

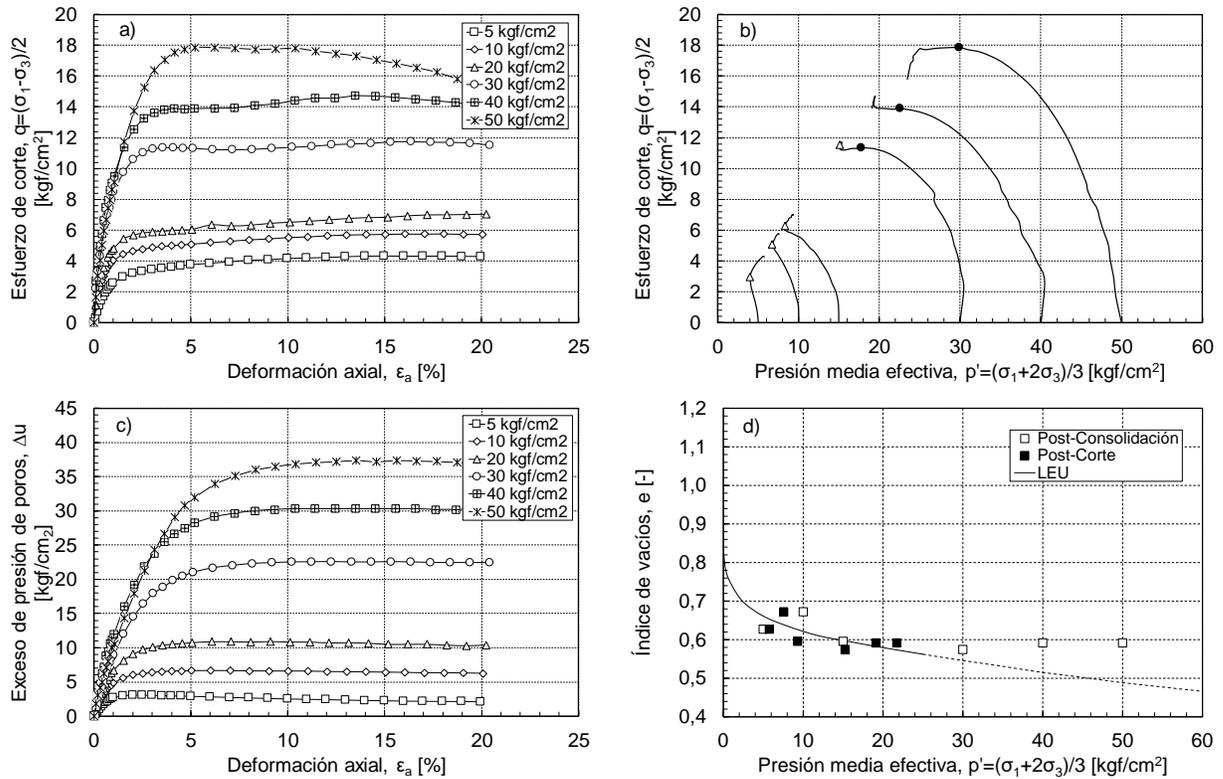


Figura 4.12: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=90%-98% para arena "El Torito" con CF=20%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e$ - $p'$ .

La Figura 4.13 presenta el ángulo de fricción movilizado para todos los ensayos realizados en arena "El Torito" con 20% de finos. Se utiliza una leyenda donde se indica el confinamiento inicial y la densidad relativa de confección (ej: CID02DR76: confinamiento inicial de 2 kgf/cm² y densidad relativa de confección 76%). Se observa que algunos ensayos presentan un valor máximo, seguido de una caída hasta alcanzar el valor residual. Este peak desaparece al aumentar la presión de confinamiento, donde para altas presiones, el ángulo de fricción interna presenta un crecimiento monótono hasta su valor último, similar a lo ocurrido para la arena con 1% de finos. A partir de un 15% de deformación axial, todas las muestras alcanzan un valor estable de  $\phi=36^\circ$  aproximadamente.

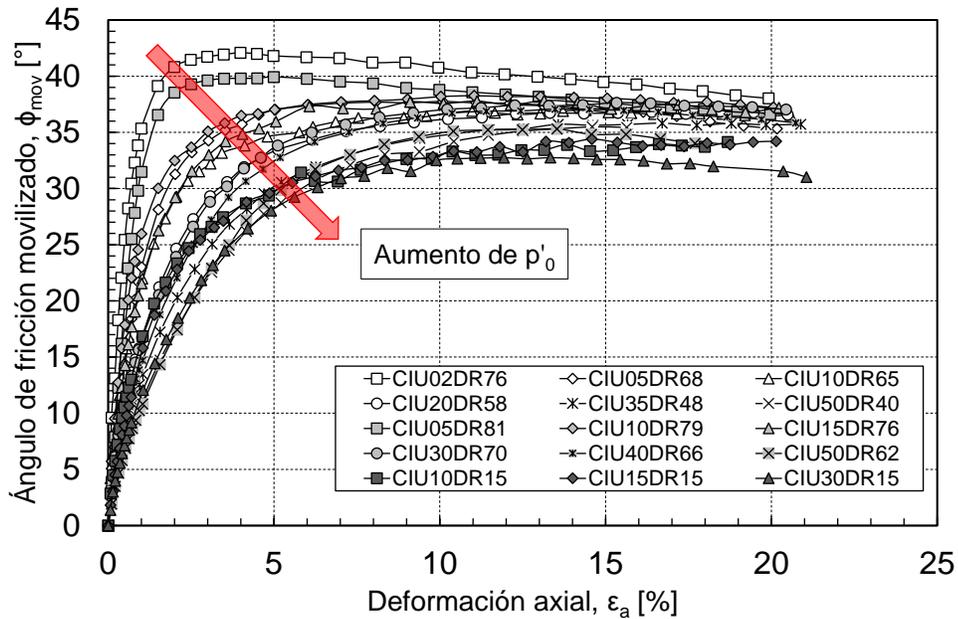


Figura 4.13: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con CF=20%.

La Figura 4.14 muestra la regresión lineal realizada con los estados tensionales últimos para los ensayos triaxiales no drenados realizados sobre la arena con 20% de finos. Se determina una pendiente  $M=0.73$ , correspondiente a un ángulo de fricción interna de  $36^\circ$ . Cabe señalar que existen dos valores que quedan por debajo. Se destaca que es  $1^\circ$  mayor al ángulo obtenido para la arena con 1% de finos.

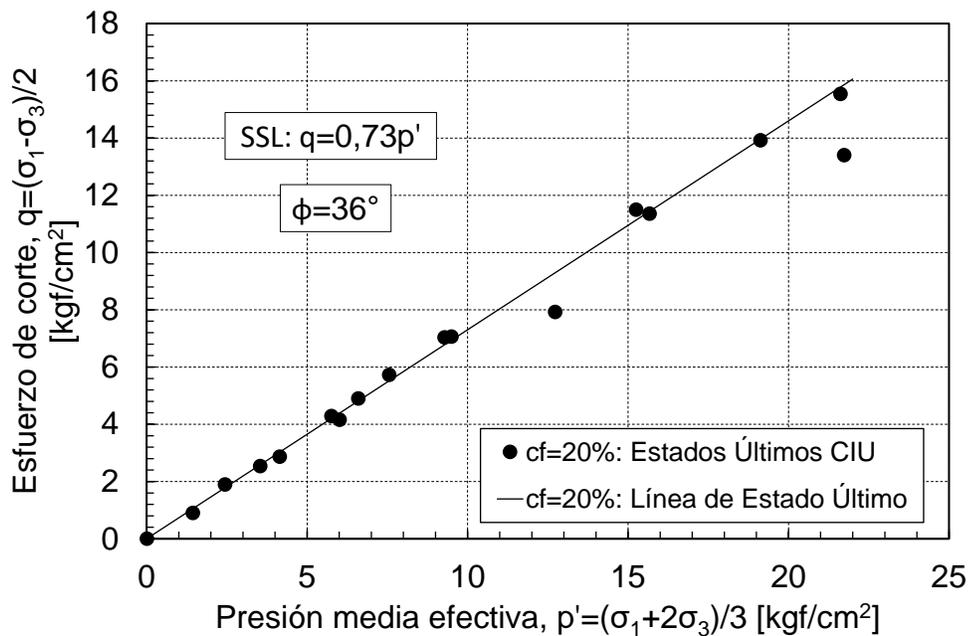


Figura 4.14: Línea de Estado Último (SSL) en espacio  $q-p'$  para arena "El Torito" con contenido de finos 20%. a) Arreglo lineal con ensayos CIU. b) Arreglo lineal agregando ensayos CID realizados por Bravo (2018).

La Figura 4.15 presenta la Línea de Estado Último en el espacio  $p'$ - $e$  en escalas lineal y logarítmica. En escala logarítmica, se aprecia un leve cambio de pendiente antes de  $p'=1$  kgf/cm<sup>2</sup>, que se mantiene constante hasta la mayor presión obtenida.

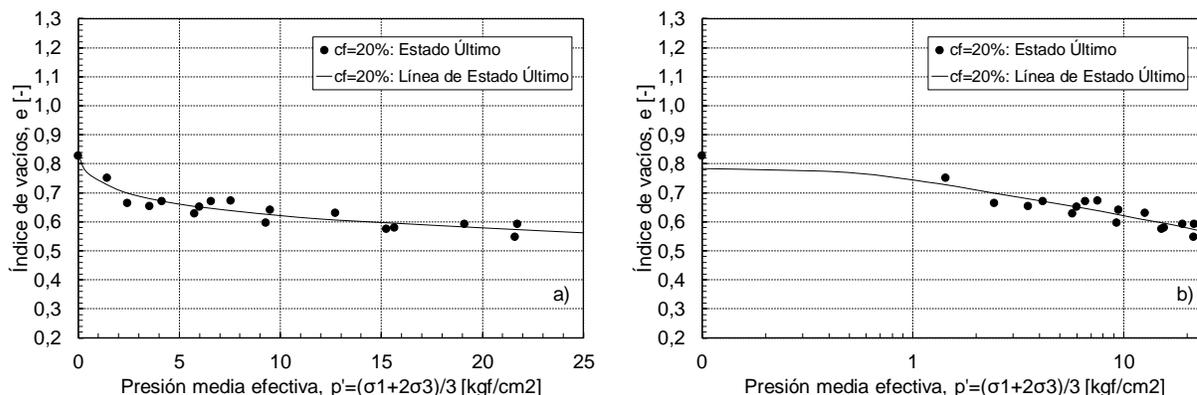


Figura 4.15: Línea de Estado Último (SSL) en espacio  $e$ - $p'$  para arena "El Torito" con contenido de finos 20% considerando ensayos CIU y CID (Bravo, 2018). a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica.

#### 4.1.2.3. RESULTADOS CF40%

Las Figuras Figura 4.16, Figura 4.17 y Figura 4.18 muestran el comportamiento monótono no drenado de la arena "El Torito" con 40% de contenido de finos para todas las densidades de ensayo y un rango de presiones de confinamiento efectivo desde 1 kgf/cm<sup>2</sup> hasta 50 kgf/cm<sup>2</sup>. Se tiene, a rasgos generales, un comportamiento similar al exhibido por las arenas con 1% y 20% de contenido de finos, diferenciando en mostrar un mayor rango de estabilidad.

La Figura 4.16 presenta los resultados para muestras con densidad de confección inicial de 15%. A diferencia de los materiales con 1% y 20% de finos que para esta densidad de confección mostraban inestabilidad para todas las presiones de confinamiento, aquí solo se observa para el mínimo y el máximo confinamiento, mientras que para confinamientos intermedios no existe. Al aumentar la densidad (Figura 4.17) se observa que la inestabilidad solo se encuentra para el menor confinamiento (2 kgf/cm<sup>2</sup>) mientras que para una densidad aún mayor (Figura 4.18) las muestras presentan comportamiento estable en toda su trayectoria de tensiones.

Pese a lo anterior, se observa el dominio del comportamiento contractivo en la mayoría del rango de presiones y densidades de ensayo, aún cuando algunas muestras presentan dilatancia hacia el final del ensayo. Para los otros contenidos de finos, a una densidad lo suficientemente alta, muestras hasta 20 kgf/cm<sup>2</sup> presentaban comportamiento dilatante, mientras que, para este material, pese a ensayarse a altas densidades, solo para confinamiento de 2 kgf/cm<sup>2</sup> se observa una respuesta puramente dilatante.

Los índices de vacío y presión media en el estado último definen una suave Línea de Estado Último en el espacio  $p'$ - $e$  como evidencia las Figuras Figura 4.16d, Figura 4.17d y Figura 4.18d.

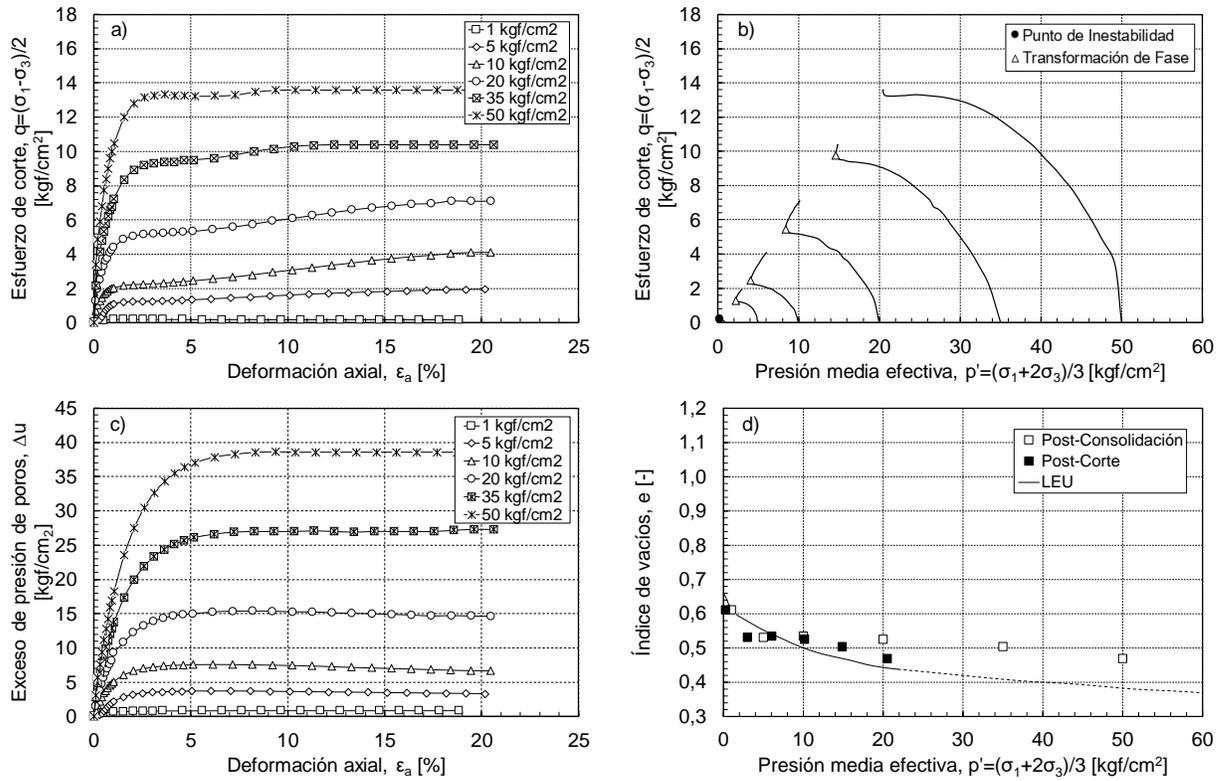


Figura 4.16: Respuesta monótona no drenada de muestras confeccionadas a DR=15% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e-p'$ .

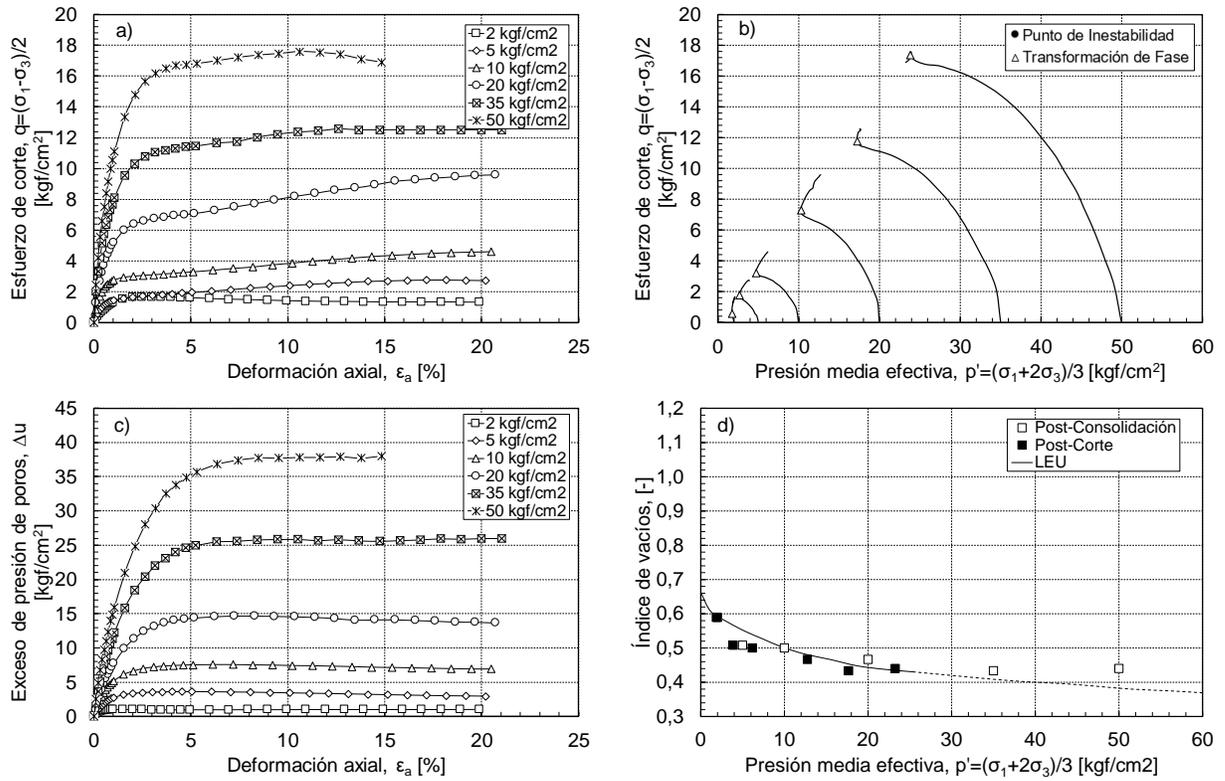


Figura 4.17: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=63%-85% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio e-p'.

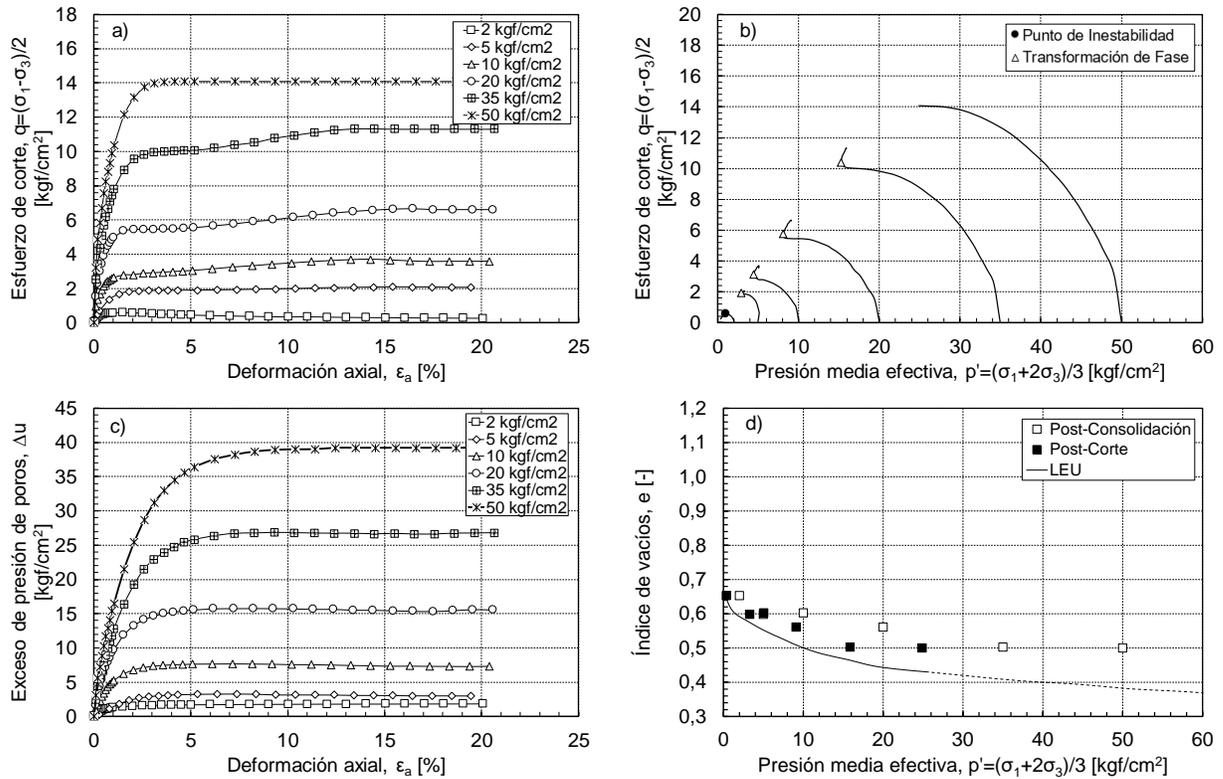


Figura 4.18: Respuesta monótona no drenada de muestras ensayadas a densidades entre DR=72%-95% para arena "El Torito" con CF=40%. a) Curvas Tensión-Deformación. b) Trayectorias de Tensiones Efectivas. c) Exceso de Presión de Poros. d) Estados Últimos en espacio  $e$ - $p'$ .

La Figura 4.19 presenta el ángulo de fricción movilizado para todos los ensayos realizados en arena "El Torito" con 40% de finos. Se utiliza una leyenda donde se indica el confinamiento inicial y la densidad relativa de confección (ej: CID02DR76: confinamiento inicial de 2 kgf/cm<sup>2</sup> y densidad relativa de confección 76%). A diferencia de los otros dos materiales, se aprecia que ningún ensayo presenta un valor máximo de ángulo movilizado y todos presentan un aumento monótono hasta el valor residual, estabilizándose alrededor de un ángulo de 33° a partir de una deformación axial del 10% en adelante.

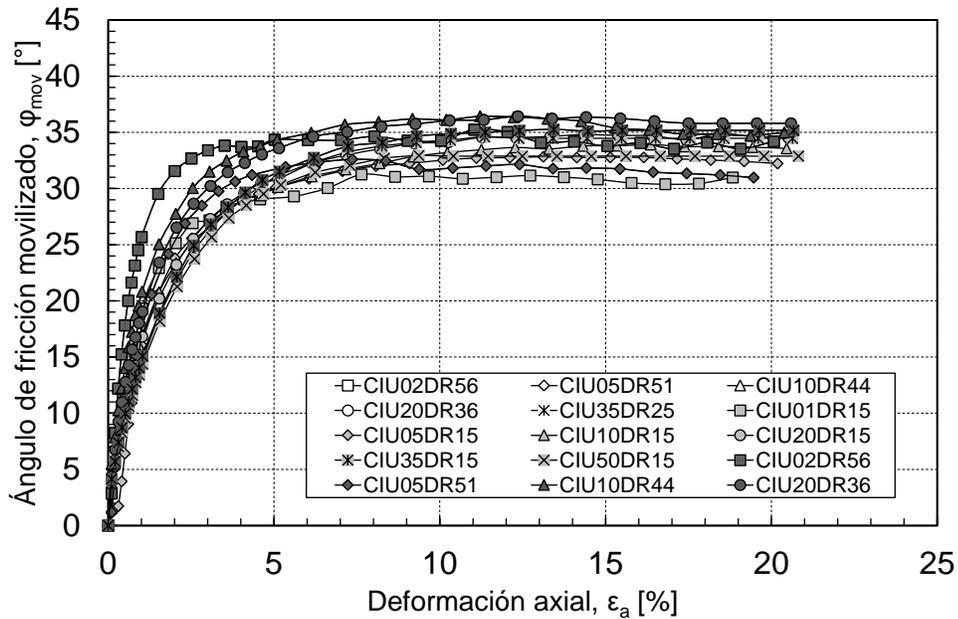


Figura 4.19: Ángulo de fricción movilizado en los ensayos triaxiales no drenados para arena "El Torito" con CF=40%.

La Figura 4.20 muestra la regresión lineal realizada con los estados tensionales últimos para los ensayos triaxiales no drenados. Se determina una pendiente  $M=0.67$ , correspondiente a un ángulo de fricción interna de  $33^\circ$ , acorde a lo observado en la Figura 4.19. Se destaca que es un valor menor, pero del mismo orden a los obtenidos para los contenidos de fino 1% y 20%.

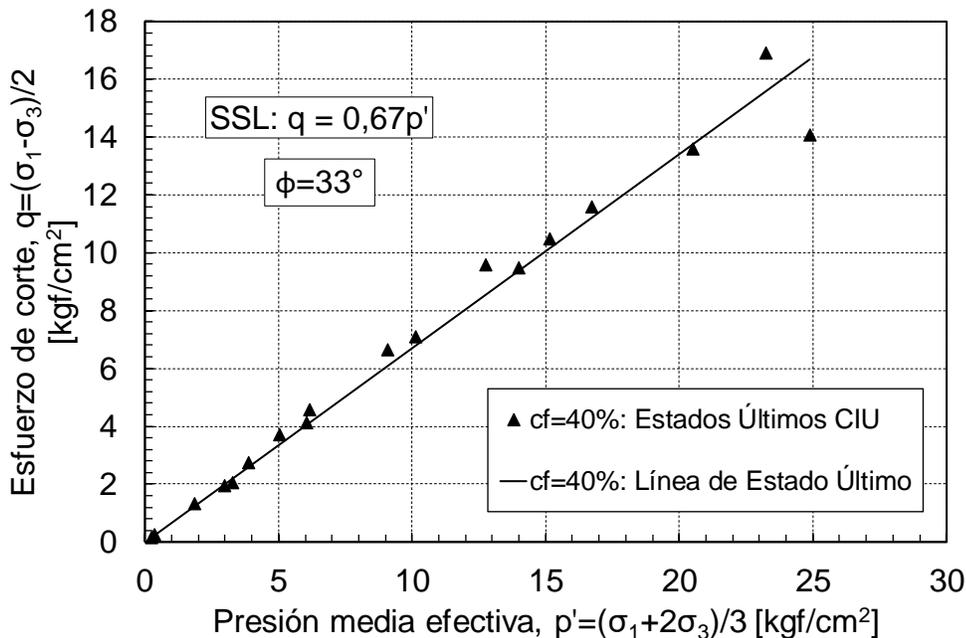


Figura 4.20: Línea de Estado Último (LEU) en espacio q-p' para arena "El Torito" con 40% de finos.

La Figura 4.21 presenta la Línea de Estado Último en el espacio p'-e en escalas lineal y logarítmica. Se aprecia, en escala logarítmica, un aumento de pendiente alrededor de  $p'=3 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que en escala lineal se tiene una suave disminución de la pendiente al aumentar la presión.

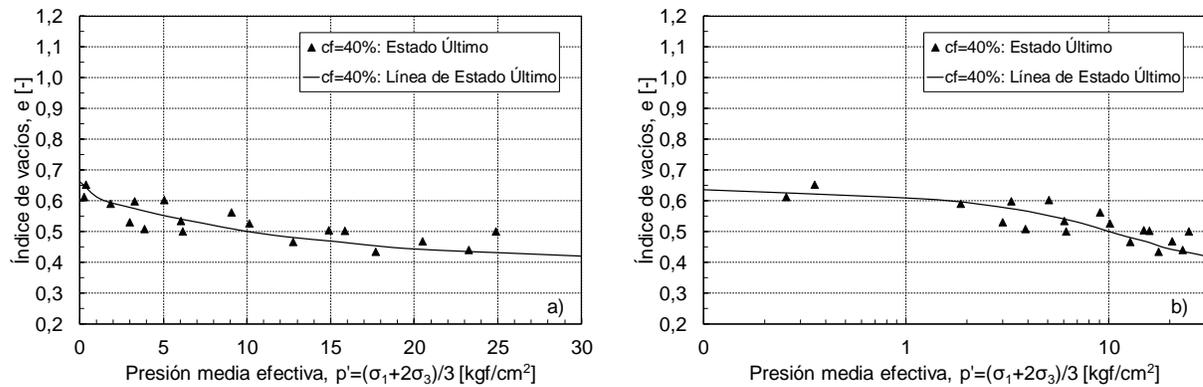


Figura 4.21: Línea de Estado Último (LEU) en espacio e-p' para arena "El Torito" con 40% de finos. a) Escala aritmética. b) Escala logarítmica.

### 4.1.3. GRANULOMETRÍAS POST-ENSAYO

Posterior a cada ensayo triaxial no drenado, las muestras fueron secadas y se obtuvo sus curvas granulométricas. Se comparan las granulometrías pre y post ensayo para observar la variación de la distribución de tamaño de partículas para los tres contenidos de finos.

La Figura 4.22 presenta las granulometrías post-ensayo de la arena "El Torito" con un 1% de contenido de finos para probetas confeccionadas a DR=15% (a) y probetas ensayadas a mayor densidad DR=73%-92% (b). Se observa una mayor diferencia en las curvas para las probetas más densas, movilizándose hacia menores tamaños de partículas al aumentar el confinamiento inicial.

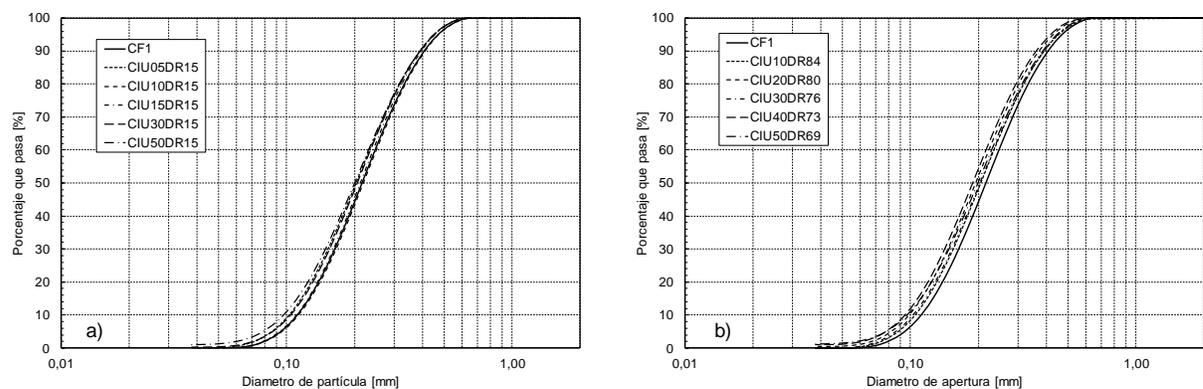


Figura 4.22: Granulometrías post-ensayos para arena "El Torito" con 1% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=73-92%.

La Figura 4.23 presenta las granulometrías post-ensayo de la arena "El Torito" con 20% de contenido de finos para probetas confeccionadas a DR=15% (a) y probetas ensayadas a mayor densidad DR=90%-98% (b). Se observa que la curvas para probetas sueltas no presenta variación con respecto al material sin ensayar, mientras que las probetas

densas muestran una leve variación en la parte baja de la curva, aumentando el porcentaje que pasa.

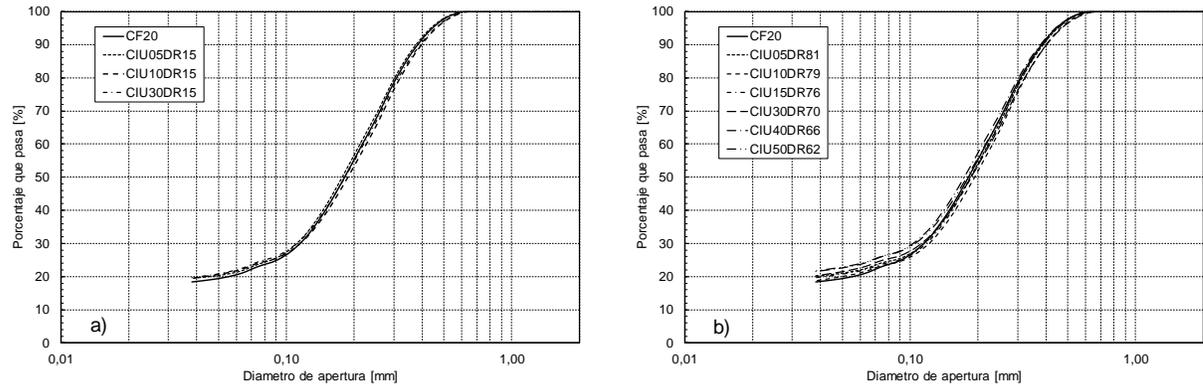


Figura 4.23: Granulometrías post-ensayos arena "El Torito" con 20% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=75-90.

La Figura 4.24 presenta las granulometrías post-ensayo para la de "El Torito" con 40% de contenido de finos para probetas confeccionadas a DR=15% (a) y probetas ensayadas a mayor densidad con DR=72%-95% (b). En ambas gráficas no se aprecia una variación significativa de las curvas post-ensayo con aquella para el material sin ensayar. Las leves diferencias observadas, como por ejemplo al final de las curvas para las muestras sueltas, puede atribuirse a parte del error de medición del ensayo.

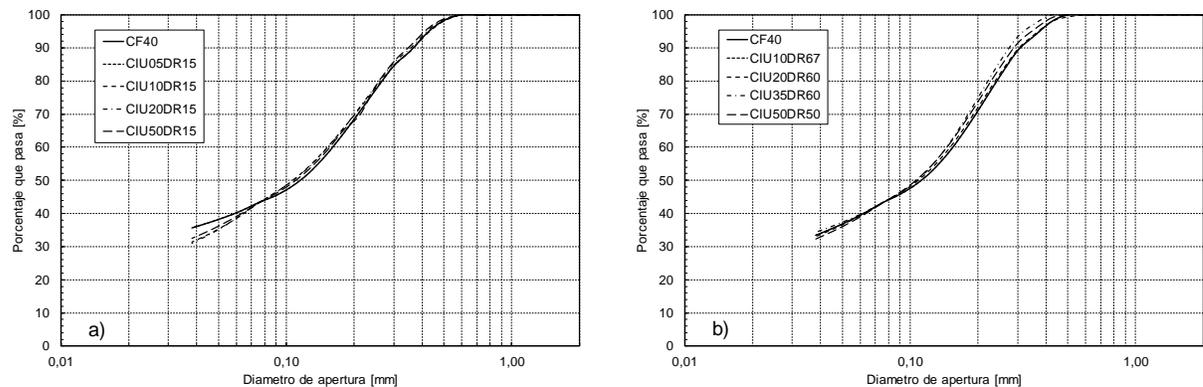


Figura 4.24: Granulometrías post-ensayos para arena "El Torito" con 40% de finos. a) Probetas DR=15%. b) Probetas DR=72%-95%.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 5.1. VARIACIÓN DE $e_{max}$ Y $e_{min}$ CON EL CONTENIDO DE FINOS

El efecto del contenido de finos en un material granular, aparte de afectar su respuesta mecánica, también lo hace con su estructura y fábrica, como han mostrado diversos autores (Cubrinovsky & Ishihara, 2002; Lade et al.1998). La Figura 5.1 muestra los estudios de densidad máxima y densidad mínima sobre la arena ‘El Torito’, realizados por Córdova (2017) y Bravo (2018), a través del método japonés (JGS, 2000) y de deposición lenta del material (ASTM D4254, 2000) respectivamente, los cuales permiten contextualizar el presente trabajo.

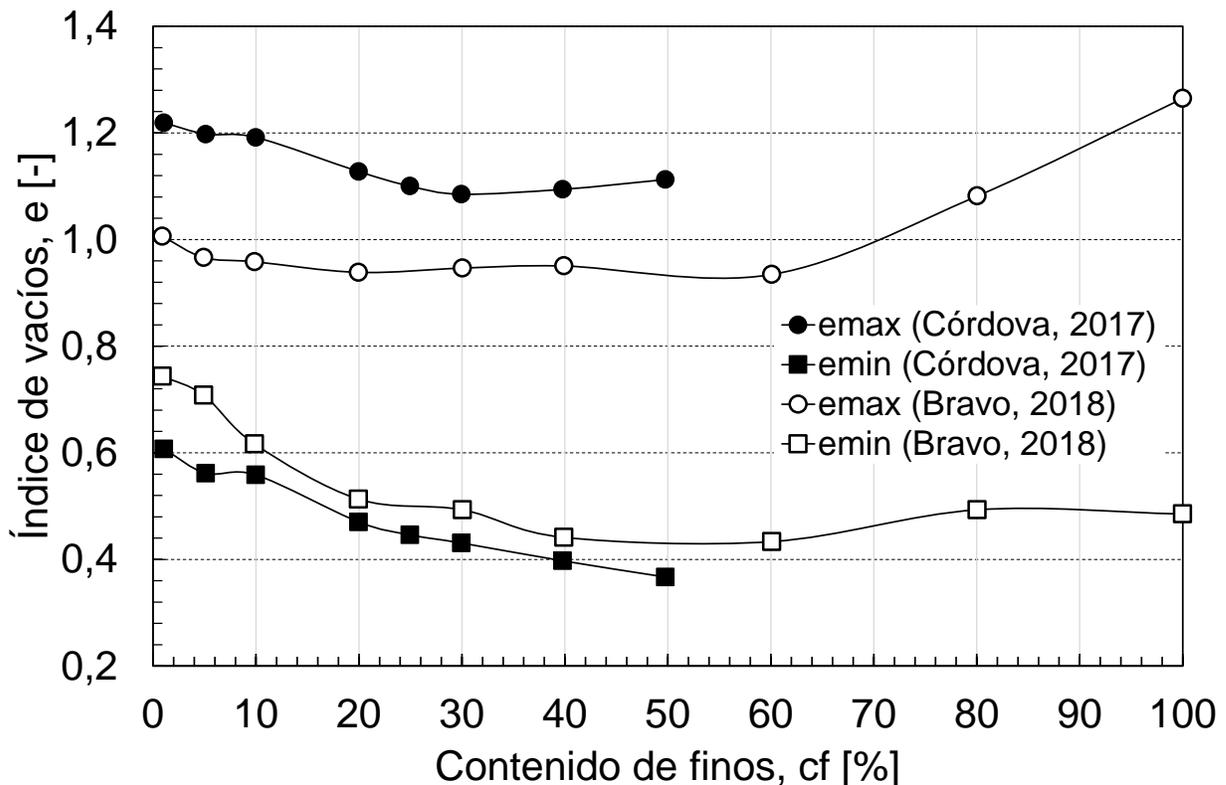


Figura 5.1: Variación de los índices de vacíos máximo y mínimo para arena ‘El Torito’ con el contenido de finos no plásticos. Resultados de Córdova (2017) y Bravo (2018).

De la Figura 5.1 se observa que, pase a que ambos autores utilizaron los mismos métodos y el mismo material, existe una diferencia en magnitud de los resultados, pero no en la forma que siguen las curvas, lo cual puede deberse a la alta sensibilidad del ensayo a quien lo realiza. Para poder realizar una mejor comparación de los resultados, estos se normalizan por los índices de vacíos correspondientes a la arena limpia ( $cf \leq 1\%$ ).

La Figura 5.2 presenta la variación de los índices de vacíos máximo (a) y mínimo (b) para arena ‘El Torito’ con el contenido de finos, en conjunto con resultados para distintas arenas de diversos orígenes reportados por algunos autores dentro de la literatura técnica (Yang et al., 2005; Polito & Martin, 2003, 2001; Lade et al., 1998; Verdugo, 1994). La Tabla 5.1 resume estas arenas y sus características.

Tabla 5.1: Resumen de las características de las arenas utilizadas en estudios del efecto del contenido de finos en los índices de vacíos máximo y mínimo por diversos autores.

Autor	Arena	Limo	Origen	Forma
Verdugo (1994)	R1-F1	-	Relave	-
Lade et al. (1998)	Nevada 50/60	Limos de Nevada	Natural	Sub angular – Angular
Polito & Martin (2001)	Monterey N°0/30	Limos de Yatesville	Natural	Sub redondeada – Sub angular
Polito y Martin (2003)	Yatesville	Limos de Yatesville	Natural	Sub redondeada – Sub angular
Yang et al. (2005)	Hokksund	Limos de Changbei	Natural	Angular

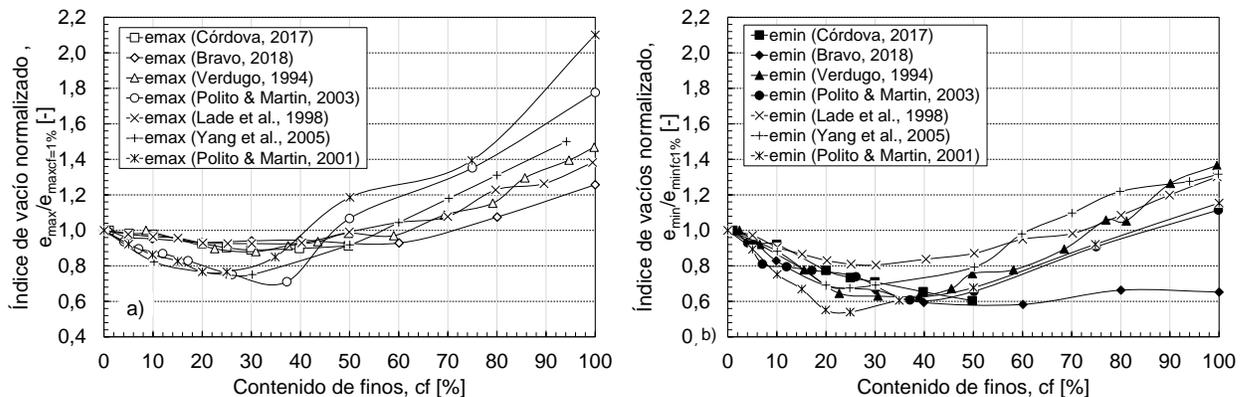


Figura 5.2: Variación de los índices de vacíos máximo (a) y mínimo (b) normalizados por los índices de vacíos correspondientes a la arena limpia.

De la Figura 5.2 se aprecia que las arenas de relaves de este estudio (Córdova, 2017 y Bravo, 2018) y la de Verdugo (1994), presentan un comportamiento similar al reportado para arenas naturales (Yang et al., 2005; Polito & Martin, 2003, 2001; Lade et al., 1998) con distintas formas de partículas. Esto sugiere que el comportamiento de los índices de vacíos con el contenido de finos no plásticos sería independiente del origen de las partículas, siendo válido también en arenas de relave.

Para el índice de vacíos máximo  $e_{max}$ , todas las arenas alcanzan su mínimo valor en un rango de contenido de finos entre  $cf=20\%$ , para Polito & Martin (2003) y  $cf=37\%$  para Polito & Martin (2003), y particularmente la arena “El Torito” lo alcanza para un contenido de finos de  $30\%$ , mientras que el máximo valor es alcanzado para el limo limpio ( $cf=100\%$ ) para todas las arenas.

Por su parte,  $e_{min}$  alcanza su mínimo valor en un rango de contenido de finos similar, entre  $cf=25\%$  para Yang et al. (2005) y  $cf=37\%$  para Polito y Martin (2003), mientras que

la arena "El Torito" muestra un comportamiento ligeramente diferente, alcanzando su mínimo  $e_{\min}$  para un contenido de finos de 50%. Lo cual sugiere que, particularmente para esta arena, el alto nivel de energía sigue movilizand las partículas finas hacia los vacíos, logrando un esqueleto granular más compacto.

Cubrinovsky e Ishihara (2002) indican que el contenido de finos donde cambia la tendencia decreciente de los índices de vacíos máximo y mínimo a una tendencia creciente, correspondería al contenido de finos límite ( $f_{C_{th}}$ ). Para la arena en estudio,  $e_{\max}$  muestra el cambio de tendencia para  $cf=30\%$ , mientras que  $e_{\min}$  lo hace para  $cf=50\%$ . Por su parte, Thevanayagam (2000) indica que el  $f_{C_{th}}$  corresponde al contenido de finos en que estos llenan por completo los espacios vacíos entre las partículas gruesas para el estado de depositación más suelto, por lo tanto, de acuerdo con este autor el  $f_{C_{th}}$  para la arena en estudio sería de 30%.

## 5.2. COMPRESIBILIDAD ISOTRÓPICA

La Figura 4.1 muestra que para las densidades de confección de 65% y 90% a presiones de confinamiento de 30 y 7 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente, se alcanzan índices de vacíos menores al valor mínimo obtenido en los ensayos de densidad máxima. Córdova (2017) observo lo mismo para arenas con 1%, 5%, 10% y 20% de finos, pero solo a densidad de confección de 90% y a partir de presiones de confinamiento superiores a 20 kgf/cm<sup>2</sup>. De esto se desprende; primero, que a cierto nivel tensional es posible alcanzar estados de ordenamiento de partículas más compactas, no alcanzables con los métodos estandarizados de compactación. Lo segundo y a partir de la consolidación de la muestra con 40% de finos, a una densidad de 90%, donde a partir de 7 kgf/cm<sup>2</sup> se obtienen índices de vacíos menores al mínimo, nivel tensional que se encuentra dentro de la práctica común en ingeniería y es mucho menor al observado para el resto de los materiales, sugiere que, para un 40% de finos, el método de densidad máxima utilizado (JGS, 2000) para la determinación del índice de vacíos mínimo no es el más adecuado y con otro método podrían obtenerse valores inferiores. Esto podría deberse a que este nivel de contenido de finos las fuerzas electromagnéticas, significativas en materiales finos, comienzan a tener una participación equiparable a las gravitacionales. Esto sugiere entonces, que para  $cf=40\%$ , existiría una mayor participación de los finos en la matriz resistente.

Con respecto al efecto del contenido de finos, la Figura 4.2 muestra que las arenas con  $cf=1, 5, 10, 20\%$  y a baja densidad de confección ( $DR=15\%$ ), presentan un aumento de compresibilidad al agregar finos. Esto se explica ya que las partículas de arena y finas formarían un estructura meta-estable, otorgando mayor capacidad de reordenamiento al esqueleto granular. Mientras, para una mayor densidad de confección, los finos ubicados en una estructura más estable ya no juegan un rol importante y la compresibilidad se hace independiente de estos, siendo controlada por la fracción gruesa, por esto para  $DR=90\%$  todas presentan la misma curva de  $e/e_0$  (Figura 4.2c). Por su parte, la arena con 40% de finos, muestra una mayor compresibilidad que el resto de los materiales para las tres densidades y parece converger a un valor único de  $e/e_0=0,58$ . Esto sugiere un cambio significativo en el comportamiento, porque ya no serían las partículas de arena quienes están gobernando sobre la respuesta mecánica y los finos tomarían un rol más importante. Las Figuras Figura 5.3 y Figura 5.4 esquematizan la estructura de arenas con

finos y muestran como para un alto contenido de finos, los granos de arena ya no estarían en contacto, dejando a los finos como la matriz resistente.

Por su parte, el módulo de compresibilidad volumétrica “ $m_v$ ” (Figura 4.3), muestra diferencias solo a presiones menores a  $p'=10 \text{ kgf/cm}^2$ , por lo que la diferencia en compresibilidad y la mayor variación del índice de vacíos, se daría a bajas presiones, mientras que a mayores presiones todos los materiales alcanzarían una compresibilidad similar.

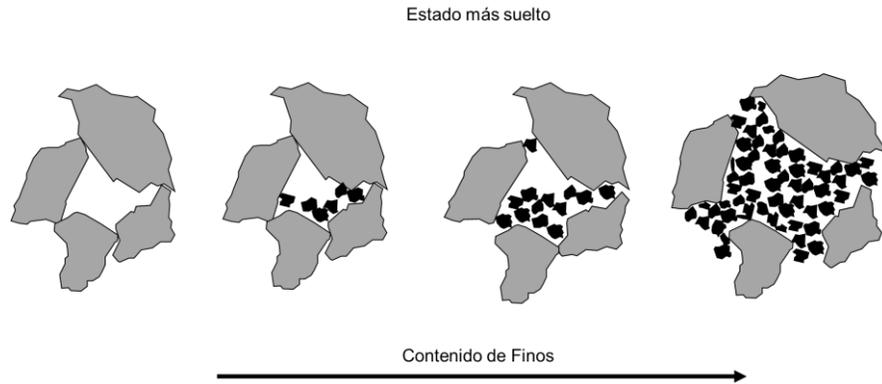


Figura 5.3: Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más suelto para arena angulosa al aumentar el contenido de finos (Modificado de Córdova, 2017).

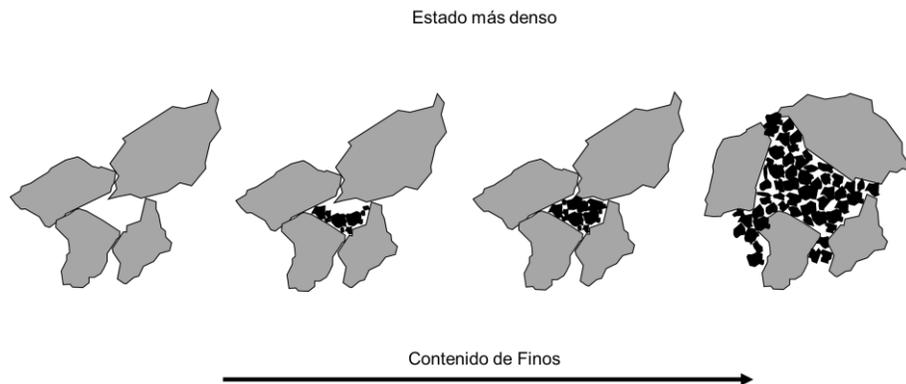


Figura 5.4: Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más denso para arena angulosa al aumentar el contenido de finos (Modificado de Córdova, 2017).

### 5.3. LÍNEA DE ESTADO ÚLTIMO ESPACIO $q$ - $p'$

#### 5.3.1. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES

Las Figuras Figura 4.8, Figura 4.14 y Figura 4.20 muestran los estados últimos en el espacio  $p'$ - $q$  para los ensayos triaxiales no drenados en arena con contenidos de finos de 1%, 20% y 40% respectivamente. Se observa que, en el rango de presiones estudiados, los datos para los tres materiales se ajustan a líneas rectas pasando por el origen, con ángulos de fricción de  $\phi_{cf1\%}=35^\circ$ ,  $\phi_{cf20\%}=36^\circ$  y  $\phi_{cf40\%}=33^\circ$ . Uno de los efectos de las altas presiones en medios granulares es la curvatura de la Línea de Estado Último (Bishop, 1960), fenómeno no observado en el rango de presiones alcanzadas con los ensayos no drenados realizados. Sin embargo, Bravo (2018) realizó ensayos drenados

sobre la misma arena, los cuales permiten extender la LEU hasta presiones superiores a las obtenidas por ensayos CIU, alcanzando valores de  $p'$  por sobre los 80 kgf/cm<sup>2</sup>. Al incorporar estos datos, la Figura 5.5 muestra que la proyección de la línea obtenida con ensayos CIU no se ajusta a los datos a altas presiones, y que la Línea de Estado Último comienza a curvarse, siendo esta curvatura más evidente en la arena con 1% de finos y menos significativa para los contenidos de finos 20% y 40%. Además, se observa que los estados últimos para ensayos CID con  $p' < 40$  kgf/cm<sup>2</sup> llegan a la misma línea definida por los ensayos no drenados, coincidente con lo mencionado por otros autores (Verdugo & Ishihara, 1996; Poulos, 1981), quienes señalan que el estado último no depende de la condición de drenaje.

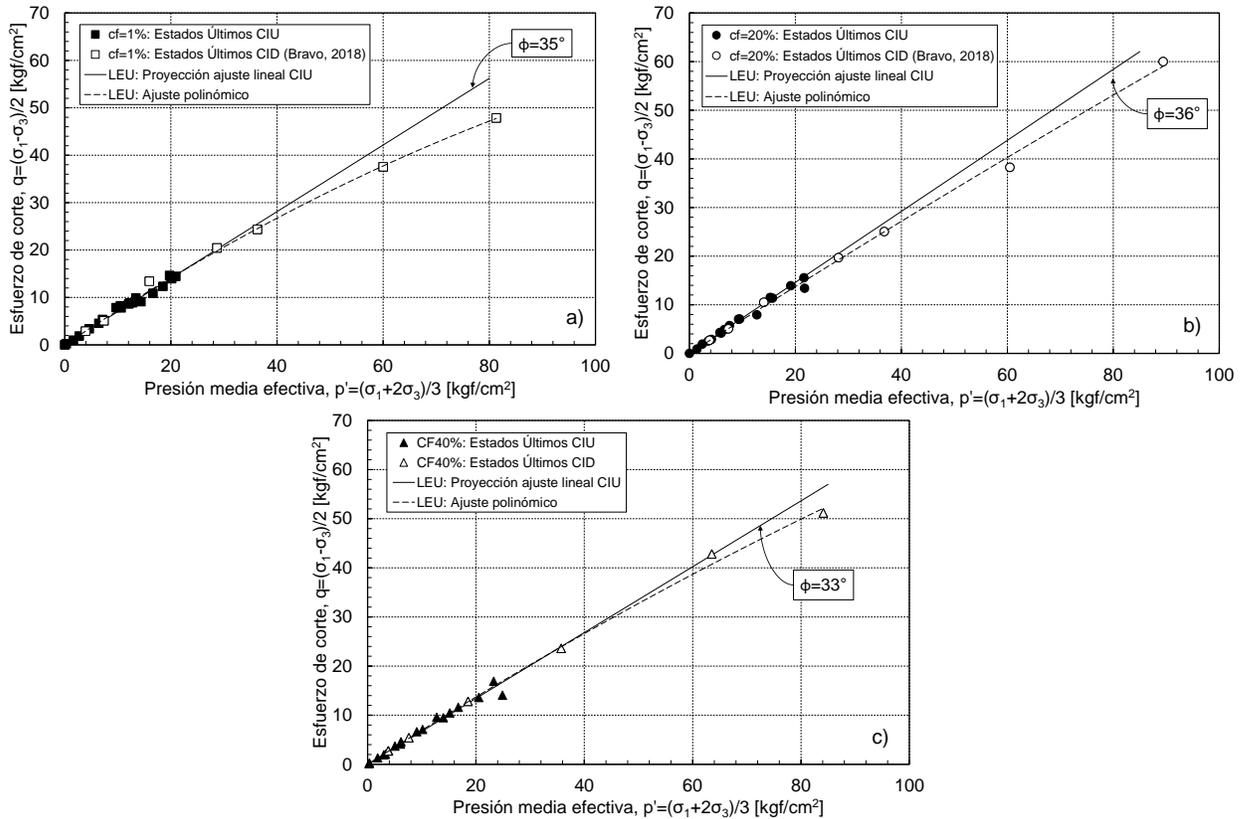


Figura 5.5: Comparación ajustes lineal y polinómico para las líneas de estado último de las arenas con distintos contenidos de finos: a) Arena-Finos 1%. b) Arena-Finos 20%. c) Arena-Finos 40%.

Lo anterior sugiere que el ángulo de fricción interna no permanece constante y decrecería a medida que aumenta la presión media  $p'$ . La Figura 5.6 presenta el ángulo de fricción secante medido en el estado último ( $\phi_u$ ) versus la presión media efectiva en el estado último ( $p'_{EU}$ ), considerando los ensayos CIU y CID, para los tres contenidos de finos.

A pesar de la dispersión, en los tres contenidos de finos, la tendencia a la disminución del ángulo, al aumentar la presión media en el estado último, es clara. Esto confirma el hecho de que la línea de estado último comience a curvarse a partir de cierta presión media efectiva y por lo tanto el ángulo comience a disminuir. Se observa también que, a bajas presiones, el ángulo secante último rodea el valor de 35°, valor cercano al arrojado por los ajustes lineales realizados con los ensayos no drenados. Así, de lo expuesto para los niveles de confinamiento ensayados, la curvatura de la Línea de Estado Último se

observaría solo a través de ensayos drenados a altas presiones, por lo tanto, la resistencia a presiones medias menores a 40 kgf/cm<sup>2</sup> podría caracterizarse con un ajuste lineal y un solo ángulo de fricción interna.

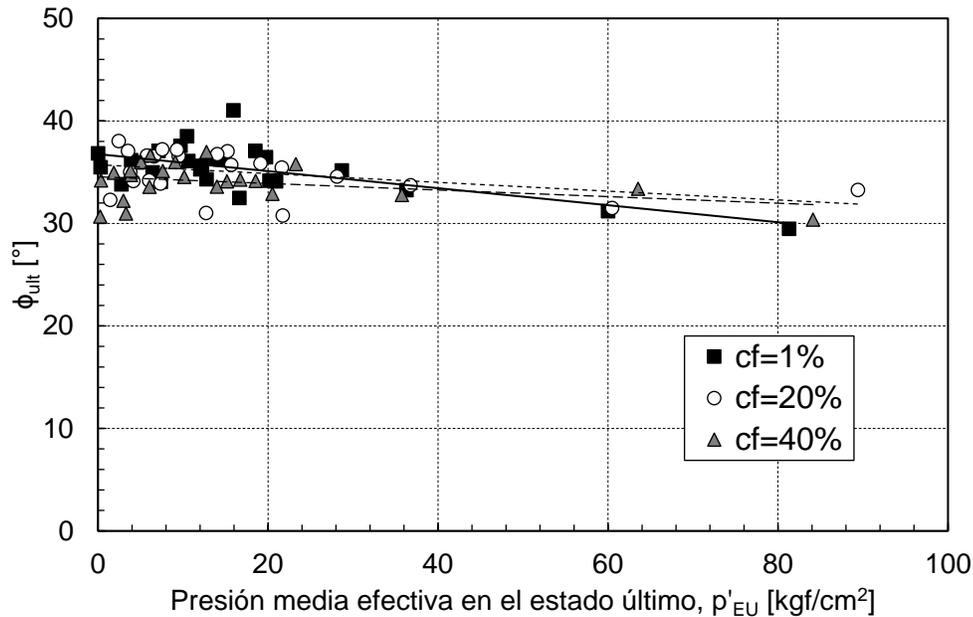


Figura 5.6: Variación del ángulo de fricción secante medido en el estado último ( $\phi_{ult}$ ) con la presión media efectiva en el estado último.

### 5.3.2. EFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS

La Figura 5.7 presenta la Línea de Estado Último para la arena con los tres contenidos de finos ensayados, considerando solo ensayos no drenados. A través de regresiones lineales mediante el método de mínimos cuadrados, se obtienen ángulos de fricción interna de 35°, 36° y 33° para los contenidos de finos 1%, 20% y 40% respectivamente. La máxima variación se da para la arena con mayor porcentaje de finos, presentando un ángulo 6% menor con respecto a la arena limpia, mientras que el material con 20% de finos muestra el máximo valor, siendo un 3% mayor al de la arena con 1%. Sin embargo, la dispersión de los datos no permite asegurar que la variación en el ángulo de fricción se debe específicamente a la variación en el contenido de finos y no esté dentro del rango de error. En base a esto, a lo mostrado por la Figura 5.6 y considerando la baja diferencia de los ángulos obtenidos a través de las regresiones lineales, se puede considerar que el ángulo de fricción interna sería más bien insensible al contenido de finos, siempre dentro del rango de este estudio.

Cuando se consideran los ensayos drenados (Figura 5.8), se observa una única Línea de Estado Último de pendiente  $M=0,70$  ( $\phi=35^\circ$ ) para los tres contenidos de finos hasta una presión media  $p'=40$  kgf/cm<sup>2</sup>, aproximadamente. A mayor presión, las líneas comienzan a curvarse y a diferenciarse según el contenido de finos. La mayor curvatura se da para la arena con 1% de finos, seguida de la arena con 40% y la menor curvatura corresponde a la mezcla con 20% de finos. Además, se incluyen ensayos drenados realizados por Bravo (2018) en la misma arena con 5 y 10% de finos, que confirman la poca influencia de los finos en la Línea de Estado Último en el espacio  $p'$ - $q$ . Esta baja

variación de la Línea de Estado Último con el contenido de finos para arenas de relaves ha sido reportada por Campaña et al. (2013), quienes al variar de 12% a 30% de finos obtuvieron una diferencia de 12% en el ángulo de fricción a presiones menores de 1 MPa, y al aumentar la presión la diferencia disminuye a un 5%.

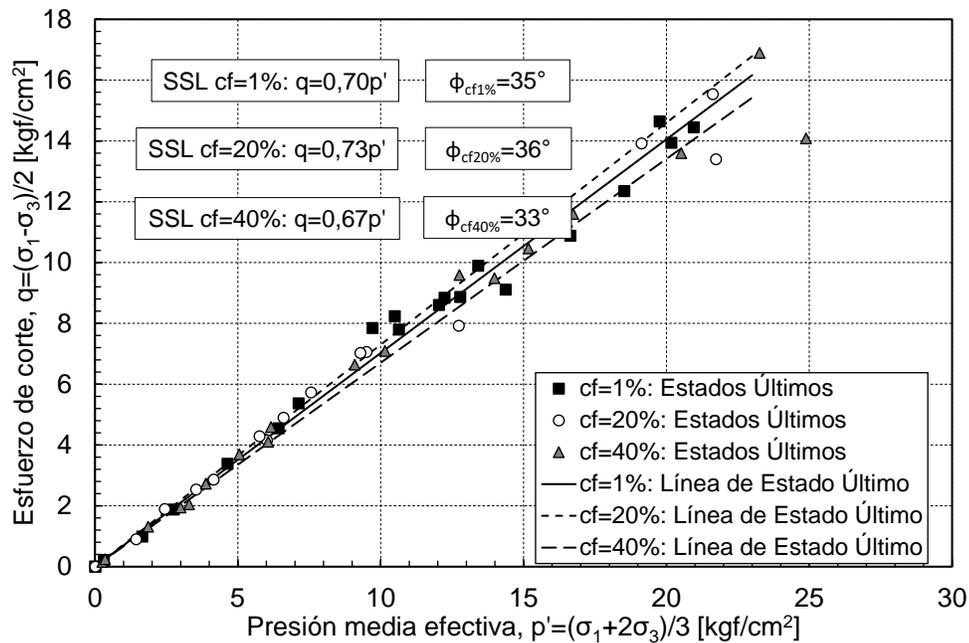


Figura 5.7: Comparación Líneas de Estado Último para los tres contenidos de finos considerando ensayos CIU.

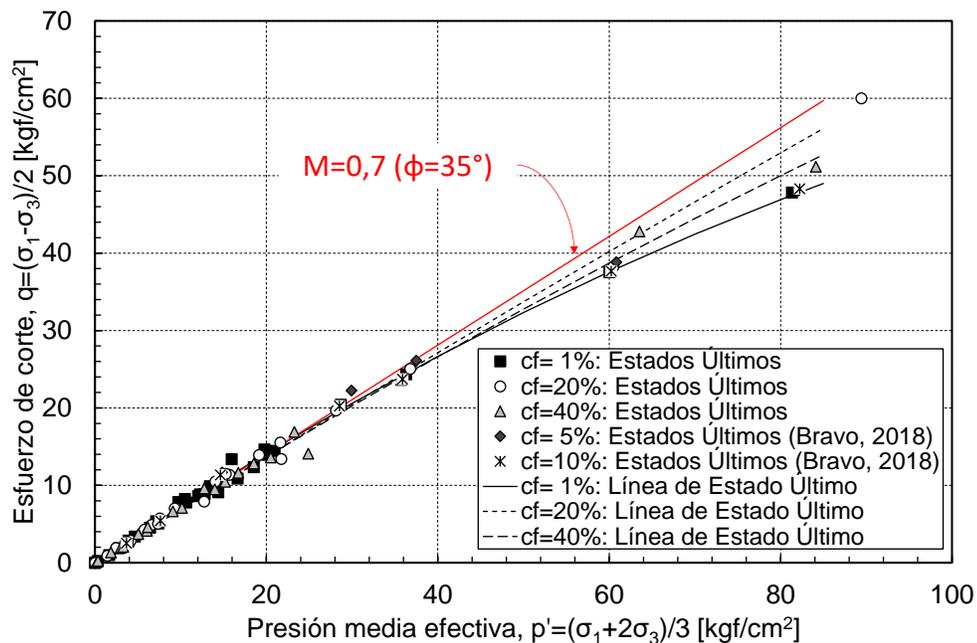


Figura 5.8: Comparación Líneas de Estado Último para los tres contenidos de finos considerando ensayos CIU y CID.

### 5.3.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN

La Figura 5.9 presenta la variación del módulo de deformación medido a una deformación axial de 0,1% ( $E_{0,1\%}$ ) con la presión de confinamiento efectivo inicial  $p'_0$  en doble escala logarítmica, para los tres contenidos de finos ensayados. Se observa que, al aumentar la presión de confinamiento inicial, incrementa el valor del módulo de deformación, mientras que el efecto del contenido de finos no sería significativo, obteniendo todos los resultados dentro de una banda. Similares resultados son reportados por Campaña y Bard (2013) en ensayos drenados y no drenados en arenas con porcentajes de finos entre 15% y 30%, y Bravo (2018) en ensayos drenados sobre la misma arena con contenidos de finos entre 1 y 20%.

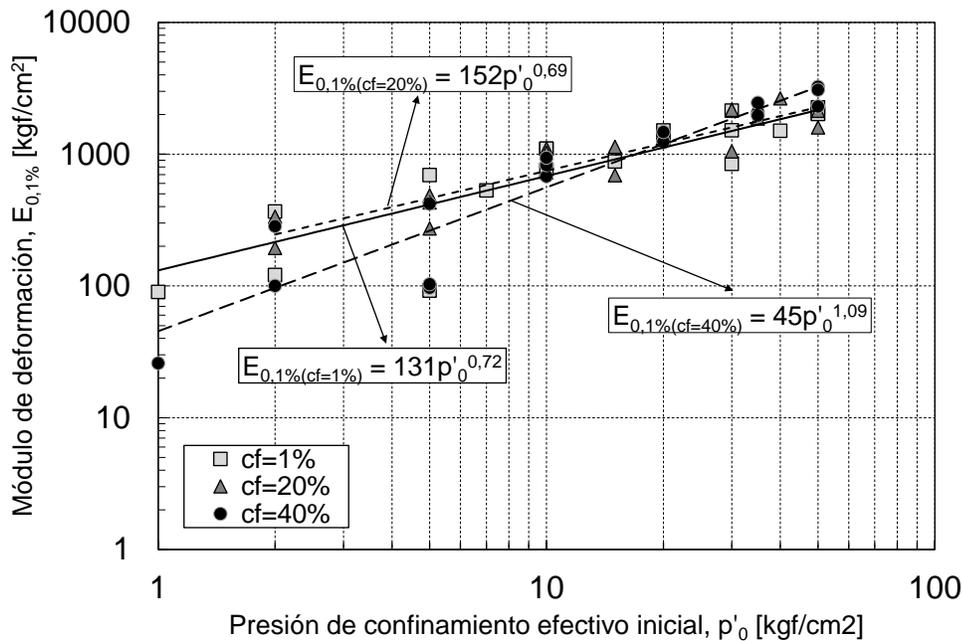


Figura 5.9: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación  $E_{0,1\%}$  con la presión de confinamiento inicial ( $p'_0$ ) en doble escala logarítmica, para los tres contenidos de finos ensayados.

Por otra parte, la Figura 5.10 muestra la variación del módulo de deformación medido a una deformación axial de 0,1% ( $E_{0,1\%}$ ) con respecto al índice de vacíos de ensayos, el cual da una idea del empaquetamiento del material al tiempo de aplicar el corte. Se observa que es posible trazar una curva para los tres contenidos de finos que correlaciona ambos parámetros. Al aumentar el contenido de finos, dichas curvas se trasladan hacia menores índices de vacíos. La Figura 5.11 muestra la variación del módulo, ahora con respecto a la densidad relativa de ensayo (DR). Se observa que los resultados caen dentro de una banda entre 60% y 100% de densidad relativa. Aquí, se aprecia un comportamiento distinto al mostrado en la Figura 5.10, presentando una diferencia entre las arenas con 1% y 20% de finos, esta última trasladándose hacia mayores densidades, lo que sugiere que necesita de mayor compactación para presentar la misma rigidez que la arena limpia, mientras que el material con 40% muestra una mayor dispersión, cubriendo por completo el rango de densidades mencionado, sin embargo parece presentar mayores valores de  $E_{0,1\%}$  que la arena con 20% de finos.

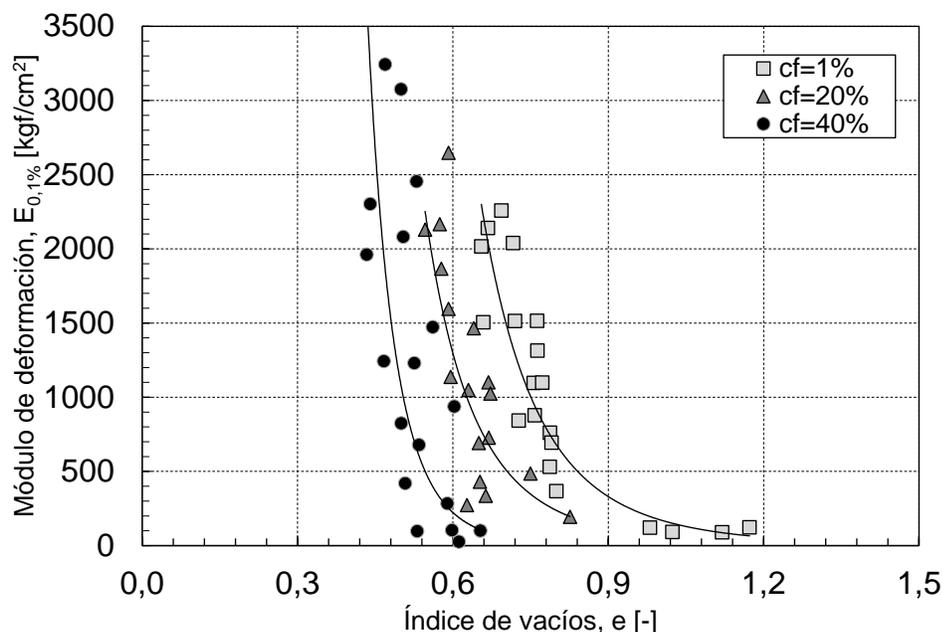


Figura 5.10: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación axial ( $E_{0,1\%}$ ) con el índice de vacíos ( $e$ ) para los tres contenidos de finos ensayados

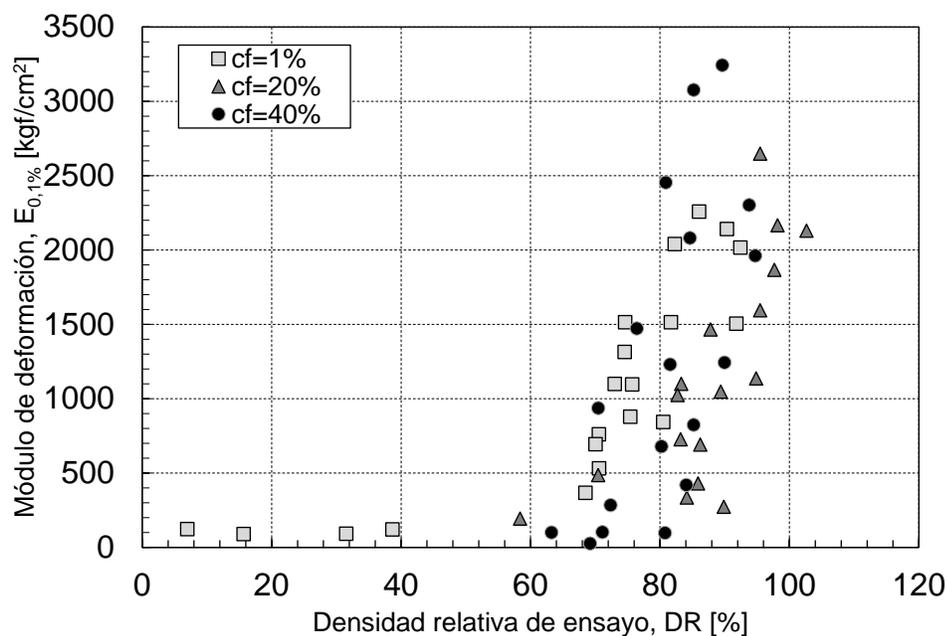


Figura 5.11: Variación del módulo de deformación a un 0,1% de deformación axial ( $E_{0,1\%}$ ) con la densidad relativa de ensayo (DR) para los tres contenidos de finos ensayados.

#### 5.3.4. RESISTENCIA NO DRENADA $S_u$

La Figura 5.12 presenta la variación de la resistencia última no drenada ( $S_u$ ) con respecto al índice de vacíos, para los tres contenidos de finos estudiados. Se observa que es posible trazar una curva, para cada porcentaje de finos, que correlaciona ambos parámetros, siendo esta altamente sensible al índice de vacíos. El aumentar el contenido de finos traslada las curvas hacia menores valores de "e" y estas se mantienen paralelas

en todo el rango de resistencias, salvo para la arena limpia a bajos  $S_u$ . Campaña et al. (2013) reportan resultados similares para 4 arenas de relaves con porcentajes de finos entre 12% y 30%, mientras que Thevanayagam et al. (1997) lo hacen para 24 arenas naturales con contenidos de finos entre 0 y 50%.

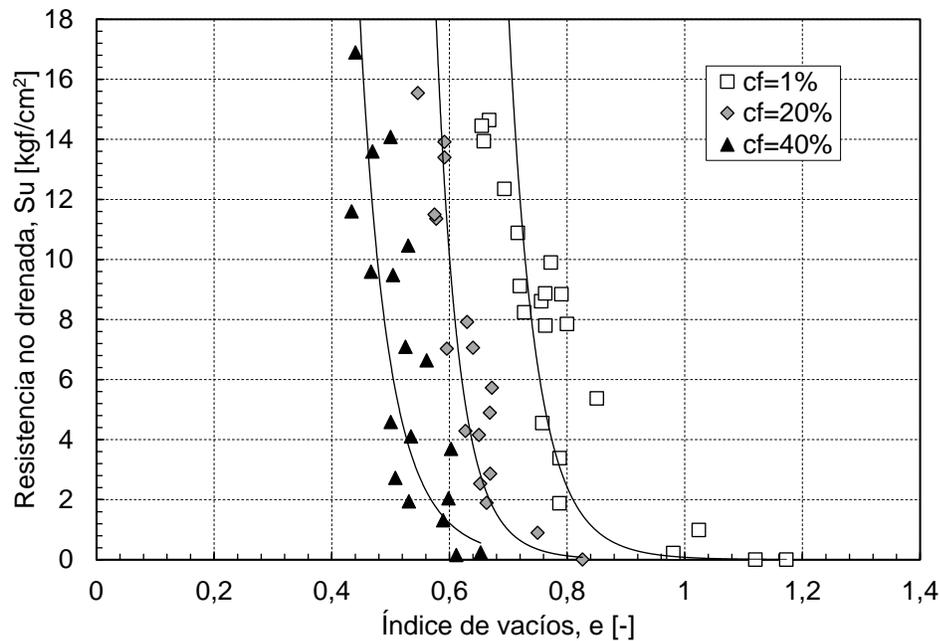


Figura 5.12: Variación de la resistencia última no drenada  $S_u$  con el índice de vacíos para arena 'El Torito' con contenidos de finos  $cf=1, 20$  y  $40\%$ .

Sin embargo, Thevanayagam et al. (1997) señalan que el efecto de los finos en la resistencia no drenada es más evidente al graficarla con respecto a la densidad relativa. La Figura 5.13 muestra la variación de  $S_u$  con la densidad relativa para los tres porcentajes de finos. Se observa que, si se mantiene fija la densidad relativa, la arena limpia presenta la mayor resistencia, seguida de la arena con 40% de finos, y por último el material con 20%. Esto indica que entre 1 y 20% de finos existiría una disminución de la resistencia, lo cual puede atribuirse a la estructura meta-estable generada en mezclas de arenas con finos a bajas densidades, la cual aumenta la inestabilidad del material, traduciéndose en mayor generación de presión de poros y una menor resistencia. Por su parte, la arena con 40% de finos ya no generaría este tipo de estructuras, presentando un estado más estable, aumentando su resistencia en comparación con la arena con  $cf=20\%$ , pero se mantendría por debajo de la arena limpia. Esto último soporta la idea de una mayor participación de los finos en la estructura resistente y el cambio de matriz.

También, se aprecia que la densidad relativa para obtener una resistencia nula ( $S_u=0$ ) es  $Dr=70\%$  para la arena con 20% de finos, lo cual se traduce en que se requieren estados altamente compactados para obtener resistencia en este material, mientras que para la arena limpia esto ocurre a una densidad  $Dr=35\%$ , señalando una estructura mucho más estable.

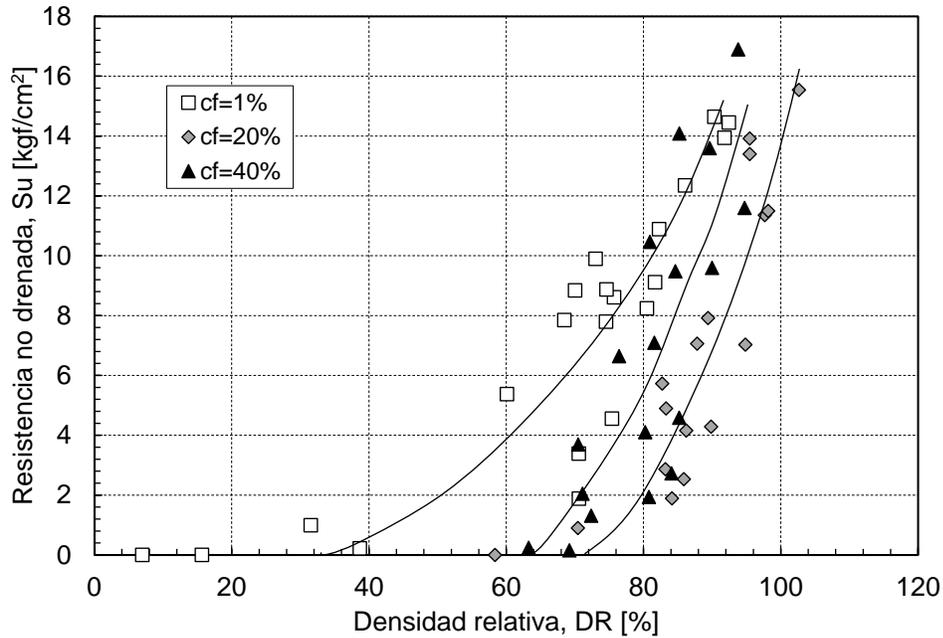


Figura 5.13: Variación de la resistencia última no drenada  $S_u$  con la densidad relativa  $DR$ , para arena "El Torito" con contenido de finos  $cf=1, 20$  y  $40\%$ .

#### 5.4. INESTABILIDAD Y TRANSFORMACIÓN DE FASE

La Figura 5.14 resume las trayectorias de tensiones para los tres contenidos de finos a una densidad de confección  $DR=15\%$ , estado más suelto utilizado. En arenas con  $1\%$  y  $20\%$  de finos se observa inestabilidad para todo el rango de presiones estudiados, mientras que para un  $40\%$  de finos, la inestabilidad se da solo para la menor presión y al aumentar el confinamiento se tiene un comportamiento estable en toda la trayectoria de tensiones, diferenciándose de las otras dosificaciones de finos. Además, se aprecia que en aquellas muestras donde hay inestabilidad, existe un rango intermedio de presiones donde sería inestabilidad temporal, mientras que para presiones que se alejan de este rango (sean menores o mayores) existiría inestabilidad total, coincidente con las observaciones de Yamamuro y Lade (1998), donde la falla de flujo se observaría por debajo o por sobre cierto rango de presiones.

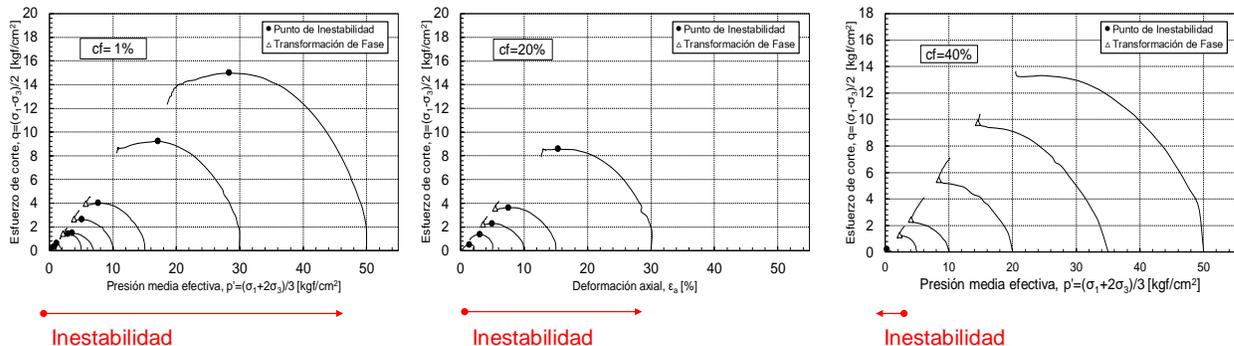


Figura 5.14: Trayectoria de tensiones para arena "El Torito" con contenido de finos  $1\%$ ,  $20\%$  y  $40\%$ , en probetas confeccionadas a  $DR=15\%$ .

La Figura 5.15 resume las trayectorias de tensiones para todos los contenidos de finos y densidades utilizadas. Se aprecia que, al aumentar la densidad de confección, la inestabilidad se ve desplazada hacia mayores presiones, dominando la dilatancia y el comportamiento estable en bajos confinamientos, sugiriendo que, al aumentar la densidad, el suelo se ordenaría en una estructura más estable. Además, se aprecia que para la arena con 40% de finos, dentro de todas las muestras ensayadas, solo se observan dos que presentan inestabilidad y corresponden a confinamientos iniciales de 1 y 2 kgf/cm<sup>2</sup>, por lo tanto, podría concluirse que para este contenido de finos y bajo el rango de presiones estudiados, el material no presentaría inestabilidad, diferenciando su comportamiento no drenado de los otros dos materiales. En la literatura (Cubrinovsky & Rees, 2008; Thevanayagam, 2002; Lade & Yamamuro, 1997), se han reportados arenas con altos contenidos de finos que presentan inestabilidad no drenada, sin embargo, son estudios a bajas presiones de confinamiento, coincidente con el nivel tensional para la inestabilidad encontrada en este estudio en la arena con cf=40%, pero que no se extienden a altas presiones.

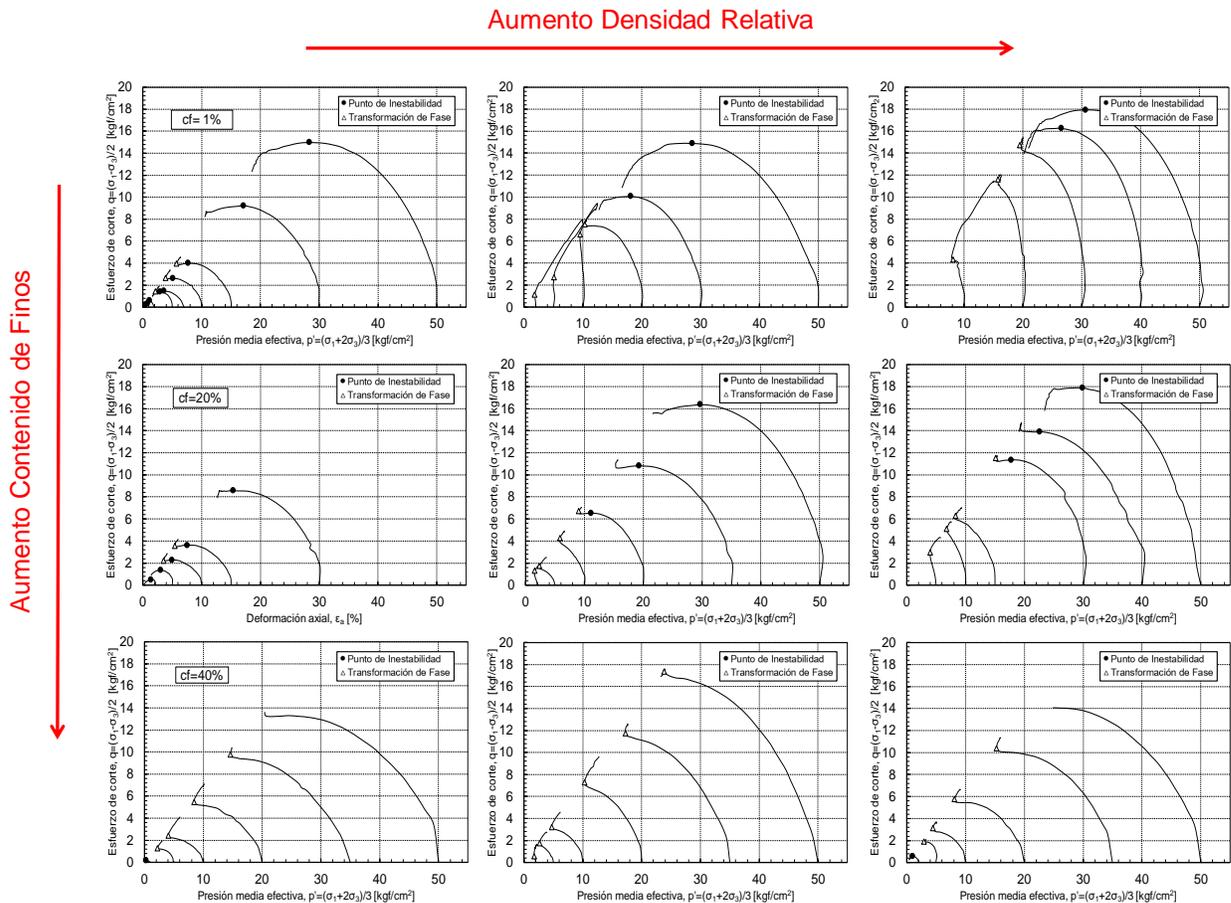


Figura 5.15: Trayectorias de tensiones de tensiones para arena "El Torito" con distintos contenidos de finos, aumentando la densidad de confección de izquierda a derecha.

Por otra parte, de las curvas tensión-deformación de aquellas muestras que presentan inestabilidad, se observa que, al aumentar el confinamiento inicial, el punto de inestabilidad o máxima resistencia local se presenta a una mayor deformación. La Figura 5.16 presenta la variación del nivel de deformación para el punto de inestabilidad con el aumento de la presión de confinamiento inicial para las arenas con 1 y 20% de finos, las

cuales presentan suficientes muestras con inestabilidad para el análisis. Se aprecia que, al aumentar el nivel de confinamiento, la deformación axial a la cual se alcanza el punto de inestabilidad incrementa, siendo menor a un 1% para confinamientos de 1 kgf/cm<sup>2</sup>, y 5% para la mayor presión ensayada ( $p'_0=50$  kgf/cm<sup>2</sup>). Esto indica que, a bajas presiones, la inestabilidad es alcanzada más rápido, lo cual puede asociarse a una mayor inestabilidad de la estructura inicial, debido a que sufrió una menor consolidación que aquellas muestras a mayor confinamiento. También indica que, a una mayor presión, el suelo necesita deformarse más para entrar en la zona de inestabilidad, lo cual otorgaría mayor holgura en el nivel de deformaciones aceptables en eventuales diseños.

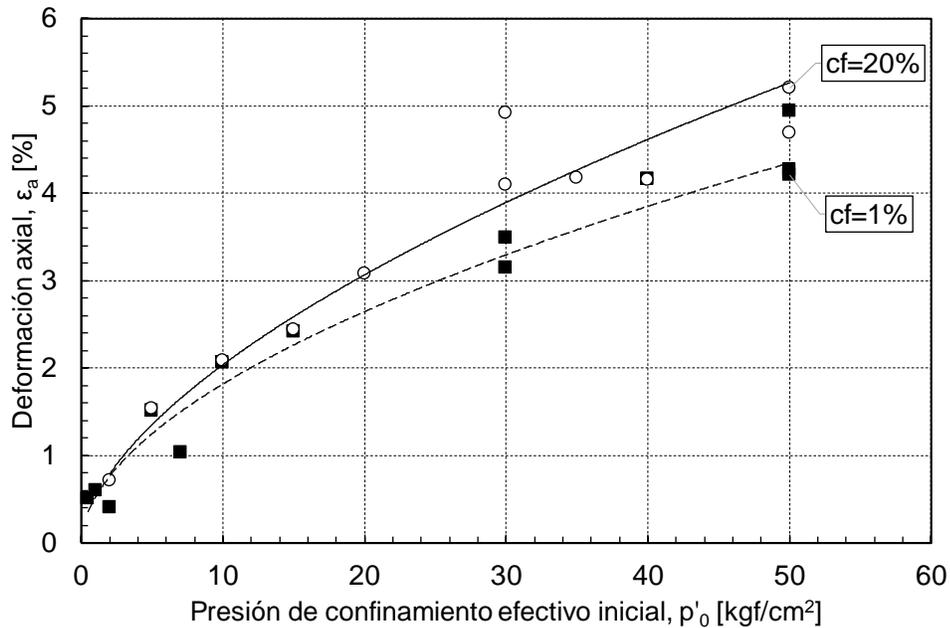


Figura 5.16: Variación de la deformación para el punto de inestabilidad con la presión de confinamiento inicial para arena "El Torito" con 1 y 20% de finos.

Algunos autores (Ishihara, 1993; Murthy et al., 2007) han reportado una relación lineal entre la presión de confinamiento efectivo inicial ( $p'_0$ ) y la presión media efectiva medida en el punto de inestabilidad ( $p'_p$ ). La Figura 5.17 presenta la variación de  $p'_p$  con respecto a  $p'_0$  para la arena aquí estudiada con contenidos de finos de 1% y 20%, y para arena Toyoura (Ishihara, 1993). Se obtienen pendientes  $p'_p/p'_0=0,60$  y  $0,57$  para  $cf=1\%$  y  $20\%$  respectivamente, mientras que para la arena Toyoura es de  $0,61$ . Por su parte Murthy et al. (2007) reportan valores de  $p'_p/p'_0$  entre  $0,59$  y  $0,66$  para arena Ottawa con porcentajes de finos entre  $0$  y  $15\%$ . Los resultados sugieren que el parámetro  $p'_p/p'_0$  sería poco sensible al tipo de arena y contenido de finos, obteniéndose valores alrededor de  $0,6$ , lo cual permitiría parametrizar la respuesta no drenada de arenas (Ishihara, 1993).

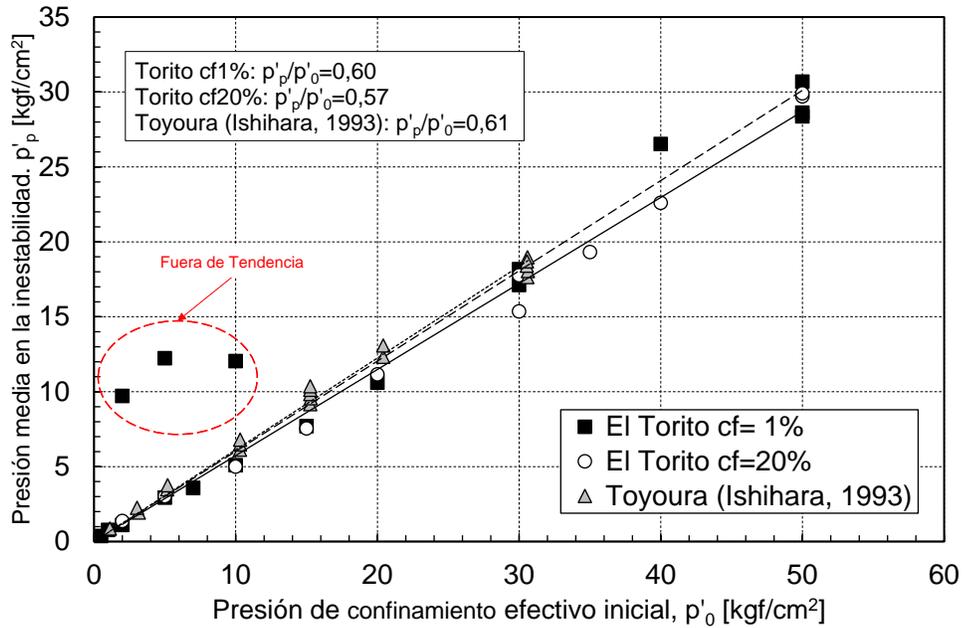


Figura 5.17: Variación de la presión media en el punto de inestabilidad con el confinamiento inicial para arena El Torito con 1% y 20% de finos, y arena Toyoura (Ishihara, 1993).

La Figura 5.18 muestra las Líneas de Inestabilidad No Drenada en el espacio  $p'$ - $q$  para las arenas con 1 y 20% de finos, no pudiendo definirse para el contenido de finos de 40% por falta de datos. Se observa que las líneas para ambos materiales son coincidentes y parecen partir desde el origen, con un ángulo de inestabilidad de  $29^\circ$ . De acuerdo con Lade y Bopp (1997), la línea de inestabilidad no drenada sería independiente de la densidad inicial, lo cual parece confirmarse en la baja dispersión de los datos mostrados pese a tener diferentes estados iniciales.

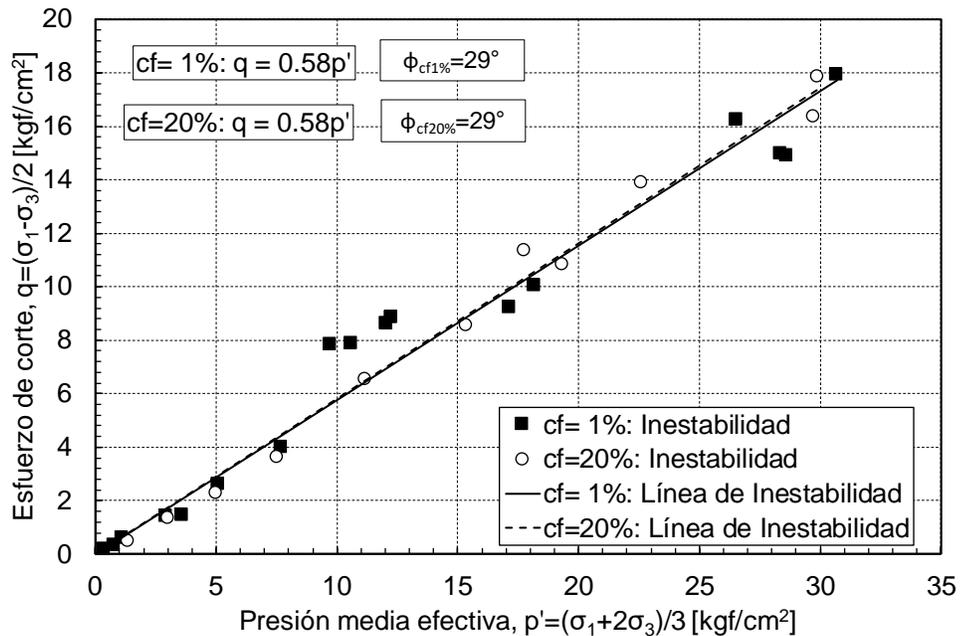


Figura 5.18: Líneas de Inestabilidad para la arena "El Torito" con 1% y 20% de contenido de finos.

La Figura 5.19 presenta la Línea de Transformación de Fase en el espacio  $p'$ - $q$  para los tres contenidos de finos ensayados. Se observa que existe una leve variación en los ángulos que caracterizan esta línea con el contenido de finos, obteniendo  $\phi_{TF}=33^\circ$  para un  $cf=40\%$ , seguido de  $\phi_{TF}=35^\circ$  para la arena limpia y el mayor ángulo  $\phi_{TF}=37^\circ$  se obtiene para la arena con 20% de finos.

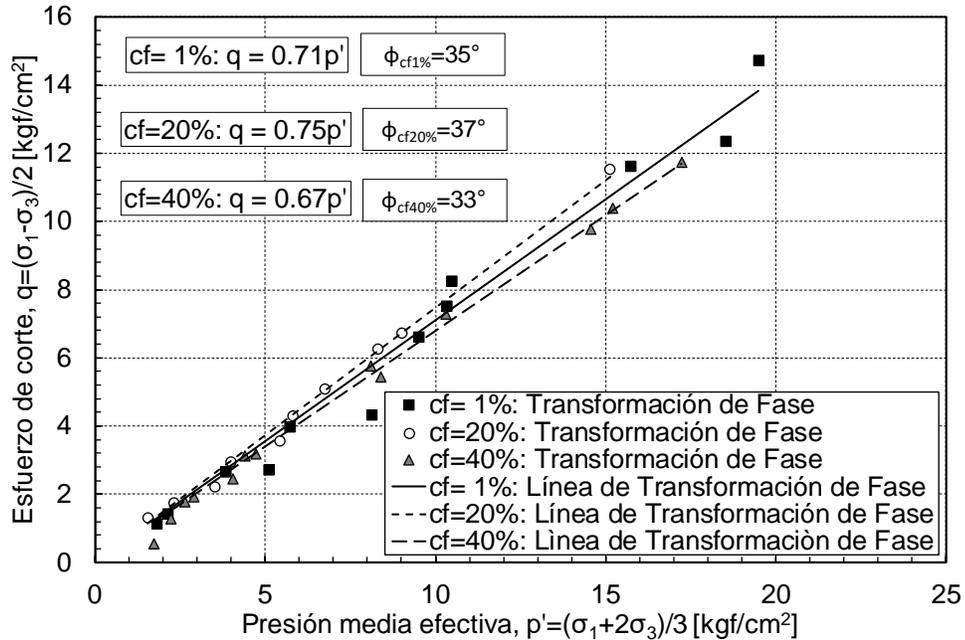


Figura 5.19: Líneas de Transformación de Fase para la arena "El Torito" con 1%, 20% y 40% de contenido de finos.

Finalmente, la Figura 5.20 muestra la comparación de los ángulos característicos de las Líneas de Estado Último, Inestabilidad y Transformación de Fase para los tres contenidos de finos ensayados. Se observa que tanto para 1 y 20% de finos, el ángulo asociado a la Línea de Inestabilidad No Drenada es menor al de la Línea de Estado Último, coincidente con lo señalado por diversos autores (Mohamad & Dobry, 1988; Ishihara, 1993; Bopp & Lade, 1997). Por su parte, el ángulo para la Transformación de Fase es, en términos prácticos, igual al asociado al Estado Último para la arena limpia y con 40% de finos, mientras que la arena con  $cf=20\%$  muestra un inusual comportamiento, con un ángulo de Transformación de Fase levemente mayor al del Estado Último, lo cual puede deberse a la dispersión asociada a los datos y no a un comportamiento del material. Así, en términos prácticos, el ángulo de transformación de fase podría considerarse igual al correspondiente al estado último.

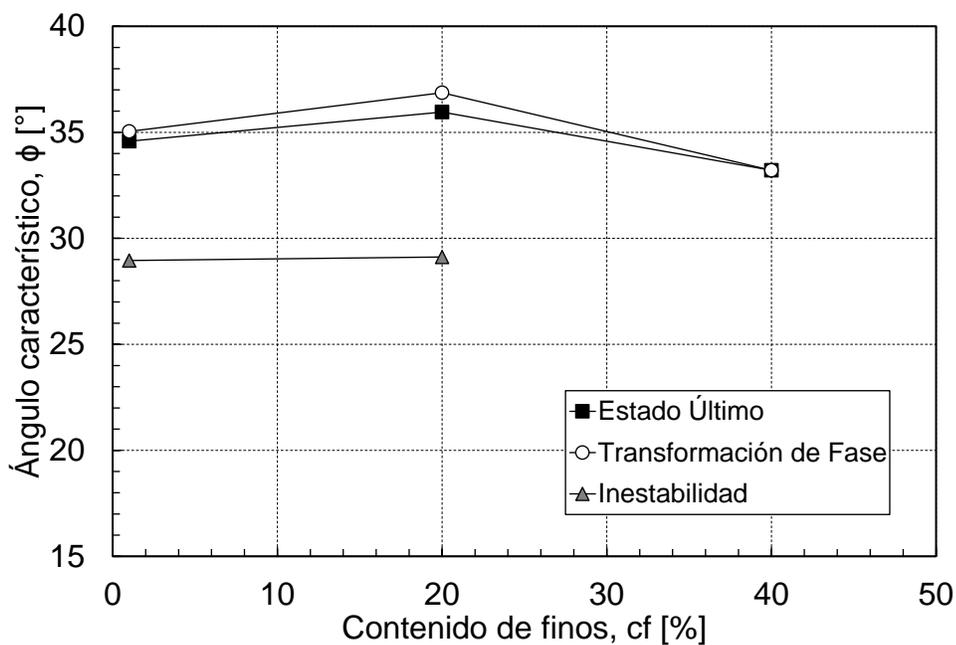


Figura 5.20: Comparación ángulos de Estado Último, Transformación de Fase e Inestabilidad para la arena "El Torito" con los tres contenidos de finos ensayados.

### 5.5. LÍNEA DE ESTADO ÚLTIMO ESPACIO $p'$ - $e$ (DIAGRAMA DE ESTADO)

La Figura 5.21 muestra las Líneas de Estado Último para los tres materiales ensayados, en escala lineal (a) y logarítmica (b), incluyendo los ensayos drenados (Bravo, 2018). Se observa una traslación de la Línea de Estado Último hacia menores índices de vacíos al aumentar el contenido de finos, similar a lo reportado por otros autores (Yang et al., 2006; Cubrinovsky & Rees, 2008) y se aprecia una convergencia de las líneas hacia presiones superiores a  $p'=80$  kgf/cm<sup>2</sup>. Al observar las curvas en el espacio  $\log(p')$ - $e$  se tiene, en las tres dosificaciones de finos, un cambio de pendiente, alrededor de  $p'=10$  kgf/cm<sup>2</sup> para 1% y 20% de finos, mientras que a un 40% de finos esto ocurre en un valor cercano a  $p'=1$  kgf/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, este cambio no está presente en la escala aritmética, por lo tanto, se asocia al cambio de escala y no a una eventual rotura de partículas (Mesri & Vardhanabhuti, 2009).

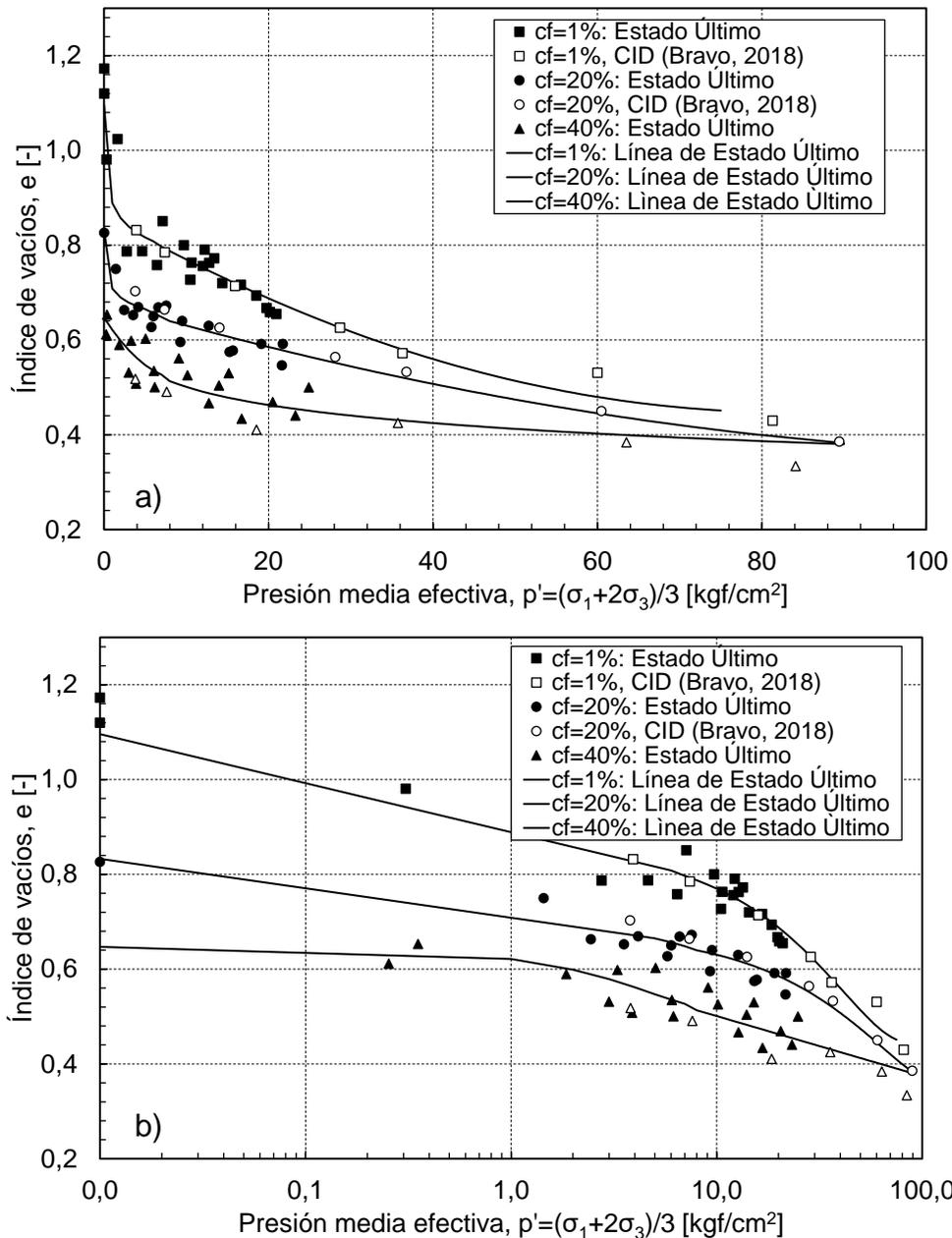


Figura 5.21: Líneas de estado último en espacio e-p' para arena "El Torito" con distintas dosificaciones de finos. a) Escala lineal. b) Escala logarítmica.

Se ha observado frecuentemente en arenas a altas presiones que Línea de Estado Último cruza la Línea de Consolidación Isotrópica para el estado más denso hacia menores índices de vacíos (Verdugo & Ishihara, 1996). Con la finalidad de observar y recalcar este fenómeno con los datos obtenidos, la Figura 5.22 presenta las áreas de contractancia ( $A_c$ ) y dilatancia ( $A_D$ ) para la arena con las tres dosificaciones de finos utilizadas. El área de contractancia se define como la superficie limitada superiormente por la línea de consolidación isotrópica del estado más suelto e inferiormente por la Línea de Estado Último. Análogamente, el área de dilatancia esta acotada por la línea de estado último y por la línea de consolidación isotrópica del estado más denso. Se observa que las líneas de estado último para las arenas con 1% y 20% de finos cruzan sus respectivas líneas

de consolidación isotrópica para valores de  $p'=25-30 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que para la arena con 40% de finos no existe dicho cruce, ni tampoco una tendencia a encontrarse.

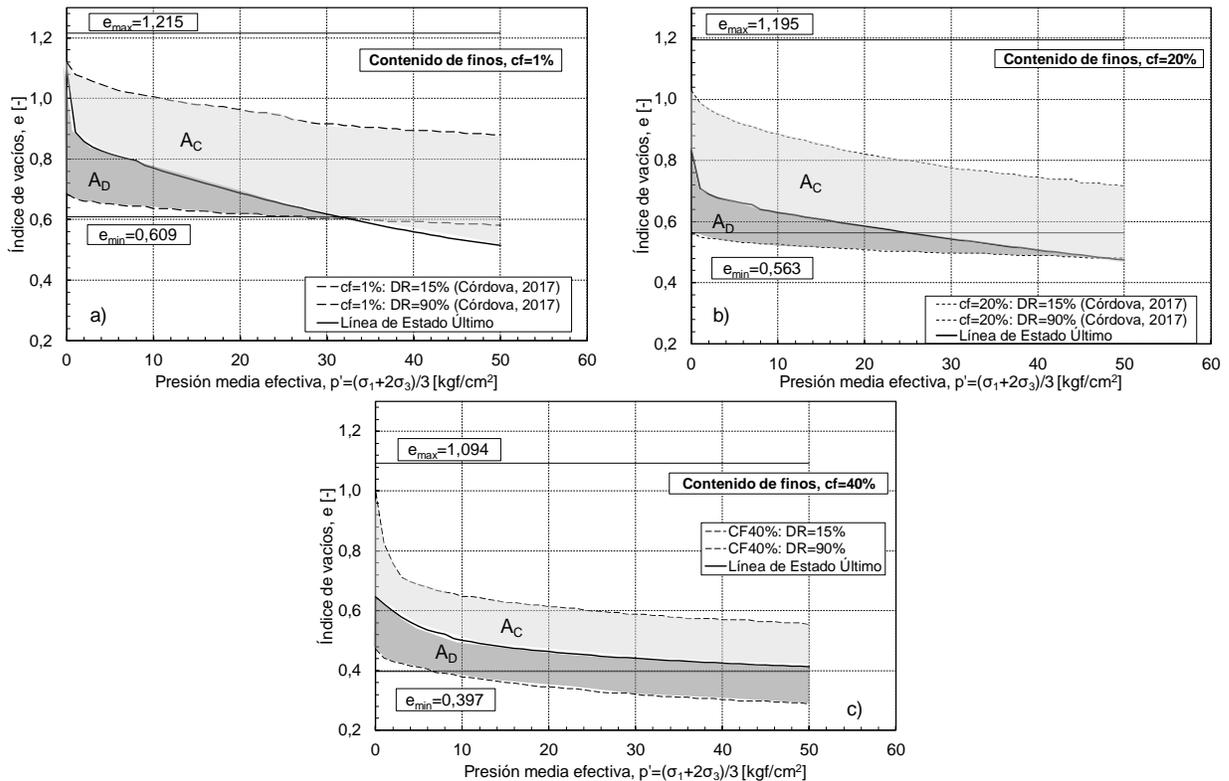


Figura 5.22: Áreas de contractancia y dilatación hasta  $p'=50 \text{ kgf/cm}^2$  para la arena "El Torito" con las tres dosificaciones de finos ensayadas. a)  $cf=1\%$ . b)  $cf=20\%$ . c)  $cf=40\%$ .

De la Figura 5.22, se evidencia que para las dosificaciones de 1% y 20% de finos, a medida que aumenta la presión media efectiva, la región de contractancia va en aumento en perjuicio de la de dilatación, hasta un punto en que todos los estados posibles contraerán. Para un 1% de finos este punto se encuentra en  $p'=32 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que para un 20% de finos está en  $p'=48 \text{ kgf/cm}^2$ . Por lo tanto, al aumentar el contenido de finos la presión media a partir de la cual solo se tendrá comportamiento contractivo aumenta. Si se sigue aumentando el contenido de finos, en este caso hasta 40%, las regiones de contractancia y dilatación son comparables en todo el rango de presiones estudiadas. Esto sugiere que para la arena con 40% de finos, hasta el nivel de presiones ensayado, no se vería suprimida la dilatación.

El hecho de que no exista un cruce de la Línea de Estado Último con la de consolidación para el estado más denso en la arena con 40%, sugiere un cambio en el comportamiento mecánico, en relación con las arenas con 1% y 2% de finos, no presentando un cruce de las líneas de estado último y de consolidación para el estado más denso, fenómeno reportado en materiales finos como arcillas y limos. Este resultado, indicaría que existe un cambio en la matriz resistente, pasando de estar conformada por la fracción gruesa en los materiales con 1 y 20% de finos, a una matriz con una fuerte participación de la fracción fina a una dosificación de 40%. Así, pese al origen artificial de la arena de relaves estudiada, el cambio de matriz ya estaría ocurriendo para un  $cf=40\%$ , teniendo un contenido de finos transicional entre un 20% y 40% de finos, reforzando lo observado en

la Figura 5.2a que sugiere un  $f_{c_{thr}}=30\%$ . El rango es similar al reportado en arenas naturales por diversos autores (Thevanayagam et al., 1997; Thevanayagam, 2002; Cubrinovsky & Ishihara, 2002; Polito & Martin, 2001, 2003).

### 5.5.1. FINOS ACTIVOS

Para un contenido de finos por debajo del transicional, diversos autores han propuesto utilizar el Índice de Vacíos Intergranular ( $e_g$ ), el cual considera que los finos no participarían en la transmisión de tensiones, por lo que el esqueleto resistente estaría compuesto solo por las partículas de mayor tamaño (Rahman et al., 2008). Para obtener “ $e_g$ ” se utiliza la Ecuación 2-1 propuesta por Thevanayagam (1998).

La Figura 5.23 muestra las Líneas de Estado Último en los materiales con 1% y 20% de finos, con el Índice de Vacíos Intergranular según la presión media efectiva. Se aprecia que, para el rango de presiones estudiado, no existe una convergencia de las líneas de estado último.

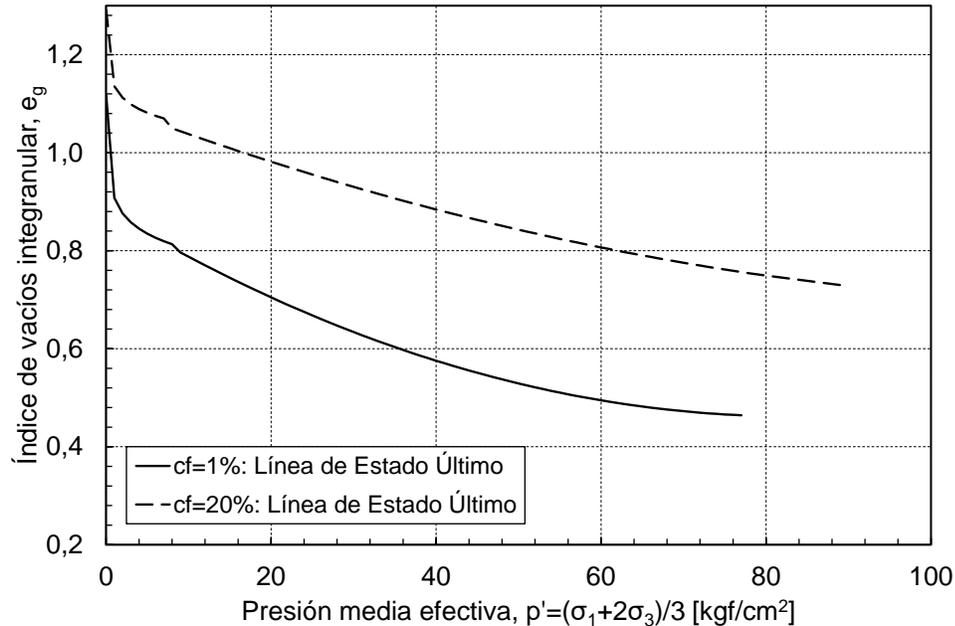


Figura 5.23: Líneas de Estado Último para la arena "El Torito" con contenidos de finos 1% y 20% considerando el Índice de Vacíos Intergranular “ $e_g$ ”.

Lo anterior sugiere que para un 20% de finos, una fracción de estos participarían en la transmisión de tensiones dentro de la estructura granular. Para corregir esto y considerar los finos activos en el esqueleto resistente, se utiliza el índice de vacíos equivalente, propuesto por Thevanayagam et al. (2002), el cual se obtiene a través de la Ecuación 2-2 y depende del parámetro  $b$ , el cual representa la fracción activa de los finos.

Rahman et al. (2008), entre otros autores, proponen una relación para predecir el valor de  $b$ . Se indica en la Ecuación 5-1 y depende de los diámetros medios de la fracción gruesa y fina del material,  $D_{50}$  y  $d_{50}$ , y el contenido de finos transicional ( $f_{c_{th}}$ ).

$$b = 1 - e^{-2.5 \cdot \left(\frac{cf^2}{k}\right)} \cdot \left(\frac{r \cdot cf}{fc_{th}}\right)^r$$

5-1

Donde:

r: razón de diámetros medios  $r=d_{50}/D_{50}$ .

k:  $1-r^{0,25}$ .

$fc_{th}$ : se considera 30% de finos, en base a lo encontrado por otros autores en la literatura y los estudios de Córdova (2017) y Bravo (2018).

La Ecuación 5-1 para la arena con 20% de finos estudiada arroja un valor de  $b=0,16$ . En base a este, la Figura 5.24 gráfica la Línea de Estado Último en función del índice de vacíos equivalente. Al igual que con el índice de vacíos intergranular ( $e_g$ ) no existe convergencia a una única línea de estado último.

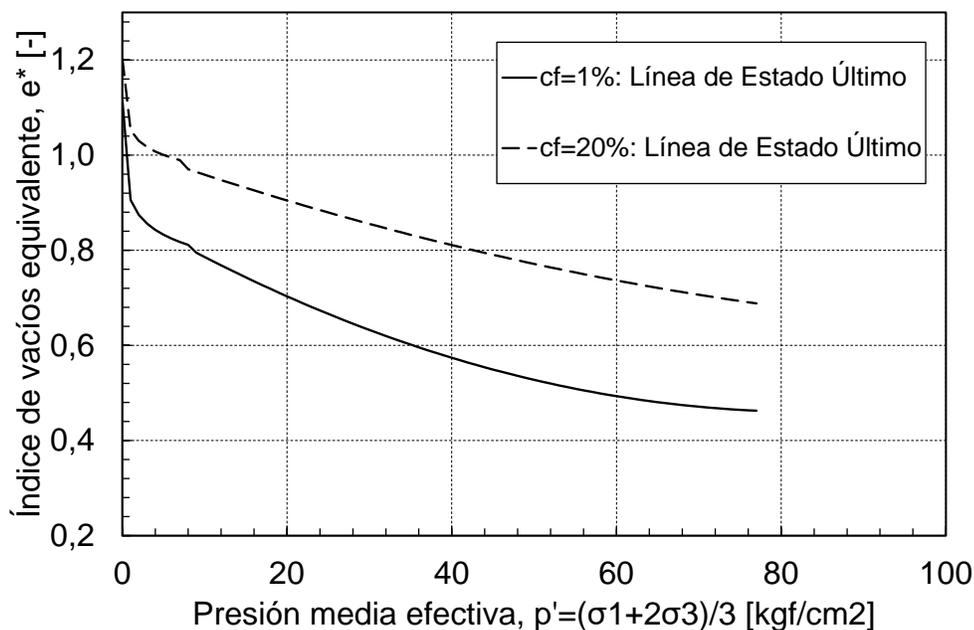


Figura 5.24: Líneas de Estado Último para la arena con 1% y 20% de finos, considerando el índice de vacíos equivalente y el parámetro  $b$  propuesto por Rahman et al. (2008).

A falta de una mejor función para predecir el valor del parámetro  $b$ , la Figura 5.25 grafica las Líneas de Estado Último como función de “ $e^*$ ” para distintos valores de  $b$ . Se evidencia que, para cualquiera de los valores mostrados, las líneas coinciden para ciertos rangos de presiones. Si se observa detenidamente, la gráfica para  $b=0,6$ , entre presiones  $p'=0 - 15$  kgf/cm<sup>2</sup>, las líneas son casi coincidentes. Lo mismo ocurre para el valor de  $b=0,8$  en un rango de  $p'=40 - 80$  kgf/cm<sup>2</sup>. Esto indicaría que, para un amplio espectro de presiones, el parámetro  $b$  no es constante y dependería de la presión media efectiva, variable que no consideran Rahman et al. (2008) en su ecuación. Así, el aumento del confinamiento promovería los contactos entre partículas, movilizandoo el arreglo granular hacia estados en que los finos tienen una mayor participación en la transmisión de tensiones.

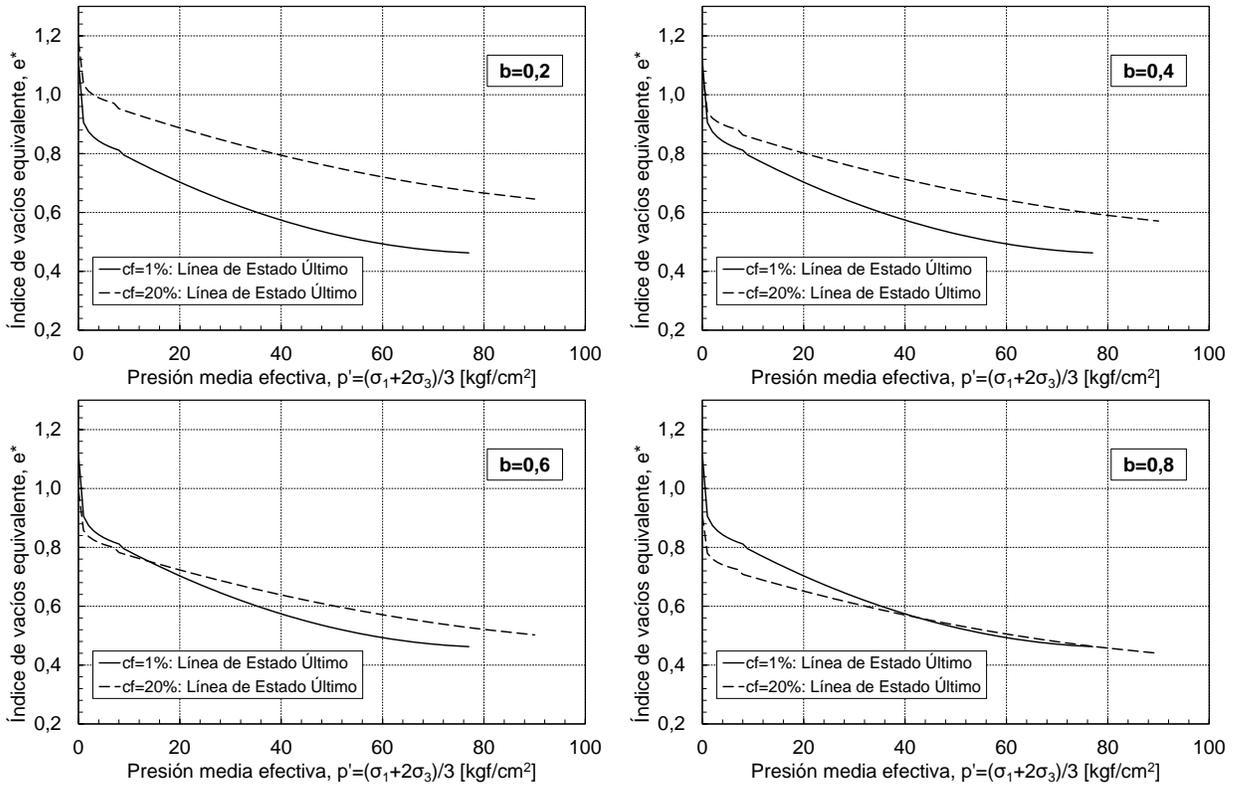


Figura 5.25: Líneas de Estado Último para arena "El Torito" con dosificaciones de finos de 1% y 20% considerando el índice de vacíos intergranular equivalente para distintos valores de b.

En base a lo observado en la Figura 5.25, se calculó punto por punto el valor de b para que las líneas de estado último coincidan en todo el rango de presiones. De esta forma, se determinó que el parámetro b debe seguir la relación dada por la Ecuación 5-2 para que las Líneas de Estado Último, considerando el Índice de Vacíos Equivalente, coincidan en todo el rango de presiones estudiados. La Figura 5.26 grafica la función obtenida para b.

$$b_{cf=20\%} = \begin{cases} 0,5 & p' \leq 10 \frac{kgf}{cm^2} \\ 0,01 \cdot p' + 0,41 & p' \in [10,40] \frac{kgf}{cm^2} \\ 0,8 & p' \geq 40 \frac{kgf}{cm^2} \end{cases} \quad 5-2$$

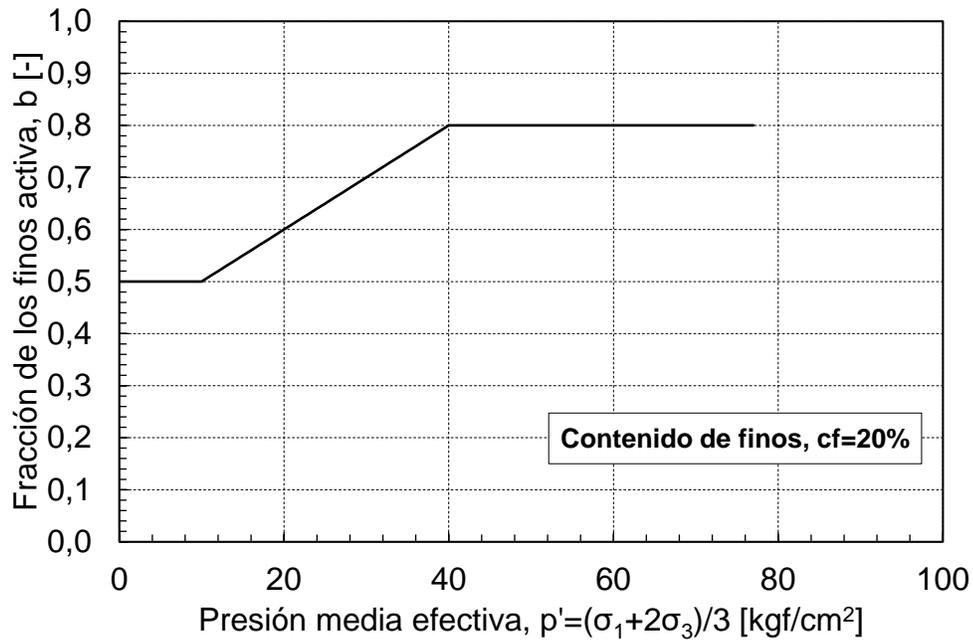


Figura 5.26: Evolución de los finos activos con la presión media efectiva.

Se obtiene un parámetro  $b=0,5$  constante hasta una presión media  $p'=10$  kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de un aumento lineal hasta  $p'=40$  kgf/cm<sup>2</sup> donde alcanza un valor de  $b=0,8$ , el cual permanece constante hasta la máxima presión alcanzada. El hecho de tener dos valores constantes para la fracción de finos activos, unidos por una variación lineal y creciente sugiere que, a partir de cierto nivel tensional, se activan mecanismos que promueven los contactos entre partículas, movilizandoo el arreglo granular hacia estados en que los finos tienen un mayor rol dentro de la estructura resistente, acrecentando su participación. Sin embargo, al alcanzar una mayor presión, estos mecanismos ya no serían suficientes para seguir movilizandoo el arreglo granular y se alcanzaría una estructura estable, donde la fracción de finos se mantiene constante y aún existirían partículas finas que no participan en la transmisión de tensiones. La Figura 5.27 muestra las Líneas de Estado Último para las dosificaciones de 1% y 20% de finos considerando el valor de  $b$  según la Ecuación 5-2.

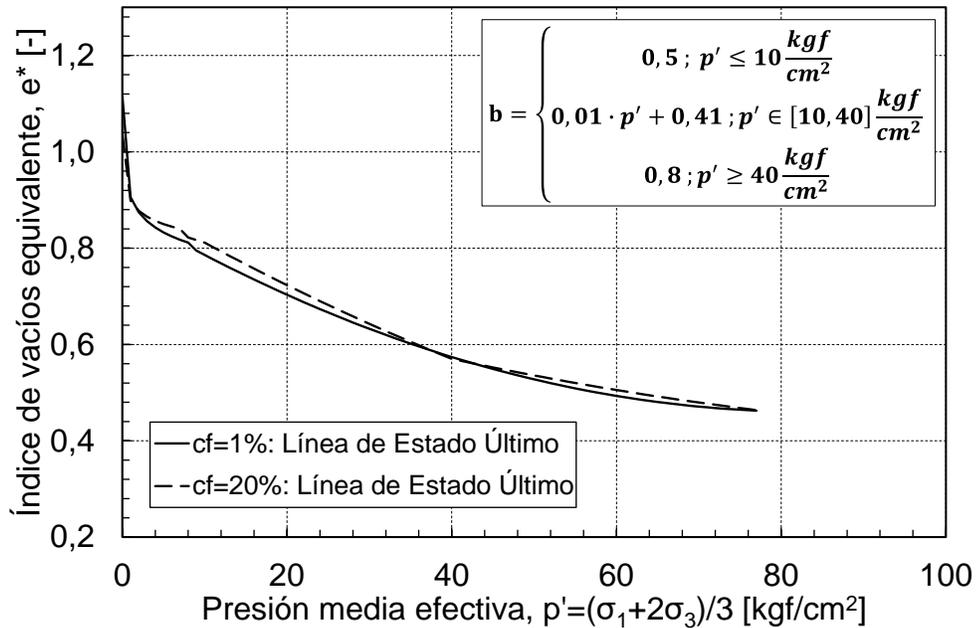


Figura 5.27: Líneas de Estado Último para arena "El Torito" con dosificaciones de finos de 1% y 20% considerando el Índice de Vacíos Intergranular Equivalente y un porcentaje de finos activos dependiente de la presión media de acuerdo con la ecuación 5-2.

Determinado el parámetro  $b$  para un contenido de finos de 20%, surge la duda de su validez para otros contenidos de finos. Para esto, se utilizan las líneas de estado último para arena "El Torito" con 5% y 10% de finos determinadas por Bravo (2018) a través de ensayos triaxiales drenados. La Figura 5.28 muestra la comparación de estas líneas con las obtenidas en este estudio para 1% y 20% de finos.

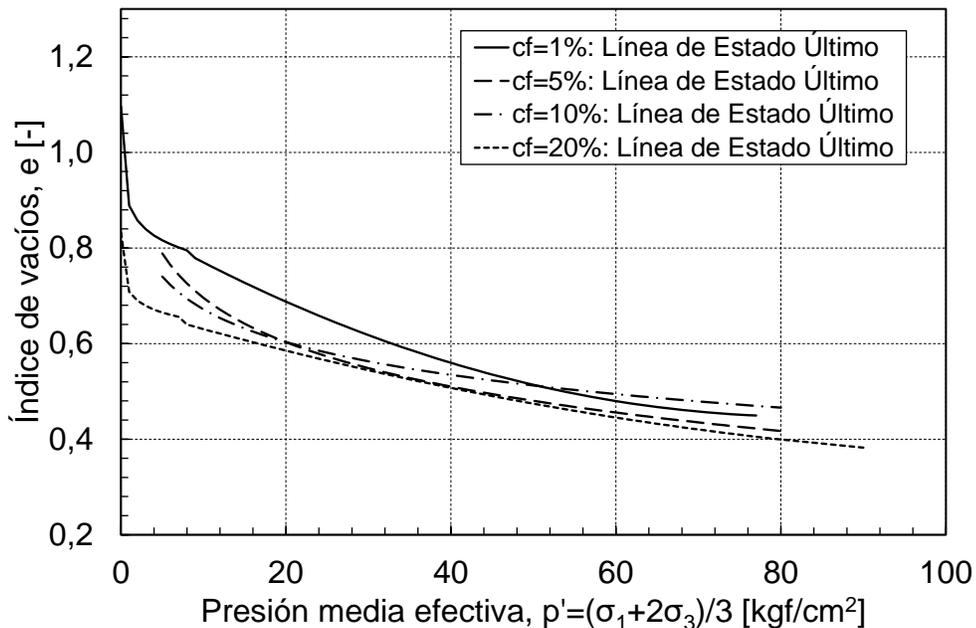


Figura 5.28: Comparación líneas de estado último para arena El Torito con 1%, 5%, 10% y 20% de finos.

Realizando el mismo ejercicio que para el contenido de finos de 20%, se determinó que el parámetro  $b$  para 5% y 10% de finos debe seguir las relaciones dadas por las ecuaciones 5-1 y 5-2, respectivamente. La Figura 5.29 muestra la variación de la fracción de finos activos con la presión media para los contenidos de finos de 5%, 10% y 20%.

$$b_{cf=5\%} = \begin{cases} 0,4 & p' \leq 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\ 0,01 \cdot p' + 0,41 & p' \in [10,40] \left[ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \\ 0,7 & p' \geq 40 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \end{cases} \quad 5-3$$

$$b_{cf=10\%} = \begin{cases} 0,3 & p' \leq 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\ 0,01 \cdot p' + 0,41 & p' \in [10,40] \left[ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \\ 0,6 & p' \geq 40 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \end{cases} \quad 5-4$$

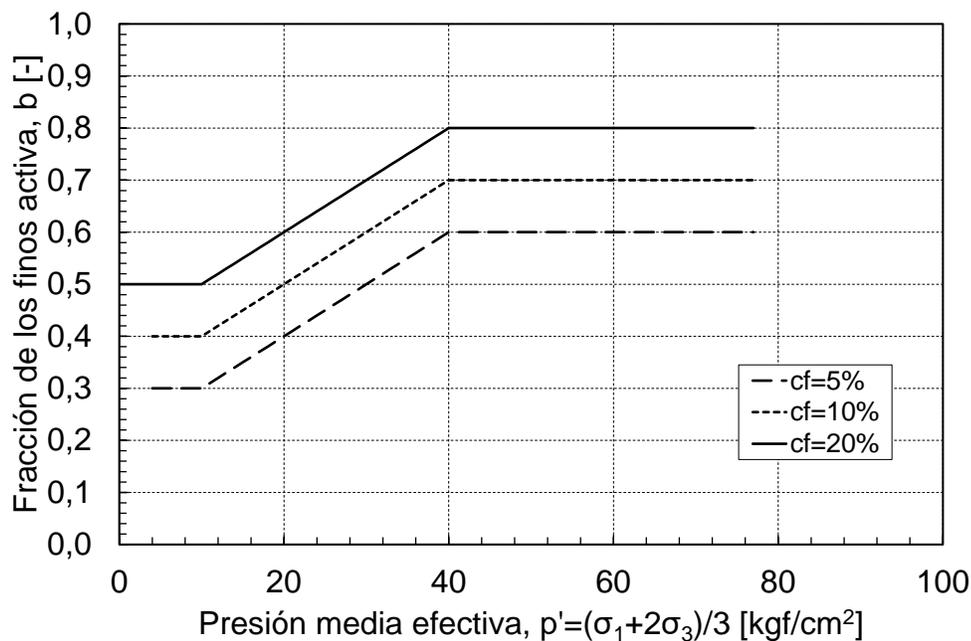


Figura 5.29: Variación de los finos activos con la presión media efectiva para contenidos de finos 5%, 10% y 20%.

La Figura 5.29 muestra que el aumentar el contenido de finos solo varía la magnitud de la fracción activa pero el cambio de esta con el nivel tensional es el mismo. Por lo tanto, se puede definir una sola función que entregue el valor de  $b$ , independiente del porcentaje de finos. La Figura 5.30 muestra la variación de los finos activos con el contenido de finos para bajas presiones ( $p' < 10 \text{ kgf/cm}^2$ ) el cual se denomina  $b_0$ , y se comporta de acuerdo con la Ecuación 5-5. Es a partir de este parámetro que se define la Ecuación 5-6, la cual

entrega el porcentaje de finos activos  $b$  en el estado último, para cualquier contenido de finos entre 1% y 20%, y a cualquier presión media efectiva menor a  $80 \text{ kgf/cm}^2$ .

$$b_0(cf) = 0.14 \ln(cf) + 0.07$$

5-5

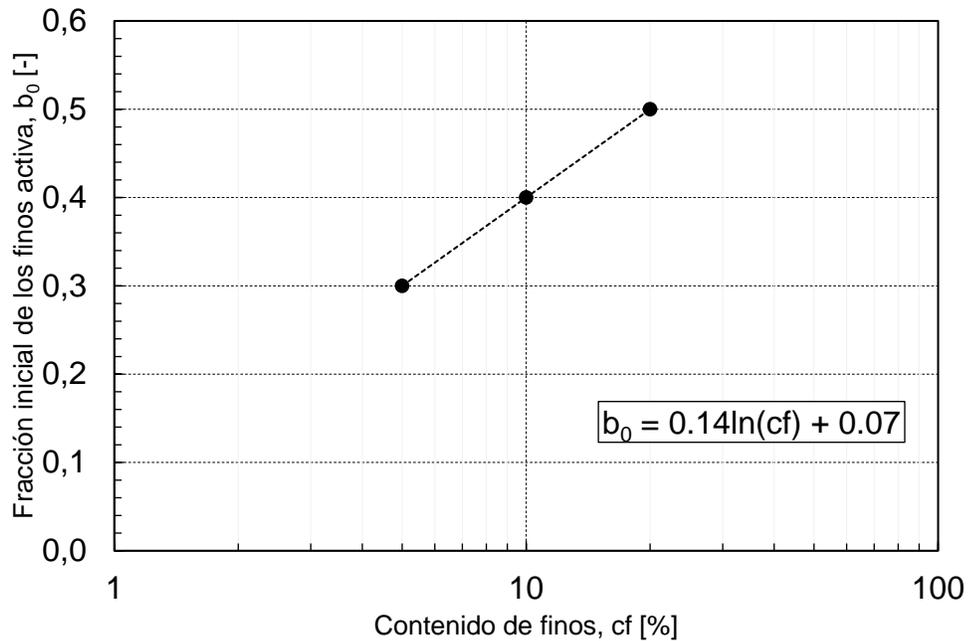


Figura 5.30: Variación del porcentaje de finos activos a bajas presiones ( $b_0$ ) con el porcentaje de finos total (CF).

$$b(cf, p') = \begin{cases} b_{10}(cf) & p' \leq 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\ 0,01 \cdot p' + b_{10}(cf) - 0,1 & p' \in [10, 40] \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\ b_{10}(cf) + 0,3 & p' \in [40, 80] \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \end{cases} \quad 5-5$$

La Figura 5.31 muestra las líneas de estado último para contenidos de finos 1%, 5%, 10% y 20% considerando la función para el parámetro  $b$  presentada en la Ecuación 5-6. Se observa que, para los 4 materiales, las líneas de estado último coinciden de buena manera en sus índices de vacíos equivalentes.

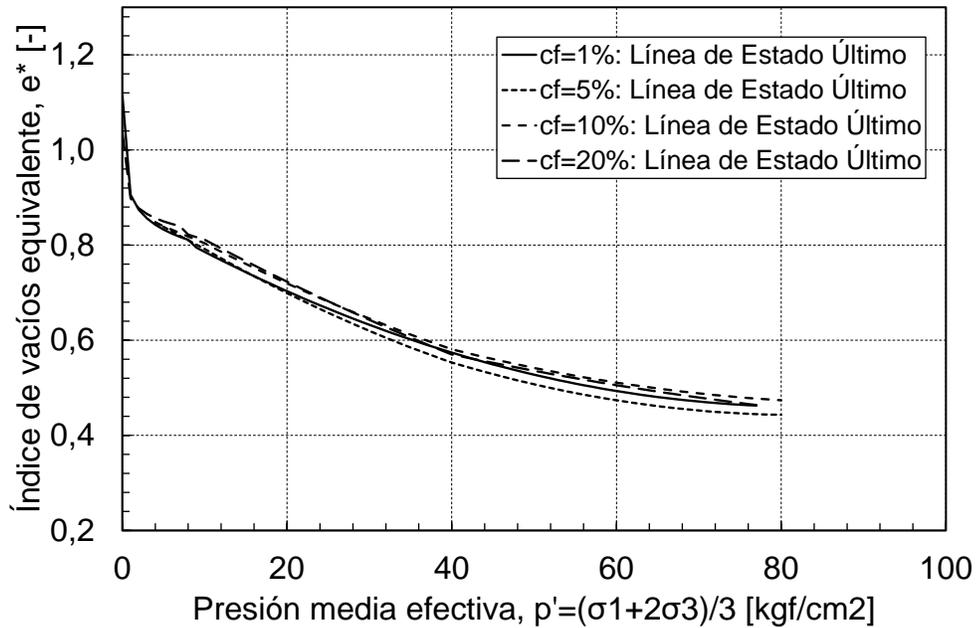


Figura 5.31: Líneas de estado último considerando el índice de vacíos intergranular equivalente  $e^*$  para los contenidos de finos 1%, 5%, 10% y 20%.

Por su parte, en la arena con 40% de finos ya no aplicaría el concepto de índice de vacíos intergranular debido a que los finos tendrían una mayor participación en el comportamiento mecánico. De acuerdo con Thevanayagam y Mohan (2000) se debiese utilizar el índice de vacíos interfino, donde se considera que son las partículas gruesas quienes no participan en la estructura resistente. Sin embargo, como se cuenta con un solo contenido de finos por sobre la transición, no es posible hacer la comparación de las líneas de estado último considerando el índice de vacíos interfino.

Para confirmar lo anterior, se utiliza la Ecuación 5-6 para determinar el parámetro  $b$  correspondiente a un 40% de finos y se obtiene la línea de estado último equivalente mostrada en la Figura 5.32. Aquí se observa que, a pesar de existir un cruce y una convergencia hacia las altas presiones, las líneas de estado último para la arena limpia y la con 40% de finos no coinciden como ocurre para las dosificaciones menores a 20%, por lo que se concluye que para este contenido de finos ya no sería válido utilizar el índice de vacíos equivalente considerando una fracción de los finos como vacíos.

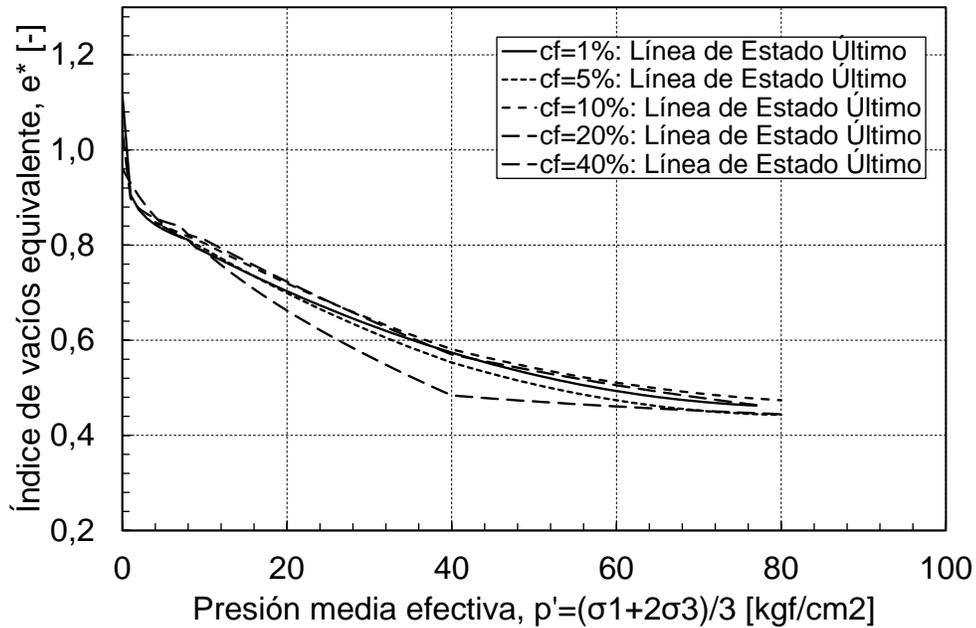


Figura 5.32: Líneas de estado último considerando el índice de vacíos granular equivalente para contenidos de finos 1, 5, 10, 20 y 40%.

En la misma línea, el índice de vacíos equivalente también ha sido utilizado para correlacionar la resistencia no drenada ( $S_u$ ) de una misma arena con distintos contenidos de finos, encontrando que, al considerar esta variable, los datos caen sobre una misma línea. La Figura 5.33 muestra la variación de  $S_u$  con el índice de vacíos equivalente y se observa que para los tres contenidos de finos se tiene una convergencia hacia un único lugar geométrico, a diferencia de lo ocurrido al considerar el índice de vacíos global ( $e$ ) mostrado en la Figura 5.12. Aquí, los resultados para  $cf=40\%$  coinciden con los de los otros dos materiales, en contraste con lo mostrado por las Líneas de Estado Último ( $p'-e^*$ ).

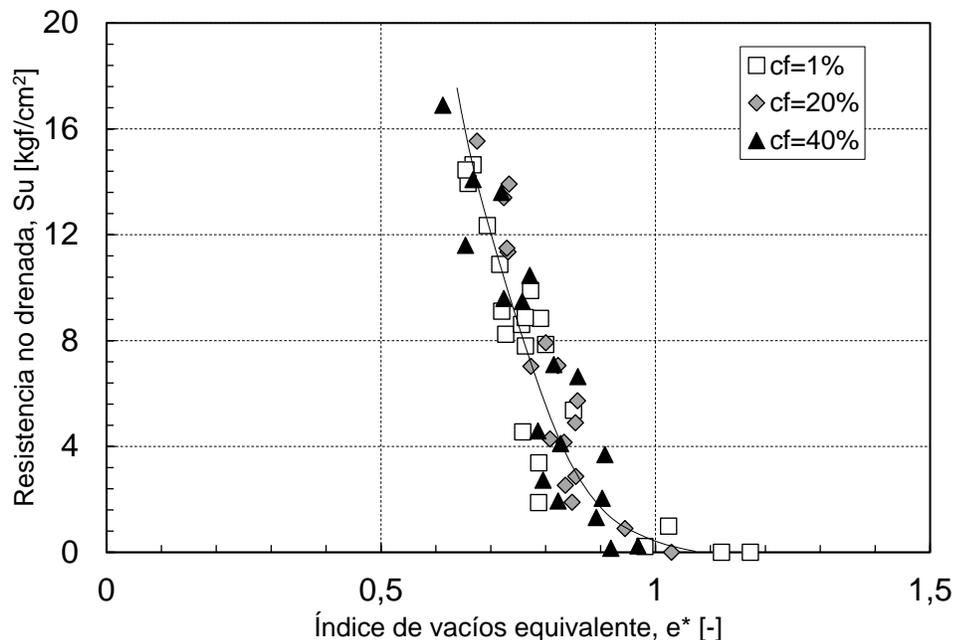


Figura 5.33: Variación de la resistencia no drenada  $S_u$  con el índice de vacíos equivalente  $e^*$  para contenidos de finos 1, 20 y 40%.

Finalmente, se muestra que el parámetro  $b$  y el índice de vacíos equivalente permiten correlacionar características como la Línea de Estado Último y la resistencia no drenada  $S_u$  para una misma arena con diferentes contenidos de finos (dentro de un porcentaje de finos acotado, en este caso hasta 40%). Sin embargo, la relación encontrada en este estudio (Ecuación 5-6), proyectada hasta una arena limpia ( $c_f=0\%$ ), arroja un valor de  $b$  distinto de cero, lo cual es físicamente contradictorio, ya que no habría finos en el material. Esto se debe a que la función se estimó a partir de los resultados para los distintos contenidos de finos, de forma que estos coincidieran en la misma línea de estado último.

## 5.6. ROTURA DE PARTÍCULAS

Para cuantificar la cantidad de rotura de partículas sufrida por los materiales durante los ensayos triaxiales, se escoge el parámetro de rotura relativa de Hardin (1985), esquematizado en la Figura 2.21a y se obtiene de acuerdo con la ecuación 5-6.

$$B_H = \frac{B_T}{B_R} \quad 5-6$$

Donde:

$B_H$ : parámetro de rotura de Hardin.

$B_T$ : rotura total de Hardin.

$B_R$ : rotura potencial de Hardin.

Se utiliza este parámetro porque es más robusto que aquellos que se basan en un solo diámetro característicos como el parámetro  $B_{10}$ , el cual es altamente sensible al valor de  $d_{10}$  a altos contenidos de finos. Por ejemplo, en la arena con 40% de finos,  $d_{10}$  es del orden de 5  $\mu\text{m}$ . Si la medición tiene un error de 1  $\mu\text{m}$ , la variación del parámetro es de 20%. Algo similar ocurre con la superficie específica, la cual es altamente sensible al contenido de finos. Estos errores y falencias se ven mitigadas en el parámetro de Hardin que considera la curva granulométrica completa.

La Figura 5.34 muestra la evolución de este parámetro con la presión de confinamiento inicial en los tres materiales ensayados en probetas sueltas y densas. La Figura 5.35 compara el parámetro de rotura para los tres contenidos de finos ensayados, en probetas sueltas y densas. De ambas figuras, se aprecia que la rotura es mayor para el contenido de finos de 1% y en probetas densas, coincidente con lo obtenido por Córdova (2017) y Bravo (2018), y también reportado por Hagerty et al. (1993), quienes atribuyen una menor rotura en bajas densidades ya que el material cuenta con mayor espacio para reordenarse antes de comenzar la rotura. Para 20% y 40% de finos, no se alcanza a apreciar una diferencia significativa en la rotura de estos materiales, además de que se necesitan mayores niveles de confinamiento para poder romper los granos.

Ni las curvas de consolidación, ni de estado último presentan un cambio de pendiente repentino que insinuara una rotura explosiva de partículas, por lo que los resultados respaldan lo indicado por Córdova y Bravo, el mecanismo de rotura, para el nivel de tensiones ensayados, corresponde a un pulimiento de los cantos angulosos de las partículas. Esto concuerda con lo reportado por Barrera et al. (2008), quienes argumentan

que la baja rotura de partículas a altas presiones en arenas de relave se debe al origen de estos materiales, los cuales tras haber pasado por procesos de chancado y molienda de alta energía, son las partículas más resistentes las que permanecen en la fracción gruesa.

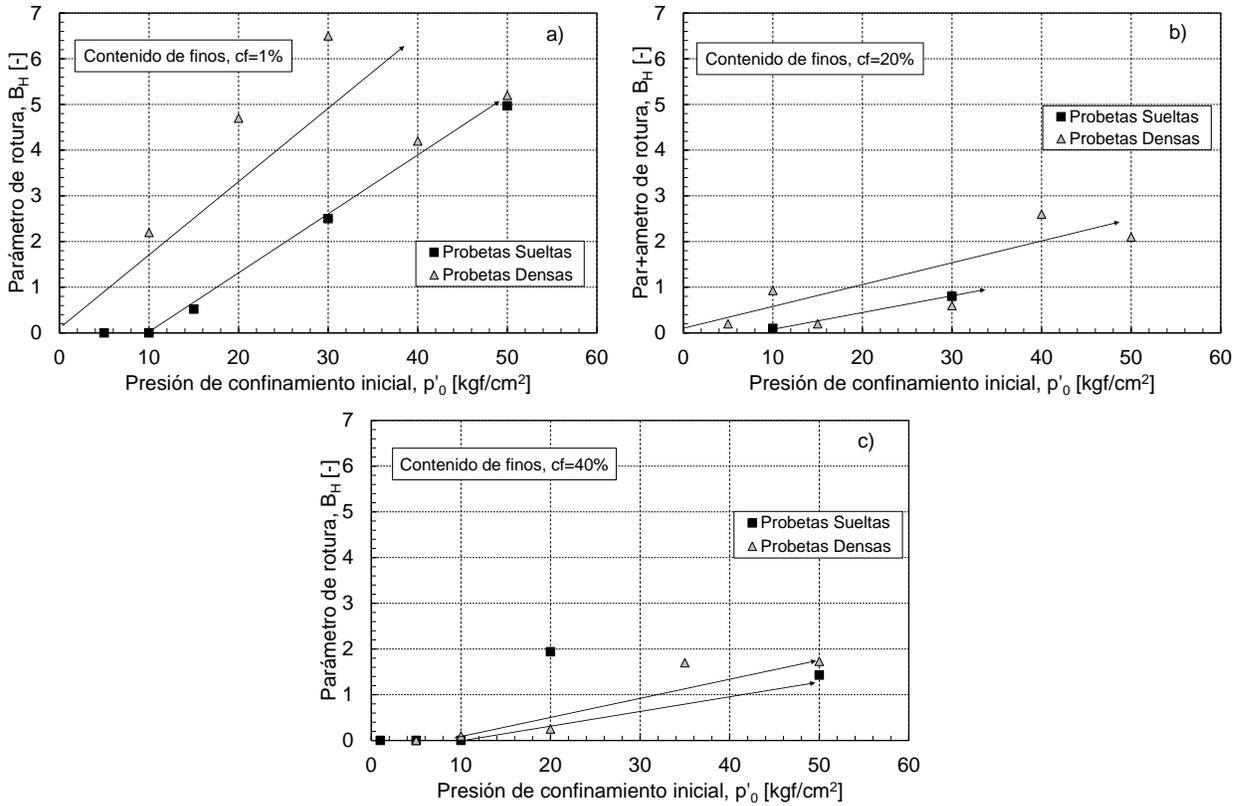


Figura 5.34: Evolución del parámetro de rotura de Hardin con la presión de confinamiento inicial para arena "El Torito" con distintos contenidos de finos. a) CF=1%. b) CF=20%. c) CF=40%.

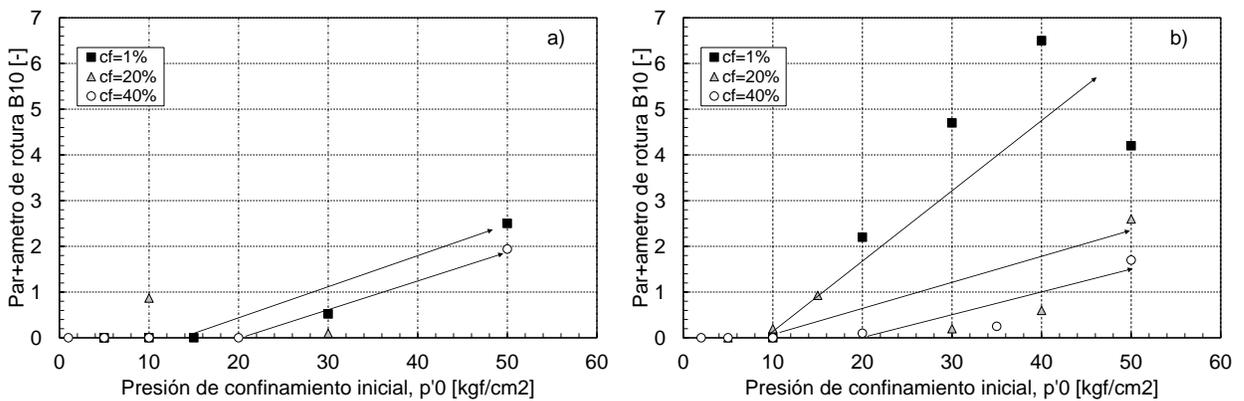


Figura 5.35: Comparación del parámetro de Hardin para los tres contenidos de finos ensayados. a) Probetas sueltas. b) Probetas densas.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se presentan los resultados y análisis de ensayos triaxiales no drenados en arena de relaves con contenidos de finos no plásticos de 1, 20 y 40%, con el principal objetivo de estudiar el efecto de los finos en la respuesta monótona y evidenciar un cambio de comportamiento al superar un cierto “contenido de finos límite” el cual, de acuerdo con la literatura, se encuentra entre 20-40% de finos. En base a esto, es posible concluir lo siguiente:

- La variación de los índices de vacíos máximo y mínimo con el contenido de finos no plásticos, muestra un comportamiento similar al de otras arenas de distinto origen, mineralogía y forma, sugiriendo que este sería independiente de dichos factores. Además, permite estimar un contenido de finos límite, el cual correspondería al cambio de tendencia de los índices de vacío máximo y mínimo. En el caso de la arena en estudio sería para  $cf=30\%$ .
- El comportamiento bajo consolidación isotrópica de la arena con 40% de finos se diferencia de los materiales con 1 y 20%, dando el primer indicio de un cambio en la matriz resistente. Para bajos contenidos de finos ( $cf \leq 20\%$ ), el efecto de los finos en la compresibilidad dependerá de la densidad inicial, teniendo su mayor influencia en estados sueltos, donde las partículas finas se ubican en los contactos de los granos de arena, lo cual genera grandes espacios vacíos que facilitarían el reordenamiento. Al aumentar la densidad, los finos ya no tienen un rol significativo en el cambio volumétrico, el cual dependería principalmente de las partículas gruesas. Por su parte, la arena con 40% de finos muestra siempre una mayor compresibilidad que el resto de los materiales, independiente de la densidad relativa, propia de un material fino. Esto sugiere que ahora los finos tomarían un mayor rol dentro de la respuesta compresional, soportando la idea del cambio de matriz.
- Las trayectorias de tensiones no drenadas muestran que la arena con 40% de finos, prácticamente, no presentaría inestabilidad dentro del rango de presiones estudiados, a diferencia de los otros dos materiales que presentan comportamiento inestable para varias combinaciones de densidad y confinamiento iniciales. Esto sugiere que, a este nivel de contenido de finos, la formación de estructuras inestables sería más escasa y los finos estarían llenando los espacios vacíos entre las partículas de arena.
- Al determinar las líneas de estado último en el espacio  $p'$ - $q$ , se observa una curvatura para los tres materiales ensayado, lo cual conlleva a una disminución del ángulo de fricción. Este efecto es más significativo en la arena limpia, bajo carga drenada principalmente, y se da para altas presiones, donde la rotura de partículas sería mayor.
- Los resultados muestran que la variación del contenido de finos no afectaría significativamente la línea de estado último en el espacio  $p'$ - $q$ . Por lo tanto, el ángulo de fricción se podría considerar independiente del contenido de finos,

siempre dentro del rango de presiones y porcentajes de finos estudiados. Lo mismo ocurre con las líneas de inestabilidad y transformación de fase.

- Al aumentar el contenido de finos, la línea de estado último en el espacio  $p'$ - $e$ , sufre una traslación hacia menores índices de vacíos. Para los tres materiales, las líneas se mantienen casi paralelas hasta valores de  $p'$  cercanos a  $10 \text{ kgf/cm}^2$ . Luego de esto, las líneas parecen converger a un punto en común, alcanzando una densidad o índice de vacíos terminal.
- Para los contenidos de finos de 1% y 20%, la línea de estado último cruza la línea de consolidación isotrópica para el estado más denso. Esto se traduce en que, a partir de cierto nivel de presión media, el material solo responderá de manera contractiva. Por su parte, el material con 40% de finos, muestra que la línea de estado último parece ser paralela a las líneas de consolidación isotrópica para los estados más suelto y denso en todo el rango de presiones estudiadas. Esto indica un cambio en el comportamiento monótono, donde el primero ha sido reportado en arenas, y el segundo se ha observado en materiales finos como limos o arcillas.
- Lo anterior, en conjunto con el cambio en el comportamiento compresional al aumentar a 40% de finos, permite decir que existiría un cambio del comportamiento mecánico del material, caracterizado primero; por la dominancia del material grueso para contenidos de finos hasta 20% y luego verse fuertemente influenciado por la fracción fina para un contenido de finos de 40%. Por lo tanto, el contenido de finos de transicional se encontraría en el rango 20%-40%, concorde a lo indicado en la literatura para arenas de origen natural.
- Para contenidos de finos menores al de transición, se pueden correlacionar las líneas de estado último a través del parámetro  $b$ . Se evidencia que este parámetro, para el rango de presiones estudiados, no puede ser constante y debe variar con el nivel tensional, además de con el porcentaje de finos. En base a esto, se define una ecuación que permite estimar el porcentaje de finos activos para contenidos de finos hasta 20% y presión media efectiva menor a  $80 \text{ kgf/cm}^2$  para el material estudiado y las condiciones aquí estudiadas. De esta forma, sería posible correlacionar el comportamiento de estos materiales con la misma arena, pero con distintos contenidos de finos.
- Igual que lo concluido por otros estudios en arenas de relaves, la rotura de partículas es mayor para la arena limpia y en probetas densas. Además, el mecanismo sería un pulimiento de los cantos angulosos de los granos y no una rotura explosiva, coincidente con lo reportado en la literatura para este tipo de arenas. El bajo nivel de rotura se asocia al origen de las arenas de relaves, con un proceso de formación de alta energía donde solo las partículas de mayor resistencia permanecen en la fracción gruesa.

En base a lo construido en este trabajo de título, se recomienda abordar las siguientes líneas de investigación.

- Estudiar el efecto del contenido de finos no plásticos en la respuesta cíclica de arenas de relave bajo un amplio rango de presiones.
- Estudiar el nivel tensional al que las partículas de arena de relave sufren rotura explosiva y su efecto en el comportamiento mecánico.
- Estudiar el comportamiento de un limo no plástico y el de agregar arena varios porcentajes de arena.
- Estudiar el efecto de aumentar el contenido de finos por sobre el valor transicional y compararlo con el comportamiento por debajo.
- Estudiar en detalle el efecto del contenido de finos en la fábrica, inicial y en el estado último, a través de microscopía SEM o tomografías.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A., & Chameau, J. L. (1988). Undrained monotonic and cyclic strength of sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1089-1109.
- ASTM D4254. (2000). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- Bard, E., Campaña, J., Torres, P., Valenzuela, L., & Cifuentes, L. (2014). Comportamiento de Arenas a Altas Presiones de Confinamiento: Comparación entre Arenas de Relaves y Naturales. *VIII Congreso Chileno de Geotecnia*.
- Barrera, S., Valenzuela, L., & Campaña, J. (2011). Sand Tailings Dams: Design, Construction and Operation. *Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC*.
- Been, K., & Mike, J. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 99-112.
- Biscontin, G., Cola, S., Pestana, J., & Simonini, P. (2007). Unified compression model for venice lagoon natural silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 133(8), 932-942.
- Bopp, P., & Lade, P. (2005). Relative density effects on undrained sand behavior at high pressures. *Soils and foundations Vol. 45, No. 1*, 15-26.
- Bravo, M. (2018). Efecto del confinamiento y el contenido de finos no plásticos en el comportamiento monótono drenado de arenas de relave.
- Campaña, J., Bard, E., & Verdugo, R. (2013). Shear strength and deformation modulus of tailing sands under high pressures. *Proceedings of the 18° International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*.
- Casagrande, A. (1936). Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Earth Fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*.
- Castro, G., & Poulos, S. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 103, No. 6*, 501-516.
- Coop, M., & Lee, I. (1992). The behaviour of granular soils at elevated stresses. *Proc. of the Wroth memorial symposium, Oxford*.
- Córdova, C. (2017). Efecto del contenido de finos no plásticos en la compresibilidad y rotura de partículas en arenas de relave.
- Cubrinovsky, M., & Rees, S. (2008). Effects of fines on undrained behaviour of sands. *Geotechnical Earthquake and Engineering and Soil Dynamics IV Congress*.
- Cubrinovsky, M., & Ishihara, K. (2002). Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and foundations, Vol. 42, No. 6 December*, 65-78.
- Della, N., Belkhatir, M., Arab, A., Canou, J., & Doupla, J. (2014). Effect of fabric method on instability behavior of granular material. *Acta Mechanica*, 225(7), 2043-2057.
- Gupta, A. (2009). Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials. *Electronic journal of geotechnical engineering*.
- Hagerty, M., Hite, D., Ullrich, C., & Hagerty, D. (1993). One dimensional high pressure compression of granular media. *Journal of geotechnical engineering*.
- Hardin, B. (1985). Crushing of soil particles. *Journal of geotechnical engineering, Noviembre*, 1117-1192.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique*, 351-415.
- JGS. (2000). Test methods for minimum and maximum densities of sands. *Soil testing standards. Japanese Geotechnical Society JGS*, 136-138.

- Juneja, A., & Raghunandan, M. (2010). Effect of sample preparation on strength of sands. *Indian Geotechnical Conference*.
- Kramer, S., & Seed, B. (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(4), 412-430.
- Lade, P., & Bopp, P. (1997). Effects of initial density on soil instability at high pressures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(7), 671-677.
- Lade, P., & Yamamuro, J. (1997). Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian geotechnical journal*, 34(6), 918-928.
- Lade, P., Liggio, C., & Yamamuro, J. (1998). Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal - December*.
- Lade, P., Yamamuro, J., & Bopp, P. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of geotechnical engineering*, april, 309-316.
- Lee, K., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian geotechnical journal*, vol. 4 N°1, 68-86.
- Lo, K. Y., & Roy, M. (1973). Response of particulate materials at high pressures. *Soils and foundations*, Vol. 13, No. 1.
- Lobo-Guerrero, S., & Vallejo, L. (2005). Analysis of crushing of granular material under isotropic and biaxial stress conditions. *Soils and foundations* Vol. 45, No. 4, 79-87.
- Maureira, S. (2012). Respuesta cíclica de arena de relaves en un amplio rango de presiones.
- Mesri, G., & Vardhanabhuti, B. (2009). Compression of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 369-392.
- Miura, N., & Yamanouchi, T. (1975). Effect of water on the behaviour of a quartz-rich sand under high stresses. *Soil and foundations* vol. 15, N°4.
- Mohamad, R., & Dobry, R. (1986). Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(10), 941-958.
- Murthy, T., Loukidis, D., Carraro, J., Prezzi, M., & Salgado, R. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique* 57, No. 3, 273-288.
- Nakata, Y., Hyde, A., Hyodo, M., & Murata, H. (1999). A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test. *Géotechnique* 49, No. 5, 567-583.
- Ni, Q., Dasari, G., & Tan, T. (2006). Equivalent granular void ratio for characterization of Singapore's Old Alluvium. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, 563-573.
- Ni, Q., Tan, T., Dasari, G., & Hight, D. (2004). Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique* 54, No. 9, 561-569.
- Poulos, S. (1981). The steady state of deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107.
- Poulos, S., Castro, G., & France, J. (1985). Liquefaction Evaluation Procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(6), 772-792.
- Rahman, M. M., Lo, S., & Cubrinovsky, M. (2010). Equivalent granular void ratio and behaviour of loose sand with fines. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Rahman, M. M., Lo, S., & Gnanendran, C. T. (2008). On Equivalent Granular Void Ratio and Steady State Behaviour of Loose Sand with Fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 1439-1456.
- Solans, D. (2010). Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves.
- Thevanayagam, S. (2000). Liquefaction potential and undrained fragility of silty soils. *In Proceedings of the 12th World Conference Earthquake Engineering*.

- Thevanayagam, S., & Mohan, S. (2000). Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands. *Geotechnique* 50, No. 1, 1-23.
- Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., & Liang, J. (October 2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 849-859.
- 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", Ph. D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Japan.
- Verdugo, R., & Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and foundations* Vol. 36, 81-91.
- Vesic, A., & Clough, G. (1968). Behavior of granular materials under high stresses. *Journal of soil mechanics & foundations div.* Vol. 94, 661-668.
- Yamamuro, J., & Covert, K. (2001). Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 127, No. 4, April, 314-324.
- Yamamuro, J., & Lade, P. (1997). Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, 905-917.
- Yamamuro, J., & Lade, P. (1998). Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, september, 868-877.
- Yamamuro, J., & Lade, P. (1998). Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 124, No. 9, september, 868-877.
- Yang, S., Lacasse, S., & Sandven, R. (2005). Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. *Geotechnical testing journal*, Vol. 29, No. 2, 102-107.
- Yang, S., Sandven, R., & Grande, L. (2006). Steady state lines of sand-silt mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 1213-1219.
- Yu, F. (2017). Characteristics of particle breakage of sand in triaxial shear. *Powder technology*, 320, 656-667.