



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

**RESPUESTA CÍCLICA DE ARENAS DE RELAVES CON
NANOPARTÍCULAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CONSUELO BELÉN RODRÍGUEZ SOTO

PROFESOR GUÍA

FELIPE AGUSTÍN OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

CÉSAR PASTEN PUCHI

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESPUESTA CÍCLICA DE ARENAS DE RELAVES CON NANOPARTÍCULAS

Este trabajo corresponde a un estudio experimental sobre el comportamiento monótono y cíclico de arenas de relaves bajo condiciones de carga triaxial con confinamiento isotrópico. El principal objetivo es entender el comportamiento no drenado de la arena de relave al incluir nanopartículas superplásticas.

El estudio tiene tres etapas: 1) caracterización geotécnica del material a utilizar a través de granulometrías, determinación de índice de vacíos máximos y mínimos, microscopía y gravedad específica. 2) Triaxiales monótonos y cíclicos a confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] y e índices de vacíos entre 0.79 y 0.84 de la arena sin tratamiento. 3) Triaxiales monótonos y cíclicos a confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] y e índices de vacíos entre 0.79 y 0.84 de la arena con tratamiento, el cual corresponde a agregar un porcentaje de laponita igual a 1% en relación a la masa seca de la arena. En el caso de los triaxiales cíclicos, se trabaja en un rango de razones de sollicitaciones cíclicas igual entre 0.17 y 0.30.

Dentro de los principales resultados se obtiene que, para los ensayos triaxiales monótonos, existe un cambio de comportamiento de contractivo a dilatante para un confinamiento de 1 [kgf/cm²]. En los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²] el comportamiento similar. Además, el ángulo de fricción interna permanece constante e igual a 35° al agregar laponita.

Por otro lado, en los triaxiales cíclicos, se obtiene de forma general que existe un aumento en la resistencia cíclica a la licuación de la arena de relaves ensayada al agregarle laponita, bajo la metodología utilizada. La mejora obtenida depende del confinamiento al que se encuentra la muestra. En el caso de un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²], se obtiene una resistencia cíclica con tratamiento 1.3 a 1.4 veces a la obtenida sin tratamiento para un mismo número de ciclos. En cambio, para los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²] se obtiene una resistencia cíclica 1.2 veces mayor. Además, es posible evidenciar que, cuando la probeta se ensaya a 1 [kgf/cm²], se obtiene una reducción de la deformación axial entre 20% y 40%. En cuanto a la presión de poros, se obtiene que existe una disminución de la generación de exceso de presión de poros por ciclo para el confinamiento de 1 [kgf/cm²]. Esta disminución de 20 veces menos el desarrollo del exceso de presión de poros por ciclo.

Por último, se comparan los resultados obtenidos en el trabajo con los obtenidos en estudios previos que utilizan laponita (Ochoa – Cornejo et al. 2016; Pardo y Orense, 2017). Se observa que la mejora obtenida en este trabajo resulta ser menor a la del resto. Sin embargo, existen diferencias en la metodología de los ensayos, como material utilizado, confección de probeta, entre otros, que influyen en dicha diferencia. Además, se comparan los resultados con otros tratamientos, como sílica coloidal, bentonita y bacterias. Con respecto al resto de los tratamientos, se observa que la mejora obtenida con laponita es cercana a la del resto de tratamientos. Cabe destacar el presente trabajo utiliza una arena de relaves con un contenido de finos igual a 17%, mientras que el resto de los estudios usan arenas con contenidos de finos menores o arenas limpias.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a mis padres, Hugo y María. Gracias a ustedes, a todo su esfuerzo, soy quien soy hoy en día. Gracias por siempre apoyarme y estar conmigo en todas las cosas. Por fin terminan una etapa larga, que consistió en la educación de sus hijas. También quiero agradecer a mis hermanas, Coni y Vivi, quienes han sido un ejemplo a seguir, como mis padres. Gracias por todo su apoyo y cariño.

Además, quiero agradecer a mis amigas del colegio: Caro, Andrea, Vale. No ha sido fácil juntarse, pero siempre estamos ahí. Mención honrosa a la Nati, quien ha sido mi mejor amiga prácticamente toda mi vida y uno de mis pilares fundamentales. Te quiero caleta.

No puedo dejar atrás a la gente que conocí en la universidad. El primer grupo de amigos que tuve acá, y que me acompaña desde la inducción. Gracias a ustedes, Jaime, Pipe, Pablo, Manuel, Gabriel y Carlitos.

También quiero agradecer a la Cata, quien fue mi primera amiga en Civil. Es brígido lo rápido que se generó nuestra amistad. Hemos vividos tantas cosas juntas, y sé que puedo contar contigo en todo, como también tú puedes contar conmigo siempre.

Quiero agradecer a los amigos de civil: Gato, Matias, Memo y Monse. Gracias por todas las juntas y buenos momentos que hemos compartido. No tantas gracias por las cañas que he tenido con ustedes.

Gracias también al Mecesup, donde he conocido a gente muy bacán, y que me han acompañado por más de un año. Principalmente agradecer al Lucho, Cristian y a la Javi. En particular, gracias a la Javi por todos los carretes improvisados, y las grandes conversaciones jugando juegos de mesa.

Gracias a Estefi. Justo llegaste a mi vida cuando me encontraba en la parte final de este proceso eterno. Has sido un apoyo muy importante, sobre todo aquellos días en los que ni siquiera era capaz de salir de la cama por el cansancio mental. Gracias por tu apoyo incondicional.

También quiero agradecer a mi profesor guía Felipe Ochoa – Cornejo. Gracias por depositar su confianza en mí para realizar este trabajo. Gracias a los profesores de la comisión, César Pasten y Yolanda Alberto. Gracias por sus consejos y comentarios, además de siempre estar dispuestos a ayudar ante cualquier duda.

Además, agradecer a Omar González y Mario Carrillo. Gracias por su disposición y paciencia para ayudarme en el laboratorio.

Por último, gracias al proyecto Fondecyt de iniciación 11181252, financiado por CONICYT.

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 específicos	1
1.3. Metodología	2
1.4. Organización de la memoria	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Comportamiento monótono de arenas	3
2.1.1. Estado último o Steady State	4
2.1.2. Quasi-Steady State	5
2.2. Licuefacción en arenas y Resistencia cíclica	6
2.2.1. Tipos de fallas	7
2.2.2. Ensayos de resistencia cíclica	7
2.3. Factores que influyen al comportamiento monótono y resistencia cíclica	8
2.4. Comportamiento monótono y cíclico de arenas con finos	9
2.5. Métodos de mejoramiento	11
2.5.1. Sílica coloidal	12
2.5.2. Bentonita	13
2.5.3. Laponita	14
2.5.4. Bacterias	16
2.6. Evaluación índice de vacíos en sistemas de suelos con diversos tamaños	19
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	22
3.1. Descripción de los materiales	22
3.1.1. Relave del depósito El Torito	22
3.1.2. Laponita	31
3.2. Equipos utilizados	33
3.2.1. Mastersizer 2000	33
3.2.2. SEM	34
3.2.3. Triaxial convencional	35
3.2.4. Marco triaxial cíclico	36
3.3. Metodología de ensayos	36
3.3.1. Mezcla de materiales	36
3.3.2. Confección de probetas	37

3.3.3.	Saturación de la probeta	37
3.3.4.	Consolidación de la probeta	38
3.3.5.	Evaluación índice de vacíos final (Método de Verdugo)	38
3.4.	Ensayos triaxiales	39
4.	RESULTADOS RELAVE EL TORITO SIN TRATAMIENTO	42
4.1.	Triaxiales monótonos no drenados	42
4.2.	Triaxiales cíclicos no drenados.....	43
5.	RESULTADOS RELAVE EL TORITO CON TRATAMIENTO	50
5.1.	Triaxiales monótonos no drenados	50
5.2.	Triaxiales cíclicos no drenados.....	51
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
6.1.	Granulometría de los materiales	56
6.2.	Comportamiento Monótono.....	57
6.3.	Comportamiento Cíclico.....	64
6.3.1.	Módulo de corte secante Gsec	68
6.3.2.	Factor de corrección por confinamiento.....	72
6.3.3.	Desarrollo de exceso de presión de poros	76
6.4.	Comparación ensayos sin tratamiento y con tratamiento	84
6.4.1.	CSR similar	85
6.4.2.	N similar	91
6.5.	Comparación entre métodos de mejoramiento	94
6.5.1.	Comparación de estudios con Laponita.....	96
6.5.2.	Comparación de estudios con Sílica Coloidal	99
6.5.3.	Comparación de estudios con Bentonita	100
6.5.4.	Comparación de estudios con Bacterias	103
6.6.	Observaciones de las interacciones arena – laponita usando microscopía	105
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
7.1.	Conclusiones generales.....	107
7.2.	Recomendaciones para trabajos futuros	109
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	110
9.	ANEXOS.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Tamices utilizados en la granulometría manual.....	22
Tabla 3-2. Resultados granulometría y plasticidad para arena de relave El Torito.....	23
Tabla 3-3. Caracterización geotécnica de arena de relaves de El Torito.....	30
Tabla 3-4. Comparación de índice de vacío máximo, mínimo y gravedad específica con estudios previos	31
Tabla 3-5. Especificaciones ensayos monótonos CIU sin tratamiento.....	39
Tabla 3-6. Especificaciones ensayos monótonos CIU con tratamiento.....	40
Tabla 3-7. Especificaciones ensayos cíclicos CIU sin tratamiento	40
Tabla 3-8. Especificaciones ensayos cíclicos CIU con tratamiento	41
Tabla 3-9. Especificaciones ensayos triaxiales cíclicos CIU realizados por Muñoz (2017)	41
Tabla 4-1. Parámetros de resistencia al corte del relave El Torito sin tratamiento	43
Tabla 4-2. Valores de CSR y N para los tres criterios de falla para ensayos triaxiales cíclicos sin tratamiento	49
Tabla 5-1. Parámetros de resistencia relave El Torito con tratamiento.....	51
Tabla 5-2. Valores de CSR y N para los tres criterios de falla para ensayos triaxiales cíclicos con tratamiento	55
Tabla 6-1. Coeficientes de consolidación secundaria ($C\alpha$) para los ensayos monótonos	57
Tabla 6-2. Coeficientes de consolidación secundaria ($C\alpha$) para arenas y arcillas.....	58
Tabla 6-3. Número de ciclos con tratamiento sobre número de ciclos sin tratamiento a una misma resistencia cíclica	66
Tabla 6-4. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos	67
Tabla 6-5. G_{sec} inicial para cada ensayo	71
Tabla 6-6. Valores del fator de corrección por confinamiento k_σ para distintos valores de N	73
Tabla 6-7. Ensayos por comparar con CSR similares	84
Tabla 6-8. Ensayos por comparar con N similar	84
Tabla 6-9. Información de los estudios para los distintos mejoramientos.....	95
Tabla 6-10. Número de ciclos con tratamiento sobre número de ciclos sin tratamiento a una misma resistencia cíclica para todos los estudios con laponita	97
Tabla 6-11. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para todos los estudios con laponita	98
Tabla 6-12. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para todos los estudios con sílica coloidal	100
Tabla 6-13. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para el estudio realizado con bentonita	102
Tabla 6-14. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para el estudio realizado con bacterias	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Comportamiento monótono no drenado a densidad relativa constante. (a) Gráfico $e - p'$, (b) Gráfico $q - p'$ (Alarcon-Guzman et al., 1988)	4
Figura 2-2. Línea de Estado Crítico que separa el comportamiento contractivo y dilatante según Casagrande (1940) y Seed y Lee (1967). (Lade y Yamamuro, 1996)	4
Figura 2-3. Línea de estado último y estados iniciales. (Verdugo and Ishihara, 1996)	5
Figura 2-4. Ensayo monótono de corte torsional no drenado en un espécimen consolidado isotrópicamente (Alarcón-Guzmán et al., 1988)	6
Figura 2-5. Respuesta de esfuerzo – deformación para una arena ensayada por triaxiales CIU (datos de Castro (1969)). Mismo e , distinto σ_c (Mohamad & Dobry, 1986).....	6
Figura 2-6. Esquema para corroborar la estabilidad. (a) Movilidad cíclica, (b) falla de flujo (Ishihara et al., 1990).....	7
Figura 2-7. (a) Líneas de esfuerzo efectivos en el diagrama $p' - q$, (b) variación de esfuerzo de corte versus deformación axial. Los gráficos de la izquierda corresponden a la arena Nevada 50/200, mientras que los de la derecha a la arena Nevada 50/80 (Lade & Yamamuro, 1997).....	9
Figura 2-8. Variación de la resistencia cíclica con el contenido de limos para muestras de arena Yatesville preparadas por compactación húmeda a 30% de densidad relativa (Polito & Martin II, 2001)	10
Figura 2-9. Curvas de resistencia a la licuefacción para distintas densidades. (a) Muestras sueltas, (b) muestras medias, (c) muestras densas (Park & Kim, 2013).....	11
Figura 2-10. Porcentaje de sílica coloidal versus deformación durante carcass cíclicas a $CSR=0.40$ (Gallagher y Mitchell, 2002)	12
Figura 2-11. Comparación de arena sin tratamiento y con tratamiento de sílica coloidal. (a) $DR=40\%$, (b)= 60% (Díaz - Rodríguez et al. 2008).....	13
Figura 2-12: Resistencia cíclica versus el número de ciclos para que el suelo licue (El Mohtar 2008).....	13
Figura 2-13: Resultados del ensayo de anillo de corte en mezclas de arena con distintos contenidos de bentonita, graficados como el contenido de bentonita versus (a) la razón de presión de poros medida para el último, ciclo número 50 de carga, (b) el número de ciclos (NL) necesarios para licuar (Gratchev et al. 2007)	14
Figura 2-14: Resistencia cíclica de arena limpia y arena con laponita (1%) (Ochoa-Cornejo 2015).....	14
Figura 2-15. CSR versus número de ciclos para licuar para arenas limosas con laponita a concentraciones de 0%, 2% y 3% (Huang y Wang, 2016).....	15
Figura 2-16. Preparación de la muestra para especímenes ensayados en ensayos de corte simple cíclicos (Pardo y Orense, 2017).....	15
Figura 2-17. Resultados del ensayo de corte simple cíclico para $CSR=0.1$ (Pardo y Orense, 2017).....	16
Figura 2-18. Respuesta a triaxiales monótonos no drenados para muestras 1:1 (DeJong et al., 2006).....	17
Figura 2-19. Razón de Solicitación Cíclica correspondientes al número de ciclos necesarios para inducir licuación para arenas biotratadas y no tratadas. Líneas sólidas representan correlaciones para un rango dado de contenido de calcita	18

Figura 2-20. CSR versus N_L , para la arena calcárea tratada para diferentes contenidos de solución de cementación (CS) bajo un confinamiento efectivo de 100 kPa (Xiao et al. 2018)	18
Figura 2-21. Datos del estado último en el espacio $e - p'$ (Thevanayagam 1998).	19
Figura 2-22. Diagrama de fase esquemático. (a) Arena limosa, (b) matriz limosa, (c) matriz arenosa (Thevanayagam 1998).	19
Figura 2-23. Diagrama esquemático de la variación teórica del índice de vacíos mínimo en un empaquetamiento binario con porcentajes de finos (Lade et al., 1998)	20
Figura 3-1. Comparación granulometría manual y láser de relave El Torito	23
Figura 3-2. Imágenes obtenidas por microscopía de relave El Torito retenido en malla #40, #50 y #100 (a, b y c, respectivamente)	24
Figura 3-3. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #40. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales	25
Figura 3-4. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #50. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales	26
Figura 3-5. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #100. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales	27
Figura 3-6. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #200. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales	28
Figura 3-7. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito bajo malla #200. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales	29
Figura 3-8. Comparación de tamaño entre partícula más grande y pequeña observada	30
Figura 3-9. a) Estructura de laponita, b) Geometría de una partícula individual de laponita (Ochoa – Cornejo, 2015)	31
Figura 3-10. Imagen obtenida por SEM de la laponita (elaboración propia)	32
Figura 3-11. Típicas curvas para suspensiones de laponita RD en concentraciones de 3% en peso a distintas edades de envejecimiento (Shen, 2014)	32
Figura 3-12. Viscosidad versus edad de envejecimiento para concentraciones de 2.75, 3 y 3.25% en peso de suspensiones de laponita (El Howayek, 2011). 1 mPa.s = 1 cPa	33
Figura 3-13. Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Mastersizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012)	34
Figura 3-14. Microscopio SEM	34
Figura 3-15. Equipo triaxial convencional	35
Figura 3-16. Marco triaxial cíclico	36
Figura 3-17. Contenedor utilizado para mezclar materiales	37
Figura 3-18. Diagrama de flujo de metodología	39
Figura 4-1. Resultados triaxiales monótonos. (a) Consolidación en el tiempo normalizada por el índice de vacíos inicial, (b) Curvas tensión deformación de los ensayos monótonos sin tratamiento, (c) Exceso de presión de poros Δu y deformación axial ϵ_{axial} de ensayos monótonos sin tratamiento, (d) desviador de esfuerzos q versus exceso de presión de poros Δu , (e) Trayectorias de tensiones y línea de estado último de los ensayos monótonos sin tratamiento, (f) Línea de Estado Último en el espacio $e - p'$ para ensayos sin tratamiento.	43
Figura 4-2. (a) Variación del esfuerzo desviador en función la presión media efectiva, (b) desviador de esfuerzos en función del número de ciclos, (c) porcentaje de deformación axial unitaria en función del número de ciclos, (d) variación de presión de poros normalizada por el confinamiento inicial efectivo en función del número de ciclos, en rojo se muestra la variación de presión de poros normalizada promedio, (e) módulo de corte secante en función	

del porcentaje de deformación angular unitaria, (f) Variación del desviador de esfuerzos en función de la deformación angular	45
Figura 4-3. Gráfico CSR - $N_{100\%P.P}$ (100% de exceso de presión de poros) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos	46
Figura 4-4. Gráfico CSR - $N_{5\%D.A}$ (5% de deformación axial en doble amplitud) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos.....	47
Figura 4-5. Gráfico CSR - $N_{10\%D.A}$ (10% de deformación axial en doble amplitud) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos.....	48
Figura 4-6. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en 20 ciclos el 5% de deformación axial en doble amplitud versus la presión media efectiva, sin tratamiento. (b) Factor de corrección por confinamiento según criterio de 5% de deformación axial en doble amplitud en 20 ciclos, sin tratamiento	49
Figura 5-1.Resultados triaxiales monótonos. (a) Consolidación en el tiempo normalizada por el índice de vacíos inicial, (b) Curvas tensión deformación de los ensayos monótonos sin tratamiento, (c) Exceso de presión de poros Δu y deformación axial ϵ_{axial} de ensayos monótonos sin tratamiento, (d) desviador de esfuerzos q versus exceso de presión de poros Δu , (e) Trayectorias de tensiones y línea de estado último de los ensayos monótonos con tratamiento, (f) Línea de Estado Último en el espacio $e - p'$ para ensayos con tratamiento	51
Figura 5-2. Gráfico CSR - $N_{100\%P.P}$ (100% de exceso de presión de poros) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos	52
Figura 5-3. Gráfico CSR - $N_{5\%D.A}$ (5% de deformación axial en doble amplitud) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos.....	53
Figura 5-4. Gráfico CSR - $N_{10\%D.A}$ (0% de deformación axial en doble amplitud) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos.....	54
Figura 5-5. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en 20 ciclos el 5% de deformación axial en doble amplitud versus la presión media efectiva, con tratamiento. (b) Factor de corrección por confinamiento según criterio de 5% de deformación axial en doble amplitud en 20 ciclos, con tratamiento	55
Figura 6-1. Granulometrías de las arenas utilizadas en estudios anteriores	56
Figura 6-2. (a) Curvas de consolidación sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²], (b) Curvas de consolidación hasta los 30 minutos..	57
Figura 6-3. Curvas tensión deformación de probetas sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita.....	59
Figura 6-4. Curvas exceso de presión de poros versus deformación sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita	60
Figura 6-5.Curvas desviador de esfuerzos versus exceso de presión de poros sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita.....	61

Figura 6-6. Trayectorias de tensiones de probetas sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita.....	62
Figura 6-7.(a) Línea de Estado Último (LEU) y Línea de Consolidación Isotrópica (LCI) en espacio e – p', (b) LEU en espacio q – p'. CL: Contenido de laponita.....	63
Figura 6-8. Módulo de deformación en función del confinamiento para ensayos sin tratamiento y con tratamiento.....	63
Figura 6-9. Gráfico CSR – N _{liq} para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²]. ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento.....	64
Figura 6-10. Gráfico CSR – N _{100%P.P} comparando sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente).....	65
Figura 6-11. (a) Gráfico de CSR en función de N _{CT} /N _{ST} , (b) Gráfico de CSR _{CT} /CSR _{ST} en función del número de ciclo en el que licúa la arena.....	67
Figura 6-12. Módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria en ensayos sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente).....	68
Figura 6-13. Módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria en ensayos con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente).....	69
Figura 6-14. Comparación del módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento.....	70
Figura 6-15. Comparación de factores de corrección por confinamiento k _σ , con los obtenidos por Hynes & Olsen (1998) mostrados por Idriss & Boulanger (2004). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento.....	72
Figura 6-16. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en N ciclos el 5% de deformación en doble amplitud sin tratamiento, (b) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en N ciclos el 5% de deformación en doble amplitud con tratamiento, (c) Factor de corrección por confinamiento k _σ según criterio de 5% en doble amplitud sin tratamiento, (d) Factor de corrección por confinamiento k _σ según criterio de 5% en doble amplitud con tratamiento.....	74
Figura 6-17. Comparación de factores de corrección por confinamiento k _σ para distintos N, con los obtenidos por Hynes & Olsen (1998) mostrados por Idriss & Boulanger (2004). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento.....	75
Figura 6-18. Desarrollo del exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente) sin tratamiento.....	76
Figura 6-19. Desarrollo del exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente) con tratamiento.....	77
Figura 6-20. Desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente) sin tratamiento.....	78
Figura 6-21. Desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente) con tratamiento.....	79
Figura 6-22. Comparación del desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm ²] (a, b y c, respectivamente).....	80

Figura 6-23. Desarrollo del exceso de presión de poros normalizado por el confinamiento versus el número de ciclos normalizado, a) sin tratamiento y b) con tratamiento.	81
Figura 6-24. Pendiente ΔU_m	82
Figura 6-25. CSR – ΔU_m (a) sin tratamiento, (b) con tratamiento, (c) sin tratamiento con estudios anteriores, (d) ensayos sin tratamiento (ST) y con tratamiento (CT)	83
Figura 6-26. Comparación ensayo CSR=0.255 sin y CSR=0.248 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	85
Figura 6-27. Comparación ensayo CSR=0.255 sin y CSR=0.248 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – $N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$	86
Figura 6-28. Comparación ensayo CSR=0.21 sin tratamiento y CSR=0.212 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	87
Figura 6-29. Comparación ensayo CSR=0.21 sin tratamiento y CSR=0.212 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – $N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$	88
Figura 6-30. Comparación ensayo CSR=0.22 sin tratamiento y CSR=0.218 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	89
Figura 6-31. Comparación ensayo CSR=0.22 sin tratamiento y CSR=0.218 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – $N_{ciclos}/N_{100\%P.P.}$	90
Figura 6-32. Comparación ensayo CSR=0.23 sin tratamiento y CSR=0.294 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	91
Figura 6-33. Comparación ensayo CSR=0.16 sin tratamiento y CSR=0.184 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	92
Figura 6-34. Comparación ensayo CSR=0.16 sin tratamiento y CSR=0.192 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm ²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{ciclos}$, (b) $\varepsilon - N_{ciclos}$, (c) $\Delta\sigma - N_{ciclos}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}	93
Figura 6-35. Resumen métodos de mejoramiento en arenas	94
Figura 6-36. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para los distintos estudios con laponita. ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento	97
Figura 6-37. Gráfico de CSR_{CT}/CSR_{ST} en función del número de ciclo en el que licúa la arena para los distintos estudios	98
Figura 6-38. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para los distintos estudios con sílica coloidal (SC)	99
Figura 6-39. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para el estudio realizado con bentonita	101
Figura 6-40. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para el estudio realizado con bacterias. MICP: Microbial Induced Calcite Precipitation. CS: Solución de cementación. ST: Sin tratamiento. CT: Con tratamiento.	103

Figura 6-41. Fotografías obtenidas mediante microscopio SEM. (a) Retenido en Malla #100 sin tratamiento, (b) Retenido en Malla #100 con tratamiento, (c) Que pasa Malla #200 sin tratamiento, (d) Que pasa Malla #200 con tratamiento. 105

Figura 6-42. Fotografías obtenidas mediante microscopio SEM para la arena de relaves El Torito con laponita secada luego de ser ensayada..... 106

1. INTRODUCCIÓN

1.1.Contexto general

En la actualidad, la actividad minera en Chile es tal que la necesidad de almacenamiento de relaves va creciendo. Según el Ministerio de Minería, el relave corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído el mineral en el proceso de flotación. Por otro lado, Chile es un país que presenta alta sismicidad en toda su extensión. Así, cada cierta cantidad de años, se presentan sismos de grandes magnitudes que tienen diversas consecuencias, llegando a ser severas. Uno de los fenómenos que se produce es la licuación en suelos sueltos, la cual consiste en la pérdida de la resistencia de un depósito de suelo, produciéndose daños graves en estructuras adyacentes o que se encuentren sobre el suelo. De esta forma, resulta necesario investigar métodos de mejoramiento en suelos que son susceptibles a la licuación, tal como materiales de relave. En particular, en este estudio se desea averiguar el efecto que tiene la inclusión de nanopartículas superplásticas, específicamente Laponita. La laponita consiste en una arcilla sintética de tamaño nanométrico bastante similar a la hectorita, caracterizada por ser utilizada para modificar la reología en diversas aplicaciones, tales como pinturas, cosméticos, entre otros (Ochoa-Cornejo, 2015).

Se han realizado varios estudios para encontrar el efecto que tiene la inclusión de partículas finas en una muestra de suelo principalmente arenoso. La gran mayoría de ellos, como los realizados por Thevanayagam (1998), Rahman y Lo (2007) y Altun et al., (2005), se han concentrado en estudiar el efecto de finos no plásticos. Tal como se puede evidenciar en las investigaciones realizadas por Altun et al. (2005), quien varía el contenido de finos de una arena, la adición de partículas finas a arenas suele tener, en un principio, un deceso en la resistencia a la licuación, mientras que, para contenidos mayores, se presenta una mejora. Por otro lado, Ochoa-Cornejo (2015) investigó el efecto que tiene la inclusión de laponita en arenas limpias, consiguiendo un incremento en la resistencia a la licuación, ensayando la mezcla mediante triaxiales cíclicos no drenados.

De esta forma, la motivación a este Trabajo de Título es continuar los estudios previos, extendiéndolos a arenas de relaves chilenos, las cuales contienen tanto partículas de arenas como de finos no plásticos. En este caso, se agregará cierto contenido de laponita en función de la masa seca de la arena.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Entender el comportamiento cíclico de una arena de relaves chilena en condiciones de carga triaxial con confinamiento isotrópico y su comportamiento al adicionar laponita.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar geotécnicamente arenas de relave con contenido de finos superplásticos.
- Evaluar respuesta monótona de arenas de relave con y sin nanopartículas.
- Evaluar resistencia a la licuación de arenas de relave con y sin nanopartículas.
- Comparar los resultados obtenidos con respecto a otros tratamientos reportados en la literatura técnica

1.3. Metodología

La metodología experimental consiste en la realización de diversos ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar el material utilizado. Dichos ensayos consisten principalmente en:

- Granulometría manual mediante tamices ASTM.
- Granulometría láser.
- Densidad máxima
- Densidad mínima
- Gravedad específica
- Ensayo triaxial monótono no drenado en arenas de relaves con 0% y 1% de laponita, preparados por medio de compactación húmeda (*wet tamping*), con confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] e índices de vacíos dentro del rango 0.79 – 0.84.
- Ensayo triaxial cíclico no drenado en arenas de relaves con 0% y 1% de laponita, preparados por medio de compactación húmeda (*wet tamping*), con confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] e índices de vacíos dentro del rango 0.79 – 0.84.

Cabe destacar que todos los ensayos mencionados se realizan tanto para la arena de relaves sin laponita como para la arena con tratamiento, salvo los cinco primeros, que solo se realizaron para el caso sin tratamiento.

1.4. Organización de la memoria

El presente trabajo de memoria de título consiste en 9 capítulos, cuyas descripciones generales se muestran a continuación.

Capítulo 1: Introducción. Se presenta el contexto general del trabajo, los objetivos y la metodología desarrollada.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica. Se realiza una recopilación de estudios pasados relacionados con el trabajo presentado, los cuales ayudan a la investigación realizada.

Capítulo 3: Programa Experimental. Se detallan los materiales y equipos utilizados, junto con la metodología seguida y los ensayos.

Capítulo 4: Resultados Relave El Torito Sin Tratamiento. Se muestra una recopilación de los resultados obtenidos tanto en trabajos anteriores como en este sobre el Relave El Torito.

Capítulo 5: Resultados Relave El Torito Con Tratamiento. En este caso, se muestran los resultados obtenidos de la misma arena de relave, pero agregando laponita.

Capítulo 6: Análisis de resultados y Discusiones. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos, comparando los dos capítulos anteriores, además de contextualizar y analizar el estudio realiza con respecto a otros.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones. Se muestran las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del programa experimental.

Capítulo 8: Bibliografía. Se presentan las referencias de las publicaciones consultadas a lo largo del trabajo.

Capítulo 9: Anexos. Se agregan los cálculos anexos del trabajo realizado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Comportamiento monótono de arenas

A lo largo de los años se ha estudiado el comportamiento de las arenas por medio de dos formas: la primera de ellas cuando se permite la deformación volumétrica de la probeta de suelo durante la aplicación de carga. Esto permite que la probeta se ensaye bajo condiciones drenadas, por lo que no existe una variación de la presión de poro inicial. Dado que se permite una variación de la deformación volumétrica, se obtiene una variación en el índice de vacíos. La segunda de ellas es cuando se restringe la variación de la deformación volumétrica, por lo que la probeta se ensaya bajo condiciones no drenadas. Al no permitir que varíe su volumen, comienza a variar la presión de poros dentro de la probeta.

Ahora, dentro de las dos formas en las que se pueden estudiar las arenas, también es posible encontrar distintos comportamientos para los suelos. Estos comportamientos van a depender de distintos factores, como la presión de cámara efectiva, la densidad relativa a la que se encuentra el suelo, etc. Dependiendo de las condiciones que posea la probeta, es posible identificar distintas regiones cuando el suelo se ensaya bajo condiciones drenadas, según lo mostrado por Alarcón-Guzmán et al., (1988) en la Figura 2-1. Estos comportamientos son: contractivo, parcialmente contractivo y dilatante.

Manteniendo el índice de vacíos constante, para altas presiones de confinamiento se evidencia un comportamiento contractivo. En esta región, se observa una disminución de la resistencia luego de haber alcanzado un valor máximo, a bajas deformaciones. Los puntos D, E y F presentan este comportamiento.

Luego, es posible identificar una zona de transición (punto C). En esta zona de transición, se observa que el suelo alcanza un valor residual de la resistencia en un rango de deformaciones, pero luego comienza a ganar resistencia mientras que la deformación causa dilatación, lo que conlleva en una reducción de la presión de poro. Debido a esto, es posible identificar un “codo” en el espacio $q - p'$. Esta zona de transición ya se había identificado previamente, como en el trabajo de Mohamad y Dobry (1986), donde la define como comportamiento parcialmente contractivo.

Por último, se encuentra la región para bajas presiones de confinamiento, donde se evidencia un continuo aumento de la resistencia del suelo. A esta zona se le conoce como comportamiento dilatante. Aunque inicialmente se observa una tendencia a contraer, la dilatación prevalece y comienza a disminuir la presión de poros. De esta forma, en el espacio $q - p'$ no se evidencia un valor máximo (curvas A y B en Figura 2-1 (b)).

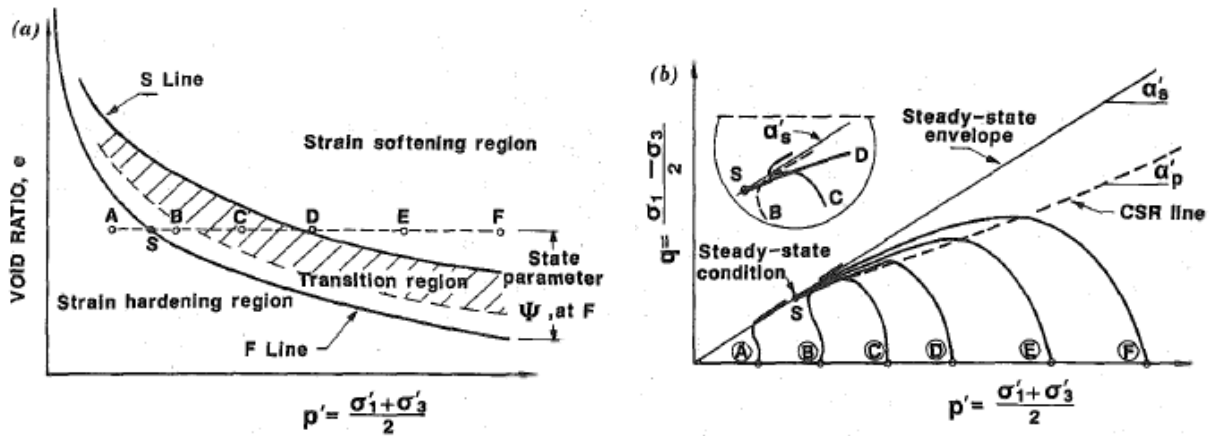


Figura 2-1. Comportamiento monótono no drenado a densidad relativa constante. (a) Gráfico $e - p'$, (b) Gráfico $q - p'$ (Alarcon-Guzman et al., 1988)

A continuación, se presentan conceptos que son relevantes para comprender el comportamiento no drenado monótono de los suelos.

2.1.1. Estado último o Steady State

El concepto de “estado último” o “steady state” ha sido descrito por distintos autores a lo largo de los años. El primer autor en mencionar este concepto bajo el nombre de “estado crítico” fue Casagrande (1936). Casagrande observó que, al ensayar suelos no cohesivos en condiciones drenadas, los suelos sueltos tienen a contraer y los densos a dilatar. Sin embargo, eventualmente ambas densidades alcanzaban la misma densidad crítica, en donde el esfuerzo y el volumen permanecen constante, donde dice que se alcanza este “estado crítico” (Figura 2-2).

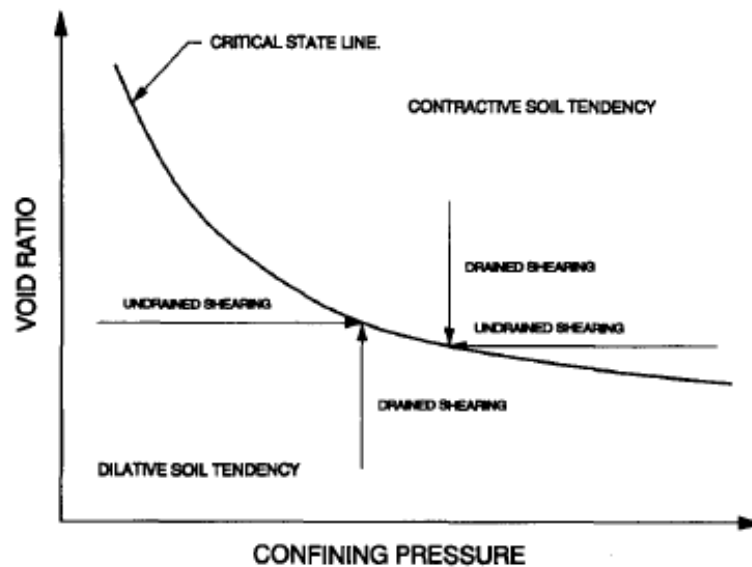


Figura 2-2. Línea de Estado Crítico que separa el comportamiento contractivo y dilatante según Casagrande (1940) y Seed y Lee (1967). (Lade y Yamamuro, 1996)

Posteriormente, aparece la definición de “steady state” o “estado último” (Poulos, 1981) como el estado en el que la masa se está deformando continuamente a volumen, esfuerzo normal efectivo, esfuerzo cortante y velocidad constantes. Este estado se presenta a grandes deformaciones, como se puede observar en el trabajo de Verdugo e Ishihara (1996), donde el estado último se alcanza en un rango de deformaciones de 20 – 25%.

Además, el trabajo reportado por Verdugo (1992) muestra que la línea de estado último no es afectada por las condiciones iniciales, mientras que el suelo se mantenga homogéneo. Esto se puede observar en la Figura 2-3, donde los estados iniciales del suelo se presentan como cuadrados y el estado final como círculos.

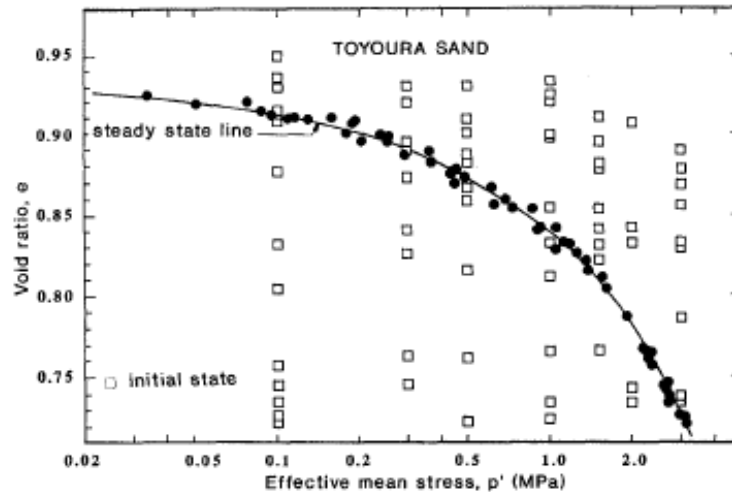


Figura 2-3. Línea de estado último y estados iniciales. (Verdugo and Ishihara, 1996)

2.1.2. Quasi-Steady State

En algunos casos en los que se está ensayando arenas sueltas, luego de alcanzar un valor máximo en el esfuerzo de corte, esta decae, mientras que la presión de poros crece continuamente. Llega un punto en el que tanto el esfuerzo de corte como la presión de poros se estabilizan. Sin embargo, al continuar cargando, el esfuerzo adicional causa dilatación, lo que provoca un incremento en la resistencia y decaimiento en la presión de poros. Este fenómeno en el que la resistencia alcanza un mínimo local se le denomina como “Quasi – Steady State” o “Pseudo Estado Último” (Figura 2-4).

Este comportamiento se puede apreciar en otros trabajos, como el presentado por Mohamad & Dobry (1986), donde recopilan los datos de Castro (1969) para mostrar los distintos comportamientos del suelo. Esto se muestra en la Figura 2-5, en donde el ensayo 2 presenta un quasi – steady state.

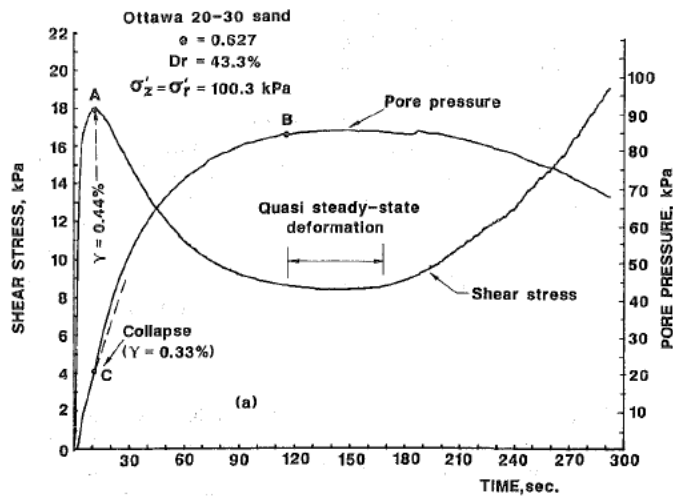


Figura 2-4. Ensayo monótono de corte torsional no drenado en un espécimen consolidado isotrópicamente (Alarcón-Guzmán et al., 1988)

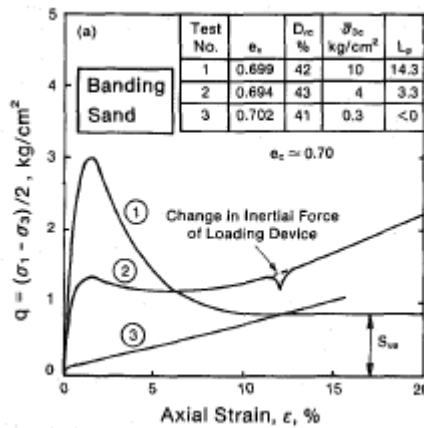


Figura 2-5. Respuesta de esfuerzo – deformación para una arena ensayada por triaxiales CIU (datos de Castro (1969)). Mismo e_c , distinto σ'_c (Mohamad & Dobry, 1986)

2.2. Licuefacción en arenas y Resistencia cíclica

La licuefacción es un fenómeno que se viene estudiando desde hace varias décadas en la geotecnia. Este ocurre principalmente en depósitos de arenas saturadas que son sometidas a cargas estática o cíclicas, con las que se genera un gran aumento en la presión de poros bajo condiciones de volumen constante, es decir, no drenadas (Castro, 1975).

Cuando ocurre licuefacción, se tiene que el incremento de la presión de poros es tal que iguala al valor del confinamiento de la muestra, por lo que el valor del confinamiento efectivo del suelo es equivalente a cero.

2.2.1. Tipos de fallas

Dependiendo de las condiciones iniciales y de las solicitaciones, es posible identificar dos tipos de fallas que se detallan a continuación.

- Movilidad cíclica: ocurre cuando el corte estático inicial (τ_s) es menor a la resistencia no drenada del suelo (S_u) (Figura 2-6 (a)). Cuando se tiene este tipo de falla ocurre bajo deformación limitada.
- Falla de flujo: en este caso, se está en presencia de deformaciones ilimitadas, llegando incluso a que el suelo fluya. Para que este tipo de falla ocurra, debe ocurrir que el corte estático inicial sea mayor a la resistencia no drenada del suelo (Figura 2-6 (b)).

La diferencia entre los dos tipos de falla ocurre debido a que el corte estático se mantiene durante todo el proceso, incluso después de la solicitación. Cuando la solicitación se detiene, el esfuerzo de corte es el único esfuerzo que puede causar movimiento sobre el suelo, y el único esfuerzo resistente es la resistencia no drenada (Ishihara et al., 1990).

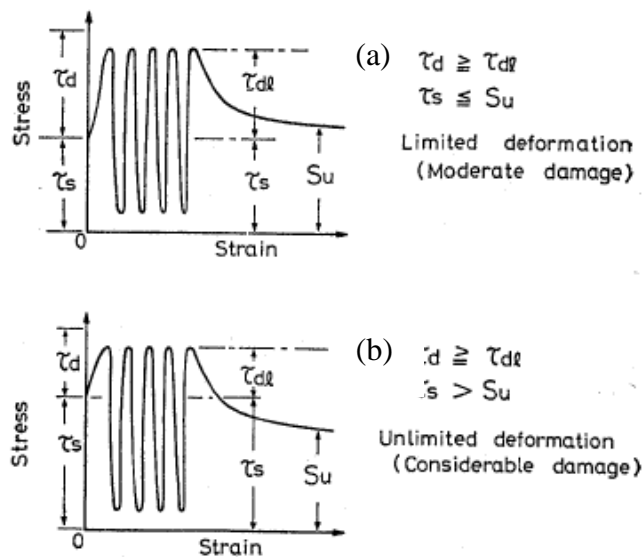


Figura 2-6. Esquema para corroborar la estabilidad. (a) Movilidad cíclica, (b) falla de flujo (Ishihara et al., 1990)

2.2.2. Ensayos de resistencia cíclica

Debido al contexto de la presente memoria, uno de los ensayos que se planea realizar es aquel para determinar la resistencia cíclica de las muestras de suelo. Lo anterior con el fin de determinar el potencial de licuefacción del suelo en estudio. En el laboratorio, existen varios equipos para poder determinar dicha resistencia, reproduciendo y simulando, mediante la fabricación de probetas de suelos, los estados tensionales generados en terreno producto de distintos eventos sísmicos. El equipo más utilizado a nivel mundial corresponde al triaxial cíclico, debido a que es simple de utilizar en el laboratorio, tanto para la operación del equipo como para la preparación de la probeta.

Muy similar al triaxial monótono, se aplica en primera instancia una presión de confinamiento, para luego aplicar una carga cíclica en la componente axial. Es por esto por lo que no se representan completamente las cargas solicitadas producto de un sismo. Algunas de las diferencias son: el cambio en las presiones de confinamiento totales, los patrones de carga, la rotación de las tensiones principales, etc.

La última diferencia mencionada es uno de los factores más relevantes, pues en un triaxial cíclico solo es posible una rotación de 0° o 90° (compresión y extensión, respectivamente), debido a la naturaleza de la carga aplicada. Este factor, junto con otros, hace que el valor obtenido en laboratorio para la resistencia cíclica se encuentre sobredimensionado (Corral, 2008).

Al variar de compresión a extensión, y viceversa, la presión de poros comienza a aumentar, generando una disminución de la tensión efectiva, lo que implica un aumento en la deformación axial de la probeta ensayada. Existen varias situaciones en las que se define que la muestra alcanza licuefacción. Una de ellas consiste en que la presión de poros alcanza por primera vez el valor de la tensión de confinamiento, por lo que las tensiones efectivas se anulan en ese instante. Otra definición o criterio de falla se da cuando el nivel de deformación axial en doble amplitud alcanza valores como 1%; 2,5%; 5% o 10%.

La razón de resistencia cíclica (Cyclic Resistance Ratio) corresponde a la tensión de corte cíclica aplicada a la probeta normalizada por la presión de confinamiento efectiva. En otras palabras, se determina de la siguiente forma:

$$CRR = \frac{\tau_{cy}}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_0} \quad (1)$$

Donde τ_{cy} corresponde a la tensión de corte cíclica aplicada, σ'_0 la presión de confinamiento aplicada y σ_d al esfuerzo desviador aplicado.

2.3. Factores que influyen al comportamiento monótono y resistencia cíclica

Tal como se ha mencionado, se utilizan los ensayos triaxiales para obtener los comportamientos monótono y cíclico de una arena. Sin embargo, los resultados de estos ensayos dependen de distintos factores. Estos pueden tener distintas naturalezas: algunos de ellos son propios del material granular, mientras que otros guardan relación con la fabricación de la probeta o factores directamente relacionados con el ensayo mismo.

Algunos de estos factores son:

- Tipo de suelo
- Tamaño de probeta
- Confinamiento inicial
- Densidad relativa
- Frecuencia de carga
- Tipo de carga
- Tipo de preparación
- Corte inicial
- Contenido de finos
- Densidad relativa
- Tamaño de partículas y gradación
- Plasticidad de los finos
- Grado de saturación
- Razón de preconsolidación

Para el caso en particular del presente estudio, resulta importante estudiar cómo afecta el contenido de finos al comportamiento monótono y resistencia cíclica. Este efecto se explica a continuación.

2.4. Comportamiento monótono y cíclico de arenas con finos

Como se menciona en la primera sección de este capítulo, las arenas pueden poseer distintos comportamientos dependiendo de las condiciones iniciales que presente la muestra, entendiéndose como condiciones iniciales el índice de vacíos y la presión de confinamiento. Ahora, manteniendo dichas condiciones iniciales, el comportamiento de la arena cambia al incorporar finos a la matriz del suelo.

Se han realizado varios estudios sobre arenas con distintos contenidos de finos y cómo va cambiando el comportamiento monótono y cíclico del suelo. Un trabajo es el realizado por Lade y Yamamuro (1997), quienes ven el efecto de finos no plásticos en la licuación estática de arenas ensayadas en su estado más suelto posible. Los resultados obtenidos muestran que, para dos arenas con graduaciones distintas, al aumentar el contenido de finos, se tiene que el suelo licúa estáticamente a menores deformaciones axiales (Figura 2-7).

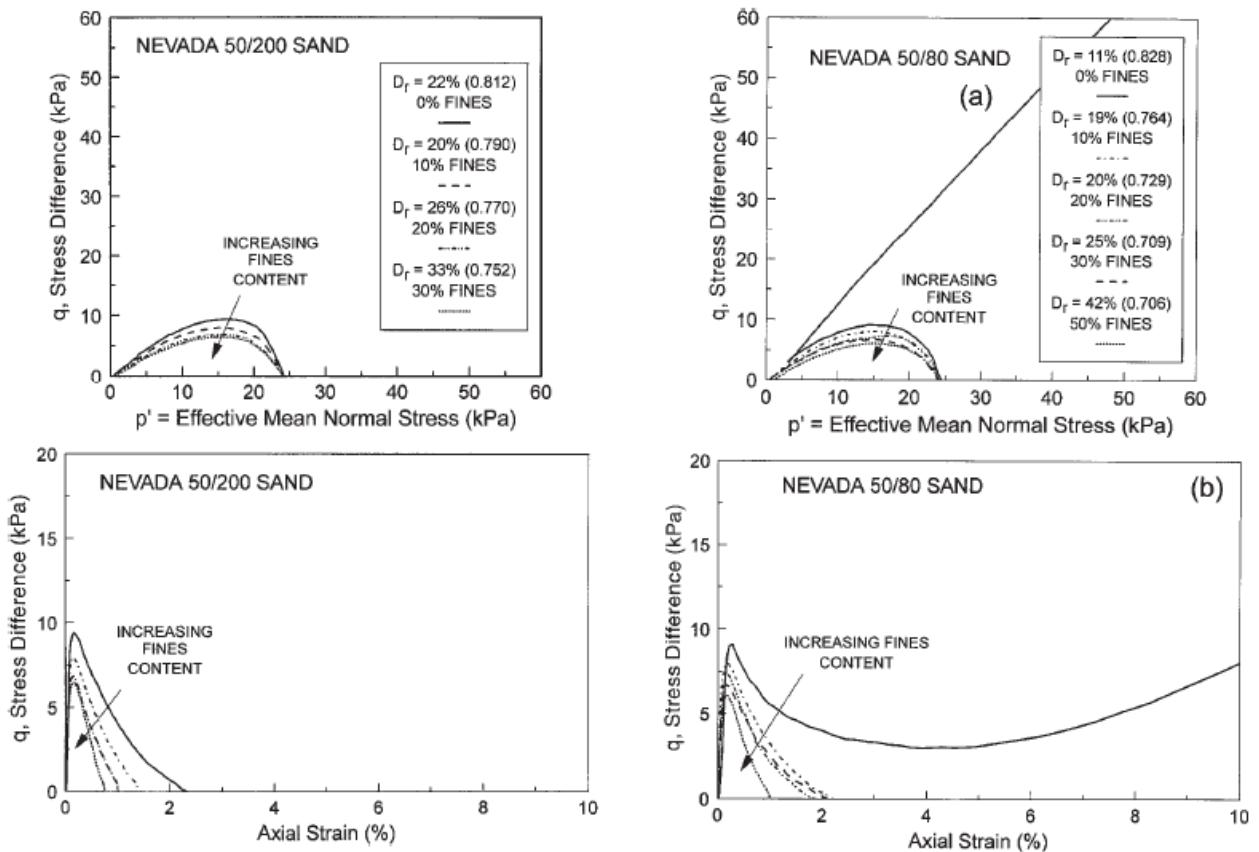


Figura 2-7. (a) Líneas de esfuerzo efectivos en el diagrama $p' - q$, (b) variación de esfuerzo de corte versus deformación axial. Los gráficos de la izquierda corresponden a la arena Nevada 50/200, mientras que los de la derecha a la arena Nevada 50/80 (Lade & Yamamuro, 1997)

Por otro lado, el estudio realizado por Polito y Martin II (2001), muestra que, para la resistencia cíclica para suelos limosos depende de si el contenido de limos actuales se encuentra por debajo o sobre el límite de contenido de limos para la arena. Cuando el contenido de limos se encuentra bajo el límite, la resistencia cíclica se ve afectada principalmente por la densidad relativa, independiente del contenido de finos. Mientras que, cuando el contenido de finos se encuentra por sobre el límite, se tiene que la resistencia cíclica decae al aumentar el contenido de finos ().

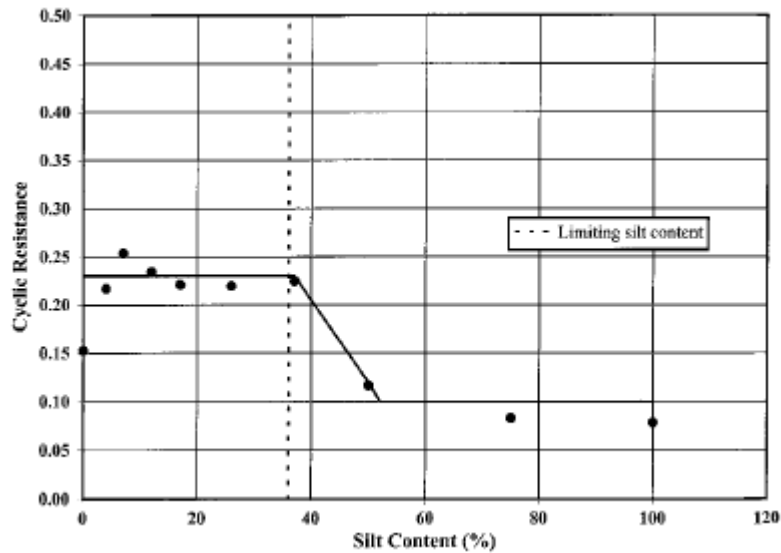


Figura 2-8. Variación de la resistencia cíclica con el contenido de limos para muestras de arena Yatesville preparadas por compactación húmeda a 30% de densidad relativa (Polito & Martin II, 2001)

Murthy et al. (2007) trabaja con contenido de finos no plástico, específicamente limos, de 0%, 5%, 10% y 15%, obteniendo como resultado que el incremento en el contenido de finos conlleva en un decaimiento en la línea de estado crítico, pero en un aumento del ángulo de fricción interna.

Más adelante, Carraro et al. (2009) realizan un estudio para ver el efecto de finos plásticos y no plásticos sobre la resistencia al corte y la rigidez. Este estudio fue realizado utilizando arena Ottawa mezclada con limo no plástico y con caolinita. Las probetas se confeccionan por “slurry deposition”, logrando el estado más suelto posible. Los resultados muestran que al agregar finos no plásticos a la arena incrementa el ángulo de fricción interna, además de cambiar el comportamiento contractivo del suelo a uno más dilatante. Por otro lado, la adición de caolinita disminuye el ángulo de fricción interna y se observa un comportamiento más contractivo.

Ahora, no sólo se ha estudiado el efecto del contenido de finos sobre la resistencia del suelo, sino que también se ha estudiado el efecto de la plasticidad. Park y Kim (2013) realizaron ensayos triaxiales a la arena del río Nakdong mezclándola con cuatro tipos de finos con distintas plasticidades. Se realizaron ensayos para muestras sueltas (DR=45%), medianamente densas (DR=60%) y densas (DR=80%). Los resultados mostraron que para las muestras sueltas no existe un cambio significativo. Sin embargo, al ir aumentando la densidad relativa de la muestra, la resistencia cíclica se vuelve mayor, pero notando un menor cambio para aquellas muestras de arena con bentonita (Figura 2-9). En la próxima sección se presentan más estudios relativos a la plasticidad de los finos.

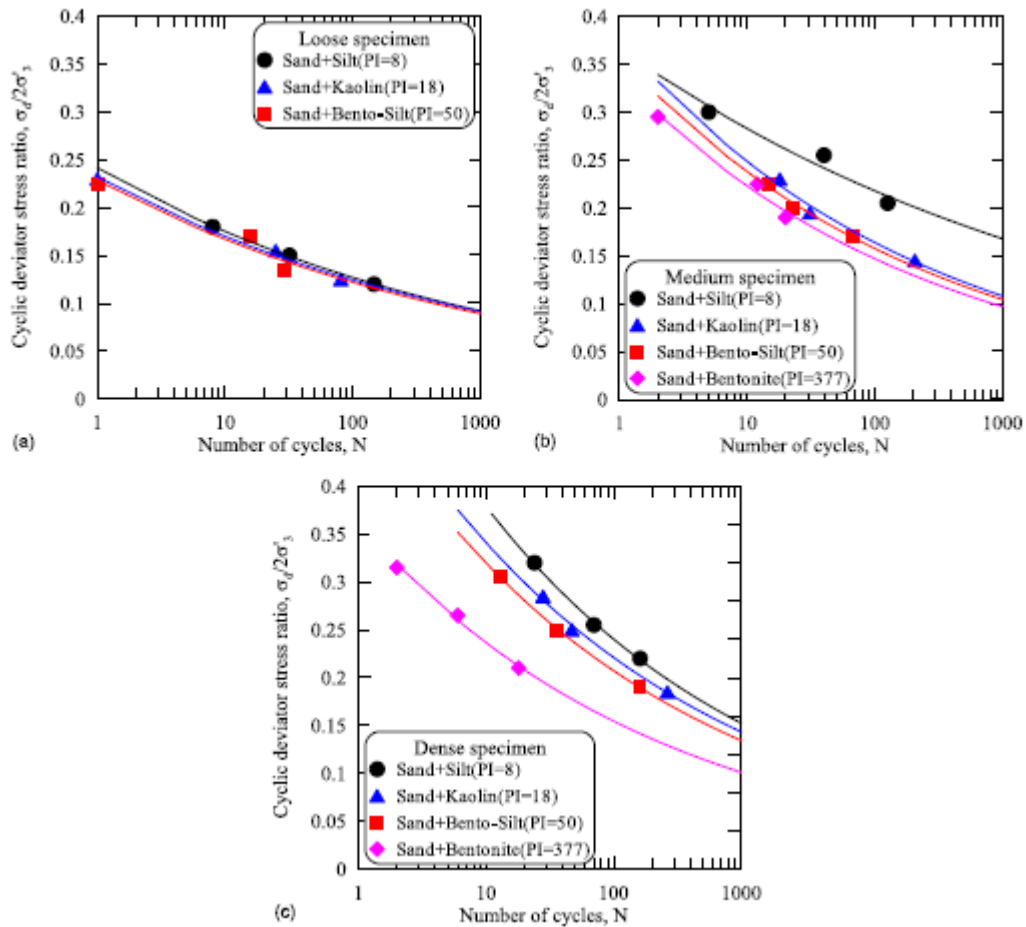


Figura 2-9. Curvas de resistencia a la licuefacción para distintas densidades. (a) Muestras sueltas, (b) muestras medias, (c) muestras densas (Park & Kim, 2013)

2.5. Métodos de mejoramiento

Como se ha podido observar, existen casos en los que la resistencia a la licuefacción se incrementa. El estudio realizado por Ishihara y Koseki (1989) da el paso para continuar la investigación en cuanto al efecto de la plasticidad de los finos a la resistencia.

En esta línea, se han realizado varios estudios con distintos tipos de métodos para ver si incrementa o no la resistencia cíclica a la licuefacción. En general, se pueden identificar dos tipos de métodos: metodologías activas y metodologías pasivas.

Dentro de las metodologías activas se pueden encontrar son los siguientes: (1) drenar el suelo, (2) inyección de lechada de cemento, (3) densificación in-situ mediante compactación dinámica, compactación explosiva, vibrocompactación, etc, (4) Densificación in-situ acompañada de instalación de drenaje, (5) Jet - Grouting, y (6) remover y reemplazar el suelo (Mitchell, 2008). Por otro lado, se tienen metodologías menos invasivas, las cuales se denominan metodologías pasivas. A continuación, se nombran y describen algunas de ellas.

2.5.1. Sílica coloidal

En los últimos años se han realizado varios estudios en los que se busca mejorar la resistencia a la licuefacción mediante la inclusión de sílica coloidal al suelo. La sílica coloidal corresponde a una solución acuosa de partículas microscópicas que se producen de soluciones saturadas de ácido silícico (Gallagher y Mitchell, 2002). En soluciones diluidas con concentraciones de 5% por peso, la sílica coloidal tiene viscosidad y densidad similares a las del agua (Gallagher et al. 2007). El tiempo en el que se demora en tomar características de gel depende de varias variables, como el tamaño del área superficial de las partículas de sílica, el pH, y la concentración de sal. Por las características de gel, la viscosidad y la densidad es que la sílica coloidal resulta interesante como un método pasivo para mitigar la licuefacción.

En el estudio realizado por Gallagher y Mitchell (2002) se observa que al aumentar el porcentaje de sílica coloidal en la mezcla con arena Monterrey No. 0/30, se obtienen menores deformaciones, además de que el suelo licúa a un mayor número de ciclos (Figura 2-10).

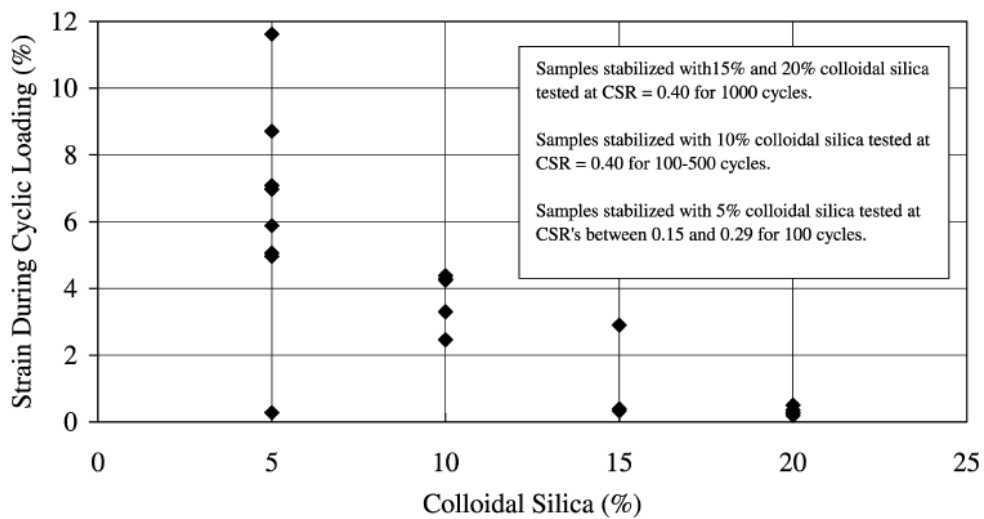


Figura 2-10. Porcentaje de sílica coloidal versus deformación durante cargas cíclicas a CSR=0.40 (Gallagher y Mitchell, 2002)

Por otro lado, el estudio de Díaz-Rodríguez et al. (2008) presentó ensayos cíclicos de corte simple a la arena limosa extraída del sitio Puerto Industrial Lázaro Cárdenas, en México. En la Figura 2-11 se presentan sus resultados, donde se observa que, para un mismo confinamiento y densidad relativa, se requiere un mayor número de ciclos para gatillar la licuefacción en arenas tratadas.

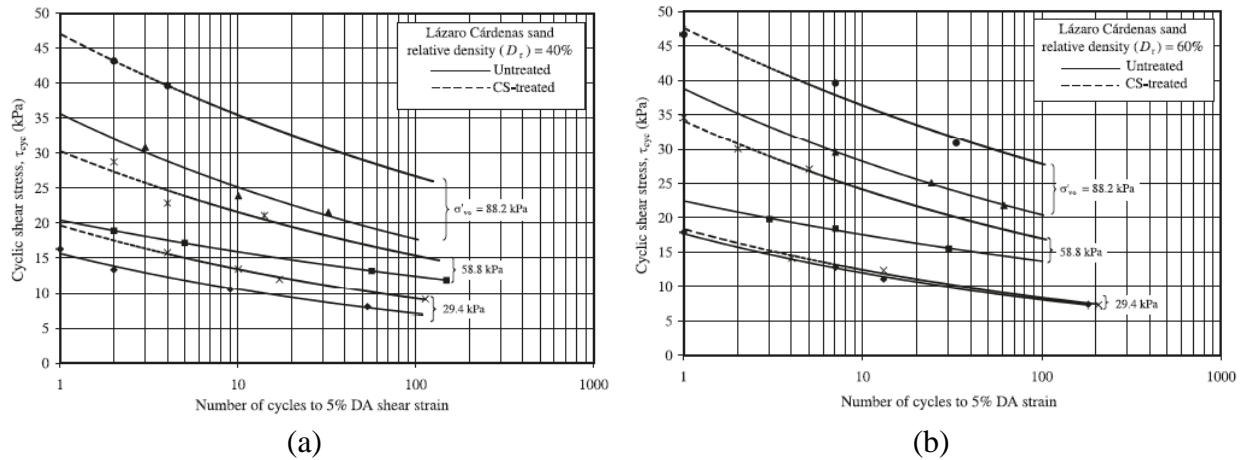


Figura 2-11. Comparación de arena sin tratamiento y con tratamiento de sílica coloidal. (a) DR=40%, (b)=60% (Díaz - Rodríguez et al. 2008)

2.5.2. Bentonita

El Mohtar (2008) realizó un estudio para ver el efecto de adicionar bentonita a arena de Ottawa, la cual corresponde a una arena limpia, es decir sin finos. La bentonita consiste en una arcilla natural formada por la meteorización sobre ceniza volcánica. Sus partículas tienen forma de disco y poseen un diámetro del orden de $0,1 \mu\text{m}$ y una razón de diámetro-espesor igual a 100. Su índice de plasticidad es de 650% (El Mohtar 2008). En este estudio, se mezcla la arena e Ottawa con distintos porcentajes de contenidos de finos, específicamente 0%, 3% y 5%. Los resultados obtenidos para la resistencia cíclica de la arena son mostrados en la Figura 2-12. Aquí, se evidencia que, al agregar un 3% y 5% de Bentonita, la resistencia a la licuefacción aumenta para un mismo número de ciclos, comparando con la arena completamente limpia.

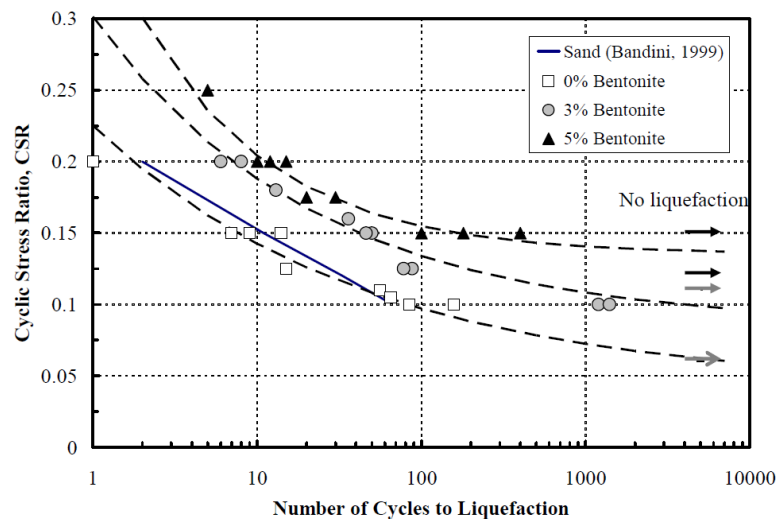


Figura 2-12: Resistencia cíclica versus el número de ciclos para que el suelo licue (El Mohtar 2008)

Otro estudio que muestra una mejora en la resistencia a la licuefacción utilizando bentonita corresponde al realizado por Gratchev et al. (2007), donde se realizaron ensayos cíclicos en un anillo de corte a una arena con distintos contenidos de bentonita. Se obtiene que a un mayor contenido de bentonita, se logra un mayor incremento en la presión de poros, además de requerir un mayor número de ciclos para lograr que el suelo licue (Figura 2-13).

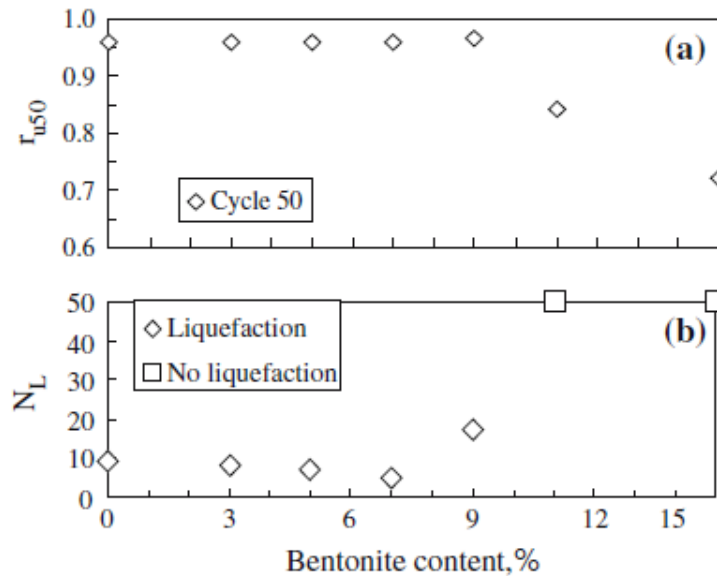


Figura 2-13: Resultados del ensayo de anillo de corte en mezclas de arena con distintos contenidos de bentonita, graficados como el contenido de bentonita versus (a) la razón de presión de poros medida para el último, ciclo número 50 de carga, (b) el número de ciclos (NL) necesarios para licuar (Gratchev et al. 2007)

2.5.3. Laponita

Ochoa-Cornejo (2015) y Ochoa – Cornejo et al. (2016) realizó un estudio similar al anterior, pero cambiando el fino de alta plasticidad utilizado. En este caso, utilizó Laponita, que consiste en una arcilla artificial en forma de disco de aproximadamente 25 nm de diámetro y 1 nm de espesor. Su índice de plasticidad bordea los 1200% (Ochoa-Cornejo 2015). En la Figura 2-14 se muestran los resultados obtenidos por Ochoa-Cornejo (2015) donde se evidencia que al agregar laponita a la arena limpia, la resistencia cíclica del material granular aumenta.

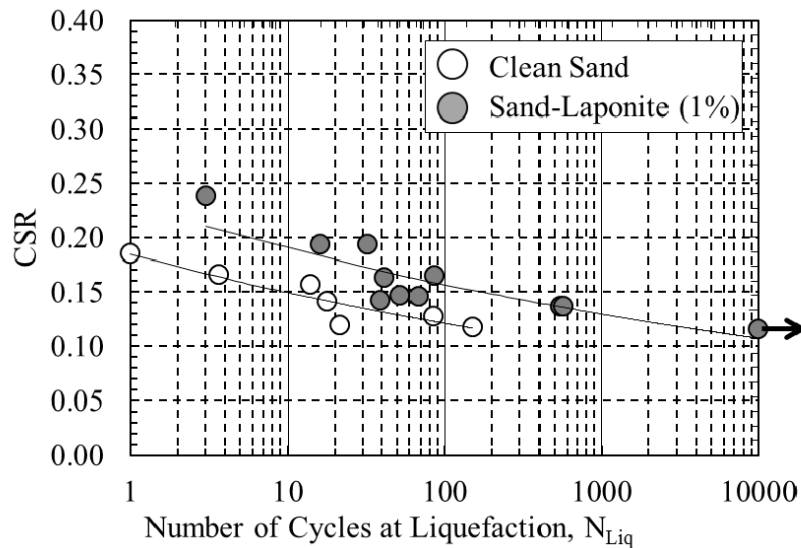


Figura 2-14: Resistencia cíclica de arena limpia y arena con laponita (1%) (Ochoa-Cornejo 2015)

Más tarde, Huang y Lang (2016) realizaron un estudio similar al anterior, donde utilizaron una arena limosa con un porcentaje de finos similar a los relaves chilenos, pero con un diferente método de confección de la probeta que el estudio anterior. En este estudio, se obtiene lo observado en la Figura 2-15, donde también se logra un incremento en la resistencia a la licuefacción.

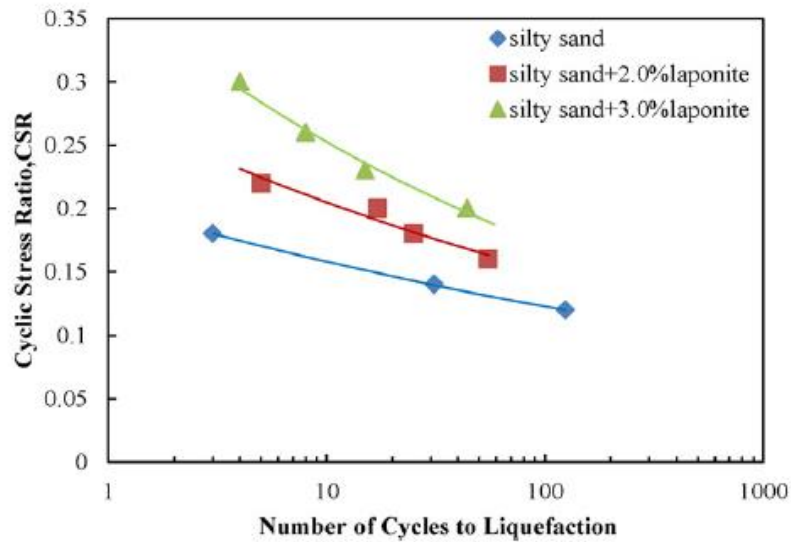


Figura 2-15. CSR versus número de ciclos para licuar para arenas limosas con laponita a concentraciones de 0%, 2% y 3% (Huang y Wang, 2016)

De los últimos estudios que se han realizado corresponde al realizado por Pardo y Orense (2017), el cual se caracteriza por realizar un método distinto de armado de la probeta, la cual es ensayada mediante cortes simples cíclicos. La metodología de confección de la probeta se resume en la Figura 2-16, donde se utiliza una arena limosa con un contenido de finos de alrededor de 10%.

Los resultados obtenidos muestran que, para un envejecimiento de 72 horas de la laponita (Fase 1 en la Figura 2-17), existe una mejora en la resistencia con un contenido de 1% de laponita en relación a la masa seca de arena.

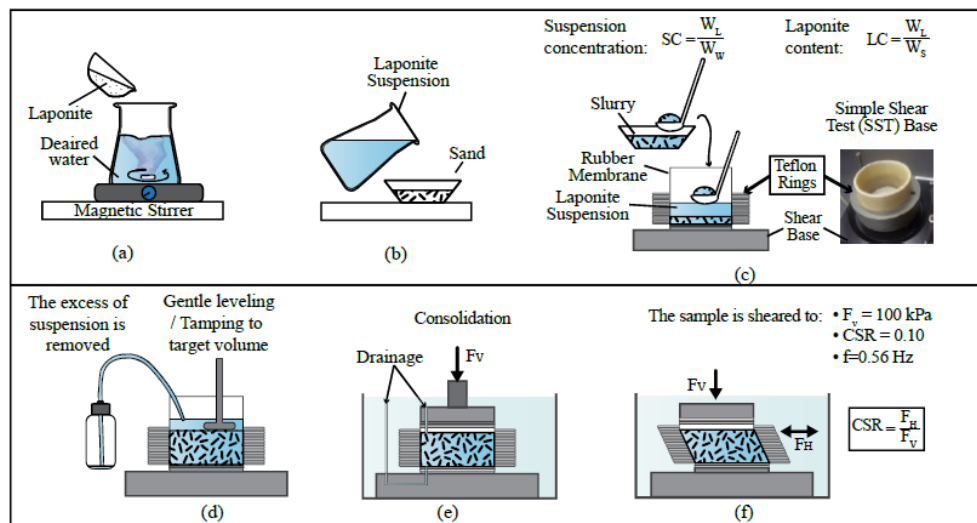


Figura 2-16. Preparación de la muestra para especímenes ensayados en ensayos de corte simple cíclicos (Pardo y Orense, 2017)

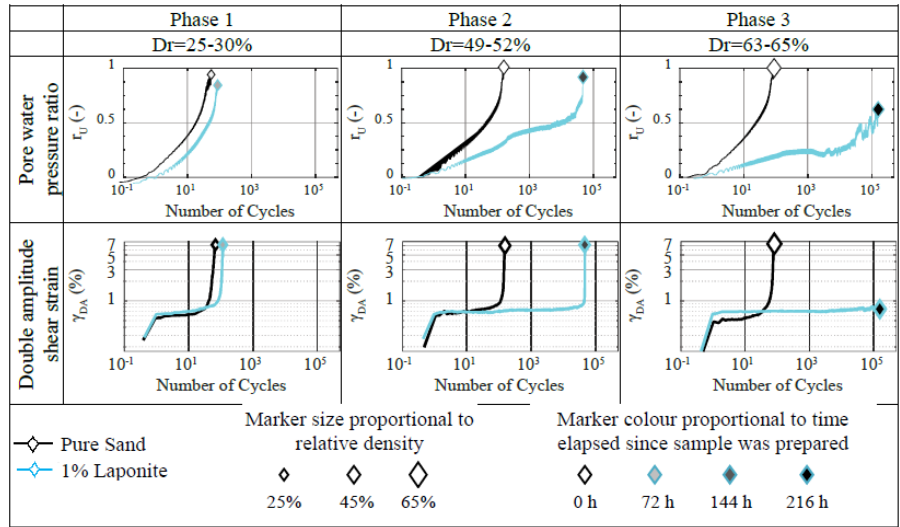


Figura 2-17. Resultados del ensayo de corte simple cíclico para CSR=0.1 (Pardo y Orense, 2017)

2.5.4. Bacterias

Además de los materiales mencionados previamente, se ha estudiado la mejora de propiedades geotécnicas mediante bacterias. DeJong et al. (2006) utilizaron arena Ottawa 50 – 70 y la bacteria *Bacillus pasteurii* para obtener una concentración de contacto de partícula – partícula por unidad de volumen para que la cementación producida por la bacteria afecte notoriamente el comportamiento global al corte. Las muestras se ensayan mediante triaxiales monótonos no drenados y se obtiene un incremento en la resistencia con respecto a muestras sueltas. Paralelamente, se midió la velocidad de onda de corte mediante bender element, donde se observa una gran degradación de la onda de corte a bajas deformaciones axiales (Figura 2-18). Cabe destacar que también se realizaron ensayos con cementando con yeso.

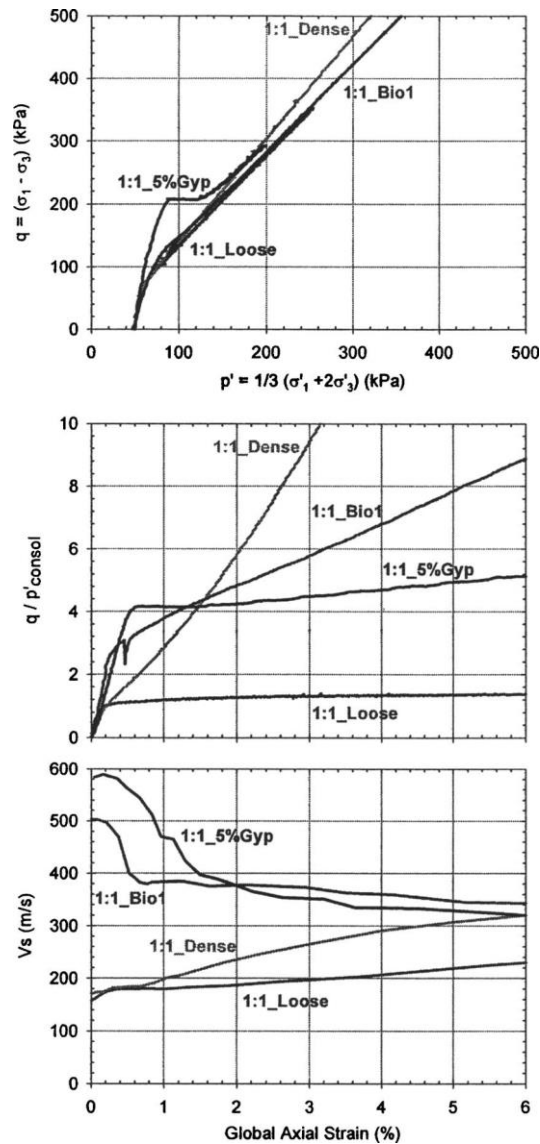


Figura 2-18. Respuesta a triaxiales monótonos no drenados para muestras 1:1 (DeJong et al., 2006)

Posteriormente, se estudia si existe una mejora en la resistencia a la licuación al producir una precipitación bioinducida de calcita sobre un suelo extraído del tranque de granito inferior que se encuentra en la orilla del Río Serpiente en el estado de Washington (Burbank et al. (2013)). Para el tratamiento, se bombea dentro de la muestra una solución de enriquecimiento seguida de tratamientos de biomineralización. Los principales resultados se presentan en Figura 2-19, donde se observa que al aumentar el contenido de calcita precipitada se obtiene un aumento en la resistencia cíclica. Para el contenido mayor, se obtiene una resistencia cinco veces mayor.

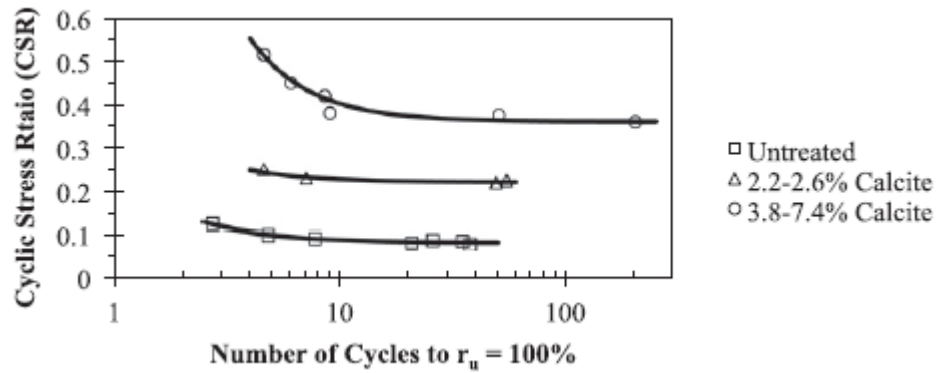


Figura 2-19. Razón de Solicitación Cíclica correspondientes al número de ciclos necesarios para inducir licuación para arenas biotratadas y no tratadas. Líneas sólidas representan correlaciones para un rango dado de contenido de calcita

Recientemente, Xiao et al. (2018) realiza un estudio en una arena calcárea sobre si existe un mejoramiento en la resistencia cíclica utilizando la precipitación de calcita inducida por bacterias. Aquí utiliza la cepa de ureasa de *Sporosarcina pasteurii* para activar la producción de calcita. Se confeccionan probetas a una densidad relativa igual a 47% aproximadamente, las cuales se ensayan mediante triaxiales cíclicos no drenados.

Los resultados se muestran en la Figura 2-20, donde se muestran la razón de sollicitación cíclica (CSR) versus el número de ciclos en los que el material licua (N_L) para la arena sin tratamiento y la arena con tres soluciones de cementación distintas. Estos resultados muestran que la resistencia cíclica a la licuación aumenta con el aumento de la solución de cementación con la que se trata la arena calcárea.

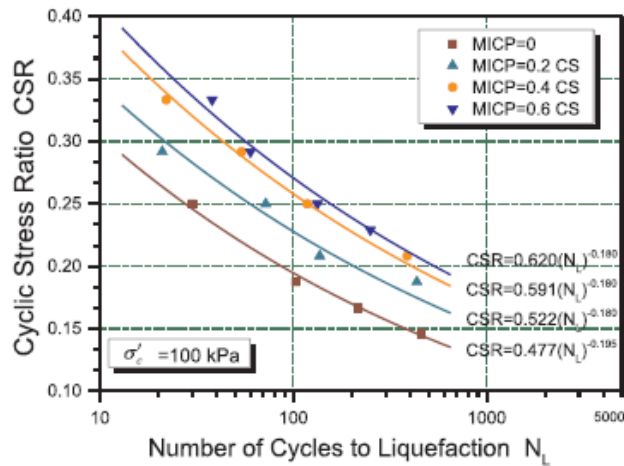


Figura 2-20. CSR versus N_L , para la arena calcárea tratada para diferentes contenidos de solución de cementación (CS) bajo un confinamiento efectivo de 100 kPa (Xiao et al. 2018)

2.6. Evaluación índice de vacíos en sistemas de suelos con diversos tamaños

El índice de vacíos, e , es una propiedad índice que se utiliza como parámetro de comparación en distintos estudios dentro del área de geotecnia. Un ejemplo es lo mostrado en Figura 2-21, donde se identifican las líneas de estado último en el espacio $e - p'$ para una arena con distintos contenidos de finos.

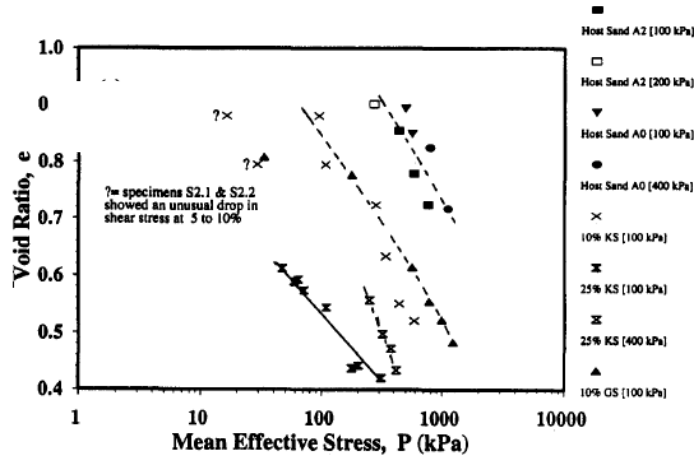


Figura 2-21. Datos del estado último en el espacio $e - p'$ (Thevanayagam 1998).

En la literatura, es posible encontrar distintos gráficos como el mencionado anteriormente. Sin embargo, en la mayoría de los casos no queda explícito la definición del índice de vacíos utilizado.

En general, se pueden identificar tres índices de vacíos diferentes, según Thevanayagam (1998): (1) índice de vacío total, (2) índice de vacío intergranular o esquelético, e (3) índice de vacío interfino. A lo largo de los años se han entregado distintas definiciones para los índices de vacíos mencionados. Sin embargo, la definición entregada por Thevanayagam (1998) es de las más utilizadas, y se muestra de forma esquemática en la Figura 2-22.

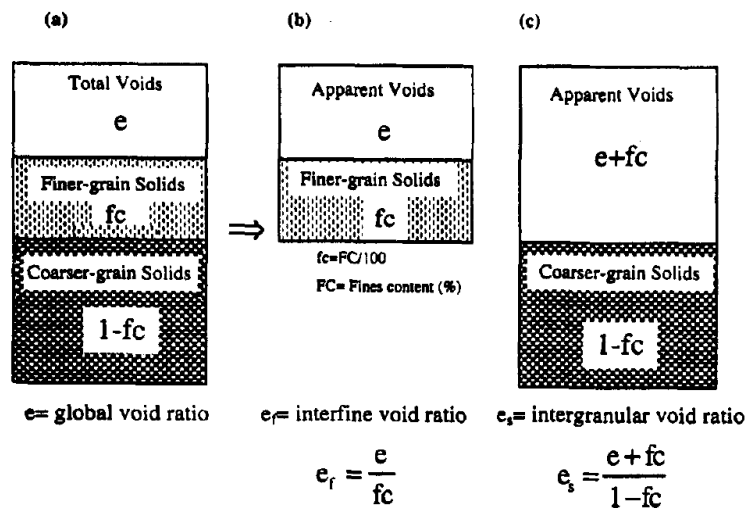


Figura 2-22. Diagrama de fase esquemático. (a) Arena limosa, (b) matriz limosa, (c) matriz arenosa (Thevanayagam 1998)

Tal como se muestra en la Figura 2-22, se tiene que el índice de vacío total queda definido por la siguiente expresión:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2)$$

Donde V_v corresponde al volumen de vacíos, y V_s al volumen de sólidos. En este caso, se tiene que los finos se consideran como sólidos. Por otro lado, cuando se habla de índice de vacío intergranular, se entiende que los finos no tienen una participación importante en el traspaso de esfuerzos entre los granos de mayor tamaño, debido a que principalmente se encuentran ubicados en los espacios entre las partículas granulares (Thevanayagam 1998). Con esto, y considerando que tanto gruesos como finos poseen la misma gravedad específica, se obtiene que el índice de vacíos intergranular se determina como:

$$e_{sk} = \frac{e + fc}{1 - fc} \quad (3)$$

Las diferentes definiciones que existen para el índice de vacíos se deben principalmente a la relevancia que van tomando los finos dependiendo del contenido de estos dentro de la estructura del suelo. Lade et al., (1998) da a conocer la variación teórica del índice de vacíos mínimo en función del contenido de finos en un sistema de dos suelos (grueso y fino), la cual se muestra en la Figura 2-23 . Aquí es posible notar cómo inicialmente el índice de vacíos disminuye al ir aumentando el contenido de finos, hasta alcanzar un mínimo y comenzar a aumentar. Es por esto que, al momento de determinar el índice de vacíos de un suelo es necesario considerar el porcentaje de finos que este posee.

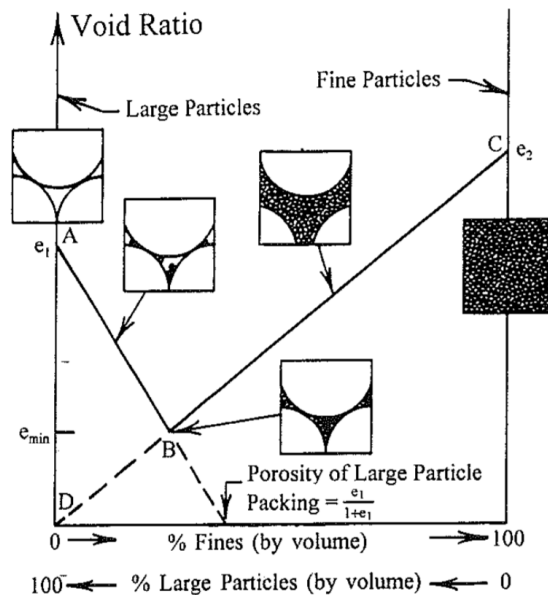


Figura 2-23. Diagrama esquemático de la variación teórica del índice de vacíos mínimo en un empaquetamiento binario con porcentajes de finos (Lade et al., 1998)

En el caso del presente estudio, es importante reconocer que la Ecuación (3) es válida sólo cuando los finos y los gruesos poseen el mismo valor para G_s . Sin embargo, en este caso se debe hacer la diferencia entre el material granular, finos no plásticos y finos plásticos. Tomando en cuenta lo anterior, el índice de vacíos se determina como:

$$e = \frac{V_T \cdot \rho_w}{M_G \cdot \left(\frac{1}{G_{S_G}} + \frac{CF_{NP}}{G_{S_{NP}}} + \frac{CF_P}{G_{S_P}} \right)} - 1 \quad (4)$$

Donde V_T corresponde al volumen total de la muestra, ρ_w la densidad del agua, M_G la masa del suelo granular, CF_{NP} el contenido porcentual de finos no plásticos, CF_P el contenido porcentual de finos plásticos, G_{S_G} la gravedad específica del suelo granular, $G_{S_{NP}}$ la gravedad específica del fino no plástico, y G_{S_P} la gravedad específica del fino plástico.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo presenta los materiales y equipos utilizados durante el trabajo. Además, se describen las metodologías de los principales ensayos.

3.1. Descripción de los materiales

En el presente trabajo se utilizan dos materiales distintos para el desarrollo del programa experimental. El primero de ellos corresponde a una arena de relaves, mientras que el segundo a un nanomaterial. A continuación, se describen ambos materiales.

3.1.1. Relave del depósito El Torito

Este trabajo ocupó la fracción gruesa del relave El Torito, perteneciente a la mina de cobre El Soldado, propiedad de la compañía Angloamerican ubicada en la V Región. En particular, se obtiene el material del muro del depósito, el cual proviene de la tronadura, chancado y molienda de las rocas con minerales de cobre.

Para caracterizar el material, se realizan ensayos de granulometría manual y láser. En el caso de la granulometría manual se utilizan tamices ASTM de distintos tamaños (Tabla 3-1). Por otro lado, para la granulometría láser se utiliza el equipo Mastersizer 2000, el cual se describe en la Sección 3.2.

Tabla 3-1. Tamices utilizados en la granulometría manual

Tamiz N°	Diámetro [mm]
10	2.000
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
100	0.150
200	0.075

La Figura 3-1 presenta las curvas granulométricas obtenidas de forma manual y por granulometría láser. La distribución de tamaño corresponde a una arena limosa (SM) mal graduada, con un porcentaje de finos igual a 17%, un tamaño medio de partículas (D_{50}) de 0.188 mm, un coeficiente de uniformidad (C_u) de 5.002 y un coeficiente de curvatura (C_c) de 1.418. Al medir la plasticidad de los finos del material mediante la norma ASTM D4318 se obtiene que corresponden a finos no plásticos. En la Tabla 3-2 se resumen los parámetros previamente mencionados, junto con los diámetros característicos del material.

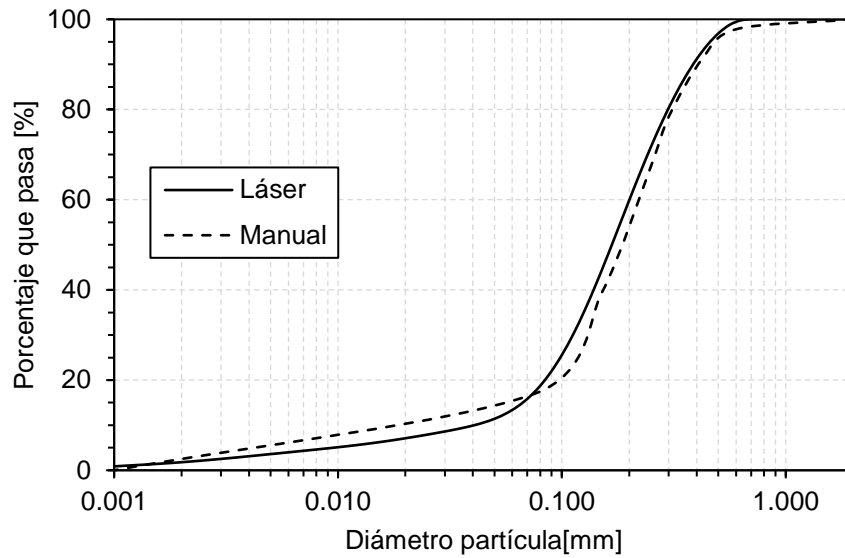


Figura 3-1. Comparación granulometría manual y láser de relave El Torito

Tabla 3-2. Resultados granulometría y plasticidad para arena de relave El Torito

Parámetro	Resultado
D10 [mm]	0.045
D30 [mm]	0.119
D50 [mm]	0.188
D60 [mm]	0.224
Cu	5.002
Cc	1.418
Plasticidad	NP

La Figura 3-2 muestra fotografías obtenidas por microscopía para el material retenido en las mallas #40, #50 y #100 (a, b y c, respectivamente). Aquí es posible observar que predomina el color gris oscuro en las partículas, observándose además colores como gris claro y salmón claro, con formas sub-angulares y angulares, probablemente debido a los procesos de molienda y chancado de la roca en el proceso minero. Además, se observa que en la malla #40 el tamaño de partícula es aproximadamente 0.7 [mm], en la malla #50 es de 0.4 [mm], y en la malla #100 de 0.25 [mm].

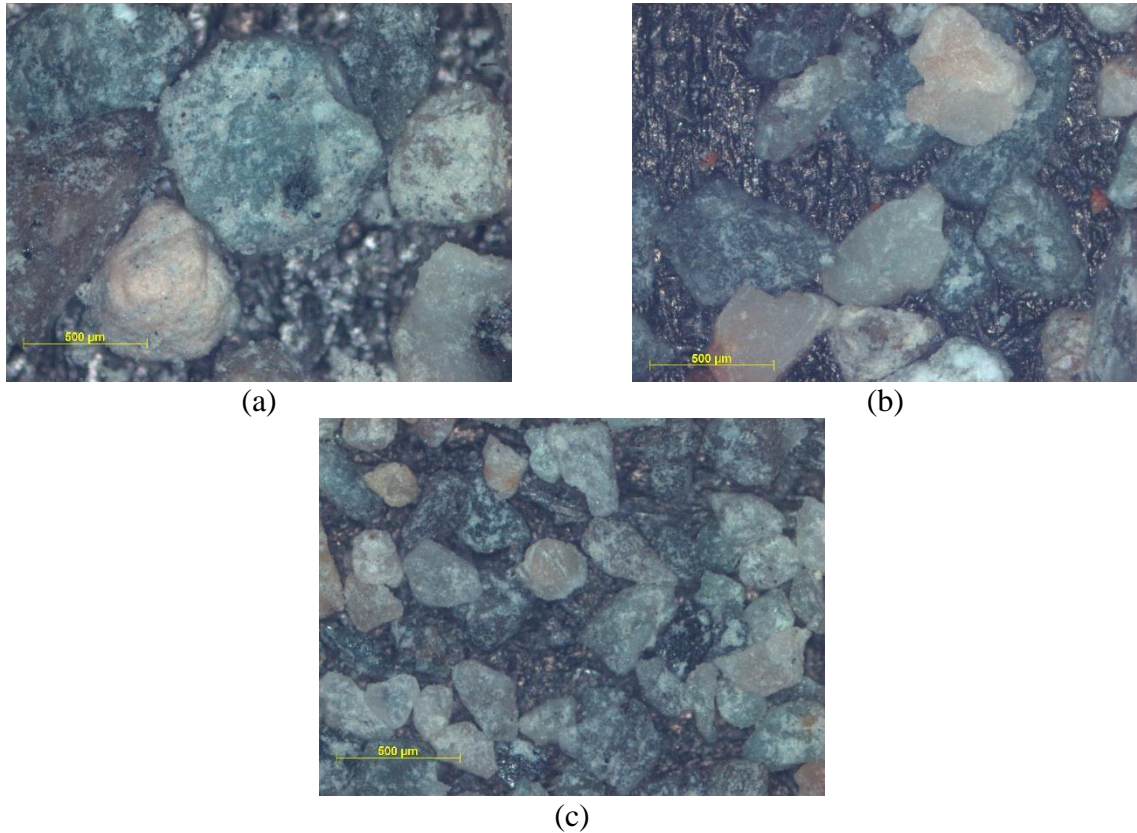
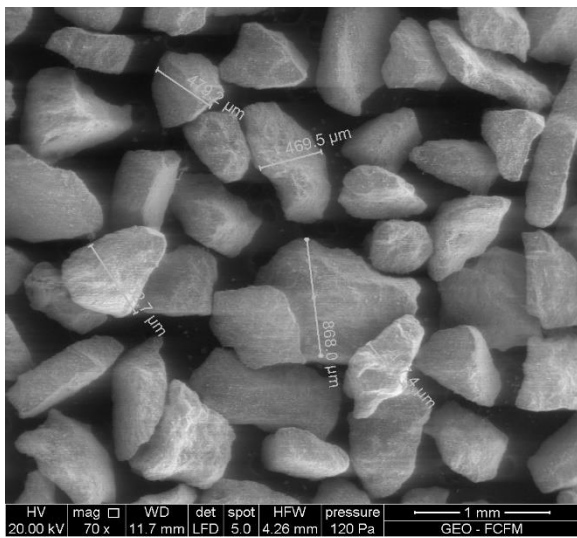
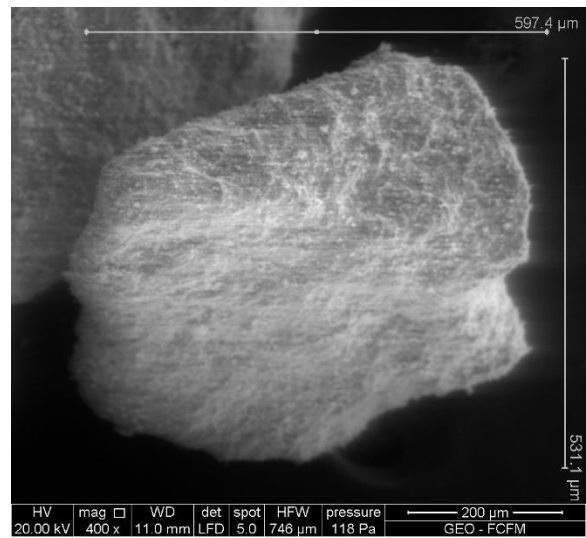


Figura 3-2. Imágenes obtenidas por microscopía de relave El Torito retenido en malla #40, #50 y #100 (a, b y c, respectivamente)

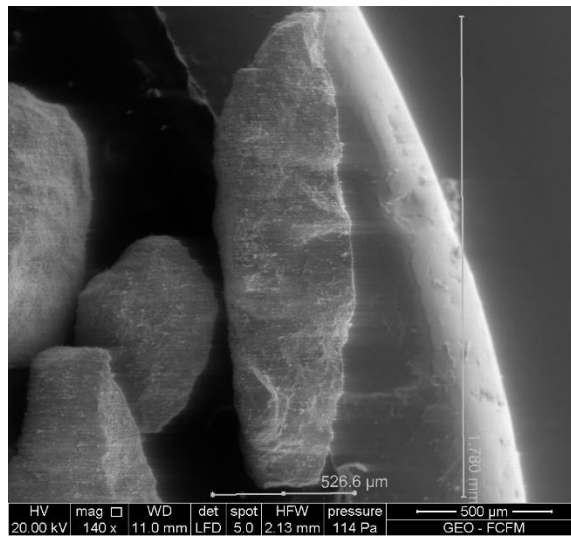
De la Figura 3-3 a la Figura 3-7 se presentan fotografías obtenidas por microscopio SEM para el material retenido en las mallas #40, #50, #100, #200 y el material que pasa la malla #200. En la Figura 3-8 se presenta una comparación entre la partícula de mayor tamaño retenida en la malla #40 y la partícula de menor tamaño observada entre el material que pasa la malla #200. De esta comparación se obtiene que la partícula de menor tamaño es aproximadamente 60 veces más pequeña que la partícula más grande.



(a)

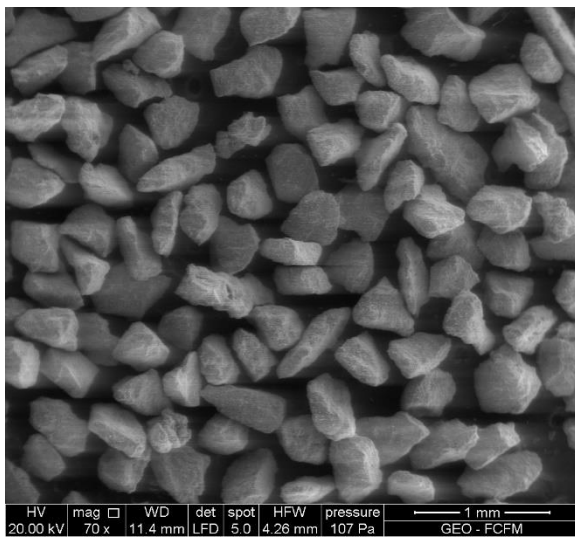


(b)

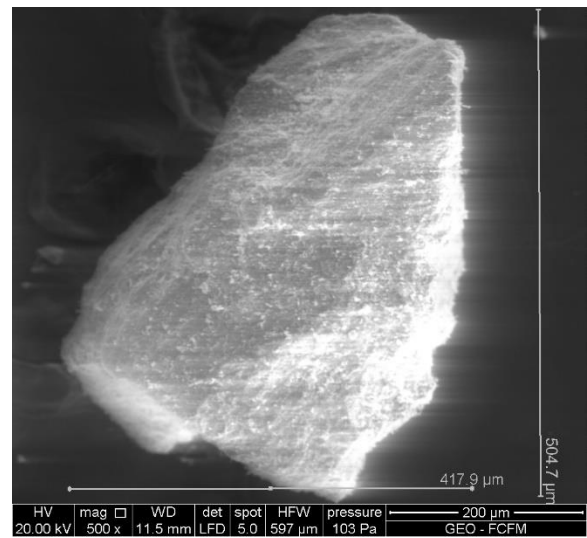


(c)

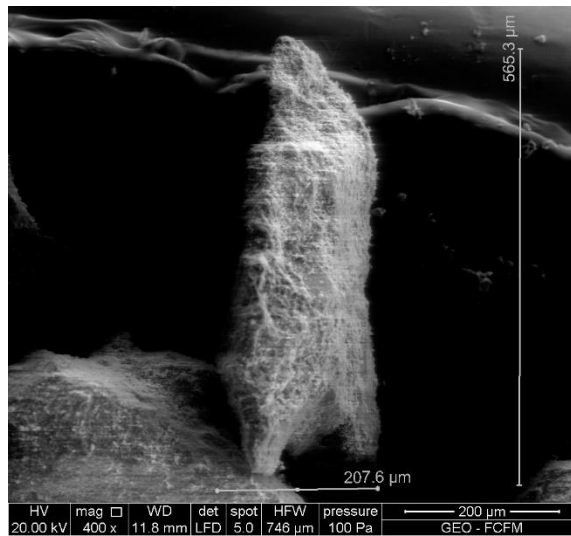
Figura 3-3. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #40. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales



(a)

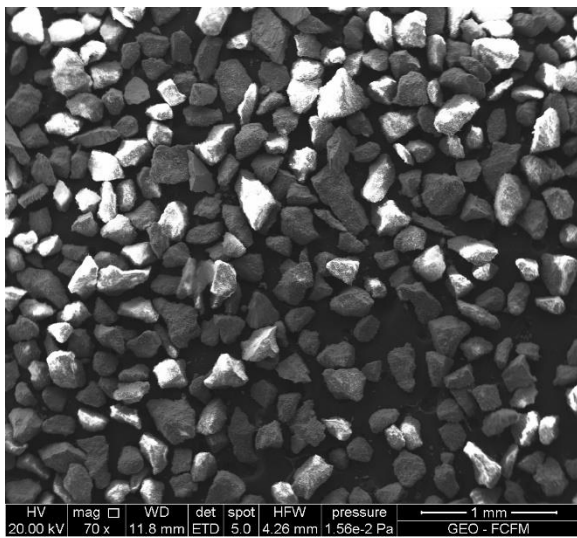


(b)

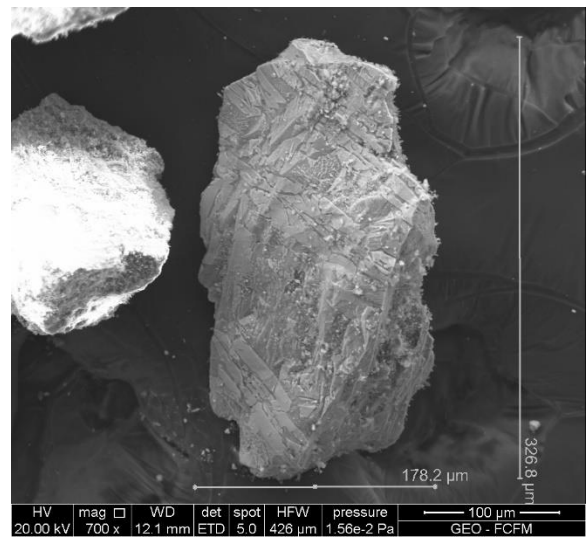


(c)

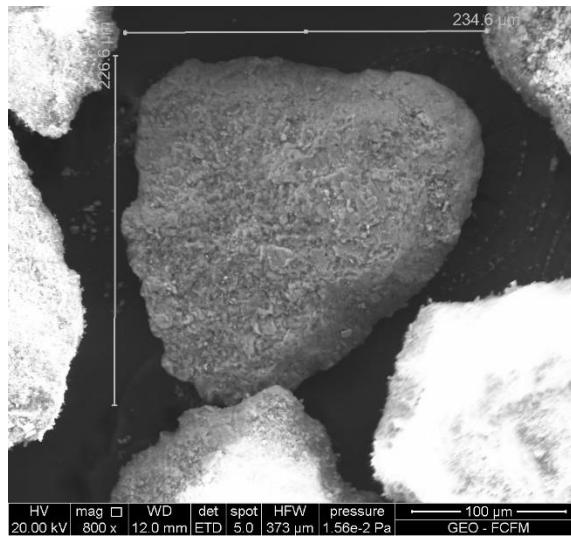
Figura 3-4. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #50. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales



(a)

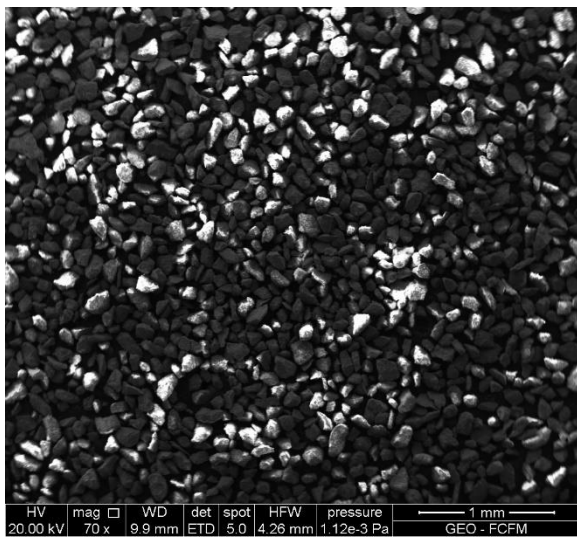


(b)

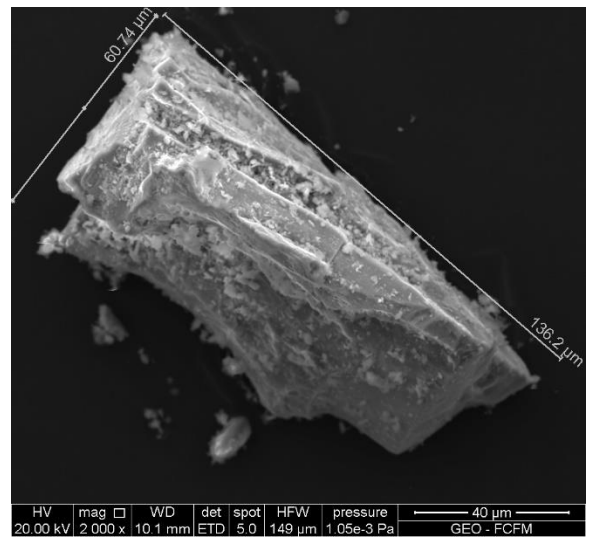


(c)

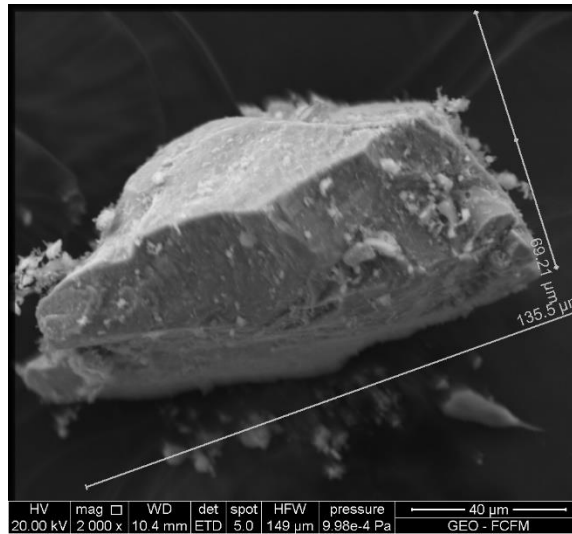
Figura 3-5. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #100. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales



(a)

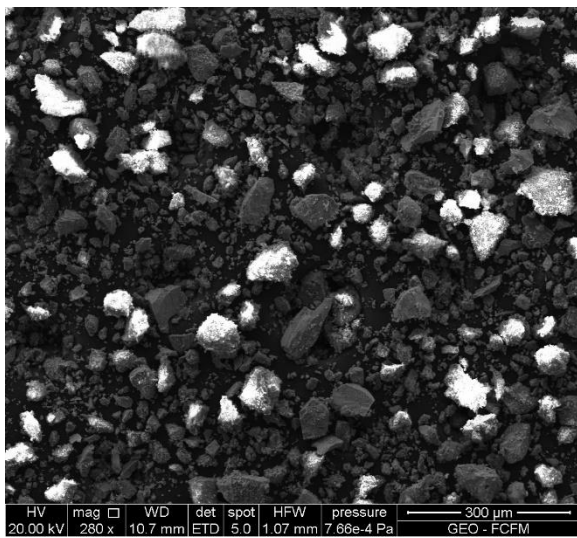


(b)

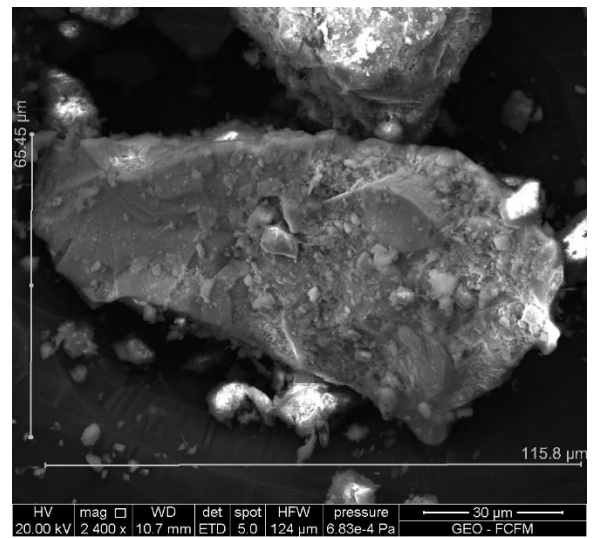


(c)

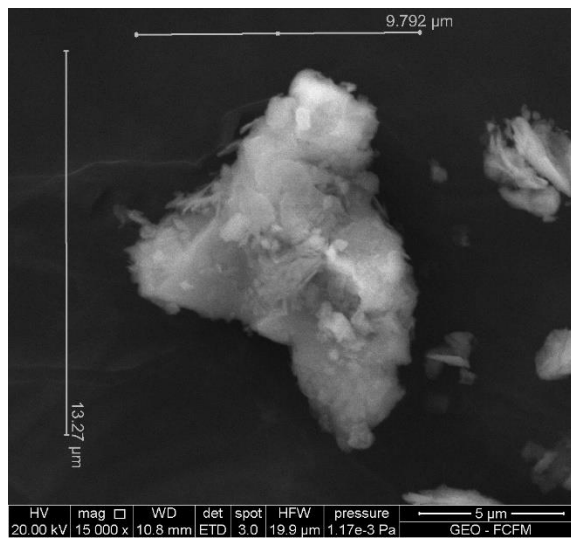
Figura 3-6. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito retenido en malla #200. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales



(a)



(b)



(c)

Figura 3-7. Imágenes obtenidas por SEM de relave El Torito bajo malla #200. (a) Vista general, (b) y (c) partículas individuales

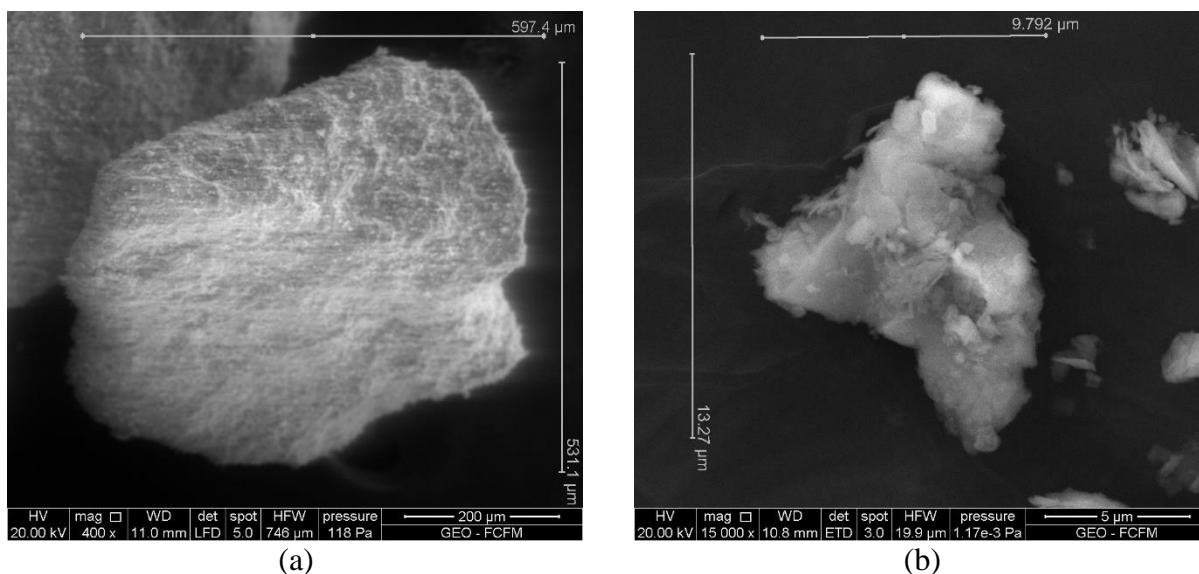


Figura 3-8. Comparación de tamaño entre partícula más grande y pequeña observada

Por otro lado, se obtienen las densidades máximas y mínimas del material. En el caso de la densidad máxima, se obtiene mediante el Método Japonés, utilizando un molde cilíndrico de volumen igual a 69 [cm³], el cual se rellena utilizando 10 capas de material, golpeando 100 veces cada una de ellas alrededor del molde. Una vez relleno, se obtiene la masa del sistema molde-material. Este ensayo se realiza seis veces, donde la densidad máxima resulta ser el valor máximo obtenido.

Para la densidad mínima, se deposita el material en un molde cilíndrico de volumen conocido utilizando un cono plástico, teniendo precaución de mantener la altura de caída cercana a 1 cm, disminuyendo la energía de depositación de la arena. El ensayo se realiza diez veces. La densidad mínima resulta ser el valor mínimo obtenido. Por último, se realiza el ensayo para determinar la gravedad específica del material según la norma ASTM D854. En la Tabla 3-3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos mencionados. Cabe destacar que los índices de vacíos mostrados corresponden a índice de vacíos totales (e_{bulk}). Además, estos valores no se ven modificados al añadir el nanomaterial.

Tabla 3-3. Caracterización geotécnica de arena de relaves de El Torito.

Parámetro	Resultado
Contenido de finos [%]	17
Índice de vacíos máximo $e_{máx}$ [-]	1.056
Índice de vacíos mínimo $e_{mín}$ [-]	0.409
Gravedad específica de los sólidos G_s [-]	2.75

Por otro lado, en la Tabla 3-4 muestra la comparación de los valores obtenidos para el índice de vacío máximo, mínimo y la gravedad específica con respecto a estudios previos realizados con el mismo material. Aquí, se observa que los valores obtenidos para todos los parámetros en el presente trabajo se acercan más a los obtenidos al estudio más cercano, es decir al de Muñoz (2017).

Tabla 3-4. Comparación de índice de vacío máximo, mínimo y gravedad específica con estudios previos

Autor	$\epsilon_{\text{máx}}$	$\epsilon_{\text{mín}}$	G_s
Asenjo (2010)	1.201	0.536	2.71
Corral (2008)	1.214	0.551	2.75
Muñoz (2017)	1.010	0.510	2.74
Este trabajo	1.056	0.409	2.75

3.1.2. Laponita

Según Ochoa – Cornejo (2015), la laponita es una arcilla sintética de tamaño nanométrico que se utiliza como modificador de la reología en distintas aplicaciones, como en cosméticos y pinturas. Corresponde a una arcilla 2:1 formada por una capa octaédrica de magnesio con una capa tetraédrica de sílice a ambos lados, teniendo una forma de sándwich (Figura 3-9 (a)). Una partícula de laponita posee una forma de disco de aproximadamente 25 nm de diámetro y un espesor igual a 1 nm (Figura 3-9 (b)). En la Figura 3-10 se muestra una imagen de la laponita obtenida por SEM.

En cuanto a sus propiedades, la laponita posee una gravedad específica de 2.57. Además, se ha obtenido que su índice de plasticidad (IP) alcanza un valor igual a 1100% (El Howayek, 2011), siendo más alto que varias arcillas naturales, como la bentonita (IP aproximadamente de 350%).

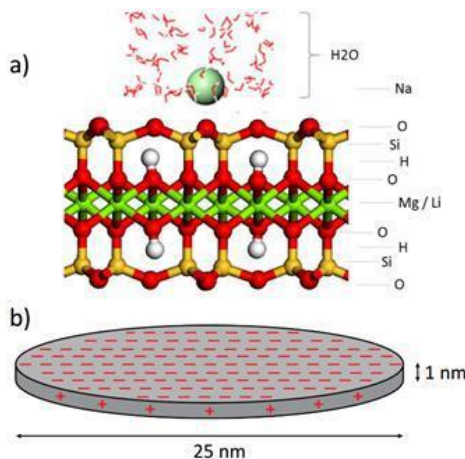


Figura 3-9. a) Estructura de laponita, b) Geometría de una partícula individual de laponita (Ochoa – Cornejo, 2015)

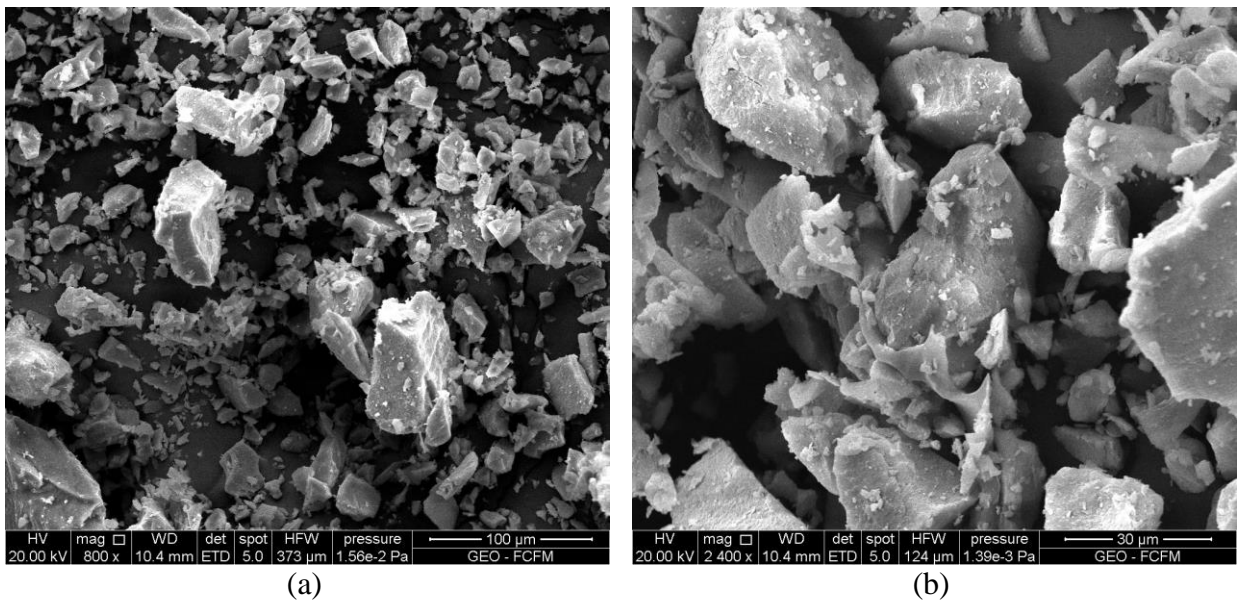


Figura 3-10. Imagen obtenida por SEM de la laponita (elaboración propia)

Por otro lado, se han realizados diversos estudios para determinar la reología de la laponita. Según Shen (2014), se ha determinado que la viscosidad, durante los primeros 30 minutos, la laponita se comporta como fluido newtoniano, puesto que el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte, lo cual se presenta en la Figura 3-11. Aquí se observa que se va perdiendo la proporcionalidad lineal entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte al ir aumentando el tiempo de envejecimiento.

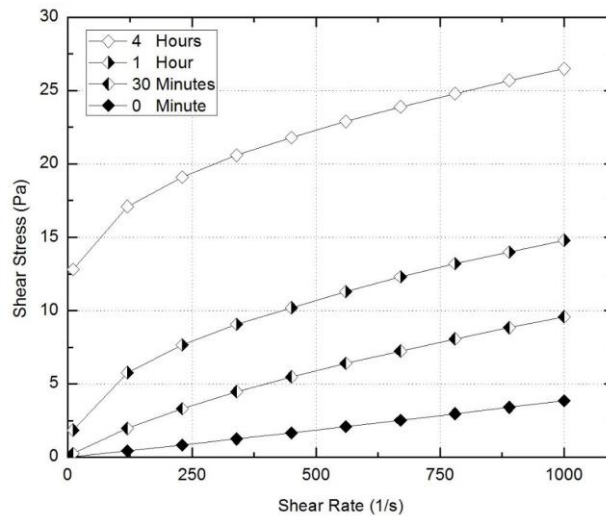


Figura 3-11. Típicas curvas para suspensiones de laponita RD en concentraciones de 3% en peso a distintas edades de envejecimiento (Shen, 2014)

Por otro lado, en la Figura 3-12 se observa el aumento de la viscosidad con el aumento de la edad de envejecimiento para distintas concentraciones. Este aumento comienza de forma abrupta a partir de los 20 minutos aproximadamente, para todas las concentraciones. Además, se tiene que, al aumentar la concentración de laponita, se obtienen viscosidades mayores.

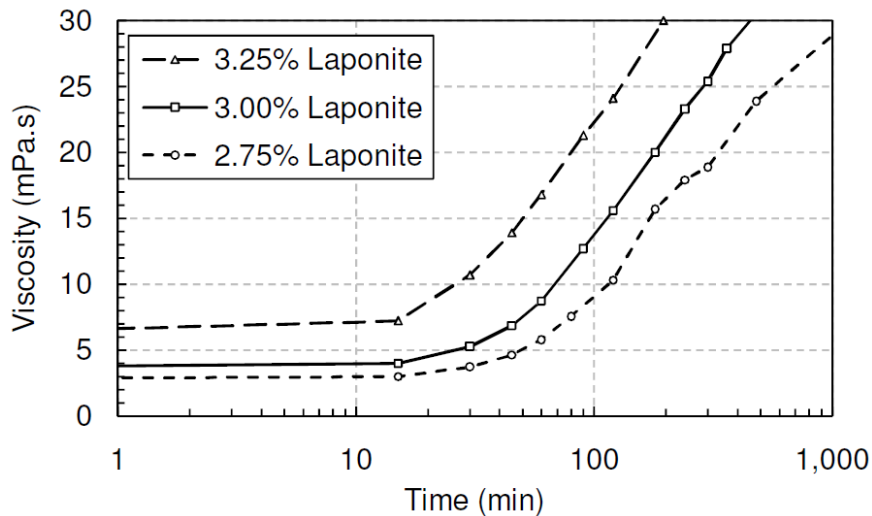


Figura 3-12. Viscosidad versus edad de envejecimiento para concentraciones de 2.75, 3 y 3.25% en peso de suspensiones de laponita (El Howayek, 2011). 1 mPa.s = 1 cPa

3.2. Equipos utilizados

Para el desarrollo del programa experimental se utilizaron varios equipos, los cuales se encuentran en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados (MECESUP) y en el Departamento de Geología, ambos. Estos se encuentran descrito a continuación.

3.2.1. Mastersizer 2000

El análisis granulométrico láser de la arena de relaves se realiza utilizando el equipo Mastersizer 2000 ubicado en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (ver Figura 3-13 (a)).

El equipo funciona pasando las partículas del material, que se encuentran suspendidas en un dispersante, entre dos cristales circulares (ver Figura 3-13 (b)). A través de estos cristales incide un láser previamente calibrado, y, dependiendo del tamaño y material de las partículas, además del tipo de dispersante utilizado, se produce un cambio en la trayectoria del láser producto de la difracción. Este cambio en la trayectoria se registra y mide mediante un arreglo de celdas fotosensibles ubicadas especialmente. Por medio de este mecanismo, el equipo entrega una frecuencia de distribución de tamaños con respecto al volumen total de la muestra (Maureira, 2012).

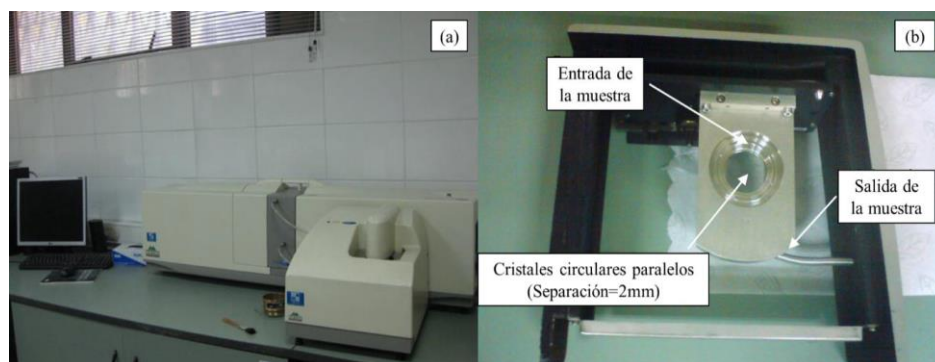


Figura 3-13. Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Masterzizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012)

3.2.2. SEM

Se emplea el microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscope, SEM*) (ver Figura 3-14), para observar la morfología de las partículas pertenecientes al material utilizado. El modelo del microscopio corresponde al FEI Quanta 20, el cual pertenece al Departamento de Geología de la Universidad de Chile y Centro de Excelencia de Geotermia de Los Andes (CEGA).

El funcionamiento consiste en hacer incidir en la muestra un haz de electrones, lo que provoca la aparición de diferentes señales. Estas señales son captadas con detectores adecuados, lo que proporciona información acerca de la naturaleza de la muestra. Existen varios detectores, pero para el presente trabajo se destaca el de electrones secundarios (SE), que proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. (Alvear, 2015). Para obtener una mejor resolución de las fotografías, las partículas se metalizan con carbono, para luego ser colocadas en una placa, tal como se muestra en la Figura 3-14.

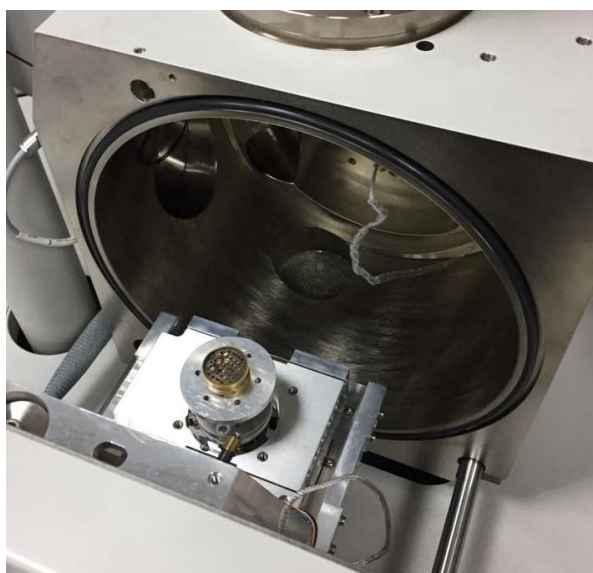


Figura 3-14. Microscopio SEM

3.2.3. Triaxial convencional

El equipo triaxial convencional permite la consolidación y aplicación de carga isotrópica y anisotrópica a la probeta que se ensayará. Consiste en un marco triaxial GDS Instrument que permite el movimiento de la base donde se apoya la cámara triaxial, y de un panel por el cual se pueden aplicar cargas de contrapresión y presión de cámara, además de medir la variación volumétrica dentro de la probeta mediante las buretas que posee. En este equipo es posible medir la carga del pistón, la presión de poros, la deformación axial y volumétrica. En la Figura 3-15 se puede observar el equipo.

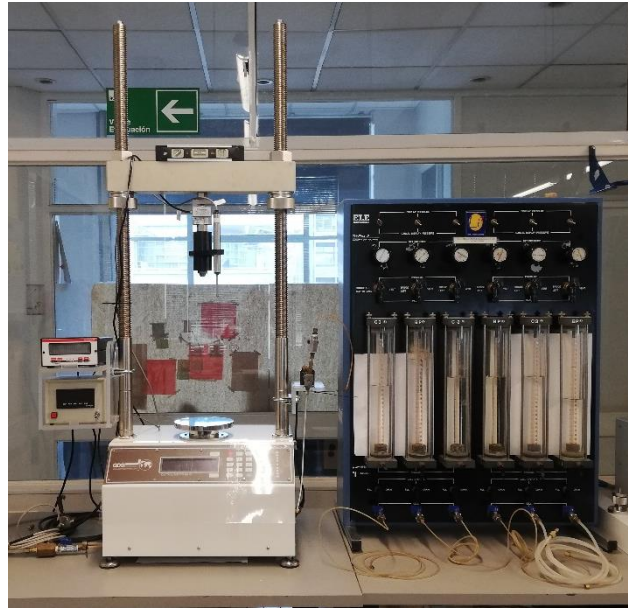


Figura 3-15. Equipo triaxial convencional

3.2.4. Marco triaxial cíclico

Para los ensayos triaxiales cíclicos se utiliza el mismo panel del triaxial convencional, pero el marco se reemplaza por el marco triaxial cíclico que se presenta en la Figura 3-16. Este marco permite la aplicación de cargas cíclicas mediante el movimiento del carro móvil que se encuentra en la palanca, la cual se conecta mediante un cable y polea al pistón de la cámara triaxial. La frecuencia de la carga cíclica depende del ejecutor del ensayo. En general, se utilizan frecuencias iguales a 1 ciclo por minuto o 3 ciclos por minuto. Además, permite la aplicación de cargas estáticas con los pesos que se encuentran bajo el marco.



Figura 3-16. Marco triaxial cíclico

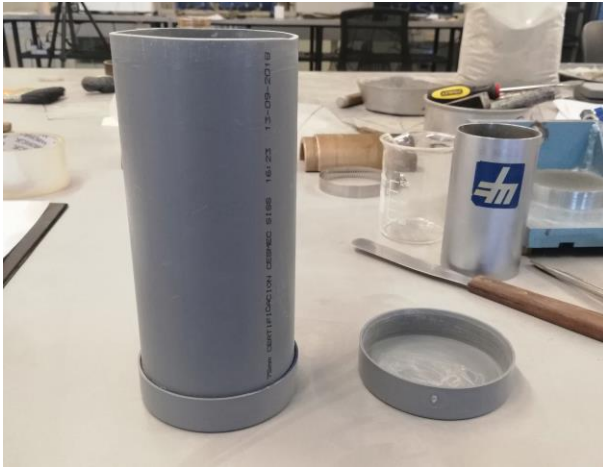
3.3. Metodología de ensayos

A continuación, se presenta la descripción de cada una de las etapas que se desarrollan para la preparación de las probetas que luego son ensayadas en los equipos anteriormente descritos. Cabe destacar que el procedimiento es prácticamente idéntico para las probetas sin tratamiento y con tratamiento.

3.3.1. Mezcla de materiales

Los ensayos se realizan con una mezcla de relave de El Torito y Laponita, siendo la masa de esta última en función de la masa de arena. Para este estudio se mezcla la arena de relave con un 1% de laponita.

La mezcla se realiza tomando 700 gramos de arena de relave, los cuales se dividen en dos. Se agrega 350 gr de material a un contenedor de PVC y de 16.7 cm y 7.1 cm de altura y diámetro, respectivamente (Figura 3-17). Luego, se agregan 7 gramos de Laponita. Finalmente, se agregan los restantes 350 gr de arena de relave, y se cierra herméticamente el contenedor. Luego, se agita manualmente el contenedor durante 20 minutos para homogeneizar la mezcla.



(a) (b)
Figura 3-17. Contenedor utilizado para mezclar materiales

3.3.2. Confección de probetas

Para la confección de las probetas se utiliza el método de compactación húmeda o “wet tamping”, el cual consiste en mezclar una masa conocida de material con agua para alcanzar un porcentaje de humedad. Se utiliza este método debido a la falta de equipo necesario para realizar otros métodos como “dry pluviation”. Para efectos de este trabajo se utiliza una humedad de confección del 5%. Luego, conociendo las dimensiones de la probeta, las cuales son 5 centímetros de diámetro y 10 centímetros de altura, se calcula el peso de material necesario para obtener la densidad deseada. Cabe destacar que la compactación se realiza en cinco capas de igual peso y de 2 centímetros cada una. Las capas se compactan dentro de un molde de bronce cilíndrico.

Las probetas tienen un geotextil y papel filtro en ambos extremos para evitar la pérdida de material durante la ejecución del ensayo. Además, se coloca una geomembrana para aislar la probeta en la cámara.

Luego de la confección de la probeta, esta se coloca dentro de la cámara triaxial para proceder con el llenado de esta con agua destilada. En el caso de los triaxiales convencionales, la cámara se llena completamente, mientras que para los triaxiales cíclicos se debe dejar un colchón de aire para permitir una correcta deformación de la probeta durante el ensayo.

3.3.3. Saturación de la probeta

El proceso de saturación consiste en circular dióxido de carbono (CO_2) por dentro de la probeta durante una media hora en el caso de las probetas sin tratamiento, y una hora en el caso de las probetas con tratamiento. De esta forma, el CO_2 desplaza y reemplaza al aire contenido dentro de la probeta. Finalizado este proceso, se procede a saturar la muestra utilizando agua des-aireada y destilada mediante un flujo a partir de un gradiente hidráulico gravitacional igual a 1 metro aproximadamente. El agua desplaza al CO_2 contenido, llenando los espacios intersticiales entre las partículas. Este proceso termina una vez que haya circulado un volumen de agua mayor al volumen de vacíos de la probeta, siendo aproximadamente igual a 250 mililitros. Luego, se procede a verificar si la probeta se satura correctamente calculando el parámetro B:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (5)$$

Donde Δu corresponde al incremento de la presión de poros debido al incremento en la presión de confinamiento, $\Delta \sigma_3$.

3.3.4. Consolidación de la probeta

En la etapa de consolidación se lleva la probeta al estado tensional que se desea estudiar. Esto se puede lograr de dos formas: isotrópicamente y anisotrópicamente. El presente estudio realizó las consolidaciones isotrópicamente, garantizando que las tensiones principales fueran iguales a lo largo del proceso de disipación del exceso de presión de poros, cambio volumétrico, y previniendo la existencia de corte. Las muestras de arena de relave se consolidaron por 1 hora, mientras que las arenas de relave tratadas con laponita se deja consolidar por un total de 72 horas, con el fin de alcanzar un estado de mayor viscosidad en la laponita.

3.3.5. Evaluación índice de vacíos final (Método de Verdugo)

El índice de vacíos al final del ensayo se determina mediante la metodología propuesta por Verdugo e Ishihara (1996), que mide el volumen de agua contenida dentro de la probeta. El procedimiento es el siguiente:

- Finalizado el ensayo, se cierran las válvulas de drenaje de la celda triaxial para que la probeta quede en condición no drenada.
- Se reduce la contrapresión. Esto se realiza para evitar posibles errores producidos por la expansión o contracción de las mangueras que van de la probeta a la bureta que mide la variación volumétrica.
- Se baja el nivel de la bureta lo más bajo posible, registrando este volumen como V_i .
- Se abre la válvula de drenaje de la base del triaxial.
- Se aumenta la presión de confinamiento al máximo valor admisible.
- Se aplica una carga cíclica a la probeta en condición drenada. Con lo anterior, en cada ciclo de carga y descarga se producirán variaciones de volumen. Una vez que se establezca dicha variación, se cierran las válvulas de drenaje y se registra el volumen de la bureta como V_f .
- Se disminuye la presión de confinamiento y se desmonta la celda.
- Luego, se desmonta la probeta y se saca cuidadosamente la membrana para depositarla en un recipiente limpio y seco. Se extrae con cuidado el material que pudo haber quedado adherido en la membrana y en los cabezales de la celda. En este paso es posible obtener pérdidas de material no mayores a un 2%.
- Se pesa el recipiente con el material recolectado en una balanza, y se registra su valor como W_m .
- Luego, se lleva el recipiente al horno hasta que el material se encuentre completamente seco. Alcanzado este punto, se pesa el recipiente con el material seco, y se registra su peso como W_d .
- Finalmente, el índice de vacíos de la probeta se determina mediante la siguiente expresión:

$$e = \frac{(V_i - V_f) \cdot \gamma_w + (W_m - W_d)}{W_d} \cdot G_s \quad (6)$$

A modo de resumen, en la Figura 3-18 se presenta un diagrama de flujo de los pasos detallados anteriormente.

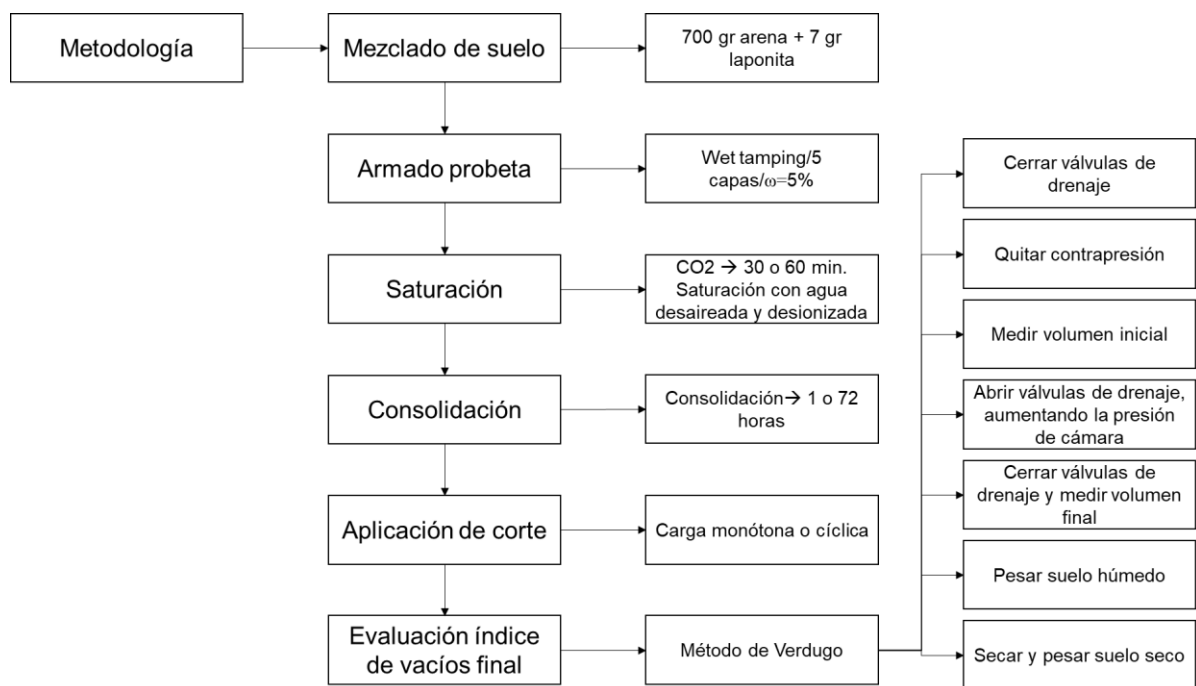


Figura 3-18. Diagrama de flujo de metodología

3.4. Ensayos triaxiales

Durante el estudio, se realizan 7 ensayos triaxiales monótonos y 18 cíclicos, ambos bajo condiciones no drenadas CIU. De los ensayos monótonos, 4 corresponden a ensayos sin tratamiento y 3 con tratamiento. En el caso de los cíclicos, 8 son sin tratamiento y 10 con tratamiento. Las especificaciones de los ensayos monótonos en ambos casos se presentan de la Tabla 3-5 y Tabla 3-6. Acá se observa que se trabaja con densidades relativas bajas y relativamente constantes, cercanas a un 40%. Esto se debe a que a densidades bajas material resulta alcanzar la licuación en un menor número de ciclos.

Tabla 3-5. Especificaciones ensayos monótonos CIU sin tratamiento

Nombre	Humedad de Confección [%]	Confinamiento Efectivo [kgf/cm ²]	Tiempo de Consolidación [hrs]	Índice de Vacíos post Consolidación [-]	Densidad Relativa [%]
MST1	5	0.5	0.5 a 1	0.805	38
MST2	5	1	0.5 a 1	0.834	34
MST3	5	2	0.5 a 1	0.795	40
MST4	5	3	0.5 a 1	0.798	40

Tabla 3-6. Especificaciones ensayos monótonos CIU con tratamiento

Nombre	Humedad de Confección [%]	Confinamiento Efectivo [kgf/cm ²]	Tiempo de Consolidación [hrs]	Índice de Vacíos post Consolidación [-]	Densidad Relativa [%]
MCT1	5	1	72	0.823	36
MCT2	5	1	72	0.828	35
MCT3	5	2	72	0.819	37

En la Tabla 3-7 y Tabla 3-8 se presentan las especificaciones de los ensayos cíclicos. El valor de la razón de sollicitación cíclica corresponde al calculado mediante la Ecuación (7). Las densidades relativas de las probetas se escogen bajo el mismo criterio utilizado en los ensayos triaxiales monótonos.

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_0} \quad (7)$$

Tabla 3-7. Especificaciones ensayos cíclicos CIU sin tratamiento

Nombre	Humedad de confección [%]	Confinamiento efectivo inicial [kgf/cm ²]	Tiempo de consolidación [hrs]	Índice de vacíos post consolidación [-]	Densidad Relativa [%]	CSR [-]	Frecuencia [ciclos por minuto]
CST1	5	1	0.5 a 1	0.790	41	0.189	3
CST2	5	1	0.5 a 1	0.820	36	0.207	3
CST3	5	1	0.5 a 1	0.813	38	0.237	3
CST4	5	1	0.5 a 1	0.799	40	0.255	3
CST5	5	2	0.5 a 1	0.776	43	0.167	3
CST6	5	2	0.5 a 1	0.807	38	0.214	3
CST7	5	3	0.5 a 1	0.762	45	0.187	3
CST8	5	3	0.5 a 1	0.788	41	0.192	3

Tabla 3-8. Especificaciones ensayos cíclicos CIU con tratamiento

Nombre	Humedad de confección [%]	Confinamiento efectivo inicial [kgf/cm ²]	Tiempo de consolidación [hrs]	Índice de vacíos post consolidación [-]	Densidad Relativa [%]	CSR [-]	Frecuencia [ciclos por minuto]
CCT1	5	1	72	0.772	44	0.243	3
CCT2	5	1	72	0.831	35	0.248	3
CCT3	5	1	72	0.805	39	0.294	3
CCT4	5	2	72	0.807	37	0.171	3
CCT5	5	2	72	0.816	38	0.181	3
CCT6	5	2	72	0.812	38	0.184	3
CCT7	5	2	72	0.807	38	0.212	3
CCT8	5	3	72	0.794	40	0.181	3
CCT9	5	3	72	0.790	41	0.193	3
CCT10	5	3	72	0.786	42	0.218	3

Por último, se utilizaron los ensayos triaxiales cíclicos no drenados isotrópicos realizados por Muñoz (2017) para completar este estudio. La principal información de los ensayos se muestra en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Especificaciones ensayos triaxiales cíclicos CIU realizados por Muñoz (2017)

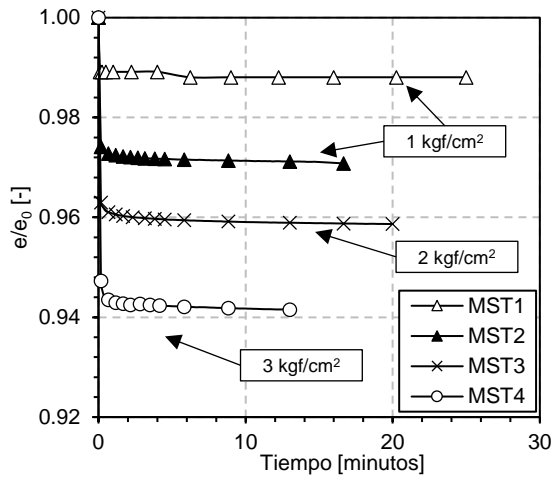
Nombre	Humedad de confección [%]	Confinamiento efectivo inicial [kgf/cm ²]	Tiempo de consolidación [hrs]	Índice de vacíos post consolidación [-]	Densidad Relativa [%]	CSR [-]	Frecuencia [ciclos por minuto]
M1	5	1	Sin Información	0.795	40	0.250	3
M2	5	1	Sin Información	0.800	40	0.230	3
M3	5	1	Sin Información	0.795	40	0.200	3
M4	5	2	Sin Información	0.800	40	0.200	3
M5	5	2	Sin Información	0.800	40	0.210	3
M6	5	2	Sin Información	0.790	40	0.160	3
M7	5	3	Sin Información	0.800	40	0.220	3
M8	5	3	Sin Información	0.790	40	0.160	3
M9	5	3	Sin Información	0.795	40	0.190	3

4. RESULTADOS RELAVE EL TORITO SIN TRATAMIENTO

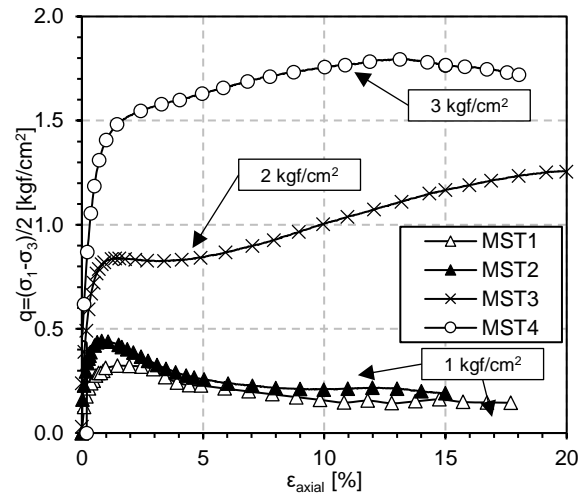
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los triaxiales monótonos y cíclicos no drenados en el caso de la arena de relaves sin tratamiento.

4.1. Triaxiales monótonos no drenados

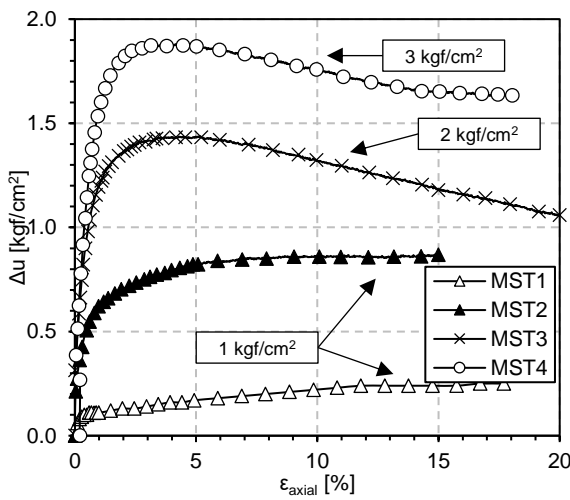
Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4-1. De la Figura 4-1 (e), se obtiene que los parámetros de resistencia al corte son los de la Tabla 4-1. Por otro lado, el parámetro λ se obtiene de la Figura 4-1 (f), y se presenta en la Tabla 4-1.



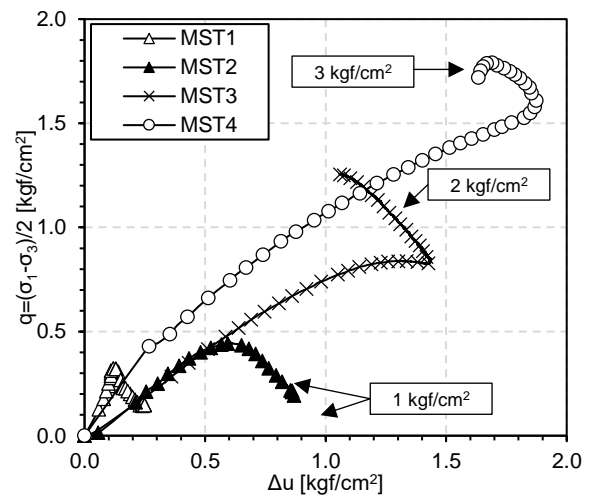
(a)



(b)



(c)



(d)

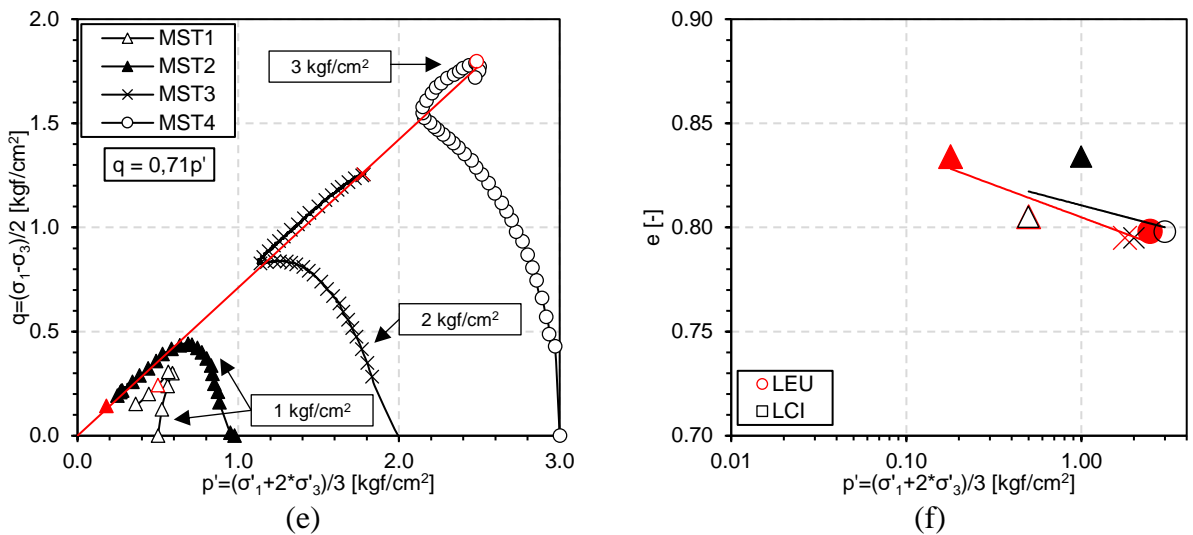


Figura 4-1. Resultados triaxiales monótonos. (a) Consolidación en el tiempo normalizada por el índice de vacíos inicial, (b) Curvas tensión deformación de los ensayos monótonos sin tratamiento, (c) Exceso de presión de poros Δu y deformación axial ε_{axial} de ensayos monótonos sin tratamiento, (d) desviador de esfuerzos q versus exceso de presión de poros Δu , (e) Trayectorias de tensiones y línea de estado último de los ensayos monótonos sin tratamiento, (f) Línea de Estado Último en el espacio $e - p'$ para ensayos sin tratamiento

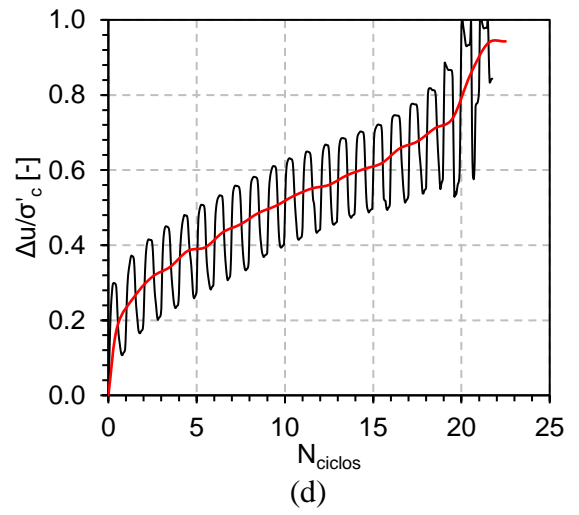
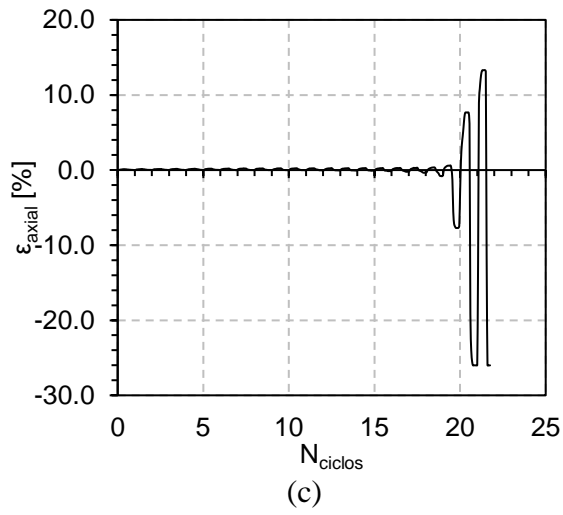
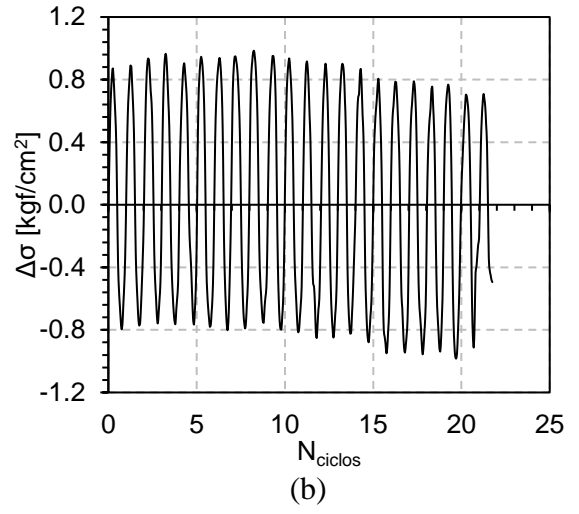
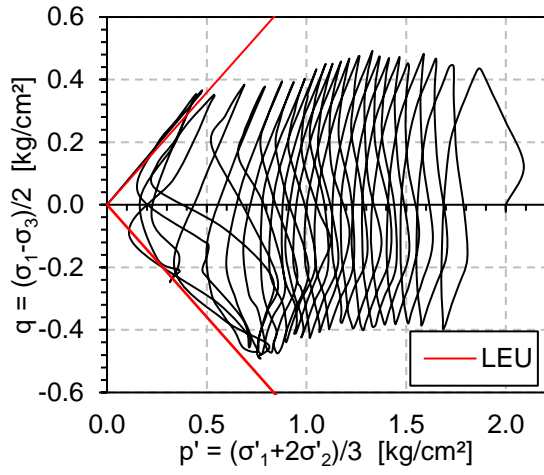
Tabla 4-1. Parámetros de resistencia al corte del relave El Torito sin tratamiento

Ángulo de fricción interna ϕ [°]	35
Cohesión c [kgf/cm²]	0
Parámetro λ [-]	-0.014

4.2. Triaxiales cíclicos no drenados

De los ensayos triaxiales se pueden medir diversas variables. Sin embargo, las más importantes resultan ser la deformación axial, el desviador de tensiones vertical y la presión de poros. En la Figura 4-2 se muestran ejemplos de los principales resultados de los ensayos triaxiales cíclicos no drenados, para el ensayo CST4.

En la Figura 4-2 (a) se muestra la trayectoria de esfuerzos. En la Figura 4-2 (b) el desviador de esfuerzos ($\Delta\sigma$) en función del número de ciclos (N). En la Figura 4-2 (c) se muestra el porcentaje de deformación axial unitaria (ε_{axial}) en función del número de ciclos. En la Figura 4-2 (d) se observa la variación de presión de poros normalizada por el confinamiento inicial ($\Delta u/\sigma'_c$) en función del número de ciclos. En la Figura 4-2 (e) el módulo de corte secante (G_{sec}) en función de la deformación angular (γ). En la Figura 4-2 (f) se muestra el desviador de esfuerzos (q) en función de la deformación angular. Los gráficos anteriormente mencionados de todos los ensayos se muestran en el Capítulo 9, de anexos.



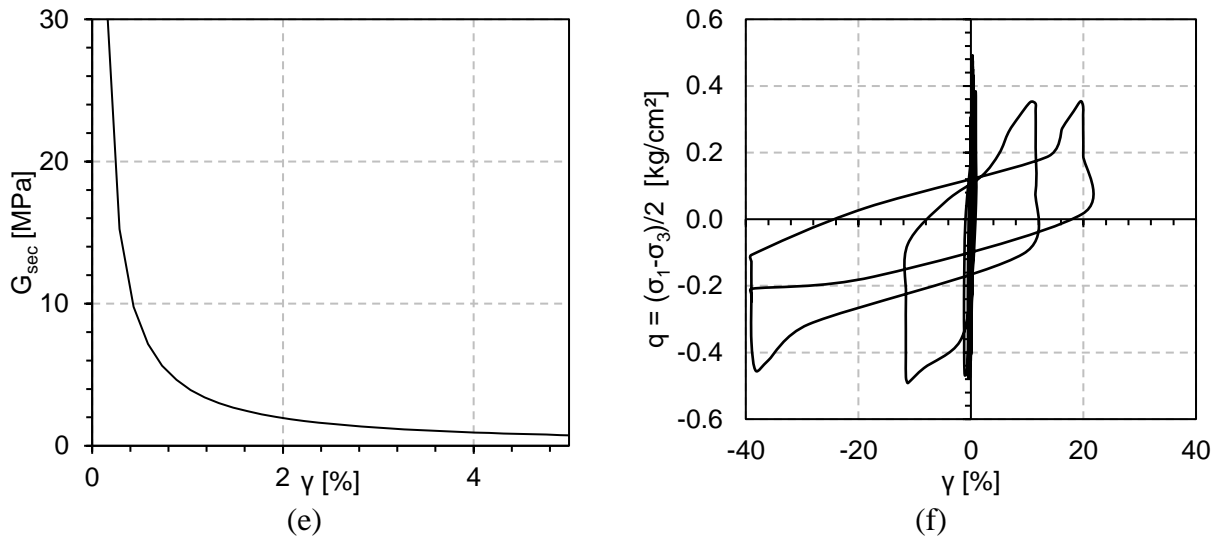


Figura 4-2. (a) Variación del esfuerzo desviador en función la presión media efectiva, (b) desviador de esfuerzos en función del número de ciclos, (c) porcentaje de deformación axial unitaria en función del número de ciclos, (d) variación de presión de poros normalizada por el confinamiento inicial efectivo en función del número de ciclos, en rojo se muestra la variación de presión de poros normalizada promedio, (e) módulo de corte secante en función del porcentaje de deformación angular unitaria, (f) Variación del desviador de esfuerzos en función de la deformación angular

Para el cálculo gráfico mostrado en la Figura 4-2 (f) se obtiene el máximo valor del desviador de esfuerzos por cada ciclo ($q_{m\acute{a}x}$) y la deformación angular asociada a dicho valor. Luego, se obtiene el módulo de corte secante mediante la siguiente fórmula:

$$G = \frac{q_{m\acute{a}x}}{\gamma} \quad (8)$$

Como se menciona anteriormente, para las curvas CSR – N_{ciclos} se utilizan los ensayos de la Tabla 3-7 y Tabla 3-9. Los valores del número de ciclos para cada sollicitación se muestran en la Tabla 4-2. Cabe destacar que se analizan tres criterios de licuación, los cuales son:

- (1) 100% de exceso de presión de poros ($\Delta u/\sigma'_c = 1$)
- (2) 5% de deformación axial en doble amplitud
- (3) 10% de deformación axial en doble amplitud

A continuación, se presentan los gráficos obtenidos de CSR – N_{ciclos} para cada uno de los criterios mencionados.

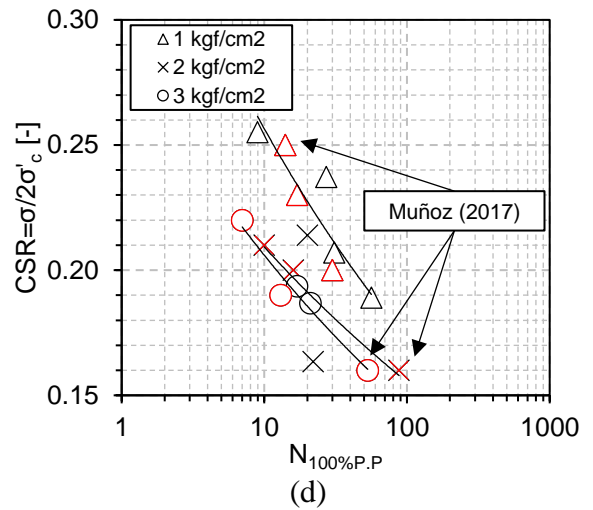
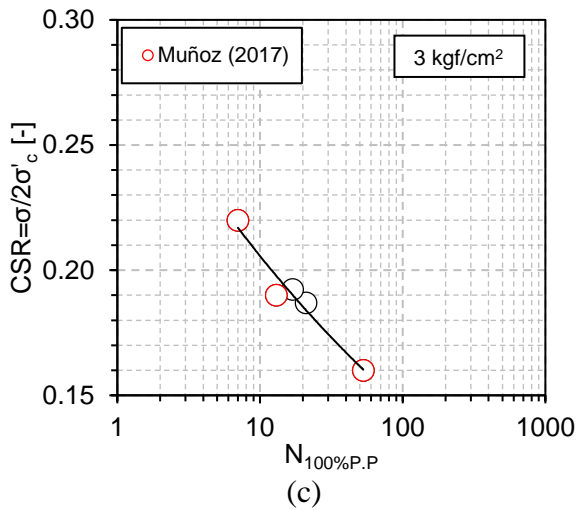
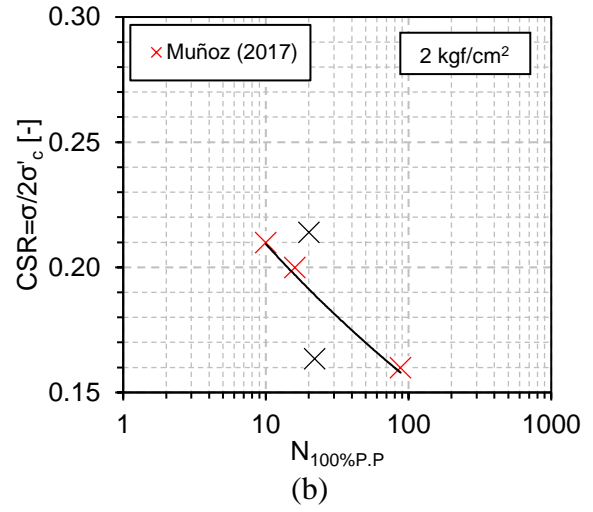
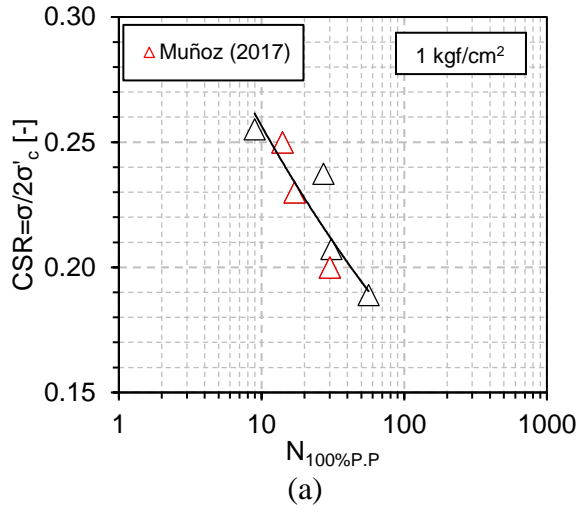


Figura 4-3. Gráfico CSR - $N_{100\%P.P}$ (100% de exceso de presión de poros) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

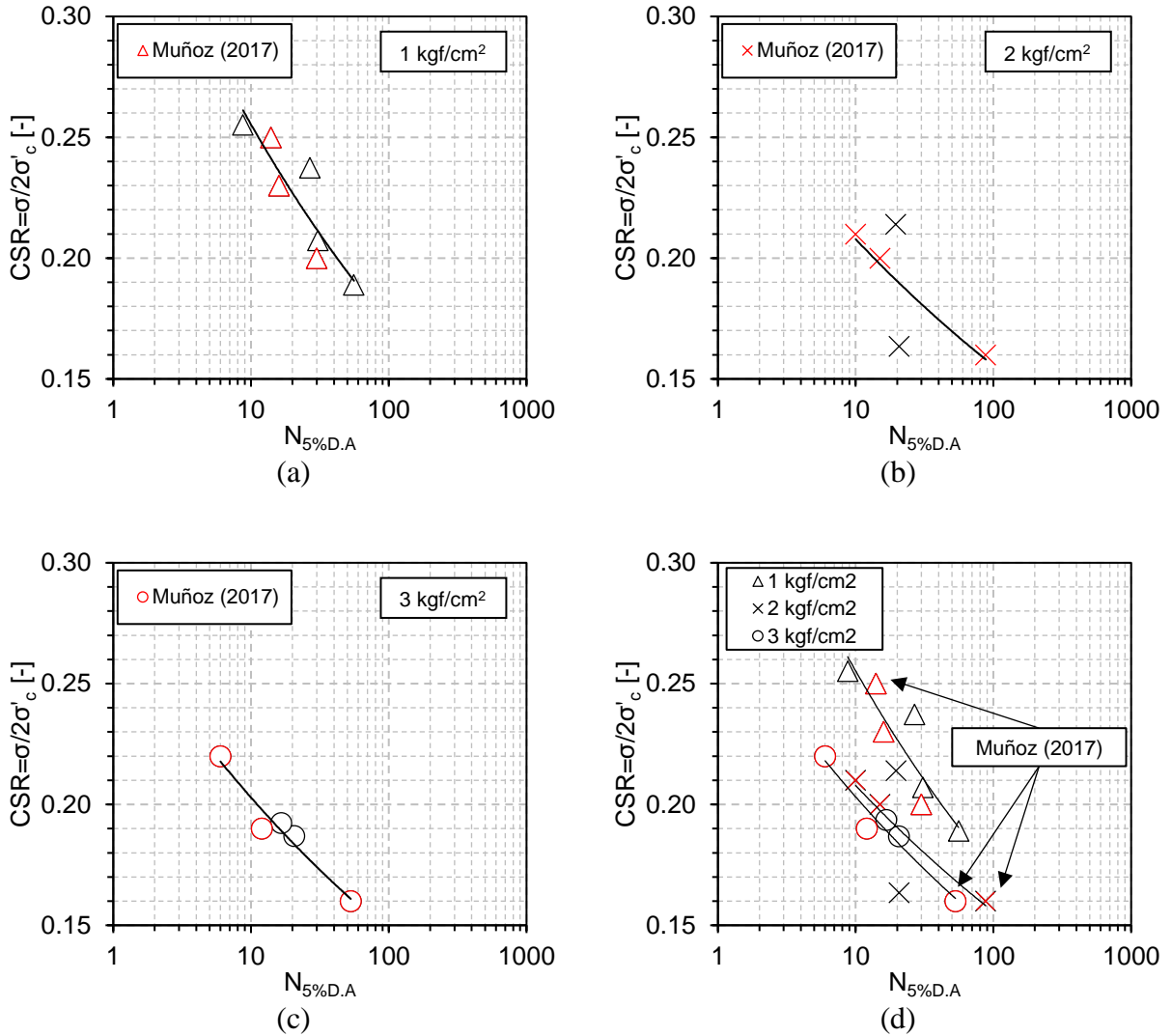


Figura 4-4. Gráfico CSR - $N_{5\%D.A}$ (5% de deformación axial en doble amplitud) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

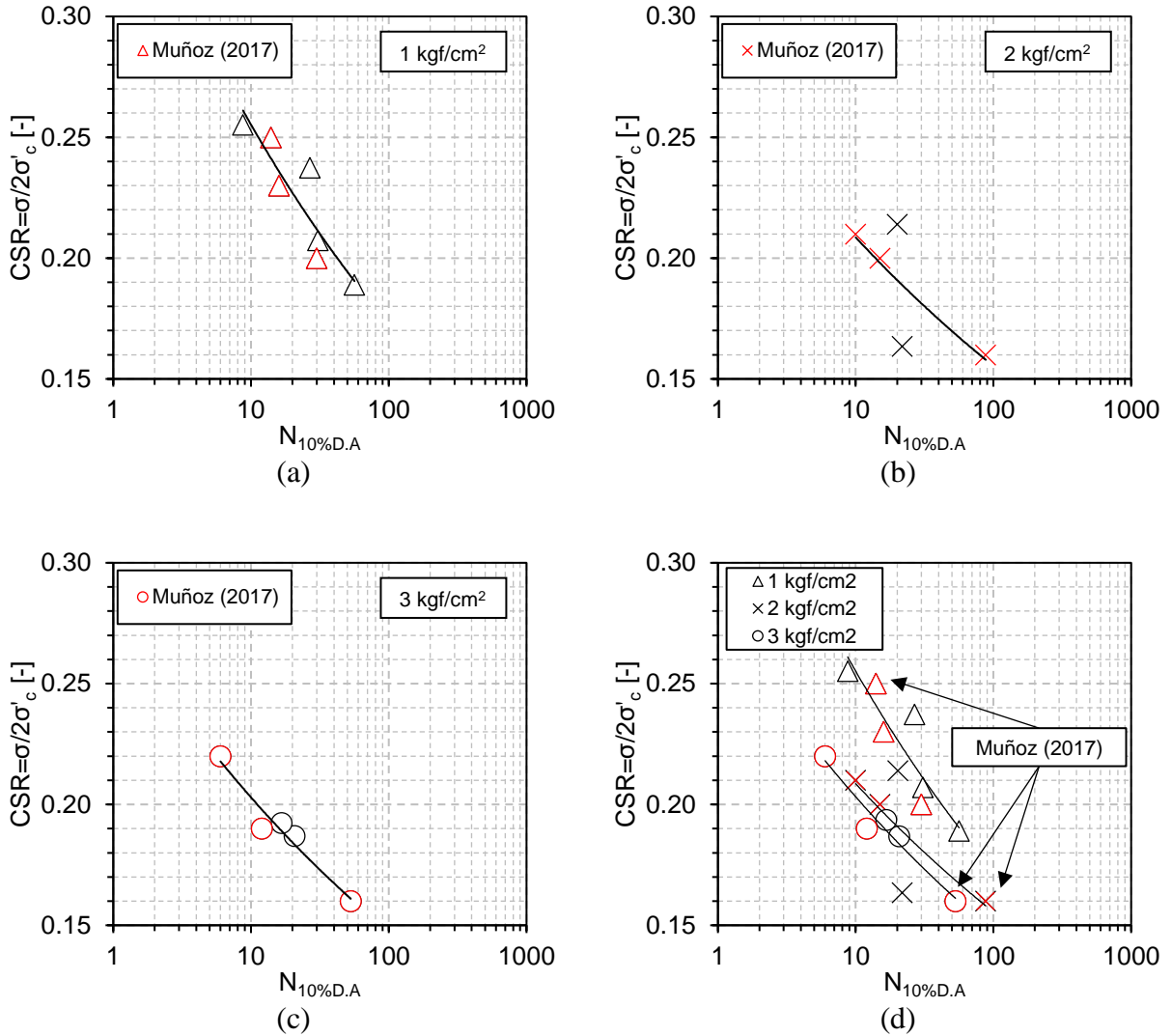


Figura 4-5. Gráfico CSR – $N_{10\%D.A}$ (10% de deformación axial en doble amplitud) sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

Tabla 4-2. Valores de CSR y N para los tres criterios de falla para ensayos triaxiales cíclicos sin tratamiento

Nombre	CSR [-]	N _{100%P.P}	N _{5%D.A}	N _{10%D.A}
CST1	0.189	56	56	56
CST2	0.207	31	31	31
CST3	0.237	27	27	27
CST4	0.255	9	9	9
CST5	0.167	22	21	22
CST6	0.214	20	20	20
CST7	0.187	21	21	21
CST8	0.192	17	17	17

Con las curvas CSR – N_{ciclos} es posible determinar el factor k_{σ} , el cual se obtiene normalizando las curvas obtenidas para la razón de resistencia cíclica a los 20 ciclos (CSR₂₀) a distintos confinamientos por el valor de CSR₂₀ a un confinamiento de 1 kgf/cm². Siguiendo el procedimiento realizado por Muñoz (2017), primero se busca la razón de resistencia cíclica necesaria para alcanzar una deformación de 5% en doble amplitud para 20 ciclos. Estos resultados se presentan en la Figura 4-6.

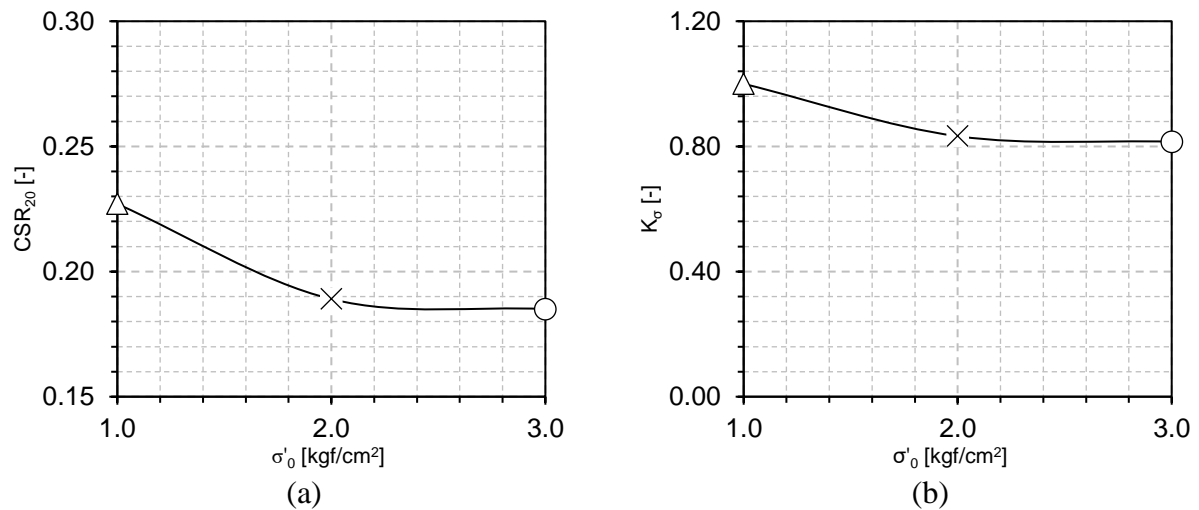


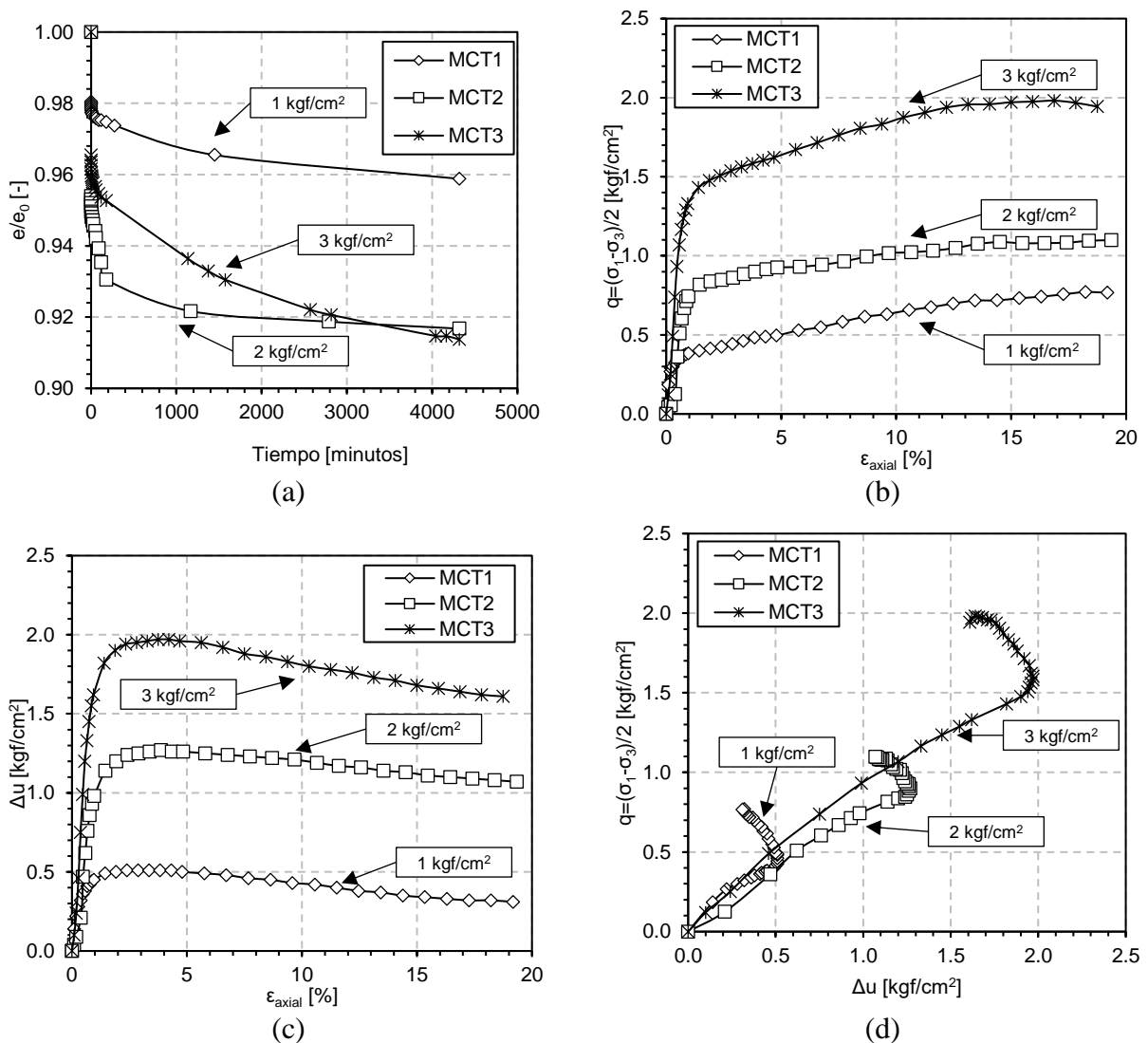
Figura 4-6. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en 20 ciclos el 5% de deformación axial en doble amplitud versus la presión media efectiva, sin tratamiento. (b) Factor de corrección por confinamiento según criterio de 5% de deformación axial en doble amplitud en 20 ciclos, sin tratamiento

5. RESULTADOS RELAVE EL TORITO CON TRATAMIENTO

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de triaxiales no drenados, tanto monótonos como cíclicos, de la arena de relave El Torito mezclados con un contenido de laponita igual al 1% con respecto a la masa seca de la arena.

5.1. Triaxiales monótonos no drenados

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5-1. De la Figura 5-1 (e), se obtiene que los parámetros de resistencia al corte son los de la Tabla 5-1. Por otro lado, el parámetro λ se obtiene de la Figura 5-1 (f), y se presenta en la Tabla 5-1.



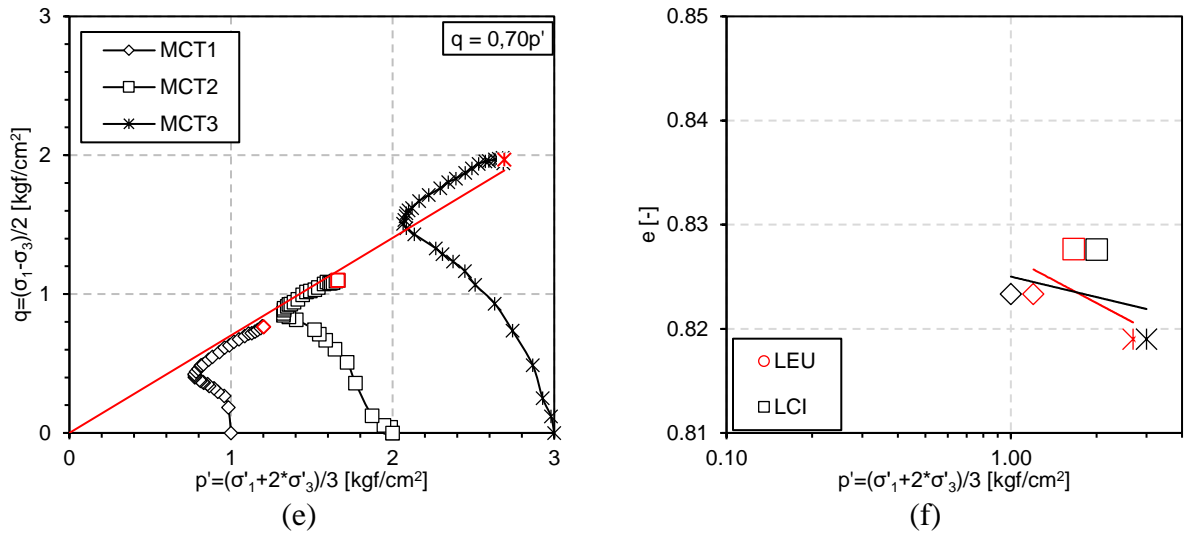


Figura 5-1. Resultados triaxiales monótonos. (a) Consolidación en el tiempo normalizada por el índice de vacíos inicial, (b) Curvas tensión deformación de los ensayos monótonos sin tratamiento, (c) Exceso de presión de poros Δu y deformación axial ε_{axial} de ensayos monótonos sin tratamiento, (d) desviador de esfuerzos q versus exceso de presión de poros Δu , (e) Trayectorias de tensiones y línea de estado último de los ensayos monótonos con tratamiento, (f) Línea de Estado Último en el espacio $e - p'$ para ensayos con tratamiento

Tabla 5-1. Parámetros de resistencia relave El Torito con tratamiento

Ángulo de fricción interna ϕ [°]	35
Cohesión c [kgf/cm²]	0
Parámetro λ	-0.006

5.2. Triaxiales cíclicos no drenados

Tal como se menciona en la Sección 4.2, de estos ensayos se pueden medir diversas variables, realizando varios gráficos con la información entregada. Estos gráficos son similares a los mostrados en la Figura 4-2. En el caso de los ensayos con tratamiento, se agregan los gráficos de todos los ensayos en el Capítulo 9, de anexos. A continuación, se presentan los gráficos de CSR – N_{ciclos} para los tres criterios mencionados en la Sección 4.2. Además, los valores de CSR y N para los distintos criterios de falla se muestran en la Tabla 5-2.

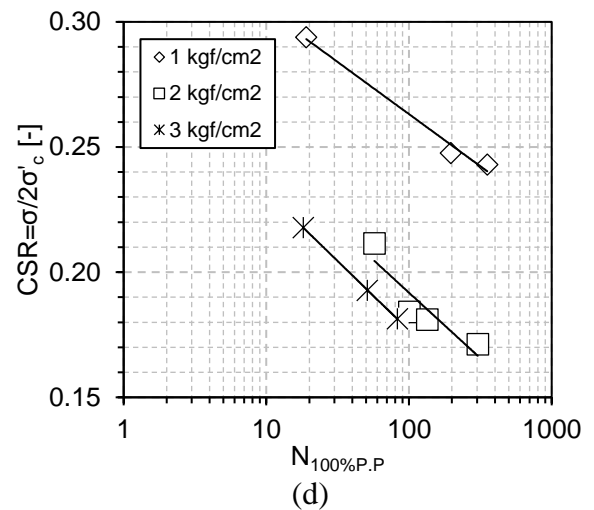
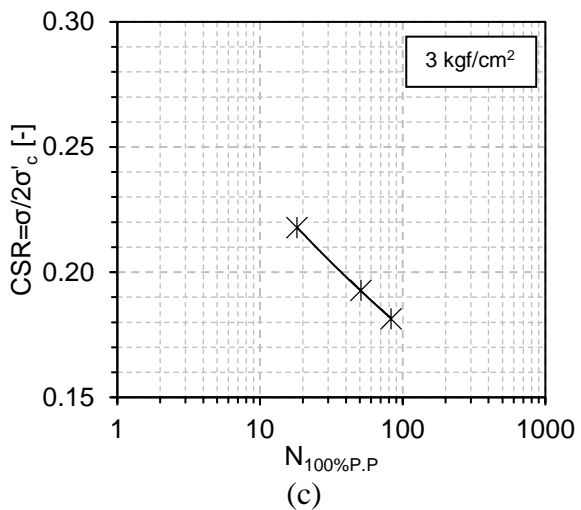
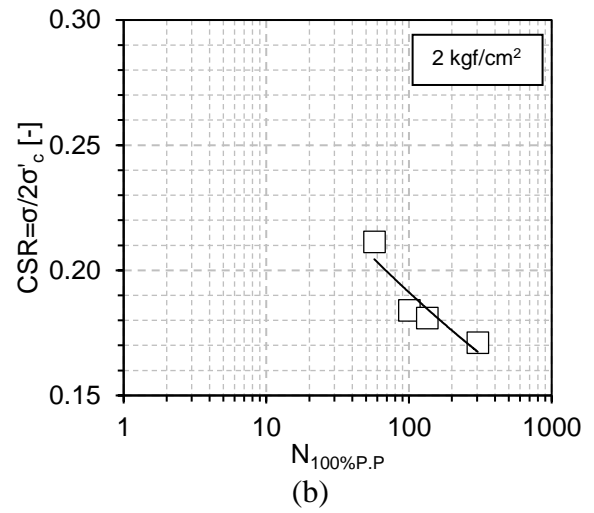
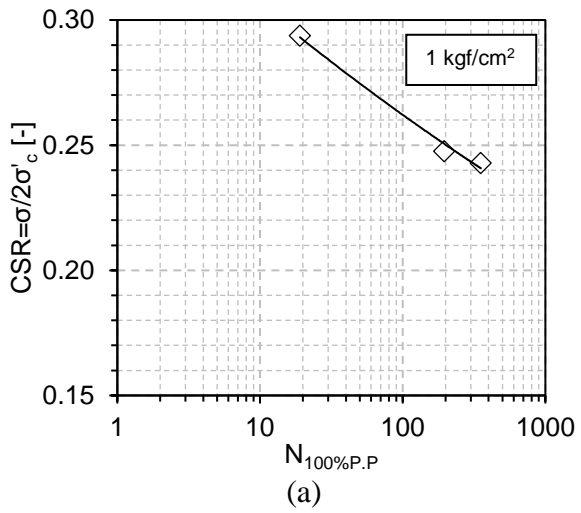


Figura 5-2. Gráfico CSR - $N_{100\%P.P}$ (100% de exceso de presión de poros) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

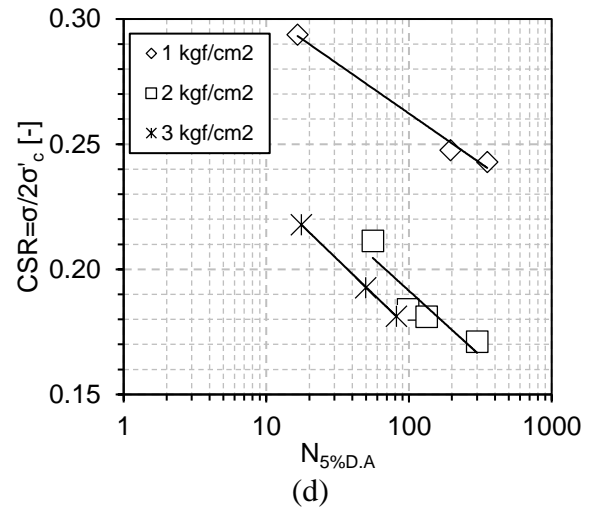
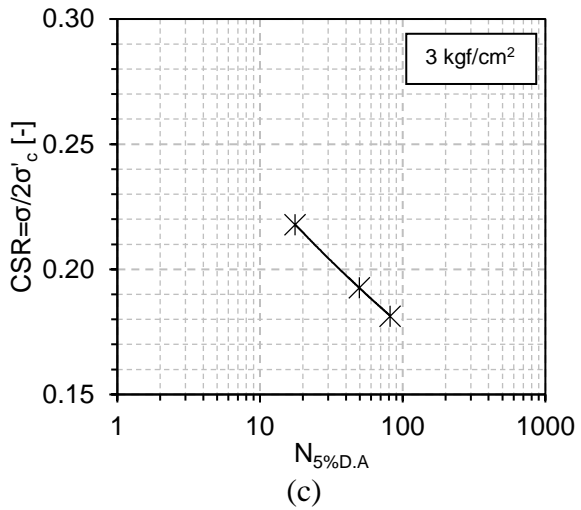
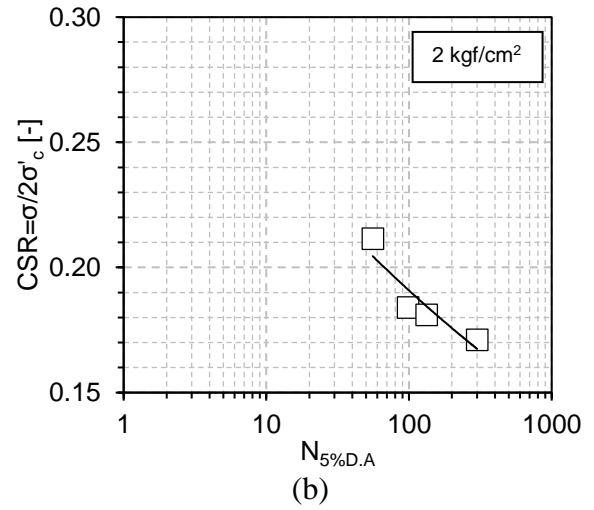
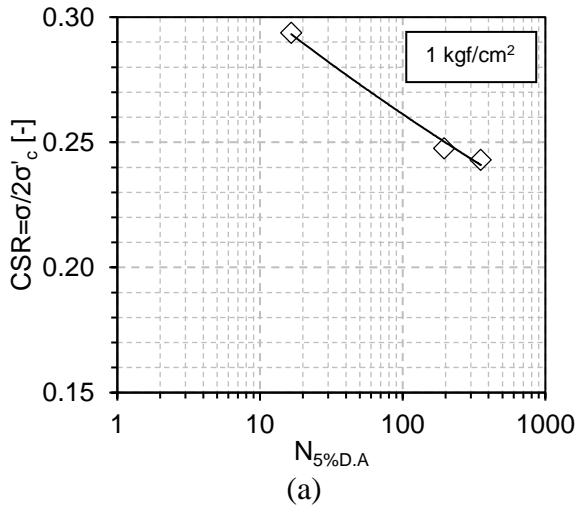


Figura 5-3. Gráfico CSR - $N_{5\%D.A}$ (5% de deformación axial en doble amplitud) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

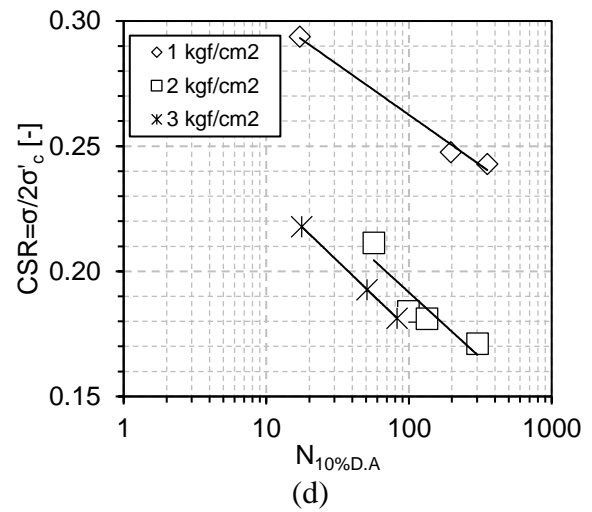
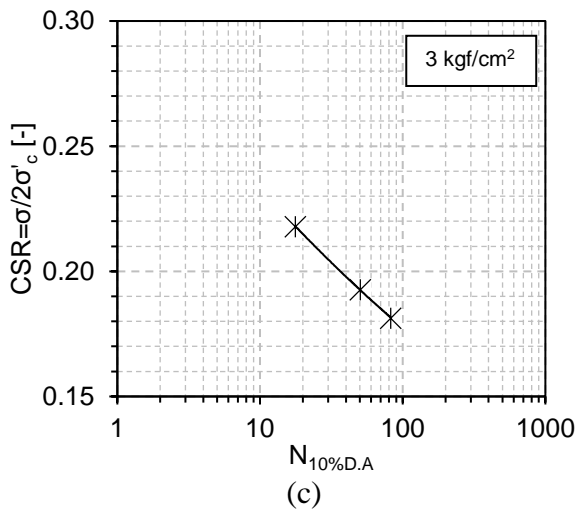
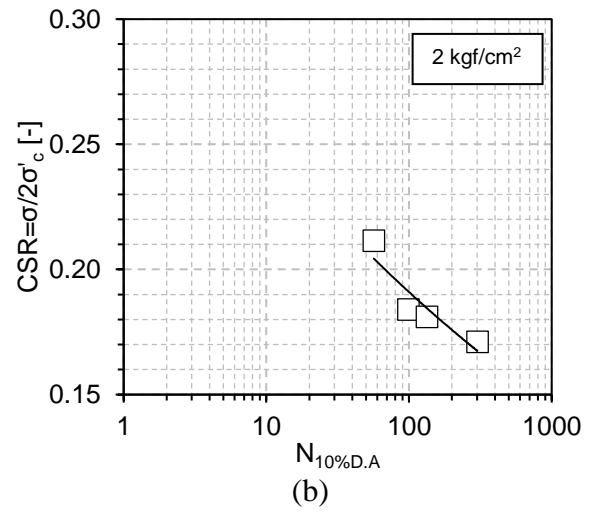
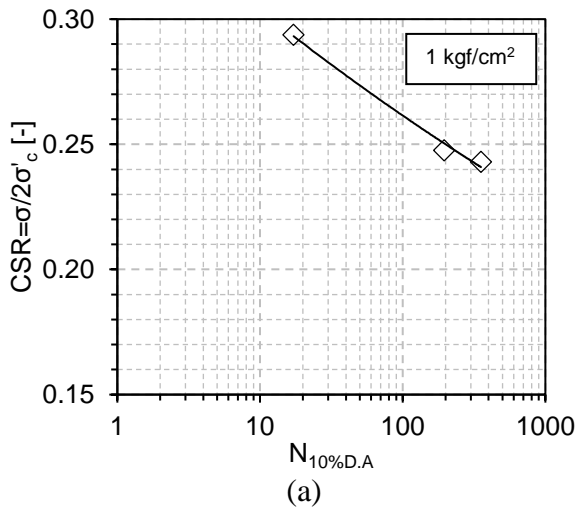


Figura 5-4. Gráfico CSR - $N_{10\%D.A}$ (0% de deformación axial en doble amplitud) con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) tres confinamientos juntos

Tabla 5-2. Valores de CSR y N para los tres criterios de falla para ensayos triaxiales cíclicos con tratamiento

Nombre	CSR [-]	N _{100%P.P}	N _{5%D.A}	N _{10%D.A}
CCT1	0.243	353	353	354
CCT2	0.248	196	196	196
CCT3	0.294	19	17	17
CCT4	0.171	303	300	301
CCT5	0.181	134	133	133
CCT6	0.184	100	98	99
CCT7	0.212	57	56	57
CCT8	0.181	83	82	83
CCT9	0.193	51	50	51
CCT10	0.218	18	18	18

Para el caso de la arena con tratamiento, se realiza el mismo procedimiento explicado en la Sección 4.2. Los resultados para CSR₂₀ se presentan en la Figura 5-5 (a), mientras que el factor de corrección k_σ se muestra en la Figura 5-5 (b).

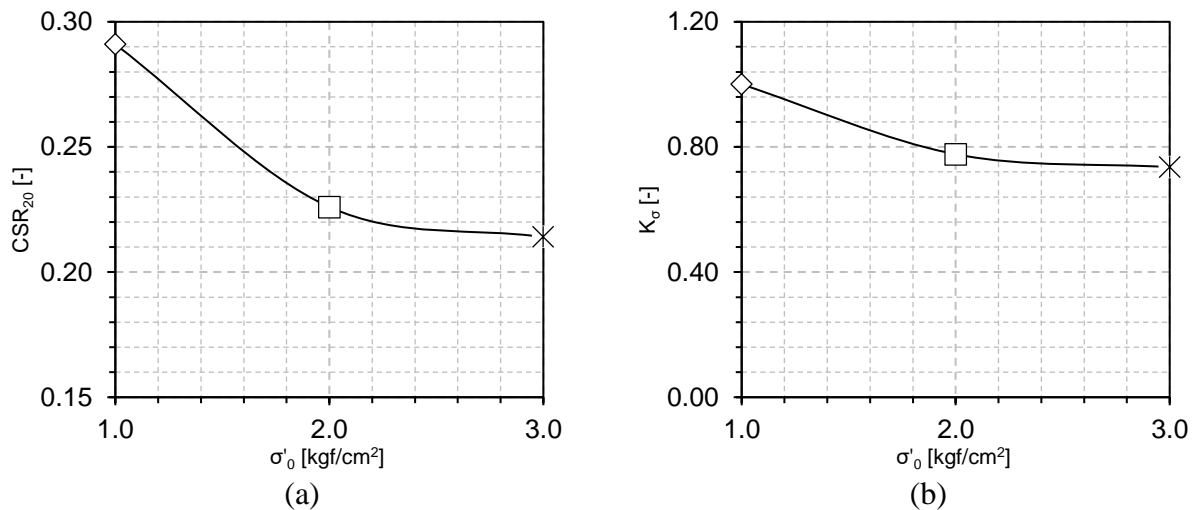


Figura 5-5. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en 20 ciclos el 5% de deformación axial en doble amplitud versus la presión media efectiva, con tratamiento. (b) Factor de corrección por confinamiento según criterio de 5% de deformación axial en doble amplitud en 20 ciclos, con tratamiento

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

Este capítulo presenta un análisis y discusión de los resultados presentados en el Capítulo 4 y Capítulo 5 con respecto a la granulometría de los materiales, el comportamiento monótono y cíclico de la arena de relave con o sin tratamiento, y mejoramiento, comparando con arenas de relaves sin tratamiento y utilizando otros métodos de tratamientos.

6.1. Granulometría de los materiales

Como se mencionó en la Sección 2.5, se han realizado varios estudios sobre el mejoramiento de arenas, por lo que es importante contextualizar las características de la arena de relave de El Torito en comparación con otras arenas estudiadas. En la Figura 6-1 se presentan las granulometrías de las arenas analizadas en los estudios mencionados en la Sección 2.5. Con líneas de color rojo punteada se señalan los límites de suelos con mayor potencial de licuación mientras que en color rojo los límites de suelos potencialmente licuables (Díaz – Rodríguez et al., 2008).

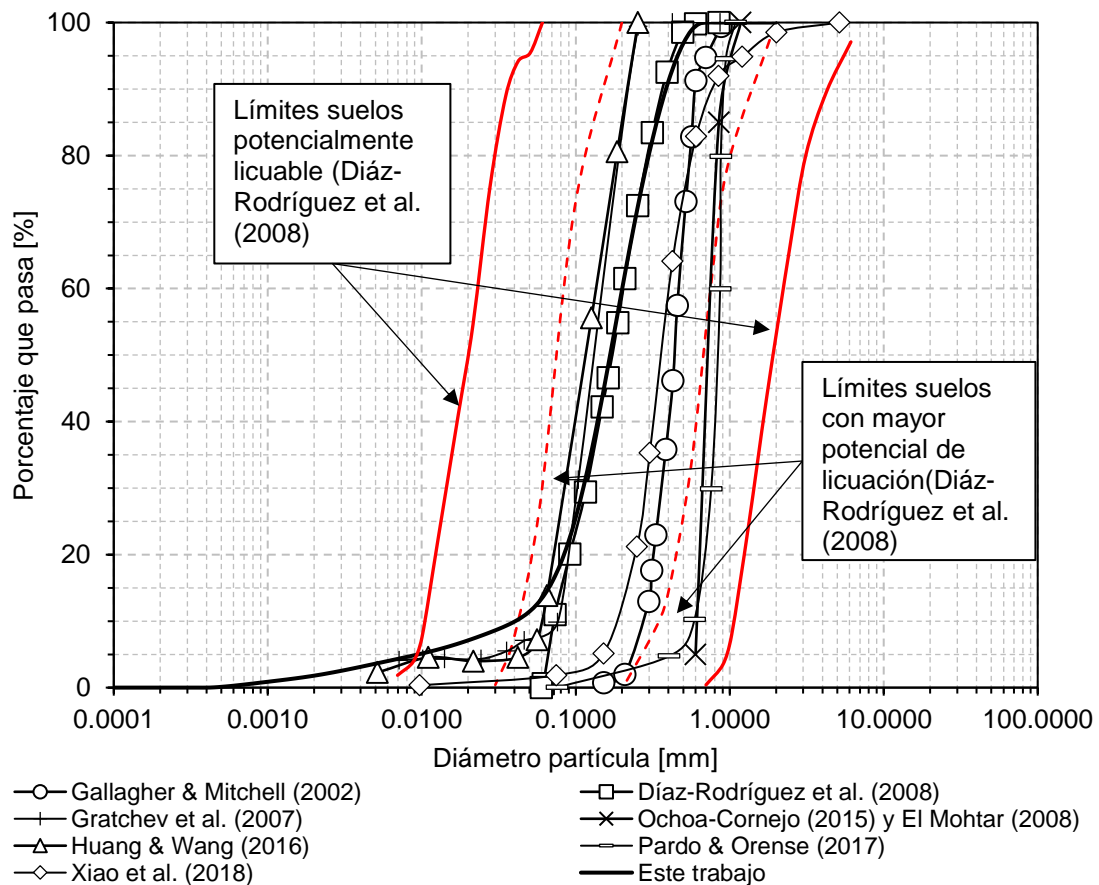


Figura 6-1. Granulometrías de las arenas utilizadas en estudios anteriores

Del gráfico se puede observar que en general las arenas utilizadas en dichos estudios se encuentran dentro del rango de arenas con mayor potencial de licuación. Además, de que en la mayoría de los estudios se han utilizado arenas sin la presencia de finos, siendo solo dos casos los que utilizaron arenas con finos: Díaz – Rodríguez (2008) y Huang y Wang (2016). En el caso de la arena de relave utilizada para el presente estudio, se tiene que se asemeja más a la utilizada por Huang y Wang (2016) en cuanto al porcentaje de finos, siendo ambos casos cercanos al 20%.

6.2. Comportamiento Monótono

En la Figura 6-2 se muestran las curvas obtenidas en la etapa de consolidación de los ensayos normalizadas por el índice de vacíos inicial. De estas curvas, es posible determinar el coeficiente de consolidación secundaria ($C\alpha$). Los resultados obtenidos para cada ensayo se presentan en la Tabla 6-1.

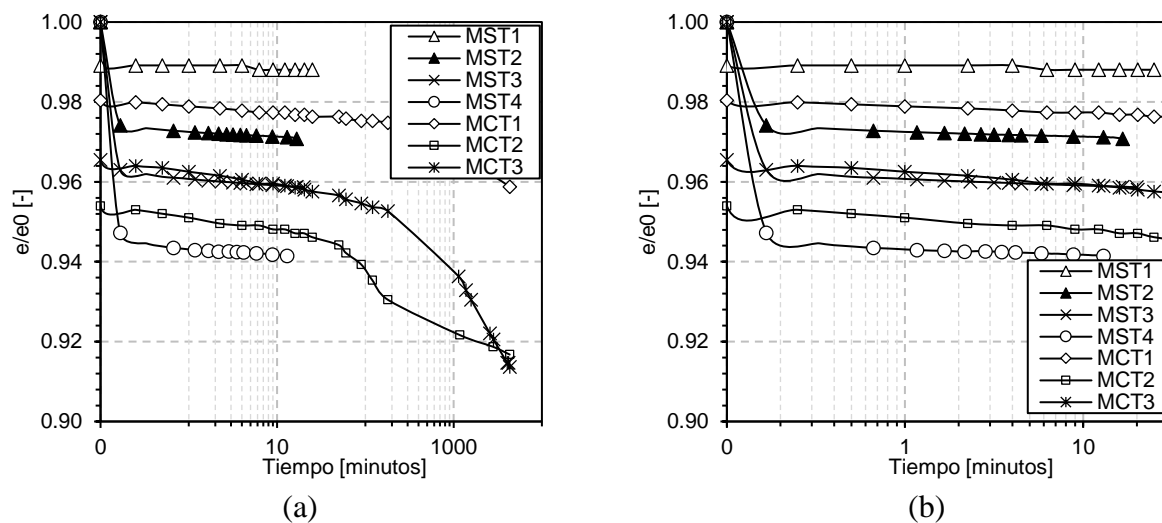


Figura 6-2. (a) Curvas de consolidación sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²], (b) Curvas de consolidación hasta los 30 minutos

Tabla 6-1. Coeficientes de consolidación secundaria ($C\alpha$) para los ensayos monótonos

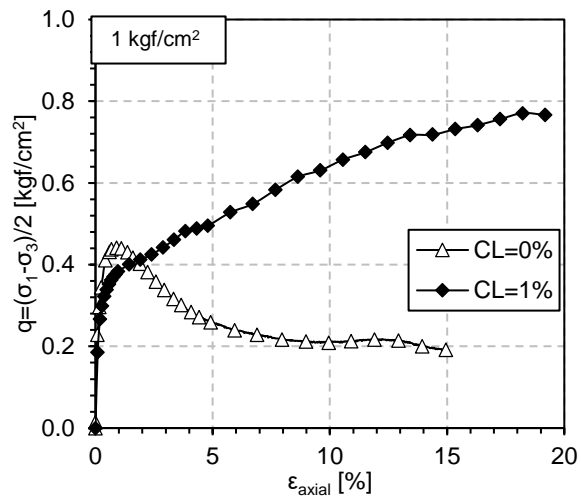
Ensayo	$C\alpha$
MST1	$2.55 \cdot 10^{-4}$
MST2	$4.34 \cdot 10^{-4}$
MST3	$5.75 \cdot 10^{-4}$
MST4	$5.65 \cdot 10^{-4}$
MCT1	$4.35 \cdot 10^{-3}$
MCT2	$3.88 \cdot 10^{-3}$
MCT3	$1.51 \cdot 10^{-2}$

Los valores de $C\alpha$ se pueden comparar con respecto a los obtenidos para arenas limpias y arcillas. Estos se muestran en la Tabla 6-2. De acá se puede observar que los valores obtenidos del material ensayado se acercan a los correspondientes a arcilla. Esto puede ser debido a la presencia de finos en el material, además del efecto de laponita sobre la matriz.

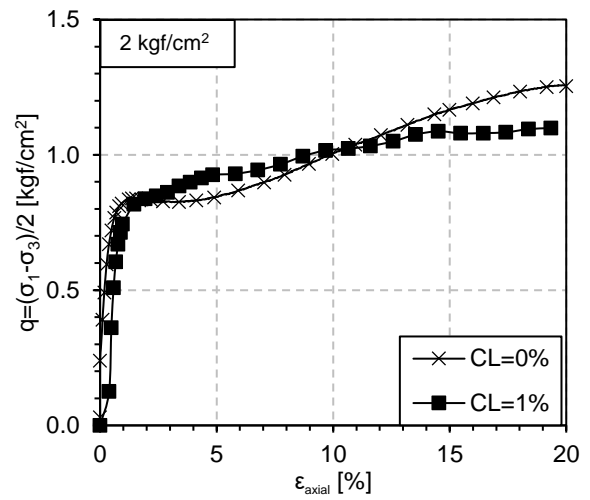
Tabla 6-2. Coeficientes de consolidación secundaria ($C\alpha$) para arenas y arcillas

Material	$C\alpha$
Arena (El Mohtar, 2009)	2.30
Arcilla (Mesri y Feng, 2014)	0.04

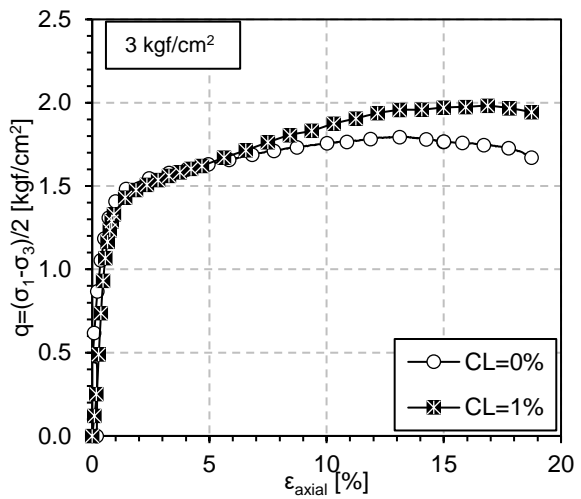
A continuación, se presentan de la Figura 6-3 a la Figura 6-6 los gráficos en los que se compara el comportamiento del suelo sin tratamiento y con tratamiento. En la Figura 6-3 se muestran los gráficos del desviador de esfuerzos versus la deformación axial unitaria para cada uno de los confinamientos. En la Figura 6-4 se muestra el exceso de presión de poros generado versus la deformación axial unitaria para cada uno de los confinamientos. En la Figura 6-5 se muestra el desviador de esfuerzos en función del exceso de presión de poros. Por último, en la Figura 6-6 se muestran las trayectorias de tensiones para los tres confinamientos. Además, en la Figura 6-7 se presentan las líneas de estado último para el caso sin tratamiento y con tratamiento, tanto en el espacio $e - p'$ como para el espacio $q - p'$.



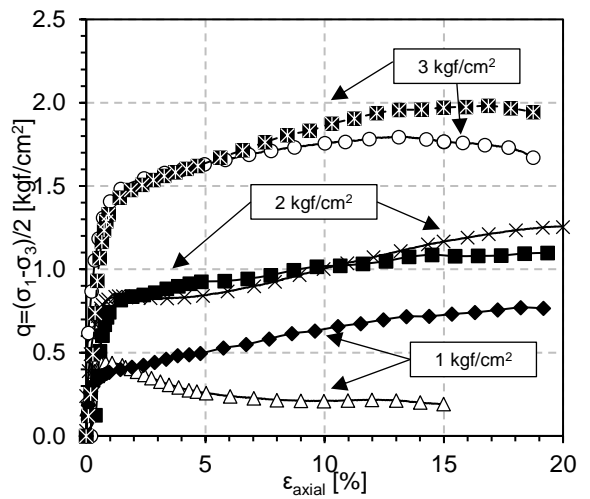
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6-3. Curvas tensión deformación de probetas sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita

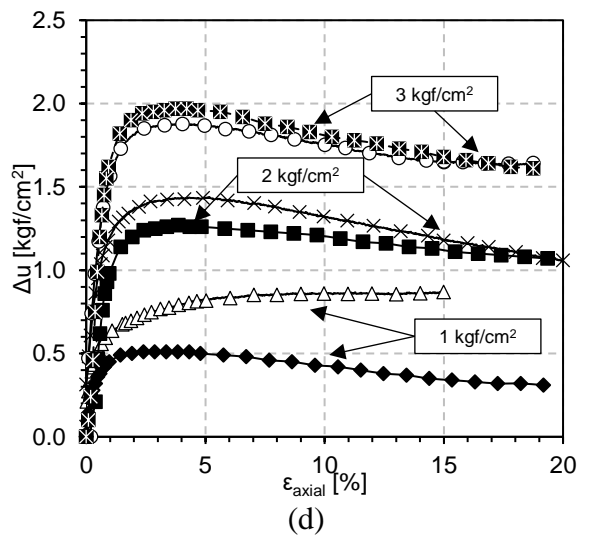
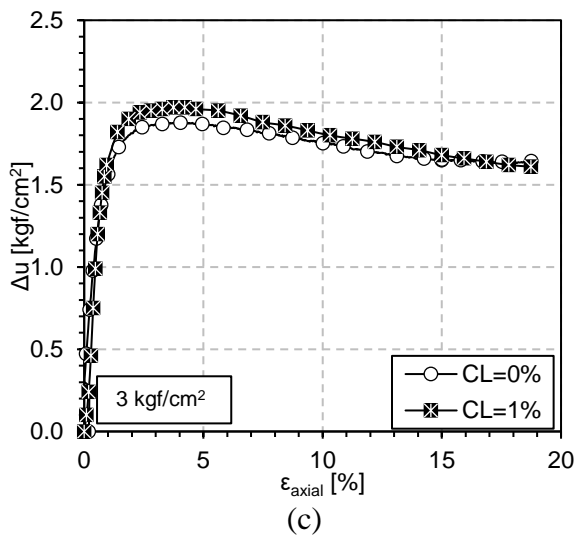
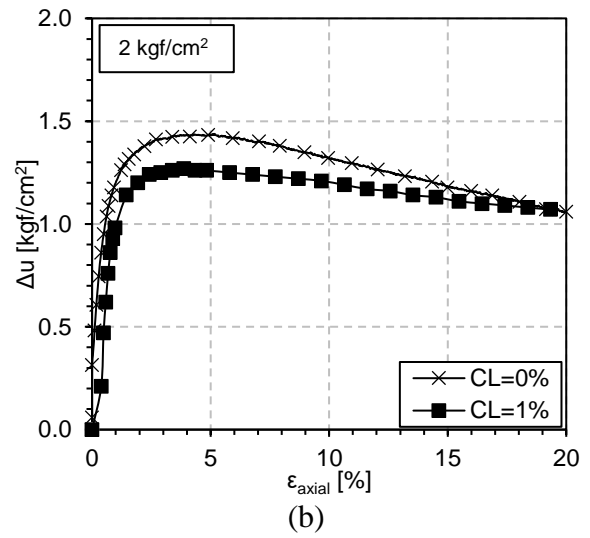
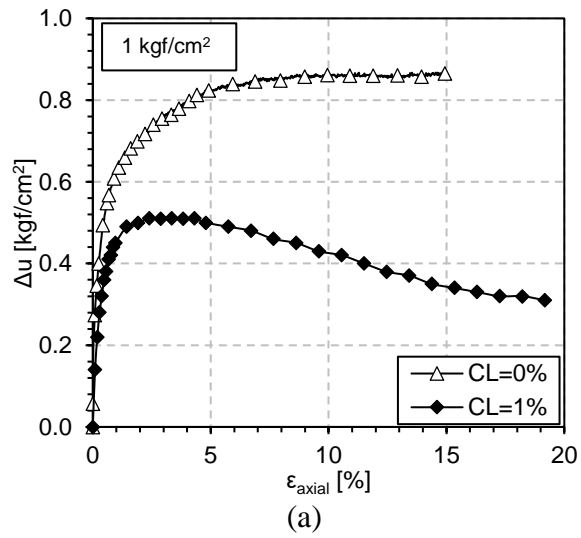
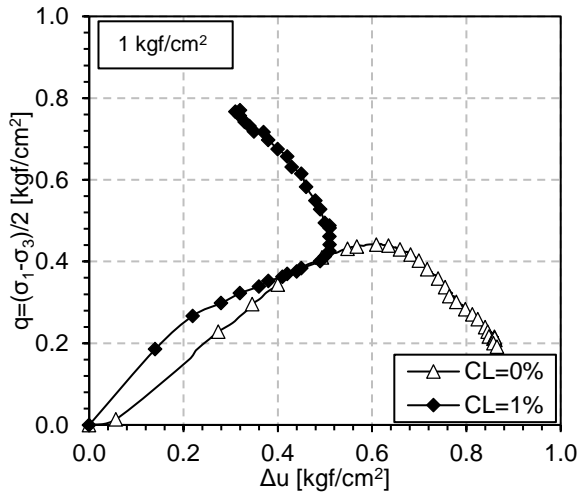
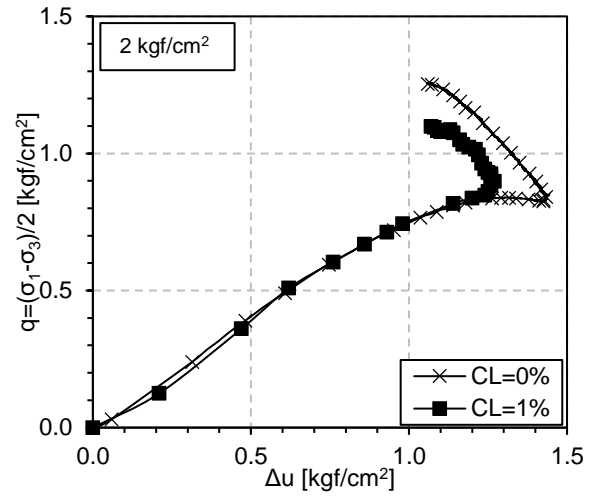


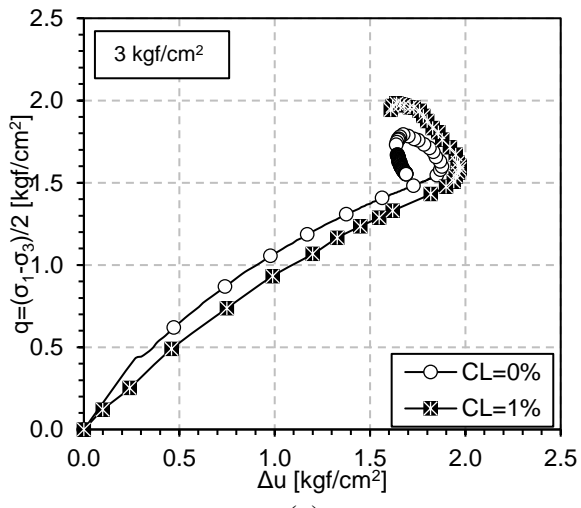
Figura 6-4. Curvas exceso de presión de poros versus deformación sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita



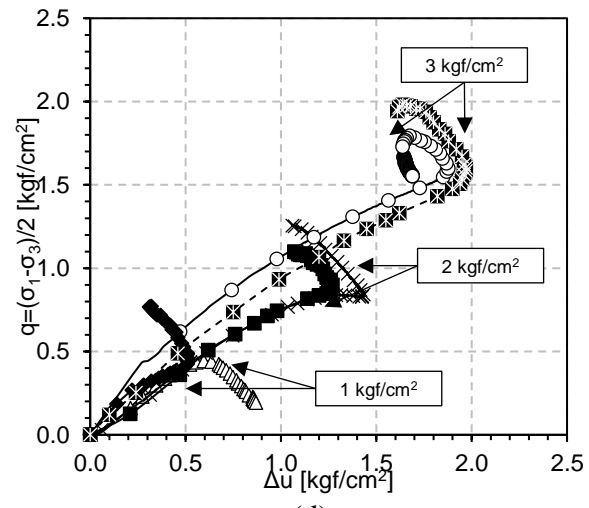
(a)



(b)

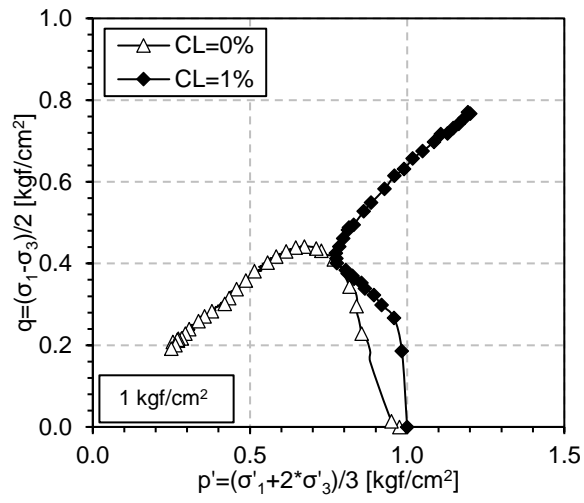


(c)

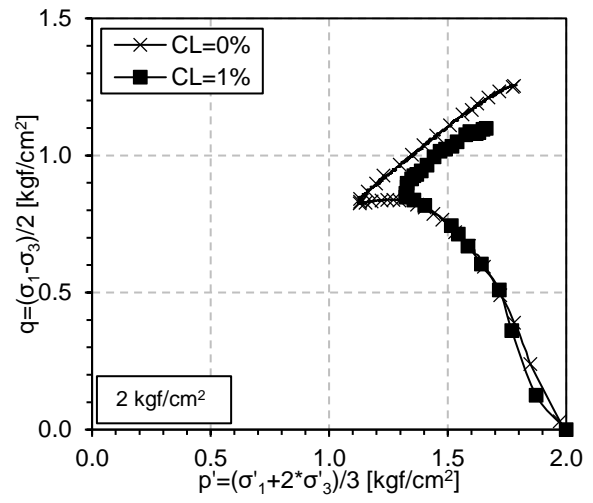


(d)

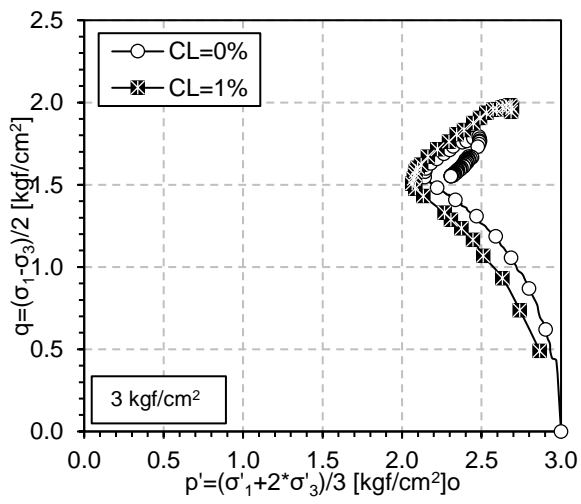
Figura 6-5. Curvas desviador de esfuerzos versus exceso de presión de poros sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita



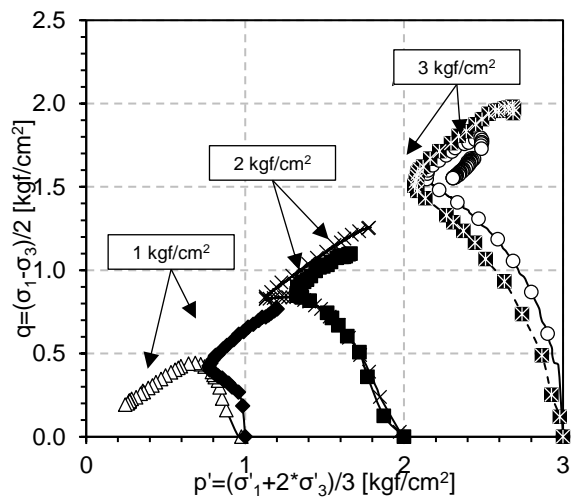
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6-6. Trayectorias de tensiones de probetas sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente), (d) todos los confinamientos. CL: Contenido de laponita

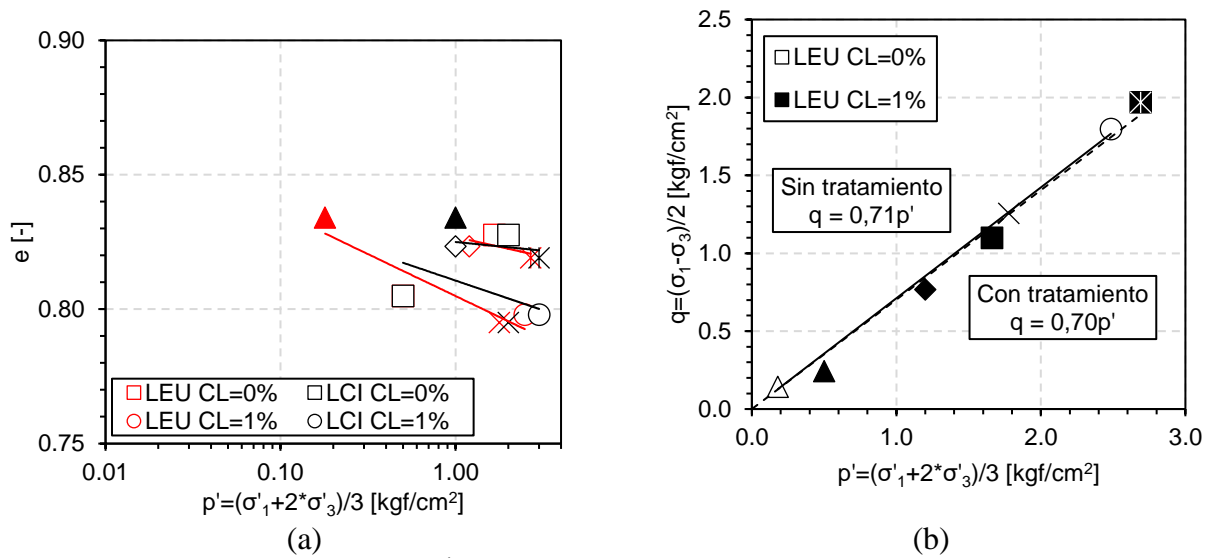


Figura 6-7.(a) Línea de Estado Último (LEU) y Línea de Consolidación Isotrópica (LCI) en espacio $e - p'$, (b) LEU en espacio $q - p'$. CL: Contenido de laponita

En primer lugar, de la Figura 6-2 es posible evidenciar que prácticamente todos los ensayos realizados consolidan a los 30 minutos. Sin embargo, aquellos triaxiales monótonos que se ensayan con laponita, se dejan consolidando durante 72 horas para que la laponita alcance valores altos de viscosidad. En este período se produce una variación no mayor a un 5% en el índice de vacíos. Por otro lado, se observa que el índice de vacíos al final de la consolidación es cercano en todos los casos, salvo para el ensayo MST1, el cual se ensaya a un índice de vacíos mayor.

De los gráficos mostrados en la Figura 6-3 es posible determinar el módulo de deformación (E) cuando se tienen pequeñas deformaciones. Estos valores se muestran en la Figura 6-8, donde se muestra el módulo de deformación (E) en función de la presión de confinamiento inicial de cada uno de los ensayos triaxiales monótonos, considerando ambos casos (sin tratamiento y con tratamiento).

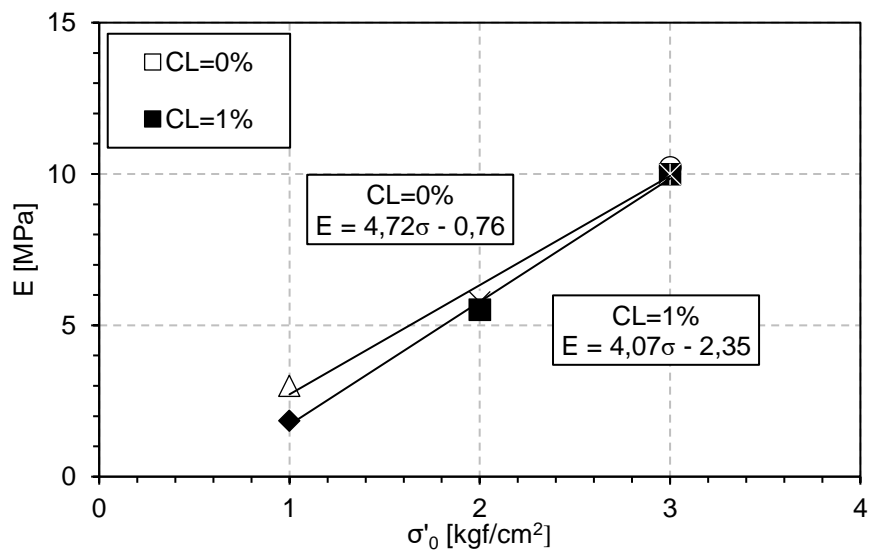


Figura 6-8. Módulo de deformación en función del confinamiento para ensayos sin tratamiento y con tratamiento

De este gráfico, se desprende que, tanto sin tratamiento como con tratamiento, existe una rigidización del material al aumentar el confinamiento. Sin embargo, se observa que el aumento del módulo de deformación con respecto al confinamiento es mayor para el caso sin tratamiento. Esto quiere decir que existe una mayor rigidización con el aumento del confinamiento cuando el material se ensaya sin laponita. Por último, se observa que en los tres confinamientos estudiados los valores del módulo de deformación es prácticamente igual en ambos casos (sin y con tratamiento).

De la Figura 6-3 a Figura 6-6 se puede observar que para los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²] la arena de relaves se comporta de manera similar sin tratamiento y con tratamiento, es decir se mantiene el comportamiento dilatante evidenciado, aumentando la rigidez con el aumento del confinamiento. Sin embargo, en el caso de los ensayos realizados a un confinamiento de 1 [kgf/cm²] se observa un cambio en el comportamiento, pasando de un comportamiento contractivo en el caso sin tratamiento, a uno dilatante al agregar laponita (Figura 6-6 (a)). Este fenómeno se evidencia en que, al adicionar laponita, se obtienen valores del desviador de esfuerzos cuatro veces mayor (Figura 6-3 (a)). Por otro lado, existe una disminución en la generación de exceso de presión de poros (Figura 6-4 (a)), alcanzando aproximadamente un 50% del valor obtenido sin tratamiento en el estado residual.

En cuanto a la Línea de Estado Último (LEU) y la Línea de Consolidación Isotrópica (LCI) mostradas en la Figura 6-7 (a) se tiene que existe un cambio en la LEU al adicionar laponita, fenómeno que ocurre de igual forma con la LCI. Además, al agregar laponita, la LCI queda próxima a la LEU. Por otro lado, al momento de comparar las Líneas de Estado Último en ambos casos en la Figura 6-7 (b), se observa que la pendiente de la línea no cambia de forma significativa, por lo que el ángulo de fricción interna se mantiene en el valor de 35°. Esto se comprueba al observar la Tabla 4-1 y Tabla 5-1.

6.3. Comportamiento Cíclico

En la Figura 6-9 se muestran las curvas de resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en que el material licua, considerando los dos casos estudiados (sin tratamiento y con tratamiento). En el caso sin tratamiento, se señalan con color rojo los ensayos realizados por Muñoz (2017).

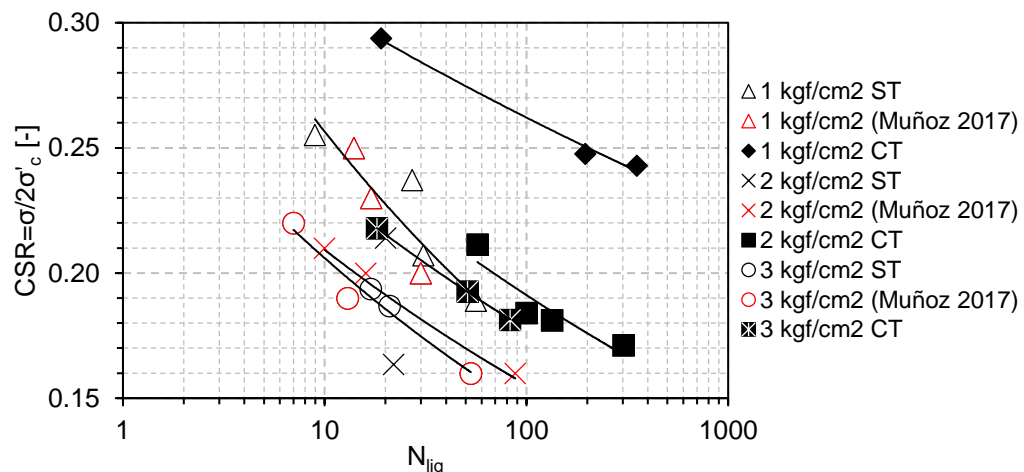


Figura 6-9. Gráfico CSR – N_{liq} para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²]. ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento

Con respecto a los resultados de la resistencia cíclica, en la Figura 6-9 se muestra que, tanto para el caso sin tratamiento y con tratamiento, existe un aumento en el potencial de licuación al aumentar el confinamiento al que es ensayada la muestra. Además, a un mismo confinamiento se tiene que la resistencia a la licuación es mayor cuando se adiciona laponita a la arena de relaves.

Para poder observar si existe o no una mejora en la resistencia a la licuación, se grafican los ensayos sin y con tratamiento para cada uno de los confinamientos. Estos gráficos se presentan en la Figura 6-10. Aquí se muestra la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que el material licua. En rojo se encuentra señalado los ensayos realizados por Muñoz (2017).

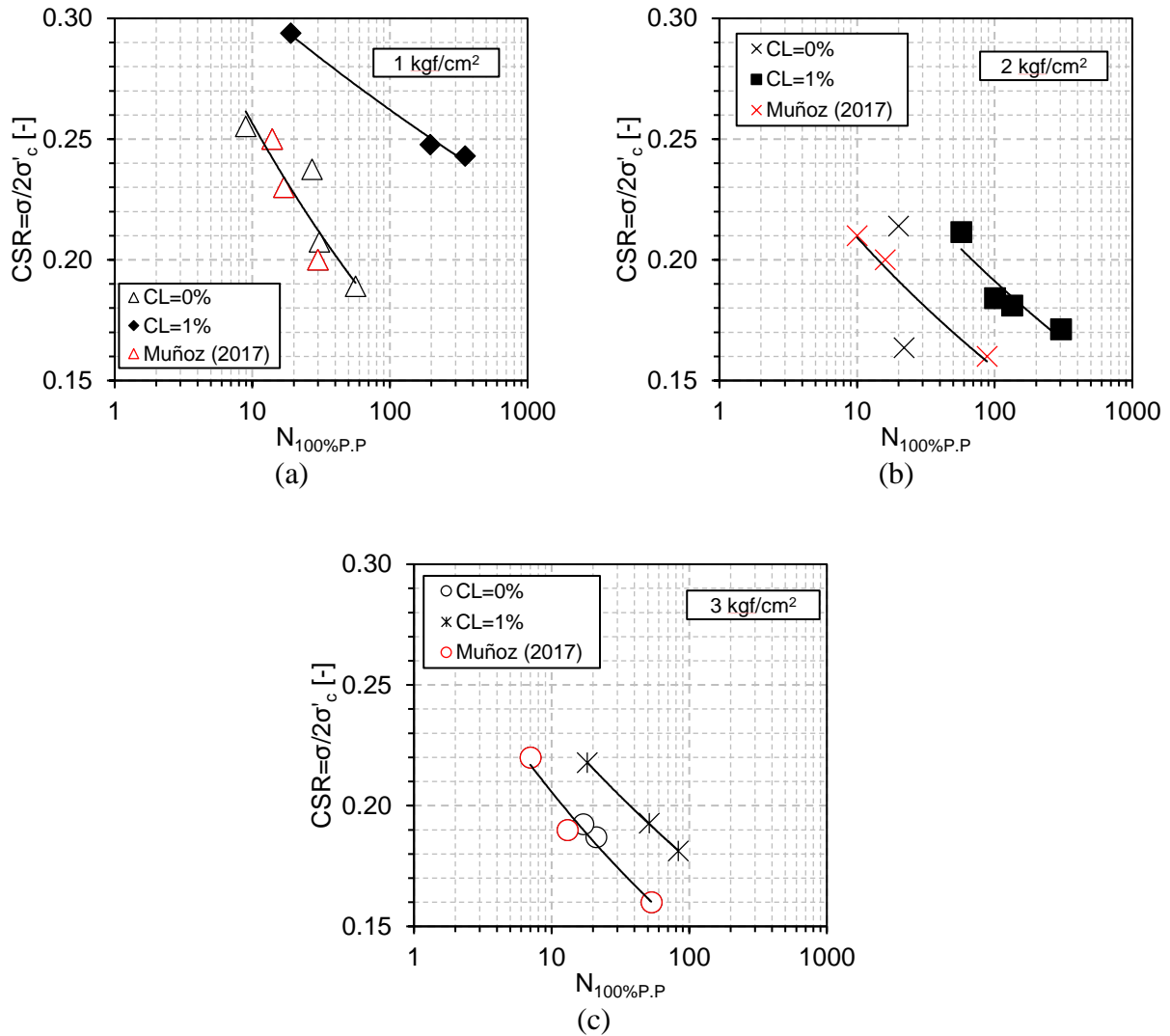


Figura 6-10. Gráfico CSR – $N_{100\%P.P}$ comparando sin tratamiento y con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente)

En el gráfico anterior se observa que existe un aumento de la resistencia a los tres confinamientos. Sin embargo, para el caso del confinamiento de 1 [kgf/cm²] existe una mejora igual a un 30% para el menor número de ciclo. Otro detalle es que en el caso de los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²] las curvas de la resistencia cíclica para el caso con tratamiento son prácticamente paralelas a las de sin tratamiento; mientras que para el caso del confinamiento de 1 [kgf/cm²] la curva con tratamiento deja de ser paralela y se aleja cada vez más de la curva sin tratamiento al ir aumentando el número de ciclos. Esto se puede interpretar como que, al ensayar las probetas con un confinamiento de 1 [kgf/cm²], el incremento de la resistencia a la licuación es mayor al aumentar el número de ciclos. En cambio, al ensayar las muestras a confinamientos mayores, el incremento de la resistencia permanece prácticamente constante.

Como una forma de detallar la mejora en cada uno de los confinamientos, se calculan dos parámetros:

- (1) N_{CT}/N_{ST} : la razón entre el número de ciclos en el que el material licua con tratamiento sobre el número de ciclos en el que el material licua sin tratamiento para un mismo número de CSR.
- (2) CSR_{CT}/CSR_{ST} : la razón entre la resistencia cíclica obtenida con tratamiento sobre la resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos.

Los resultados de las razones se muestran en la Tabla 6-3 y Tabla 6-4. Observando los valores de la Tabla 6-3 se tiene que efectivamente existe un aumento en el número de ciclos necesarios para que la arena licúe al mantener el CSR. Además, para el confinamiento de 1 [kgf/cm²] existe un mayor cambio con el CSR, mientras que en el resto de los confinamientos N_{CT}/N_{ST} se mantiene constante. Por otro lado, se tiene que el incremento va disminuyendo a medida que se va aumentando el confinamiento. Esto se muestra de forma gráfica en la Figura 6-11 (a).

En la Tabla 6-4, se observa que existe un incremento en la resistencia cíclica de las muestras con tratamiento para un mismo ciclo. En el caso del confinamiento de 1 [kgf/cm²], el incremento es mayor al aumentar el número de ciclos. Para el resto de los confinamientos, CSR_{CT}/CSR_{ST} es prácticamente constante. Para observar de mejor forma este fenómeno, se grafica el valor de CSR_{CT}/CST_{ST} en función del número de ciclos (ver Figura 6-11 (b)).

Tabla 6-3. Número de ciclos con tratamiento sobre número de ciclos sin tratamiento a una misma resistencia cíclica

σ'_c [kgf/cm ²]	CSR	N_{ST}	N_{CT}	N_{CT}/N_{ST}
1	0.240	15	383	26
	0.250	12	208	18
2	0.170	50	262	5
	0.210	10	45	5
3	0.190	17	46	3
	0.220	6	14	2

Tabla 6-4. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos

σ'_c [kgf/cm ²]	N	CSR _{ST}	CSR _{CT}	CSR _{CT} /CSR _{ST}
1	20	0.228	0.292	1.3
	30	0.213	0.285	1.3
	40	0.202	0.279	1.4
	50	0.195	0.275	1.4
2	20	0.192	0.231	1.2
	30	0.182	0.220	1.2
	40	0.175	0.213	1.2
	50	0.170	0.207	1.2
3	20	0.185	0.216	1.2
	30	0.174	0.205	1.2
	40	0.167	0.198	1.2
	50	0.161	0.193	1.2

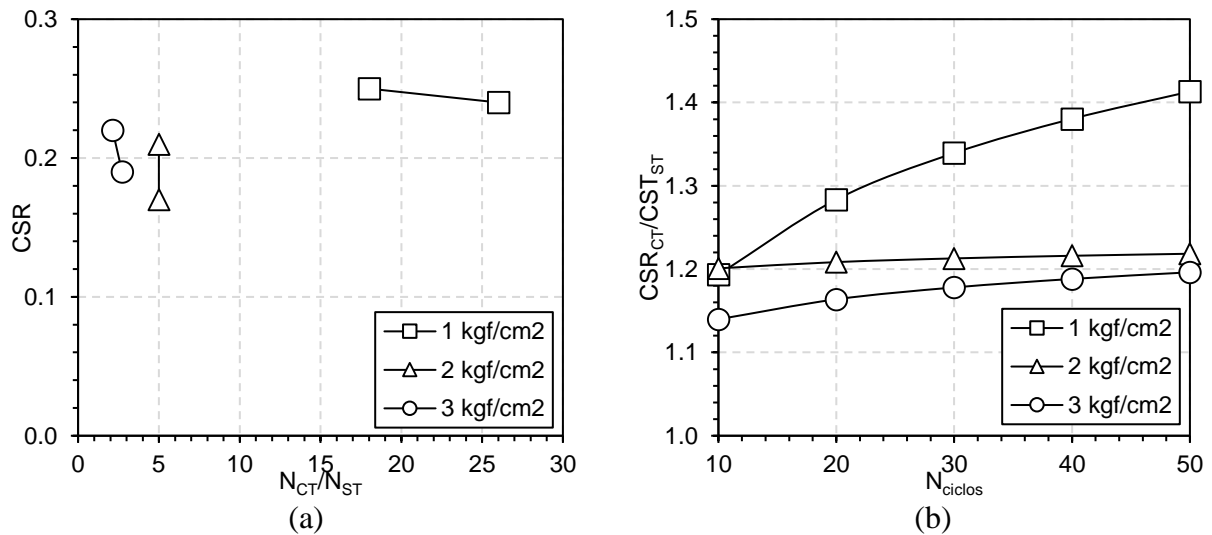


Figura 6-11. (a) Gráfico de CSR en función de N_{CT}/N_{ST} , (b) Gráfico de CSR_{CT}/CSR_{ST} en función del número de ciclo en el que licúa la arena

6.3.1. Módulo de corte secante G_{sec}

Otro factor importante para comparar corresponde a los valores obtenidos para el módulo de corte secante (G_{sec}) en cada ciclo con respecto a la deformación angular unitaria (γ). Los resultados se presentan en la Figura 6-12 para el caso sin tratamiento y en la Figura 6-13 para el caso con tratamiento. En cada gráfico se muestran las curvas obtenidas para cada valor de CSR ensayado por confinamiento.

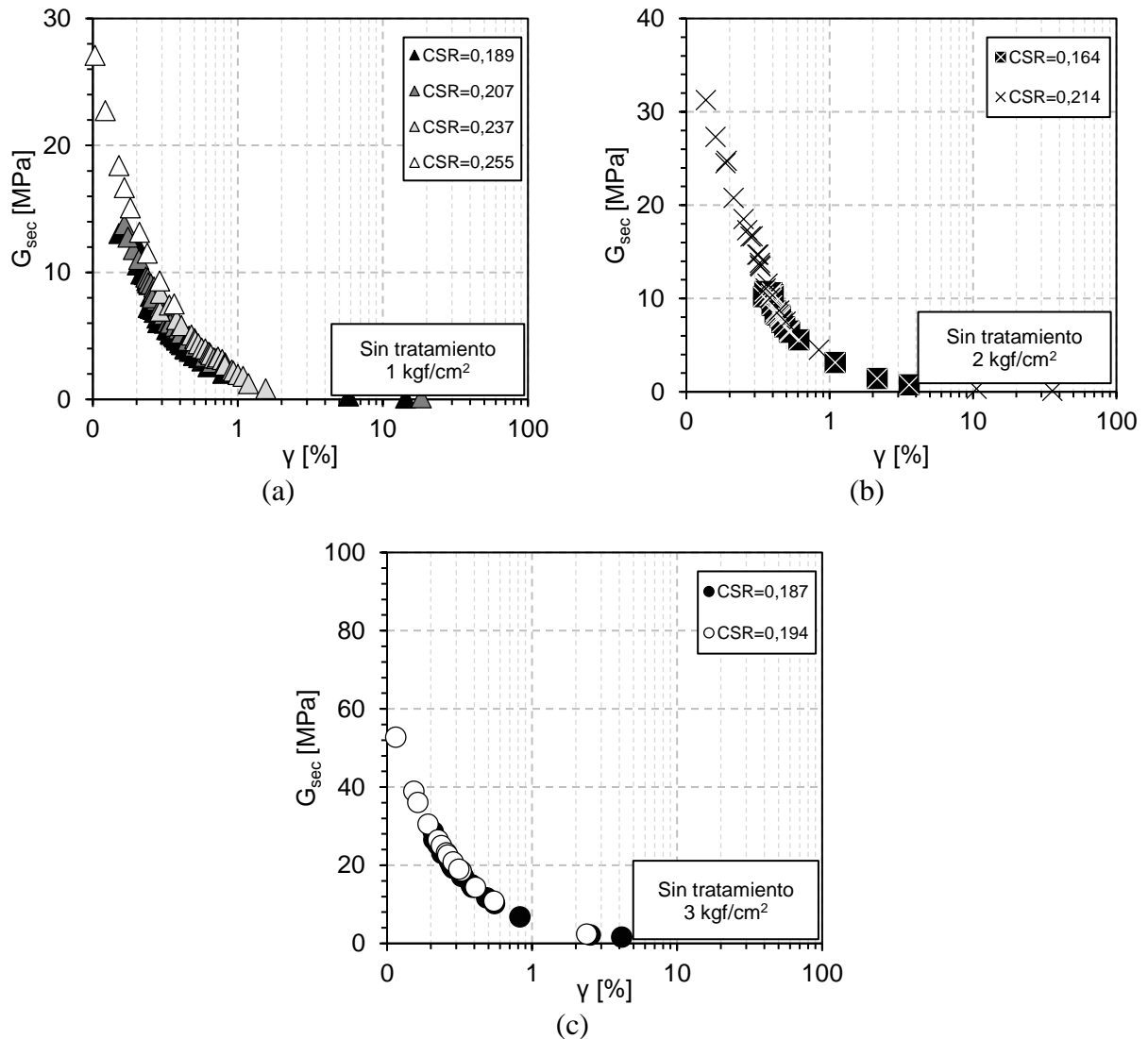


Figura 6-12. Módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria en ensayos sin tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente)

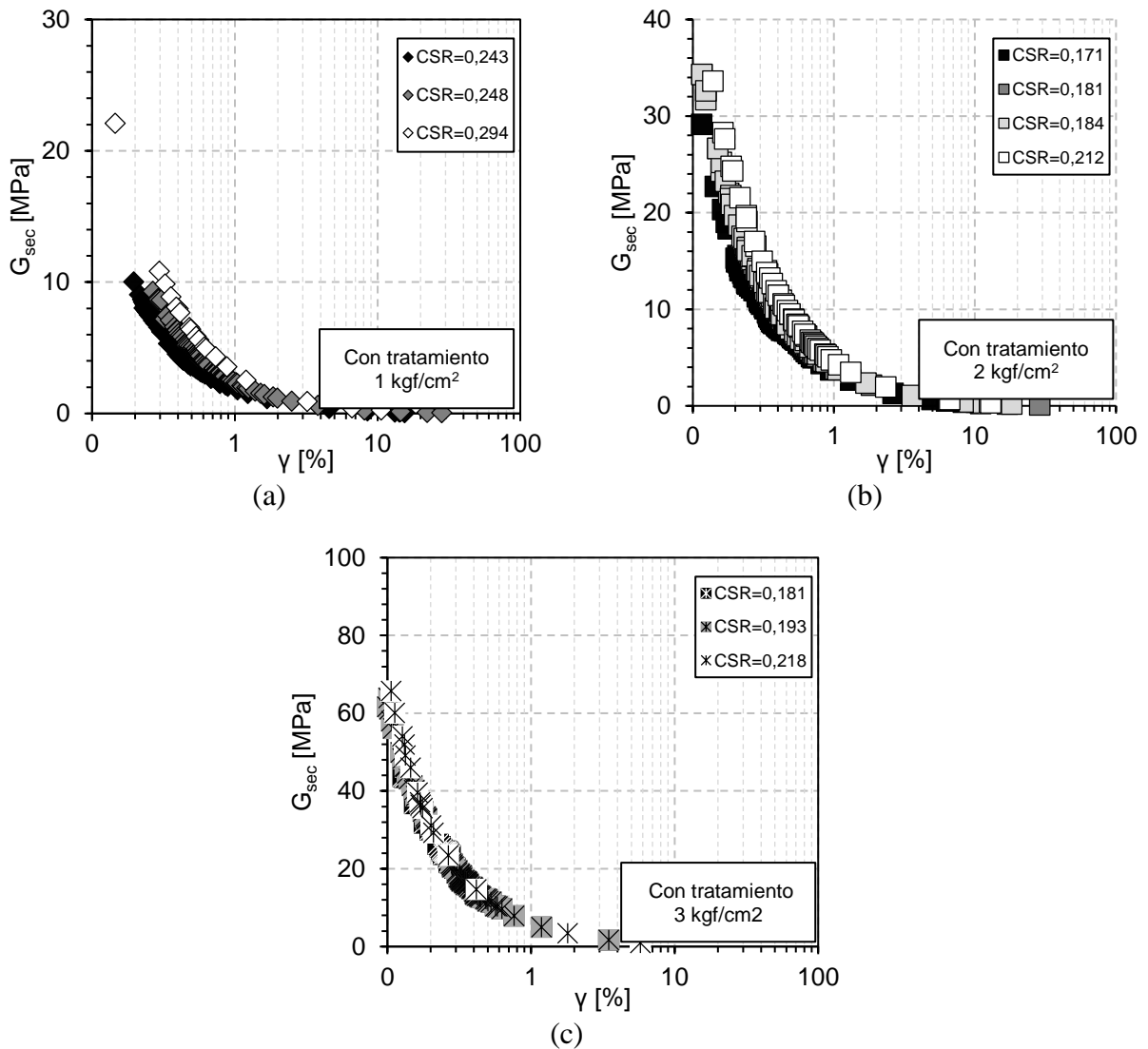


Figura 6-13. Módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria en ensayos con tratamiento para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente)

Para los ensayos sin y con tratamiento se obtiene que, a aumentar el confinamiento inicial de los ensayos, aumenta el valor del módulo de corte secante inicial. Además, no se observa una tendencia clara con respecto al módulo de corte secante inicial en función de la sollicitación cíclica. Para poder evidenciar el efecto que se tiene al agregar laponita sobre el módulo de corte, se grafican los resultados por confinamiento. Estos gráficos se presentan en la Figura 6-14, donde se muestra el módulo de corte secante en función de la deformación angular.

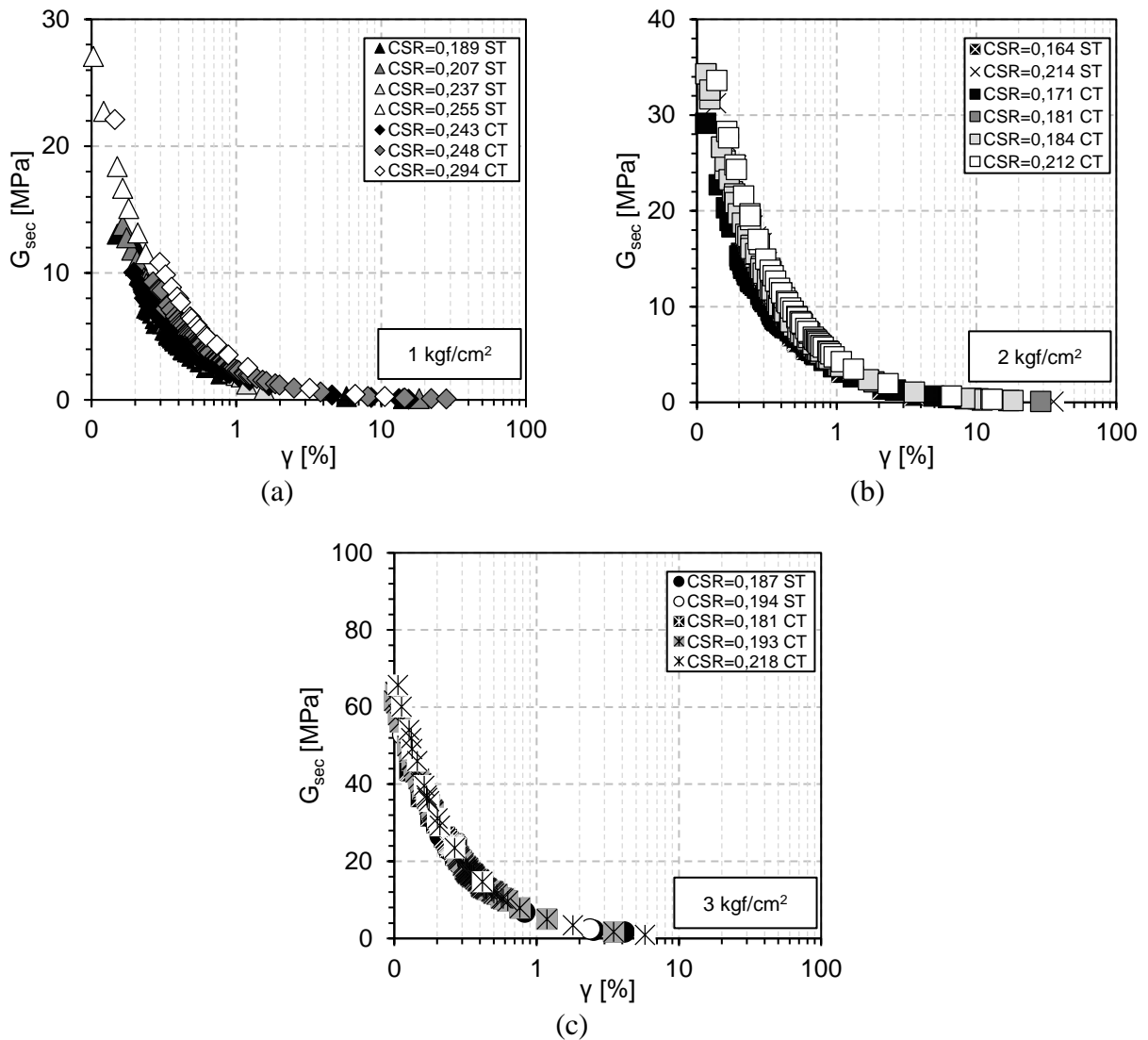


Figura 6-14. Comparación del módulo de corte secante por ciclo versus deformación angular unitaria para confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento

De la figura anterior es posible observar que al adicionar laponita no existe un cambio en la curva con respecto a la obtenida sin laponita. Más bien los ensayos se encuentran dentro de una banda, alcanzando valores similares del módulo de corte en ambos casos, los cuales van aumentando en función del confinamiento. Por ejemplo, a bajas deformaciones, para un confinamiento de 1 [kgf/cm²], se alcanza un módulo de corte igual a 30 [MPa], mientras que para un confinamiento de 2 [kgf/cm²] es de 40 [MPa], y a 3 [kgf/cm²] es de 70 [MPa]. Para observar de mejor forma el comportamiento del módulo de corte secante, se presenta en la Tabla 6-5 el valor de G_{sec} inicial para cada uno de los ensayos.

Tabla 6-5. G_{sec} inicial para cada ensayo

Sin tratamiento			Con tratamiento		
Ensayo	Confinamiento [kgf/cm ²]	G [MPa]	Ensayo	Confinamiento [kgf/cm ²]	G [MPa]
CST1	1	13.1	CCT1	1	10.0
CST2	1	13.8	CCT2	1	9.3
CST3	1	8.3	CCT3	1	22.1
CST4	1	27.1	CCT4	2	39.1
CST5	2	10.7	CCT5	2	14.7
CST6	2	31.3	CCT6	2	34.3
CST7	3	28.6	CCT7	2	33.7
CST8	3	52.9	CCT8	3	43.7
			CCT9	3	64.2
			CCT10	3	65.7

De aquí es posible observar que, para un mismo confinamiento, se evidencia una mayor rigidización inicial en el caso de los ensayos con laponita. Ochoa – Cornejo et al. (2016) y Ochoa – Cornejo et al. (2019) proponen que la disminución en la movilidad cíclica de arenas con laponita se puede deber a: (1) la unión entre las partículas de arena debido a la presencia de finos plásticos, y (2) la restricción producida por el fluido formado en los espacios intersticiales como el resultado de la hidratación de la laponita.

6.3.2. Factor de corrección por confinamiento

En cuanto al k_{σ} , se tiene que es un factor importante debido a que con él se puede incorporar la influencia del confinamiento en problemas ingenieriles reales, logrando obtener resultados con mayor certeza. El objetivo es del factor es reducir la resistencia a la licuación (Pillai y Byrne, 1994). De esta forma, se realiza una comparación con lo obtenido por Idriss y Boulanger (2004), quienes complementan el estudio realizado por Hynes y Olsen (1998). Esta comparación se presenta en la Figura 6-15, donde se grafica el factor de corrección por confinamiento versus el esfuerzo vertical efectivo normalizado por la presión atmosférica. Además, se señala los resultados obtenidos por Muñoz (2017) con color rojo.

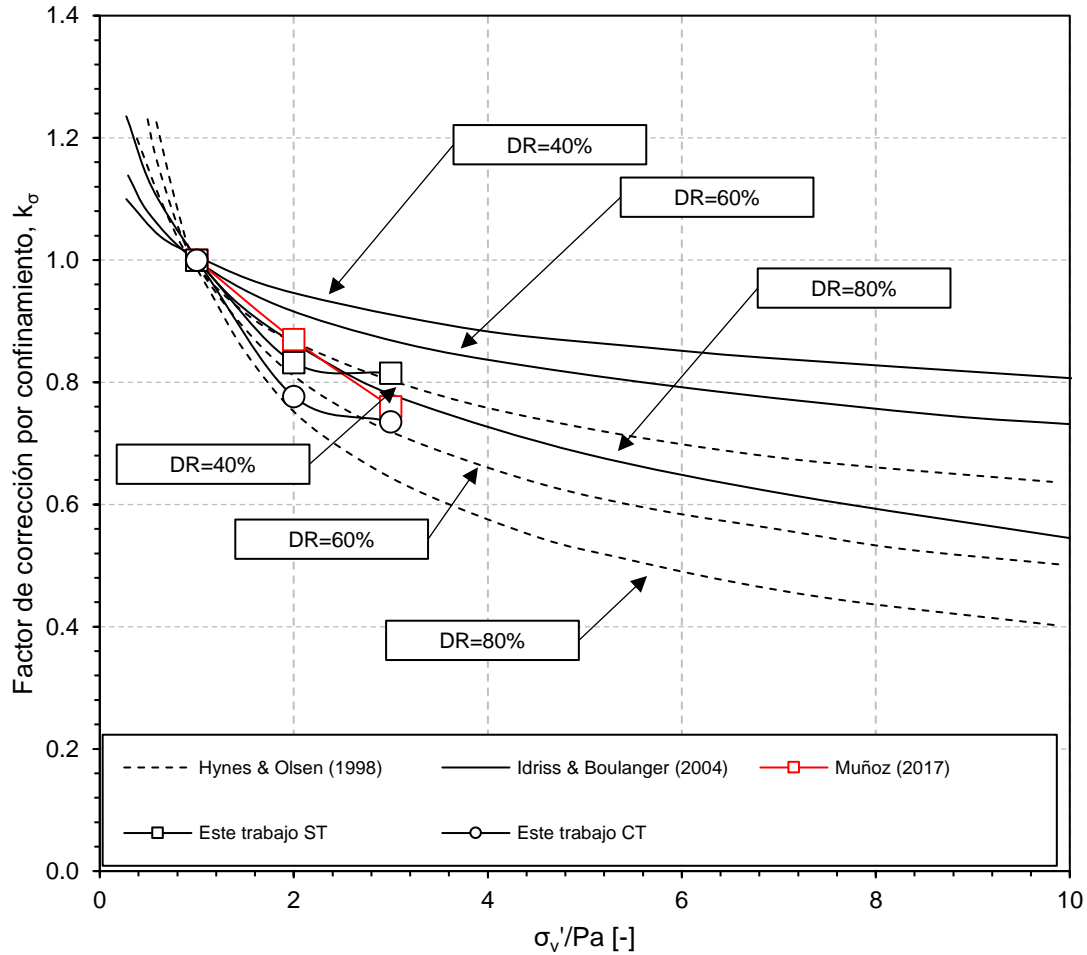


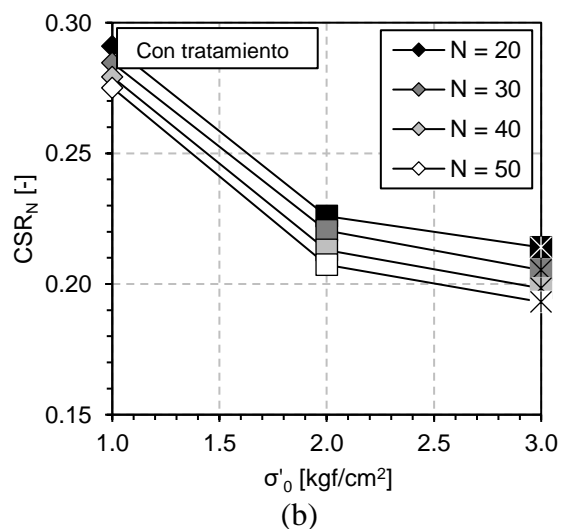
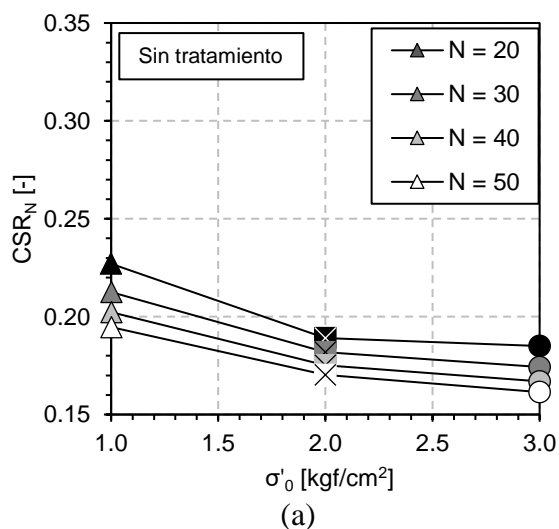
Figura 6-15. Comparación de factores de corrección por confinamiento k_{σ} , con los obtenidos por Hynes & Olsen (1998) mostrados por Idriss & Boulanger (2004). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento

En la Figura 6.12 se observa que la curva obtenida en el caso sin tratamiento se acerca a la curva de $D_R=40\%$ para el estudio de Hynes y Olsen (1998), mientras que la curva con tratamiento se acerca a la de $D_R=80\%$. Además, se observa que la curva sin tratamiento del presente estudio se acerca a la obtenida por Muñoz (2017). Por último, observando las curvas de Hynes y Olsen (1998), Idriss y Boulanger (2004), Muñoz (2017) y las del presente trabajo, se tiene que no existe una relación consistente entre los estudios. Esto corrobora la gran dependencia del factor de corrección por confinamiento con respecto a la naturaleza del suelo, la densidad relativa y la confección e la probeta (Montgomery et al., 2014).

Por otro lado, se calcula el factor de corrección por confinamiento k_σ tomando en cuenta el valor de CSR para distintos números de ciclos. En la Tabla 6-6 se muestran los valores obtenidos, tanto para los ensayos sin tratamiento como con tratamiento. Además, estos resultados se grafican y se muestran en la Figura 6-16.

Tabla 6-6. Valores del fator de corrección por confinamiento k_σ para distintos valores de N

N	σ'_c [kgf/cm ²]	Sin tratamiento		Con tratamiento	
		CSR _N	k_σ	CSR _N	k_σ
20	1	0.227	1.00	0.291	1.00
	2	0.189	0.83	0.226	0.78
	3	0.185	0.81	0.214	0.74
30	1	0.213	1.00	0.285	1.00
	2	0.182	0.86	0.220	0.77
	3	0.174	0.82	0.205	0.72
40	1	0.202	1.00	0.279	1.00
	2	0.175	0.87	0.213	0.76
	3	0.167	0.83	0.198	0.71
50	1	0.195	1.00	0.275	1.00
	2	0.170	0.87	0.207	0.75
	3	0.161	0.83	0.193	0.70



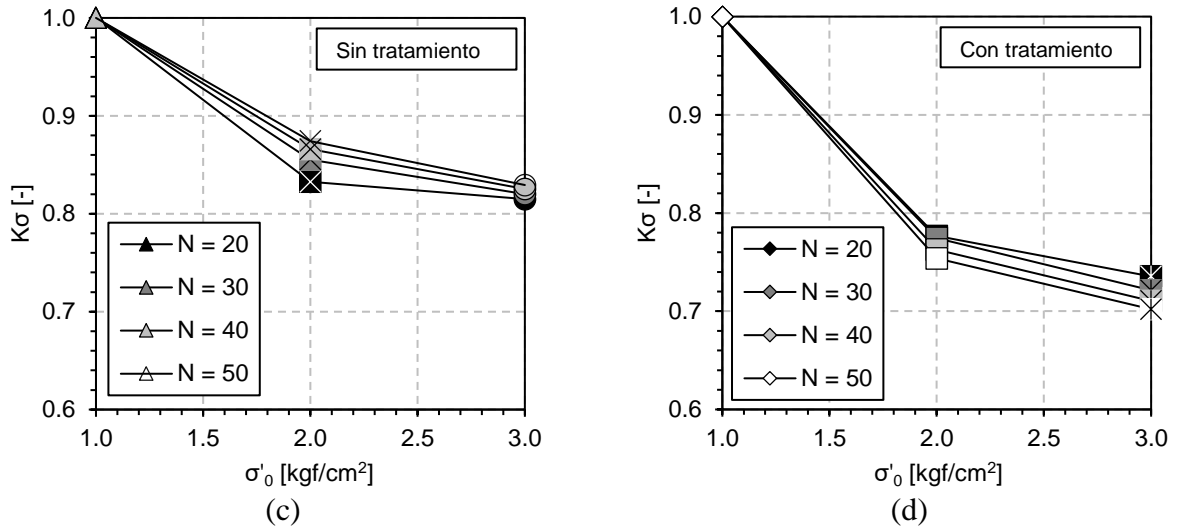


Figura 6-16. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en N ciclos el 5% de deformación en doble amplitud sin tratamiento, (b) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en N ciclos el 5% de deformación en doble amplitud con tratamiento, (c) Factor de corrección por confinamiento k_σ según criterio de 5% en doble amplitud sin tratamiento, (d) Factor de corrección por confinamiento k_σ según criterio de 5% en doble amplitud con tratamiento

Aquí se puede ver que, sin tratamiento, a mayor el número de ciclos, el factor de corrección por confinamiento va aumentando. Sin embargo, al ver los valores obtenidos para los ensayos con tratamiento, se tiene la relación inversa, es decir, a mayor número de ciclos, menor es el factor de corrección por confinamiento. Esto concuerda con lo presentado por Montgomery et al. (2014), donde se menciona que el criterio que se escoge para la licuación afecta el valor de k_σ .

Para ver cómo se comportan los valores anteriores con respecto a los estudios de Idriss y Boulanger (2004) y Hynes y Olsen (1998) se agregan en el gráfico mostrado en la Figura 6-15. Sin embargo, se agrega sólo el caso de $N=50$ con el fin de comparar el otro extremo estudiado. Estos resultados se presentan en la Figura 6-17, donde se observa que, al ir aumentando el número de ciclos, no existe un cambio significativo en los valores del factor de corrección por confinamiento (diferencias no mayores a 5%).

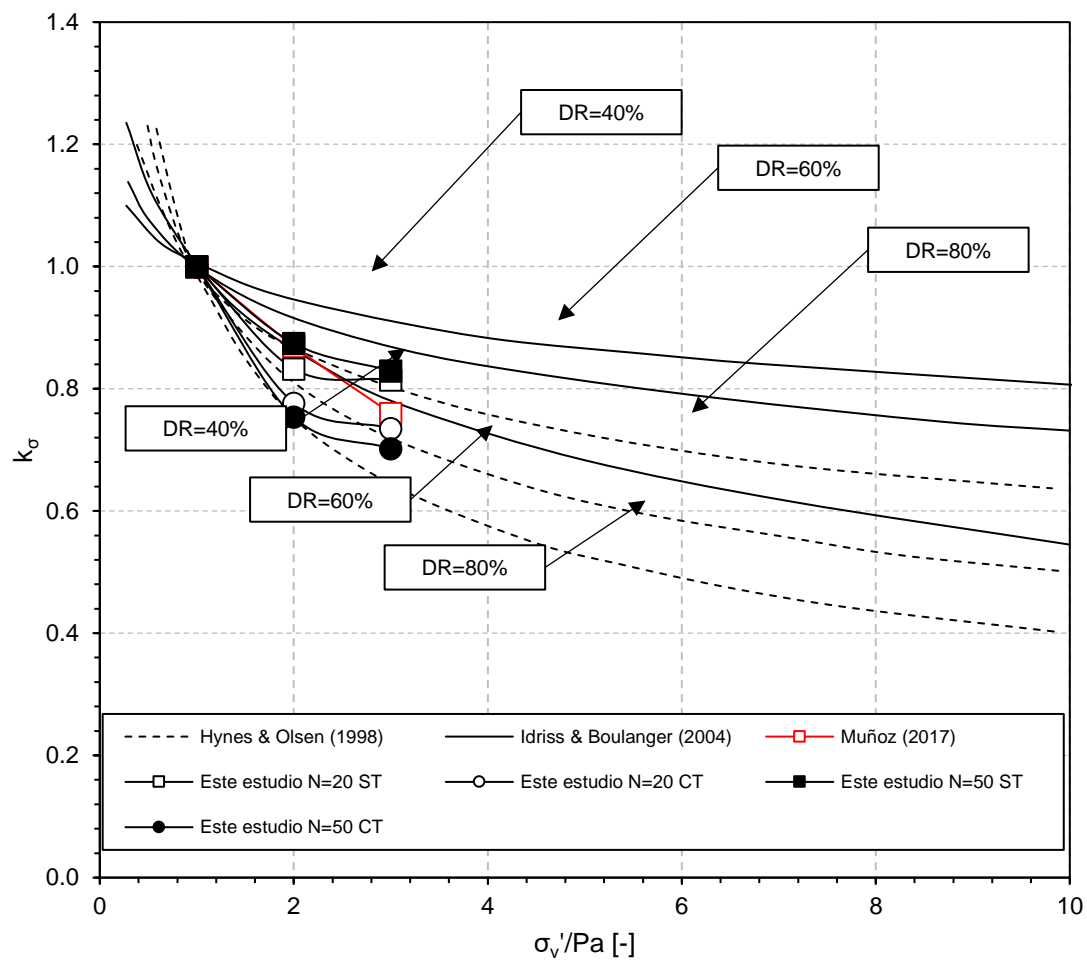


Figura 6-17. Comparación de factores de corrección por confinamiento k_σ para distintos N, con los obtenidos por Hynes & Olsen (1998) mostrados por Idriss & Boulanger (2004). ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento

6.3.3. Desarrollo de exceso de presión de poros

En cuanto al desarrollo del exceso de presión de poros, se presentan en la Figura 6-18 y Figura 6-19 el desarrollo del exceso de presión de poros normalizado por el confinamiento inicial versus el número de ciclos para los tres confinamientos distintos.

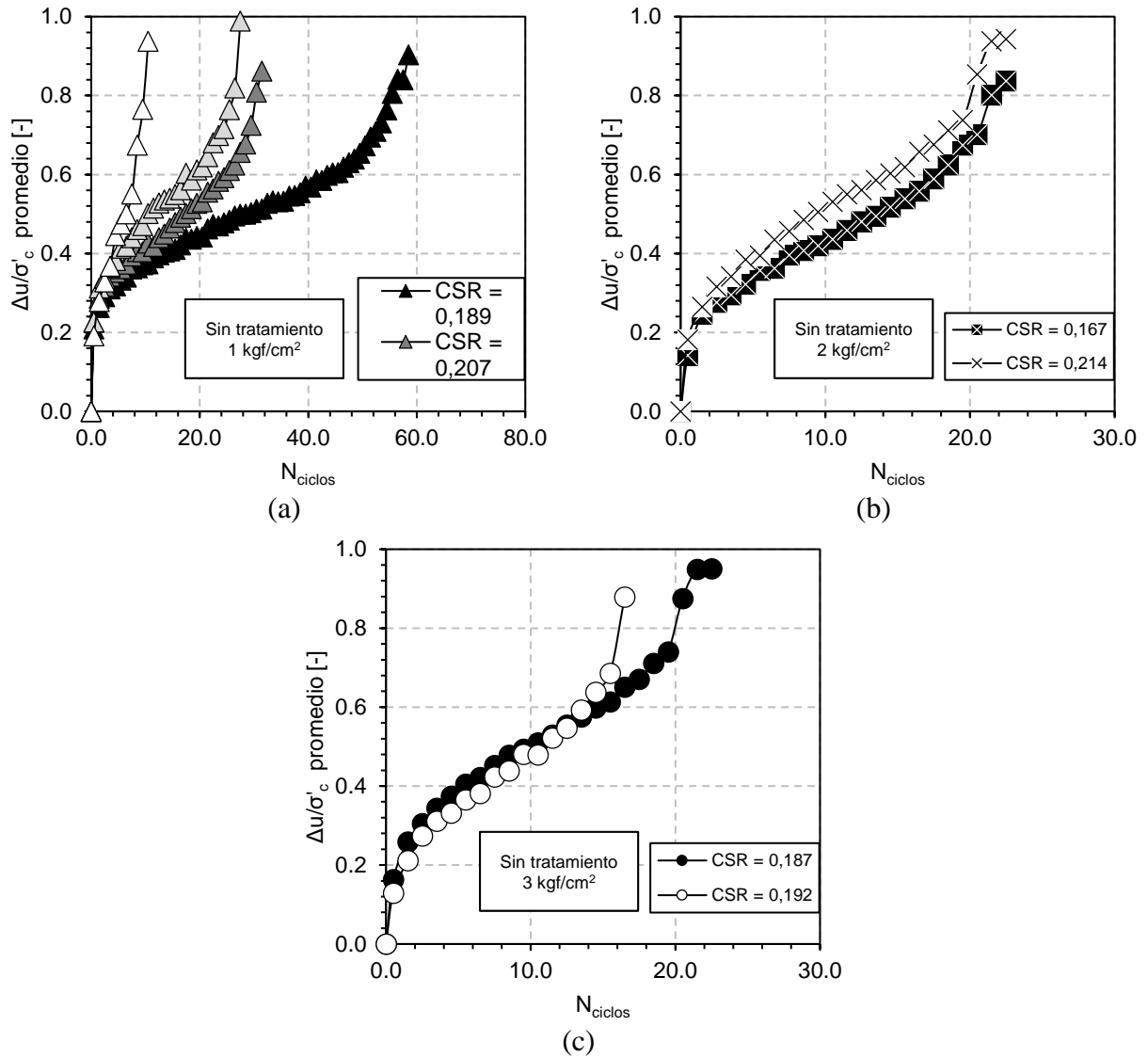


Figura 6-18. Desarrollo del exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente) sin tratamiento

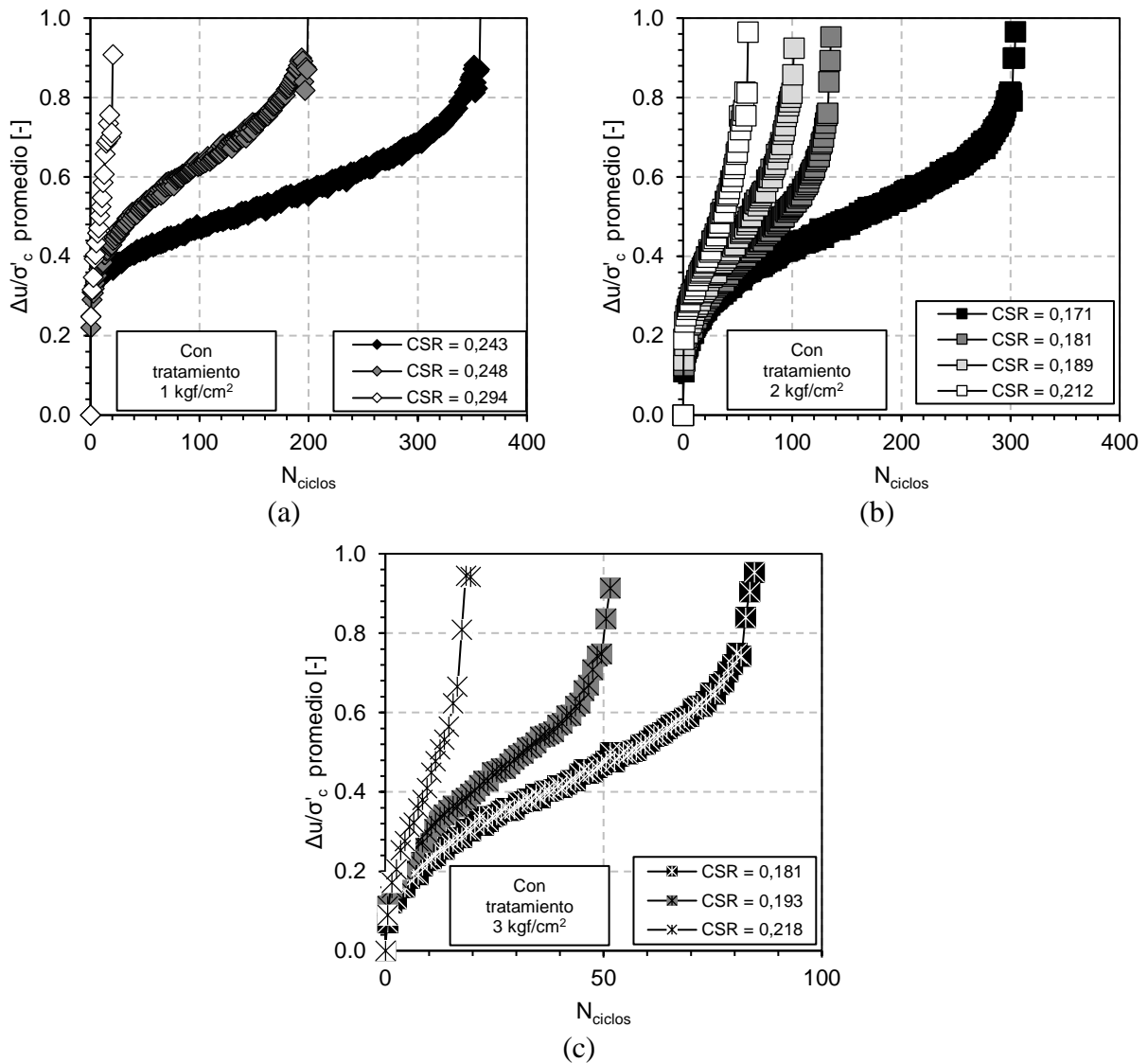


Figura 6-19. Desarrollo del exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente) con tratamiento

Aquí es posible notar que, a una mayor sollicitación, se requiere un menor número de ciclos para que la presión de poros sea igual al confinamiento inicial al que se está ensayando, tanto para los ensayos sin tratamiento como los con tratamiento, comportamiento evidenciado en otros estudios de arenas de relave (Corral 2008; Maureira 2012; Vargas 2015).

En la Figura 6-20 y Figura 6-21 se presenta el desarrollo del exceso de presión de poros normalizado por el confinamiento inicial versus el número de ciclos normalizado por el ciclo en el que licúa para todos los ensayos realizados. Además, en la Figura 6-22 se muestran la comparación por confinamiento entre los ensayos sin tratamiento y los realizados con adición de laponita.

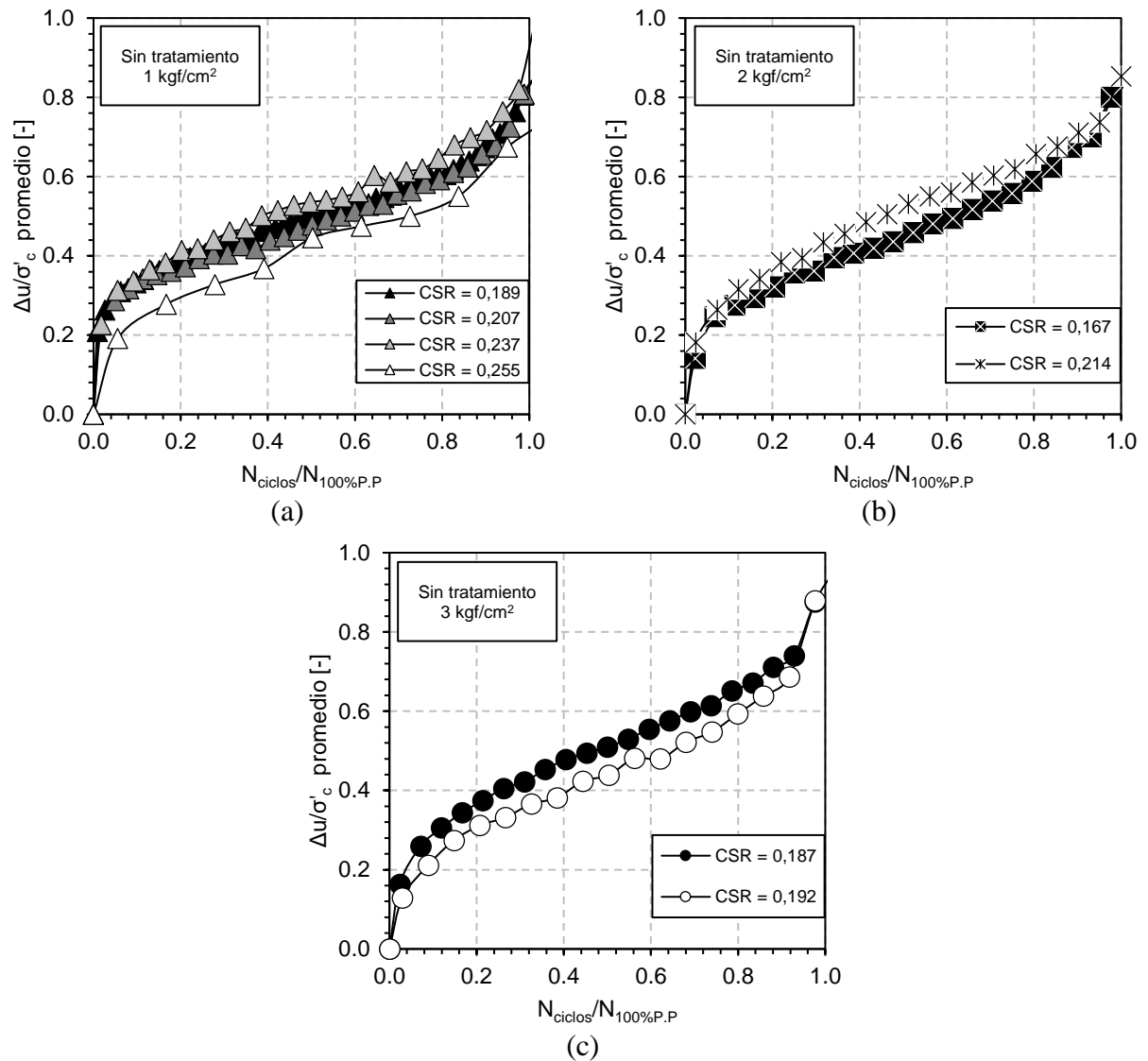


Figura 6-20. Desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente) sin tratamiento

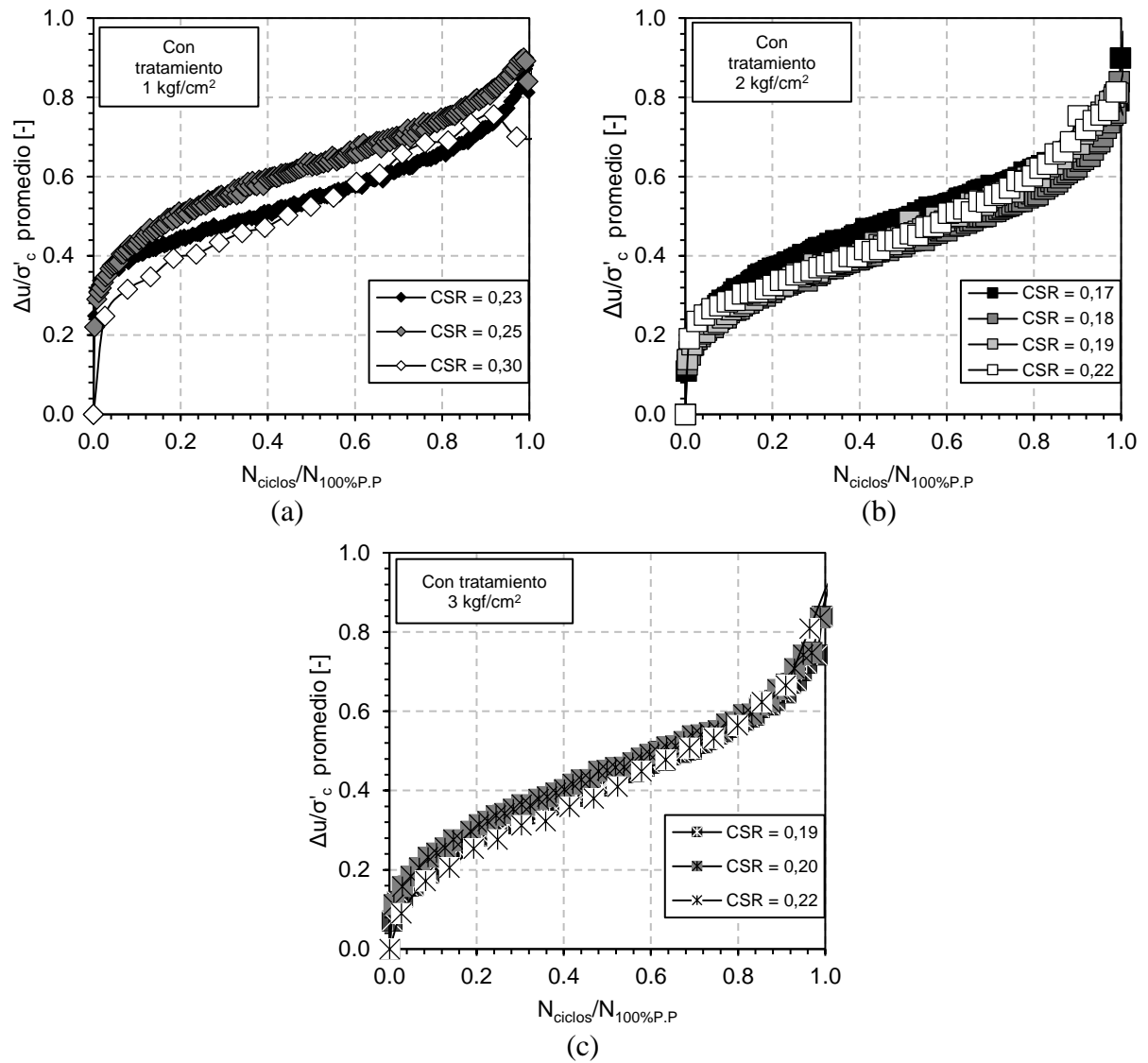


Figura 6-21. Desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente) con tratamiento

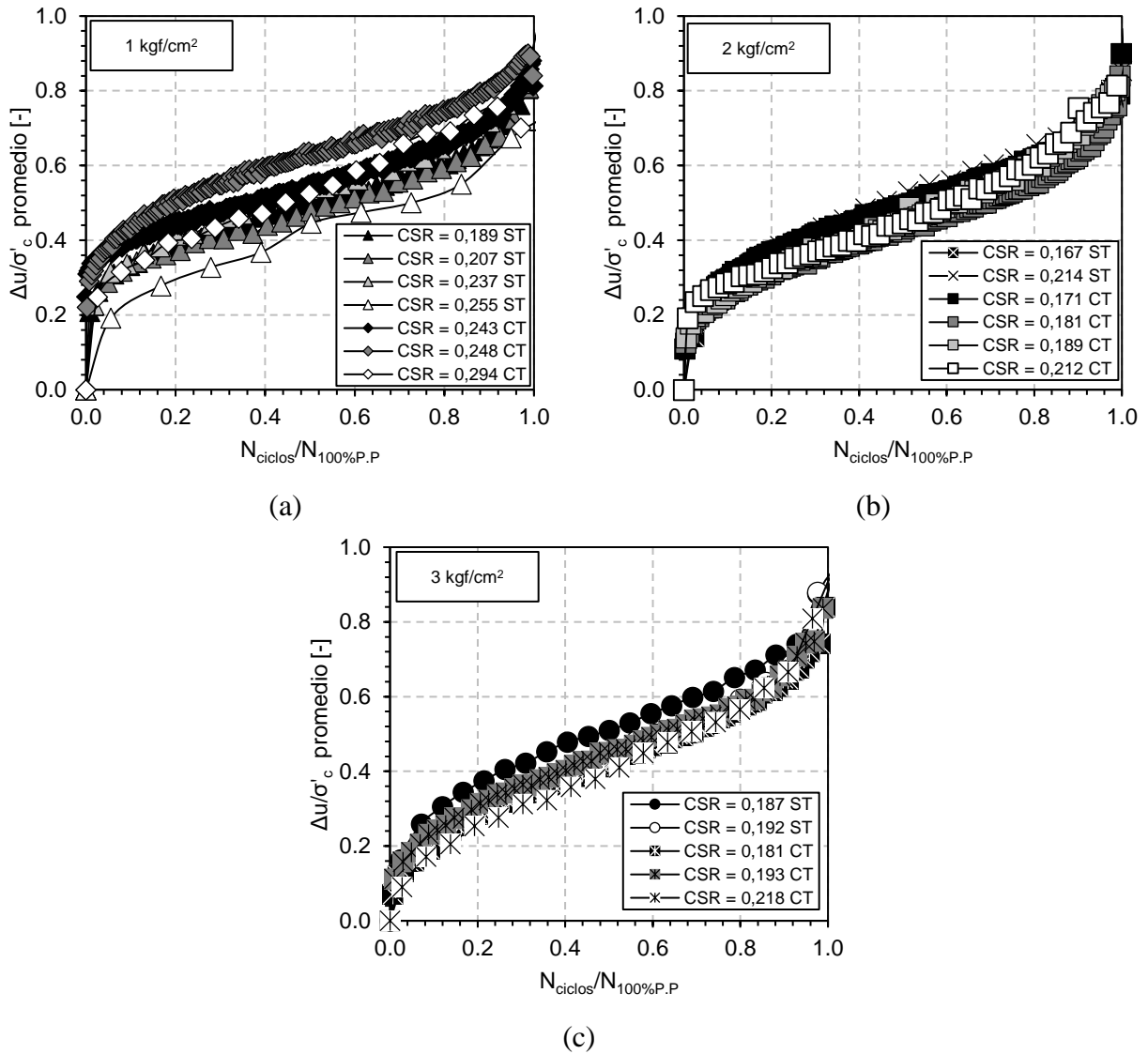


Figura 6-22. Comparación del desarrollo del exceso de presión de poros versus el número de ciclos normalizado por el número de ciclos en el que se alcanza el 100% de presión de poros para confinamientos 1, 2 y 3 [kgf/cm²] (a, b y c, respectivamente)

De los gráficos anteriores es posible observar que, en primer lugar, no existe una relación entre el desarrollo del exceso de presión de poros con respecto al valor de CSR. Además, al comparar los ensayos sin y con tratamiento, se tiene que las curvas se encuentran dentro de una misma banda, por lo que no se evidencia un cambio significativo en el exceso de presión de poros al adicionar laponita a la arena de relaves.

En la Figura 6-23 se presentan todos los ensayos juntos, con el fin de comparar el efecto del confinamiento y de la sollicitación sobre el desarrollo del exceso de presión de poros. Además, se agregan en color rojo los límites para arenas propuestas por Lee y Albaisa (1974) y complementadas posteriormente por DeAlba (1975). Esto se realiza con el fin de comparar el comportamiento del material estudiado y del tratamiento utilizado con respecto al comportamiento de las arenas en general, pues así se puede verificar si cambia el comportamiento del material al agregar cierto contenido de finos. Se observa que todos los ensayos quedan dentro de los límites propuestos por Lee y Albaisa (1974) y DeAlba (1975), por lo que el material continúa comportándose como arena al agregar laponita. Sin embargo, tanto en el caso sin tratamiento como con tratamiento, los ensayos realizados al confinamiento más bajo escapan del límite en los primeros ciclos. Este fenómeno es más notorio en el caso de la arena con tratamiento. Eso podría deberse al aumento del contenido de finos producto de la adición de laponita.

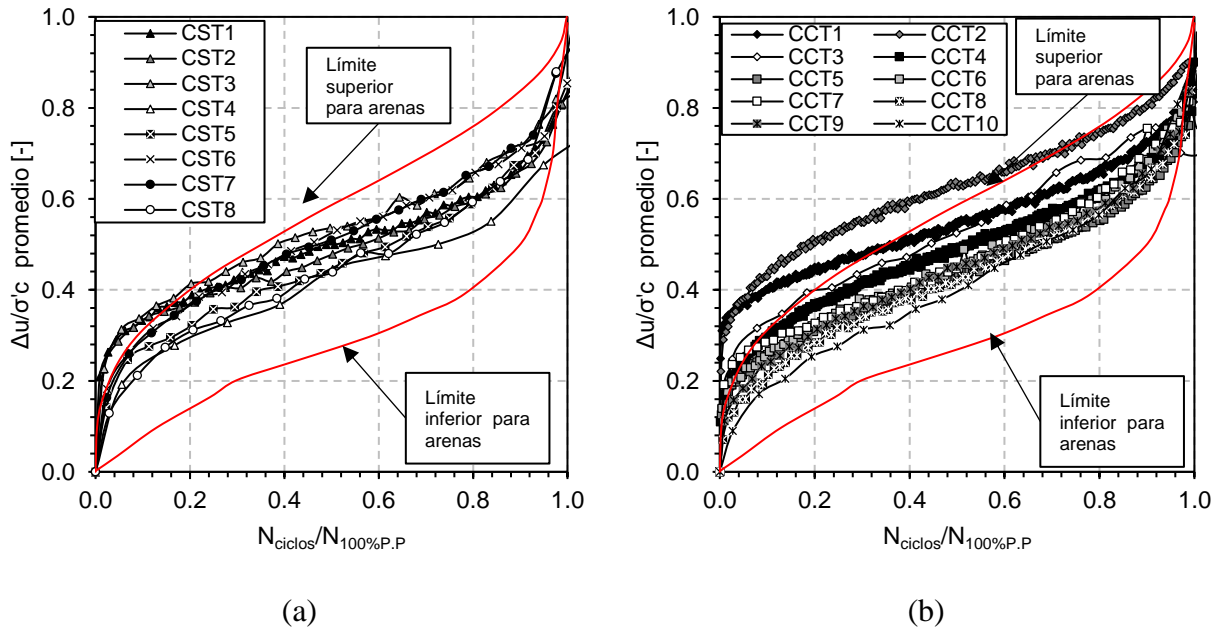


Figura 6-23. Desarrollo del exceso de presión de poros normalizado por el confinamiento versus el número de ciclos normalizado, a) sin tratamiento y b) con tratamiento.

De la Figura 6-23, es posible identificar tres etapas en las curvas. Una etapa inicial en la que la presión de poros incrementa rápidamente. Luego, la presión de poros crece de forma más paulatina. Finalmente, la presión de poros vuelve a tener un gran incremento, alcanzando el valor del confinamiento inicial. De esta forma, es posible determinar la pendiente de la etapa intermedia, la cual se denomina ΔU_m (Figura 6-24). La pendiente se calcula para todos los ensayos a partir de la información entregada en la Figura 6-22 y se grafica con los valores de CSR correspondientes. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6-25.

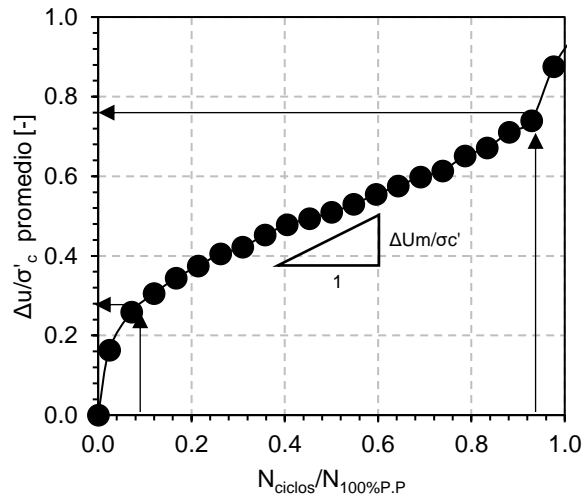
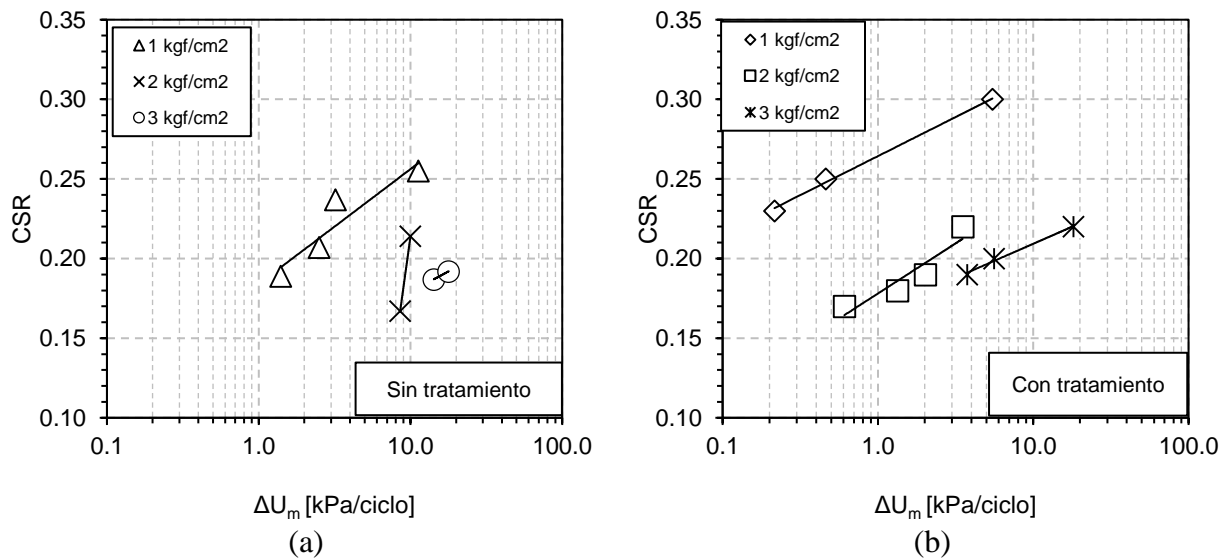


Figura 6-24. Pendiente ΔU_m



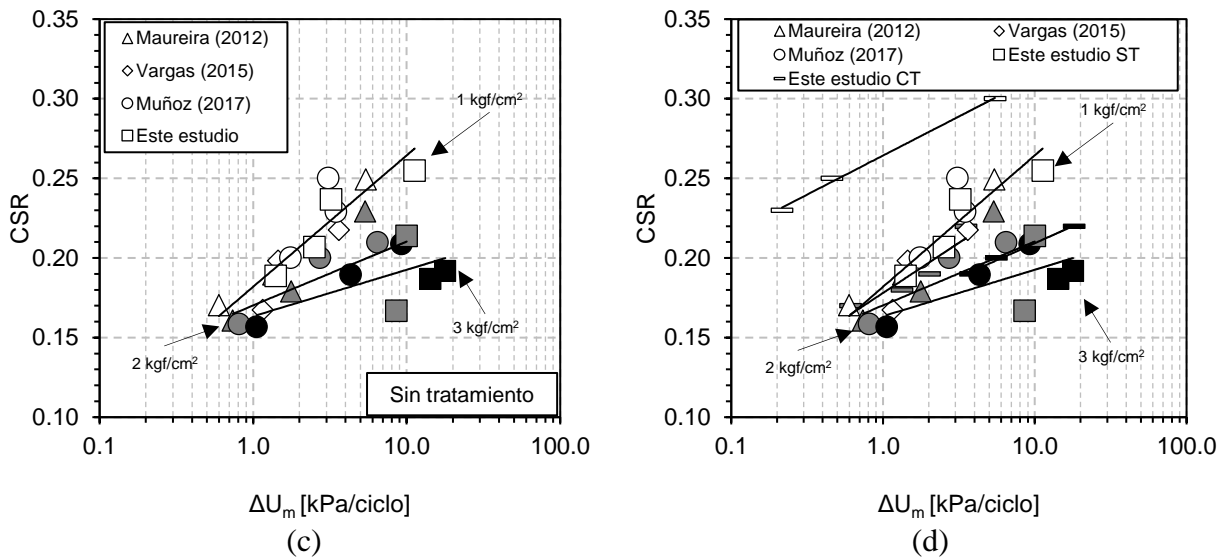


Figura 6-25. CSR – ΔU_m (a) sin tratamiento, (b) con tratamiento, (c) sin tratamiento con estudios anteriores, (d) ensayos sin tratamiento (ST) y con tratamiento (CT)

En la Figura 6-25 (a) y (b) se puede ver que, al aumentar el confinamiento, a un mismo valor de CSR, la pendiente es mayor, lo que implica que se existe una mayor generación de presión de poros. Sin embargo, en la Figura 6-25 (a) es posible notar que existe un comportamiento distinto para el confinamiento de 2 [kgf/cm²]. Es por lo que se decide agregar a la comparación los estudios de Maureira (2012), Vargas (2015) y Muñoz (2017). Esto se presenta en la Figura 6-25 (c), donde en general se tiene que los resultados obtenidos concuerdan con los estudios previos, salvo para un ensayo realizado con un confinamiento de 2 [kgf/cm²]. Esto se debe a que, en el caso de los ensayos sin tratamiento, existe una mayor dispersión de los resultados obtenidos con respecto a los de Muñoz (2017) (Ver Figura 4-3). Por último, en la Figura 6-25 (d) se comparan los valores sin tratamiento y con tratamiento. Aquí se puede observar que, en el caso con tratamiento, las curvas se desplazan hacia arriba, lo que implica que, para un mismo valor de CSR, existe una mayor generación de presión de poros en el caso sin tratamiento. Sin embargo, esto es más notorio para un confinamiento de 1 [kgf/cm²], pues existe una mayor diferencia de la generación de presión de poros con respecto al caso sin tratamiento. Esto se evidencia en que a un confinamiento de 1 [kgf/cm²], para un mismo valor de CSR, la pendiente con tratamiento disminuye aproximadamente 200 veces. En cambio, para los confinamientos mayores la pendiente disminuye 30 veces aproximadamente.

6.4. Comparación ensayos sin tratamiento y con tratamiento

Una vez visto que la resistencia cíclica aumenta al agregar un 1% de contenido de laponita a la arena de relave, es necesario comparar en detalle qué es lo que sucede con los ensayos realizados. Para esto, se realizan comparaciones en dos ámbitos:

- (1) Ensayos que poseen un CSR similar
- (2) Ensayos que licúan a un número de ciclos cercano

Los ensayos por comparar se muestran en la Tabla 6-7 y Tabla 6-8. Cabe destacar que los valores de CSR corresponden al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 6-7. Ensayos por comparar con CSR similares

σ'_c [kgf/cm ²]	Sin tratamiento		Con tratamiento	
	CSR	Autor	CSR	Autor
1	0.237	Rodríguez (2019)	0.243	Rodríguez (2019)
	0.255	Rodríguez (2019)	0.248	Rodríguez (2019)
2	0.210	Muñoz (2017)	0.212	Rodríguez (2019)
3	0.194	Rodríguez (2019)	1.93	Rodríguez (2019)
	0.220	Muñoz (2017)	0.218	Rodríguez (2019)

Tabla 6-8. Ensayos por comparar con N similar

σ'_c [kgf/cm ²]	Sin tratamiento		Con tratamiento	
	CSR	Autor	CSR	Autor
1	0.230	Muñoz (2017)	0.294	Rodríguez (2019)
2	0.160	Muñoz (2017)	0.184	Rodríguez (2019)
3	0.160	Muñoz (2017)	0.192	Rodríguez (2019)
	0.194	Rodríguez (2019)	0.218	Rodríguez (2019)

De esta forma, se comparan los ensayos mediante cuatro curvas:

- (1) $\Delta u / \sigma'_c - N_{\text{ciclos}}$
- (2) $\varepsilon - N_{\text{ciclos}}$
- (3) $\Delta \sigma - N_{\text{ciclos}}$
- (4) $\Delta u / \sigma'_c \text{ promedio} - N_{\text{ciclos}}$

En los gráficos, de color rojo se presenta los resultados de los ensayos con tratamiento, mientras que en color negro los resultados de los ensayos sin tratamiento. Además, debido a que para un CSR similar, el ensayo con tratamiento suele licuar a un mayor número de ciclos, se presentan los gráficos normalizados por el número de ciclos en el que el suelo licua. Así, a continuación, se presentan algunas comparaciones como ejemplo. El resto de las comparaciones se presenta en el Capítulo 9, de anexos.

6.4.1. CSR similar

A continuación, se presentan los gráficos mencionados en la sección para todos los casos de la Tabla 6-7..

6.4.1.1. CSR = 0.255 ST – CSR = 0.248 CT y $\sigma'_c = 1[\text{kgf/cm}^2]$

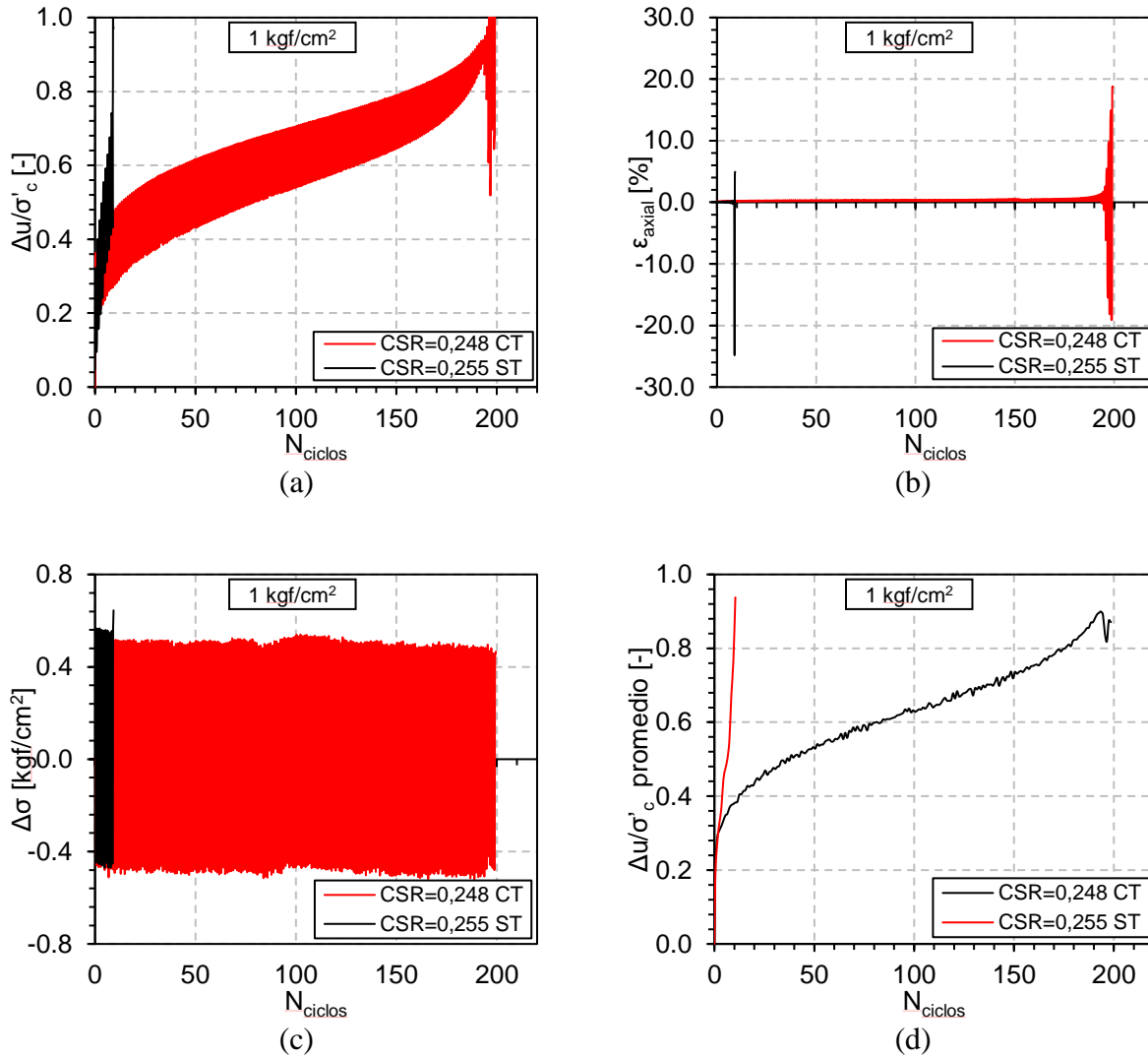


Figura 6-26. Comparación ensayo CSR=0.255 sin y CSR=0.248 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c$ – N_{ciclos} , (b) ε – N_{ciclos} , (c) $\Delta\sigma$ – N_{ciclos} , (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}

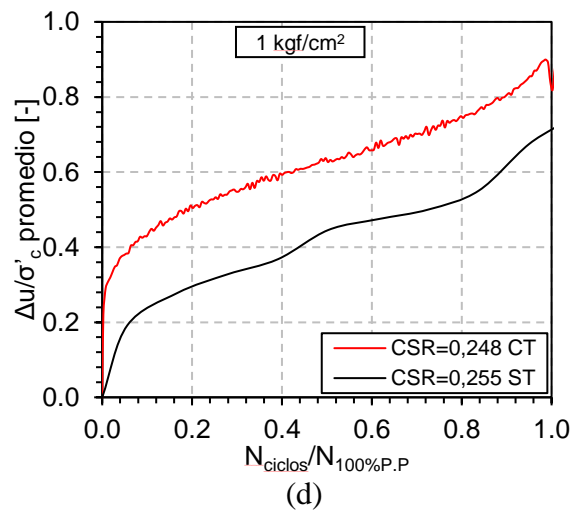
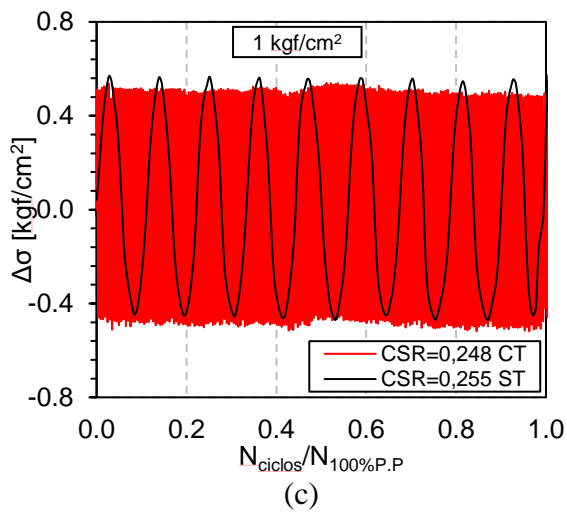
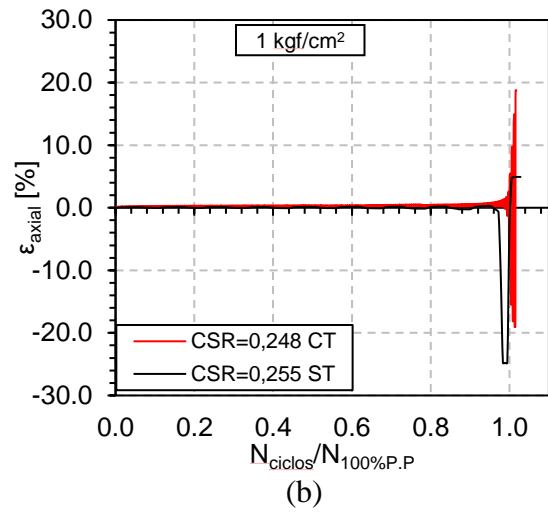
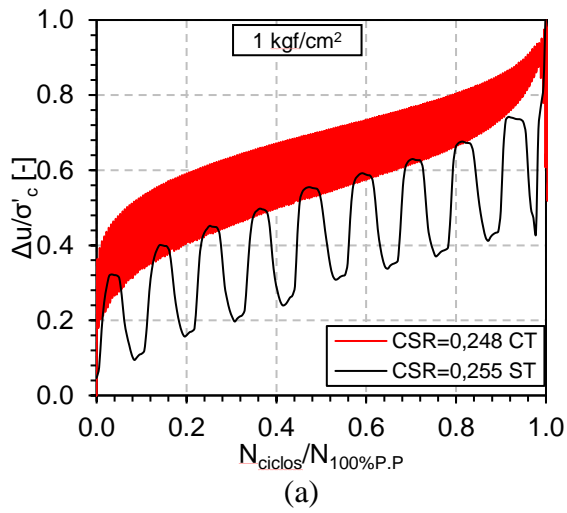


Figura 6-27. Comparación ensayo CSR=0.255 sin y CSR=0.248 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c \text{ promedio} - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$

6.4.1.2. CSR = 0.21 ST – CSR = 0.212 CT y $\sigma'_c = 2[\text{kgf/cm}^2]$

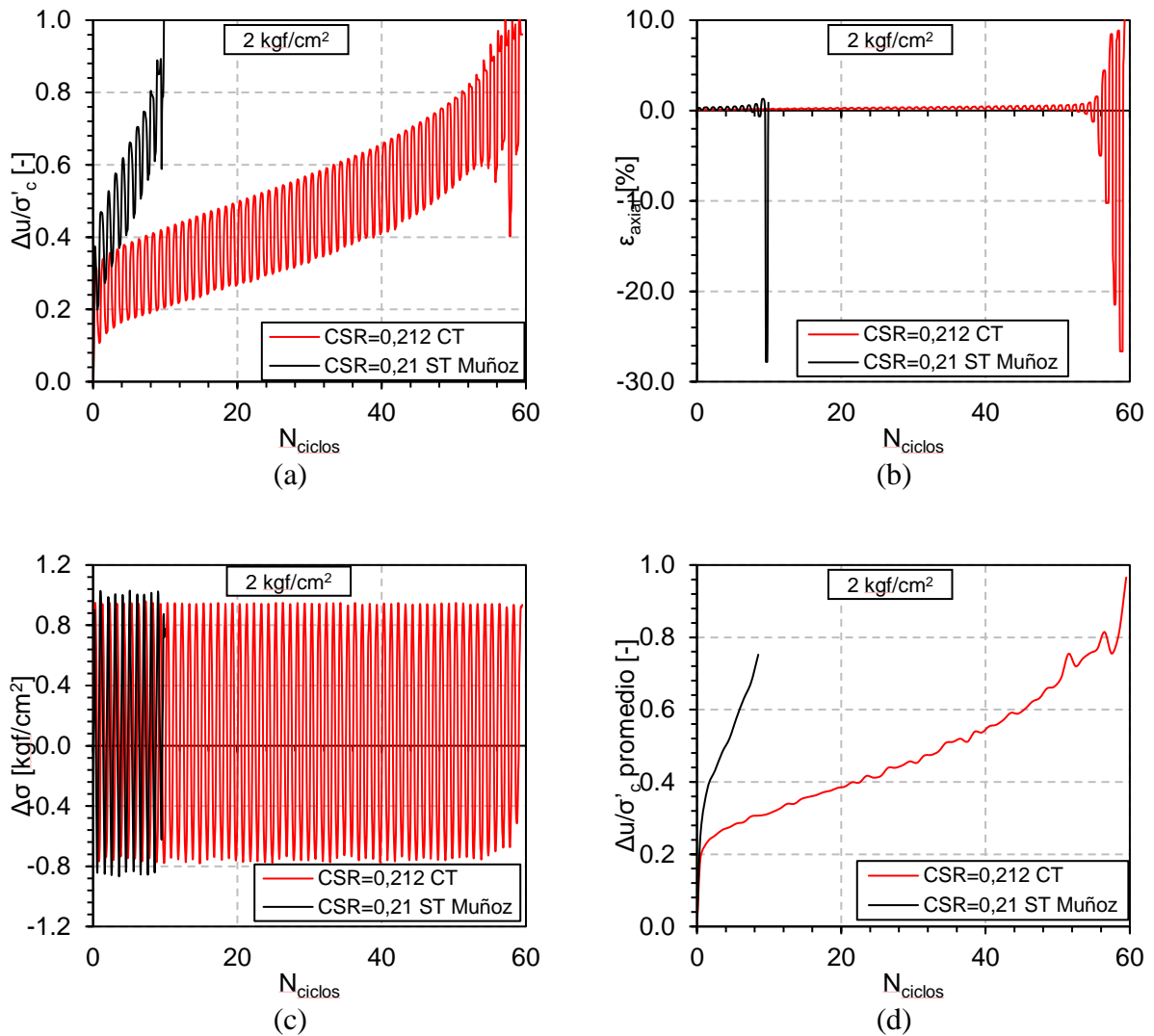


Figura 6-28. Comparación ensayo CSR=0.21 sin tratamiento y CSR=0.212 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c$ – N_{ciclos} , (b) ε – N_{ciclos} , (c) $\Delta\sigma$ – N_{ciclos} , (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}

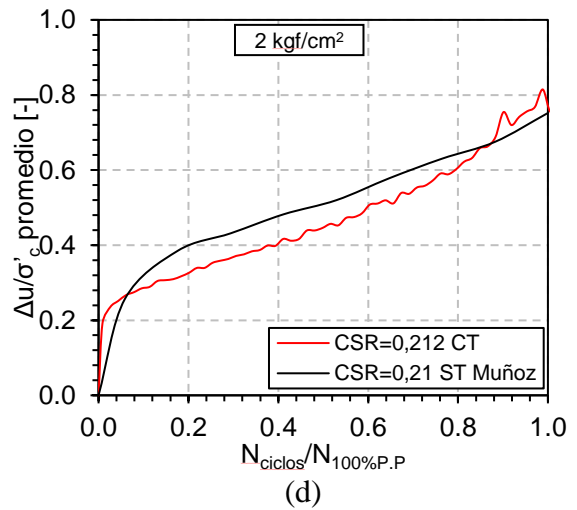
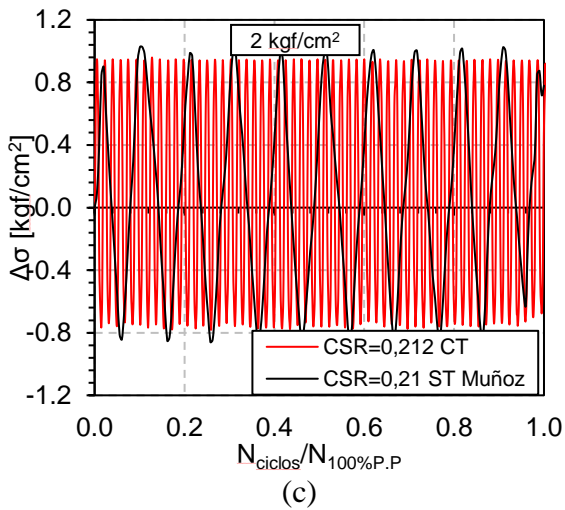
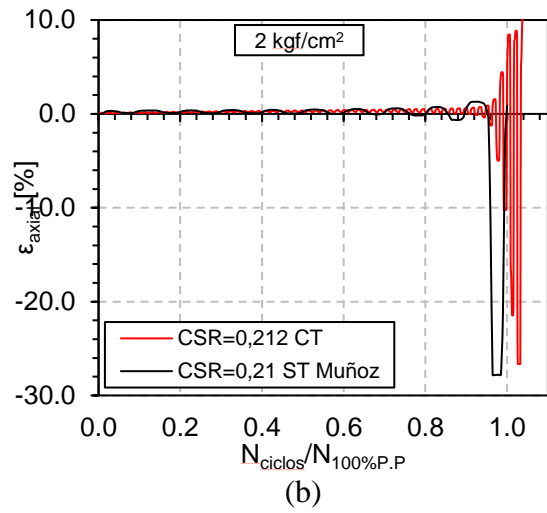
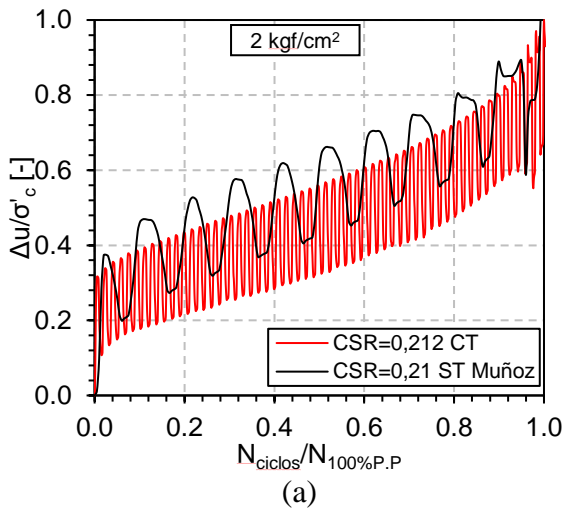


Figura 6-29. Comparación ensayo CSR=0.21 sin tratamiento y CSR=0.212 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c \text{ promedio} - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$

6.4.1.3. CSR = 0.22 ST – CSR = 0.218 CT y $\sigma'_c = 3[\text{kgf/cm}^2]$

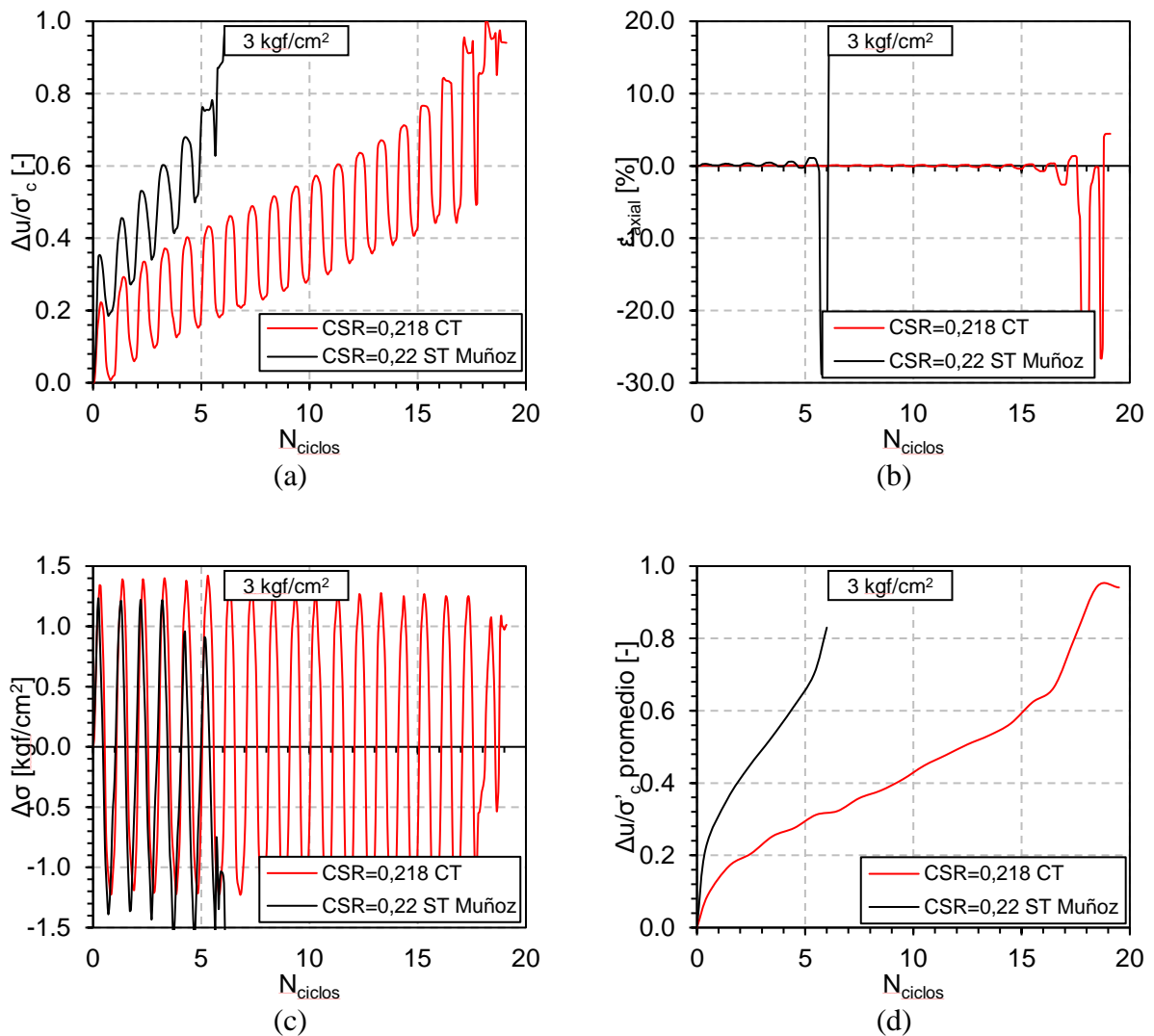


Figura 6-30. Comparación ensayo CSR=0.22 sin tratamiento y CSR=0.218 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u / \sigma'_c - N_{\text{ciclos}}$, (b) $\epsilon - N_{\text{ciclos}}$, (c) $\Delta \sigma - N_{\text{ciclos}}$, (d) $\Delta u / \sigma'_c \text{ promedio} - N_{\text{ciclos}}$

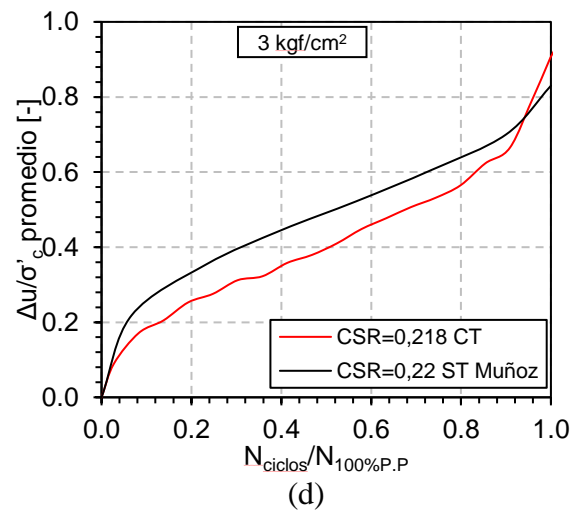
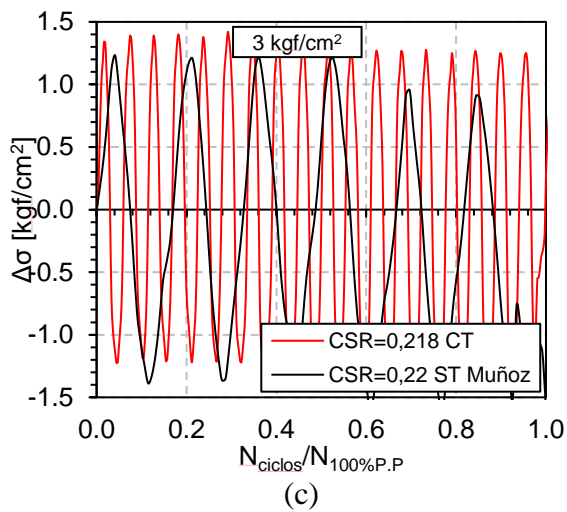
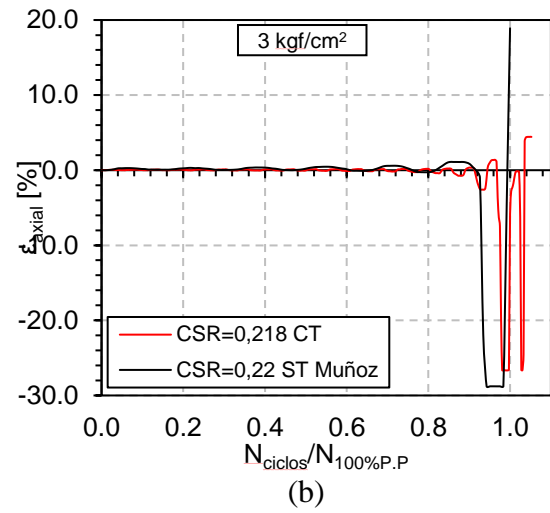
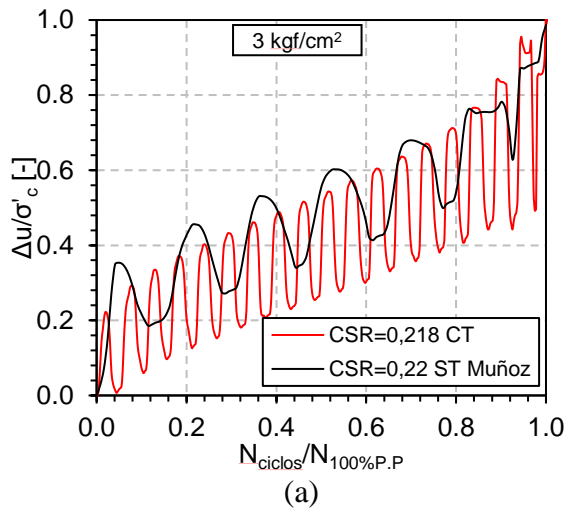


Figura 6-31. Comparación ensayo CSR=0.22 sin tratamiento y CSR=0.218 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (b) $\varepsilon - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (c) $\Delta\sigma - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$, (d) $\Delta u/\sigma'_c \text{ promedio} - N_{\text{ciclos}}/N_{100\%P.P.}$

6.4.2. N similar

6.4.2.1. CSR = 0.23 ST – CSR = 0.294 CT y $\sigma'_c = 1$ [kgf/cm²]

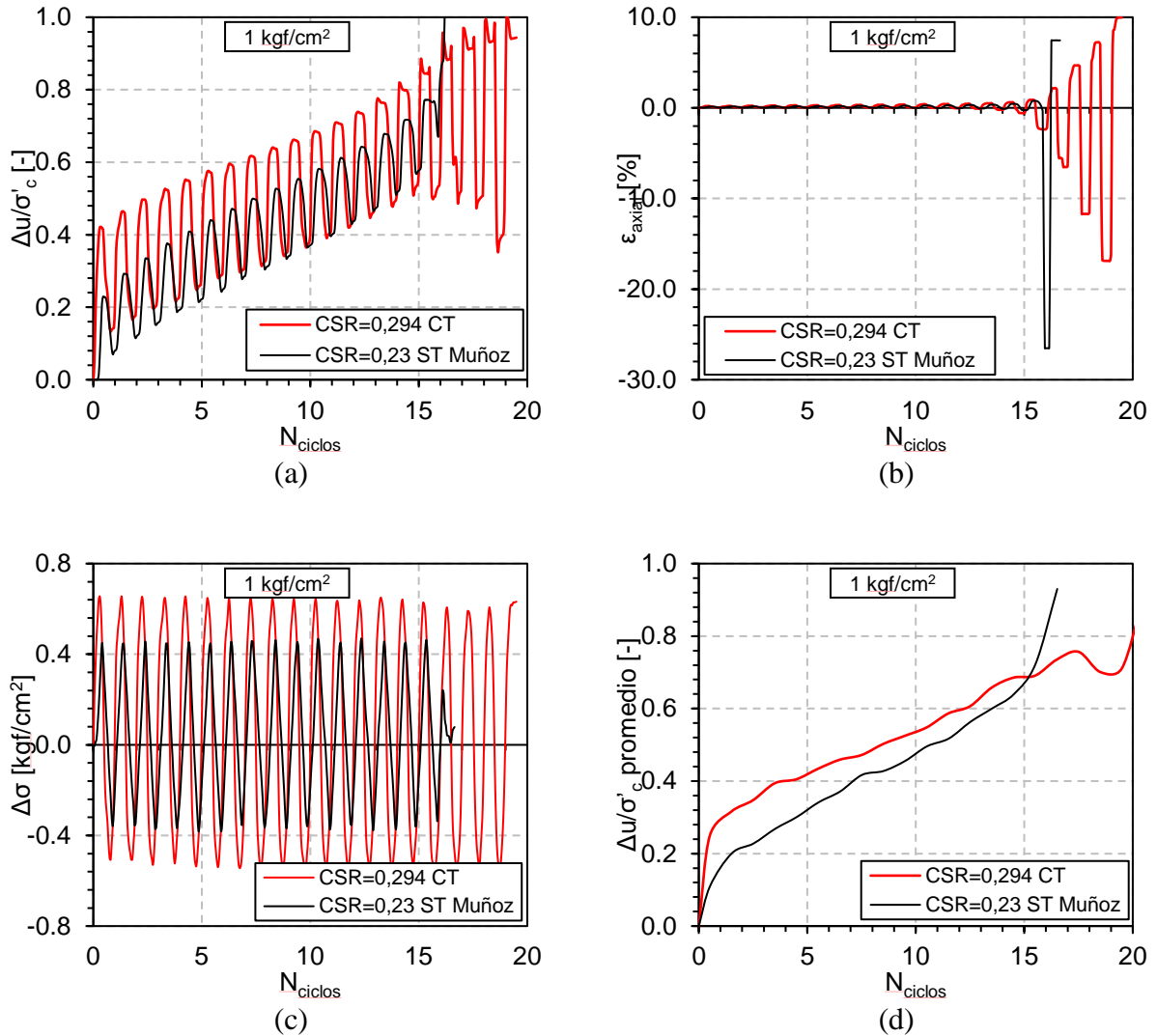


Figura 6-32. Comparación ensayo CSR=0.23 sin tratamiento y CSR=0.294 con tratamiento, confinamiento de 1 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c$ – N_{ciclos} , (b) ϵ – N_{ciclos} , (c) $\Delta\sigma$ – N_{ciclos} , (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}

6.4.2.2. CSR = 0.16 ST – CSR = 0.184 CT y $\sigma'_c = 2$ [kgf/cm²]

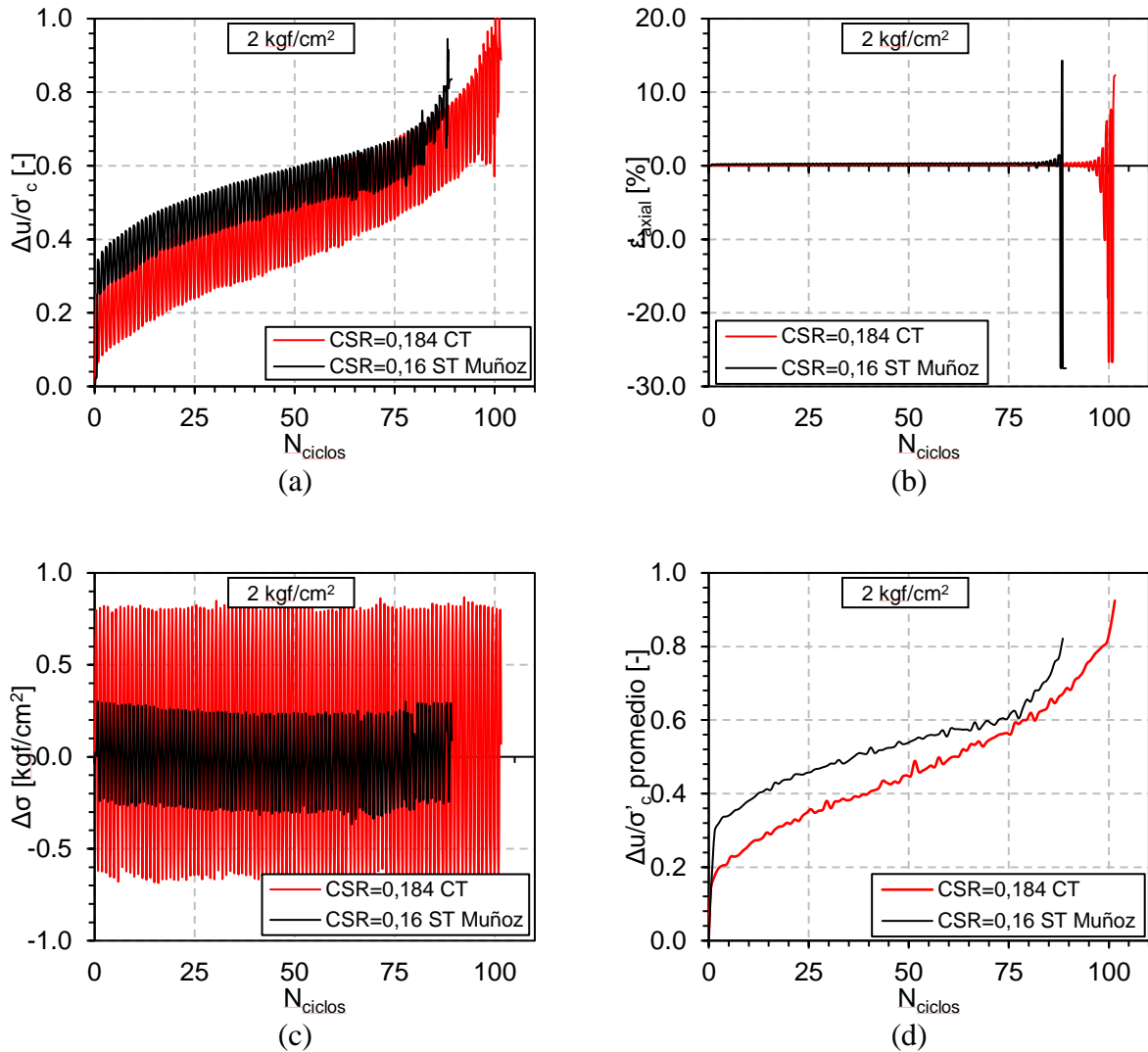


Figura 6-33. Comparación ensayo CSR=0.16 sin tratamiento y CSR=0.184 con tratamiento, confinamiento de 2 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c$ – N_{ciclos} , (b) ϵ – N_{ciclos} , (c) $\Delta\sigma$ – N_{ciclos} , (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}

6.4.2.3. CSR = 0.16 ST – CSR = 0.192 CT y $\sigma'_c = 3$ [kgf/cm²]

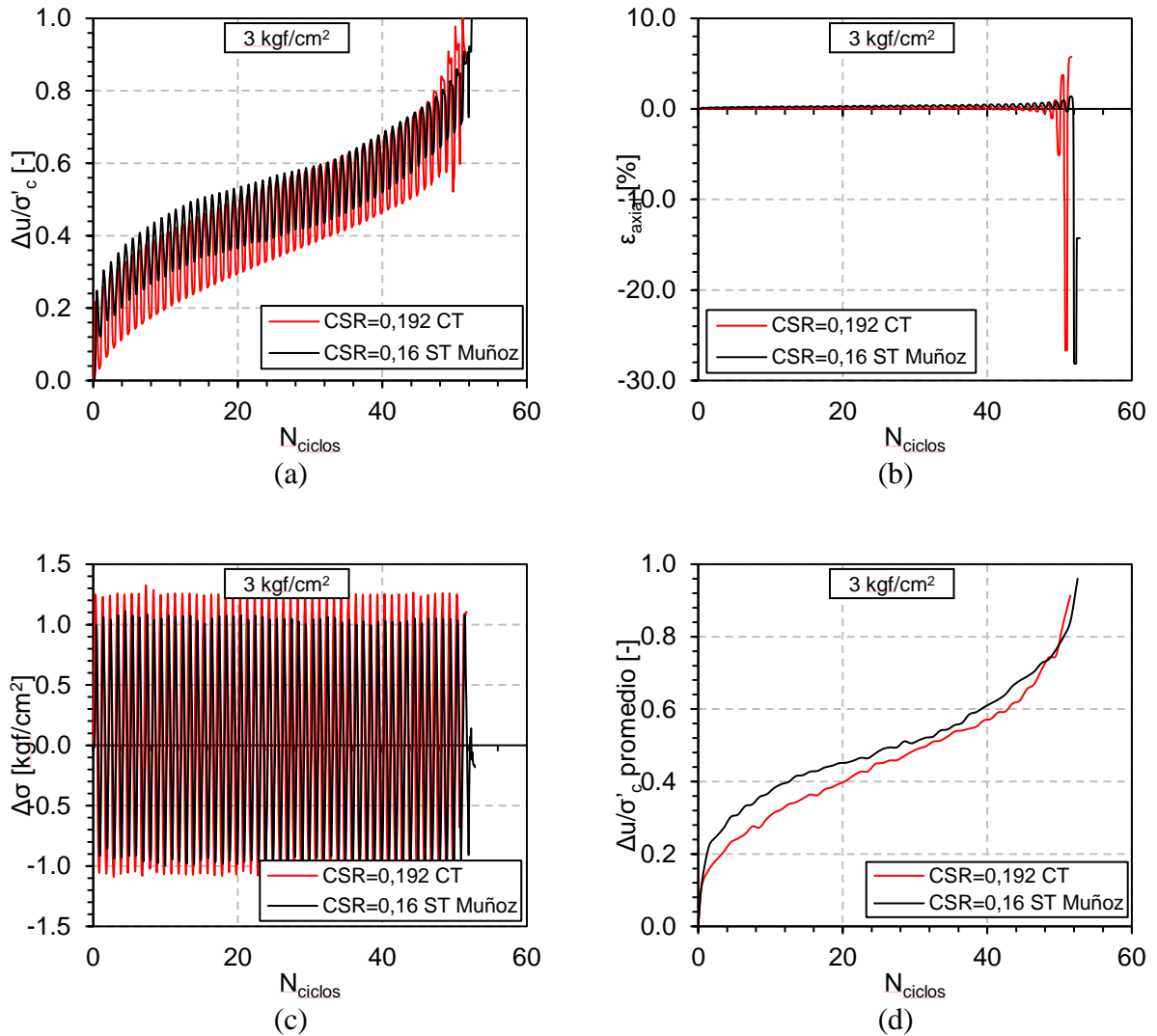


Figura 6-34. Comparación ensayo CSR=0.16 sin tratamiento y CSR=0.192 con tratamiento, confinamiento de 3 [kgf/cm²]. (a) $\Delta u/\sigma'_c$ – N_{ciclos} , (b) ϵ – N_{ciclos} , (c) $\Delta\sigma$ – N_{ciclos} , (d) $\Delta u/\sigma'_c$ promedio – N_{ciclos}

De las figuras anteriores es posible observar varios fenómenos. En primer lugar, para un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²] se tiene que el desarrollo del exceso de presión de poros es mayor en los primeros ciclos. Esto ocurre tanto para los ensayos con el mismo valor de CSR normalizado por el número de ciclos como para los ensayos con el mismo N (Ver Figura 6-27 (d) y Figura 6-32 (d)). En cambio, para los confinamientos de 2 [kgf/cm²] (Figura 6-29 (d) y Figura 6-33 (d)) y 3 [kgf/cm²] (Figura 6-31 (d) y Figura 6-34 (d)) la presión de poros normalizada promedio se comporta de forma similar sin y con tratamiento.

En segundo lugar, en cuanto a la deformación, se tiene que para los ensayos con tratamiento y con un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²] existe una disminución cercana a un 30% de la deformación axial al momento de licuar. Este fenómeno no ocurre para el resto de los confinamientos. Sin embargo, en los tres confinamientos, es posible notar que la deformación axial aumenta de forma más brusca en el caso de los ensayos sin tratamiento, mientras que con tratamiento la deformación axial va aumentando de forma paulatina. De esto se puede decir que, al agregar laponita a la arena de relaves, el incremento de la deformación axial por ciclo disminuye. Por lo tanto, el material, para una misma sollicitación, licua en un número mayor de ciclos.

6.5. Comparación entre métodos de mejoramiento

Tal como se detalla en la Sección 2.5, se han realizado estudios con distintos métodos para mejorar la resistencia cíclica de arenas. En la Figura 6-35 se muestra un resumen de estos. Antes de comenzar a comparar con los estudios en cuestión, es necesario contextualizar los tipos de arenas que se utilizaron en cada uno de ellos y su porcentaje de contenido de finos. En la Tabla 6-9 se presentan las arenas utilizadas en cada uno de ellos y la información general de todos los estudios. Aquí es posible notar que en la mayoría de los estudios se han utilizado arenas limpias. Mientras que aquellas arenas con material fino que se han utilizado contienen un porcentaje relativamente bajo de finos comparado con la arena relave del presente estudio, siendo sólo la arena utilizada por Huang y Wang (2016) la única cercana. Todo esto se puede corroborar en la Figura 6-1.

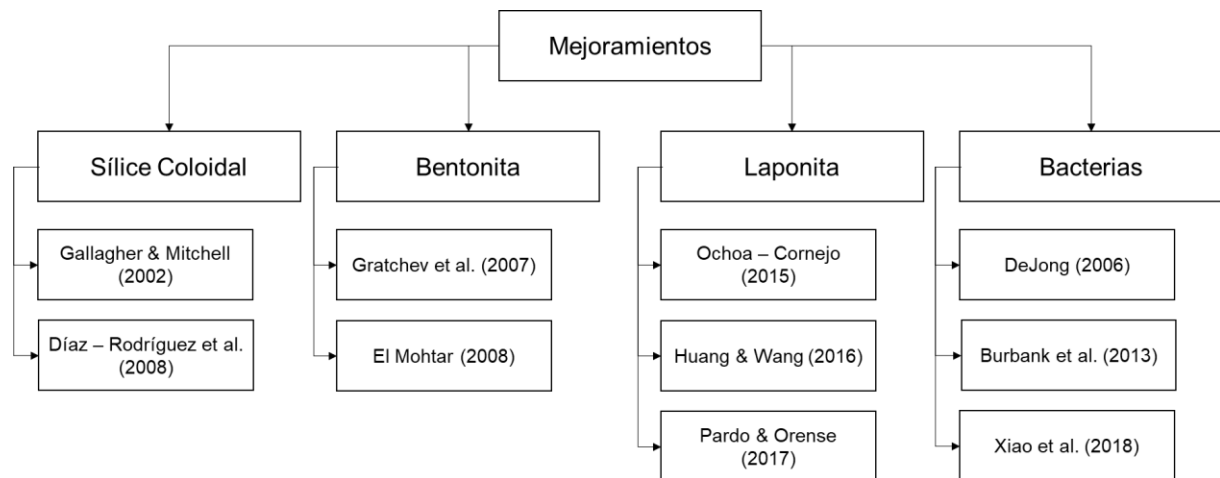


Figura 6-35. Resumen métodos de mejoramiento en arenas

Tabla 6-9. Información de los estudios para los distintos mejoramientos

Método	Autor(es)	Arena	%CF	Método de Preparación	DR [%] O e [-]	Tiempo de Envejecimiento [días]	σ'_c [kgf/cm ²]	B - value [%]	Criterio Licuación	¿Miden presión de poros?
Sílica Coloidal	Gallagher & Mitchell (2002)	Monterrey No. 0/30	0	Wet Pluviation	DR=22	4 a 56	1	-	1; 2; 5% D.A	No
	Díaz – Rodríguez et al. (2008)	Lázaro Cárdenas	11,5	Wet Pluviation	DR=40	7	0.3 ; 0.6 ; 0.9	-	5% D.A	Sí
Bentonita	Gratchev et al. (2007)	S7	~10	Dry Deposition	e=0.918-0.924	-	1.07	96 - 98	$u/\sigma'_c \geq 0.95$	Sí
	El Mohtar (2008)	Ottawa C778	0	Dry Pluviation	DR=32-43*	1 a 10	1	97 promedio	5% D.A	Sí
Laponita	Ochoa – Cornejo (2015)	Ottawa C778	0	Dry Pluviation	DR=15-30*	3	1	Mayor a 95	100% P.P	Sí
	Huang & Wang (2016)	Isla Changxing	~20	Wet Tamping	S/I	2	0.3	-	100% P.P	Sí
	Pardo & Orense (2017)	Mercer (Río Wakaito)	0	Slurry Deposition	e=0.7581*	3 ; 6 ; 9	1	-	N.A	Sí
Bacterias	DeJong (2006)	Ottawa 50 – 70	0	Dry Pluviation	DR=35	-	0.5 ; 1	-	N.A	No
	Burbank et al. (2013)	Snake River	-	Water Pluviation	DR=30-39	-	1	Mayor a 95	100% P.P	Sí
	Xiao et al. (2018)	Arena Calcárea	~1	Air Pluviation	DR=47	-	0.5 ; 1 ; 2	Mayor a 95	$u/\sigma'_c \geq 0.95$	Sí

*: Densidades relativas o índice de vacíos esqueléticos. CF: Contenido de Finos. S/I: Sin Información. N.A: No Aplica

6.5.1. Comparación de estudios con Laponita

En primer lugar, se compara el presente estudio con aquellos que han utilizado el método de mejoramiento con laponita. Así, se verán los estudios de Ochoa – Cornejo et al. (2016), Huang y Wang (2016), y Pardo y Orense (2017). Para poder realizar una comparación entre los estudios, es importante conocer los parámetros de confección de las muestras utilizadas en cada uno de ellos, los cuales se muestran en la Tabla 6-9. Aquí, es posible ver que cada uno de los estudios ha preparado las probetas por distintos métodos. En primer lugar, Ochoa – Cornejo et al. (2016) fabrica la probeta mediante “dry pluviation”, mezclando previamente la arena seca con laponita. Huang y Wang (2016) mezclan la arena con laponita, para luego armar la probeta mediante “wet tamping”. Por último, Pardo y Orense (2017) preparan una solución de laponita, la cual mezclan con la arena y forman las probetas mediante “slurry deposition”. Por otro lado, es importante destacar que la definición de contenido de laponita varía de un estudio a otro. Ochoa – Cornejo et al. (2016) considera el porcentaje de laponita en función de la masa seca de la arena. Huang y Wang (2016) ven el contenido de laponita en función del contenido de agua de las probetas. Por último, Pardo y Orense (2017) lo consideran al igual que Ochoa – Cornejo et al. (2016), es decir considera el porcentaje de laponita en función de la masa seca de la arena. Sin embargo, agrega que ese porcentaje de laponita a una solución con agua, obteniendo una concentración igual a 3.4%. Con lo anterior, se comparará utilizando los ensayos de Ochoa – Cornejo et al. (2016) para un contenido de laponita igual a 1% y los resultados de Pardo y Orense (2017). En el caso del estudio de Huang y Wang (2016) se utilizarán los ensayos realizados de concentraciones iguales a 3.5%, que es el valor más cercano al presente estudio, el cual corresponde a 1% de laponita con respecto a la masa seca de la arena de relaves, y un 3.5% en función de la masa de agua de las probetas cuando estas se encuentran saturadas.

Finalmente, es importante conocer los tiempos de envejecimiento en cada uno de los ensayos para las concentraciones seleccionadas y el confinamiento efectivo inicial. Esta información se presenta en la Tabla 6-9. Ochoa – Cornejo et al. (2016) utiliza un tiempo de envejecimiento de tres días, y ensaya con un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²]. Por otro lado, se tiene que Huang y Wang (2016) realizan los ensayos con un tiempo de envejecimiento igual a dos días, y con un confinamiento inicial menor, igual a 0.3 [kgf/cm²]. En el caso de Pardo y Orense (2017), solo se utiliza para comparar los ensayos con un envejecimiento igual a tres días, que corresponde al tiempo utilizando en el presente estudio.

Teniendo en cuenta las condiciones de los estudios, se realiza una comparación con los resultados de Ochoa – Cornejo et al. (2016) y Pardo y Orense (2017). Huang y Wang (2016) se descarta debido a la gran diferencia del confinamiento efectivo inicial. Comparando los resultados obtenidos de la resistencia cíclica para todos los estudios, y considerando el presente, se obtiene la Figura 6-36. En este gráfico cada símbolo representa a un estudio distinto. Por otro lado, los símbolos blancos representan a los resultados sin tratamiento, mientras que los símbolos negros representan los resultados obtenidos al agregar el tratamiento.

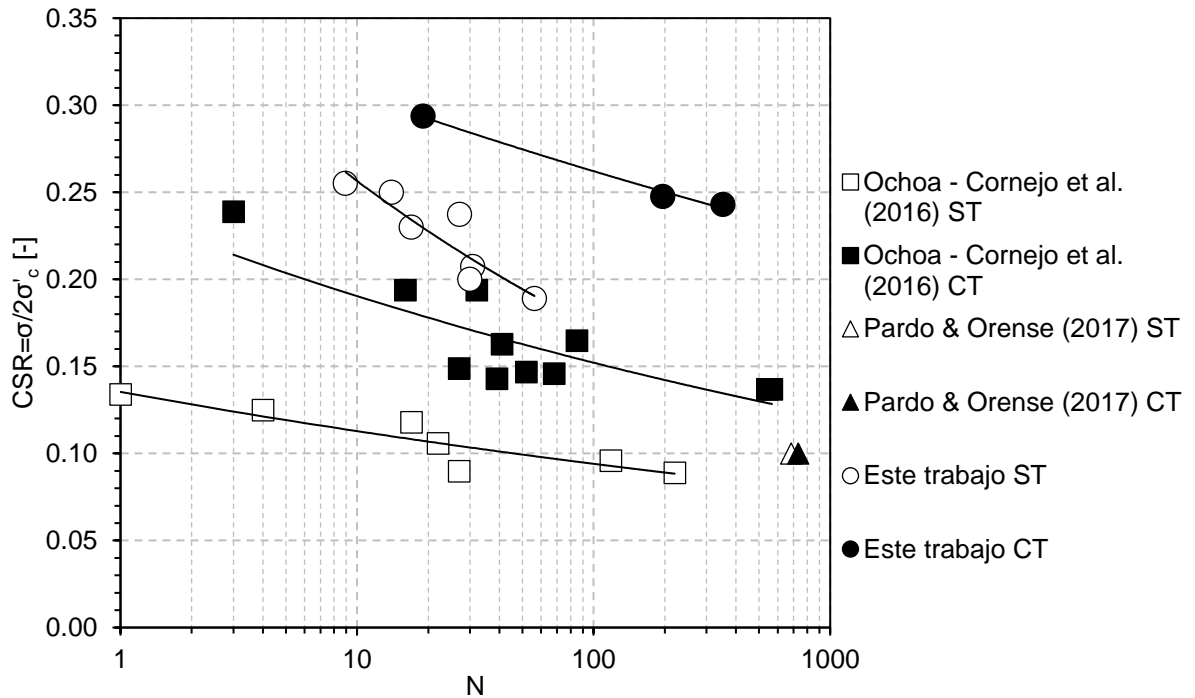


Figura 6-36. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para los distintos estudios con lapónita. ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento

Del gráfico es posible notar que en todos los estudios se obtiene una mejora a la resistencia a la licuación. En particular, se observa que las curvas respectivas al presente estudio se encuentran ubicadas más arriba con respecto a las pertenecientes del resto de los estudios. Para poder medir la magnitud de la mejora en cada uno de los casos, se determinan las mismas razones mencionadas en la Sección 6.3. Estos valores se muestran en la Tabla 6-10 y Tabla 6-11. Cabe destacar que para algunos casos fue necesario utilizar la ecuación de la regresión.

Tabla 6-10. Número de ciclos con tratamiento sobre número de ciclos sin tratamiento a una misma resistencia cíclica para todos los estudios con lapónita

Autor(es)	CSR _{ST}	CSR _{CT}	N _{ST}	N _{CT}	N _{CT} /N _{ST}
Ochoa – Cornejo et al. (2016)	0.134	0.137	1	542	542
Pardo & Orense (2017)	0.100	0.100	685	734	1
Este trabajo	0.240	0.240	15	383	26
Este trabajo	0.250	0.250	19	723	38

Tabla 6-11. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para todos los estudios con laponita

Autor(es)	N	CSR _{ST}	CSR _{CT}	CSR _{CT} /CSR _{ST}
Ochoa – Cornejo et al. (2016)	20	0.107	0.178	1.7
	30	0.103	0.171	1.7
	40	0.101	0.166	1.6
	50	0.099	0.162	1.6
Este trabajo	20	0.228	0.292	1.3
	30	0.213	0.285	1.3
	40	0.202	0.279	1.4
	50	0.195	0.275	1.4

Los valores anteriores son graficados en la Figura 6-37 donde queda en evidencia que a números de ciclos bajos existe una gran diferencia entre la proporción de los valores de CSR con tratamiento y sin tratamiento, siendo los resultados de Ochoa – Cornejo et al. (2016) los que entregan una mejora mayor, aumentando cerca de un 65% la resistencia a la licuación. Sin embargo, al ir aumentando el número de ciclos, se tiene que la mejora en ambos estudios tiende a acercarse en magnitud. Por otro lado, se ve que los resultados de Ochoa-Cornejo et al. (2016) muestran que la mejora va disminuyendo al ir aumentando el número de ciclos, mientras que, para el caso del presente estudio, se tiene que la mejora va aumentando. Esto tiene como implicancia que, al aumentar el número de ciclos, la mejora obtenida es independiente del estudio.

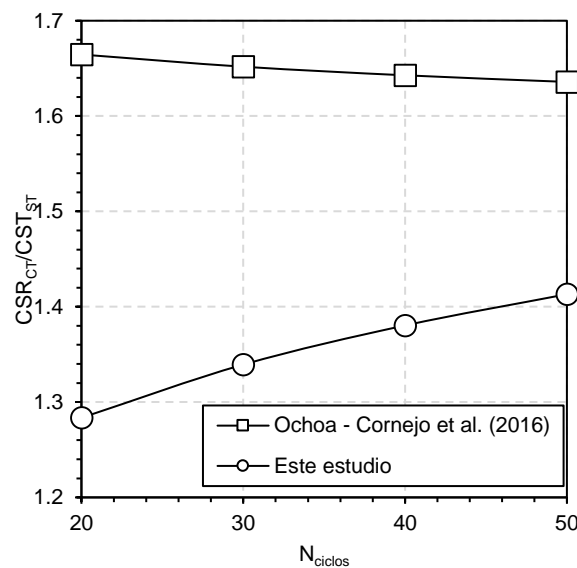


Figura 6-37. Gráfico de CSR_{CT}/CSR_{ST} en función del número de ciclo en el que licúa la arena para los distintos estudios

Además de examinar la magnitud de la mejora con estudios donde se ha utilizado laponita, resulta interesante comparar este método de mejoramiento con otro de los estudios mencionados en la Figura 6-35. Debido a que corresponden a métodos distintos al utilizado en el estudio, se realizan las comparaciones obteniendo el parámetro CSR_{CT}/CSR_{ST}.

6.5.2. Comparación de estudios con Sílica Coloidal

En el caso de la mejora utilizando sílica coloidal, se compara el presente estudio con el realizado por Gallagher y Mitchell (2002) y el de Díaz – Rodríguez (2008). La información general de estos estudios se encuentra en la Tabla 6-9. Aquí se observa que Gallagher y Mitchell (2002) realizan los ensayos a un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²], mientras que Díaz-Rodríguez (2008) utiliza confinamientos más bajos, siendo el más alto igual a 0.9 [kgf/cm²]. Debido a esto, se comparan sólo los resultados para un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²]. Cabe destacar que en ambos estudios utilizan como criterio de licuación la deformación axial en doble amplitud, en particular cuando se alcanza el 5%. Además, en el caso del estudio de Gallagher y Mitchell (2002) se compara con los ensayos con un contenido de sílica coloidal igual a 5% y 10%, pues se encontró más información con esos contenidos. En el caso de Díaz-Rodríguez (2008) sólo se trabajó con un contenido igual a 14.5%. Por último, cabe destacar que Gallagher y Mitchell (2002) trabajan con densidades relativas más sueltas que el resto de los casos a comparar (DR=22% versus DR=40% de Díaz – Rodríguez y DR=35% -aproximadamente- del presente estudio). Los resultados se muestran en la Figura 6-38, donde cada símbolo representa un estudio distinto. Los símbolos blancos representan los resultados sin tratamiento, mientras que los símbolos rellenos corresponden a los resultados con el tratamiento respectivo.

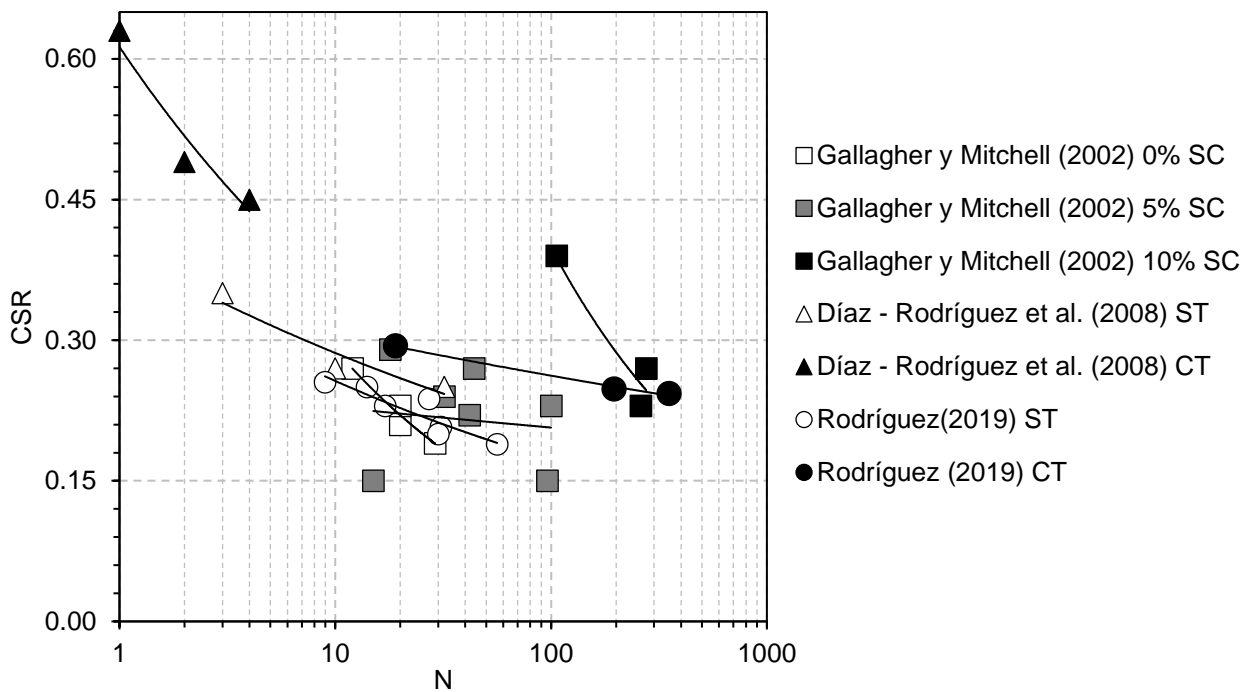


Figura 6-38. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para los distintos estudios con sílica coloidal (SC)

En el gráfico anterior se observa que los resultados sin tratamiento se encuentran prácticamente en la misma banda. Con respecto a los resultados de Gallagher y Mitchell (2002) se tiene que para un contenido de sílica coloidal igual a 5% no existe una gran mejora, teniendo incluso que la curva se intersecta con la curva sin tratamiento. Sin embargo, al aumentar el contenido de sílica coloidal a 10%, la curva se traslada de forma significativa hacia la derecha, aumentando el número de ciclos para una misma sollicitación. En el caso de Díaz – Rodríguez (2008) se tiene que la curva se desplaza hacia arriba al realizar los ensayos con tratamiento.

Para ver la mejora obtenida en cada uno de los estudios, se determina la razón CSR_{CT}/CSR_{ST} en cada caso. Los resultados se muestran en la Tabla 6-12, en la cual se presenta el contenido del tratamiento respectivo utilizado, el número de ciclos al cual se calcula el valor de CSR sin tratamiento y con tratamiento, y la razón obtenida. Cabe destacar en la mayoría de los casos fue necesario utilizar la regresión para obtener el valor.

Tabla 6-12. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para todos los estudios con sílica coloidal

Autor(es)	Contenido utilizado [%]	N	CSR_{ST}	CSR_{CT}	CSR_{CT}/CSR_{ST}
Gallagher y Mitchell (2002)	5	100	0.116	0.207	1.8
	10	100	0.116	0.398	3.4
Díaz – Rodríguez (2008)	14.5	10	0.286	0.350	1.2
Este trabajo	1	20	0.228	0.292	1.3
		100	0.173	0.263	1.5

De la tabla anterior se observa que en el caso de Gallagher y Mitchell (2002), cuando se utiliza un 5% de sílica coloidal, la razón de mejora es similar a la obtenida en el presente estudio. Sin embargo, al aumentar el contenido a 10%, la razón incrementa casi al doble. Sin embargo, del gráfico de la Figura 6-38 se observa que la curva con 10% de sílica coloidal se acerca a la curva con tratamiento de este estudio al aumentar el número de ciclos, por lo que la razón para Gallagher y Mitchell (2002) con 10% de sílica coloidal debería ir disminuyendo al aumentar el número de ciclos. De esta forma, al aumentar al aumentar el número de ciclos, se deberían obtener mejoras similares con respecto al presente estudio. Por otro lado, para el estudio de Díaz – Rodríguez (2008) la razón obtenida para el mismo número de ciclos es prácticamente idéntica con la del estudio, por lo que no existen diferencias si se tratan los materiales bajo las condiciones de ambos estudios.

6.5.3. Comparación de estudios con Bentonita

En el caso de bentonita, en la Figura 6-35 se muestran dos estudios, el de Gratchev (2007) y El Mohtar (2008). Sin embargo, sólo se realizan comparaciones con el último estudio mencionado, debido a que en el caso de Gratchev (2007) no se encontró la información suficiente para poder realizar comparaciones.

La principal información del estudio de El Mohtar (2008) se encuentra en la Tabla 6-9. Aquí se observa que utiliza la misma arena con la que Ochoa – Cornejo et al. (2016) realizó su estudio. Además, realiza los ensayos a un confinamiento de 1 [kgf/cm²] y las muestras se encuentran a densidades relativas esqueléticas de 40% en promedio. En su estudio, El Mohtar (2008) utiliza varios contenidos de bentonita. Sin embargo, se realiza la comparación con un contenido de bentonita igual a 3%. Para este contenido, El Mohtar (2008) realiza ensayos a distintos tiempos de envejecimiento. Estos resultados, junto con los del presente estudio, se muestran en la Figura 6-39. Cada símbolo representa un estudio distinto. Por otro lado, los símbolos blancos muestran los ensayos sin tratamiento, mientras que los símbolos rellenos los realizados con el tratamiento respectivo.

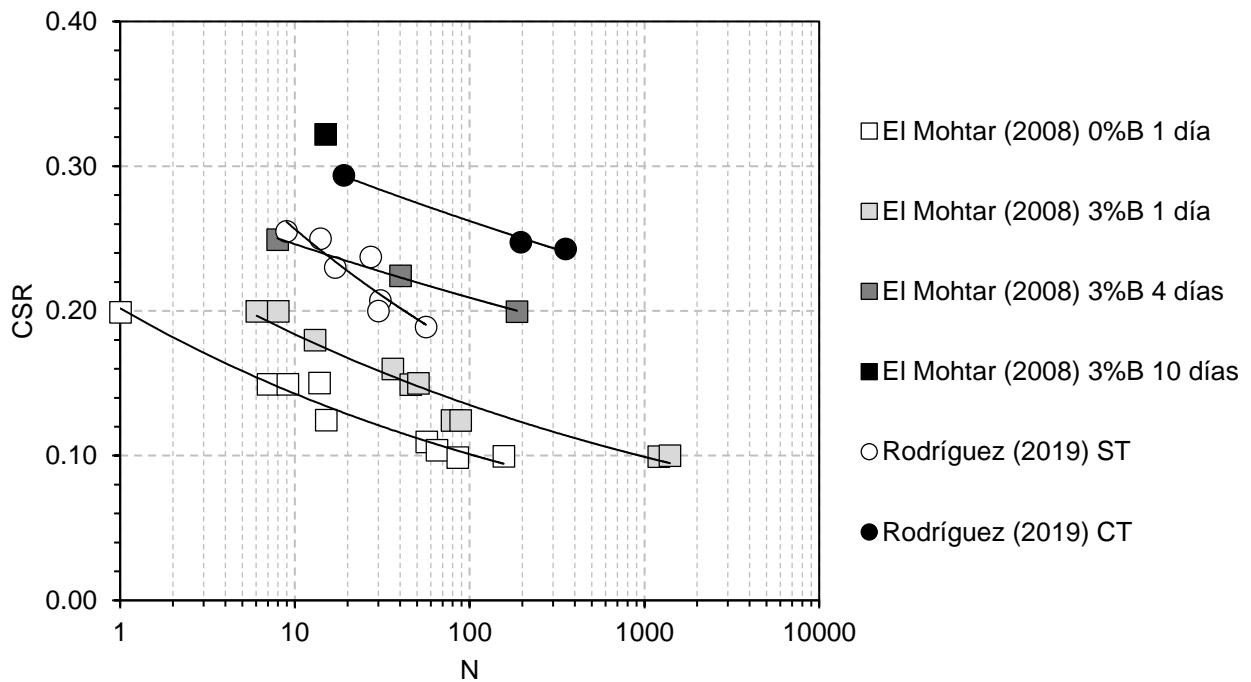


Figura 6-39. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para el estudio realizado con bentonita

En la figura anterior se observa que, al aumentar los días de envejecimiento de la muestra con bentonita, aumenta la resistencia cíclica del ensayo. Además, la curva sin tratamiento del presente estudio queda por sobre la curva sin tratamiento de El Mohtar (2008). Esto se puede deber a los distintos tipos de suelos utilizados, además de la diferencia entre las densidades relativas y los métodos de confección de las probetas, entre otros.

Para ver la magnitud de la mejora en cada caso, se calcula la razón entre el valor de CSR con tratamiento sobre el CSR sin tratamiento. Los resultados se muestran en la Tabla 6-13. Cabe destacar que en la mayoría de los casos se utilizó la regresión para obtener los valores de CSR.

Tabla 6-13. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para el estudio realizado con bentonita

Autor(es)	Tiempo de envejecimiento [días]	N	CSR_{ST}	CSR_{CT}	CSR_{CT}/CSR_{ST}
El Mohtar (2008)	1	15	0.134	0.174	1.3
		100	0.101	0.135	1.3
		200	0.091	0.123	1.4
	4	15	0.134	0.239	1.8
		100	0.101	0.209	2.1
		200	0.091	0.199	2.2
10	15	0.134	0.322	2.4	
Este trabajo	1	15	0.239	0.298	1.2
		100	0.173	0.263	1.5
		200	0.153	0.251	1.6

De esta tabla, se observa que, en general, cuando se deja envejecer la muestra con bentonita 1 día se obtienen resultados menores a los obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, al aumentar los días de envejecimiento, la magnitud de la mejora aumenta. Además, tanto en el estudio de El Mohtar (2008) como en el presente, se tiene que, al aumentar el número de ciclos, aumenta la magnitud de la mejora. Sin embargo, se destaca que los resultados obtenidos por El Mohtar (2008) se logran utilizando un mayor porcentaje de fino plástico, mientras que en el caso del presente estudio se utiliza un porcentaje mínimo.

6.5.4. Comparación de estudios con Bacterias

Para las bacterias, se compara con los estudios de Burbank et al. (2013) y Xiao et al. (2018). En el caso de Burbank et al. (2013), se confeccionan las probetas mediante pluvitación con agua, que corresponde en dividir el material en partes iguales, agregar cada parte en un matraz y agregar agua desaireada. Luego, se vierte cada matraz dentro del molde y se vibra hasta alcanzar la altura deseada. Así, se obtienen densidades relativas entre 30% y 39%. Las probetas se ensayan a un confinamiento de 1 [kgf/cm²]. En este caso, la bacteria responsable de la precipitación de calcita se encuentra de forma natural en el suelo. Por otro lado, en el estudio de Xiao et al. (2018) se preparan las probetas por pluvitación seca en el molde. Luego, se bombea dentro de la probeta la suspensión con la bacteria, para luego bombear solución de cementación. Las densidades relativas de las probetas son, en promedio, 47% y se ensayan a varios confinamientos, destacando el confinamiento igual a 1 [kgf/cm²].

Los resultados de ambos métodos, juntos con los del presente estudio, se presentan en la Figura 6-40. En color blanco, se presentan los resultados para las muestras sin tratamiento, mientras que los símbolos de color corresponden a los ensayos con tratamiento.

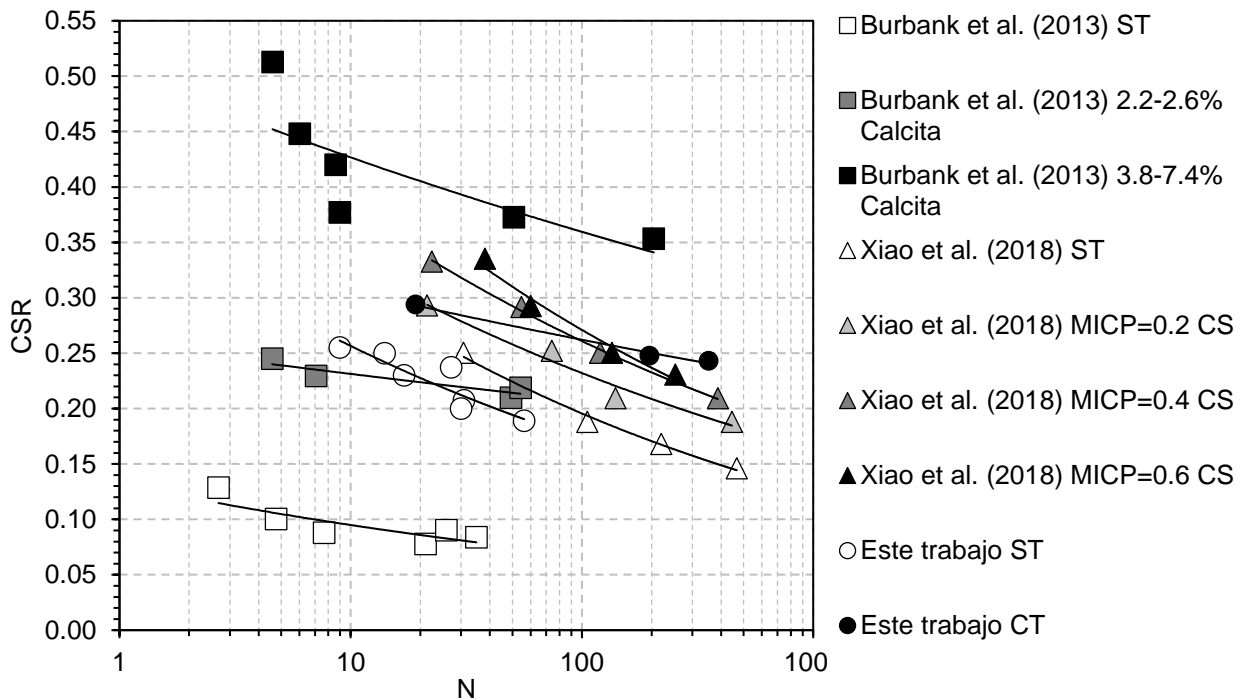


Figura 6-40. Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en el que se logra la licuación para el estudio realizado con bacterias. MICP: Microbial Induced Calcite Precipitation. CS: Solución de cementación. ST: Sin tratamiento. CT: Con tratamiento.

Al igual que en el resto de los métodos, para poder comparar los tratamientos de bacterias con el tratamiento utilizado laponita, se determina el parámetro CSR_{CT}/CSR_{ST} para cada uno de los casos. Estos valores se muestran en la Tabla 6-14 para un mismo número de ciclos.

Tabla 6-14. Resistencia cíclica con tratamiento sobre resistencia cíclica sin tratamiento para un mismo número de ciclos para el estudio realizado con bacterias

Autor(es)	Mejoramiento	N	CSR_{ST}	CSR_{CT}	CSR_{CT}/CSR_{ST}
Burbank et al. (2013)	2.2-2.6% de Calcita	30	0.081	0.219	2.7
	3.8-7.4% de Calcita	30	0.081	0.394	4.9
Xiao et al. (2018)	MICP=0.2 CS	30	0.246	0.283	1.2
	MICP=0.4 CS	30	0.246	0.320	1.3
	MICP=0.6 CS	30	0.246	0.336	1.4
Este trabajo	CL=1%	30	0.213	0.285	1.3

De estos resultados se tiene que el estudio realizado por Burbank et al. (2013) es aquel en donde se obtiene una mejora de mayor magnitud, con un bajo porcentaje de concentración de calcita. Es necesario recordar que, en este caso, la bacteria se encontraba de forma natural en el suelo. Además, se tiene que, al aumentar la concentración de calcita en la probeta, mayor es el incremento en la resistencia a la licuación. Por otro lado, en el estudio de Xiao et al. (2018) se obtiene una mejora de magnitud cercana a la del presente estudio, es decir, en un aumento cercano al 35% en la resistencia a la licuación.

6.6. Observaciones de las interacciones arena – laponita usando microscopía

Para corroborar la influencia de la laponita en la interacción de las partículas de la arena de relave, se observan muestras de arena mezclada con laponita en el microscopio SEM. En primer lugar, se observa el material mezclado previo al ensayo triaxial. Los resultados se muestran en la Figura 6-41, donde se observa en las figuras de la izquierda las obtenidas sin tratamiento, y a la derecha las con tratamiento.

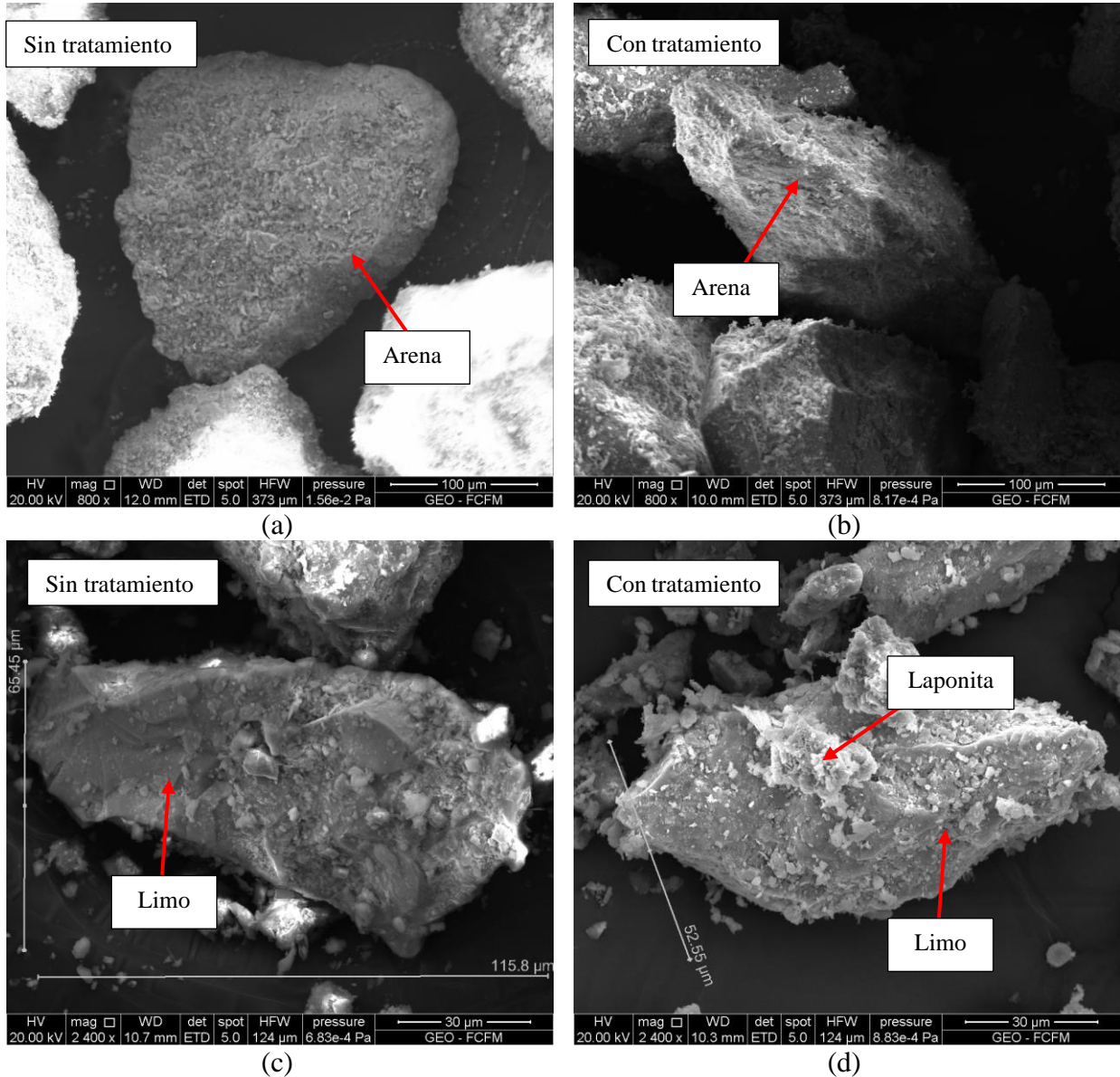


Figura 6-41. Fotografías obtenidas mediante microscopio SEM. (a) Retenido en Malla #100 sin tratamiento, (b) Retenido en Malla #100 con tratamiento, (c) Que pasa Malla #200 sin tratamiento, (d) Que pasa Malla #200 con tratamiento.

Como es posible evidenciar en la Figura 3-10, la laponita tiene forma de lámina. De esta forma, al observar las imágenes con tratamiento, se nota un aumento de material más fino. En particular, en la Figura 6-41 (d) se observan partículas más finas con la forma de lámina de la laponita. Sin embargo, debido a que el material se encuentra seco, no se evidencia algún tipo de interacción arena – laponita. Para poder ver si se forman uniones en las partículas, se obtiene una muestra de una probeta ensayada, la cual se seca finalizado el ensayo.

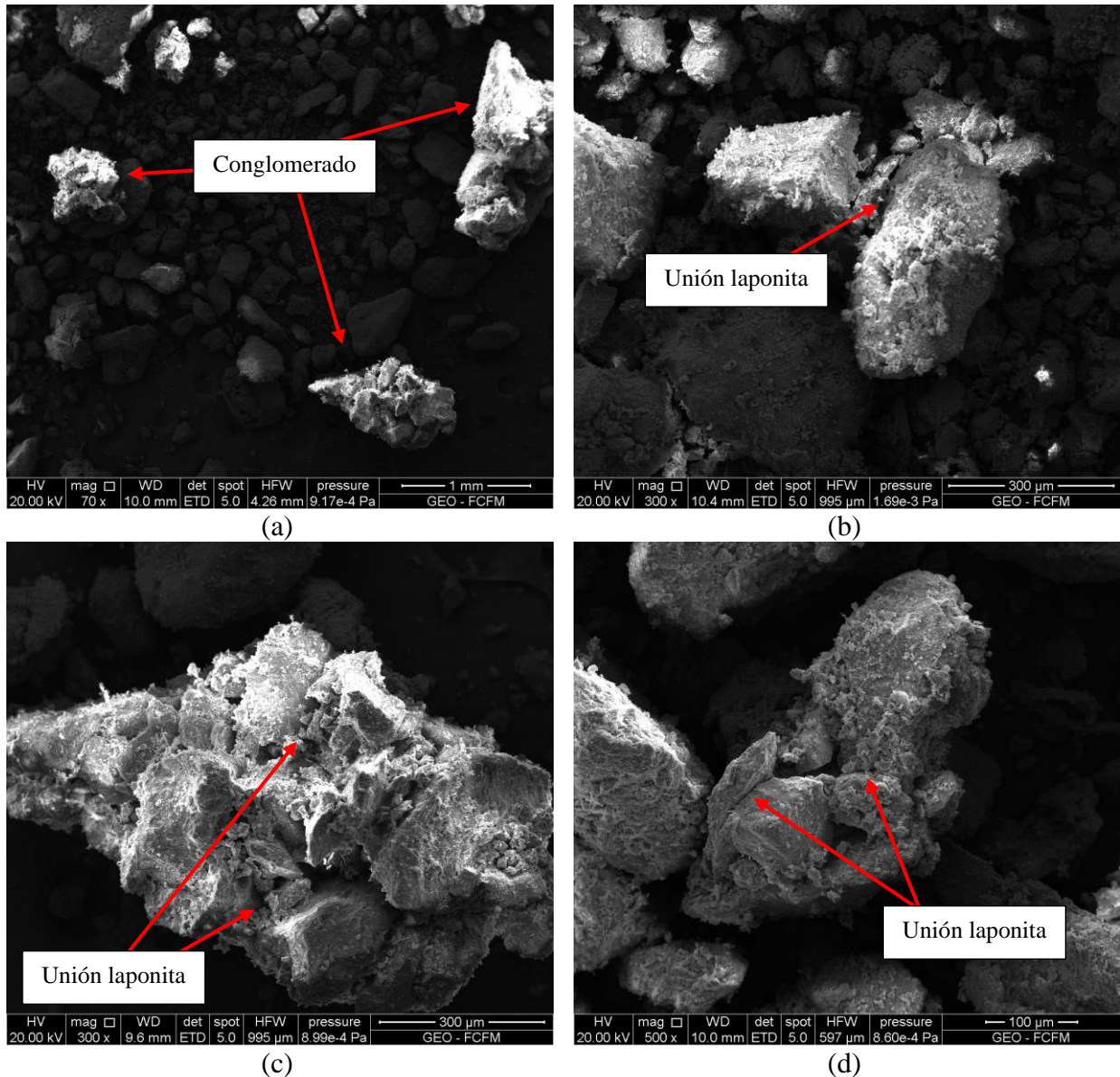


Figura 6-42. Fotografías obtenidas mediante microscopio SEM para la arena de relaves El Torito con laponita secada luego de ser ensayada

En la Figura 6-42 (a) es posible evidenciar distintos conglomerados. En la Figura 6-42 (b), (c) y (d) se muestran algunos de ellos con mayor detalle. Aquí, se observan partículas de la arena de relaves de distintos tamaños unidas por puentes de laponita que dejan de ser visibles al haber estado en contacto con agua (Ochoa – Cornejo et al. 2019). Esto evidencia que la saturación de la muestra es capaz de disolver parte de las partículas de laponita, produciendo su estado gel.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones generales

En este estudio se muestran los resultados obtenidos de ensayos triaxiales monótonos y cíclicos realizados a muestras confeccionadas con arena de relave de El Torito, la cual posee un contenido de finos de aproximadamente 17%. Además, se ensayan muestras confeccionadas con la misma arena adicionándole 1% con relación a la masa seca de la arena de la nanopartícula laponita. Este material se agrega a la arena de relaves en seco, previo a la confección de las probetas. Las probetas se confeccionaron mediante compactación húmeda y a índices de vacíos entre 0.790 y 0.840, y fueron ensayadas a confinamientos de 1, 2 y 3 [kgf/cm²], tanto para los ensayos monótonos y cíclicos. El objetivo principal de este trabajo es estudiar la factibilidad de usar Laponita como un mitigador de la licuefacción de arenas bajo las condiciones de dichos ensayos.

En primer lugar, se obtiene que al agregar laponita no existe un cambio significativo en las curvas de consolidación. Las muestras sin tratamiento se dejan consolidando no más de 1 hora, mientras que, en el caso de las probetas con tratamiento, se dejan consolidar por 72 horas para lograr el efecto deseado en la laponita, que consiste en un aumento de su viscosidad. A pesar de la diferencia de tiempos en la consolidación, la variación del índice de vacíos en ese período no es mayor a un 5%. Con esto, es posible comparar las muestras sin y con tratamiento para un mismo confinamiento, pues se encuentran dentro de un mismo rango de índice de vacíos.

En el caso de los ensayos monótonos, para los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²], se obtiene que las muestras mantienen su comportamiento dilatante al ser ensayadas sin tratamiento y con tratamiento. Además, se obtienen valores similares del desviador de esfuerzos y del exceso de presión de poros, teniendo variaciones de 15% y 1.5% en el estado último, respectivamente. Sin embargo, al ensayar las muestras a un confinamiento de 1 [kgf/cm²], se obtiene un cambio en el comportamiento del material, pasando de un comportamiento contractivo sin tratamiento, a uno dilatante con tratamiento. Esto implica que, al agregar laponita a la arena de relaves, se obtienen valores mayores en la resistencia no drenada (S_u). Esto se cumpliría siguiendo la metodología empleada en el estudio, y al ensayarlas con un confinamiento inicial efectivo igual a 1 [kgf/cm²].

Comparando los parámetros de resistencia al corte obtenidos en ambos casos, bajo las condiciones del estudio, se obtiene que el ángulo de fricción interna no cambia y se mantiene en 35°. En cuanto a la cohesión, se mantiene nula. Por otro lado, observando la LEU y LCI en el espacio $e - p'$, se observa un cambio en la pendiente de ambas curvas, lo que provoca que el parámetro λ cambie al tratar la arena de relaves.

Para el caso de los ensayos cíclicos, de forma general, se evidencia una mejora en la resistencia cíclica para los confinamientos estudiados y bajo las condiciones del presente estudio. La mejora observada es dependiente del confinamiento al que se ensayan las muestras. Para el caso de los confinamientos mayores, 2 y 3 [kgf/cm²], se observa que el valor de la resistencia cíclica con tratamiento es 1.2 veces la obtenida sin tratamiento. Mientras que, cuando el confinamiento es igual a 1 [kgf/cm²], la resistencia cíclica con tratamiento es 1.3 y 1.4 veces la obtenida sin tratamiento, para un bajo número de ciclos ($N_{liq}=20$) y un número de ciclos mayor ($N_{liq}=50$), respectivamente.

Por otro lado, es posible observar si existe una variación en el comportamiento de las muestras durante la aplicación de carga cíclica, en cuanto a deformación axial y desarrollo de exceso de presión de poros. Para esto, se comparan ensayos que fueron ensayados a valores de CSR similares y que hayan licuado a un número de ciclos similar. De esto, se obtiene que, para la deformación axial, no existe una variación cuando las muestras se encuentran a un confinamiento igual a 2 y 3 [kgf/cm²]. En cambio, cuando el confinamiento es 1 [kgf/cm²], existe una reducción de la deformación axial en extensión dentro de un rango desde 20 a 40%. Para el desarrollo de la presión de poros se observa que para los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²], no existe una diferencia significativa en el exceso de presión de poros promedio. Mientras que, cuando el confinamiento es de [1 kgf/cm²], el exceso de presión de poros promedio en el caso con tratamiento aumenta con respecto a los ensayos sin tratamiento.

Sin embargo, al comparar las curvas de los ensayos realizados, tanto sin tratamiento y con tratamiento, es posible evidenciar que se encuentran dentro de los límites propuestos por Lee y Albaisa (1974) y complementadas posteriormente por DeAlba (1975). Además, es posible determinar la pendiente de la zona intermedia de las curvas, correspondiente a un aumento paulatino de la presión de poros. De esta zona, se determina la pendiente (ΔU_m) en función de la razón de sollicitación cíclica. De aquí se observa que, para un mismo valor de CSR, la pendiente es menor para los ensayos sin tratamientos. Esto implica que, al agregar laponita a la arena de relaves, existe un incremento menor del exceso de la presión de poros por ciclo. La variación de ΔU_m es mayor para un confinamiento igual a 1 [kgf/cm²], siendo 20 veces menor. En cambio, para los confinamientos de 2 y 3 [kgf/cm²] la disminución es 4 y 5 veces, respectivamente.

Como se ha observado, existe una mejora más significativa, tanto en la deformación axial, el desarrollo del exceso de presión de poros y la resistencia cíclica misma, cuando la probeta es ensayada a un confinamiento de 1 [kgf/cm²]. De esto se puede decir que el efecto de la laponita como método de tratamiento para disminuir el potencial de licuación de la arena se ve afectado por el confinamiento efectivo inicial. Esto es que, a mayor confinamiento, menor es la mejora observada. Es decir, el confinamiento tendría un efecto sobre el comportamiento de gel que posee la laponita en los espacios intersticiales de la arena, provocando que sea menos notorio a un confinamiento mayor.

La mejora observada en los ensayos cíclicos de 1 [kgf/cm²] se evidencia en otros estudios que utilizan laponita, como el de Ochoa – Cornejo et al. (2016) y el de Pardo y Orense (2017). Al comparar los resultados obtenidos con los de los estudios mencionados, se tiene que el trabajo realizado por Ochoa – Cornejo et al. (2016) es aquel donde se obtienen mejoras mayores (1.6 y 1.7 versus 1.3 y 1.4 del presente estudio). Sin embargo, se debe tener en cuenta las diferencias presentadas en la metodología de los ensayos. Estas corresponden a arena utilizada, contenido de finos, método de mezcla de la arena con laponita, método de confección de la probeta, densidades relativas o índice de vacíos (además si corresponden a totales -bulk- o esqueléticos), equipos utilizados, entre otros.

Además, se ha comparado el presente trabajo con respecto a otros métodos de mejoramiento, en particular a estudios que utilizaron sílica coloidal (Gallagher y Mitchell, 2002; Díaz – Rodríguez et al., 2008), bentonita (El Mohtar, 2008) y bacterias (Burbank et al., 2013; Xiao et al., 2018). Al comparar con otros métodos, es necesario comparar sólo con la normalización de los resultados. Es por esto, que se realiza la comparación mediante el parámetro CSR_{CT}/CSR_{ST} . De esta comparación, se observa que en todos los métodos existen estudios donde se obtienen mejoras similares a la observada en este trabajo. Estos estudios corresponden a Díaz – Rodríguez et al. (2008) para sílica coloidal, El Mohtar (2008) con un día de envejecimiento para bentonita, y Xiao et al. (2018) para el caso de bacterias. En el resto de los estudios, la mejora obtenida es superior a la del presente trabajo. Sin embargo, nuevamente se debe tener en cuenta las características de los ensayos y la metodología empleada. En general, en los estudios realizados a un confinamiento de 1 [kgf/cm²] se han utilizado arenas con una baja presencia de finos (no superior a 12%), mientras que la arena de este trabajo contiene un porcentaje de finos igual a 17%. Además, se destaca la baja concentración de laponita utilizada para obtener mejoras, versus un mayor contenido del tratamiento en los estudios, como en el de sílica coloidal y bentonita.

7.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Se recomienda realizar los ensayos modificando el método de confección de la probeta, probando con métodos como pluviación seca o deposición de lodos (“dry pluviation” o “slurry deposition”). Otro método que resulta interesante estudiar es inyectar una solución de laponita a la probeta, una vez que esta se encuentre confeccionada.

Se recomienda realizar los ensayos para confinamientos más bajos, para ver si se repite el fenómeno observado en el caso del confinamiento de 1 [kgf/cm²].

Se recomienda realizar los ensayos en altas presiones, para corroborar si existe una disminución del efecto de la laponita como método de mejoramiento.

Se recomienda realizar los ensayos variando el índice de vacíos, o en su defecto, la densidad relativa, intentando alcanzar valores mayores de índices de vacíos, siendo más susceptible a la licuación.

Se recomienda realizar ensayos monótonos con el fin de encontrar si incrementa la resistencia a la licuación estática al agregar laponita a la matriz de arena de relave.

Se recomienda realizar los ensayos modificando el contenido de finos, ya sea de los finos no plásticos propios de la arena de relave, o de los finos plásticos que se adicionan (laponita).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A, and Chameau, J. L. (1988). “Undrained Monotonic and Cyclic Strength of Sands”. I. Geotech. Engng Div. Am. Sot. Cio. Engrs 114, GTIO, 1089-1109.
- Altun, S., Goktepe, A. B. and Akguner, C. (2005) "Cyclic Shear Strength of Silts and Sands Under Cyclic Loading." Earthquake Engineering and Soil Dynamics (GSP 133), 158, 33.
- Asenjo, R. (2010). “Efecto del Esfuerzo de Corte Estático Inicial en la Resistencia Cíclica en una Arena de Relaves”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Alvear, B. (2015). “Estudio Textural Mediante SEM-CL en Minerales de Alteración en el Sistema Geotermal Tolhuaca, IX Región de la Araucanía, Chile”. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013). “Geotechnical Tests of Sands Following Bioinduced Calcite Precipitation Catalyzed by Indigenous Bacteria”. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 139(6): 928 – 936
- Carraro, J. A. H., Prezzi, M., and Salgado, R. (2009). “Shear Strength and Stiffness of Sands Containing Plastic or Nonplastic Fines”. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 135(9): 1167- 1178.
- Casagrande, A. (1936). “Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Earth Fills”, Journal of the Boston Society of Civil Engineers.
- Castro, G. (1969). “Liquefaction of sands”. Harvard Soil Mechanics Series, No. 81, Cambridge, Mass.
- Castro, G. (1975). “Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands”. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 551 – 569.
- Corral, G. (2008). “Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en arenas”. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
- DeAlba, P., Clarence, K. C., and Seed, H. B. (1975). “Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large Laboratory Tests”.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). “Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear”. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(11): 1381 – 1392.
- Díaz – Rodríguez, J. A., Antonio – Izarraras, V. M., Bandini, P., and López – Molina, J. A. (2008). “Cyclic Strength of a Natural Liquefiable Sand Stabilized with Colloidal Silica Grout”. Can. Geotech. Journal. 45: 1345 – 1355.
- El Mohtar, C. (2008). “Pore fluid engineering: an autoadaptive design for liquefaction mitigation”. A dissertation submitted to the Faculty of Purdue University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

- El Howayek, A. (2011). “Characteriation, rheology and microstructure of Laponite Suspensions”. Master thesis for Purdue University, West Lafayattem Indiana, USA.
- Gallagher, P. M., and Mitchell, J. K. (2002). “Influence of Colloidal Silica Grout on Liquefaction Potential and Cyclic Undrained Behavior of Loose Sand”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22. 1017 – 1026.
- Gallagher, P. M., Conlee, C. T., and Rollins, K. M. (2007). “Full – Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133(2): 186 – 196.
- Gratchev, I., Sassa, K., Osipov, V. I., Fukuoka, H., and Wang, G. (2007). “Undrained Cyclic Behavior of Bentonite – Sand Mixtures and Factors Affecting it”. *Geotech. Geol. Eng.* 25:349 – 367.
- Huang, Y., and Wang, L. (2016). “Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles”. *Engineering Geology* 204, 23 – 32.
- Ishihara, K., and Koseki, J. (1989). “Discussion on the cyclic shear strength of fines containing sands.” Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 101–106.
- Ishihara, K., Yasuda, S., and Yoshida, Y. (1990). “Liquefaction induced Flow failure of embankments and residual strength of silty sands”. *Soils and Foundations*. Vol. 30 No 3, 69 – 80.
- Lade, P.V., and Yamamuro, J. A. (1996): “Undrained Sand Behavior in Axisymmetric Tests at High Pressures”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 122, N°2, 120-129.
- Lade, P. V., and Yamamuro, J. A. (1997) “Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands” *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 34(6), 918–928
- Lade, P. V., Liggio, C. C., Jr., and Yamamuro, J. A. (1998). “Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand”. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 21, No. 4, oo. 336-347.
- Lee, K. L., and Albaisa, A. (1974). “Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 100(4): 387–406.
- Maureira, S. (2012). “Respuesta Cíclica de Arenas de Relaves en un Amplio Rango de Presiones”. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile
- Mesri, G., and Feng, T. (2014). “Consolidation of Soils”. *Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering*.

- Mitchell, J. K. (2008). “Mitigation of Liquefaction Potential of Silty Sands”. Symposium Honoring Dr. John H. Schmertmann for His Contributions to Civil Engineering at Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress 2008.
- Mohamad, R., and Dobry, R. (1986). “Undrained Monotonic and Cyclic Triaxial Strength of Sand”. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, Issue 10.
- Montgomery, J., Boulanger, R. W., Harder Jr, L. F. (2014). “Examination of the K_{σ} Overburden Correction Factor on Liquefaction Resistance”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 140, Issue 12.
- Muñoz, S. (2017). “Análisis del Comportamiento Cíclico de Arenas de Relaves Bajo Diferentes Condiciones Iniciales de Carga”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Murthy, T. G., Loukidis, D., Carraro, J. A. H., Prezzi, M., and Salgado, R. (2007). “Undrained monotonic response of clean and silty sands”. *Géotechnique* 57, No. 3, 273-288.
- Ochoa-Cornejo, F. (2015) “Cyclic behavior of sands with superplastic fines”. A dissertation submitted to the Faculty of Purdue University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- Ochoa-Cornejo, F., Bobet, A., Johnston, C., and Santagata, M. (2016). “Cyclic Behavior and Pore Pressure Generation in Sands with Laponite, a Super-plastic Nanoparticle”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 88, 265 – 279
- Ochoa-Cornejo, F., Bobet, A., Johnston, C., Santagata, M., and Sinfield, J. V. (2019). “Dynamic properties of a sand–nanoclay composite”. *Géotechnique*, 1-16.
- Pardo, G. S., and Orense, R. P. (2017). “Experimental study on self – healing effect of laponite on the liquefaction resistance of sand”. *Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium*.
- Park, S., and Kim, Y. (2013) “Liquefaction Resistance of Sands Containing Plastic Fines with Different Plasticity”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(5): 825-830.
- Pillai, V., and Byrne, P. (1994). “Effect of Overburden Pressure on Liquefaction Resistance of Sand”. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol 31. No 1. 53 – 60.
- Polito, C. P., and Martin II, J. R. (2001) “Effects of Nonplastic fines on the Liquefaction Resistance of Sands”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(5): 408-415.
- Poulos, S. K. (1981). “The Steady State of Deformation”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, N° GT5, 553-562.
- Shen, M. (2014). “Rheological Properties of Laponite and Chemically Modified Laponite Suspensions”. Open access theses. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/253.
- Thevanayagam, S. (1998). “Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, Issue 6

- Vargas, M. (2015). “Efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial en la resistencia cíclica de arena de relaves”. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
- Verdugo, R. (1992): “Characterization of Sandy Soil Behavior Under Large Deformation”, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Japan.
- Verdugo, R., and Ishihara, K. (1996): “The Steady State of Sandy Soils”, Soils and Foundations, Vol. 36, N°2, 81-91.

9. ANEXOS

Determinación índice de vacíos para arena con dos tipos de finos de distinta gravedad específica

Definiciones:

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

$$V_V = V_T - V_S$$

$$V_S = V_{SG} + V_{SF1} + V_{SF2}$$

$$M_S = M_G + M_{F1} + M_{F2}$$

$$M_{F1} = CF_1 \cdot M_G$$

$$M_{F2} = CF_2 \cdot M_G$$

Donde V_V corresponde al volumen de vacío, V_S al volumen de sólidos, V_{SG} al volumen de sólidos del suelo granular, V_{SF1} el volumen de sólidos del fino 1, V_{SF2} el volumen de sólidos del fino 2, M_S la masa de los sólidos, M_G la masa del suelo granular, M_{F1} la masa del fino 1, M_{F2} la masa del fino 2, CF_1 el contenido de finos del fino 1, CF_2 el contenido de finos del fino 2.

Luego, se sabe que:

$$G_S = \frac{W_S}{\gamma_\omega \cdot V_S} \Rightarrow G_S = \frac{M_S}{\rho_\omega \cdot V_S} \Rightarrow V_S = \frac{M_S}{\rho_\omega \cdot G_S}$$

Entonces, se tiene que:

$$V_{SG} = \frac{M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SG}}$$

$$V_{SF1} = \frac{CF_1 \cdot M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SF1}}$$

$$V_{SF2} = \frac{CF_2 \cdot M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SF2}}$$

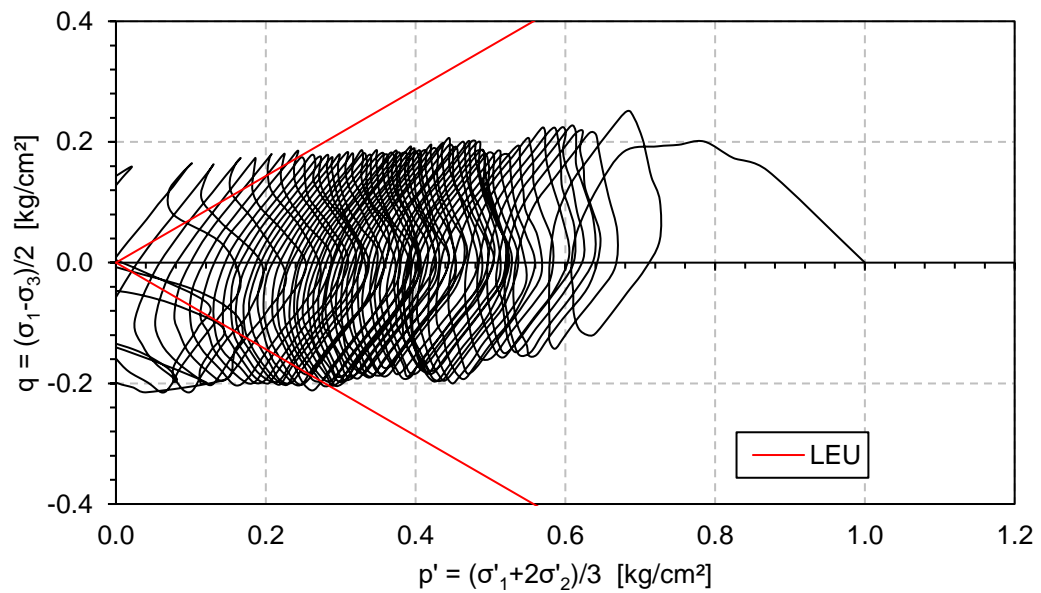
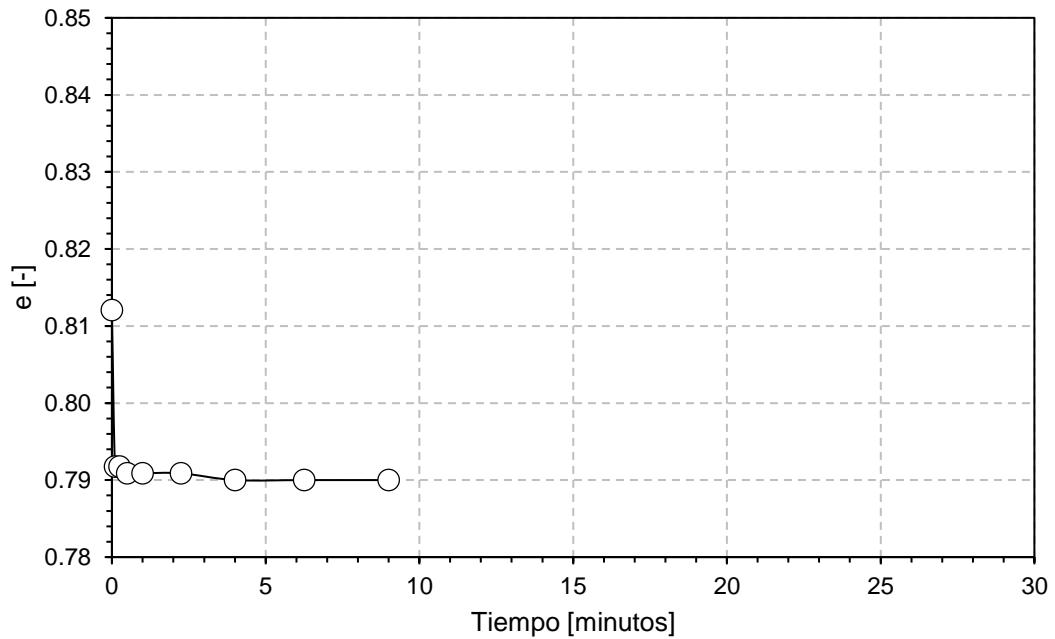
Donde G_S es la gravedad específica del suelo granular, G_{SF1} la gravedad específica del fino 1, y G_{SF2} la gravedad específica del fino 2. Así, retomando desde la definición de índice de vacíos (e):

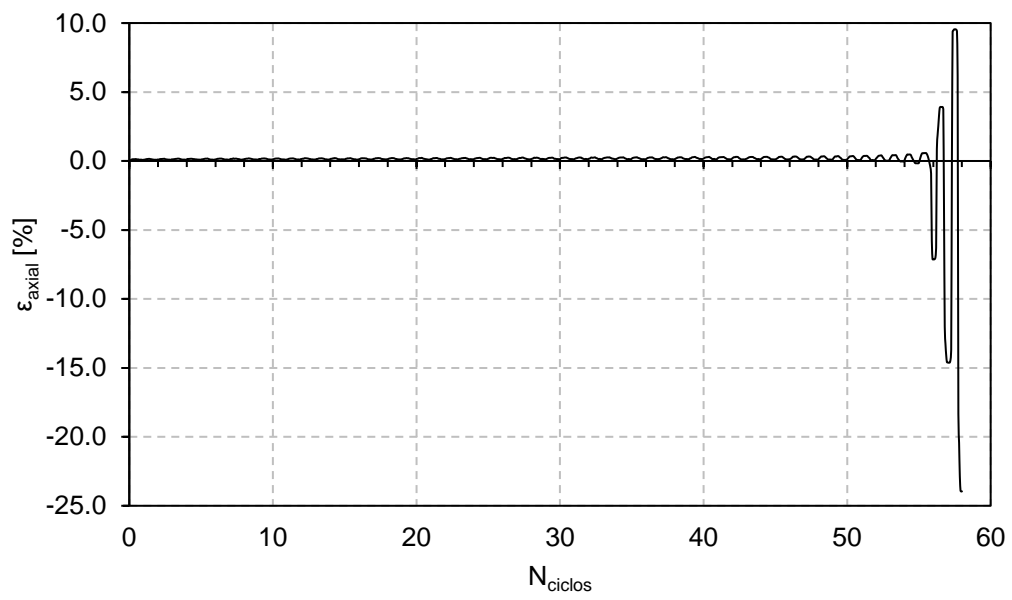
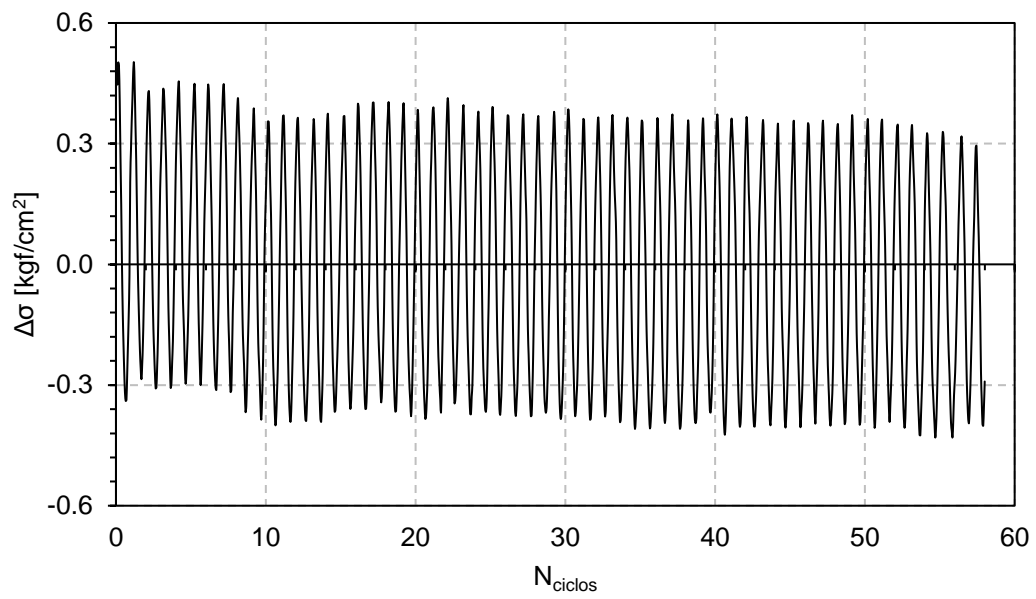
$$e = \frac{V_T - V_S}{V_S} \Rightarrow e = \frac{V_T}{V_S} - 1 \Rightarrow e = \frac{V_T}{V_{SG} + V_{SF1} + V_{SF2}} - 1$$

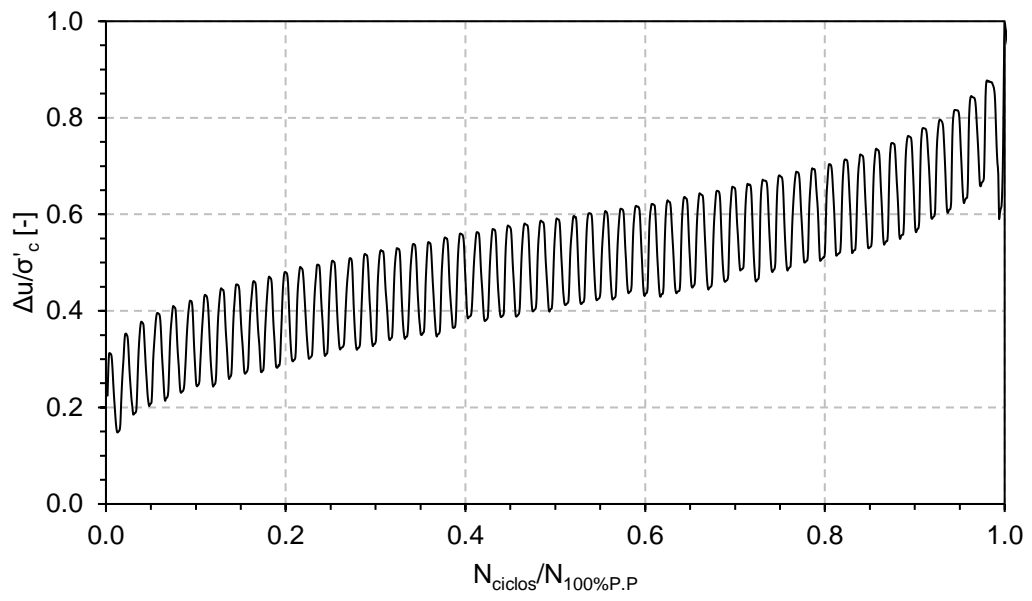
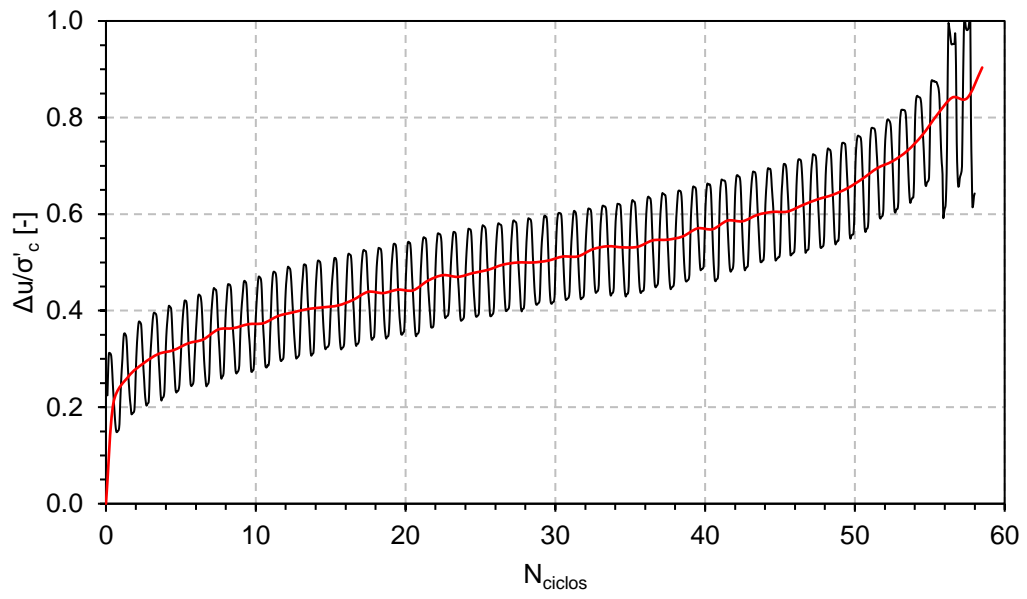
Dado de que se conoce el volumen total (V_T), que corresponde al volumen de la probeta, se tiene que:

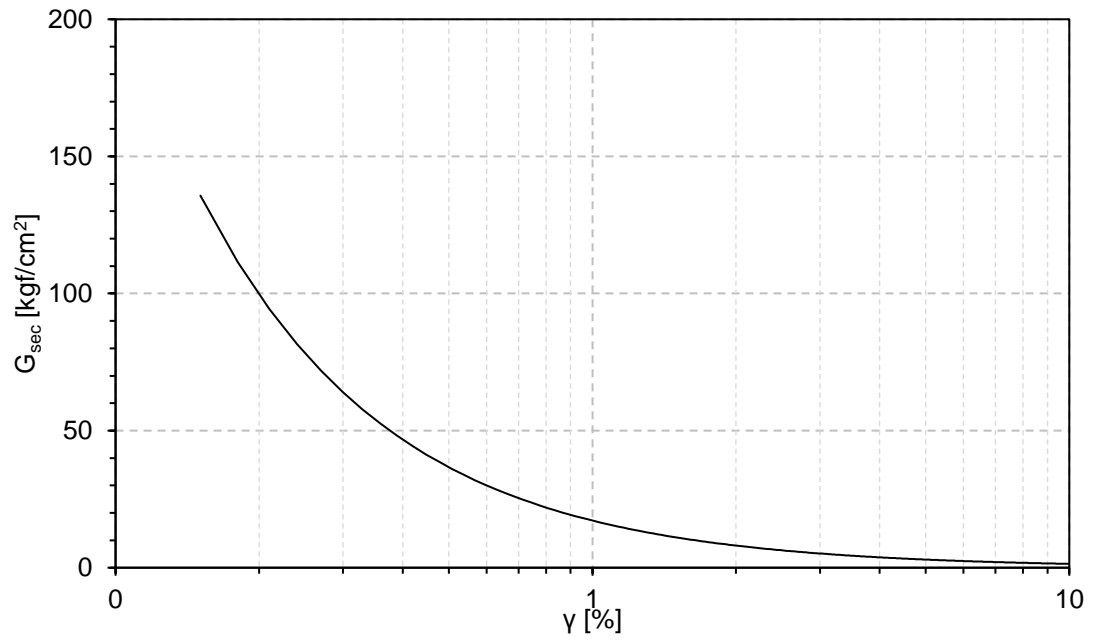
$$e = \frac{V_T}{\frac{M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SG}} + \frac{CF_1 \cdot M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SF1}} + \frac{CF_2 \cdot M_G}{\rho_\omega \cdot G_{SF2}}} - 1 \Rightarrow e = \frac{V_T \cdot \rho_\omega}{M_G \left(\frac{1}{G_{SG}} + \frac{CF_1}{G_{SF1}} + \frac{CF_2}{G_{SF2}} \right)} - 1$$

Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #1			
ID	CST1	CSR	0.189
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	56
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	56
DR _f [%]	41	N _{10%D.A}	56
B - value [%]	97		

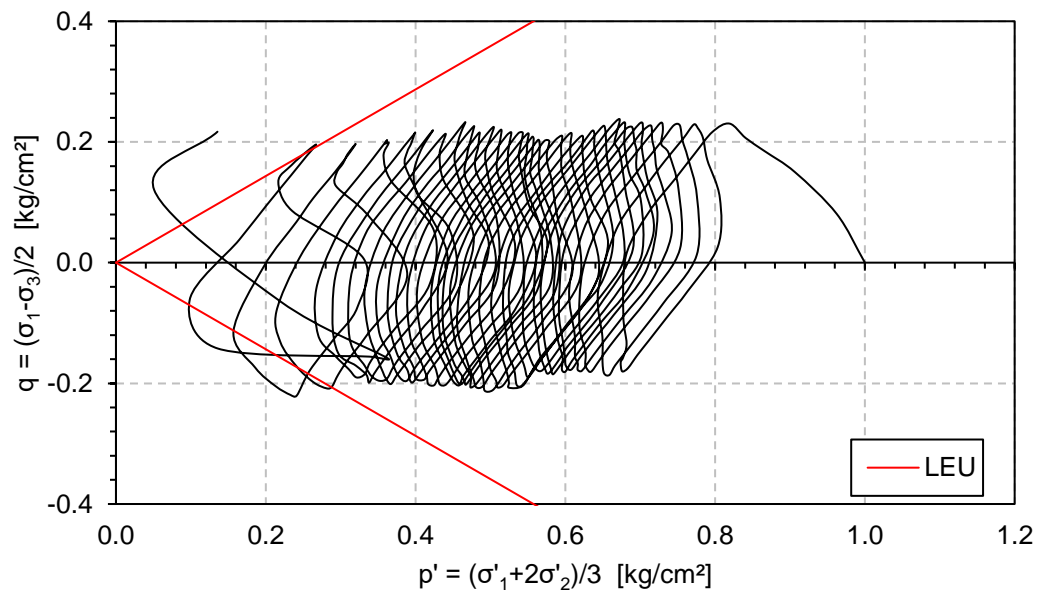
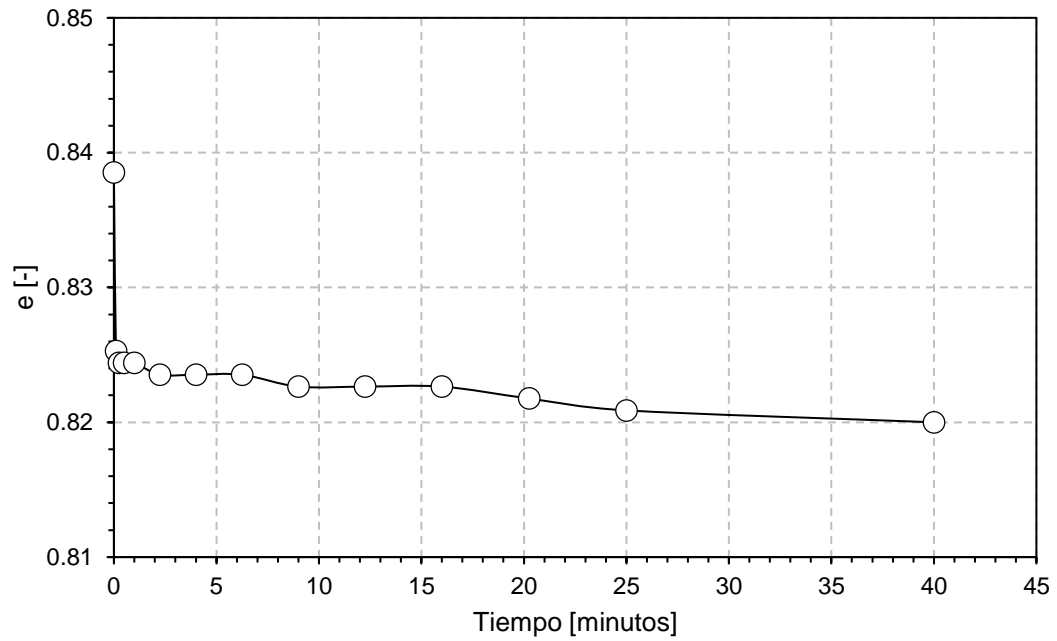


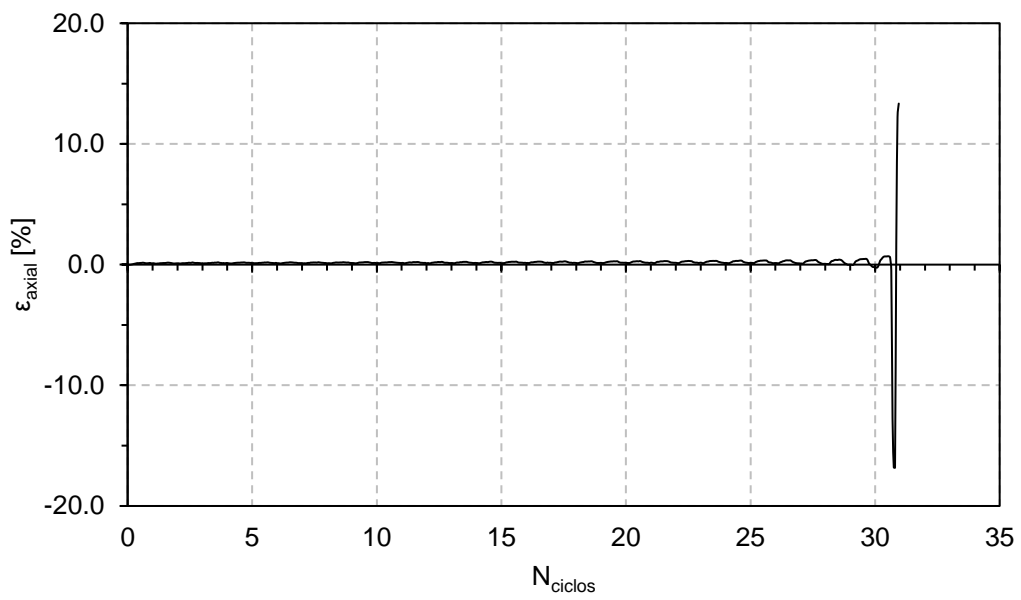
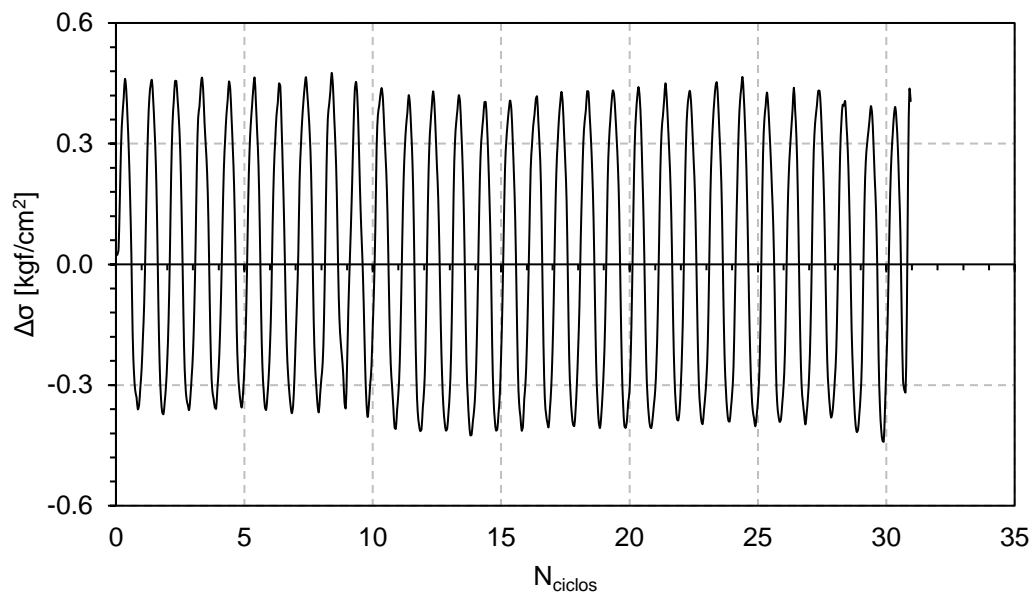


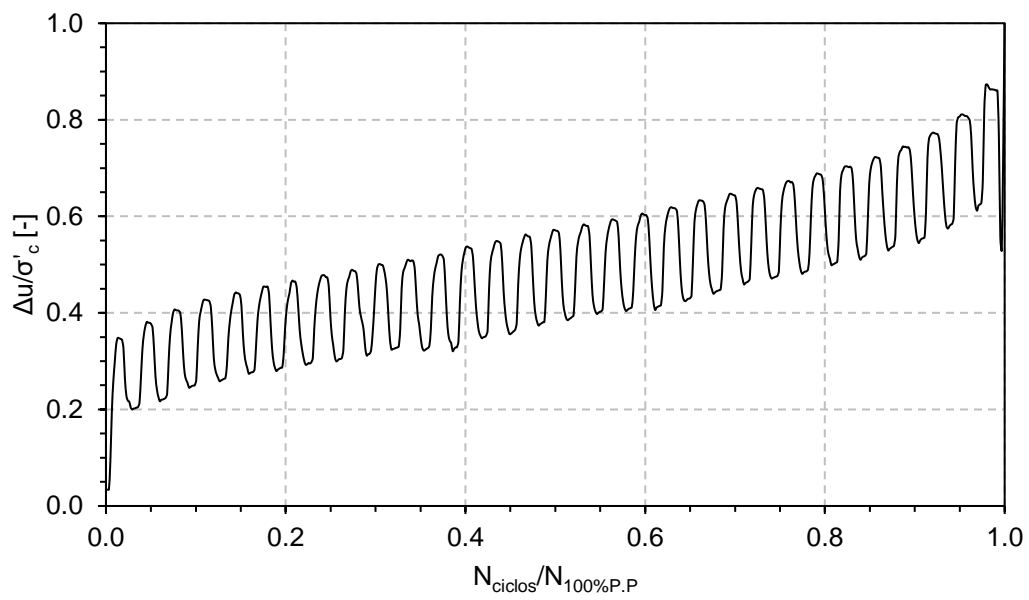
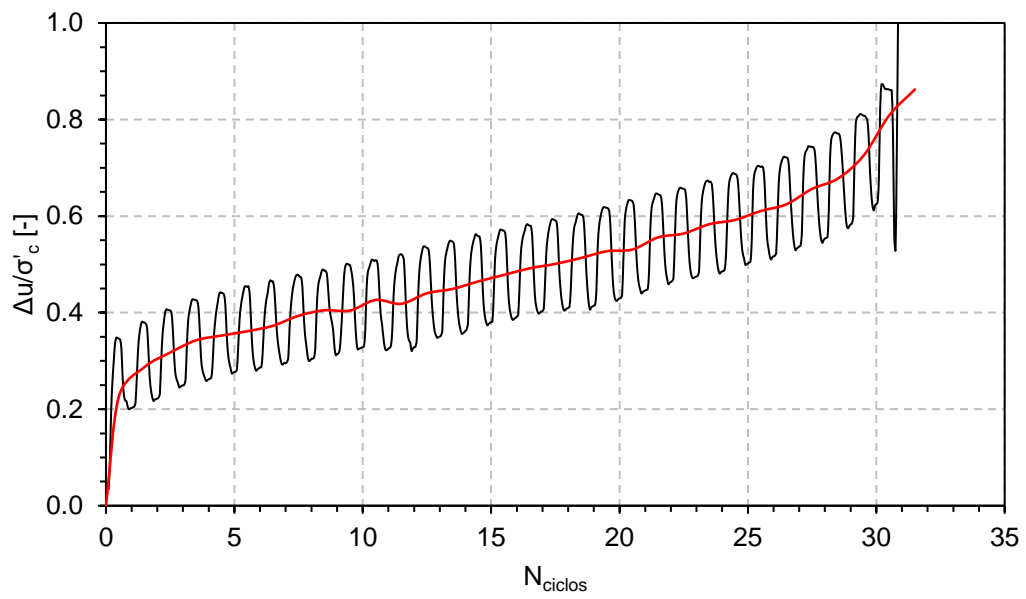


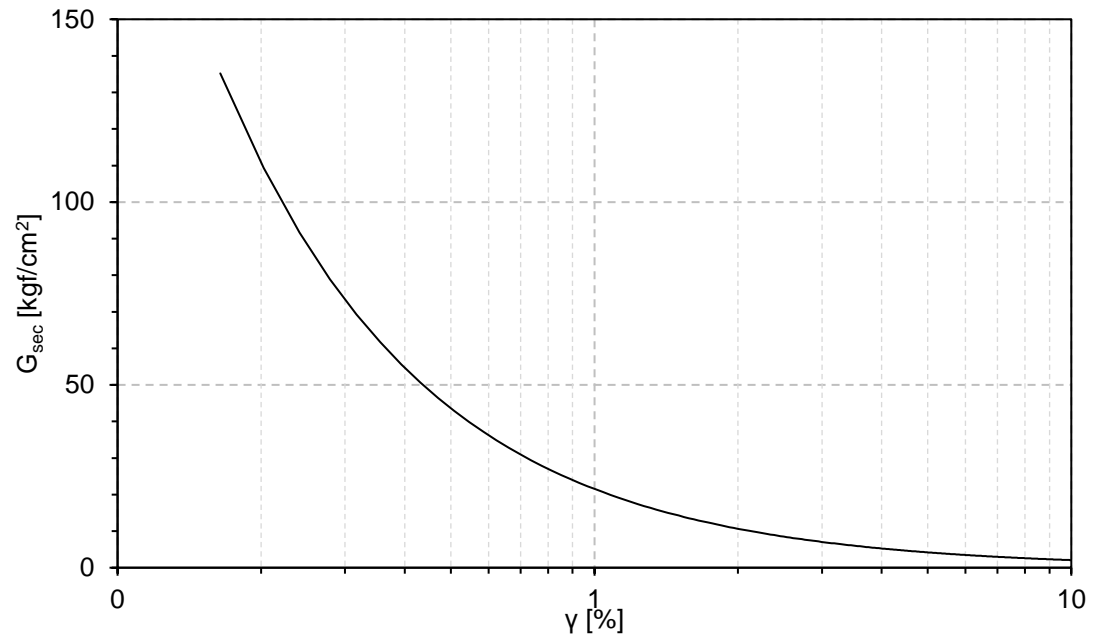


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #2			
ID	CST2	CSR	0.207
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	31
BP [kgf/cm ²]	2	N _{5%D.A}	31
DR _f [%]	36	N _{10%D.A}	31
B - value [%]	97		

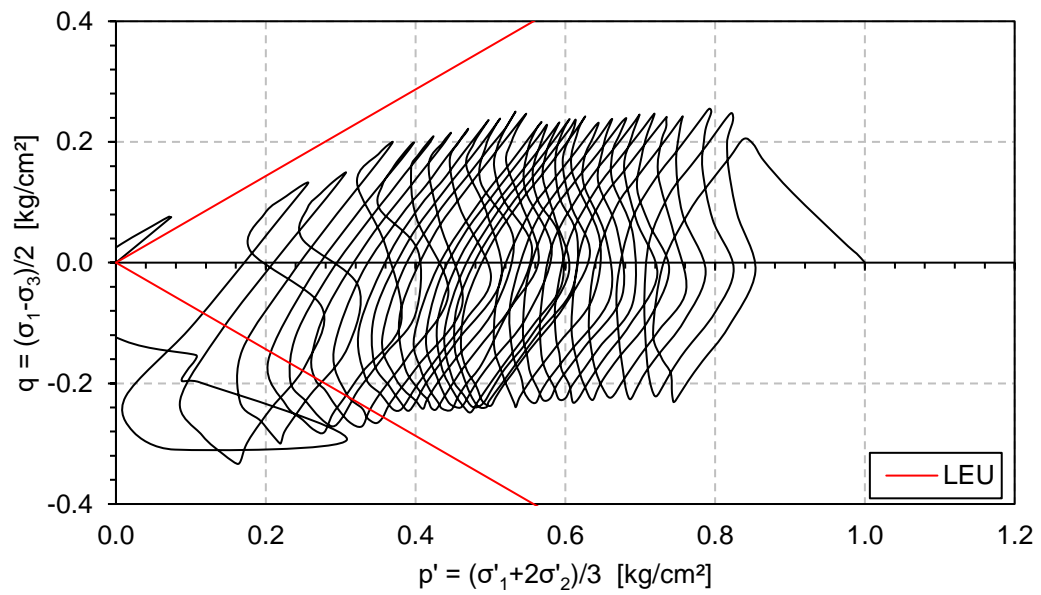
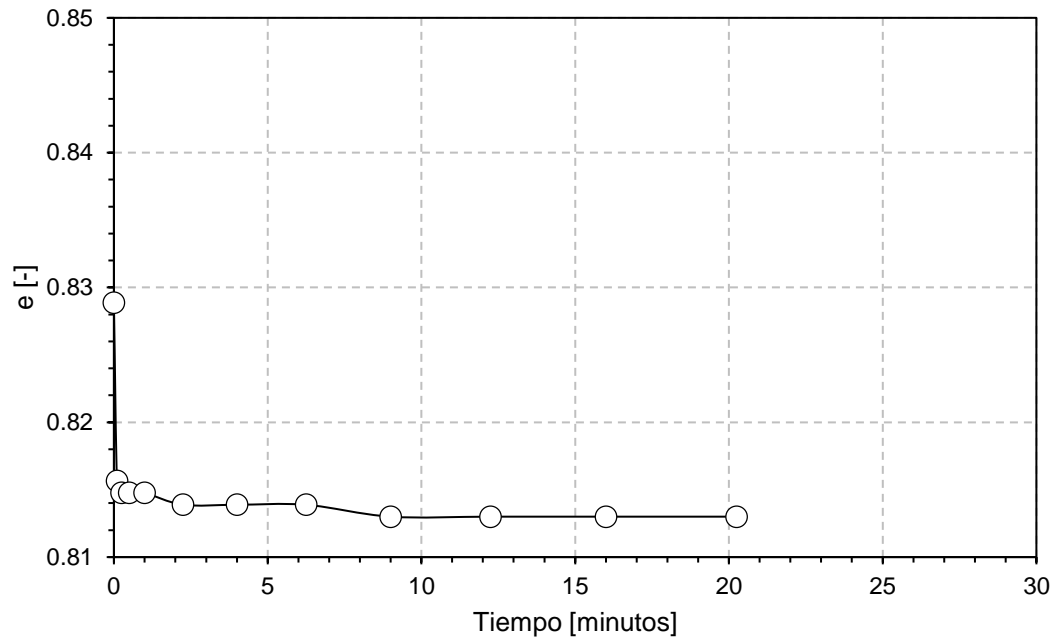


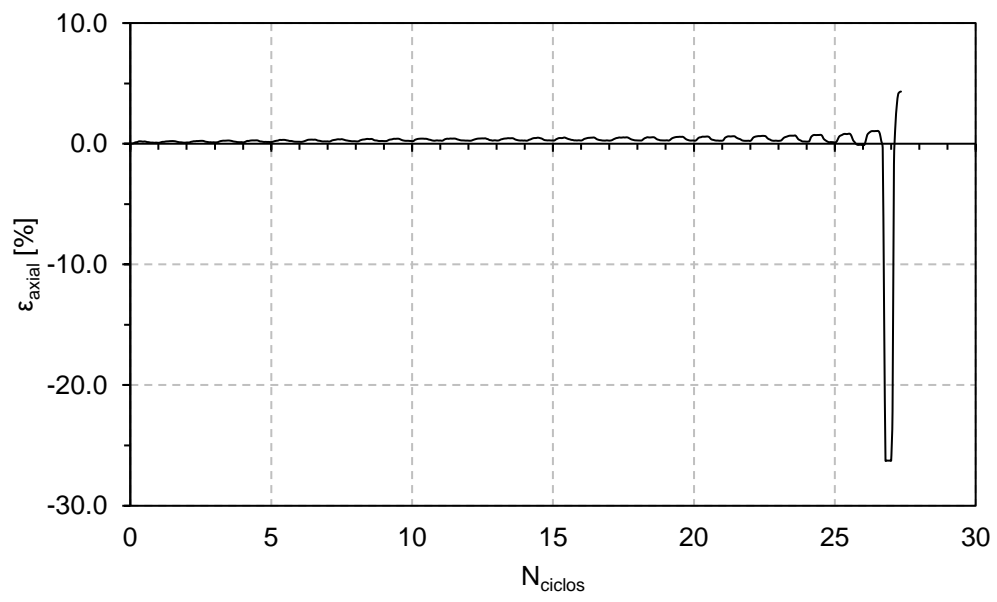
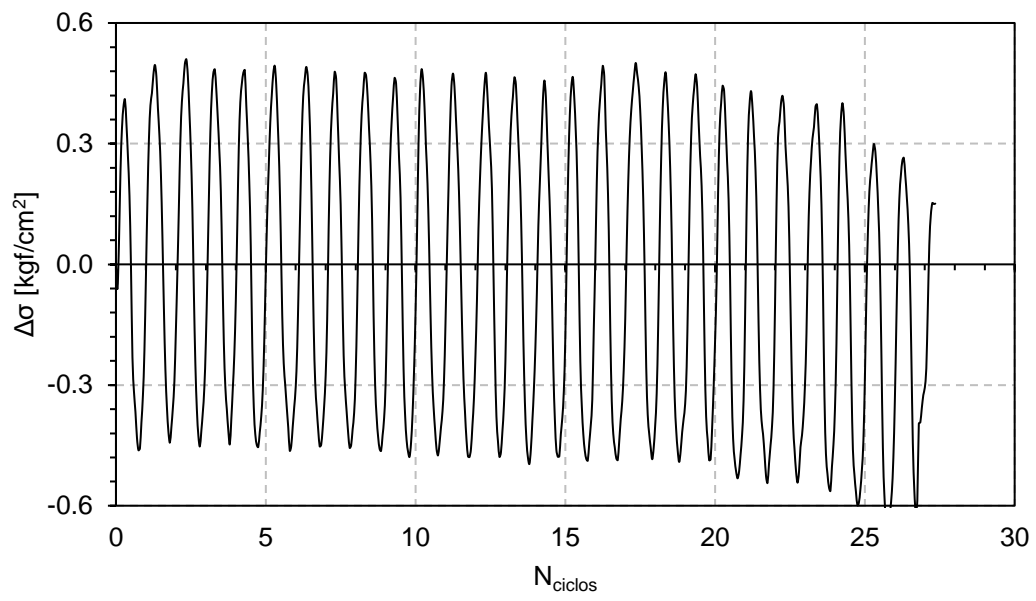


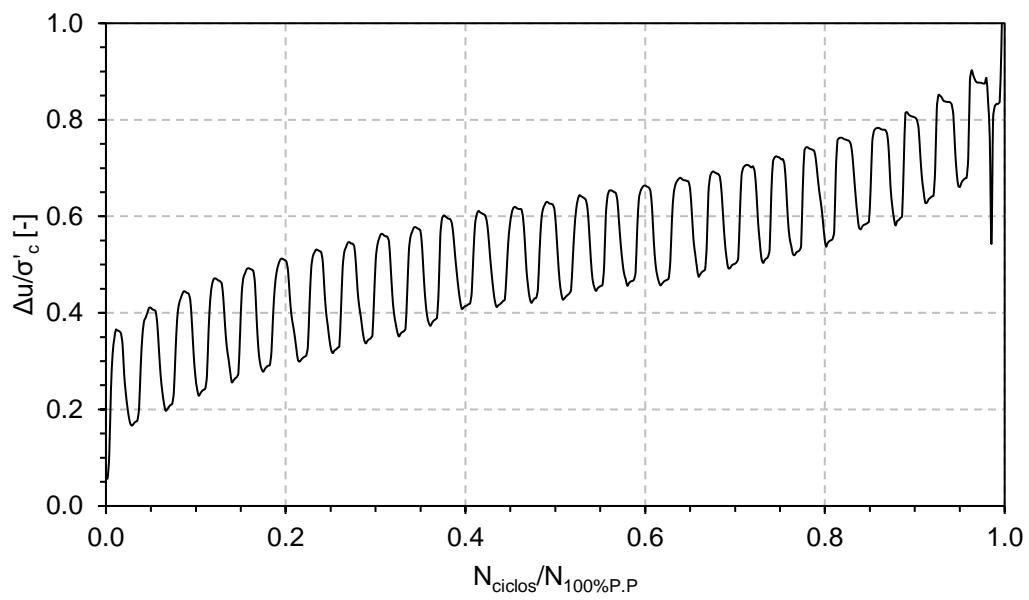
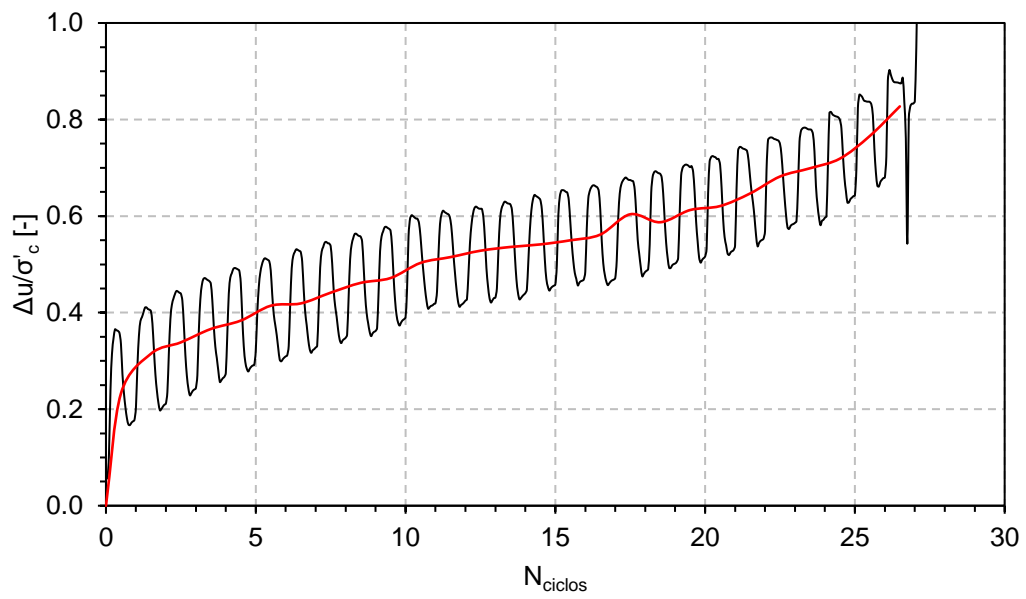


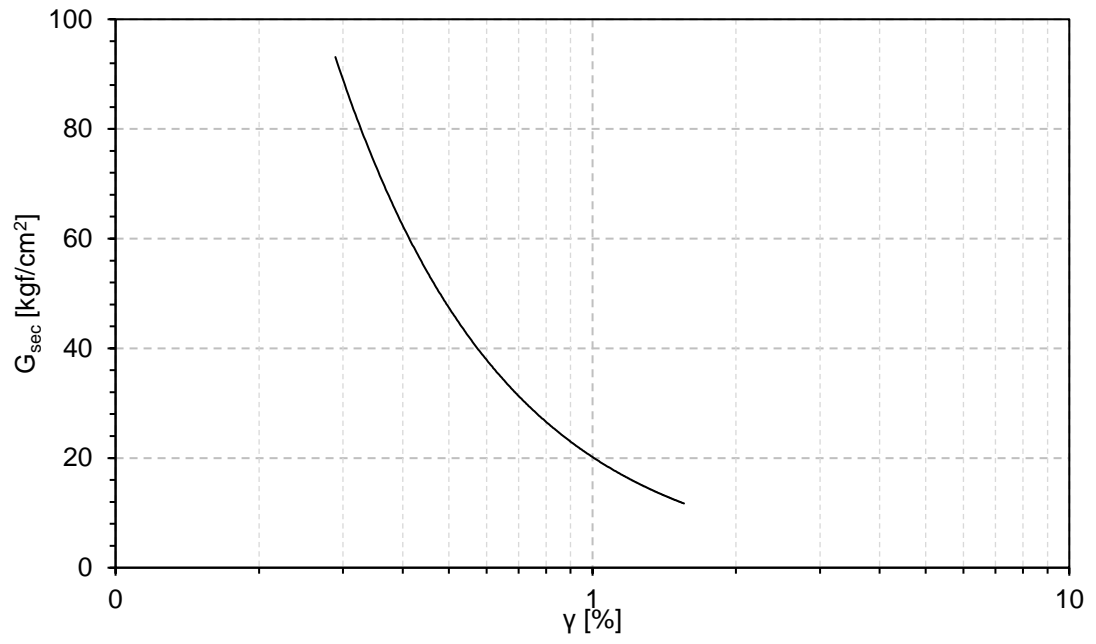


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #3			
ID	CST3	CSR	0.237
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	27
BP [kgf/cm ²]	2	N _{5%D.A}	27
DR _f [%]	38	N _{10%D.A}	27
B - value [%]	95		

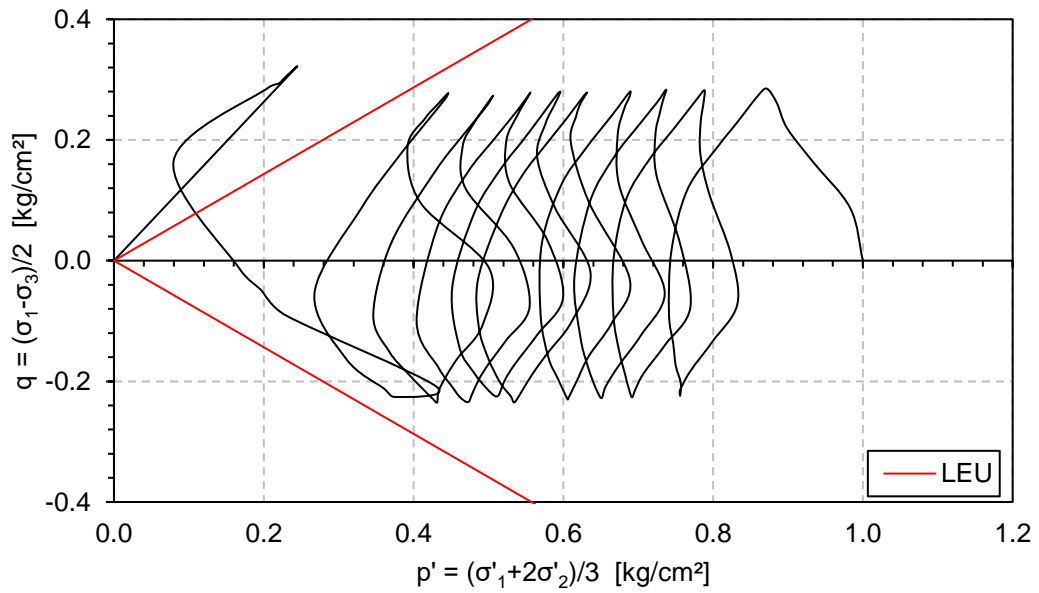
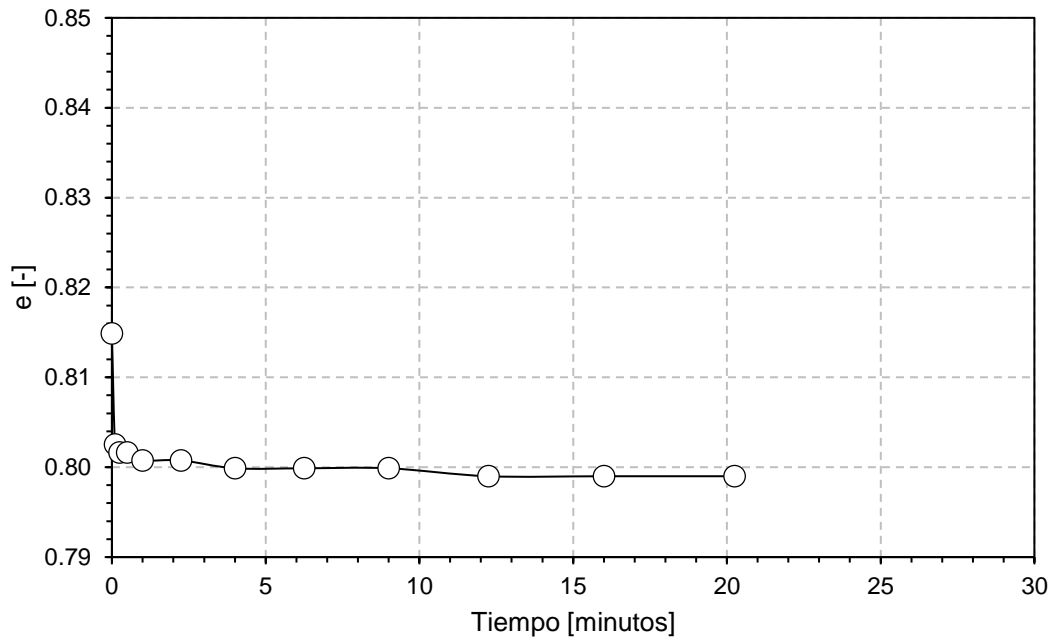


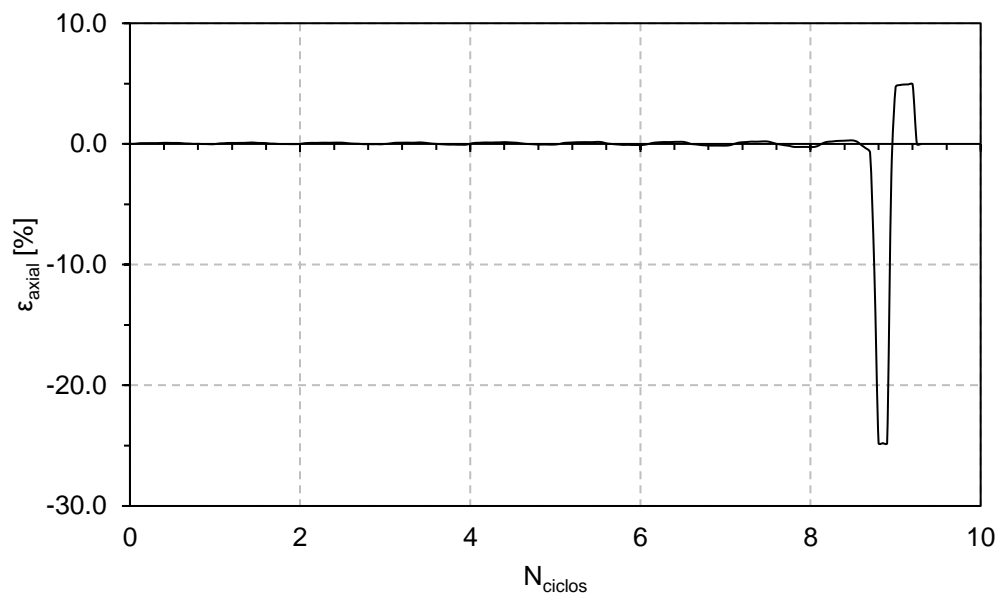
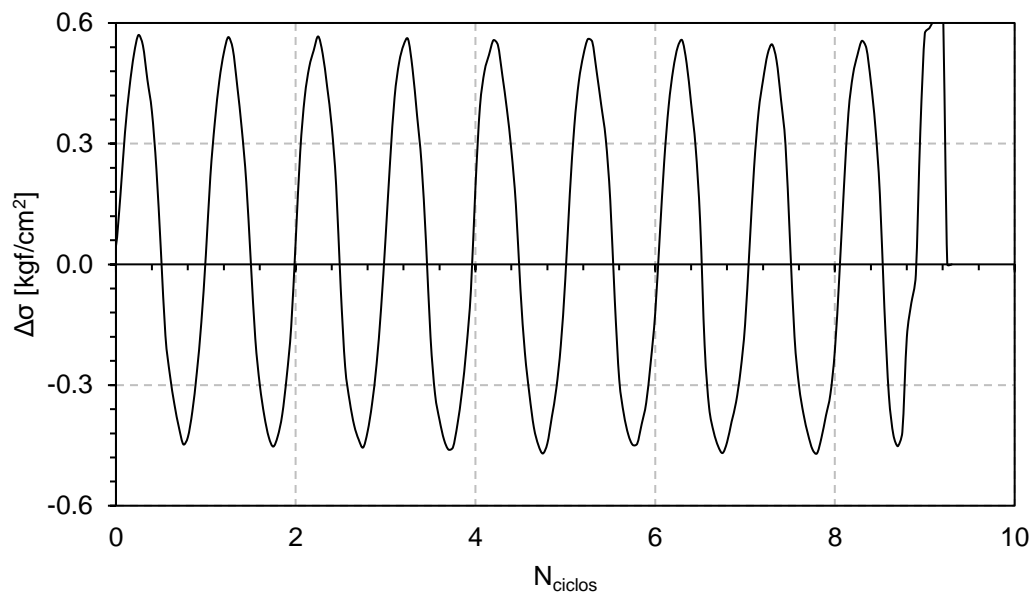


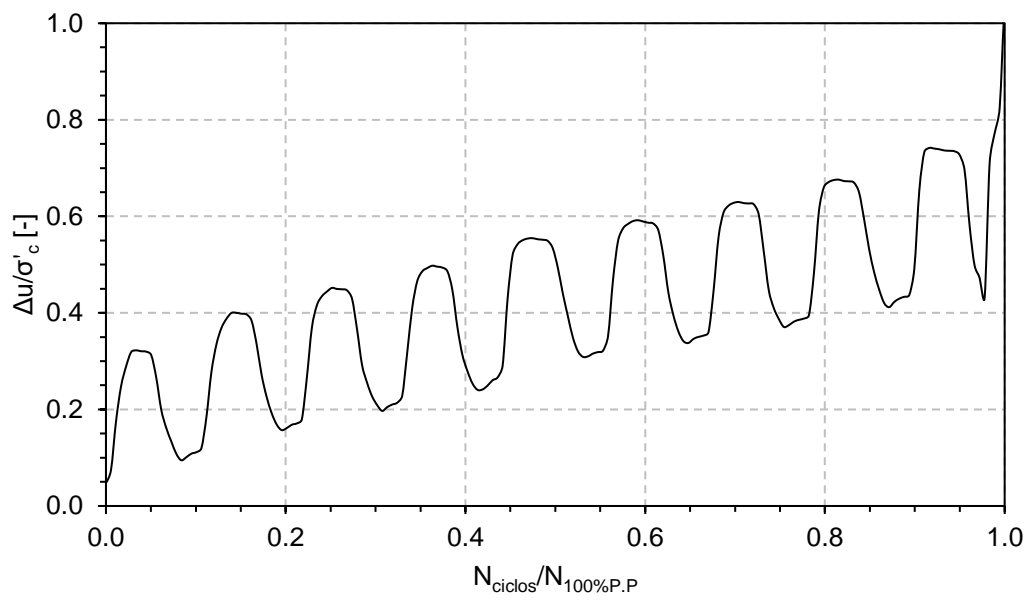
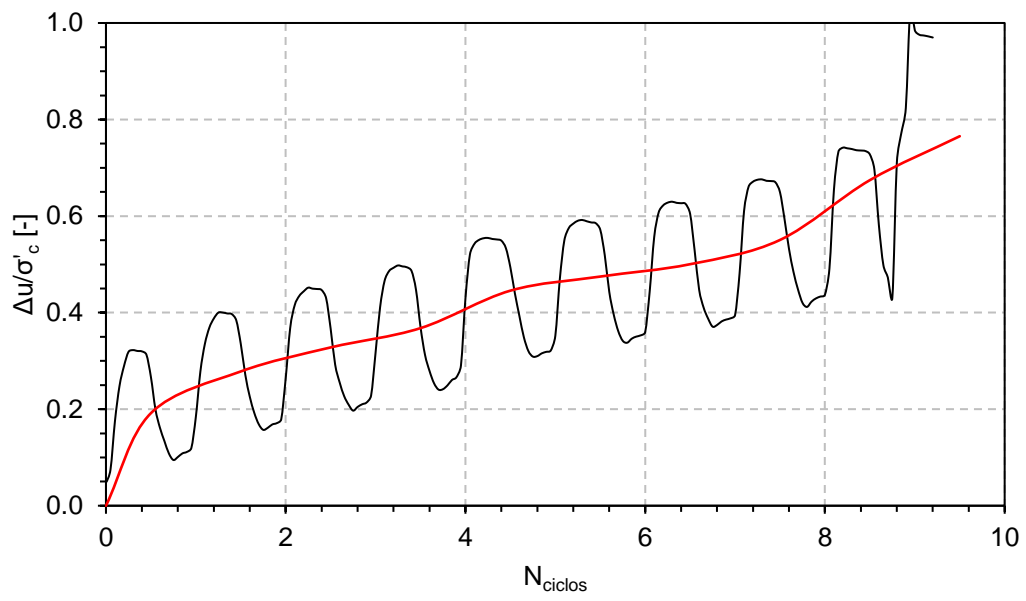


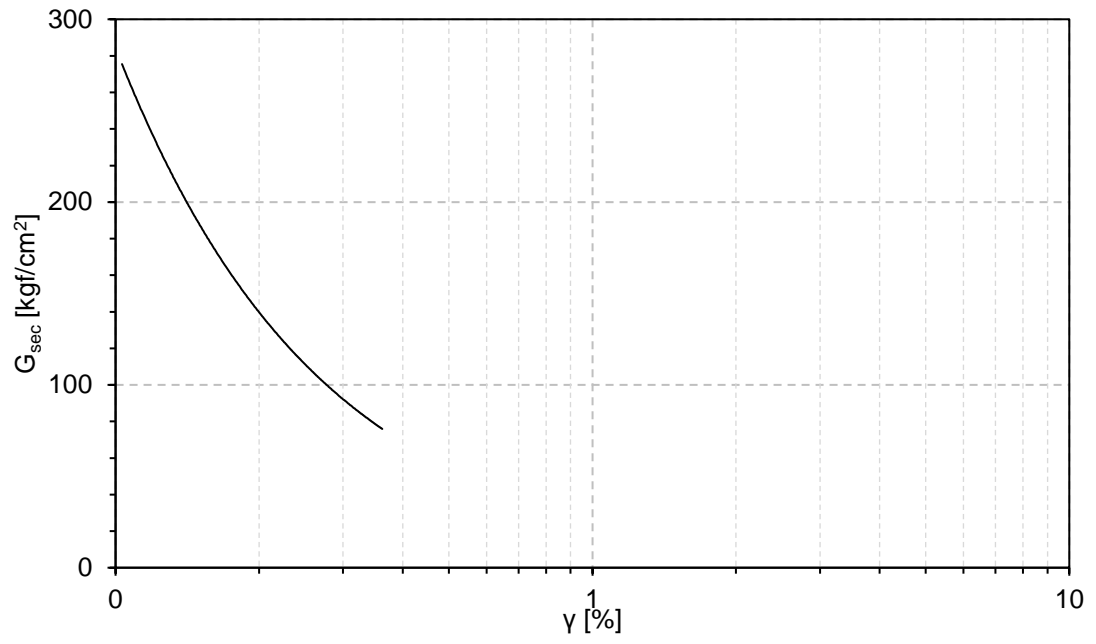


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #4			
ID	CST4	CSR	0.255
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	9
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	9
DR _f [%]	40	N _{10%D.A}	9
B - value [%]	95		

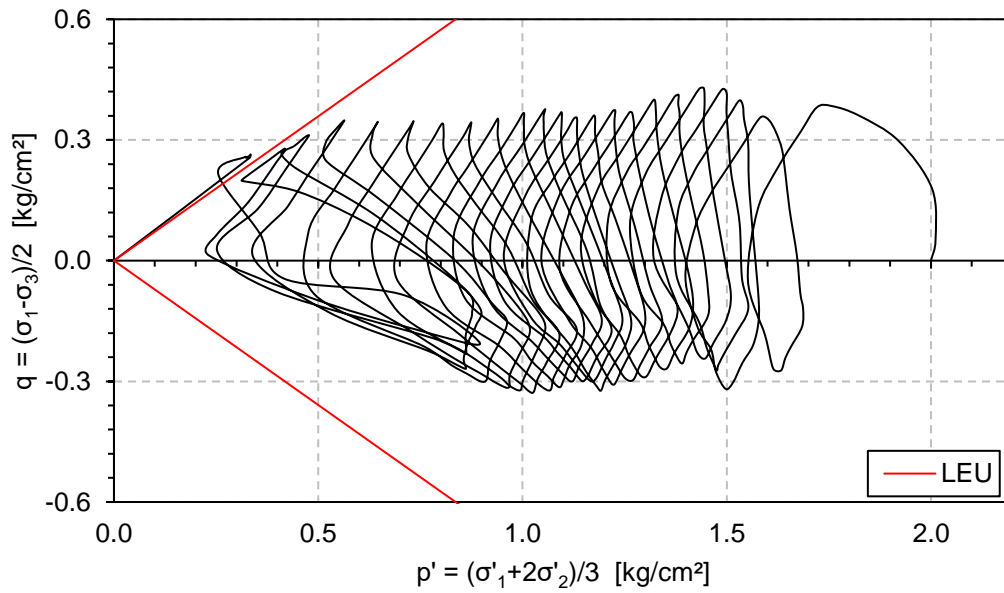
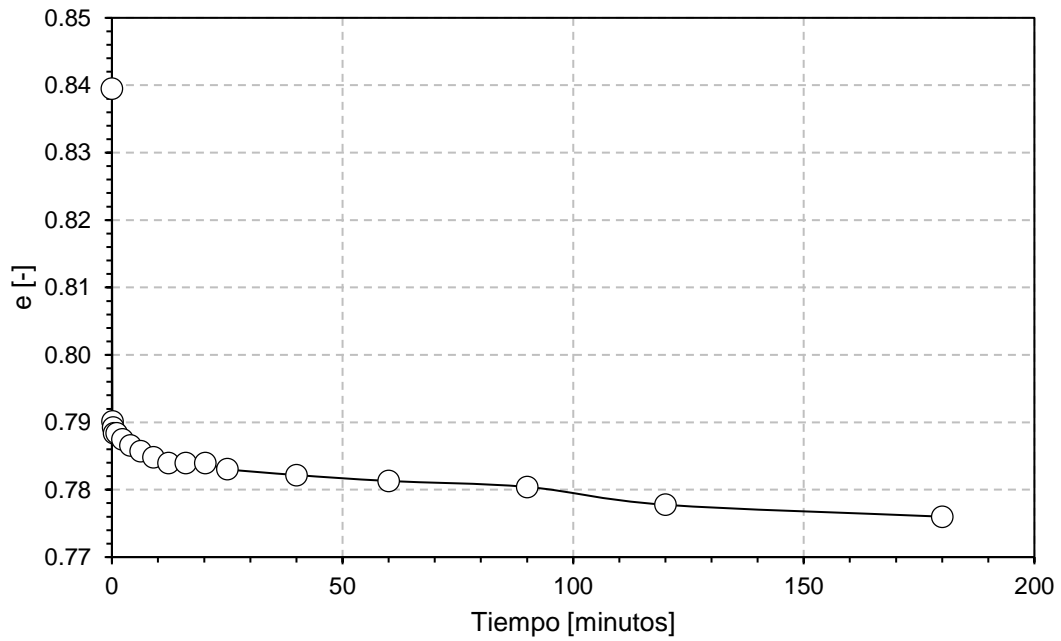


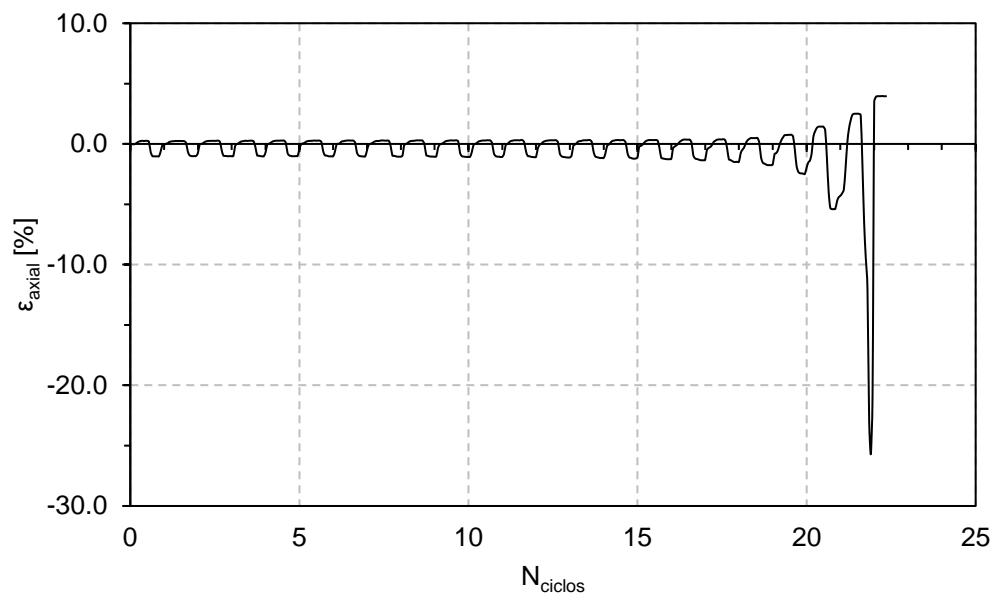
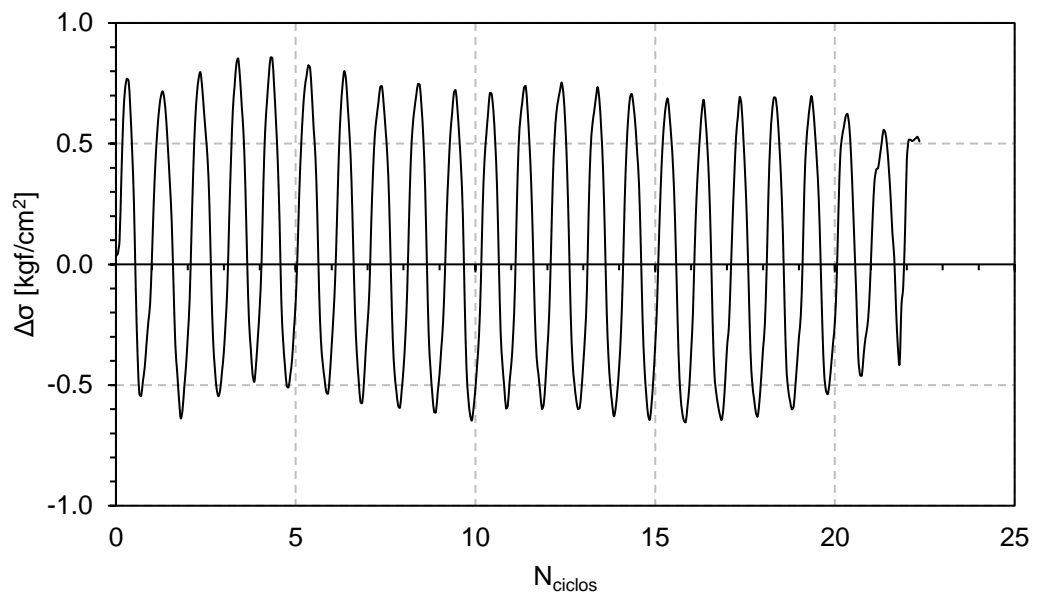


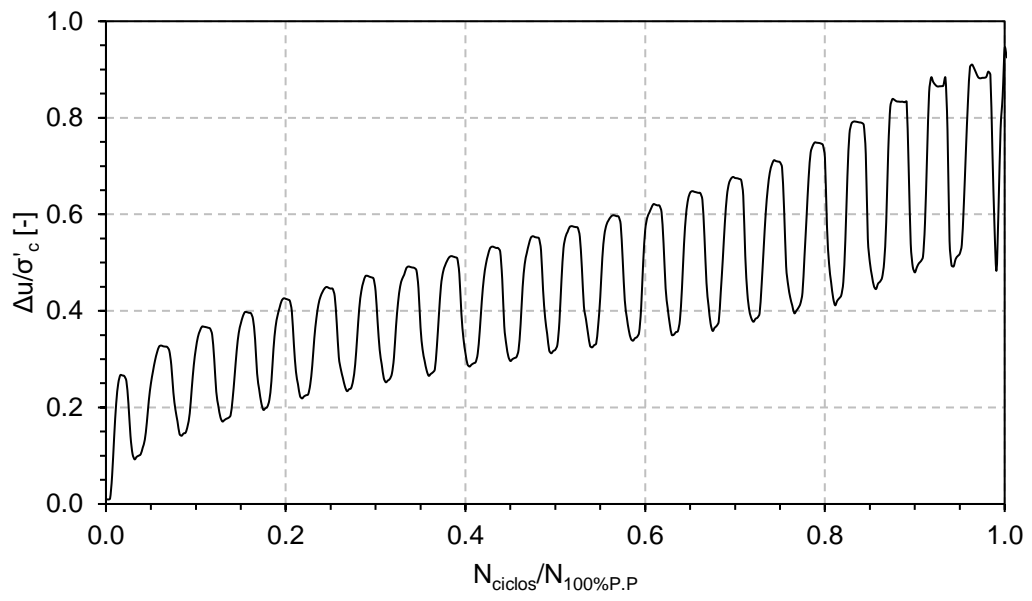
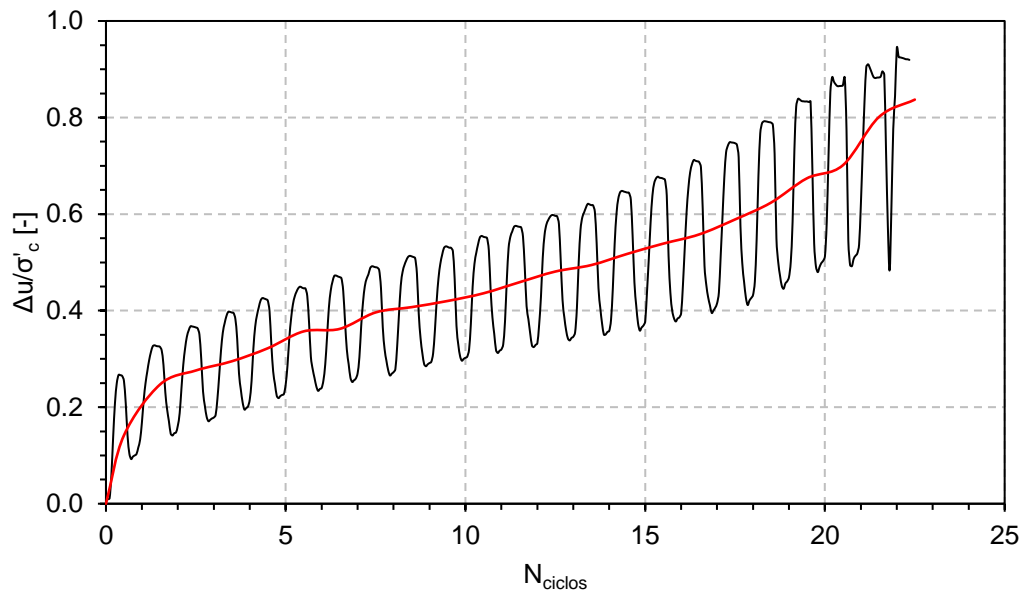


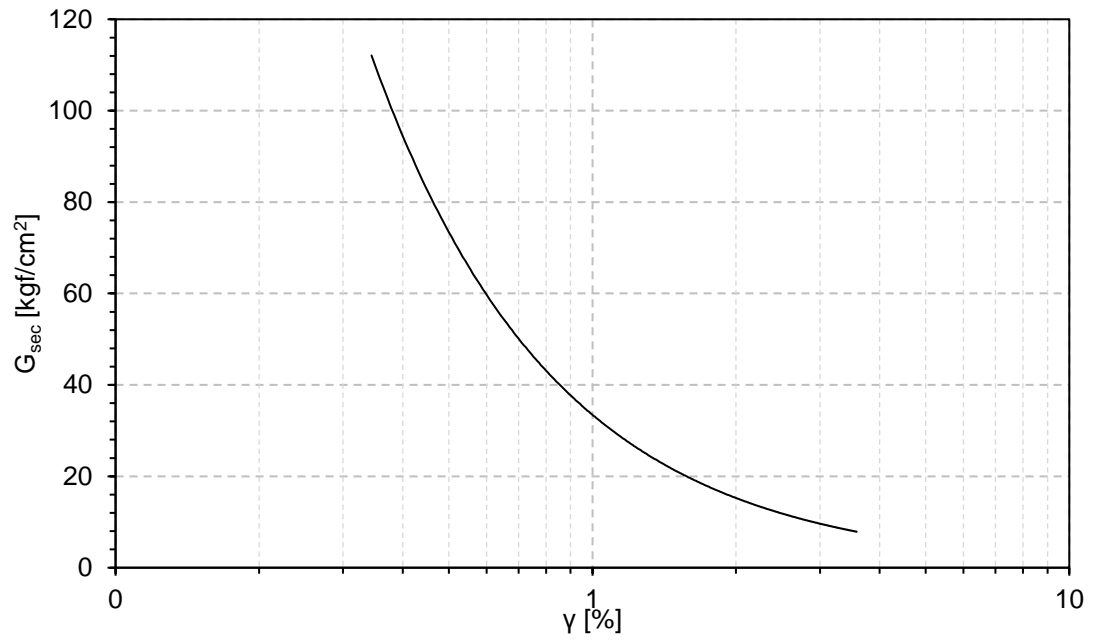


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #5			
ID	CST5	CSR	0.164
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	22
BP [kgf/cm ²]	2	N _{5%D.A}	21
DR _f [%]	43	N _{10%D.A}	22
B - value [%]	98		

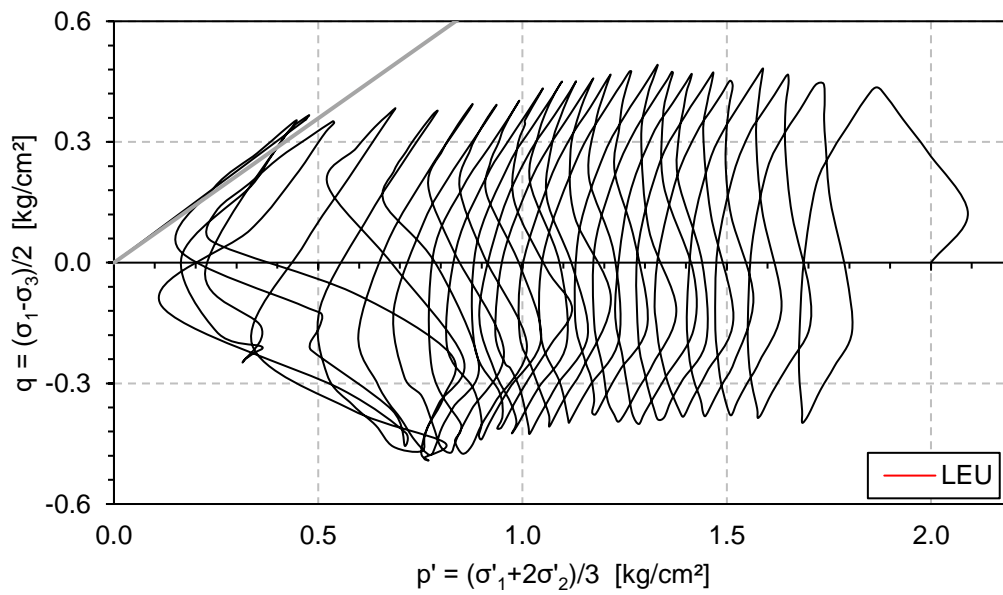
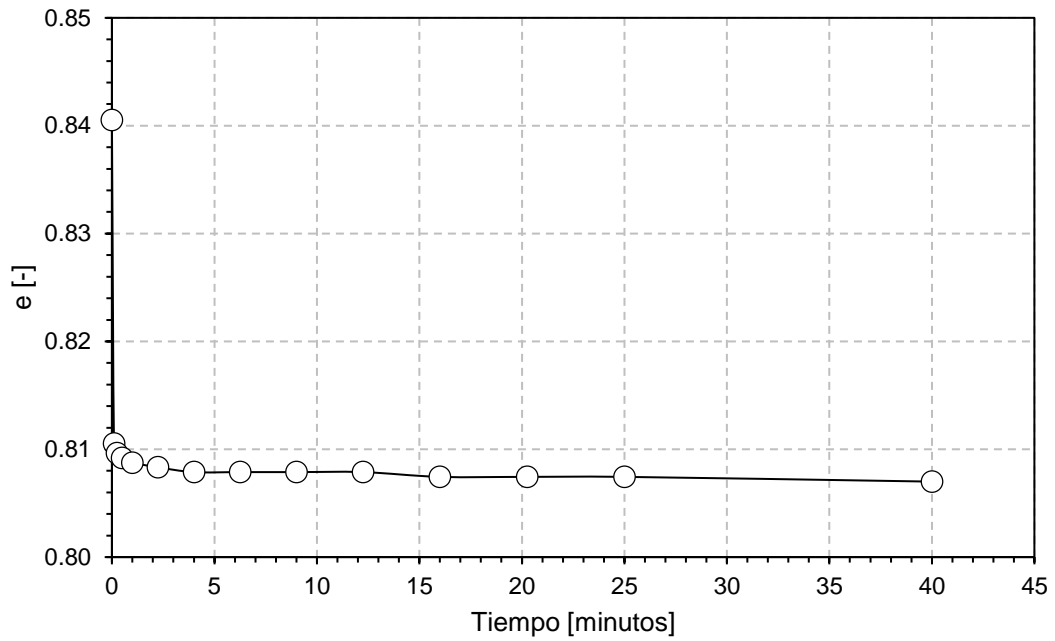


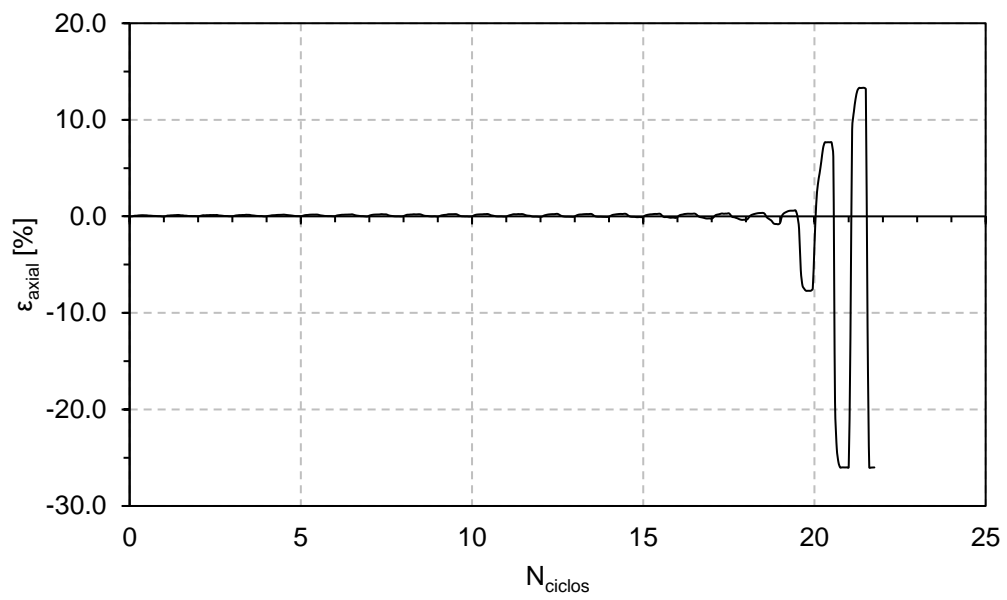
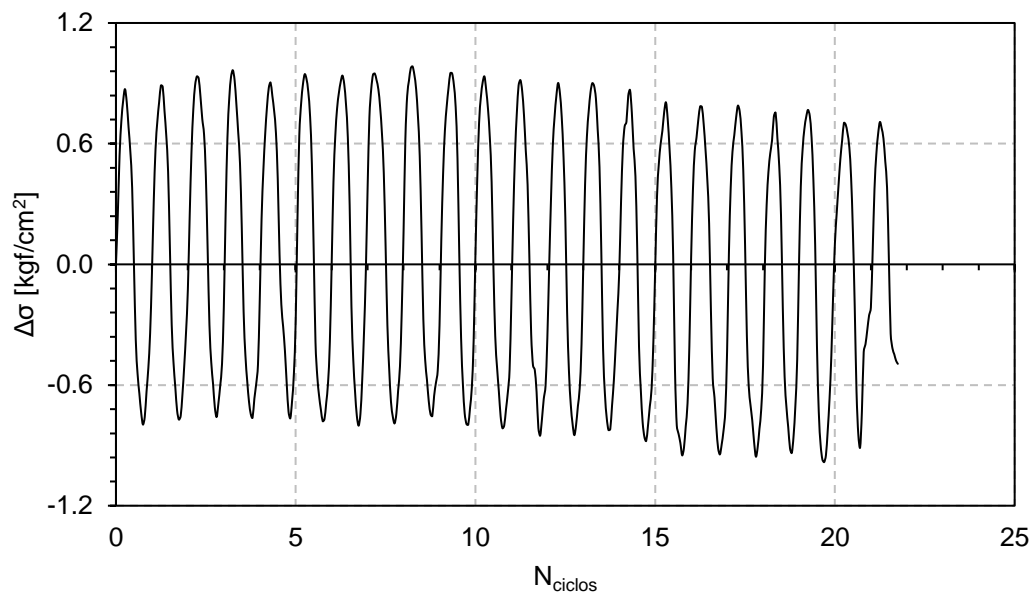


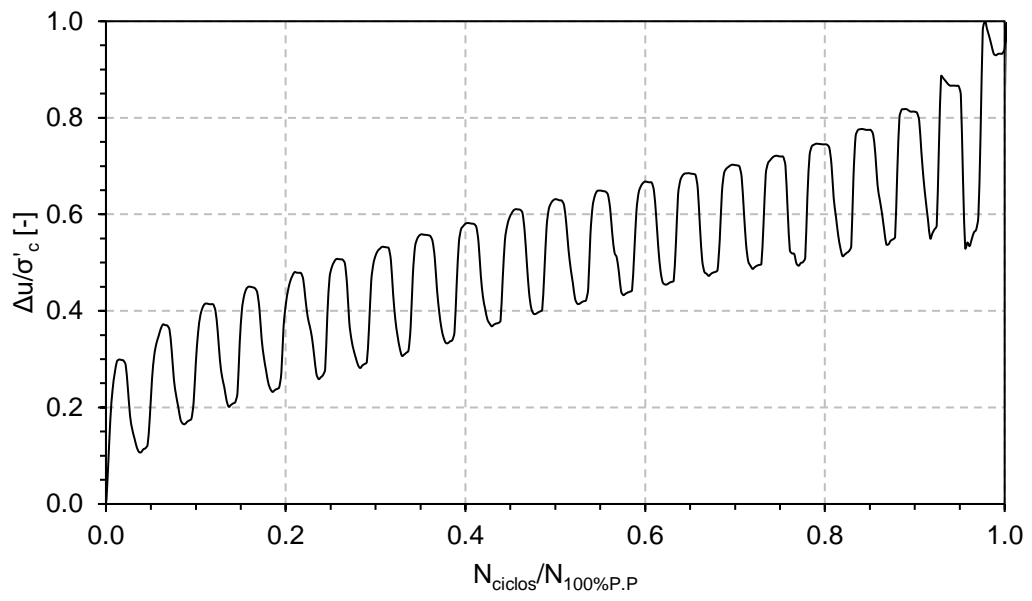
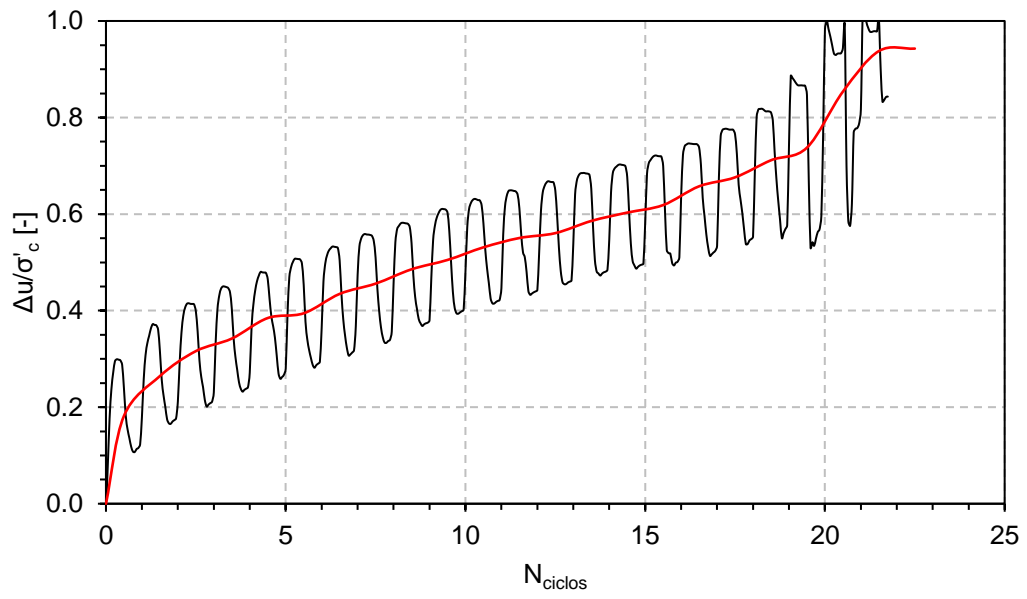


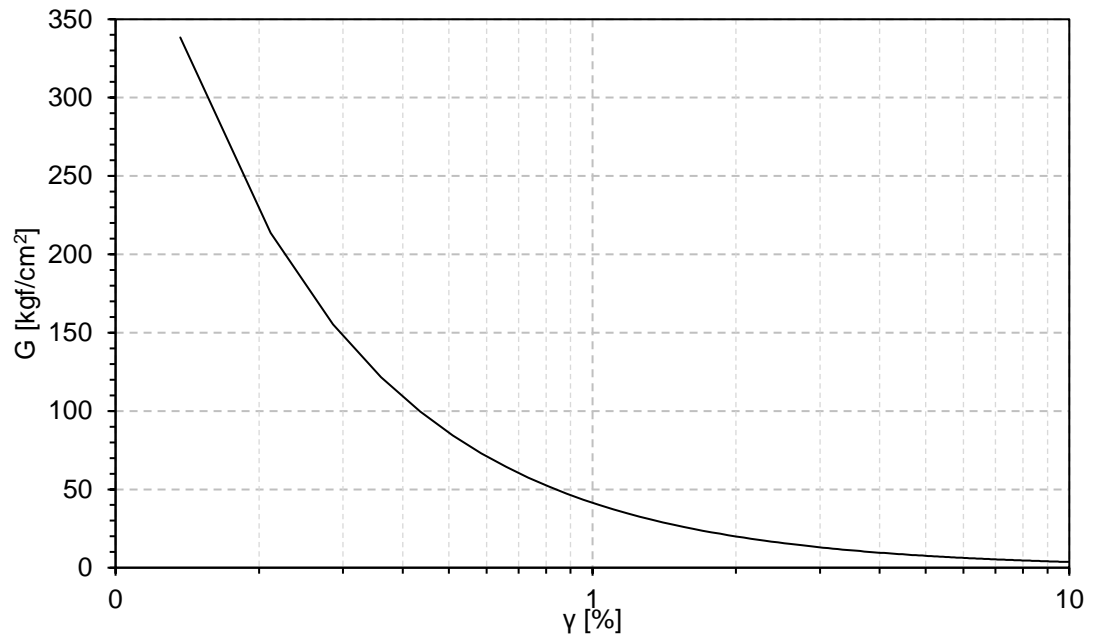


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #6			
ID	CST6	CSR	0.214
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	20
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	20
DR _f [%]	38	N _{10%D.A}	20
B - value [%]	97		

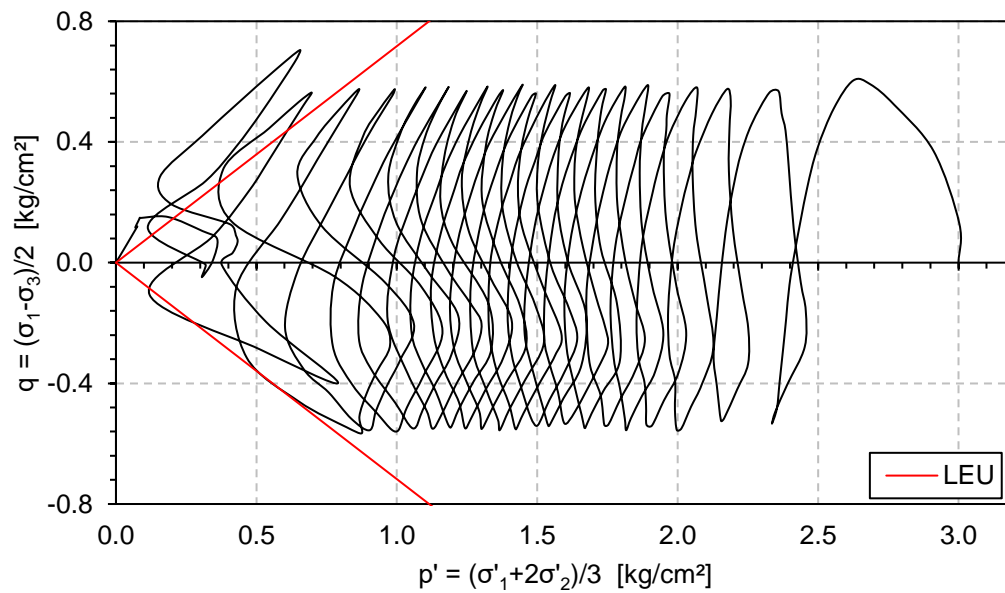
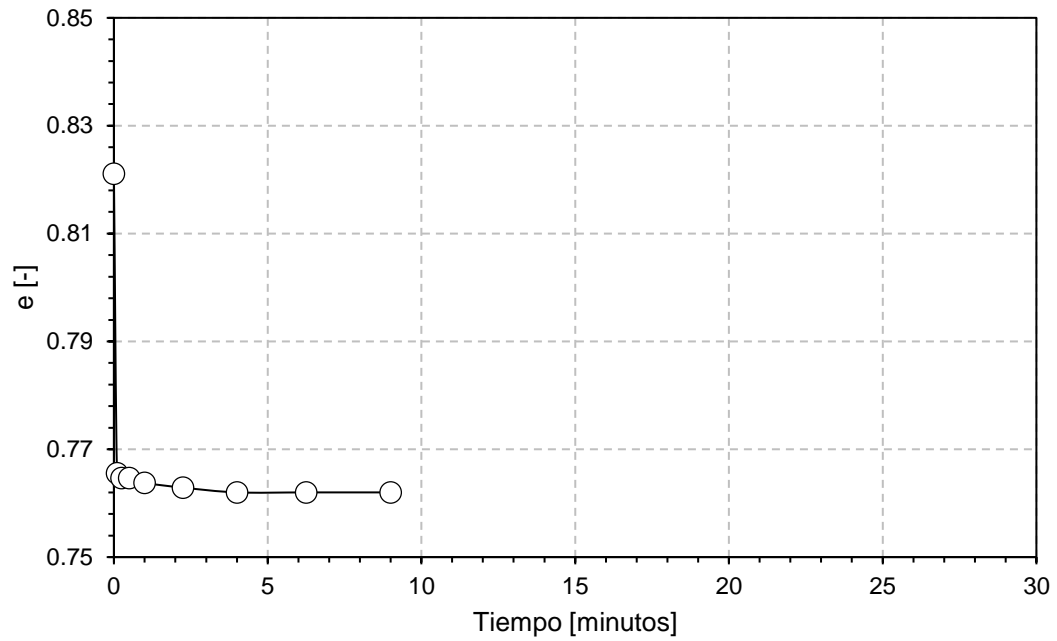


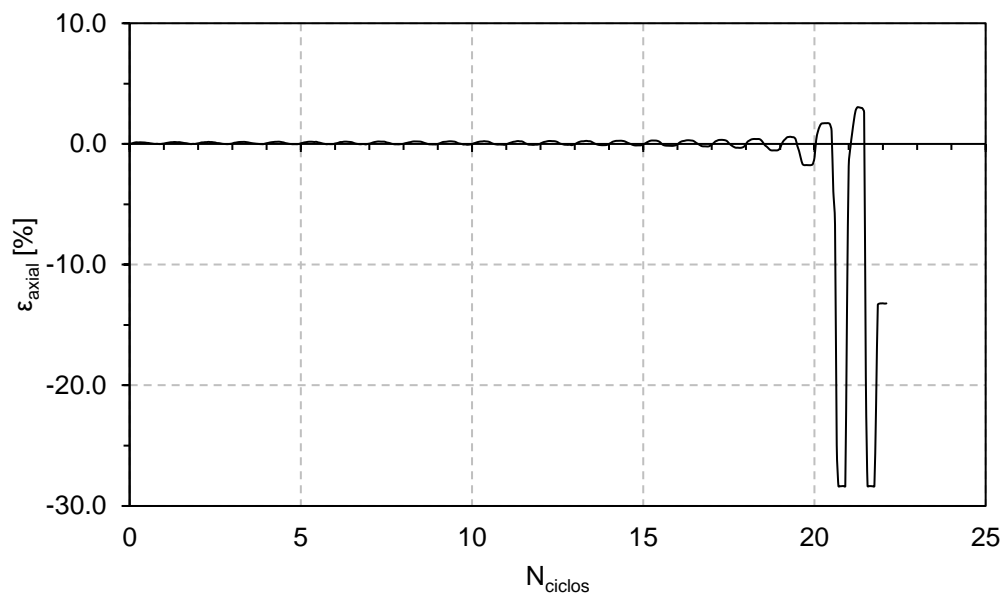
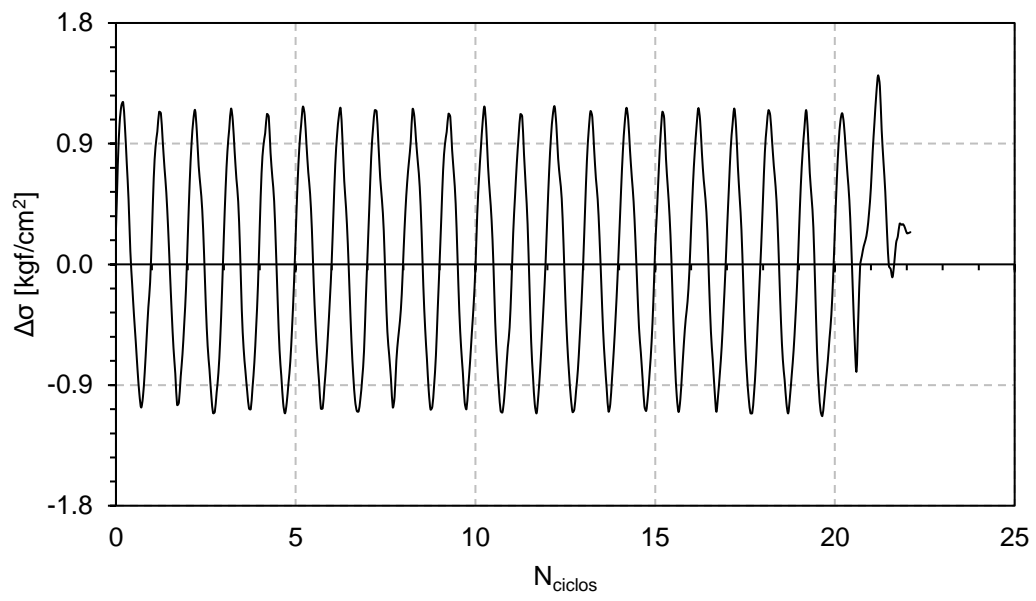


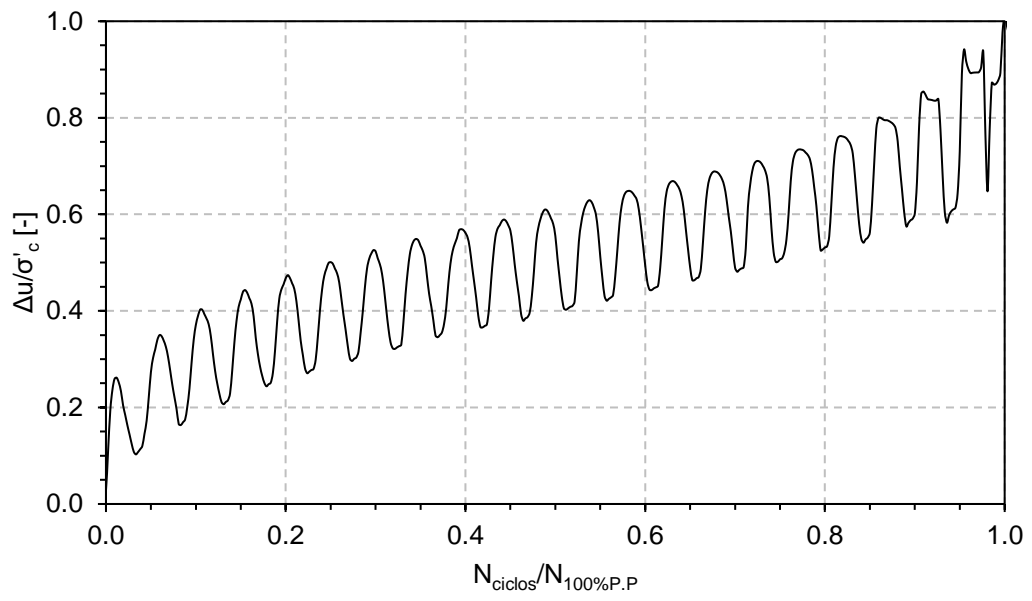
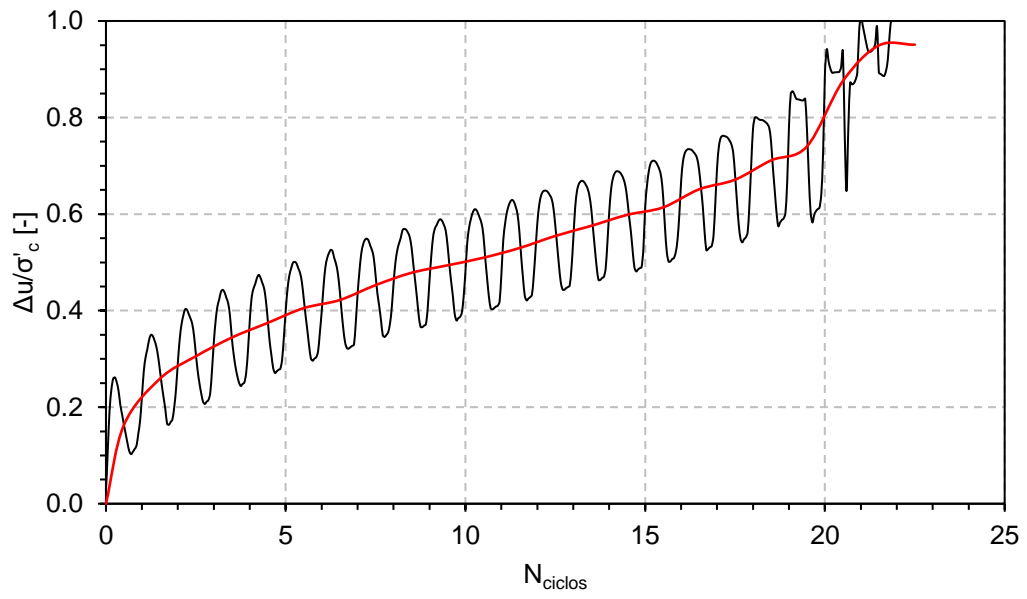


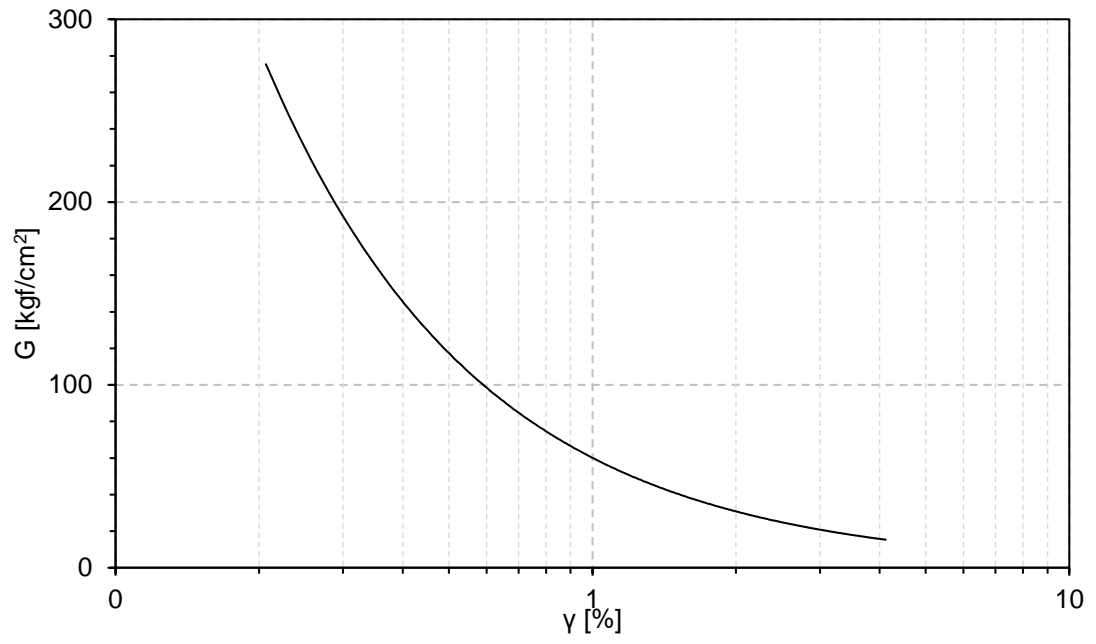


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #7			
ID	CST7	CSR	0.187
p'_0 [kgf/cm ²]	3	N _{100%P.P}	21
BP [kgf/cm ²]	2	N _{5%D.A}	21
DR _f [%]	45	N _{10%D.A}	21
B - value [%]	99		

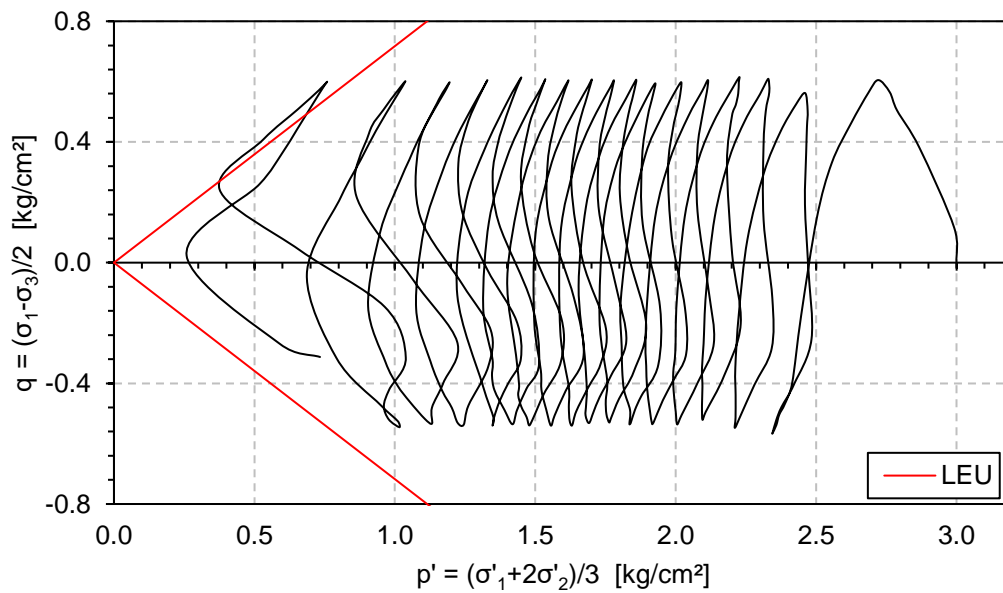
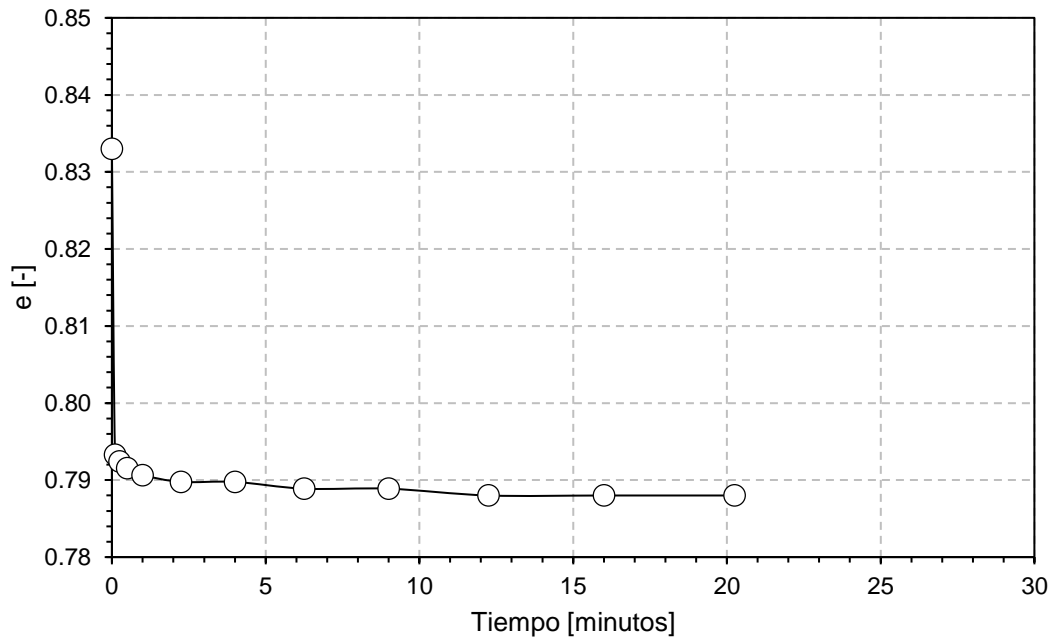


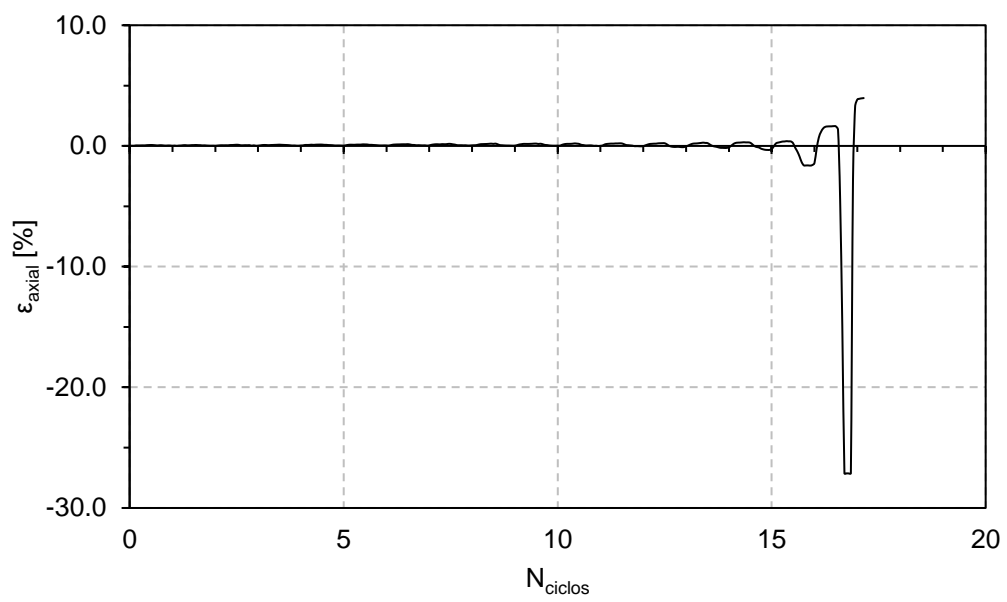
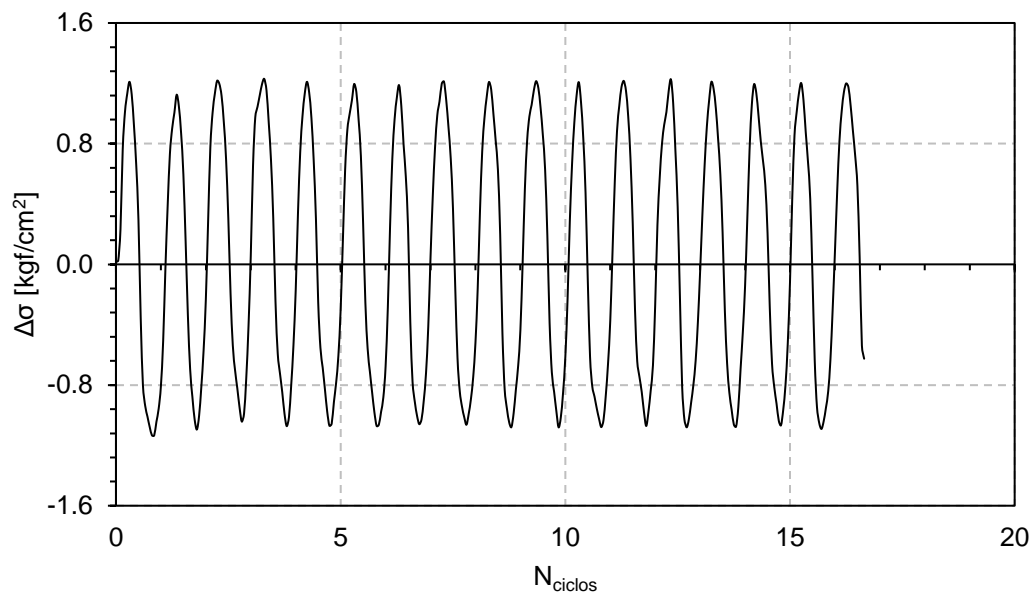


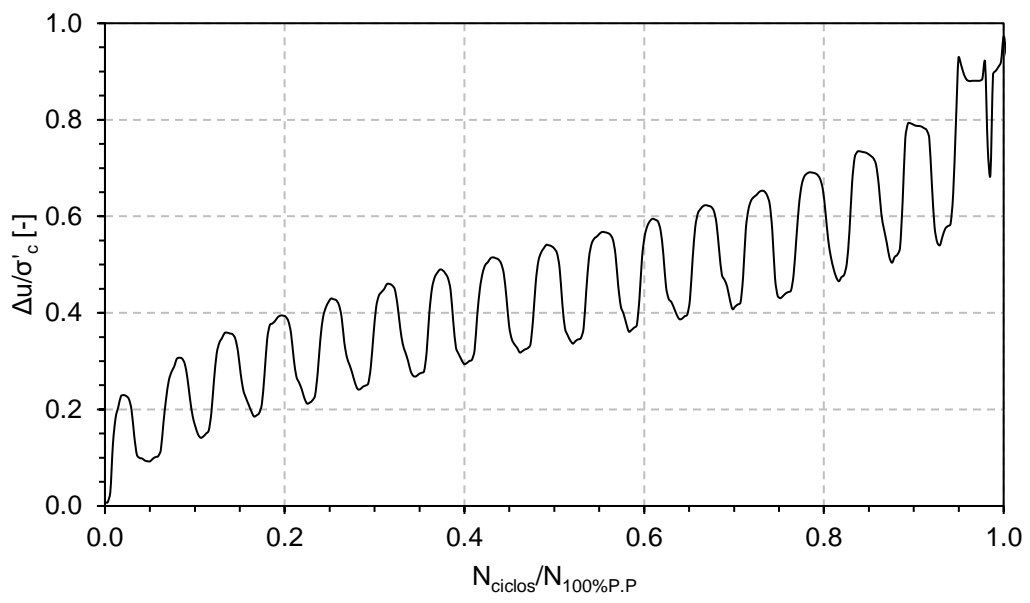
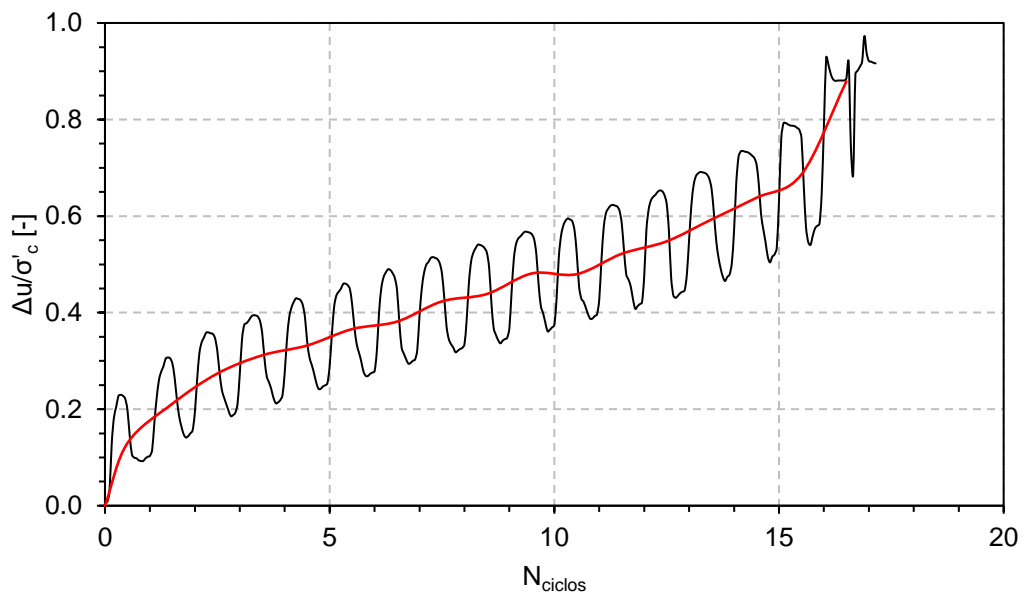


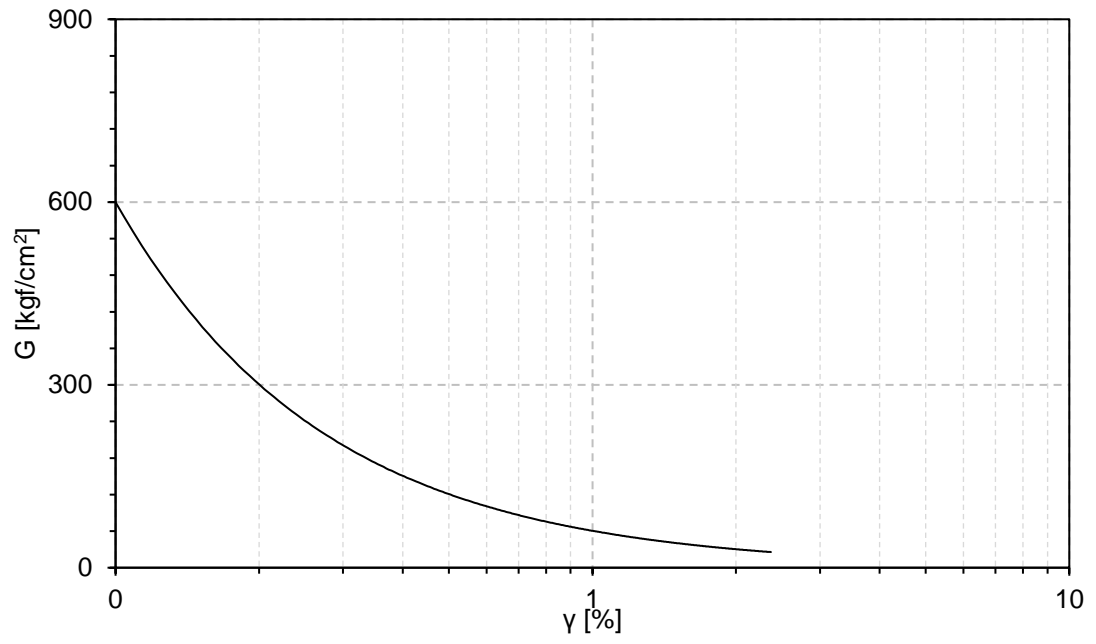


Información Ensayo Triaxial Cíclico Sin Tratamiento #8			
ID	CST8	CSR	0.194
p'_0 [kgf/cm ²]	3	N _{100%P.P}	17
BP [kgf/cm ²]	2	N _{5%D.A}	17
DR _f [%]	41	N _{10%D.A}	17
B - value [%]	95		

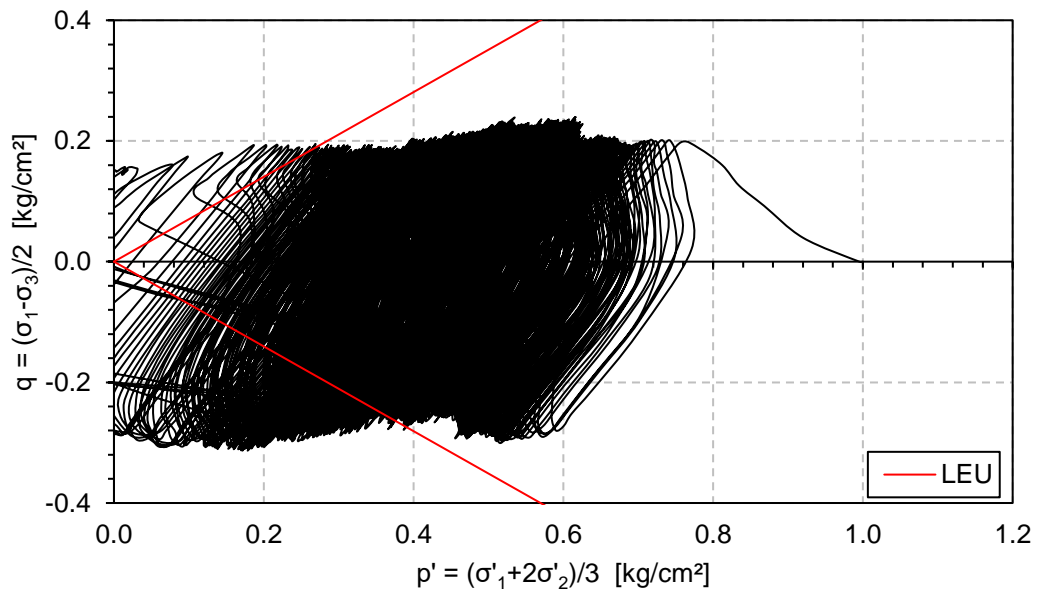
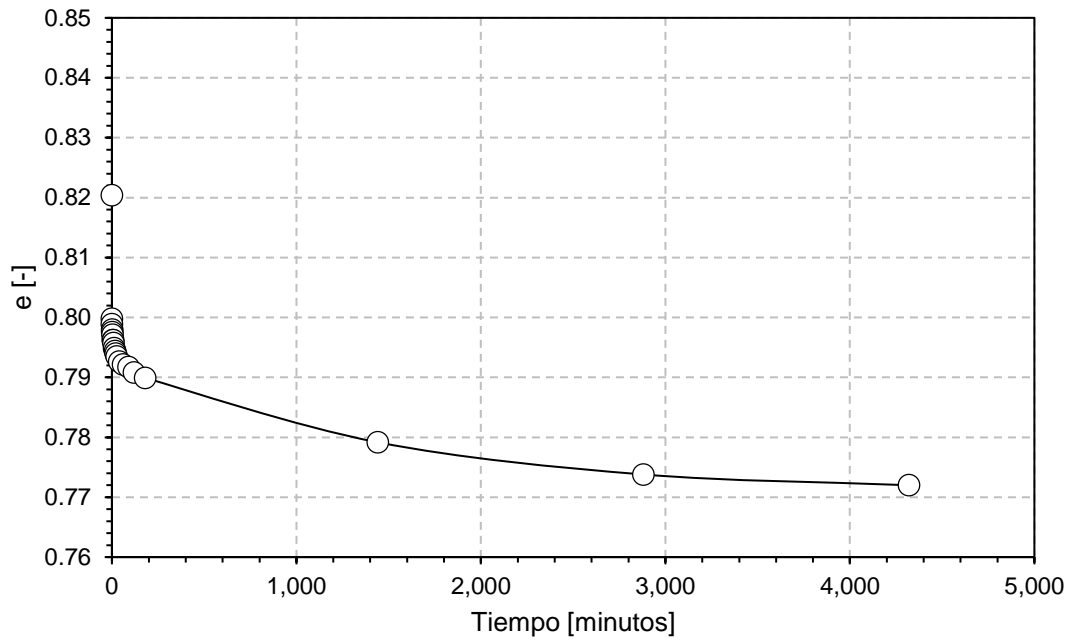


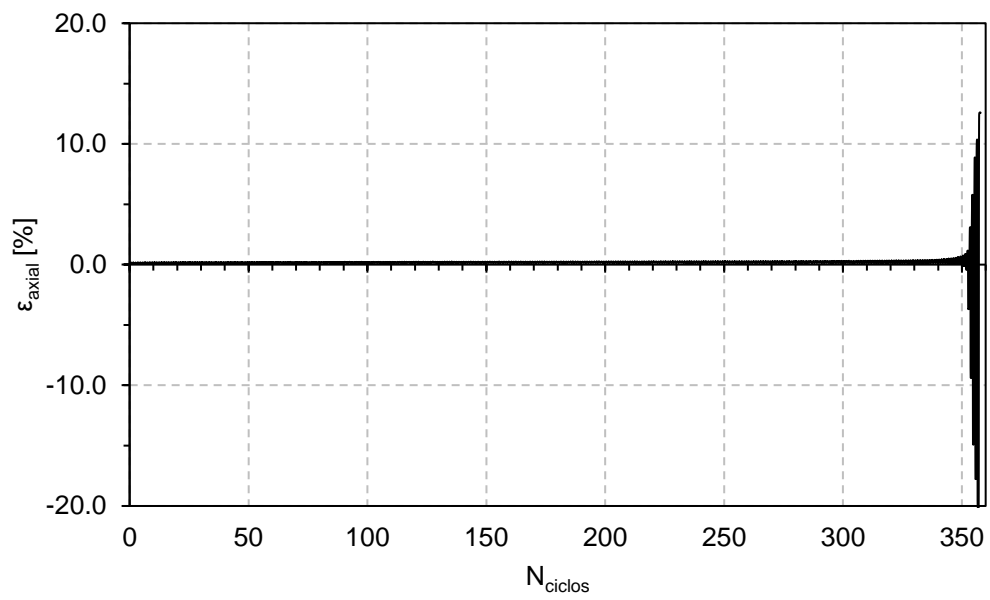
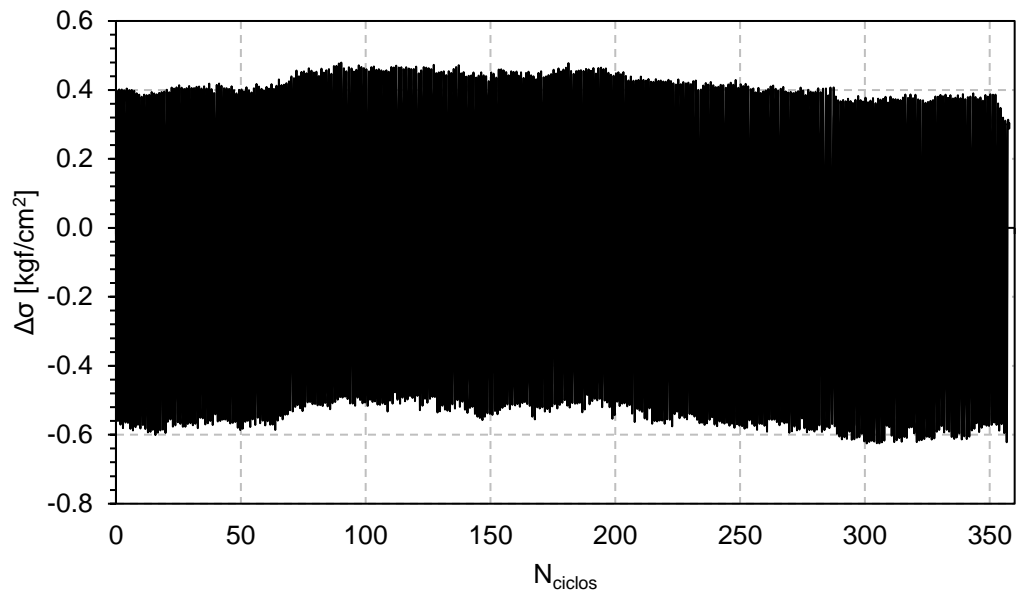


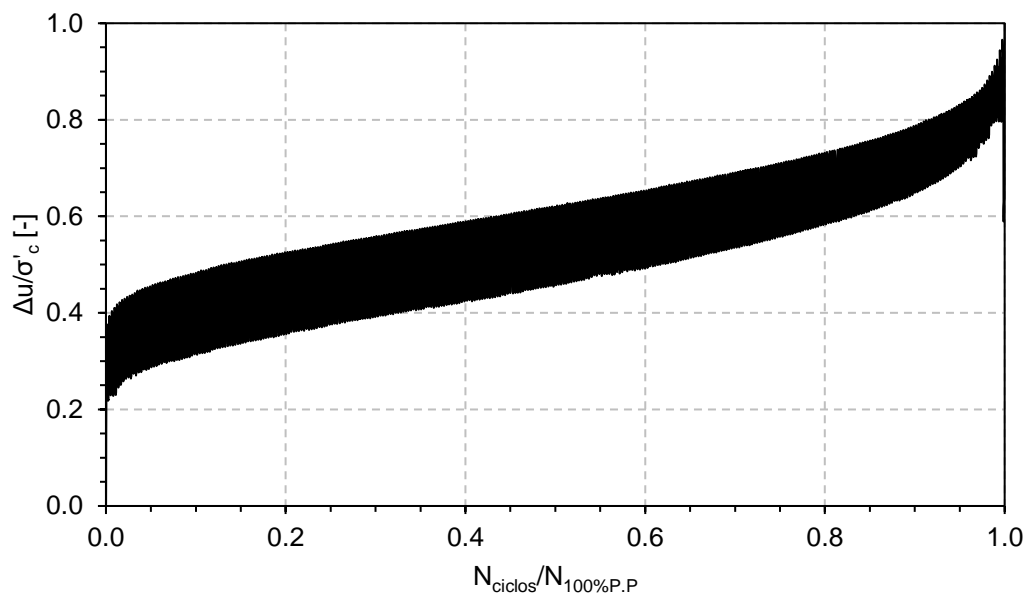
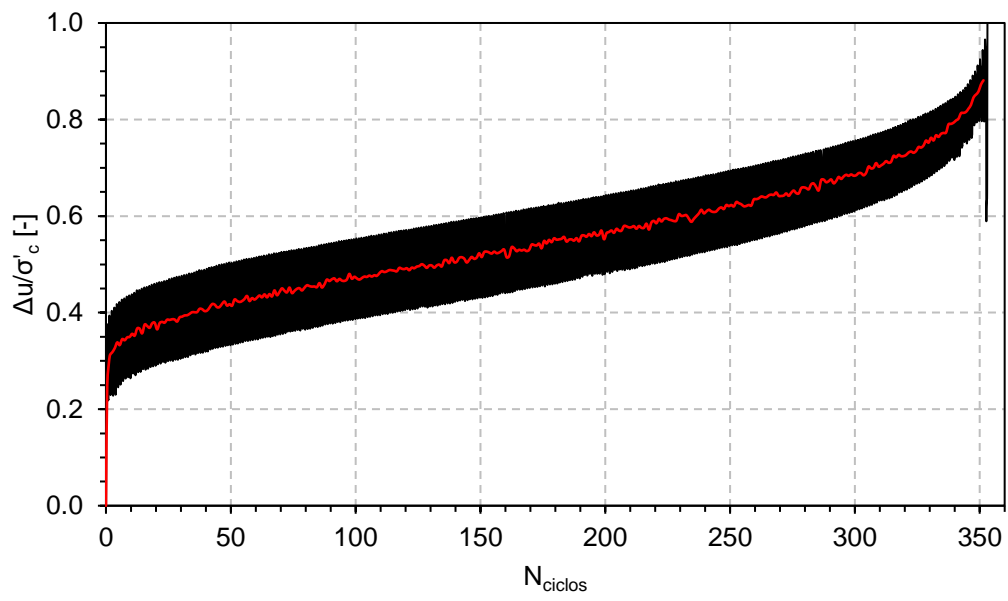


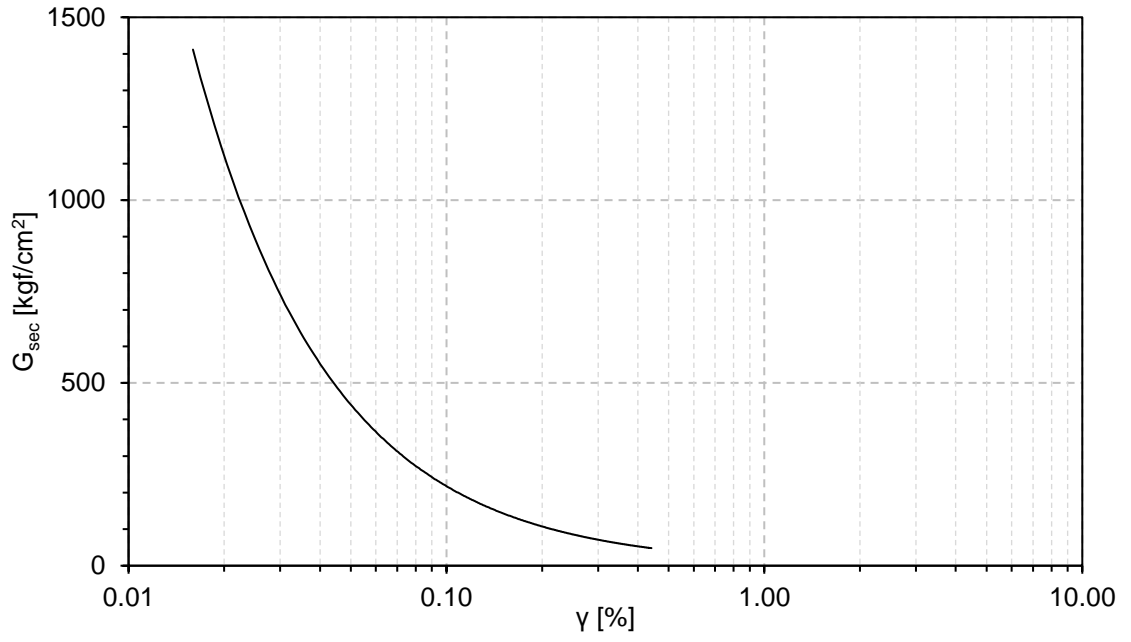


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #1			
ID	CCT1	CSR	0.243
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	353
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	353
DR _f [%]	44	N _{10%D.A}	354
B - value [%]	97		

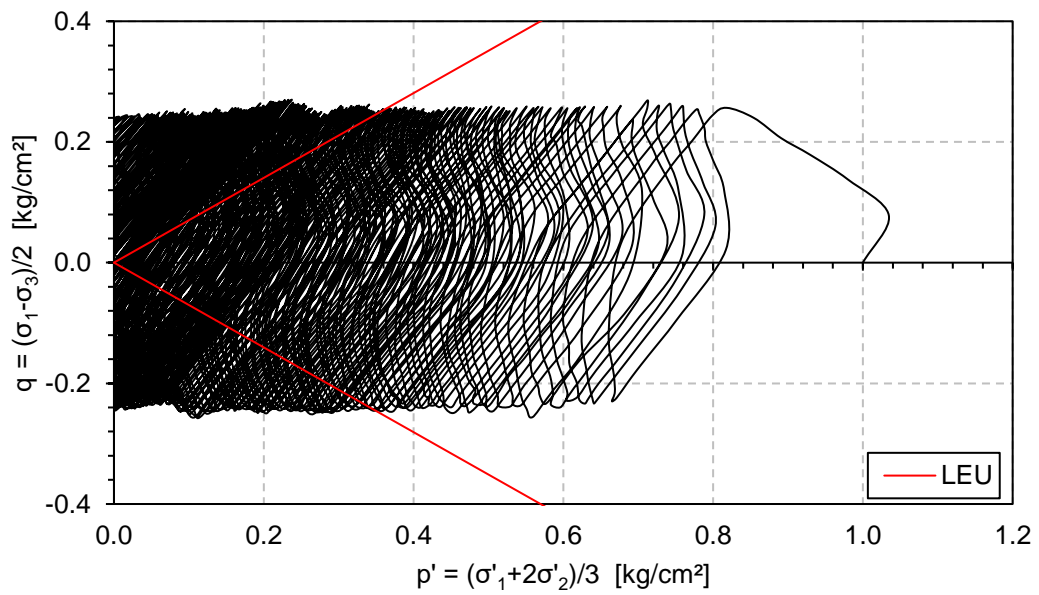
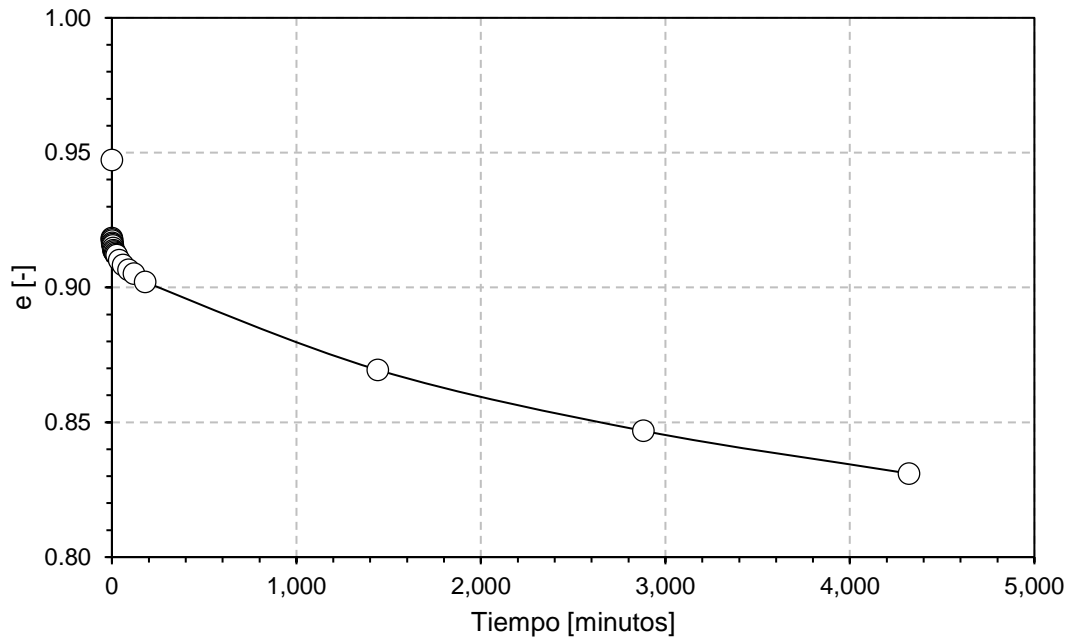


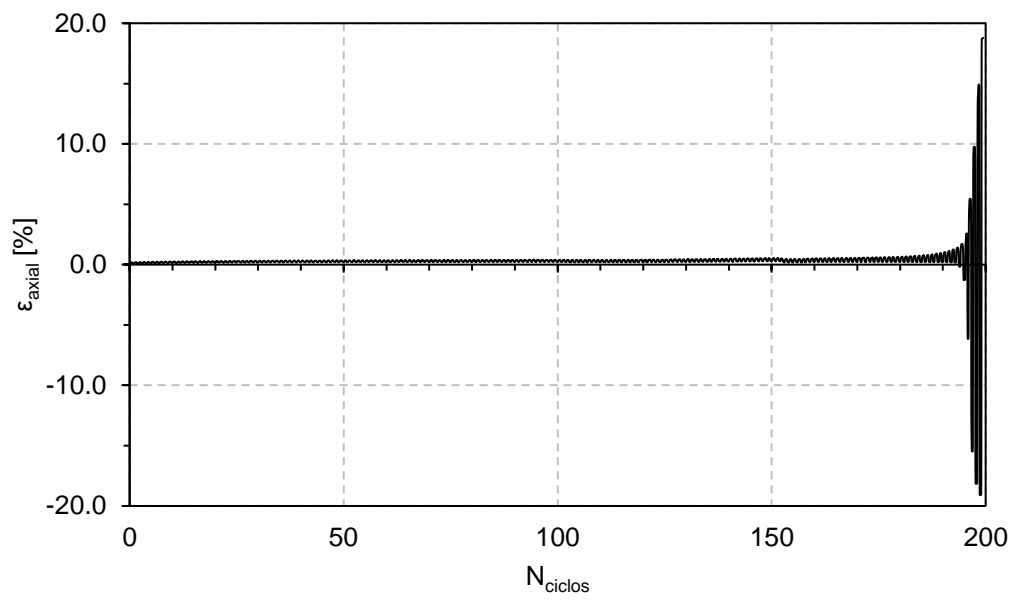
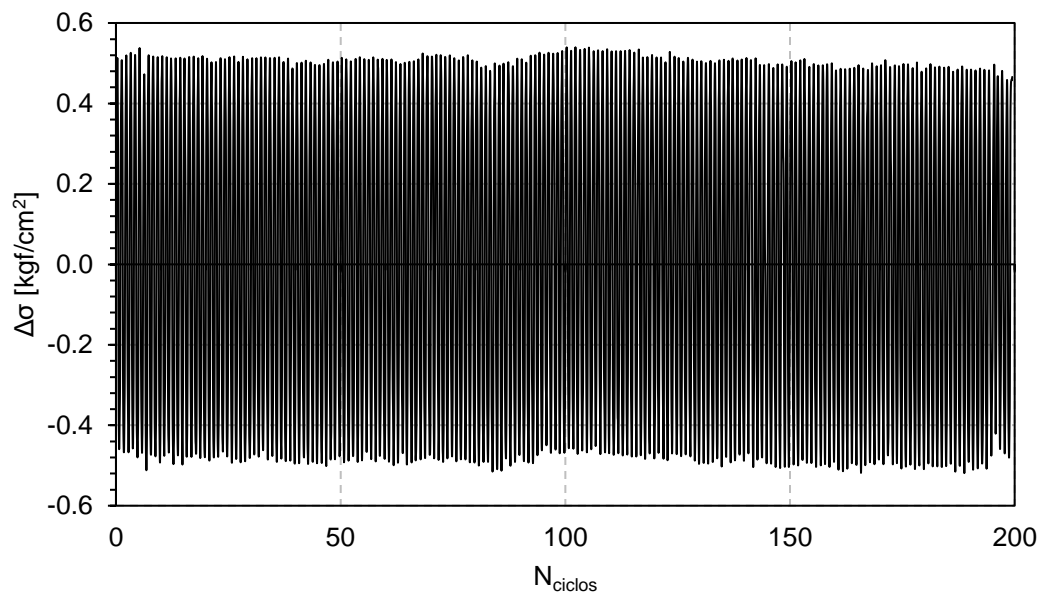


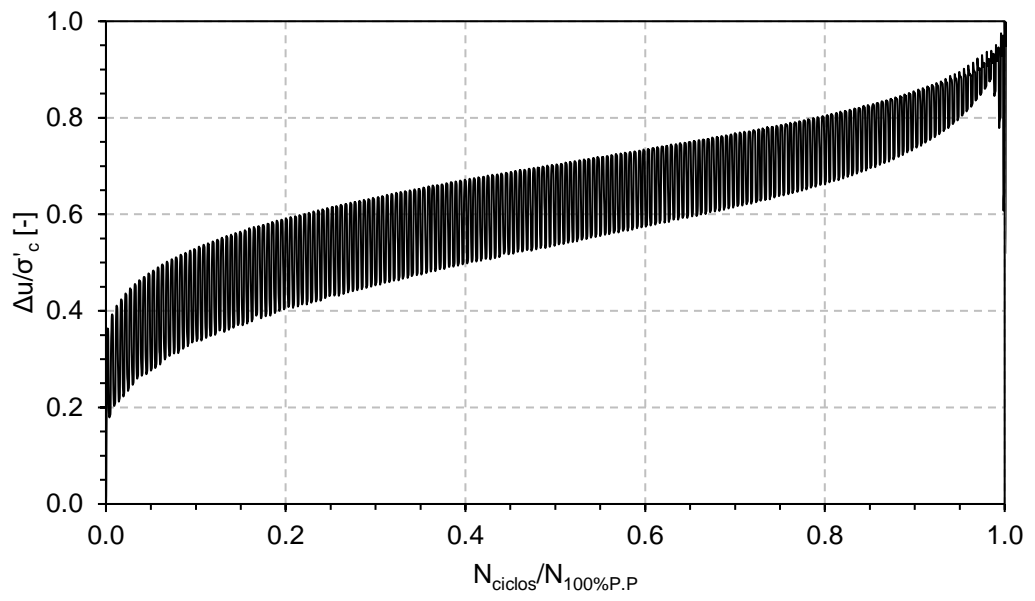
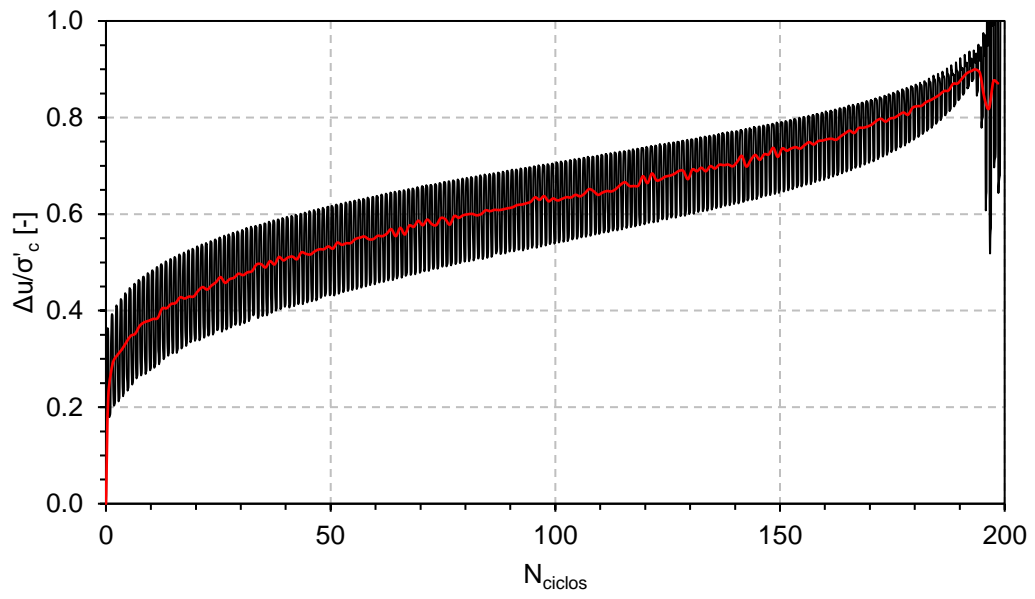


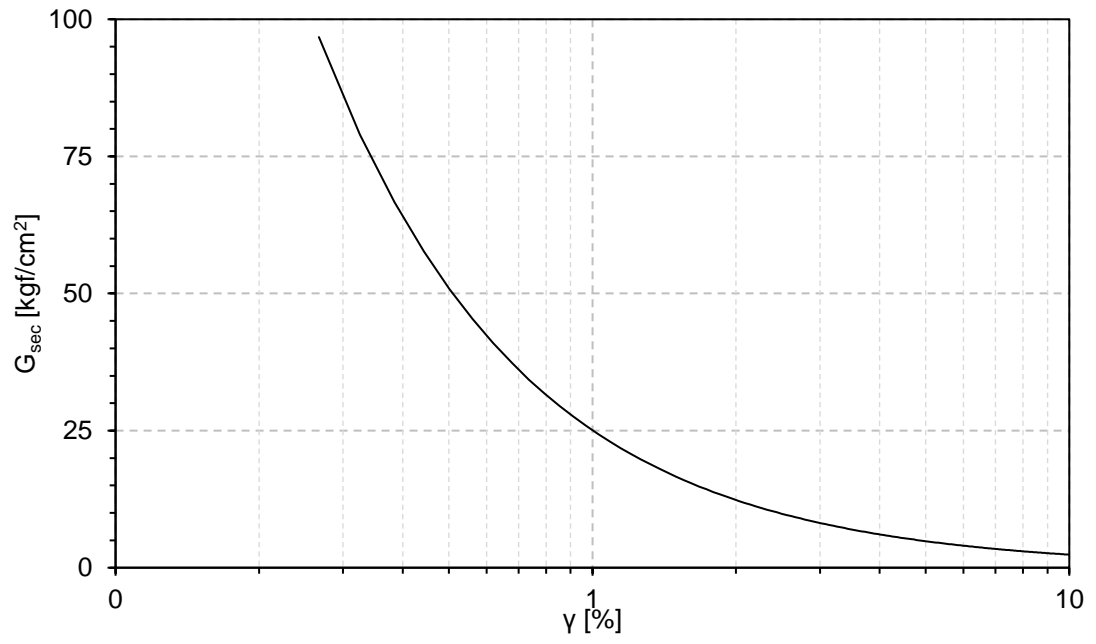


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #2			
ID	CCT2	CSR	0.248
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	196
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	196
DR _f [%]	35	N _{10%D.A}	196
B - value [%]	97		

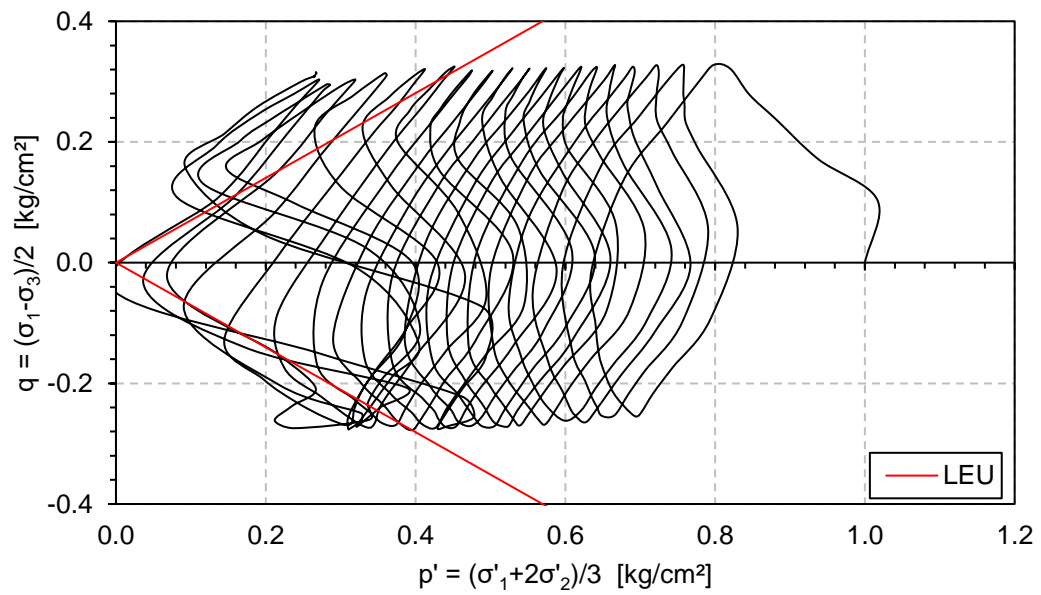
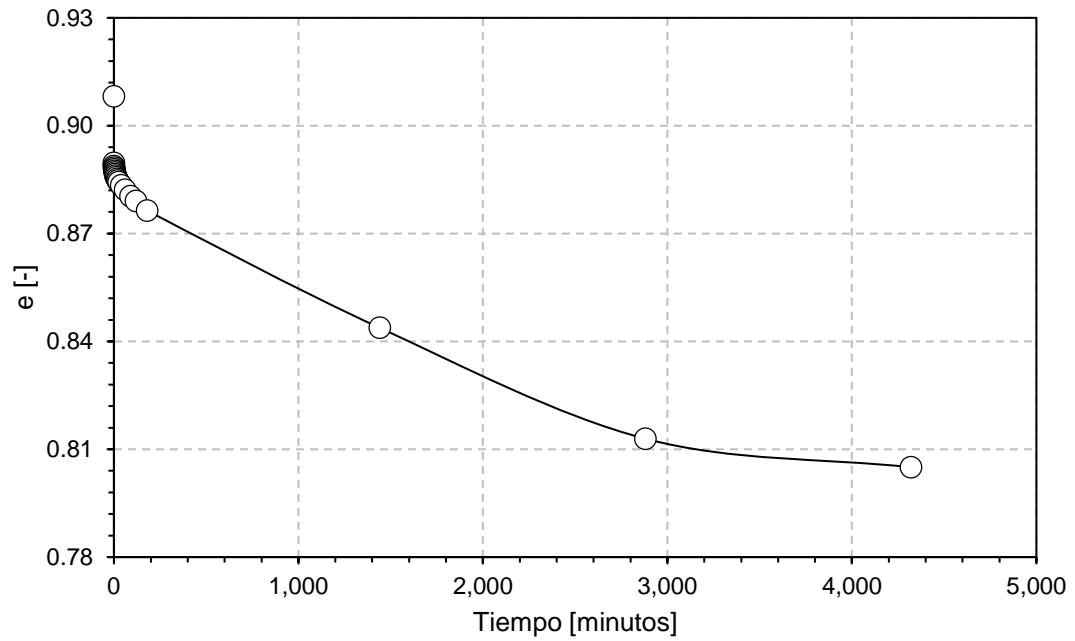


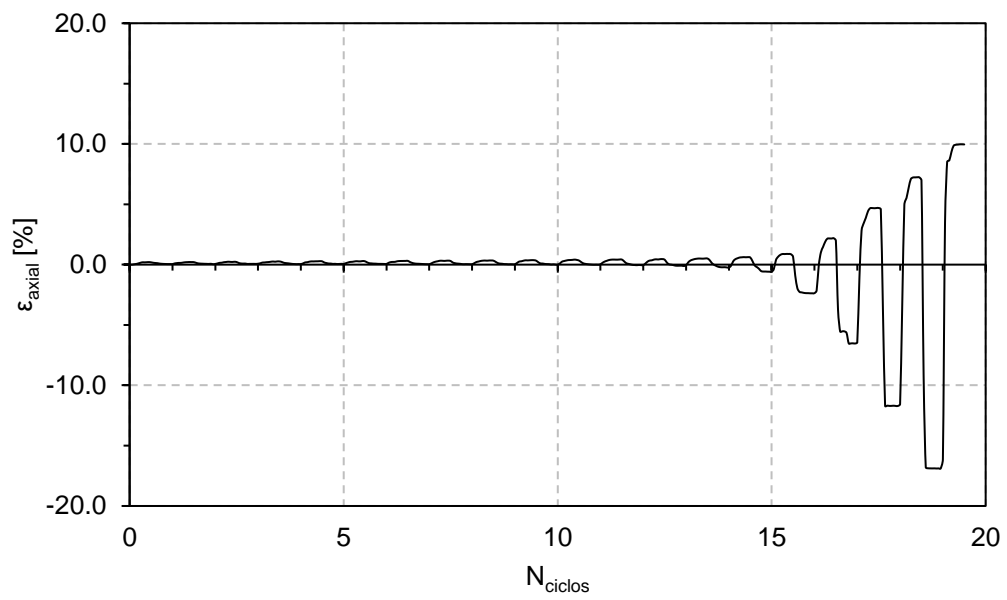
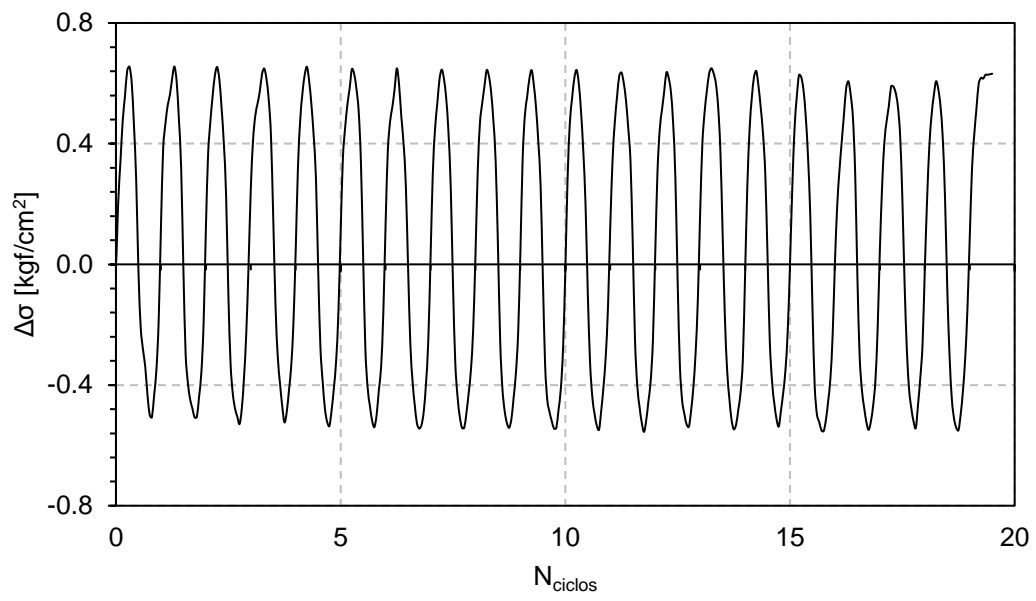


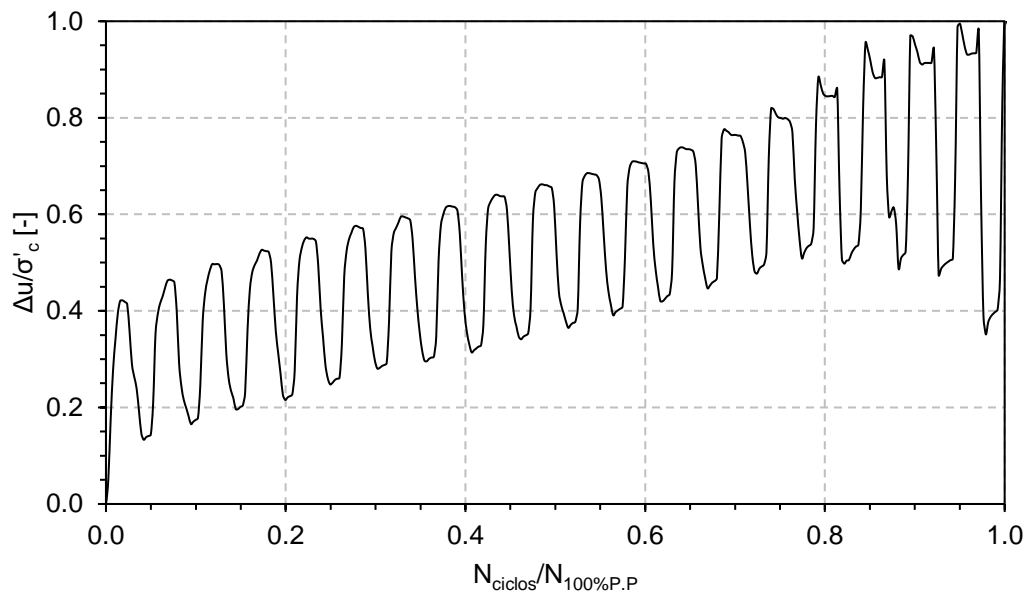
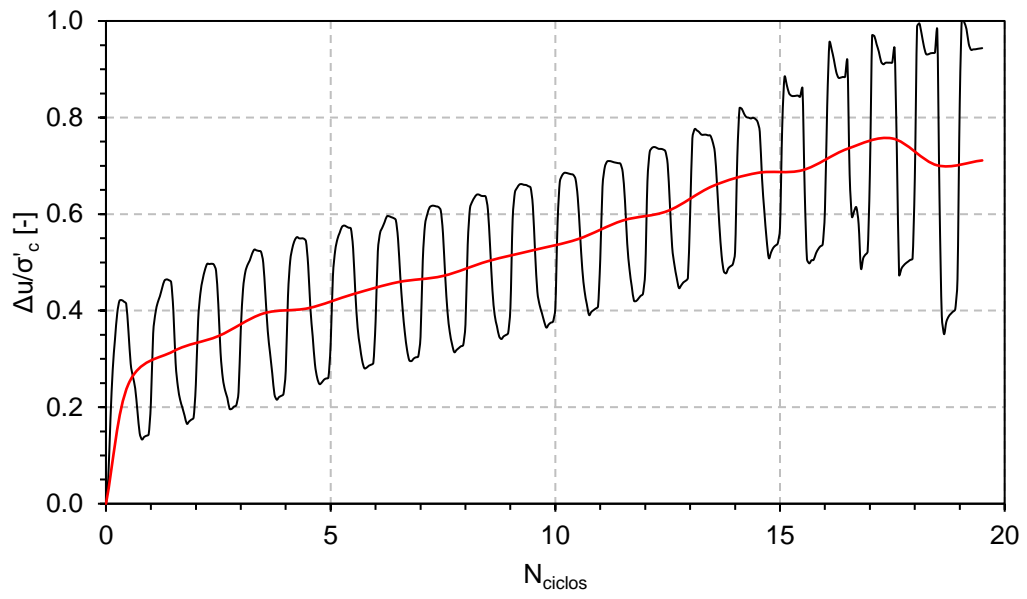


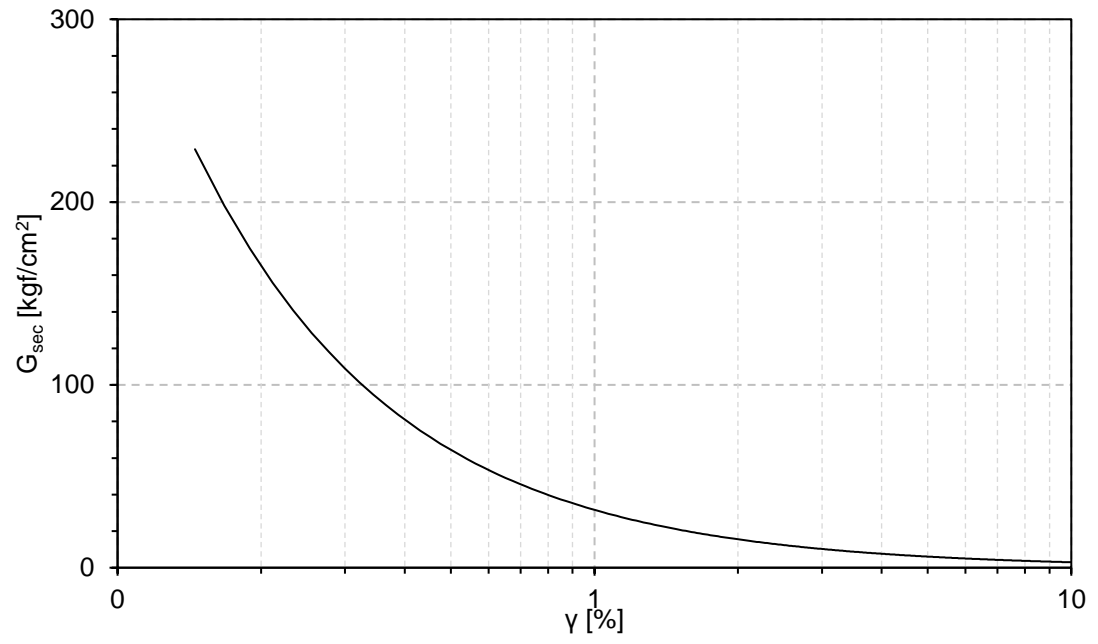


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #3			
ID	CCT3	CSR	0.294
p'_0 [kgf/cm ²]	1	N _{100%P.P}	19
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	17
DR _f [%]	39	N _{10%D.A}	17
B - value [%]	97		

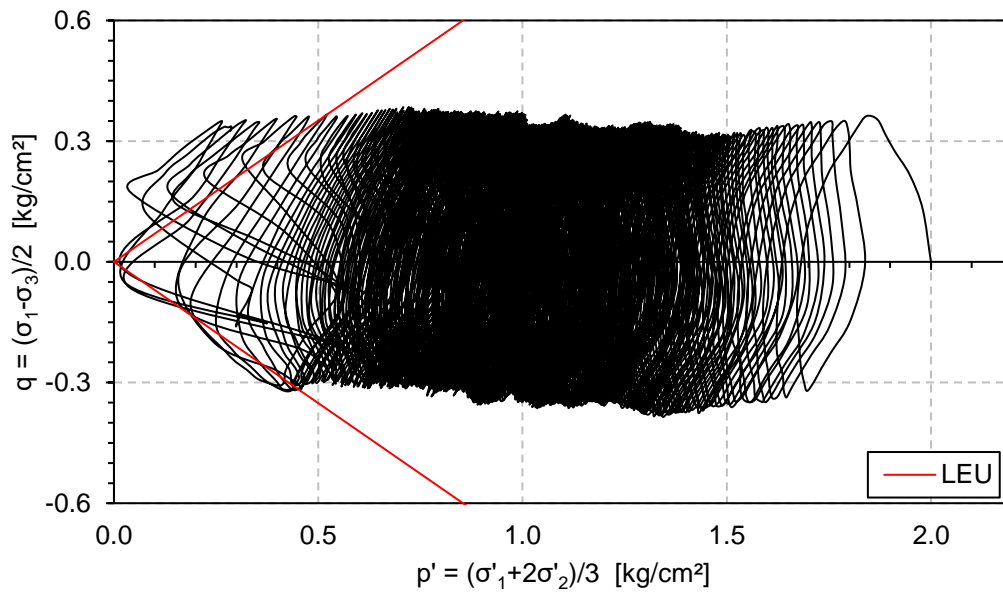
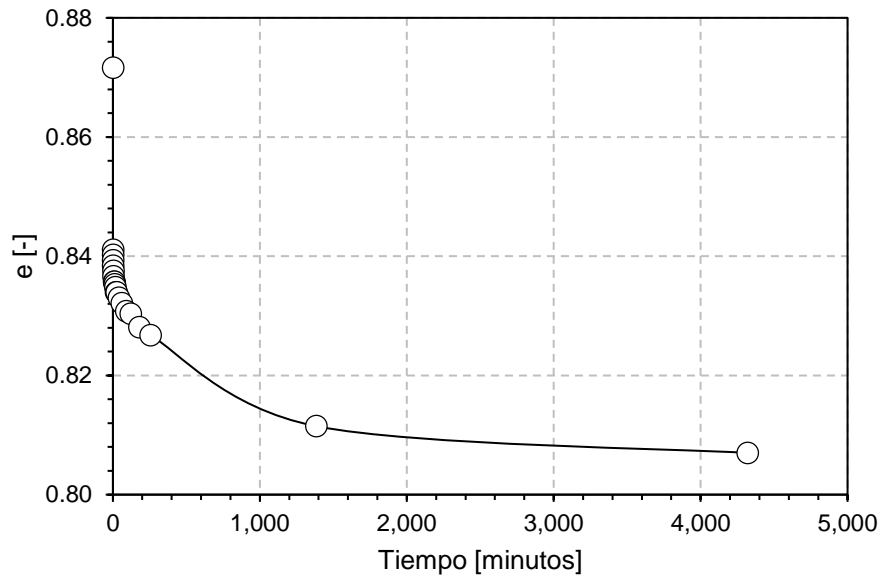


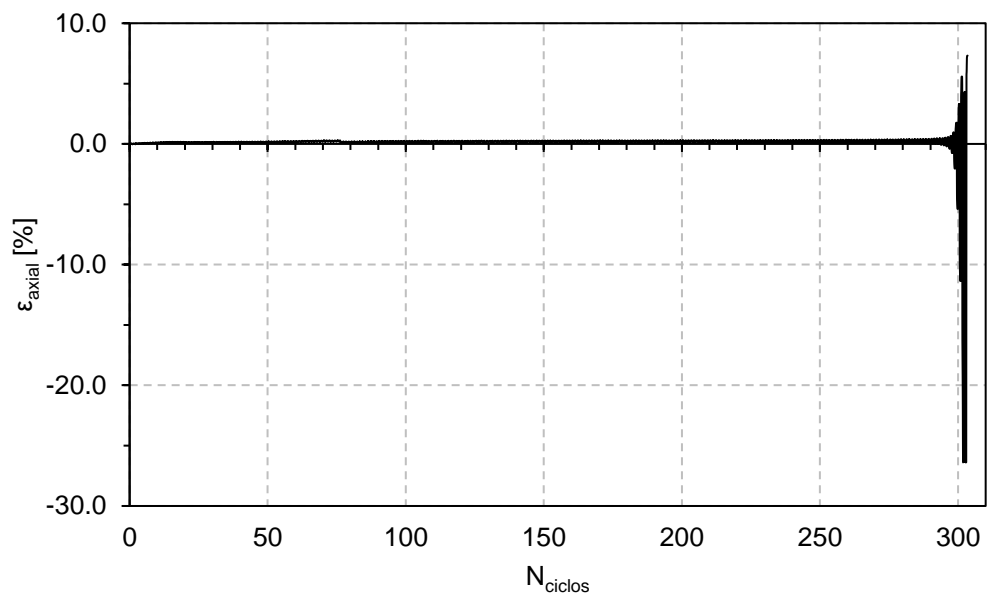
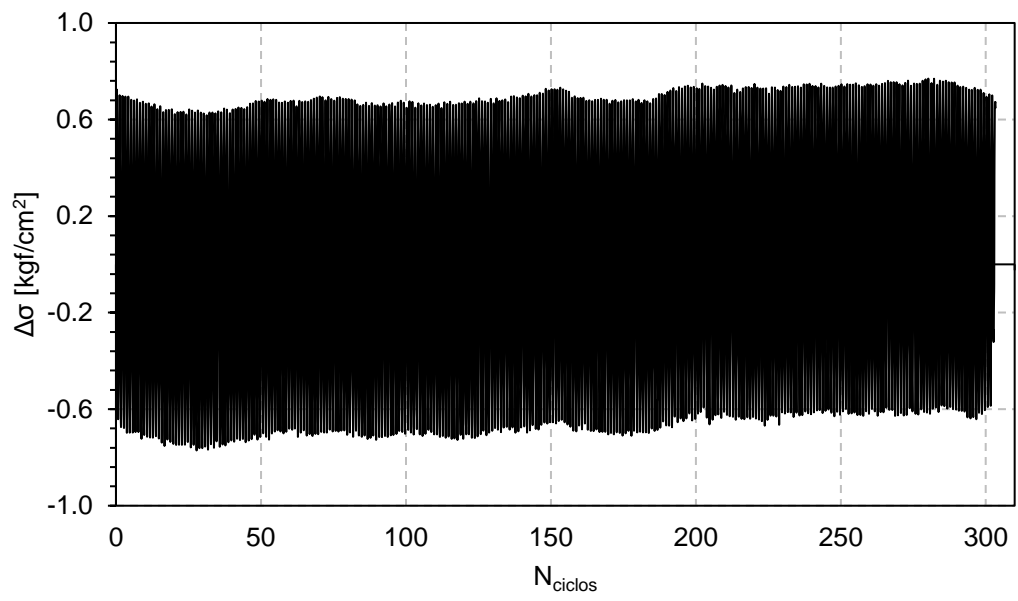


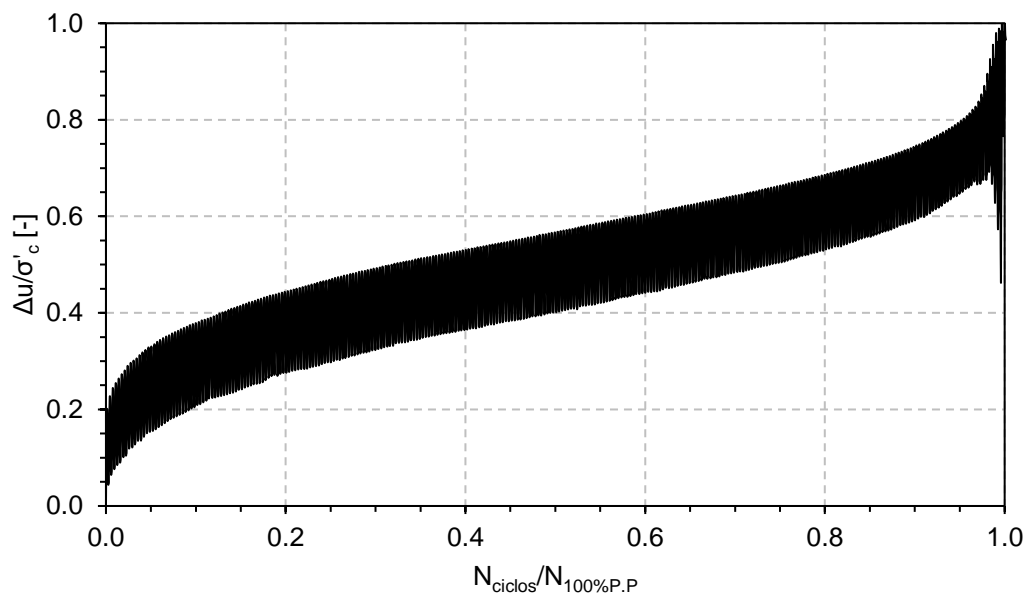
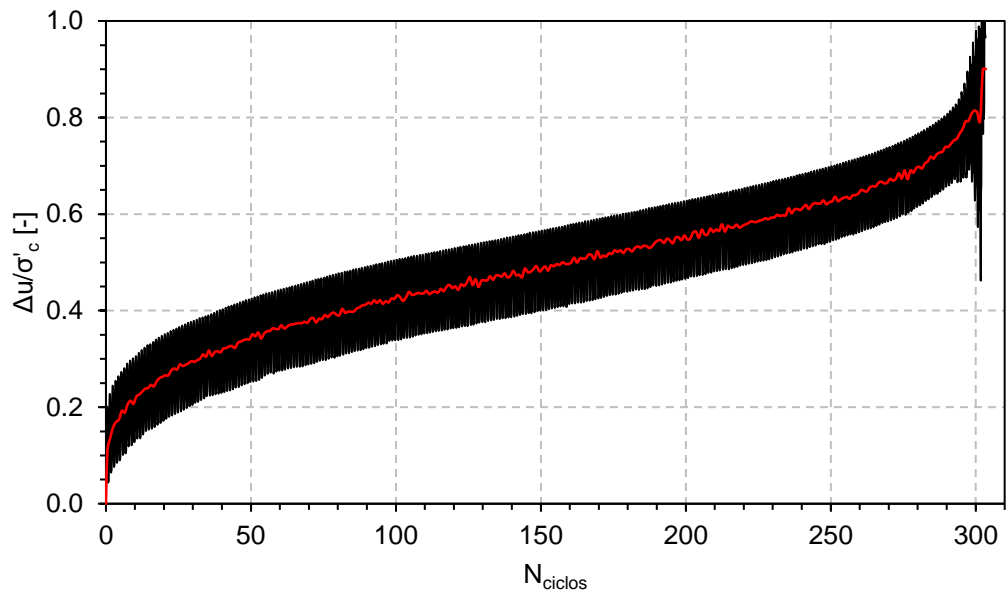


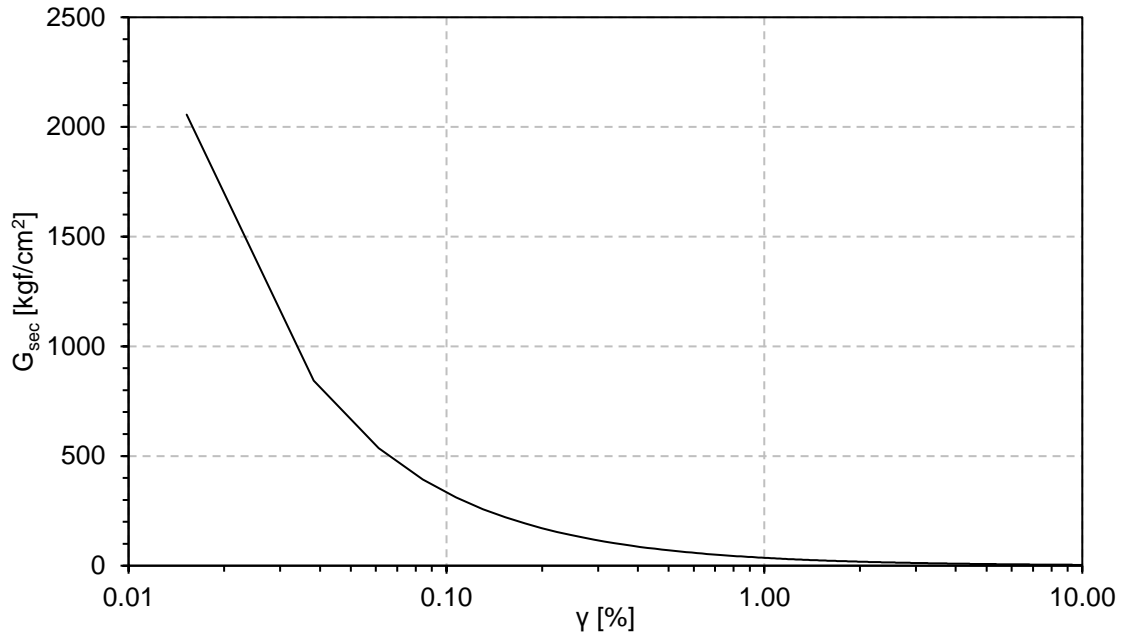


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #4			
ID	CCT4	CSR	0.171
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	303
BP [kgf/cm ²]	4	N _{5%D.A}	300
DR _f [%]	38	N _{10%D.A}	301
B - value [%]	96		

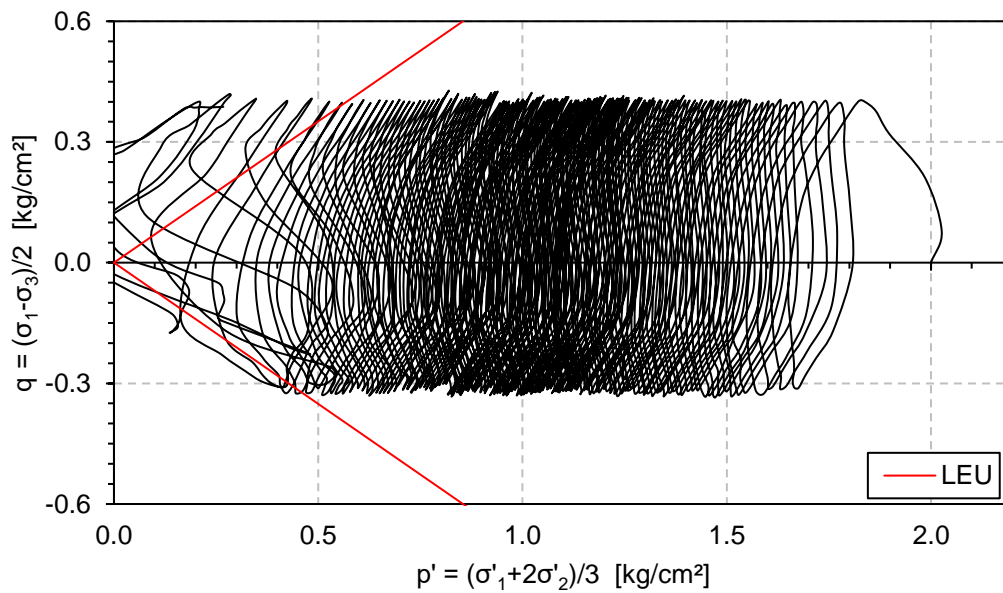
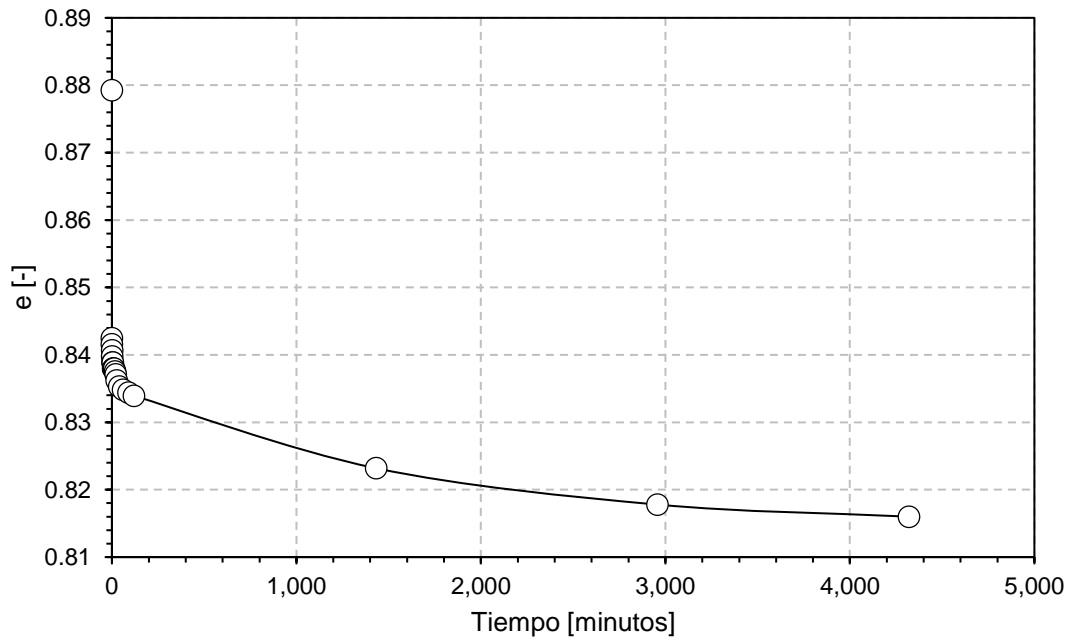


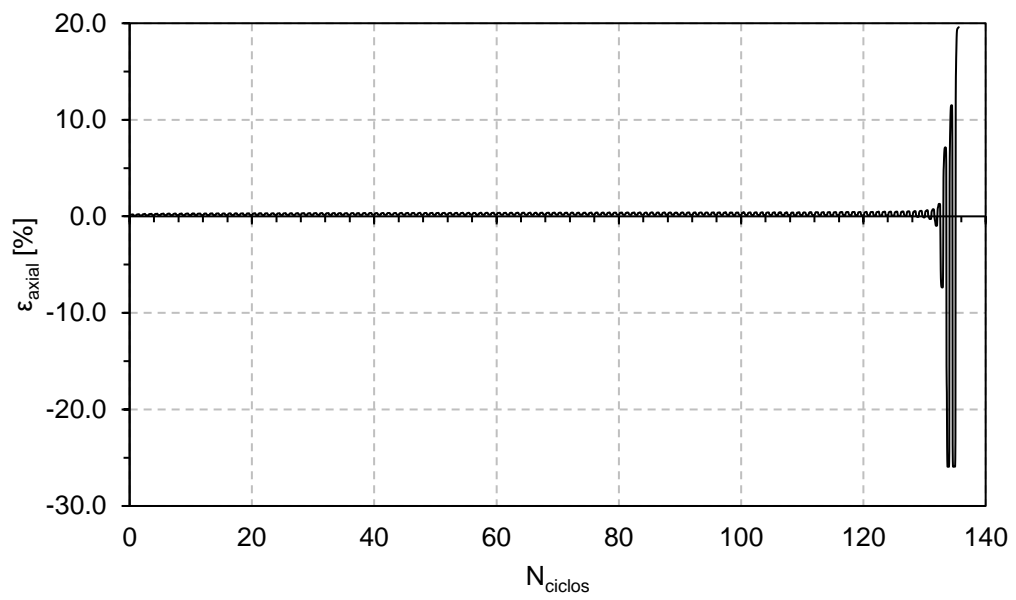
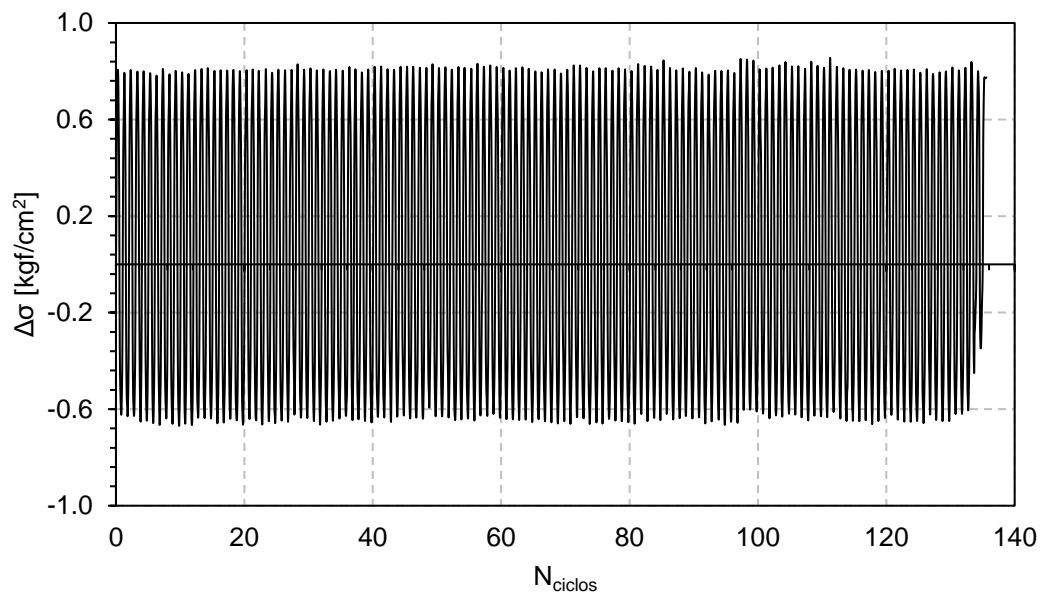


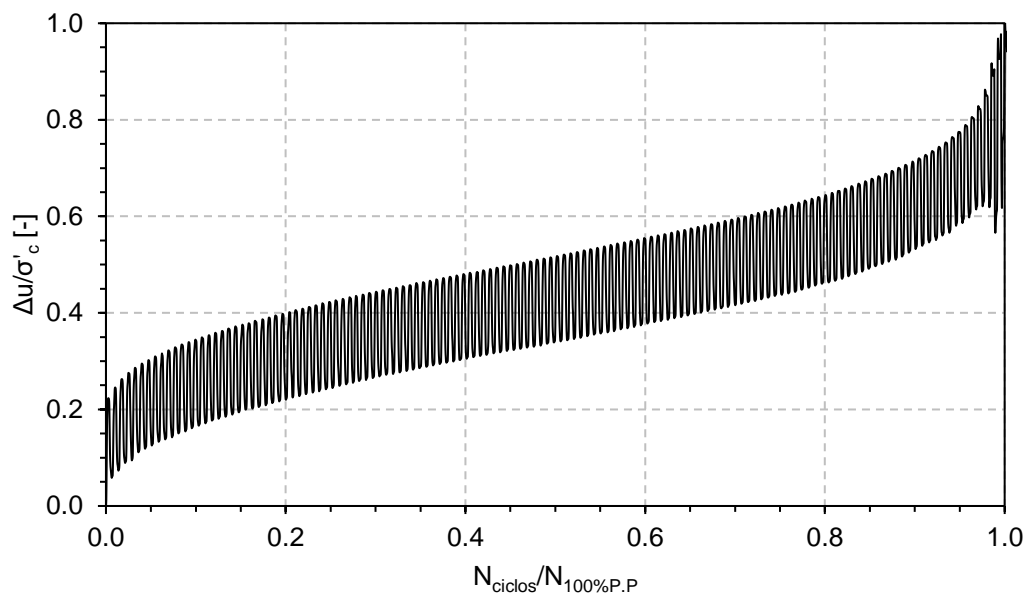
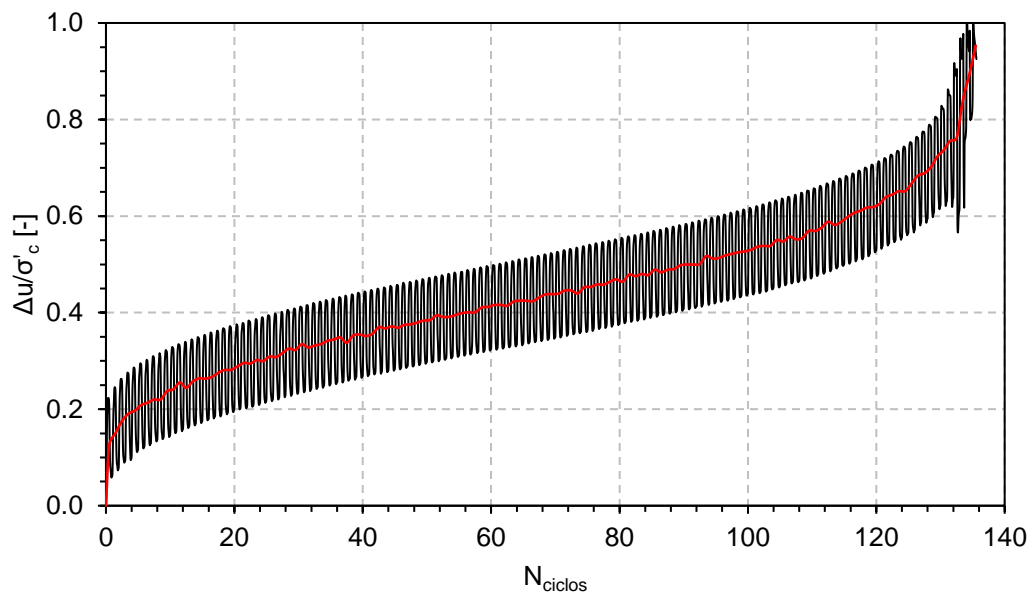


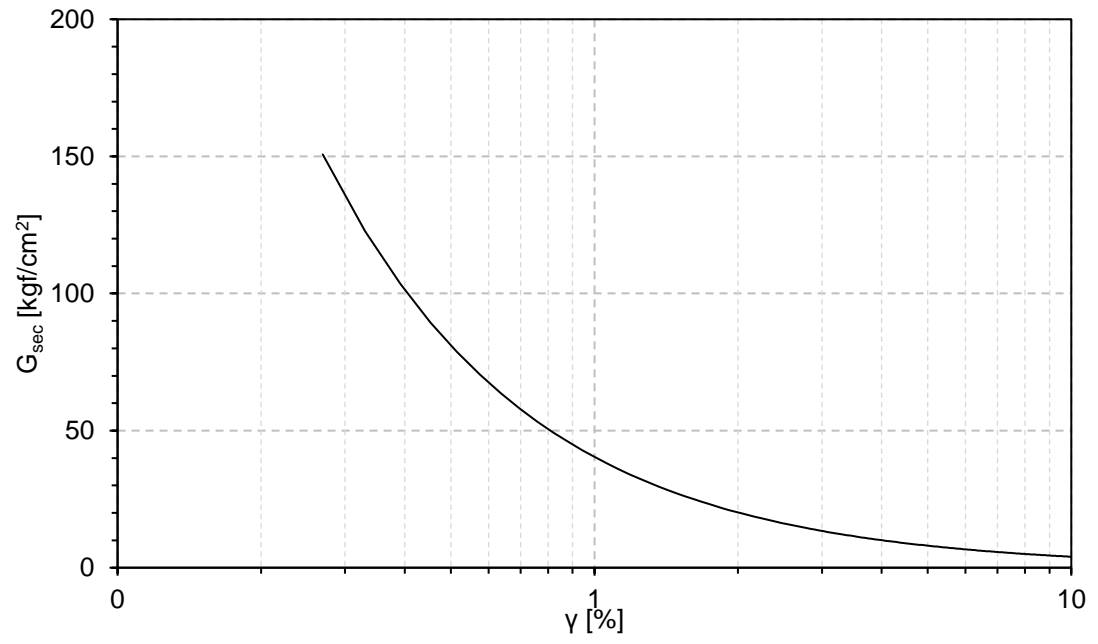


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #5			
ID	CCT5	CSR	0.181
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	134
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	133
DR _f [%]	37	N _{10%D.A}	133
B - value [%]	97		

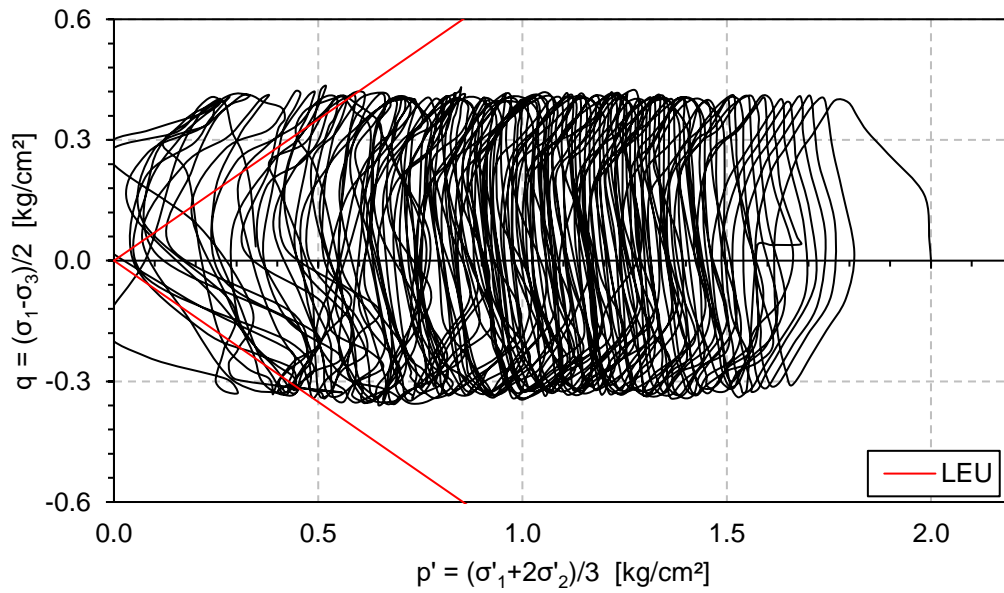
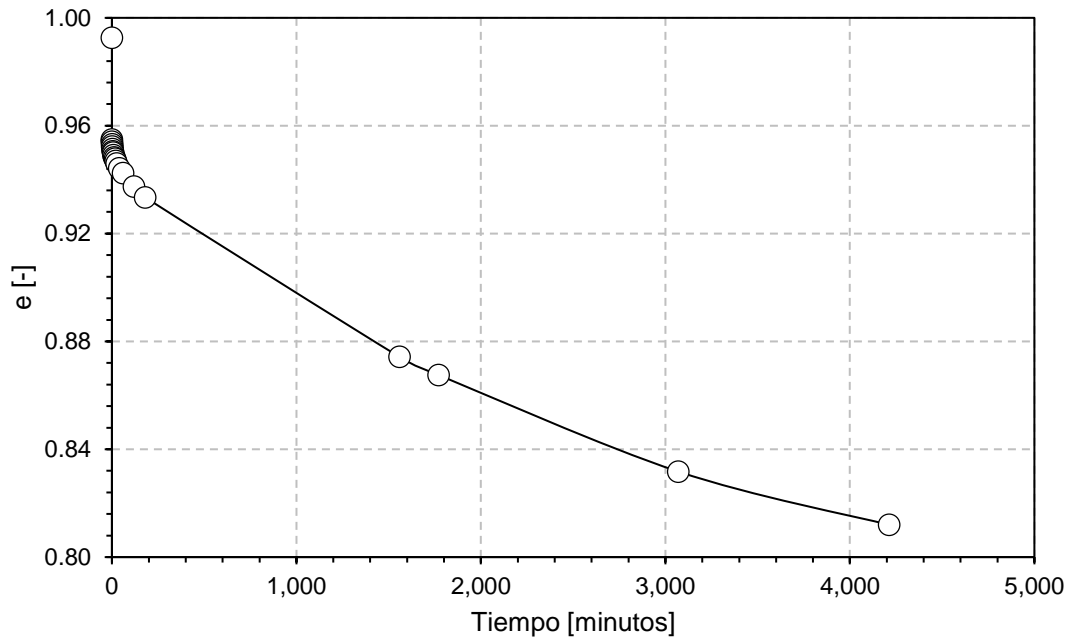


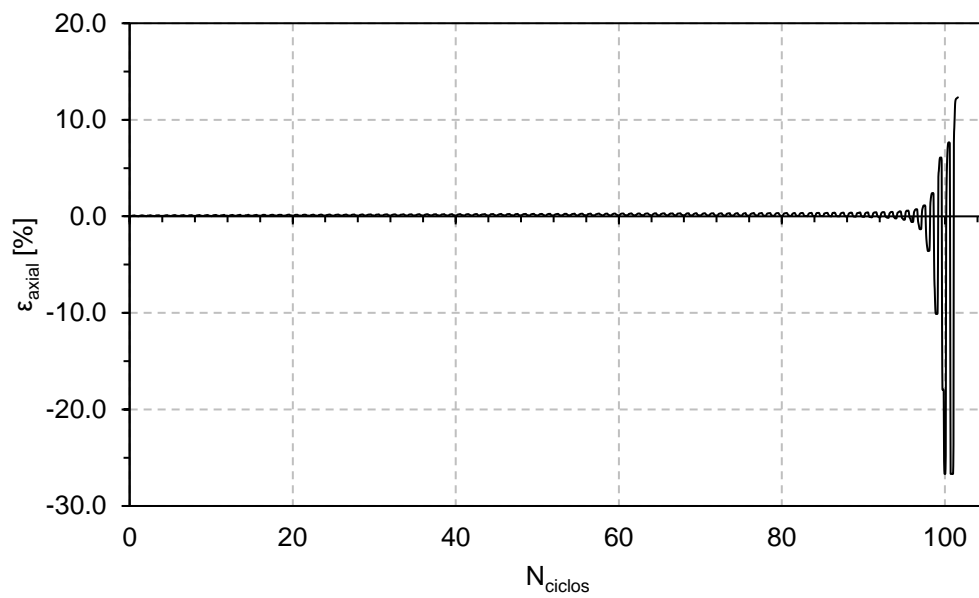
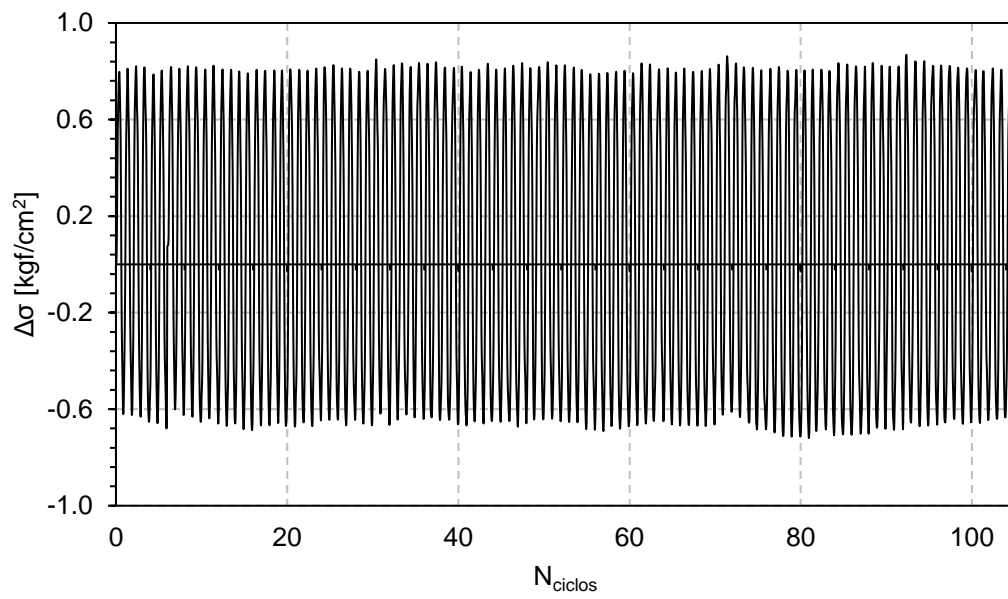


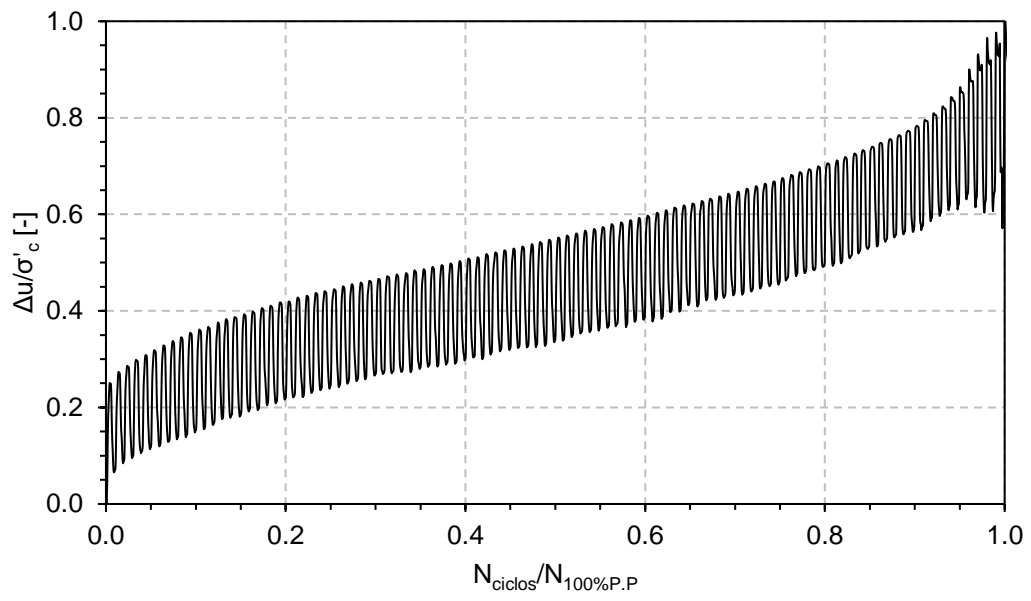
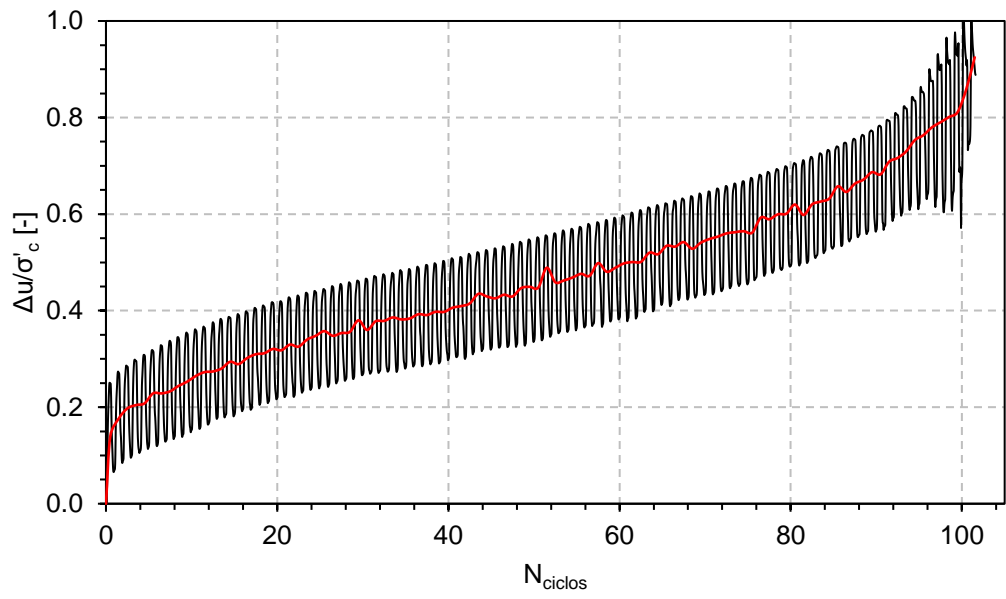


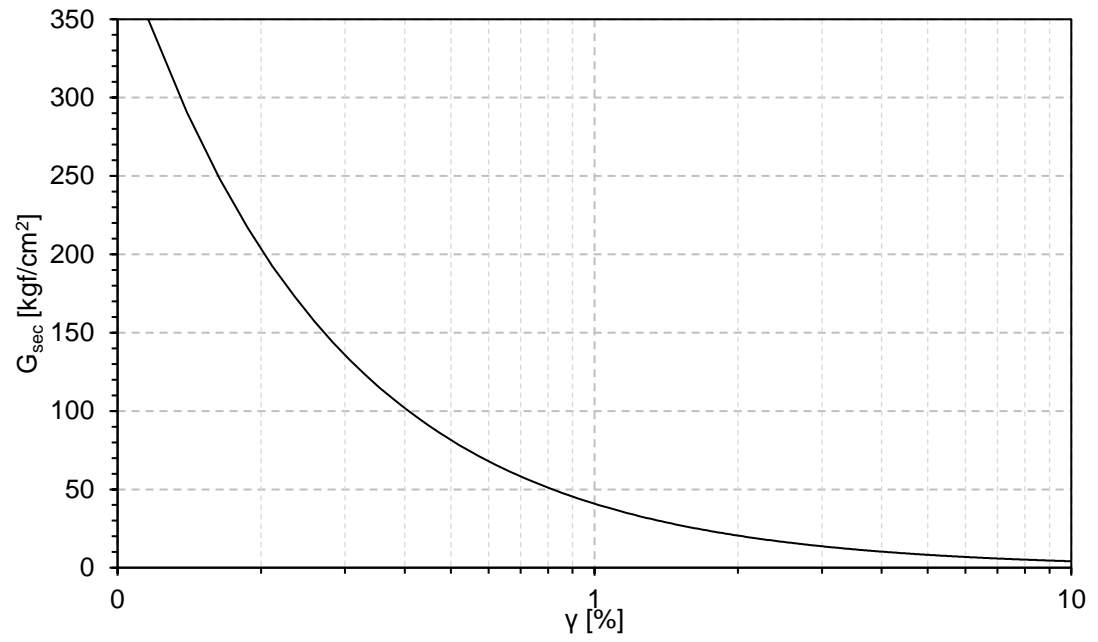


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #6			
ID	CCT6	CSR	0.184
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	100
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	98
DR _f [%]	38	N _{10%D.A}	99
B - value [%]	97		

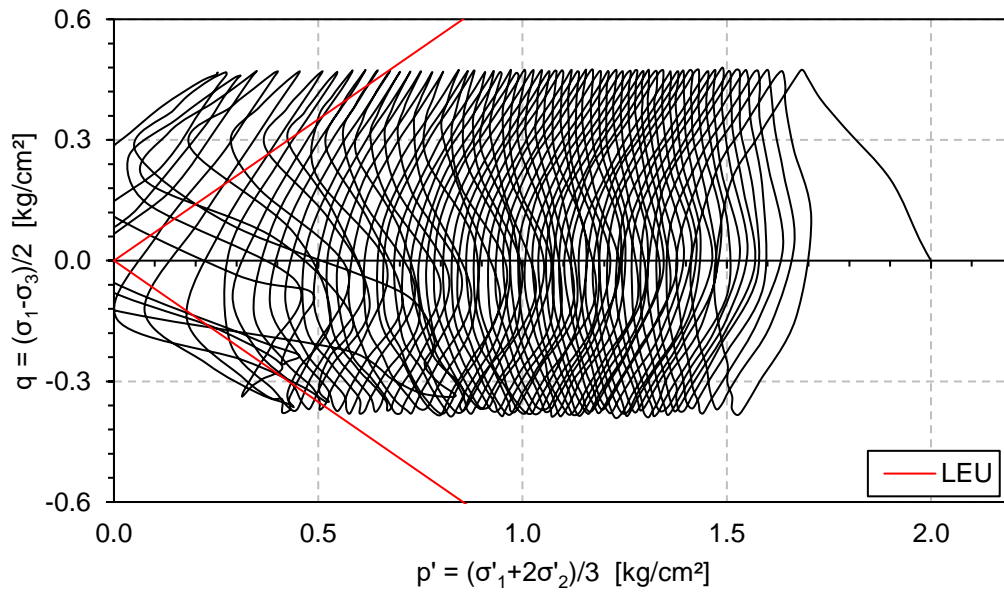
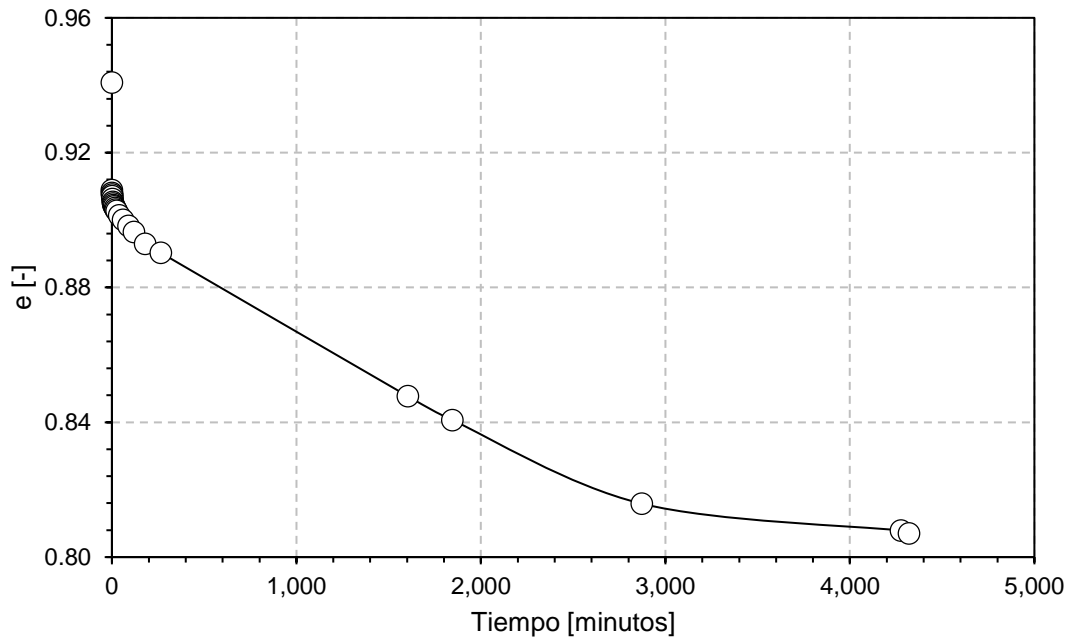


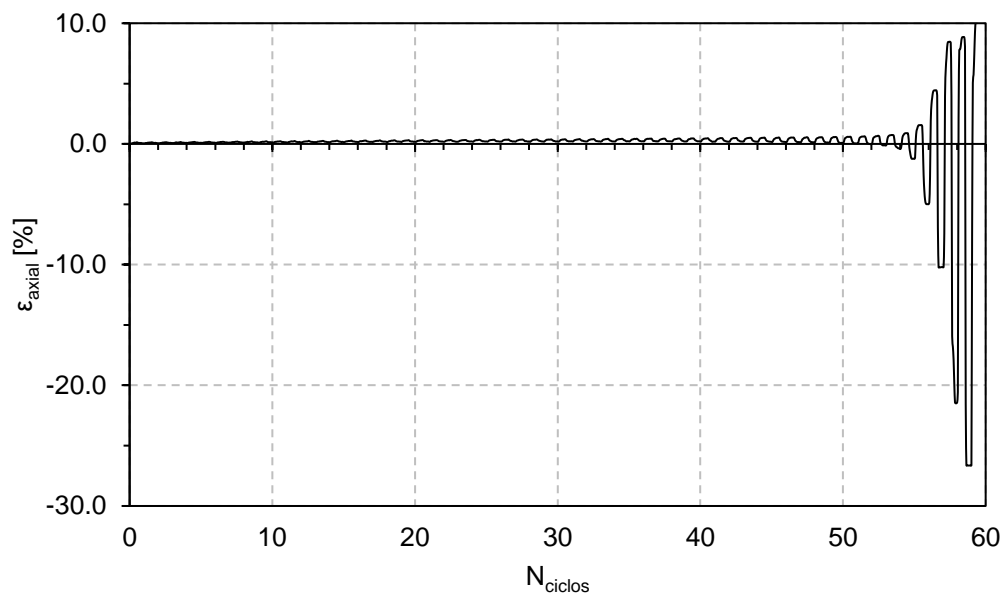
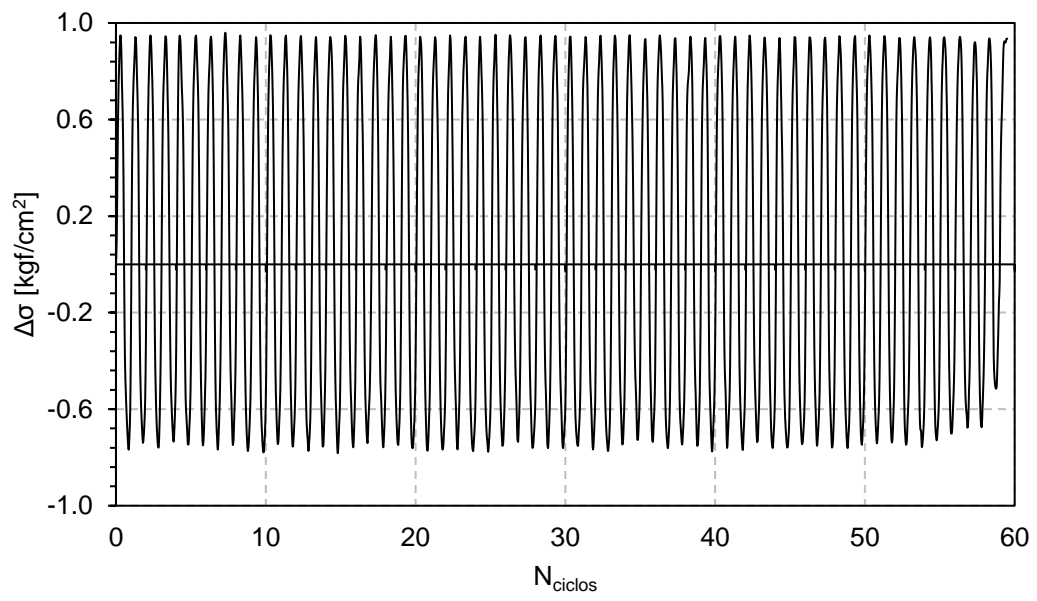


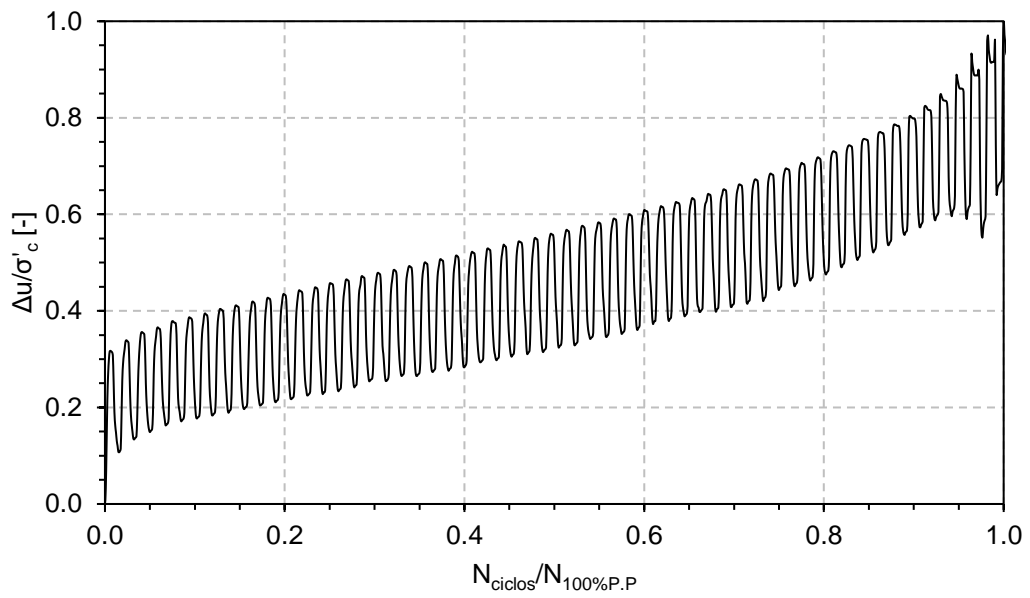
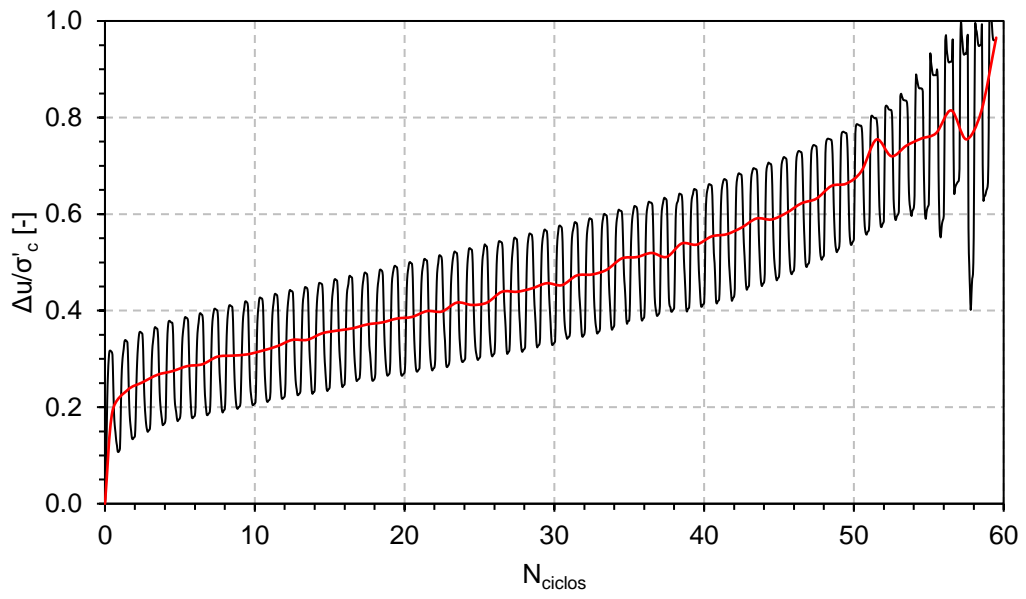


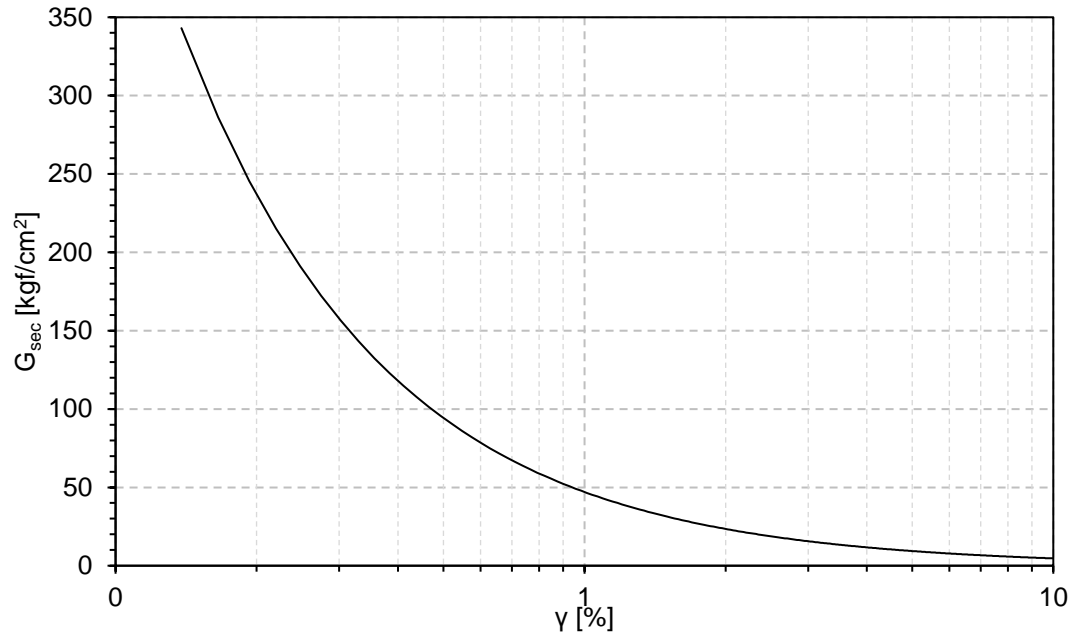


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #7			
ID	CCT7	CSR	0.212
p'_0 [kgf/cm ²]	2	N _{100%P.P}	57
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	56
DR _f [%]	38	N _{10%D.A}	57
B - value [%]	97		

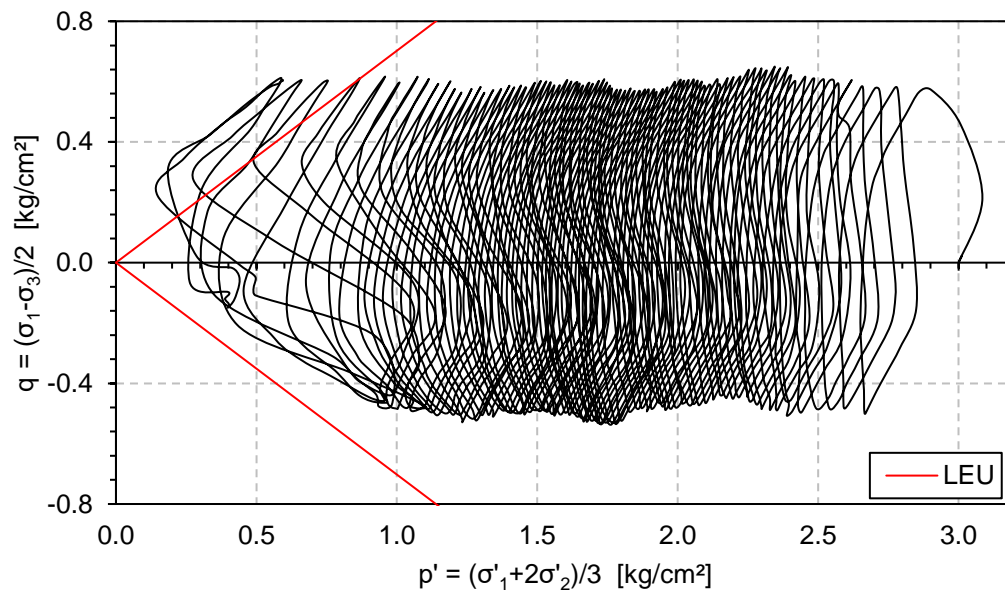
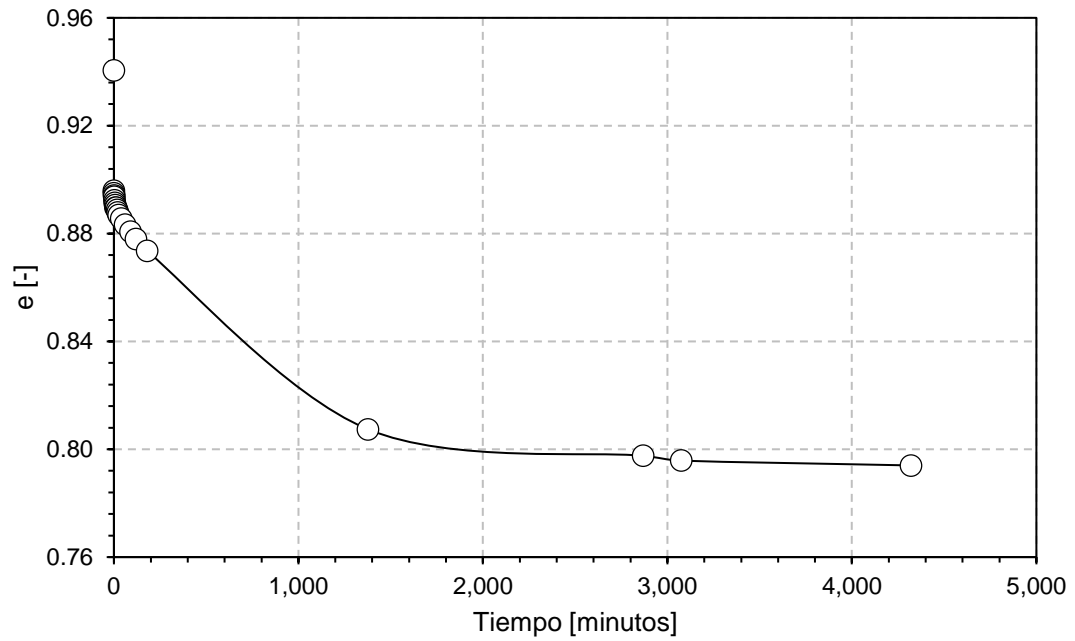


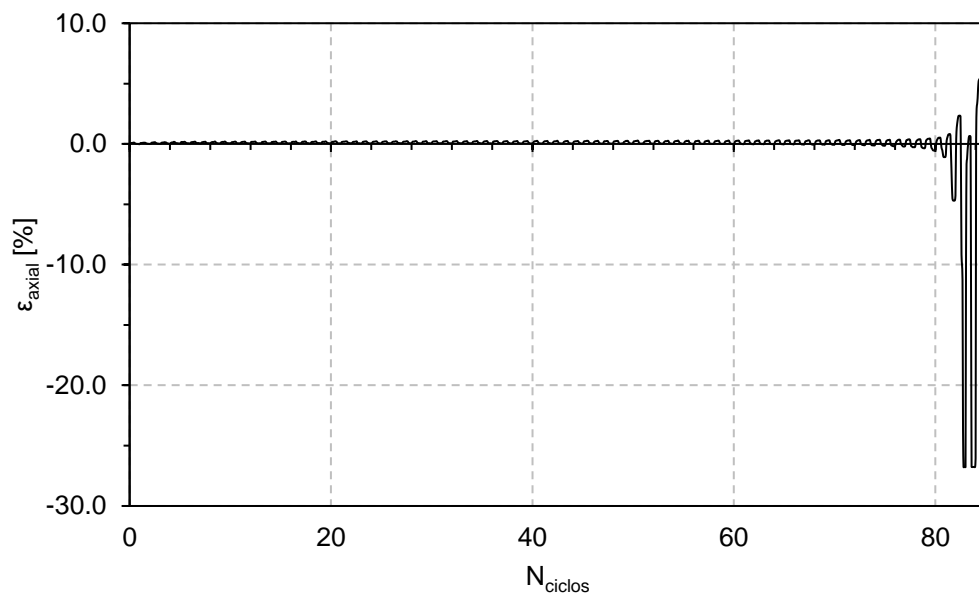
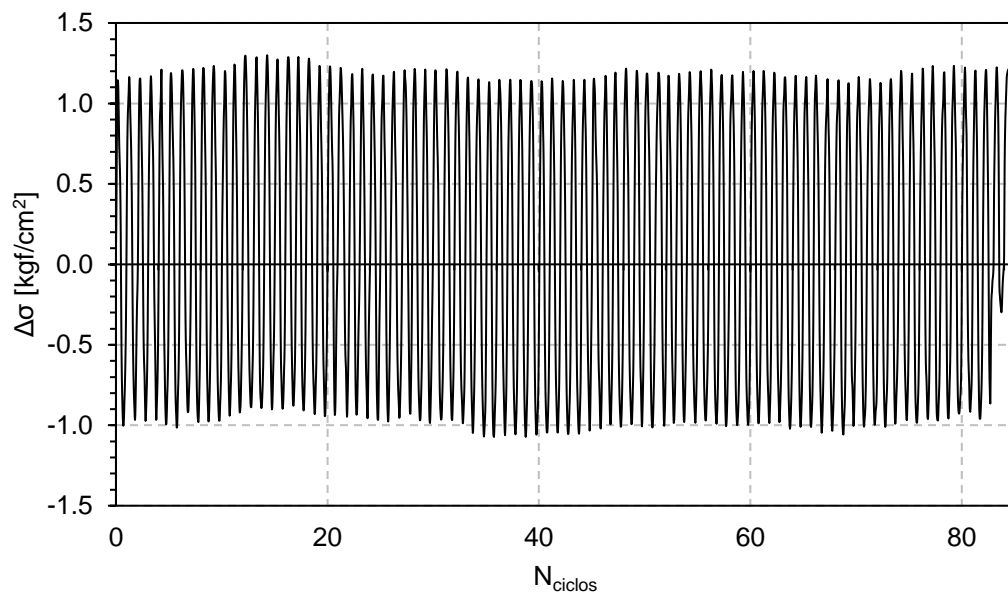


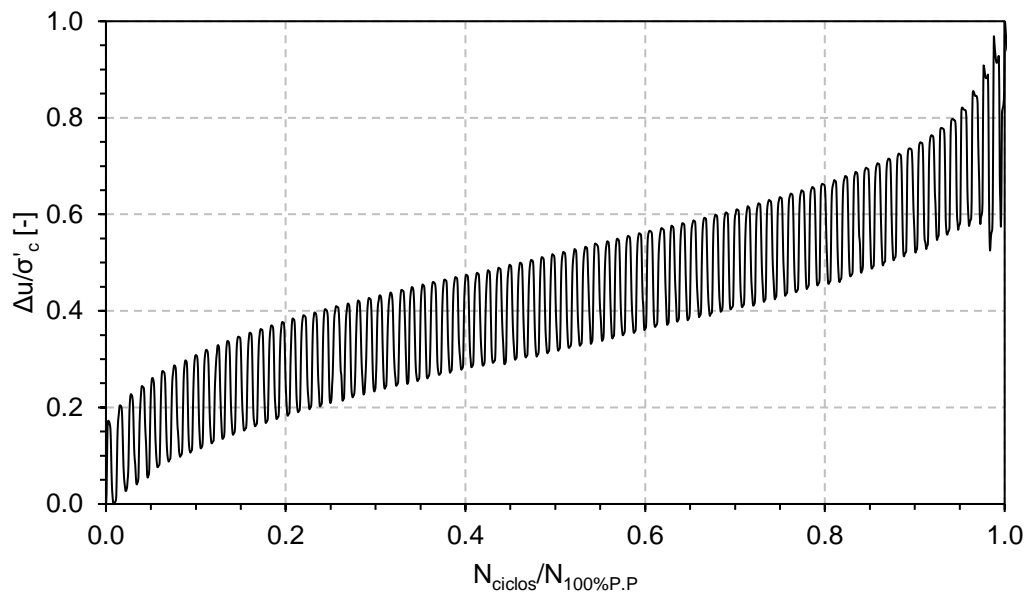
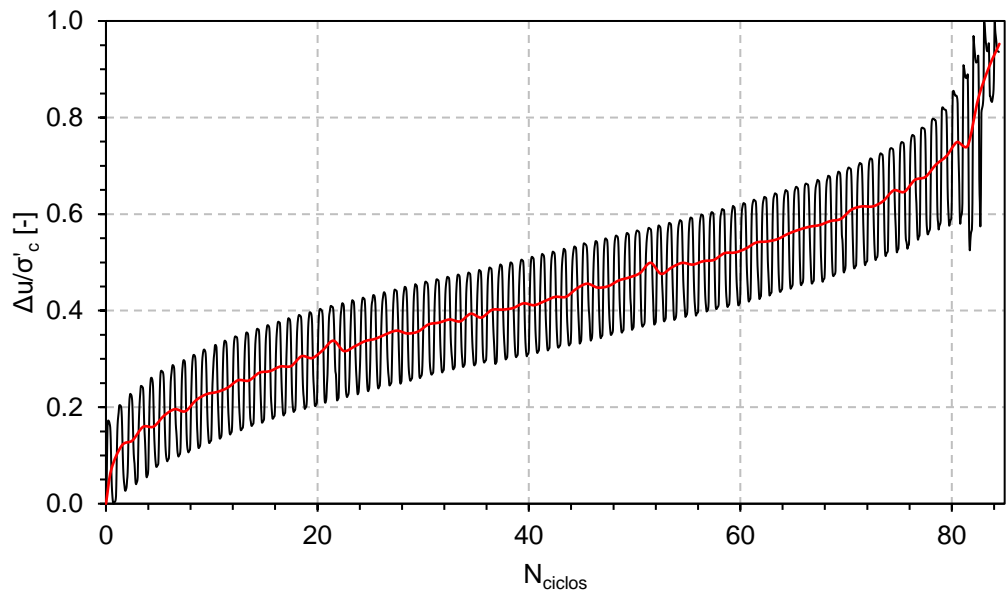


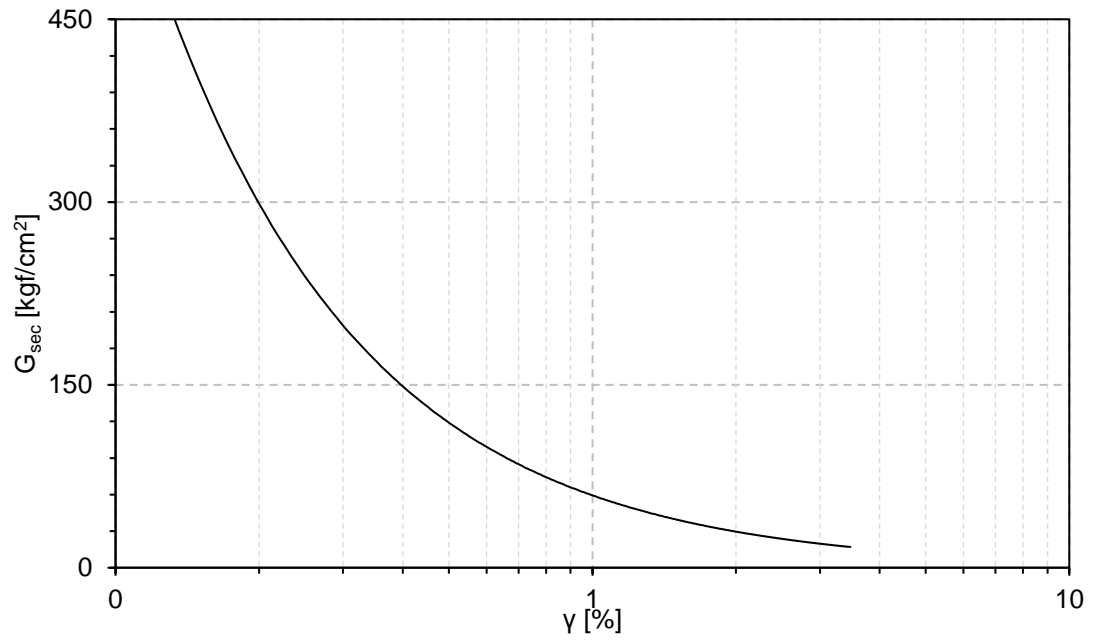


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #8			
ID	CCT8	CSR	0.181
p'_0 [kgf/cm ²]	3	N _{100%P.P}	83
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	82
DR _f [%]	40	N _{10%D.A}	83
B - value [%]	96		

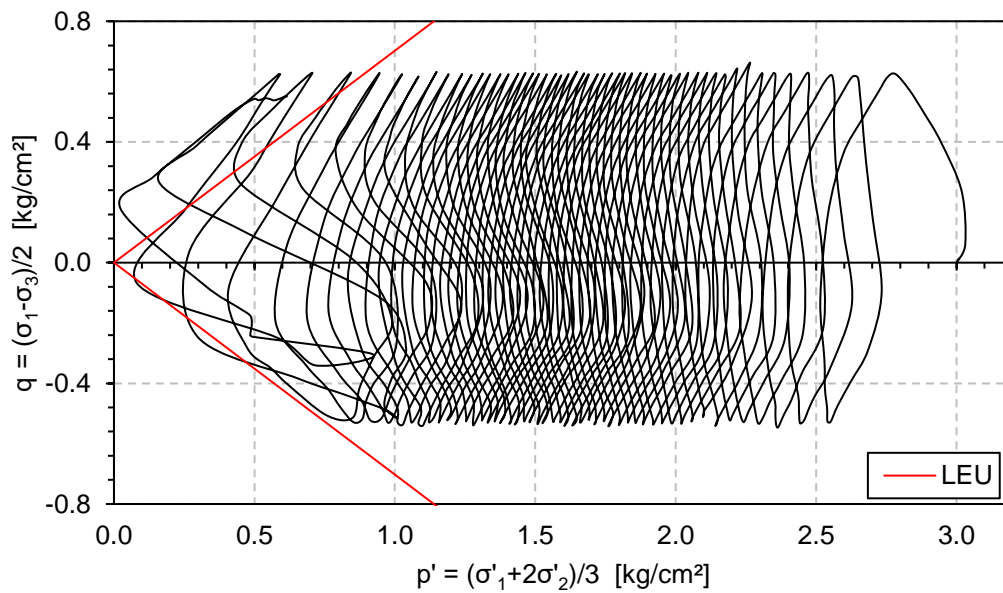
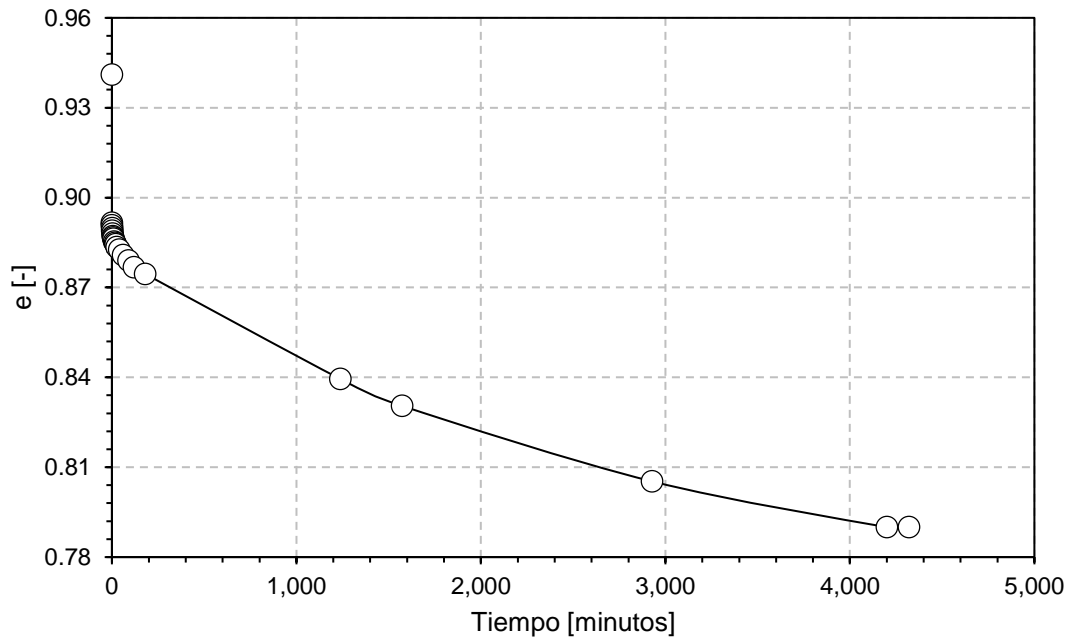


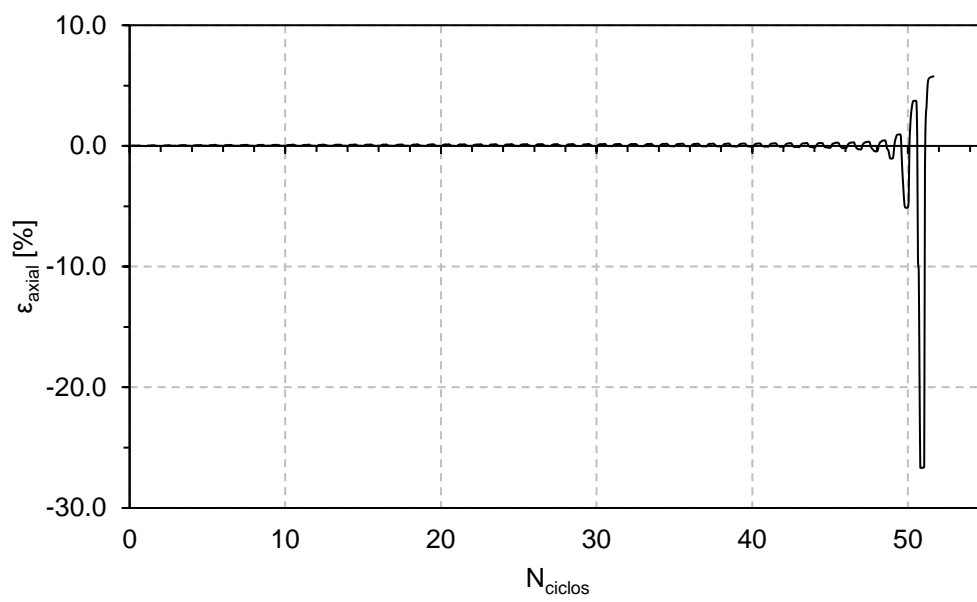
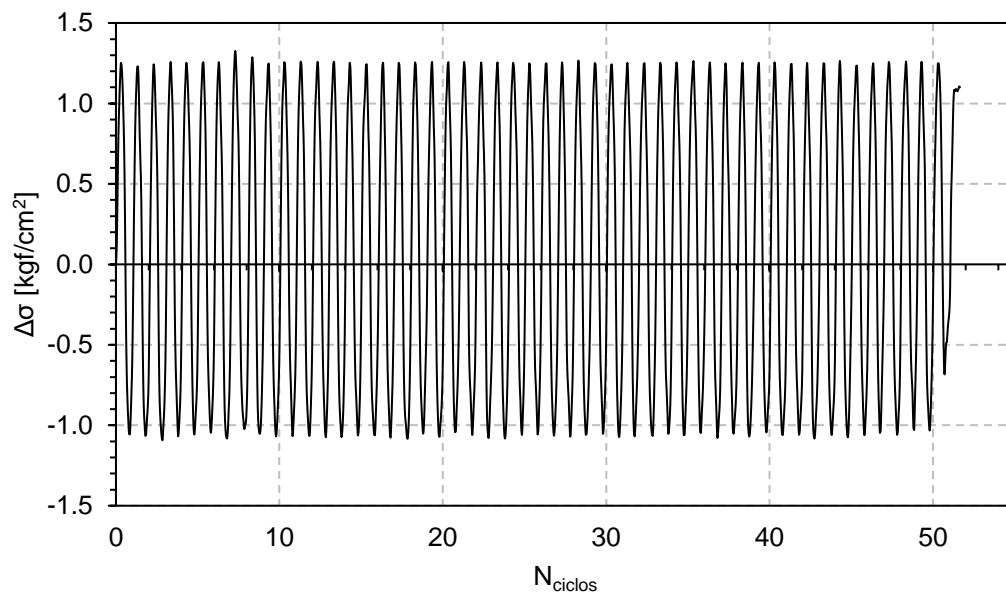


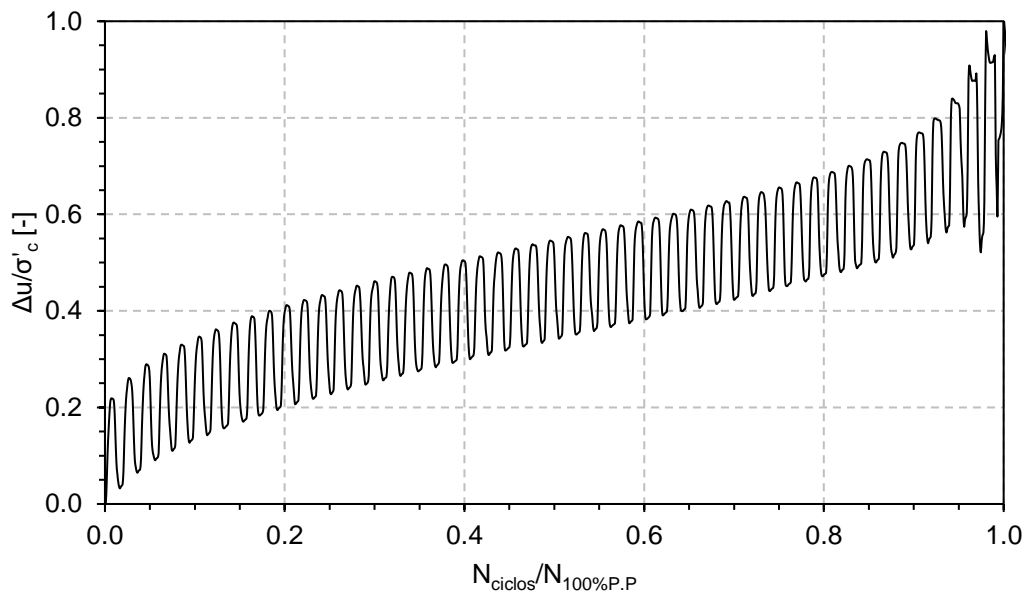
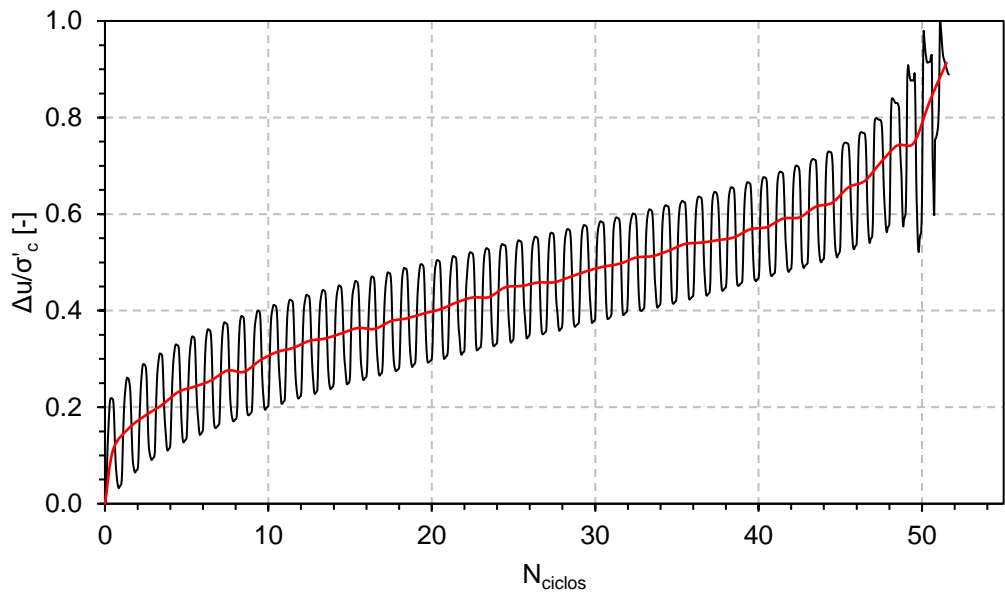


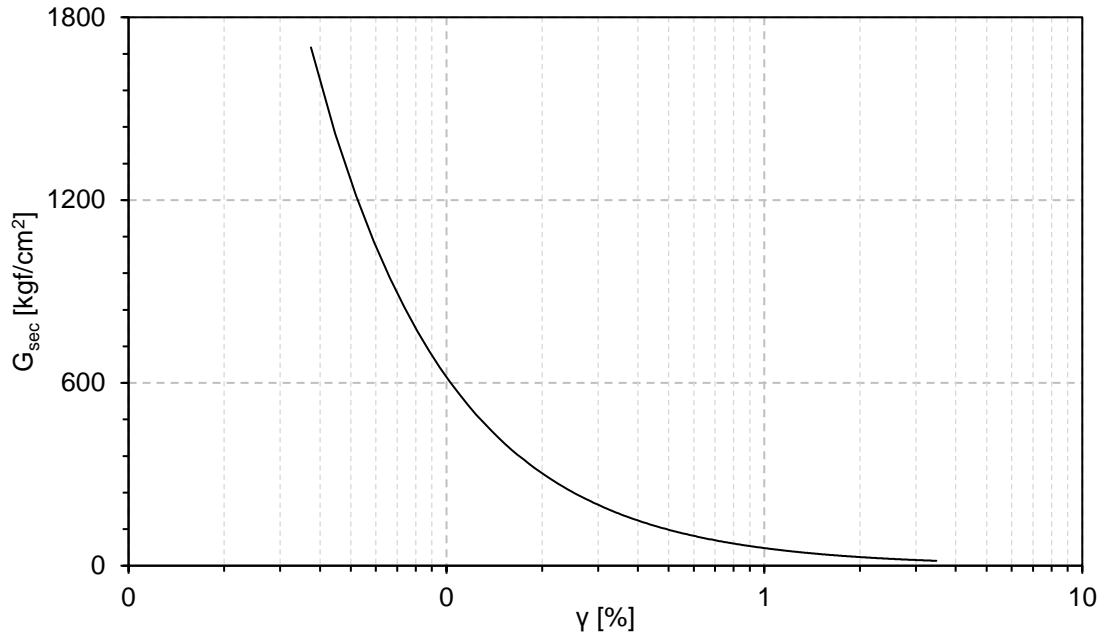


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #9			
ID	CCT9	CSR	0.193
p'_0 [kgf/cm ²]	3	N _{100%P.P}	51
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	50
DR _f [%]	41	N _{10%D.A}	51
B - value [%]	96		

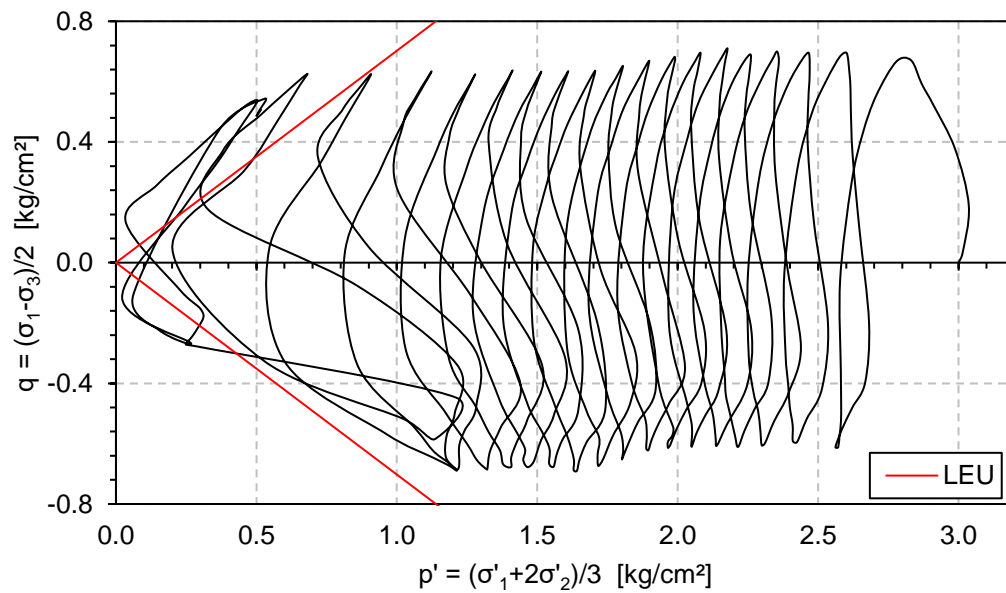
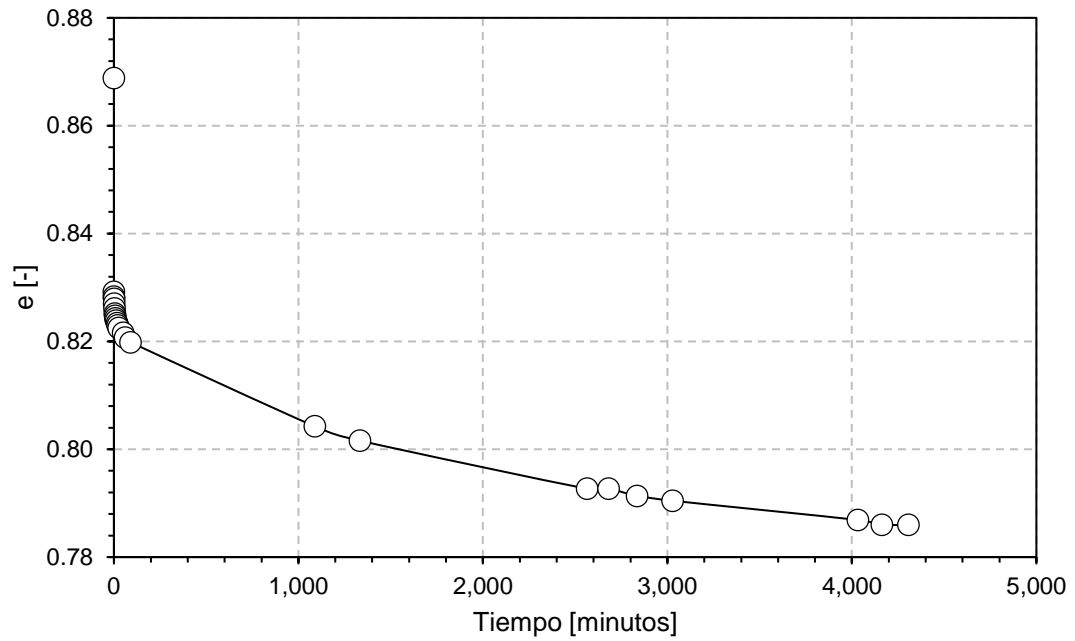


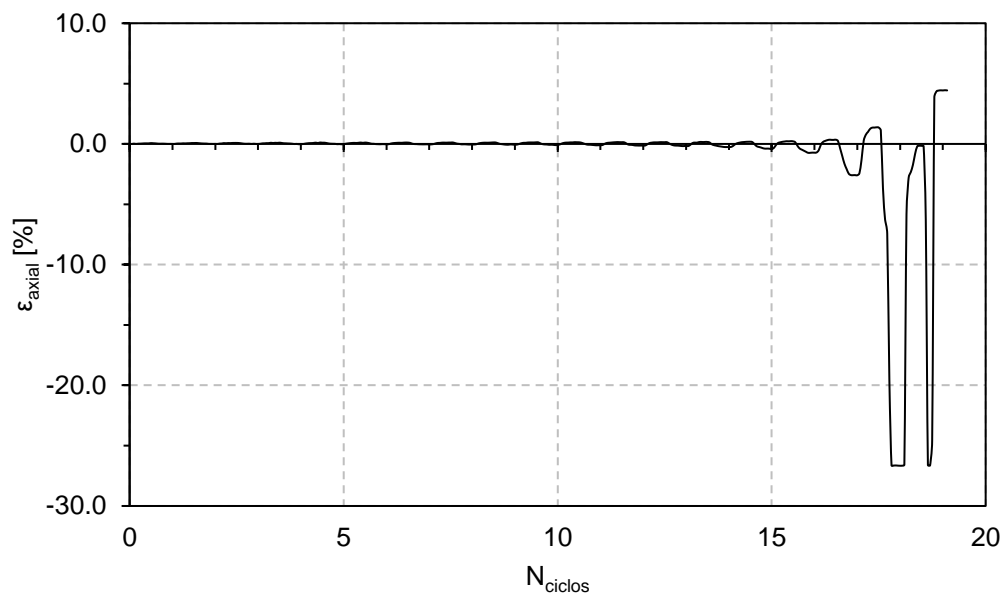
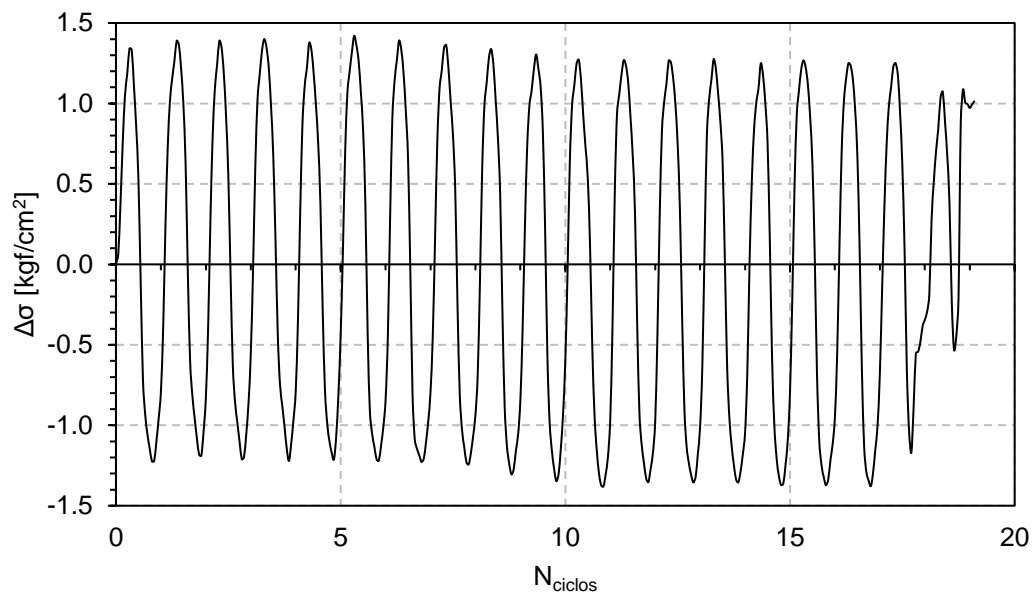


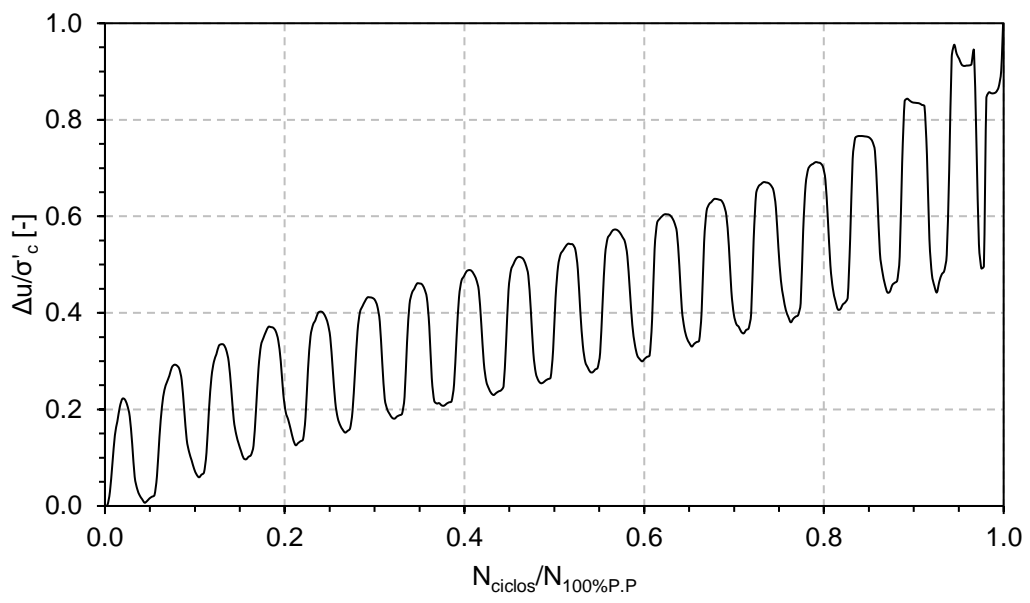
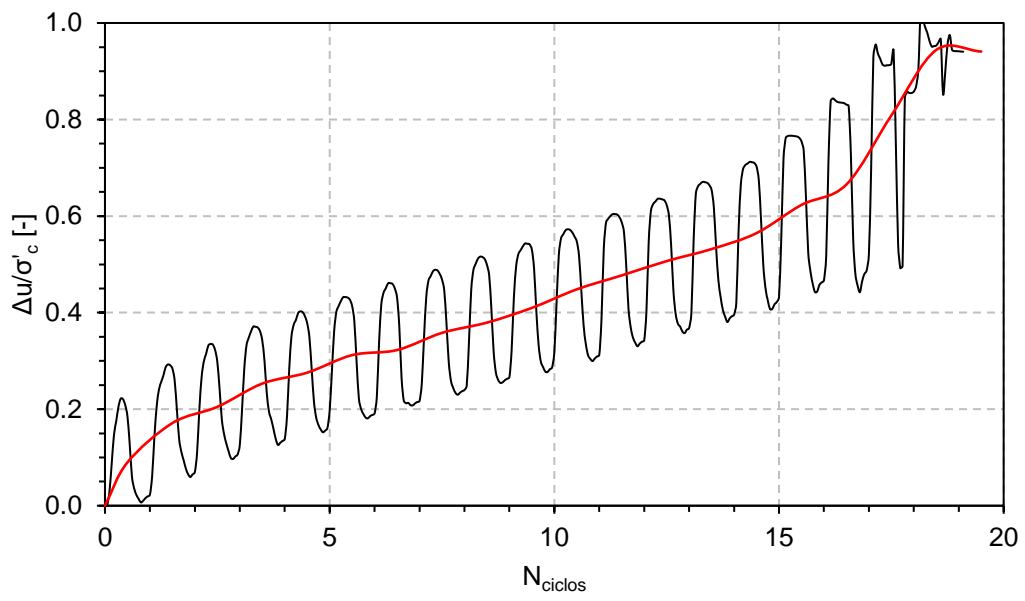


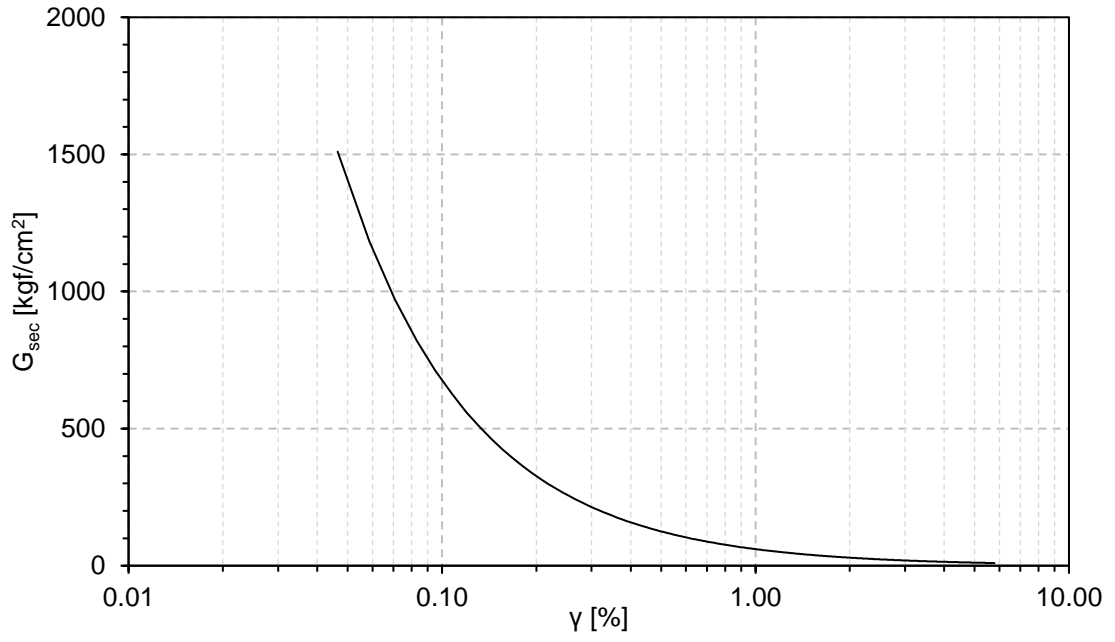


Información Ensayo Triaxial Cíclico Con Tratamiento #10			
ID	CCT10	CSR	0.218
p'_0 [kgf/cm ²]	3	N _{100%P.P}	18.15
BP [kgf/cm ²]	3	N _{5%D.A}	17.65
DR _f [%]	42	N _{10%D.A}	17.75
B - value [%]	96		



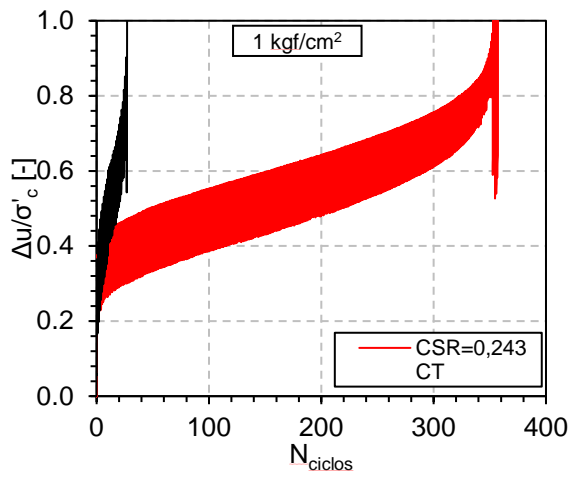




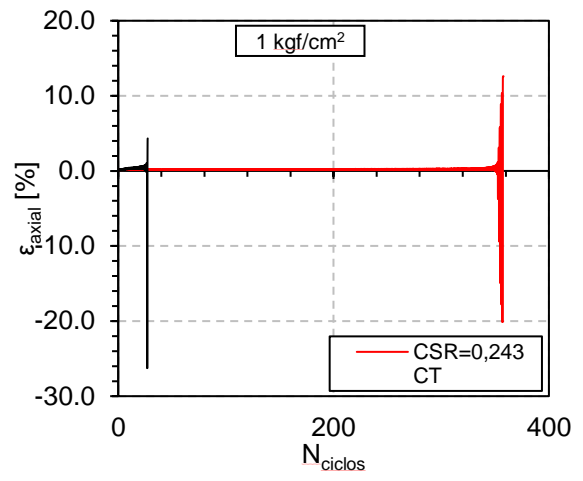


Comparaciones ensayos sin tratamiento y con tratamiento

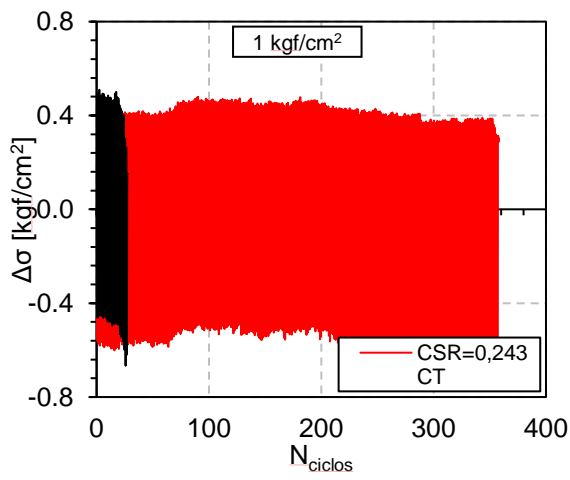
- $CSR = 0.237$ ST – $CSR=0.243$ CT y $\sigma'_c = 1[\text{kgf/cm}^2]$



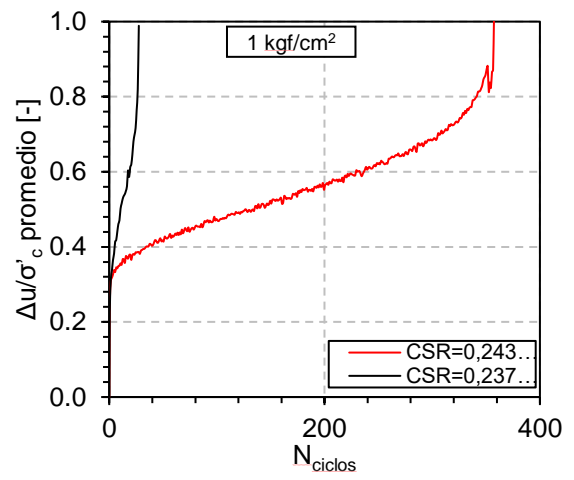
(a)



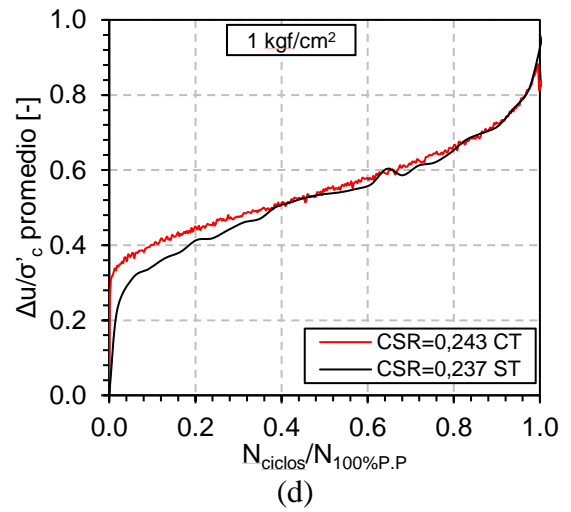
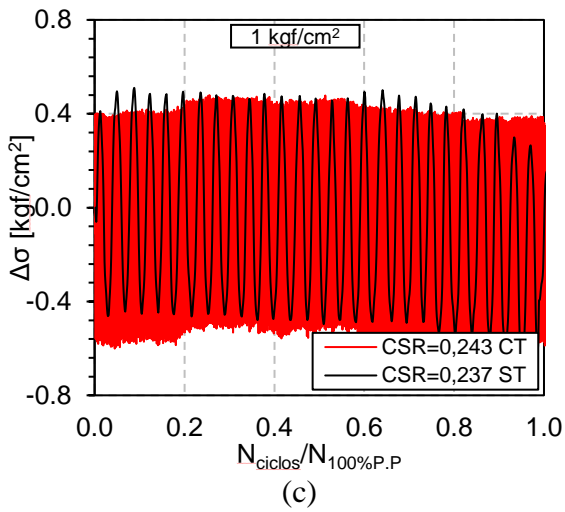
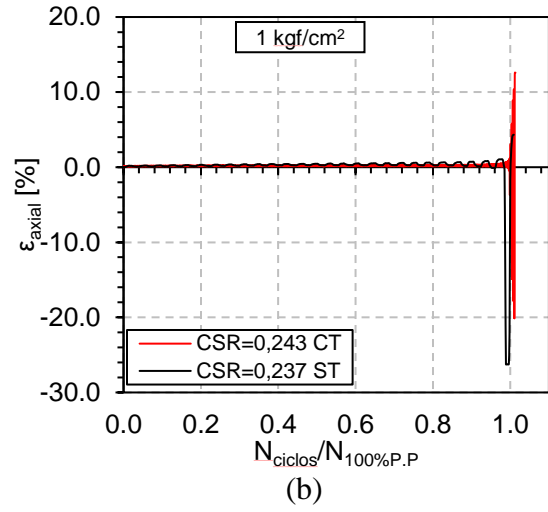
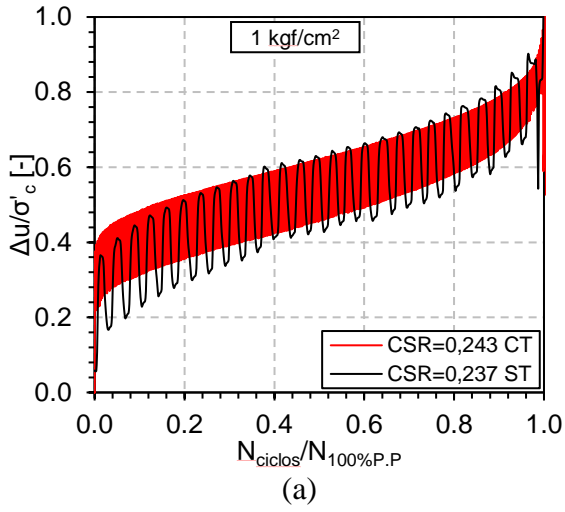
(b)



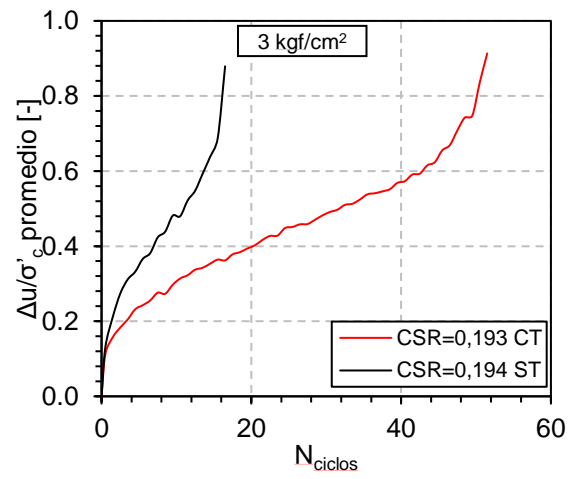
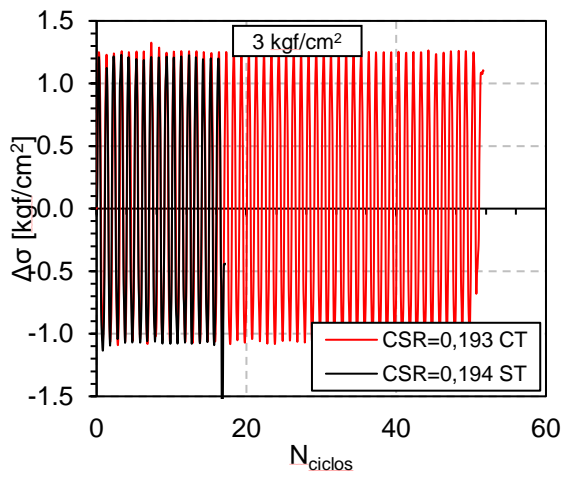
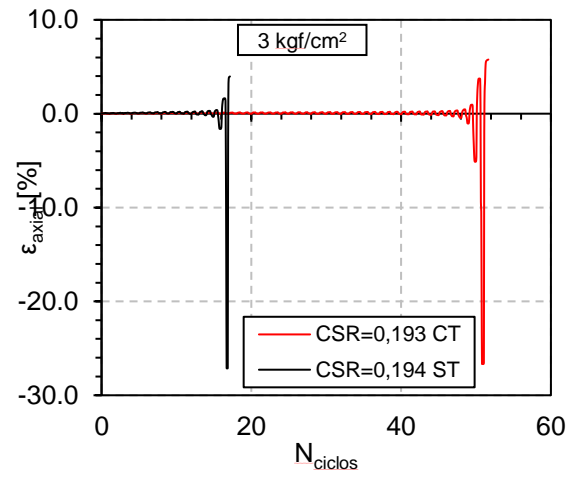
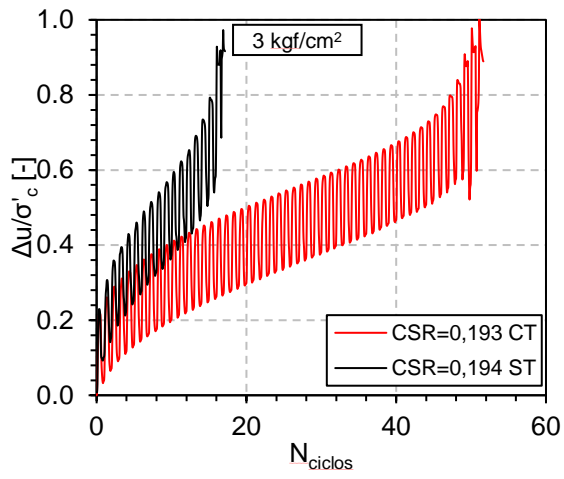
(c)

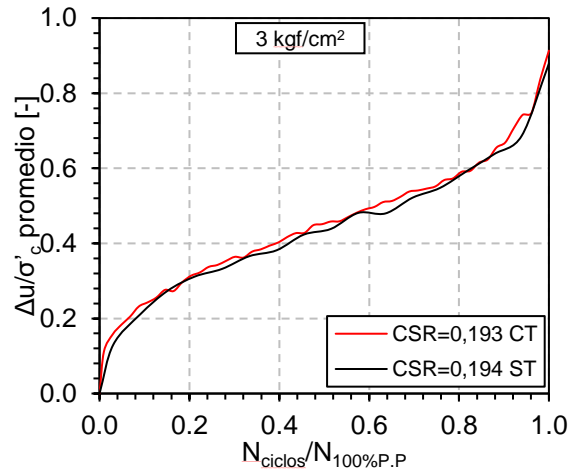
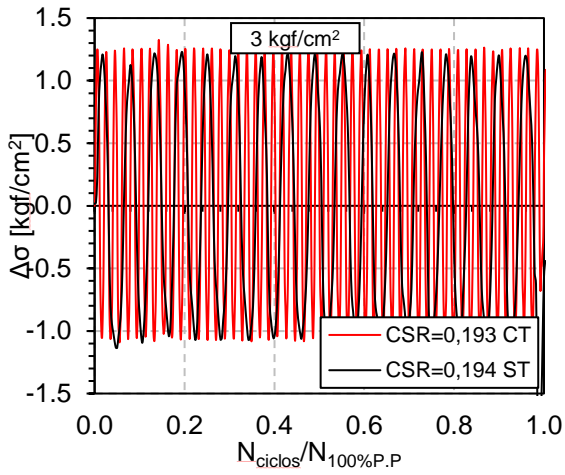
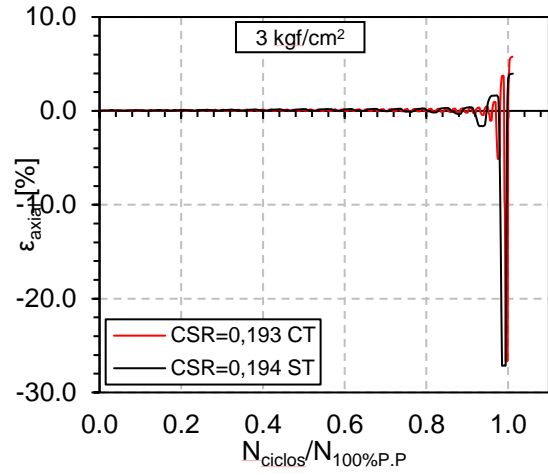
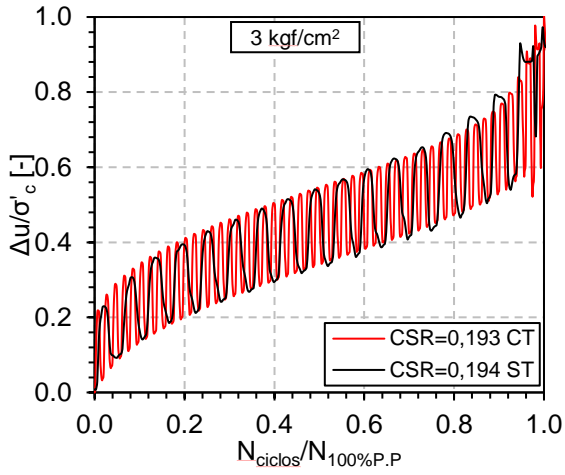


(d)

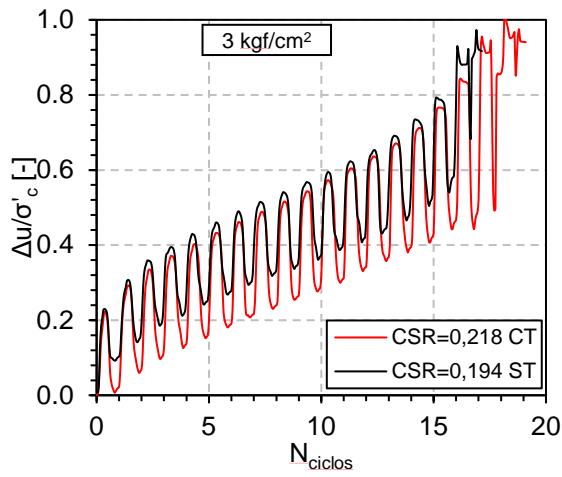


- $CSR = 0.194$ ST – $CSR = 0.193$ CT y $\sigma'_c = 3$ [kgf/cm²]

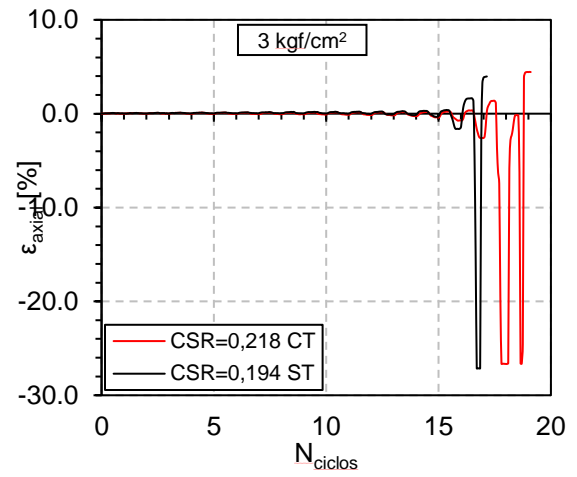




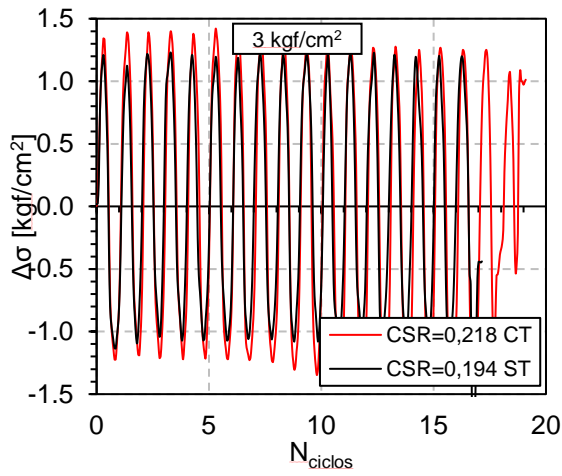
- $CSR = 0.194$ ST – $CSR = 0.218$ CT y $\sigma'_c = 3[\text{kgf/cm}^2]$



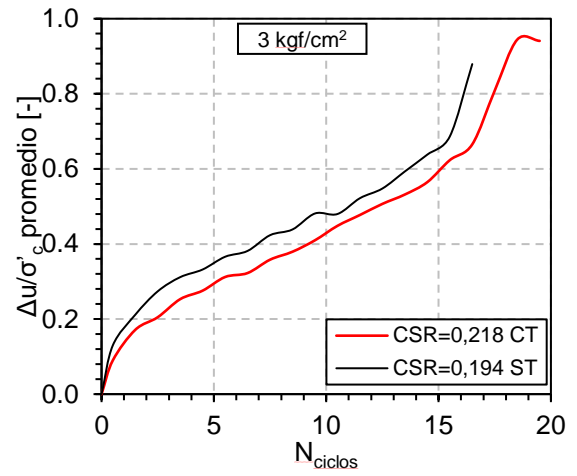
(a)



(b)



(c)



(d)