

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

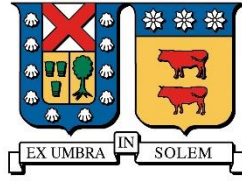
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**Estudio de la respuesta a corte de un suelo granular frente a
cargas cíclicas de larga duración**

Daniela Leonor Ramírez Ortega

Ingeniera Civil
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Mayo de 2022



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

Estudio de la respuesta a corte de un suelo granular frente a cargas cíclicas de larga duración

Tesis de Grado y Memoria de Título presentada por

DANIELA LEONOR RAMÍREZ ORTEGA

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniera Civil

y el grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gonzalo Hernán Suazo Fuenzalida

Mayo de 2022

TITULO DE LA TESIS:

Estudio de la respuesta a corte de un suelo granular frente a cargas cíclicas de larga duración

AUTOR:

DANIELA LEONOR RAMIREZ ORTEGA

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el **Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. Guía

Gonzalo Suazo Fuentealba

Nombre Miembro 1 Comisión

Matías Silva Illanes

Nombre Miembro 2 Comisión

Gabriel Villavicencio

Valparaíso, Chile, Mayo de 2022

Somos prehistoria que tendrá el futuro
Somos los anales remotos del hombre
Estos años son el pasado del cielo
Estos años son cierta agilidad
Con que el sol te dibuja en el porvenir
Son la verdad o el fin, son Dios
Quedamos los que puedan sonreír
En medio de la muerte, en plena luz

...

Al final del viaje está el horizonte
Al final del viaje partiremos de nuevo
Al final del viaje comienza un camino
Otro buen camino que seguir
Descalzos contando la arena
Al final del viaje estamos tú y yo
intactos
Quedamos los que puedan sonreír
En medio de la muerte, en plena luz

Resumen

Las fundaciones profundas offshore se encuentran sometidas bajo los efectos de las mareas y tormentas, fenómenos que se caracterizan por su baja frecuencia y gran cantidad de ciclos de carga. Debido a los costos e ingeniería asociado a este tipo de proyectos, asegurar resistencia es clave.

Existe evidencia de que el efecto acumulado de los ciclos puede producir asentamientos o degradación en la capacidad de soporte de la fundación, lo cual depende de la dirección de las cargas aplicada (Poulos, 1989) como también la combinación de éstas (Andersen, 2009). Es importante tener un completo marco de trabajo que permita determinar el comportamiento de cargas monótonas y cíclicas del suelo, identificando parámetros tales como el historial de esfuerzos previos, valores de cargas medias y cíclicas, deformaciones angulares, condiciones de drenaje, etc.

Con el fin de investigar este fenómeno, han sido realizados ensayos a gran escala (Jardine et. al, 2012), como ensayos a mediana escala (Tsuha et. al, 2012), a partir de los cuales se han obtenido diagramas de interacción (Poulos, 1989) que permiten entregar límites en función de la reducción de la capacidad de soporte observada. Sin embargo, los altos costos de este tipo de ensayos hacen necesario buscar otra alternativa. Estudios enfocados en el análisis de esfuerzos generados en el suelo adyacente a pilotes, (Boulon y Foray, 1986; Lehane, 1993) han presentado la importancia de la relación existente entre el esfuerzo radial local y el desplazamiento generado en el suelo, ya que controla la capacidad de soporte. Es posible evaluar esta relación mediante ensayos de laboratorio realizados al suelo, sin embargo, para obtener una relación conservadora, se propone que el equipo CDSS, bajo condiciones de volumen constante, es el más adecuado para ello.

El presente estudio de la respuesta a corte de un suelo granular frente a cargas cíclicas de larga duración, permite complementar los estudios existentes en esta área abarcando el tópico de suelos granulares. La base de datos existente de este tipo de estudios se enfoca en arcillas, debido a que las investigaciones asociadas a estructuras offshore son realizadas principalmente por países nórdicos. En este estudio se evalúa el efecto de esfuerzos de corte cíclicos simétricos y asimétricos en la respuesta monótona, cíclica y post cíclica del suelo, en términos de deformaciones angulares (media o cíclica), trayectoria de esfuerzos, cambios en el módulo de corte, entre otros.

Un total de 34 ensayos en equipo CDSS fueron realizados, en los cuales es utilizada arena de Ottawa, la cual presenta una amplia base técnica disponible (Parra, 2016). Las muestras fueron realizadas bajo condiciones secas y a una densidad relativa de 70% ($1.692 \text{ [g/cm}^3\text{]}$), con el fin de simular condiciones de un suelo medio-denso. Los ensayos realizados se dividen en: 6 ensayos monótonos, 16 ensayos cíclicos y 12 ensayos monótonos post ciclos.

Con el fin de estudiar la respuesta monótona de la arena, 6 ensayos monótonos controlados por deformaciones son realizados, los cuales son sometidos a diferentes esfuerzos de consolidación (100, 300 y 500 [kPa]) bajo condiciones de presión y volumen constante. Resultados obtenidos señalan que la arena Ottawa presenta un ángulo de fricción de 28° para el caso a presión o esfuerzo vertical constante y 30.4° para el caso a volumen constante. Valores obtenidos se encuentran dentro del rango de valores asociados al material (Bhaumik, 2015; Parra, 2016).

En cuanto al análisis de la respuesta cíclica del material, 16 ensayos cíclicos controlados por esfuerzos, bajo condiciones de volumen constante y con esfuerzo de consolidación de 100 [kPa] son realizados. Estos ensayos fueron sometidos a distintas combinaciones de esfuerzo de corte cíclico (12.5-24 [kPa]) y de esfuerzo de corte medio (0-20 [kPa]). Resultados muestran que existe una marcada relación entre el esfuerzo de corte medio aplicado y las deformaciones angulares generadas. A mayor esfuerzo de corte medio aplicado, existe una mayor acumulación de deformaciones angulares permanentes iniciales, sin embargo, con los ciclos, dada la estabilización del esfuerzo vertical, esta acumulación procede a ser de manera lenta.

El comportamiento de la deformación angular es presentado en diagramas de contorno (Andersen, 1988), los cuales buscan representar de forma normalizada los distintos escenarios posibles de la falla cíclica del suelo. Para los diagramas de contorno realizados para el presente estudio, se agrupan en función del comportamiento de las deformaciones angulares generadas (media o cíclica) como de la cantidad de ciclos requerida para alcanzar un valor umbral de deformación angular. El diagrama de contorno propuesto para el suelo plantea la existencia de 4 grupos o regiones dependiendo del comportamiento observado. Las regiones definidas, en general, coinciden con las regiones estable, metaestable e inestable definidas en diagramas de estabilidad para pilotes (Jardine et. al., 2012), sin embargo, el presente estudio delimita en mayor profundidad la región metaestable, señalando la existencia de dos subregiones para este caso. En cuanto a los valores de esfuerzo de corte medio y cíclico definidos, permiten complementar la zona de pequeños esfuerzos de un diagrama de contorno para arena de Ottawa de similares características (Blaker y Andersen, 2019).

En cuanto a la resistencia a corte, es observado que la existencia de preshearing mejora la resistencia del suelo, evitando que se alcancen estados con esfuerzos verticales nulos y evitando en menor medida la degradación existente debido a los ciclos. Resultados y conclusiones similares son vistas en estudios enfocados en pilotes (Jardine, 1991).

La respuesta monótona post ciclos es evaluada con la realización de 12 ensayos monótonos controlados por deformaciones, realizados luego de una etapa cíclica en donde distintos valores de esfuerzos de corte cíclico fueron evaluados (15, 17.5 y 20 [kPa]). Estos ensayos presentaron una consolidación inicial de 100 [kPa]. Fue evaluada la influencia de las condiciones iniciales de los ensayos monótonos post ciclos, es decir, se analizaron cambios respecto a la existencia de reconsolidación tras los ciclos, retorno de deformaciones angulares o esfuerzos de corte residuales a cero debido a la etapa cíclica. Los ensayos monótonos post ciclos fueron comparados con los ensayos monótonos, con el fin de buscar diferencias y semejanzas entre ellos.

Resultados indican que la aplicación de una reconsolidación posterior a la etapa cíclica permite una leve recuperación de la respuesta a corte del suelo, debido a la densificación producida. Sin embargo, no es relevante la amplitud de esfuerzo de corte cíclico aplicado durante la etapa cíclica si durante ésta es alcanzada la línea de estado crítico, ya que existe evidencia de comportamientos similares entre ensayos.

Abstract

Deep offshore foundations are subject to effects of tidal and storm surges, characterized by low frequency and large number of load cycles. Due to the costs and associated engineering with this kind of project, ensuring resistance is key.

Evidence shows that the cumulative effect of cycling can produce settlement or degradation in the bearing capacity of the foundation, which depends on the direction of the applied loads (Poulos, 1989) as well as the combination of these (Andersen, 2009). It is important to have a complete framework to determine the monotonic and cyclic loading behavior of the soil, identifying parameters such as previous stress history, values of average and cyclic loads, angular deformations, drainage conditions, and others.

In order to investigate this phenomenon, large-scale tests (Jardine et. al, 2012), as well as medium-scale tests (Tsuha et. al, 2012) have been carried out, from which interaction diagrams (Poulos, 1989) have been obtained to provide limits as a function of the observed reduction in bearing capacity. However, the high costs of this type of tests make it necessary to look for another alternative. Studies focused on the analysis of stresses generated in the soil adjacent to piles (Boulon and Foray, 1986; Lehane, 1993) have shown the importance of the relationship between the local radial stress and the displacement generated in the soil, since it controls the bearing capacity. It is possible to evaluate this relationship by laboratory tests performed on the soil; however, in order to obtain a conservative relationship, it is proposed that the CDSS equipment, under constant volume conditions, is the most suitable for this purpose.

The present study of the shear response of a granular soil to long-term cyclic loading complements existing studies in this area covering the topic of granular soils. The existing database of this type of studies focuses on clays because the research associated with offshore structures is mainly carried out by Nordic countries. This study evaluates the effect of symmetric and asymmetric cyclic shear stresses on the monotonic, cyclic and post cyclic response of the soil, in terms of angular deformations (average or cyclic), stress path, changes in shear modulus, among others.

A total of 34 CDSS tests were performed, using Ottawa sand, which has a broad technical base available (Parra, 2016). The samples were performed under dry conditions with a relative density of 70% (1.692 [g/cm³]), in order to simulate medium-dense soil conditions. The tests performed are divided into 6 monotonic tests, 16 cyclic tests and 12 post-cycle monotonic tests.

In order to study the monotonic response of the sand, 6 deformation-controlled monotonic tests are performed, which are subjected to different consolidation stresses (100, 300 and 500 [kPa]) under conditions of constant pressure and volume. Results obtained indicate that the Ottawa sand presents a friction angle of 28° for the case at constant pressure or vertical stress and 30.4° for the case at constant volume. Values obtained are within the range of values associated with the material (Bhaumik, 2015; Parra, 2016).

Regarding the analysis of the cyclic response of the material, 16 stress-controlled cyclic tests were performed under constant volume conditions and with a consolidation stress of 100 [kPa]. These tests were subjected to different combinations of cyclic shear stress (12.5-24 [kPa]) and medium shear stress (0-20 [kPa]). Results show that there is a marked relationship between the average shear stress applied and the angular deformations generated. As average applied shear stress is higher, greater is the accumulation of initial permanent angular deformations; however, with cycling, given the stabilization of the vertical stress, this accumulation proceeds slowly.

The behavior of the angular deformation is presented in contour diagrams (Andersen, 1988), which seek to represent in a normalized form the different possible scenarios of cyclic soil failure. For the contour diagrams made for the

present study, they are grouped according to the behavior of generated angular deformations (average or cyclic) as well as the number of cycles required to reach a threshold value of angular deformation. The proposed contour diagram for the soil suggests the existence of 4 groups or regions depending on the observed behavior. The defined regions, in general, coincide with the stable, metastable and unstable regions defined in stability diagrams for piles (Jardine et. al., 2012), however, the present study delimits the metastable region, pointing out the existence of two subregions for this case. As for the mean and cyclic shear stress values defined, they allow complementing the small stress zone of a contour diagram for Ottawa sand of similar characteristics (Blaker and Andersen, 2019).

Regarding shear strength, it is observed that the existence of preshearing improves soil resistance, preventing the achievement of states with zero vertical stresses and avoiding to a lesser extent the existing degradation due to cycling. Similar results and conclusions are seen in studies focused on piles (Jardine, 1991).

The post-cyclic monotonic response is evaluated by performing 12 deformation-controlled monotonic tests, performed after a cyclic stage where different values of cyclic shear stresses were evaluated (15, 17.5 and 20 [kPa]). These tests presented an initial consolidation of 100 [kPa]. The influence of the initial conditions of the post-cycle monotonic tests was evaluated, i.e., changes were analyzed with respect to the existence of reconsolidation after the cycles, return of angular deformations or residual shear stresses to zero due to the cyclic stage. The post-cycle monotonic tests were compared with the monotonic tests in order to look for differences and similarities between them.

Results indicate that the application of a reconsolidation after the cyclic stage allows a slight recovery of the soil shear response, due to the densification produced. However, the amplitude of the cyclic shear stress applied during the cyclic stage is not relevant if the critical state line is reached during the cyclic stage, since there is evidence of similar behavior between tests.

Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a mi mamá, por apoyarme y quererme todos estos años, la cual que quiso tanto que permitió que volara de su lado en Curicó para cumplir uno de mis objetivos de vida acá en la quinta costa. Finalmente, y luego de 10 años, se logró titular la hija menor.

Agradezco a mis tíos, por ser su hija, por aceptarme cada domingo durante estos años para compartir y sentir el calor familiar, los cariños, abrazos y gestos que llenaron de alegría mi corazón.

Agradezco a mis hermanos, por los buenos momentos y los gestos de apoyo que me dieron durante todos estos años. Gracias por darme privilegios de hermana menor.

Agradezco a toda la gente que conocí durante mi instancia en la universidad, ya sea en durante mis ramos de carrera, de postgrado o en las actividades extracurriculares en las que participé (Acción educa, ayudantías, orquesta, concursos varios), ya que fueron parte importante de mi desarrollo personal a lo largo de estos años.

Mención especial a aquella gente que marcó y me acompañó en mi camino: las que me apoyaron y me dieron ánimos en mis momentos difíciles, las que alegraron mis días, las que me apañaron en las etapas de exámenes y trabajos, las que me hicieron sentir en casa dentro de sus propias casas. No necesito nombrarlos, ya que sé que al leer estas líneas se darán por aludidas y aludidos. A pesar de los distintos rumbos que tomemos en nuestras vidas, los bellos recuerdos vividos en conjunto quedarán atesorados en mi corazón.

Agradezco a las profesoras y profesores de esta universidad, por la formación y conocimiento que permitirá desarrollarme profesionalmente. Aquellos profesores y profesoras, que en cada lección dada mostraban un ejemplo de integridad personal y profesional. En particular, agradecida del profesor Matías Silva, por aceptarme como su alumna tesista, planteándome un tema acorde a mis intereses, respondiéndome y aclarándome mis dudas siempre de una manera muy amena y cercana; y agradecida en particular del profesor Gonzalo Suazo por el tiempo dedicado a sus comentarios y correcciones certeras que enriquecieron este trabajo.

Agradezco a mi compañero Cristian Monje por dedicarme tiempo (que fue bastante) para enseñarme a utilizar el equipo CDSS sin morir (ni matarlo) en el intento. A mis compañeros de la famosa 313 (Monse, Eve, Seba, Nico) por el apoyo moral que nos dábamos durante la instancia experimental y al personal de mecánica de suelos de LEMCO por su apoyo y buena disposición. No puedo dejar de mencionar en agradecimientos a mis compañeros de la mítica salita y los tecitos conversados.

Agradecimientos formales a ANID (ex CONICYT) mediante el programa de formación de capital humano avanzado convocatoria 2019 (CONICYT-PFCHA/Magíster Nacional/2019-22191378) y a Universidad Técnica Federico Santa María por el soporte financiero entregado para el desarrollo de esta investigación.

Mención honrosa a Chocola, quien me acompañó fielmente en la etapa de escritura en durante la cuarentena.

Finalmente, y no menos importante, agradezco a mi versión que, durante los años 2019-2022, trabajó y dedicó mucho tiempo en el desarrollo de esta tesis. Si pudo sobrevivir a un estallido social y a una pandemia realizando una tesis de magíster, puede lograr todo en esta vida.

Contenido

Resumen	6
Abstract	8
Agradecimientos.....	10
Contenido	11
1 Introducción.....	14
1.1 Contexto	14
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Estructura de la tesis.....	15
2 Estado del Arte	17
2.1 Solicitaciones cíclicas.....	17
2.2 Efecto de las sollicitaciones cíclicas en fundaciones profundas	20
2.2.1 Diagrama de interacción o estabilidad.....	20
2.2.2 Representación componentes del suelo adyacente a fundación profunda	21
2.3 Respuesta cíclica del suelo	24
2.3.1 Deformación angular	24
2.3.2 Efecto de preshearing o prestraining en la respuesta de los suelos	25
2.3.3 Diagramas de Contorno.....	28
2.4 Respuesta monótona post ciclos.....	29
2.5 Equipo CDSS.....	30
2.5.1 Etapas de un ensayo DSS o CDSS	32
3 Estudio experimental	34
3.1 Material utilizado.....	34
3.2 CDSS-USM.....	35
3.3 Preparación de la muestra.....	36
3.4 Programa experimental.....	38
4 Resultados: Ensayos monótonos.....	39
4.1 Introducción.....	39
4.2 Consolidación.....	39
4.3 Ensayos presión o esfuerzo vertical constante (PC).....	40
4.3.1 Esfuerzo de Corte versus Deformación Angular	41

4.3.2	Desplazamiento vertical versus deformación Angular	42
4.3.3	Esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical.....	43
4.4	Ensayos a volumen constante (VC).....	45
4.4.1	Variación de esfuerzo vertical versus deformación angular	45
4.4.2	Esfuerzo de corte versus deformación angular	46
4.4.3	Variación del Esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical	48
4.5	Comparación resultados esfuerzo vertical y volumen constante	49
5	Resultados: Ensayos cíclicos	52
5.1	Definición de parámetros de respuesta.....	53
5.2	Efectos de aplicación esfuerzo de corte medio (preshearing).....	54
5.3	Deformación angular con el número de ciclos	55
5.3.1	Comportamiento deformación angular acumulada en función del número de ciclos.....	58
5.3.2	Comportamiento deformación angular media en función del número de ciclos	60
5.3.3	Comportamiento deformación angular cíclica en función del número de ciclos.....	61
5.4	Diagrama de contorno	62
5.4.1	Comportamiento deformación angular	63
5.4.2	Comportamiento número de ciclos.....	65
5.4.3	Diagrama de contorno propuesto para el suelo estudiado	67
5.5	Trayectorias de esfuerzos	69
5.5.1	Efecto de amplitud de esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado	69
5.5.2	Efecto amplitud de esfuerzo de corte cíclico.....	73
5.6	Módulo de corte.....	77
5.6.1	Valores de módulo de corte versus amplitud cíclica	77
5.6.2	Valores de módulo de corte versus número de ciclos.....	78
5.7	CSR vs número de ciclos.....	81
6	Resultados: Ensayos monótonos post ciclos.....	85
6.1	Introducción.....	85
6.2	Consolidación.....	85
6.3	Etapa cíclica.....	86
6.4	Etapa monótona post ciclos	87
6.4.1	Caso A – Reconsolidación.....	88
6.4.2	Caso B (Esfuerzo de corte residual cero)	93
6.4.3	Caso C (Deformación angular cero).....	94
7	Conclusiones.....	97

7.1	General	97
7.2	Ensayos monótonos	97
7.3	Ensayos cíclicos.....	97
7.3.1	Referente a condiciones iniciales	97
7.3.2	Referente a la deformación angular.....	97
7.3.3	Referente a diagrama de contorno	98
7.3.4	Referente a trayectorias de esfuerzos	99
7.3.5	Referente a módulo de corte	99
7.3.6	Referente a CSR	100
7.4	Ensayos monótonos post ciclos	100
7.5	Futuras investigaciones	101
8	Bibliografía.....	102
9	Anexos	107
	Diagramas de contorno	107
	Etapa cíclica – Ensayos monótonos post ciclos	110

1 Introducción

1.1 Contexto

Las fundaciones profundas son sometidas a diversos tipos de carga a lo largo de su vida útil. Dentro de la variedad de estructuras que presentan este tipo de fundaciones, particular atención poseen las estructuras offshore. Este tipo de estructuras se encuentra sometida bajo los efectos de mareas y tormentas, las cuales se caracterizan por una baja frecuencia y una gran cantidad de ciclos de carga. Dada la ingeniería involucrada para realizar este tipo de proyectos, que conllevan a una gran cantidad de dinero invertido, es necesario que éstos presenten robustez en los factores de seguridad asociados. El efecto acumulado de los ciclos puede producir asentamientos o degradación de la capacidad de soporte en la fundación profunda de la estructura, por lo que se hace imperativo asegurar el buen sostenimiento y resistencia de la estructura.

Dentro del diseño de la fundación profunda, es necesario tener un conocimiento del comportamiento del suelo adyacente a la fundación. Esto involucra el comportamiento bajo cargas monótonas y cíclicas del suelo, identificando distintos parámetros que influyen en la resistencia, tales como el número de ciclos aplicado, historial de esfuerzos previo, valores de cargas medias y cíclicas, deformaciones angulares, condiciones de drenaje, etc. Tanto la combinación de las cargas media y cíclicas (Andersen, 2009) como la dirección de éstas (Poulos, 1989) gobiernan los comportamientos observados. Ciclos en dos direcciones (stress reversal) generan degradación cíclica mientras que ciclos en una dirección generan acumulación de deformaciones permanentes.

Para tener un marco de trabajo que permita conocer el comportamiento del suelo de fundación, en el sitio en donde ésta se instalará, particular importancia presentan los ensayos a gran escala, ya que permiten recrear de mejor manera las condiciones a las que estará sometida la fundación profunda. Para representar los resultados obtenidos, se plantea el concepto diagramas de interacción o estabilidad (Poulos, 1988), los cuales, en base a la carga media y cíclica aplicada, entregan límites en función de la reducción de la capacidad de soporte observada, la cuales corresponden a una zona estable, metaestable e inestable. Condiciones y diagramas similares son obtenidos entre ensayos realizados a gran escala (Jardine et. al, 2012) con ensayos de pilotes a menor escala (Tsuha et. al, 2012).

Sin embargo, el costo y la información previa necesaria para llevarlos a cabo (ej. propiedades del sitio), hacen necesario buscar otra alternativa que permita dar información acerca del comportamiento y las propiedades del suelo a evaluar. Con el fin de lograr esto, son utilizadas pruebas de laboratorio, tales como pruebas de cámara de calibración, pruebas centrífugas, pruebas triaxiales cíclicas y pruebas DSS, ya que permiten representar las condiciones de esfuerzo cortante alrededor del pilote (Randolph y Wroth, 1981). Dentro de estos ensayos de laboratorio, la clave está en buscar aquel que permita simular las condiciones de borde que impone la existencia de un pilote rígido en el suelo adyacente.

Estudios enfocados en el análisis de esfuerzos radiales existentes en suelo adyacente a estructuras offshore (Boulon y Foray, 1986), señalan que el ensayo más adecuado es el ensayo CNS (constant normal stiffness), ya que permite relacionar el esfuerzo radial local y el desplazamiento radial bajo una razón constante K . Estudios posteriores en pilotes instrumentalizados han señalado que la evolución del esfuerzo radial local generado en el suelo controla la capacidad de soporte (componente a fuste) de la fundación (Lehane, 1993). Sin embargo, el definir un valor correcto es complejo, debido a la naturaleza no lineal de la arena (Jardine, 2013).

Debido a esto, es propuesta la utilización de equipo CDSS bajo condiciones de volumen constante, ya que permiten definir un límite superior en cuanto a la reducción de esfuerzos radiales locales existentes. Ensayos CDSS bajo volumen constante son sugeridos en métodos de diseños de pilotes, como por ejemplo el método ICP-05 (Jardine et. al, 2005), en donde es utilizado para predecir los cambios existentes en la capacidad del pilote bajo ciclos.

Tras la realización de distintos ensayos CDSS bajo distintas combinaciones de esfuerzos de corte cíclico y medio, es posible generar, en base a esta información, los diagramas de contorno (Andersen, 1988). Estos diagramas permiten presentar estudios de factibilidad y análisis del comportamiento del suelo previo a la obtención de datos específicos del suelo a estudiar, pudiendo ser utilizados en todo tipo de fundación profunda offshore. Estos son análogos a los diagramas de interacción o estabilidad descritos anteriormente, sin embargo, presentan la diferencia de que pueden ser realizados hasta un cierto valor de deformación angular o hasta un número determinado de ciclos, permitiendo la obtención de datos para esfuerzos de corte y medio no ensayados interpolando los resultados dentro del diagrama de contorno obtenido.

La base de datos con distintos diagramas de contorno es amplia para suelos arcillosos, ya que las investigaciones de estructuras offshore han sido dirigidas fundamentalmente por países nórdicos, los cuales presentan este tipo de suelo en mayor cantidad en sus costas (Andersen, 2009). Existe una incipiente investigación con suelos granulares, principalmente arenas (Blaker, 2015; Blaker, 2019) que debe ser complementada para abarcar un mayor conocimiento en esta área de la geotecnia.

Dicho esto, el siguiente trabajo de tesis propone, en base a un equipo de corte simple (DSS), realizar estudios acerca del comportamiento cíclico y monótono de un suelo granular normalizado (Ottawa Sand). Evaluando el efecto de esfuerzos de corte cíclicos simétricos y asimétrico en la respuesta monótona, cíclica y post cíclica del suelo, en términos de deformaciones angulares medias o cíclicas, trayectorias de esfuerzos, entre otros. Este trabajo de tesis busca complementar lo existente en esta área abarcando el comportamiento de suelos granulares, específicamente arenas limpias sin finos. El diagrama de contorno propuesto permitirá ampliar la base de datos existente y beneficiar el desarrollo en esta área de la geotecnia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo de investigación es evaluar el efecto de esfuerzos de corte cíclicos simétricos y asimétricos de larga duración en la respuesta de un suelo granular seco utilizando un equipo de corte simple cíclico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la influencia del número de ciclos, amplitud de esfuerzo de corte cíclico y medio, y del esfuerzo normal aplicado, en la respuesta cíclica de un suelo granular en términos del análisis de las deformaciones angulares (cíclicas, acumuladas y permanentes), la variación de esfuerzo vertical, la trayectoria de esfuerzos y la evolución del módulo de corte.
- Plantear un diagrama de contorno para caracterizar la respuesta de un suelo granular denso, con criterio basado en número de ciclos y deformaciones angulares para evaluar estabilidad y comportamiento.
- Analizar la variación en la respuesta monótona de un suelo granular, evaluando variaciones de trayectorias de esfuerzo, esfuerzo vertical, esfuerzo de corte y deformaciones angulares, debido al efecto de sollicitaciones cíclicas previas caracterizadas en función de parámetros tales como número de ciclos, amplitud de carga cíclica y media, y esfuerzo normal aplicado, con el fin de establecer relaciones entre estos parámetros y el comportamiento observado.

1.3 Estructura de la tesis

A continuación, se presenta una breve descripción de los 9 capítulos que conforman esta tesis:

- Capítulo 1: Introducción. Presenta el contexto y la fundamentación de la problemática en estudio.
- Capítulo 2: Estado del arte. Presenta el estado del arte acerca de las solicitaciones cíclicas, efecto de las solicitaciones cíclicas en fundaciones profundas, respuesta cíclica del suelo, respuesta monótona post ciclos y descripción de equipo CDSS.
- Capítulo 3: Estudio experimental. Se describe la metodología seguida en la investigación, presentando el programa experimental y una caracterización del material en estudio como también del equipo utilizado.
- Capítulo 4: Ensayos monótonos. Presenta las variables estudiadas y los resultados asociados, presentando valores que definen el marco de trabajo posterior.
- Capítulo 5: Ensayos cíclicos. Presenta las variables estudiadas y los resultados asociados, realizando comparaciones con lo visto en literatura.
- Capítulo 6: Ensayos monótonos post ciclos. Presenta variables estudiadas y resultados asociados, comparando resultados de esta etapa y lo descrito en el capítulo 4.
- Capítulo 7: Conclusiones. Presenta las conclusiones de los capítulos 4, 5 y 6 acá descritos, incluyendo desafíos futuros para próximos trabajos en esta línea de investigación.
- Capítulo 8: Bibliografía
- Capítulo 9: Anexos

2 Estado del Arte

Para tener un marco de trabajo definido en cuanto a terminología y a estudios asociados a esta investigación, son abordados los siguientes temas en este capítulo: **solicitaciones cíclicas**, definición, tipos y principales parámetros de caracterización. Posterior a ello, se describe el **efecto de las solicitaciones cíclicas en fundaciones profundas**, señalando los denominados diagramas de interacción y representación de las componentes del suelo adyacente, con el fin de analizar el fenómeno de una manera física. Teniendo clara la importancia del suelo de fundación, son presentados distintos resultados acerca de la **respuesta cíclica del suelo**, analizando la deformación angular, preshearing y el concepto de diagrama de contorno. Resultados acerca de la **respuesta monótona post ciclos** son presentados, para finalizar describiendo el **equipo CDSS**, el cual se utiliza en esta investigación.

2.1 Solicitaciones cíclicas

Las solicitaciones cíclicas pueden tener diversos orígenes (terremotos, mareas, tormentas, etc.), siendo caracterizadas principalmente por su periodo (T), cantidad de ciclos (N) y amplitud de sus cargas. La carga de corte cíclica Q , puede tener dirección vertical u horizontal, siendo representada de la siguiente manera:

- Q_{mean} o Q_{medio} : Valor promedio de la carga cíclica
- Q_{cyclic} o $Q_{ciclico}$: Media amplitud alcanzada por la carga cíclica
- Q_{min} , $Q_{máx}$: Valores mínimos y máximos de la carga cíclica

Esta representación se visualiza en el esquema de la Figura 2-1.

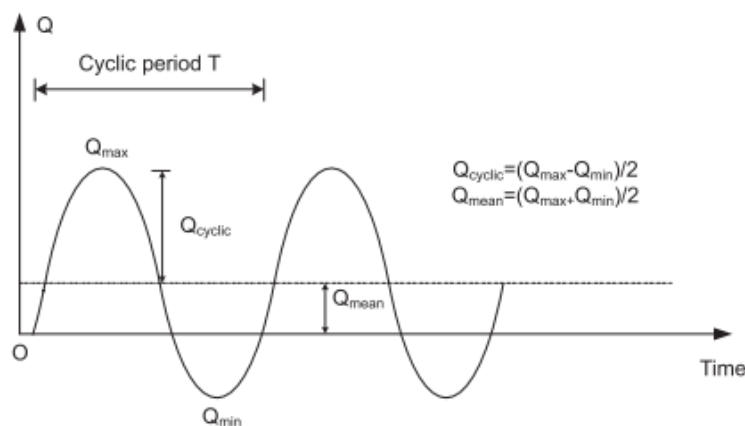


Figura 2-1: Esquema ilustrativo de definiciones, (Tsuha et al., 2012)

Con respecto a cómo las solicitaciones cíclicas influyen en la respuesta de un suelo, es posible identificar al menos cuatro parámetros que de forma combinada controlan la respuesta de un suelo frente a solicitaciones cíclicas:

- Carga cíclica y carga media: entendiéndose que lo importante no es el valor máximo de carga que gobierna el comportamiento a la falla, sino que es la relación existente entre estos parámetros (Andersen, 2009). La combinación realizada puede generar cargas en una o dos direcciones. Ciclos en dos direcciones (stress reversal) generan degradación cíclica mientras que ciclos en una dirección generan acumulación de deformaciones permanentes (Poulos, 1989; Jardine, 1991). En la Figura 2-2, son presentadas las distintas combinaciones en una o dos direcciones, en donde Figura 2-2.a y Figura 2-2.b representan ciclos dos

direcciones (stress reversal), mientras que las Figura 2-2.c y Figura 2-2.d representan ciclos en una dirección.

- Frecuencia (Periodo): la duración de los ciclos aplicados influye en si existe disipación de presión de poros durante los ciclos, condicionando la naturaleza drenada o no drenada del material. Por ejemplo, cargas sísmicas, que presentan alta frecuencia no permiten que el material alcance a disipar la presión de poros, produciéndose efectos de licuefacción. Cargas asociadas a mareas en general presentan periodos superiores a 10[s], por lo cual es posible considerar condiciones drenadas para la arena alrededor del pilote adyacente (Jardine et. al, 2005)
- Tasa de carga: la velocidad a la que se aplica la carga impacta en la resistencia al corte no drenado de las arcillas, dadas las propiedades viscosas de este material. Sin embargo, no influye significativamente en arenas (Poulos, 1989).
- Número de ciclos: el evento cíclico al que estará sometido el suelo puede ser de unos pocos a unos cientos de ciclos. La Figura 2-3, se presenta una comparación del número de ciclos versus la frecuencia de carga para distintos tipos de solicitaciones cíclicas tales como los terremotos, efectos de deshielo, fuerzas de anclajes, trenes de alta velocidad, variaciones de marea, estanques de almacenamiento (carga y descarga), etc. Importante señalar, que las solicitaciones sísmicas se caracterizan por un bajo número de ciclos a periodos muy bajos a diferencia de las cargas cíclicas offshore que, en general presentan un número de ciclos.

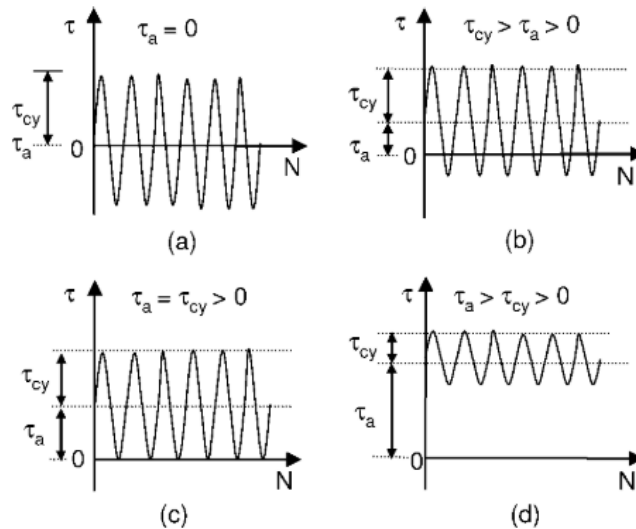


Figura 2-2: Representación cargas cíclicas a) Dos direcciones ($t_{cyc} > 0$, $t_{ave} = 0$), b) Dos direcciones ($t_{cyc} > t_{ave} > 0$), c) Una dirección ($t_{cyc} = t_{ave}$), d) Una dirección ($t_{ave} > t_{cyc} > 0$) (Randolph and Gourvenec, 2009)

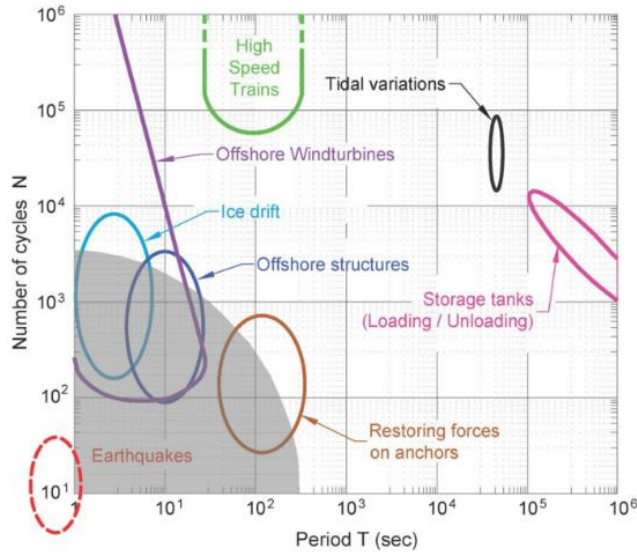


Figura 2-3: Diagrama periodos (SOLCYP (Puech & Garnier, 2017))

Las solicitaciones cíclicas offshore son principalmente tormentas, las cuales son patrones de sucesos irregulares, que deben ser convertidas en patrones cíclicos con la forma de la Figura 2-1. Para lograr esto, en el caso de mareas, es necesario caracterizar la tormenta, existiendo recomendaciones para la realización de este procedimiento (BSH, 2011; BSH, 2015) que se han utilizado en desarrollo de diseños de, por ejemplo, granjas eólicas en el mar del norte (Merrit y Schroeder, 2012). La tormenta es posible representarla en una serie idealizada de cargas uniformes (Figura 2-4).

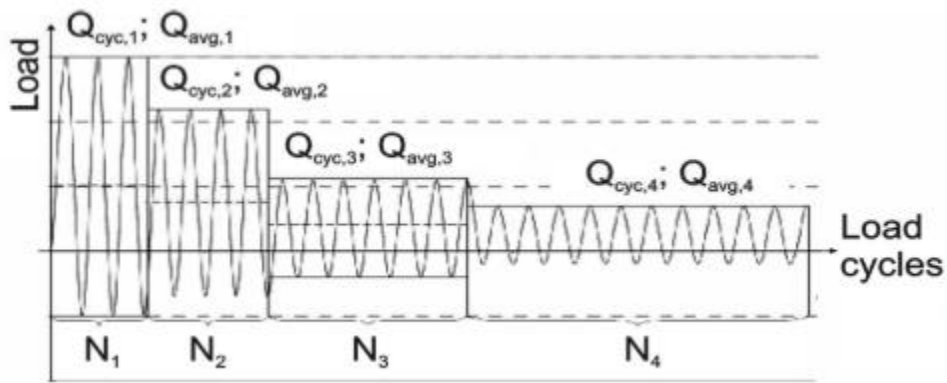


Figura 2-4: Serie idealizada de carga uniforme (Merrit y Schroeder, 2012)

Es posible generar una única carga equivalente en función de las cargas representadas en la Figura 2-4, mediante las leyes de Miner (Miner, 1945). Sin embargo, al realizar esta transformación, no es posible evaluar los efectos de la frecuencia y el historial de carga en respuestas de término de estabilidad y deformaciones de fundaciones. Kaggwa (Kaggwa et. al, 1991) realizó una serie de realizando ensayos triaxiales drenados, modificando el orden de las cargas cíclicas aplicadas señala que el uso de los existentes métodos para convertir tiempo-historia de esfuerzos en series uniformes de esfuerzos equivalentes pueden llevar a predicciones erróneas de los efectos de la carga cíclica irregular. Esto debido a que las deformaciones alcanzadas entre sus ensayos y aplicando las leyes de Miner (Miner,

1945), demostraron tener resultados distintos. Por lo tanto, el orden en la aplicación de la carga puede tener un efecto en el comportamiento del suelo, que podría relacionarse con la evolución existente de las tensiones del suelo.

2.2 Efecto de las solicitaciones cíclicas en fundaciones profundas

Las fundaciones profundas funcionan transfiriendo las solicitaciones de la estructura a un estrato en profundidad mediante la resistencia en punta y la resistencia de fuste o de fricción, logrando un equilibrio entre la sollicitación de la estructura y la capacidad de soporte del suelo. Con el fin de señalar importantes puntos acerca del efecto de las solicitaciones cíclicas en fundaciones profundas, es planteado en primer lugar el concepto de diagrama de interacción o estabilidad utilizado en pilotes de pequeña a gran escala, posterior a ello, es descrito en mayor detalle la representación de las distintas componentes existentes en el suelo adyacente al pilote y cómo se relacionan entre sí.

2.2.1 Diagrama de interacción o estabilidad

El concepto de diagrama de interacción o estabilidad para arenas (Poulos,1988) presenta las combinaciones de cargas principales (equivalente a la carga media) con las cargas cíclicas, normalizadas por la capacidad estática a compresión que se encuentra sometida la fundación profunda, con el fin de analizar los comportamientos existentes bajo distintos valores de cargas principales y cíclicas.

Poulos (Poulos, 1988), define para un cierto número de ciclos aplicados, tres regiones que corresponden al tipo de comportamiento que adopta la fundación profunda: zona estable (carga cíclica no tiene efecto en la capacidad del pilote), zona metaestable (carga cíclica causa alguna reducción en la capacidad de carga) y zona inestable (carga cíclica provoca la falla en un número determinado de ciclos). Al aumentar el número de ciclos las regiones inestables y metaestables aumentarán mientras que la región estable empieza a disminuir. Posteriores estudios han observado las mismas regiones, sin embargo, los límites entre éstas presentan diferencias (Jardine et. al, 2012, Tsuha et. al, 2012, Aghakouchak et al., 2015). En la Tabla 2-1 se presentan las distintas investigaciones y sus principales conclusiones.

Tabla 2-1: Comparación resultados de literatura para diagramas de interacción

Parámetro	Jardine et. al, 2012	Tsuha et. al, 2012	Aghakouchak et. al, 2015
Forma de ensayo	Pilotes instrumentalizados hincados en Dunquerque, Francia	Ensayos en cámaras de calibración, en arena de sílice (Fontainebleau NE34 sand) bajo condiciones secas	Ensayos triaxiales cíclicos no drenados en arenas de Dunquerque y Fontainebleau NE34 recreando las condiciones ensayos de campo (Jardine y Standing,2012)
Análisis condiciones de borde	Comportamiento del desplazamiento en la punta del pilote	Deslizamiento de interfaz, análisis de esfuerzos	Análisis del comportamiento de p^* .
Condición estable	Desplazamientos de la punta del pilote se acumulan lentamente bajo cientos de ciclos ($N > 1000$), en cargas uni o bidireccionales.	La capacidad a fuste aumenta y no existe deslizamiento de la interfaz en menos de 1000 ciclos.	Bajo $CSR < 0.3$, sin acumulación de deformaciones permanentes, mejorando la capacidad del suelo. Ganancia en la rigidez cíclica.
Condición metaestable	Se acumulan desplazamientos en la punta del pilote a tasas moderadas entre decenas y cientos de ciclos sin lograr estabilizarse. La falla ocurre en el rango de 100 a 1000 ciclos. ($100 < N < 1000$).	Ocurre una mezcla de estos comportamientos, sin embargo, la pila puede sostener cientos de ciclos metaestable sin fallar, pero con comportamiento plástico cercano al eje.	Entre $0.3 < CSR < 0.5-0.6$, se aplican cientos de ciclos sin fallar, sin embargo, existe algo de daño y de acumulación de deformaciones permanentes. Pérdida pequeña de rigidez cíclica en arena.

Parámetro	Jardine et. al, 2012	Tsuha et. al, 2012	Aghakouchak et. al, 2015
Condición inestable	Se desarrollan rápidamente los desplazamientos bajo condiciones de cargas en una o dos direcciones, provocando una marcada pérdida de capacidad del eje a una cantidad de ciclos menores a 100 (N<100).	Comportamientos inelásticos tanto en la masa de suelo (densificación y pérdida de esfuerzo principal) como en la interfaz (deslizamientos locales debido a compactación y marcadas reducciones del esfuerzo efectivo radial), ocurridas en menos de 100 ciclos.	Sobre CSR >0.5-0.6, la falla se alcanza a los pocos ciclos, acumulación de deformaciones permanentes y degradación marcada del módulo G de la arena

En la Figura 2-5, se presenta el diagrama de estabilidad asociado al estudio descrito (Jardine y Standing, 2012).

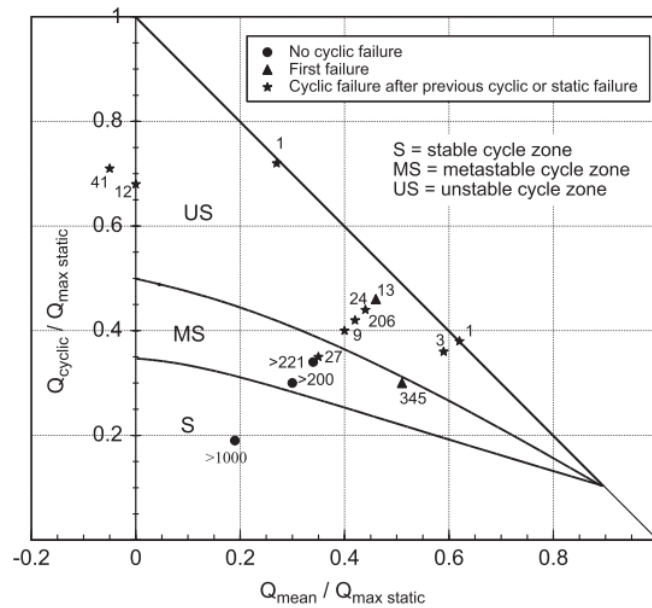


Figura 2-5: Diagrama de estabilidad (Jardine y Standing, 2012)

2.2.2 Representación componentes del suelo adyacente a fundación profunda

Dado el alto el costo e información previa necesaria para generar un diagrama de interacción o estabilidad (ej. propiedades del sitio), hacen necesario buscar otra alternativa que permita dar información acerca del comportamiento y las propiedades del suelo a evaluar. Con el fin de lograr esto, son utilizadas pruebas de laboratorio, tales como pruebas de cámara de calibración, pruebas centrífugas, pruebas triaxiales cíclicas y pruebas DSS, ya que permiten representar las condiciones de esfuerzo cortante alrededor del pilote (Randolph y Wroth, 1981).

En la Figura 2-6 se representa un elemento de suelo ubicado inmediatamente al lado del eje de un pilote. Se observa que el elemento de suelo tiene componentes principales vertical (σ_z), radial (σ_r) y orto radial (σ_θ). La componente vertical está asociada al peso propio de la masa de suelo, la cual varía dependiendo de la profundidad a la que se encuentre sometido, mientras que las componentes radial y orto radial se encuentran relacionadas con la respuesta del suelo frente a una sollicitación, como también por la inclusión de algún tipo de elemento (pilote, anclaje, etc.).

Dada la geometría propia de la interacción entre el suelo y la superficie del pilote, las tensiones radiales o normales aplicadas sobre un elemento de pilote se relacionan con la masa infinita de suelo que lo rodea. Adicionalmente y dado el proceso propio de instalación de un pilote, se produce una expansión de cavidades (Salgado et al. 1998) en el macizo de suelos por el paso de la punta o base del pilote. Esto implica que la tensión normal no tendría relación directa con las tensiones verticales en profundidad. Sin embargo, condiciones cercanas a la orilla son altamente restringidas cinemáticamente: deformaciones circunferenciales y verticales están limitadas a valores muy pequeños debido a la presencia de un pilote rígido (Jardine et. al, 2005).

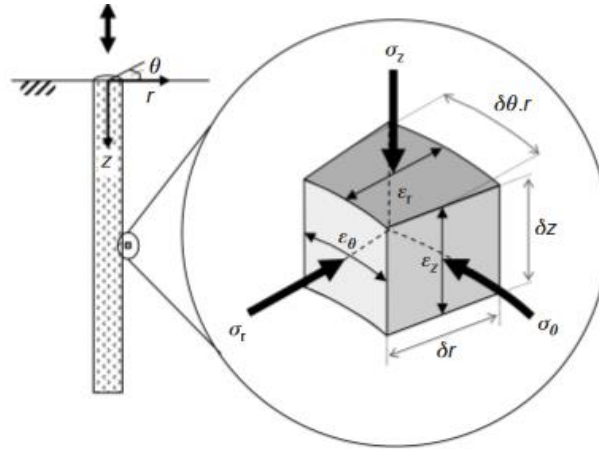


Figura 2-6: Condiciones de esfuerzo y deformación de un elemento de suelo (Sim et al., 2013)

Estudios en pilotes instrumentados han señalado que la evolución del esfuerzo radial local generado en el suelo controla la capacidad de soporte (componente a fuste) de la fundación (Lehane, 1993). Con respecto al mecanismo de la resistencia a fricción de los pilotes en arenas, Lehane (Lehane, 1993) utilizando un pilote instrumentado en una arena de sílice de densidad media a densa, señala que la resistencia última a fricción de los pilotes (en forma local) puede ser descrita mediante el criterio de Mohr-Coulomb en la interfaz. El término asociado a los esfuerzos ($\sigma'rf$), contiene a los valores de esfuerzos alcanzados por el equilibrio ($\sigma'rc$) como también por la variación de esfuerzo radial ($\Delta\sigma'r$).

Con respecto a la variación de esfuerzo radial ($\Delta\sigma'r$), según (Lehane, 1993), se divide en dos componentes, una debido a la rotación del esfuerzo principal ($\Delta\sigma'rp$) y otra a la dilatancia debida al deslizamiento en la interfaz ($\Delta\sigma'rd$).

Con respecto a la componente de rotación, es más significativa en ensayos a tracción que a compresión, y es posible hacer un análogo en lo visto en ensayos triaxiales, en donde existen direcciones principales asociadas a los máximos y mínimos esfuerzos existentes. Con respecto a la componente de dilatancia, Lehane (Lehane, 1993) señala que el cambio de esfuerzo radial que resulta del desplazamiento límite de delta h aplicada a una masa de suelo elástica con rigidez a corte de G, está dada por la Ecuación 2.1. Al reordenar los términos de la Ecuación 2.1, se puede establecer el equilibrio estático de la interfaz suelo-pilote, siendo denominada esta relación como K_{CNS} , presentada en la Ecuación 2.2, referida a un suelo elástico con rigidez constante G, representado en la Figura 2-7.a

$$\Delta\sigma'rd = 2\delta h \frac{G}{R} \quad (\text{Ecuación 2.1}) \quad \rightarrow \quad K_{cns} = \frac{\Delta\sigma'rd}{\delta h} = 2 \frac{G}{R} = \frac{4G}{D} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Estudios enfocados en el análisis de esfuerzos radiales existentes en suelo adyacente a estructuras offshore (Boulon y Foray, 1986), plantean adecuada la utilización del ensayo CNS (constant normal stiffness). Sin embargo, el

problema existente de utilizar ensayos para obtener el valor adecuado de K_{CNS} , es que por sí es complejo, debido a la respuesta no lineal de los suelos, dependiente de los esfuerzos y la anisotropía natural de la rigidez de la arena (Jardine,2014). Debido a esto, es propuesta la utilización de equipo CDSS, bajo condiciones de volumen constante, ya que permite entregar un límite superior en las predicciones de los potenciales efectos cíclicos en suelos saturados. (Jardine et. al, 2005), representando el suelo según la Figura 2-7.b.

La utilización de ensayos CDSS para predecir los cambios existentes en la capacidad del pilote bajo ciclos, ha sido incorporada en métodos de diseño de pilotes, como, por ejemplo, el método de diseño ICP-05 (Jardine et. al, 2005). Por otra parte, estudios enfocados en representar condiciones de pilotes en equipos triaxiales (Aghakouchak et al., 2015), expone que es factible representar el efecto de los ciclos observado en terreno en laboratorio, señalando que es necesario complementar los valores obtenidos con ensayos realizados en equipo CDSS. Este equipo presenta la capacidad de estos ensayos en representar netamente condiciones de corte simple, a diferencia de los ensayos triaxiales, que presentan direcciones principales, tal como se describe en la Figura 2-8.

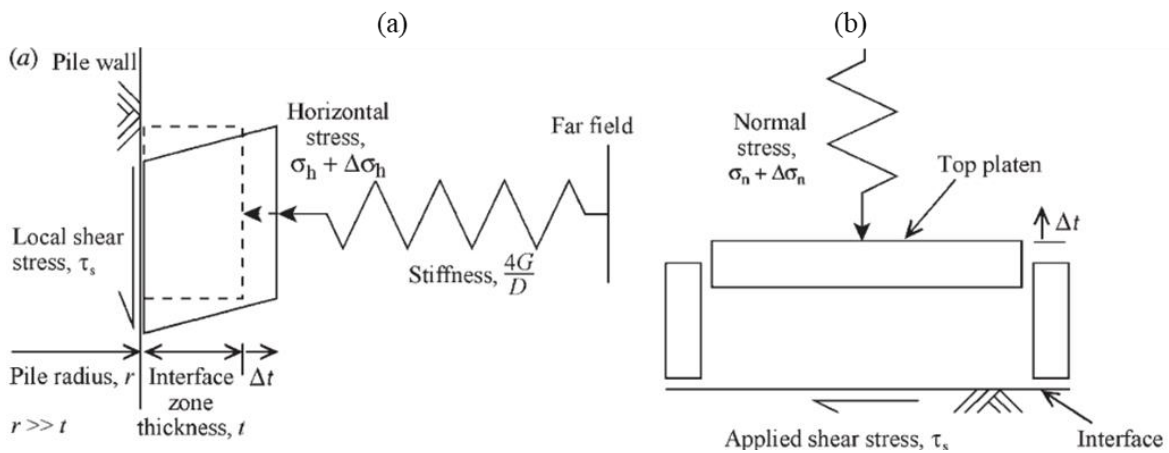


Figura 2-7: Representación masa de suelo a) En interfaz b) En laboratorio (Lehane y White, 2005)

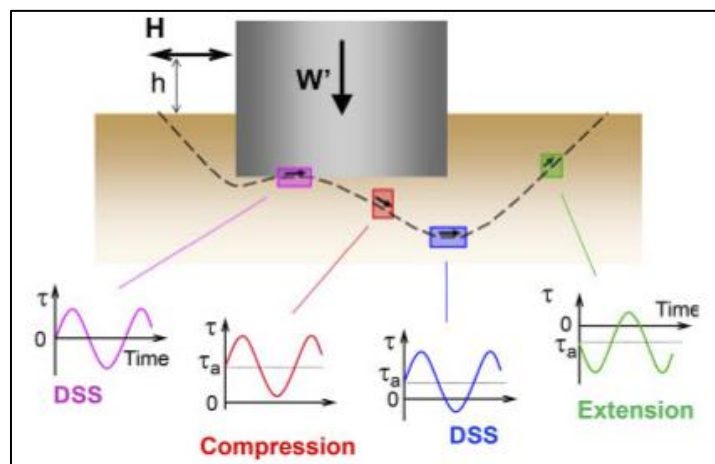


Figura 2-8: Diferencias en orientaciones del suelo y ensayo más adecuado (Andersen,2009)

2.3 Respuesta cíclica del suelo

Estudios diversos han sido desarrollados para evaluar la respuesta del suelo bajo condiciones de cargas cíclicas de larga duración, con el fin de evaluar fenómenos asociados a degradación de respuesta. El énfasis de estos estudios ha sido tanto a condiciones drenadas (Whitman, 1989; López-Querol et. al, 2012) como no drenadas (Ishihara et. al, 1978; Bouferra et. al, 2007). Principales resultados son presentados en base al comportamiento de las deformaciones angulares generadas y al efecto del historial de cargas (concepto de preshearing), planteando el concepto de diagrama de contorno que permite interpolar resultados obtenidos de un set de ensayos cíclicos.

2.3.1 Deformación angular

En el caso de la deformación angular generada por estas solicitaciones, en la Figura 2-9, se presentan las distintas componentes que conforman el comportamiento de la deformación angular durante la aplicación de solicitaciones cíclicas:

- Deformación angular cíclica (γ_{cy}): denominada en amplitud simple o media amplitud, es la provocada netamente por efecto de la solicitación.
- Deformación angular permanente o deformación angular media (γ_p): es aquella generada debido a la acumulación de los ciclos y debido a la existencia de un esfuerzo de corte previo.

La suma de ambas componentes es lo denominado deformación angular máxima. Cabe destacar que en ensayos simétricos (es decir, carga media igual a cero), no existe componente asociada a deformación angular permanente.

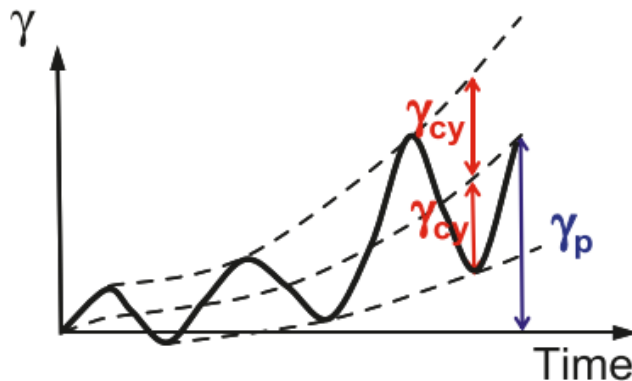


Figura 2-9: Definición deformaciones angulares (Andersen,2009)

El periodo de la solicitación influye en la respuesta del suelo frente a solicitaciones cíclicas. En el caso de terremotos, fenómenos de corta duración, el efecto de licuación es preponderante (Ishihara et. al. 1975) mientras que en el caso de tormentas, fenómenos de larga duración, el efecto de degradación de respuesta es el más importante (Andersen, 2015). Tanto la licuefacción como la degradación de respuesta son considerados indicadores en el cual ocurrió la falla del suelo. En el caso de licuefacción el criterio adoptado es de 3.75% en amplitud simple (Ishihara 1993, NRC 1985), mientras que para estudiar la degradación de respuesta criterios utilizados van desde 5% (Zografou et. Al 2016) hasta un 15% (Andersen,2015).

La importancia que presenta la diferencia existente entre los valores de deformación angular a los cuales es posible definir la falla, es posible observarla en la Figura 2-10. Es planteado que, dependiendo de la deformación angular generada en el suelo, es posible considerar degradación del módulo de corte en suelos completamente saturados (Vucetic, 1994). Los valores umbral de deformación angular en los cuales es posible definir el suelo bajo un comportamiento lineal o no lineal, se correlaciona en base al índice de plasticidad.

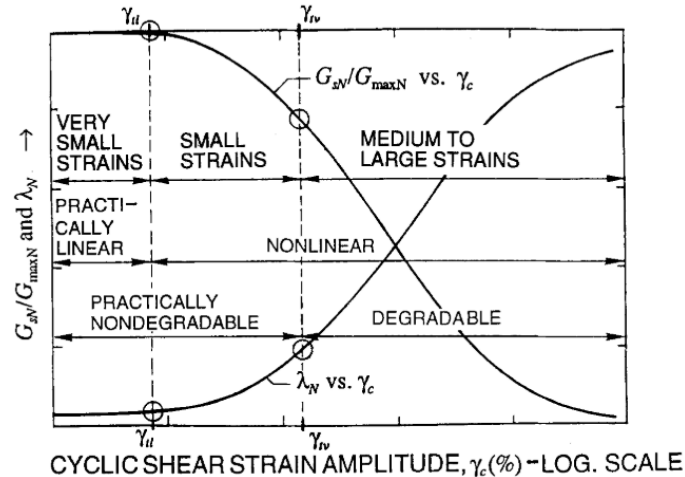


Figura 2-10: Curva de reducción de módulo de Corte (Vucetic, 1994)

2.3.2 Efecto de preshearing o prestraining en la respuesta de los suelos

El preshearing o prestraining consiste en la aplicación de un valor específico de esfuerzo de corte previo (preshearing) o una deformación angular (prestraining) mediante control de esfuerzos o deformaciones, con el fin de estudiar el comportamiento cíclico (o monótono) del suelo posterior a esta carga o deformación previamente aplicada. Esta carga o deformación puede aplicarse de manera cíclica o monótona.

El objetivo de la aplicación de preshearing o prestraining es recrear historial previo de esfuerzo al cual se encuentra sometido el suelo previo a la carga aplicada. Este preshearing aplicado puede quedar representado como un corte medio inicial aplicado a las muestras en laboratorio a estudiar, análogamente el prestraining puede representarse como una deformación angular inicial aplicada a las muestras en laboratorio.

El preshearing o prestraining puede tener diferentes valores y significados dependiendo del autor que los utilice, por lo cual para explicar los efectos que ocasiona la aplicación de preshearing o prestraining, es especificada la definición descrita por cada autor, con su correspondiente efecto encontrado:

- Ishihara (Ishihara,1978), analizó el efecto del historial de esfuerzos en arenas en base a ensayos triaxiales en compresión y extensión en condiciones drenadas bajo condiciones de control de esfuerzos. En este caso, el preshearing consiste en una variación de esfuerzos de manera cíclica con una posterior reconsolidación de la muestra. En la Figura 2-11.a, se presenta la línea de transformación de fase, la cual condiciona la respuesta del suelo dependiendo del preshearing aplicado, ya sea bajo o largo, tal como se presenta en la Figura 2-11.b. A bajos preshearing la muestra presenta endurecimiento mientras que en largos preshearing presenta más rigidez, pero dependiendo del lado en que es cargada (extensión o compresión). Estudios posteriores del mismo autor (Ishihara, 1982), plantean generación de anisotropía en la muestra, dependiendo de la dirección de los ciclos aplicados.
- Luong (Luong,1982), mediante ensayos cíclicos realizados en triaxiales en probetas de arena, plantea la existencia de una línea característica (CT line), que divide el espacio de esfuerzos en dos regiones: una región subcaracterística y una región supercaracterística (Figura 2-12). Cuando el estado de esfuerzos se encuentra en la región subcaracterística, la muestra presentará un comportamiento contractivo, mientras que si se encuentra en la región supercaracterística la muestra presentará un comportamiento dilatante. Si el punto se encuentra por encima de esta línea, no existe cambio alguno de volumen.

- Andersen (Andersen, 2009), considerando el preshearing como la aplicación de 10 ciclos esfuerzos de corte cíclicos de baja amplitud aplicados previamente en condiciones drenadas, señala que: en ensayos cíclicos controlados por deformación, el esfuerzo de corte cíclico final aumenta mientras mayor es el preshearing aplicado, no existiendo diferencia en la densidad de la muestra evaluada, tal como se observa en la Figura 2-13 Sin embargo, plantea que resultados opuestos pueden ser obtenidos si el preshearing aplicado genera largos valores de deformación angular, en donde pueda verse alterada la estructura de suelo.
- Porcino (Porcino et. Al 2009), realiza un acerca de la influencia del preshearing cíclico en la posterior respuesta cíclica y monótona bajo comportamiento no drenado en arenas, utilizando equipo DSS y dos tipos de arena: arena carbonatada y de sílice de Ticino. Con respecto a la respuesta cíclica posterior al preshearing, plantea la existencia de diferencias entre resultados obtenidos en arenas sueltas y densas al ser sometidas a un largo preshearing, definido como la aplicación esfuerzos cíclicos hasta alcanzar una deformación angular en amplitud simple de 3.75%, y posteriormente ser re consolidadas hasta el esfuerzo inicial de consolidación. Cuando son aplicados ciclos posterior a este preshearing, en arenas sueltas existe una menor resistencia a la re-licuefacción mientras que en arenas densas no existe mayor cambio en su comportamiento.
- Shahnazari (Shahnazari et al, 2014) en su estudio del comportamiento dinámico de arena densa y muy densa, utilizando para ello un equipo de cilindro hueco, define el prestraining como aplicaciones de 10 ciclos de carga controlados por deformación. Plantea que bajo pequeños prestraining la microestructura no cambia, sin embargo, un aumento de la densidad conduce a un aumento de la resistencia del suelo y bajo largos preshearing, la microestructura del suelo es completamente alterada bajo una nueva forma. En este caso, si la amplitud de carga es idéntica a una aplicada en el prestraining previo, la resistencia del suelo aumenta, sin embargo, si la amplitud de carga es menor que el prestraining previo, la resistencia disminuye en la etapa siguiente.
- Aghakouchak (Aghakouchak et. al, 2015), realizó una serie de ensayos triaxiales en donde se buscaba recrear condiciones similares a ensayos realizados en pilotes instrumentalizados en terreno (Jardine y Standing, 2012), para estudiar el efecto de los ciclos bajo estado drenado, observó que la aplicación de un pre-cycling permitió que la falla posterior fuese a un número más alto de ciclos a diferencia de las muestras que no fueron sometidos a este pre-cycling.
- Blaker (Blaker, 2019) realizando una serie de ensayos cíclicos en equipos triaxial y DSS en una arena reconstituida bajo condiciones no drenadas durante la aplicación de los ciclos (evento principal), define el preshearing como ciclos de carga de baja amplitud posteriores a la consolidación aplicados de manera drenada, los cuales representan las condiciones de las fundaciones previo a las tormentas de diseño o durante el periodo de build-up de éstas. El efecto de este preshearing es que, a mayor valor de preshearing, más es retrasada la generación de presión de poros de la muestra, por lo cual estas muestras con mayor preshearing resisten más ciclos antes de que se empiezan a desarrollar las deformaciones angulares medias y cíclicas.

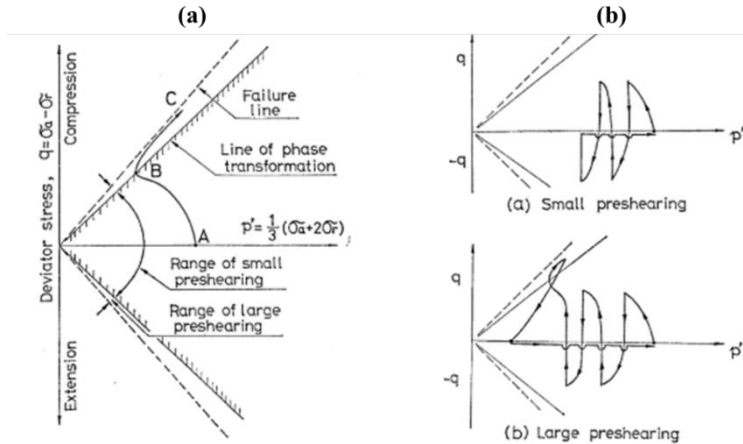


Figura 2-11: a) Línea de transformación de fase; b) Diferencia entre pequeño y largo preshearing (Ishihara, 1978)

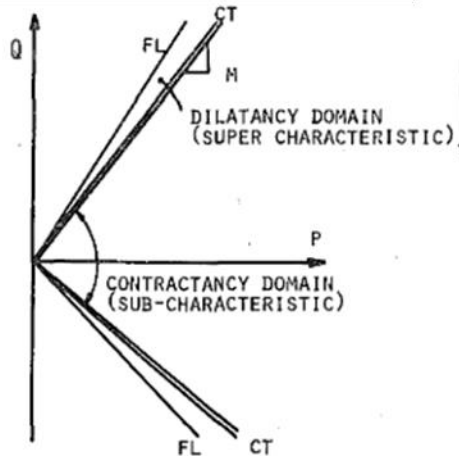


Figura 2-12: Definición de línea características y regiones existentes (Luong,1982)

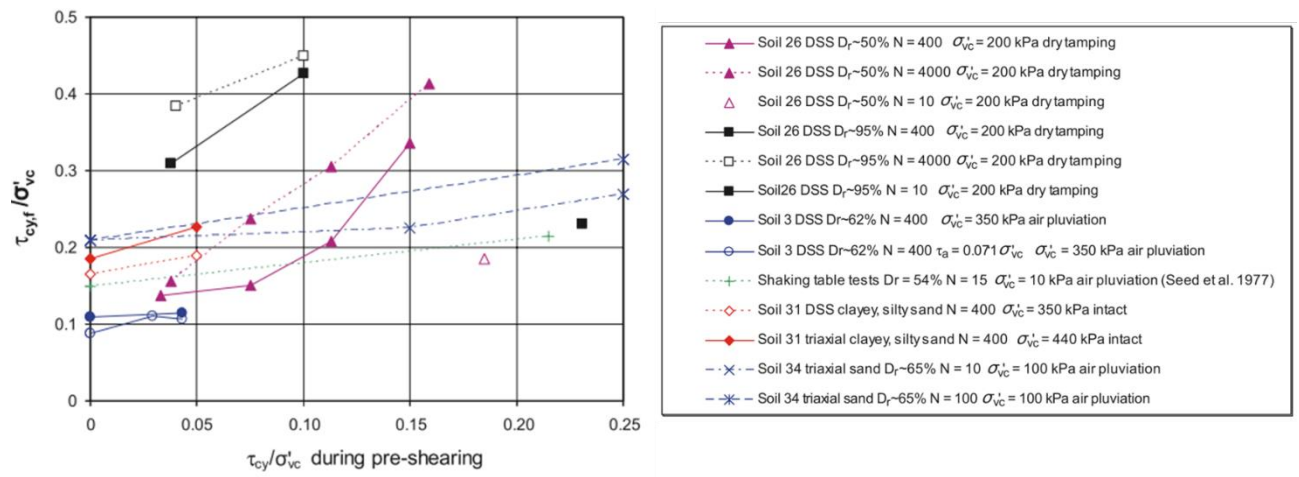


Figura 2-13: Efecto preshearing en esfuerzo de corte último (Andersen, 2009)

2.3.3 Diagramas de Contorno

Para graficar las combinaciones de los esfuerzos cíclicos de corte y medio que inducen la falla bajo un número dado de ciclos en un suelo, son propuestos los denominados diagramas de contorno (Andersen, 1988), los cuales buscan representar de forma normalizada los distintos escenarios posibles de falla cíclica en el suelo.

A diferencia de representar las combinaciones de cargas principales (equivalente a la carga media) con las cargas cíclicas, normalizadas por la capacidad estática a compresión que se encuentra sometida la fundación profunda, los diagramas de contorno buscan representar distintas cargas cíclicas y medias impuestas en laboratorio. El objetivo de los diagramas de contorno es permitir analizar el comportamiento del suelo, siendo utilizados en estudios de prefactibilidad.

La diferencia principal existente entre los diagramas de contorno y los diagramas de interacción es que estos últimos definen zonas en donde la combinación de cargas aplicadas genera distintos comportamientos en la fundación profunda. Mientras que de los diagramas de contorno permiten la interpolación de resultados y reduce el número de ensayos requeridos para establecer un completo marco del comportamiento cíclico del suelo.

Los diagramas de contorno son presentados en el plano de esfuerzo de corte cíclico versus esfuerzo de corte medio, siendo cada valor normalizado ya sea por la respuesta monótona no drenada del material o el esfuerzo vertical de consolidación, dependiendo del tipo de ensayo y/o material ensayado (para el primer caso es en arcillas, mientras que en el segundo es para arenas). Cabe destacar que los diagramas de contorno son realizados con datos obtenidos a partir de ensayos DSS o triaxial, siendo presentados en esta sección los resultados obtenidos en ensayo DSS. En general, los diagramas de contorno se utilizan para representar el comportamiento del material bajo cargas cíclicas de la siguiente manera:

A) Número de ciclos que conducen a la falla y el modo de falla (tipo 1).

Este tipo de diagramas presenta el número de ciclos para alcanzar un determinado valor de deformación angular (falla) en ensayos CDSS bajo condiciones de esfuerzo controlado en función del esfuerzo de corte cíclico y el esfuerzo de corte medio. El diagrama de la Figura 2-14, se encuentra realizado para arcillas normalmente consolidadas (Andersen,2015).

En la Figura 2-14.a, cada punto representa un ensayo realizado, ya sea triaxial o DSS. Los números escritos al lado de cada punto representan el número de ciclos a la falla (en negro) y el valor alcanzado de deformación angular, ya sea media (en azul) como cíclica (en rojo), tal como fue señalado en la Figura 2-9. Para este diagrama en específico, la falla es considerada al alcanzar un valor de deformación angular 15%, ya sea media o cíclica. Interpolando y extrapolando los resultados obtenidos, se definen curvas con las combinaciones de esfuerzo de corte medio y cíclico que causan la falla después de determinados números de ciclos, tal como se aprecia en la Figura 2-14.b, con el fin de una mejor visualización de los datos y posterior utilización.

A) Deformaciones angulares en función del esfuerzo de corte medio y cíclico para un número constante de ciclos (tipo 2).

A diferencia del caso anterior, este tipo de diagrama es graficado hasta un valor fijo de número de ciclos, como se muestra en la Figura 2-15.a. Cada punto representa un ensayo realizado, ya sea triaxial o DSS. Los números escritos al lado de cada punto representan el valor alcanzado de deformación angular, ya sea media (en azul) como cíclica (en rojo). Este diagrama se encuentra realizado para arcillas normalmente consolidadas (Andersen,2015). Con los valores graficados, es posible interpolar el diagrama (Figura 2-15.b), con el fin de conocer el comportamiento del suelo bajo una cierta cantidad de ciclos.

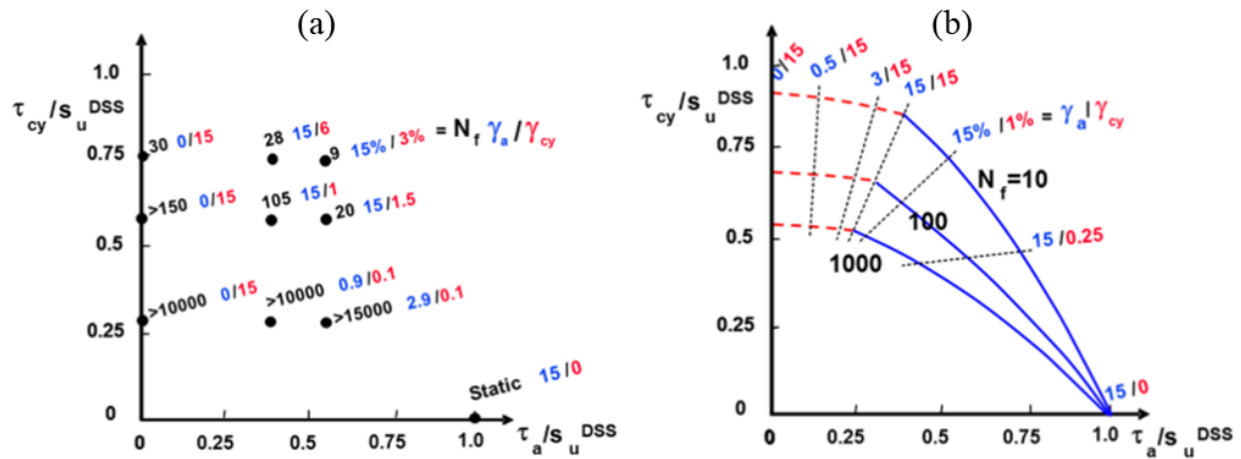


Figura 2-14: Diagrama de contorno tipo 1 a) Valores obtenidos de CDSS b) Valores interpolados (Andersen, 2015)

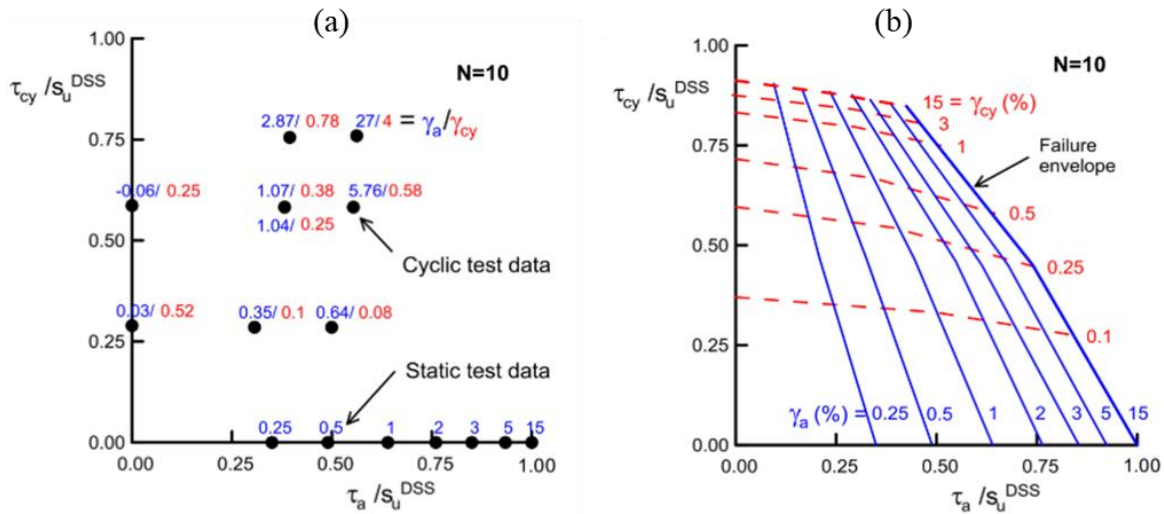


Figura 2-15: Diagrama de contorno tipo 2 a) Valores obtenidos de CDSS b) Valores interpolados (Andersen, 2015)

2.4 Respuesta monótona post ciclos

Hasta este punto, se ha señalado la importancia de los efectos en la respuesta cíclica del suelo. Sin embargo, fundaciones profundas se encuentran sometidas a cargas monótonas a lo largo de su vida útil (ej. Peso propio), la cual puede aumentar debido a necesidades operativas. Al igual que en cargas cíclicas el estudio de este fenómeno se realiza en función del comportamiento del suelo. Debido a los ciclos, existe evidencia de un reacomodo de partículas (Ishihara, 1982; Shahnazari et. Al., 2014) los cuales pueden o no provocar cambios en la respuesta monótona del suelo.

Porcino (Porcino et. Al 2009), realiza un estudio acerca de la influencia del preshearing cíclico en la posterior respuesta cíclica y monótona bajo comportamiento no drenado en arenas, utilizando equipo DSS y dos tipos de arena: arena carbonatada y de sílice de Ticino. Con respecto a la respuesta monótona posterior al preshearing las trayectorias de esfuerzos son similares entre las muestras vírgenes evaluadas y las que poseen un historial de esfuerzos cíclicos ya aplicados, tal como se observa en la Figura 2-16.

Dentro de este mismo estudio, (Porcino et. al, 2009), se plantea que, bajo pequeños preshearing aplicados previo a los ciclos (valor máximo de deformación angular cíclica igual a 1%), existe un comportamiento ‘strain-hardening’ durante la aplicación de la carga monótona, hasta que es alcanzada la línea de transformación de fase. Si el preshearing aplicado previo a los ciclos es considerado largo (máximo 3.75%), las diferencias son menos marcadas, alcanzando todos ellos la línea de estado crítico. Con respecto a las arenas densas, no existe mayor cambio en su comportamiento.

Noorzad y Shakeri (Noorzad y Shakeri, 2017), mediante ensayos aplicados a arenas con distintos contenidos de limos, en condiciones no drenadas en un equipo triaxial, establecen que la carga última a bajo contenido de finos, no cambia la resistencia en estado último del suelo.

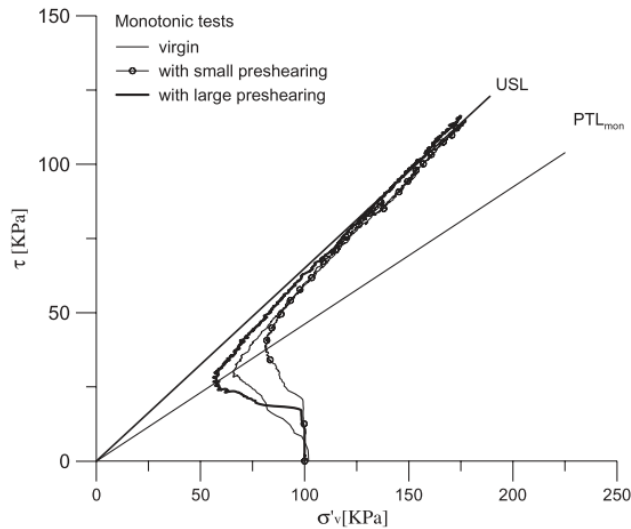


Figura 2-16: Efectos de la respuesta monótona debido a ciclos previos (Porcino et. al, 2009)

2.5 Equipo CDSS

Para el desarrollo de esta investigación, el equipo de corte simple CDSS (Cyclic direct simple shear) es utilizado, debido a las ventajas que presenta en cuanto a la representación del fenómeno a estudiar (Jardine et. al, 2005). Este equipo permite ensayar el suelo para investigar las relaciones de esfuerzos, deformaciones y fuerzas para distintas situaciones de carga horizontal: carga monótona y cíclica, propiedades esfuerzo-deformación-resistencia, condiciones drenadas y no drenadas, análisis del módulo de corte, ensayos de creep, programas de ensayos especiales. Es el ensayo que permite representar de manera adecuada el corte simple al que estará sometido el suelo.

El término corte simple hace referencia a un estado de deformación plana, en que el elemento se deforma solo en una dirección. Para visualizar esto, en la Figura 2-17 se presenta un ejemplo de representación en donde se encuentran los elementos de una columna de suelo en estado en reposo (Figura 2-17.a). Al ser aplicada una carga cíclica (en este caso una onda de corte), el suelo se desplaza lateralmente a lo largo de toda la columna (Figura 2-17.b).

Tal como lo detalla (Le, 2016), existen distintas variaciones existentes en cuanto a los aparatos DSS actualmente utilizados. Todos los aparatos de corte simple buscar aplicar una fuerza horizontal al elemento de suelo estudiado. Este sistema permite mantener un esfuerzo vertical total constante sobre la probeta mientras una carga horizontal (monótona o cíclica) es aplicada. Las fuerzas aplicadas y los desplazamientos son medidos. Dependiendo de la

condición del ensayo, es posible, medir el desplazamiento vertical de la probeta, mediante un LDVT instalado al aparato DSS.

Dependiendo del sistema de confinamiento utilizado para generar la condición de volumen lateral constante en la probeta, se reconocen tres tipos de equipos DSS:

- SGI: desarrollado por el Instituto Geotécnico Sueco (Swedish Geotechnical Institute) en 1936 y descrito en 1951 por Kjellman (Kjellman, 1951). En este equipo se utiliza una membrana de goma y un set de anillos de aluminio alrededor de la probeta para mantenerla unida, como es observado en la Figura 2-18.
- NGI: desarrollado en los años 60 (Bjerrum & Landva, 1967), utiliza una membrana de goma reforzada con alambre alrededor de la probeta. En la Figura 2-19 se observa el equipamiento correspondiente.
- Cambridge Device: desarrollado por investigadores de la universidad de Cambridge en los 50 (Roscoe, 1953), utiliza placas montadas con bisagras para impartir una carga uniforme a través de la muestra, tal como se muestra en la Figura 2-20.

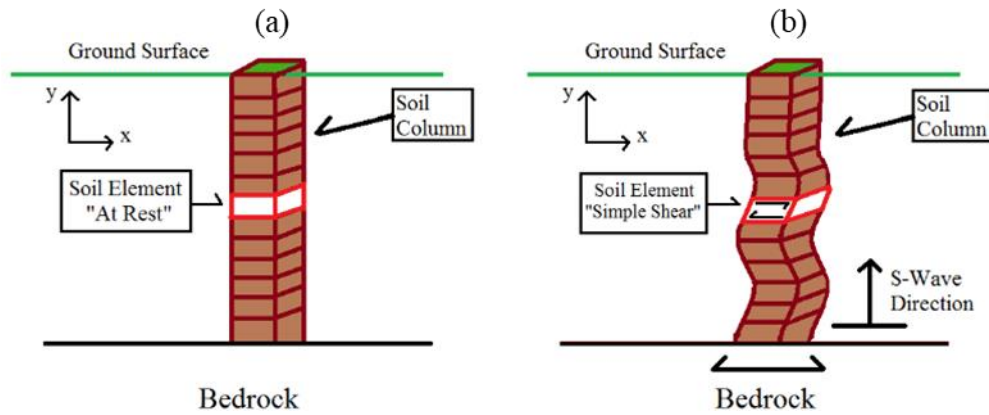


Figura 2-17: Ejemplo deformación plana a) Antes del sismo b) Después del sismo (Le, 2016)

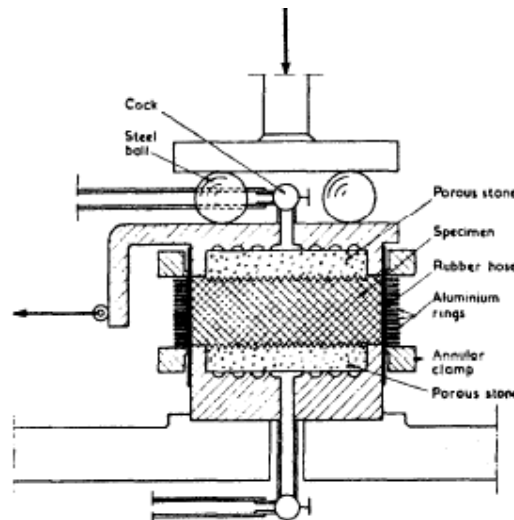


Figura 2-18: Aparato SGI (Kjellman, 1951)

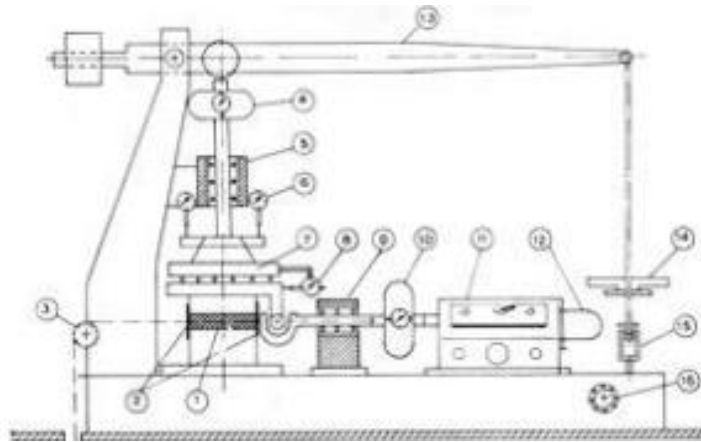


Figura 2-19: Aparato NGI (Bjerrum & Landva, 1967)

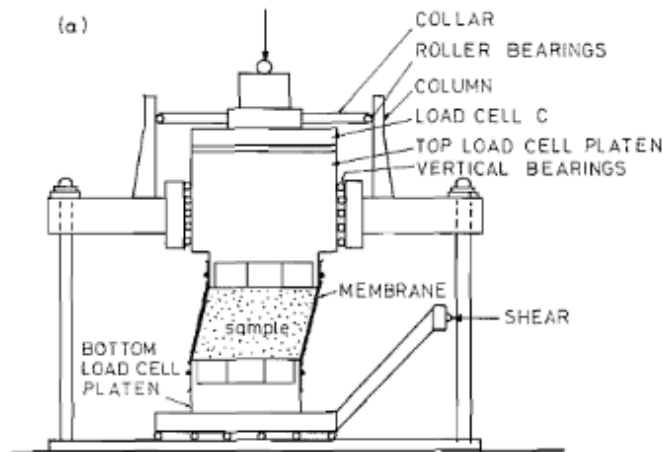


Figura 2-20: Cambridge device (Roscoe, 1953)

Con el paso de los años, distintas modificaciones se han realizado a los aparatos DSS mencionados anteriormente, con el fin de controlar más los parámetros de ensayo (presión de poros, aplicación de corte en distintas direcciones, medición de saturación, etc.), y cambios respecto al sistema de confinamiento utilizado. Con respecto a la presión de poros, existen sensores capaces de medir la variación de ésta durante la aplicación del ensayo, sin embargo, como buena aproximación se puede establecer que, en el caso de ensayos realizados a volumen constante (no drenados) en condiciones saturadas, la variación de esfuerzo vertical corresponde a la presión de poros generada en la muestra (Bjerrum y Landva, 1967). Actualmente, todos los equipos utilizados poseen como base uno de estos tres sistemas.

2.5.1 Etapas de un ensayo DSS o CDSS

Para la realización de ensayos en el equipo DSS, independiente el método de confinamiento descrito en la sección anterior, se deben seguir las siguientes etapas:

- Preparación de la muestra: Con respecto al origen de la muestra a ensayar, puede ser remoldeada o inalterada. Para las muestras remoldeadas, son definidas la humedad y la densidad de preparación de probeta. Con respecto al sistema de confinamiento, presenta paredes rígidas en la parte superior e inferior

de la probeta, mientras que en sus costados paredes flexibles, con el fin de simular la condición estática o de reposo.

- Consolidación: La muestra se somete a un esfuerzo vertical, el cual se aplica en etapas sucesivas hasta alcanzar el esfuerzo vertical final deseado. Se define que se ha alcanzado la consolidación primaria cuando la muestra, en la última etapa de esfuerzo vertical aplicado ha dejado de experimentar deformación volumétrica en un intervalo de tiempo determinado. La deformación volumétrica se asocia a cambios en la deformación vertical, debido a la restricción existente en la componente horizontal.
- Corte: se aplica una carga horizontal, controlando el desplazamiento basal. Esta carga puede ser monótona (desplazamiento basal constante hasta un valor dado de desplazamiento angular) o cíclica (aplicación de ciclos sinusoidales de amplitud definida, controlados por desplazamiento o esfuerzo). Con respecto a la condición de variables en la componente vertical de la muestra, se enlazan las variables de deformación y esfuerzo verticales. Se simula la condición de presión constante o drenaje, cuando la componente de deformación vertical no se encuentra restringida, mientras que la componente de esfuerzo vertical se mantiene constante. Se simula la condición de volumen constante o no drenaje, cuando la componente de deformación vertical se encuentra restringida, mientras que la componente de esfuerzo vertical se encuentra libre.

Con respecto a la relación existente entre la altura y el diámetro de la muestra, en equipos NGI, independiente del tipo de refuerzo de membrana utilizado, no se observa influencia significativa en el esfuerzo estático medido, (Vucetic y Lacasse, 1982). Por otro lado, mientras menor es la relación entre altura y diámetro de la probeta, mejor uniformidad en la distribución de esfuerzos es obtenida en la muestra (Shen, 1978), por lo que actualmente ASTM define que esta relación entre altura y diámetro no debe exceder 0.4.

3 Estudio experimental

En la presente investigación se ejecutó un extenso trabajo de pruebas experimentales con el objetivo de evaluar el efecto de esfuerzos de corte cíclicos simétricos y asimétricos de larga duración en la respuesta de un suelo granular seco utilizando un equipo de corte simple cíclico. Los ensayos han sido definidos con el fin de presentar un rango de valores que permitan identificar y cuantificar el efecto de variables que puedan afectar significativamente su comportamiento. Para el análisis del comportamiento monótono se analizan variables tales como: esfuerzo vertical de consolidación, condiciones de borde (presión vertical y volumen constante), mientras que para el análisis del comportamiento cíclico se analizan variables tales como: esfuerzo de corte cíclico y esfuerzo de corte medio.

En el presente capítulo se presenta una caracterización del material utilizado, descripción del equipo CDSS utilizado, preparación de las muestras evaluadas y el programa experimental, con el plan de trabajo y la metodología propuesta.

3.1 Material utilizado

En los ensayos se utilizó la arena Ottawa, conocida comercialmente como HM-106 (Global Gilson) y de características equivalentes a la F-35. Esta arena es utilizada como arena normada para realizar los ensayos de obtención de la densidad por medio del ensayo de cono. Sin embargo, existe mayor base técnica acerca de la arena Ottawa F-65 (Dakoulas y Sun, 1992; Ziotopoulou et. al., 2018; ElGhoraiby et. al, 2020), en donde existen amplios estudios acerca de la conductividad hidráulica, propiedades de resistencia monótona, cíclica y post cíclica del material (Parra, 2016), a diferencia de la arena F-35.

En la Tabla 3-1 se comparan los valores de la arena F-35 y F65. Dado que son la misma arena Ottawa, sus componentes químicas son idénticas, observados en la Tabla 3-2, en donde se observa que el material está compuesto en su gran mayoría de sílice, siendo una arena limpia, uniforme, no cementada, inodora y con una dureza de 7 en la escala de Mohs. Sin embargo, a pesar de que existe diferencia en cuanto al valor d_{50} , con respecto a la variación de los límites de relación de vacíos, esta es menor, por lo que se considera para efectos de estudio la base técnica estudiada es válida para el material ensayado.

Tabla 3-1: Diferencia entre arena F35 y F65

Material	Gs	D ₅₀ [mm]	e _{min} [-]	e _{max} [-]	Referencia
F-35	2.650	0.36	0.570	0.763	(Alshibli et. al, 2015)
F-65	2.65	0.19	0.51	0.83	(Parra, 2016)

Tabla 3-2: Componentes arena de Ottawa ensayada (Información entregada por fabricante)

Componente	Porcentaje	Componente	Porcentaje
Óxido de silicio (Cuarzo)	98.7-99.9	Óxido de hierro	<0.1
Óxido de aluminio	<1.1	Óxido de titanio	<0.1

Como parte del programa experimental, se realizaron los ensayos de densidad mínima y máxima en dependencias del laboratorio de ensaye de materiales (LEMCO) en la Universidad Técnica Federico Santa María. La granulometría del material fue entregada por la empresa que comercializa el producto (Global Gilson), mientras que la gravedad específica del material se obtuvo a partir de lo descrito en literatura (Parra, 2016).

La Figura 3-1 presenta la distribución granulométrica del material ensayado, el cual es complementado con lo señalado en la Tabla 3-3. Según clasificación USCS, el material clasifica como SP. El valor de la densidad mínima y máxima compactada seca se calculó mediante las normas ASTM D4254 (ASTM, 2006) y ASTM D4253 (ASTM, 2013). Para la obtención de la densidad mínima, se realizaron 5 ensayos distintos, los cuales dieron un promedio de 1.554 [g/cm³] (relación de vacíos máxima de 0.705 [-]). En el caso de la densidad máxima, se realizaron 3 ensayos distintos, los cuales dieron un promedio de 1.759 [g/cm³] (relación de vacíos mínima de 0.506 [-]). Con respecto a la gravedad de sólidos, se utilizó el valor obtenido señalado en literatura de 2.65 [-] (Parra, 2016).

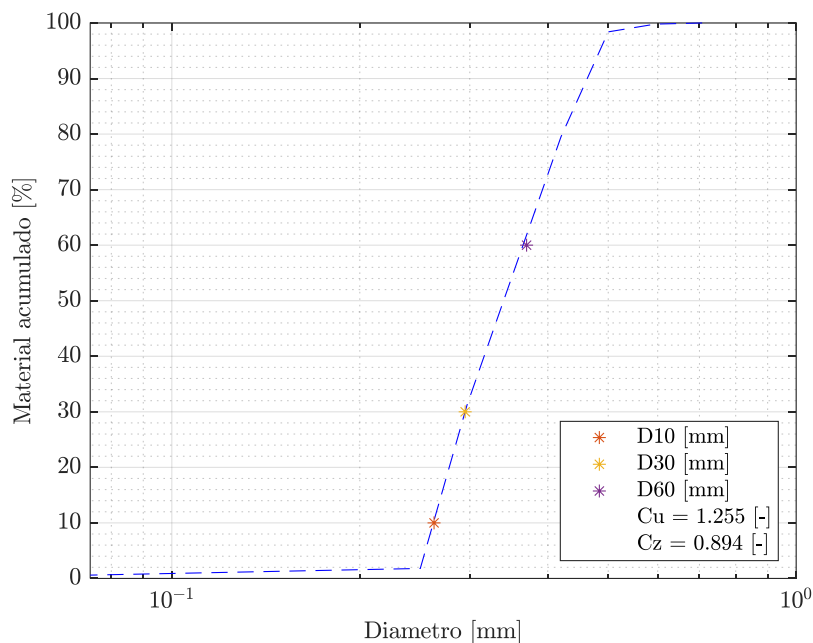


Figura 3-1: Granulometría arena Ottawa

Tabla 3-3: Granulometría Ottawa Sand (Información entregada por la empresa)

US sieve	mm	% Retenido	% Acumulado	Propiedades	
25	0.707	0.2	100	d50	0.345
30	0.595	1.4	99.8	d60	0.37
35	0.5	18.9	98.4	d30	0.295
40	0.42	48.3	79.5	d10	0.263
50	0.297	29.4	31.2	Cu	1.255
60	0.25	1.2	1.8	Cz	0.894
Bandeja	0.074	0.6	0.6		

3.2 CDSS-USM

El equipo CDSS que se utilizó en la investigación corresponde a un modelo NGI modificado fabricado por la compañía alemana Willie Geotechnik, el cual es presentado en la Figura 3-2. A diferencia de la utilización de una

membrana reforzada, el equipo utiliza apilados de anillos (Stacked Rings), lo cual garantiza tener el área transversal constante durante todo el ensayo. Las opciones de ensayo incorporadas por defecto del equipo son:

- Consolidación: Permite aplicar una carga vertical a una velocidad constante hasta que alcanza el valor de esfuerzo vertical deseado.
- Altura constante: Permite establecer constante la altura de la probeta, con el fin de permitir la variación del esfuerzo vertical a partir de un esfuerzo inicial fijado previamente.
- Corte monótono a esfuerzo o presión vertical constante: No permite el cambio de esfuerzo vertical, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante en la base el cual puede ser controlado por deformación o esfuerzo. Útil para recrear condiciones drenadas.
- Corte monótono a volumen constante: Se impone una altura constante a la probeta aplicando un desplazamiento a velocidad constante en la base el cual puede ser controlado por deformación o esfuerzo. Corte cíclico: Permite aplicar ciclos de corte con amplitud definida por el usuario, los cuales pueden ser controlados mediante fuerza o desplazamiento. Por defecto, el equipo en esta configuración mantiene la altura de la probeta constante, útil para recrear condiciones no drenadas.

3.3 Preparación de la muestra

Las muestras se prepararon a una densidad seca de 1.692 [g/cm³], equivalente a una densidad relativa del 70%, lo anterior con la finalidad de alcanzar una compactación medianamente densa a media y ser consistente con lo visto en literatura (Jardine y Standing, 2012; Tsuha et. al., 2012). Para lograr esto, se aplica el material en 5 capas de 31.32 [g] (llegando a una masa total de 156.617 [g]), compactando cada capa hasta que llegue a la altura deseada, luego se escarifica y se vuelve a colocar la capa siguiente. La probeta por ensayar en su estado final tiene una altura de 23 [mm] y un diámetro de 7.158 [cm]). El sistema de confinamiento de la muestra consiste en una membrana de látex de 0.3 [cm] de espesor y 25 anillos de acero.

En la Figura 3-3, se observa en detalle de la preparación de la probeta. En la Figura 3-3.a, se muestra la membrana y los anillos utilizados, luego en Figura 3-3.b se observa el sistema ya montado, aplicando la succión en la membrana de 10 [kPa] (el cual permite que se adhiera la membrana al sistema de anillos) y con el material que se aplica, luego en Figura 3-3.c se muestra la cantidad de material aplicado en cada una de las 5 capas, para finalizar con la Figura 3-3.d, en donde se encuentra ya aplicado todo el material y escarificado en su superficie, posterior a la compactación realizada con el mazo y el pistón.

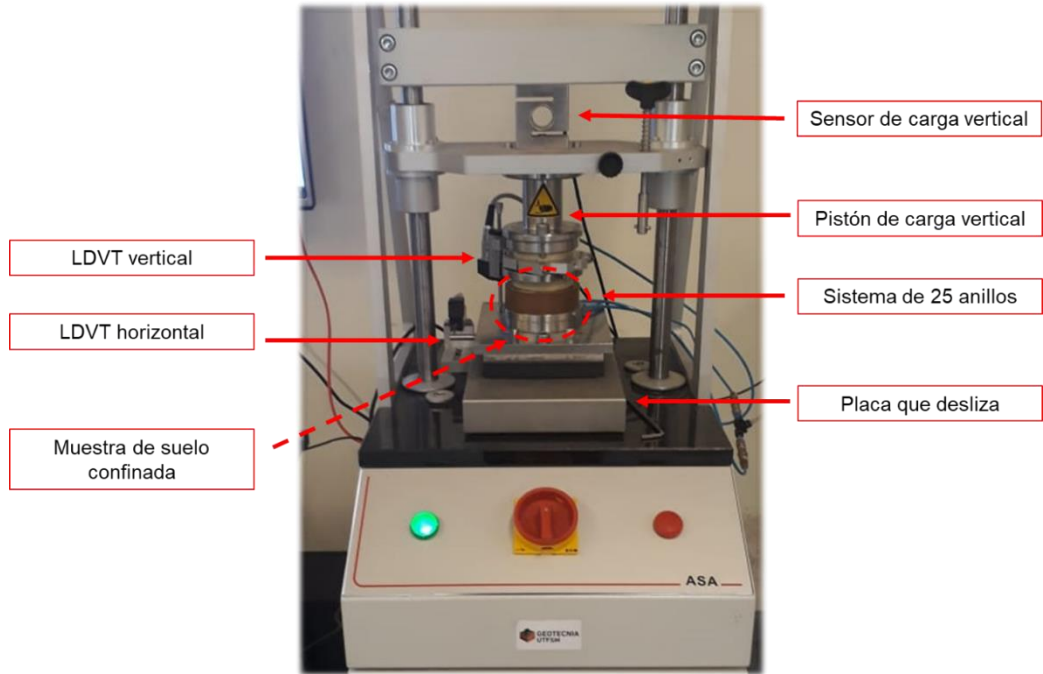


Figura 3-2: Equipo DSS Utilizado

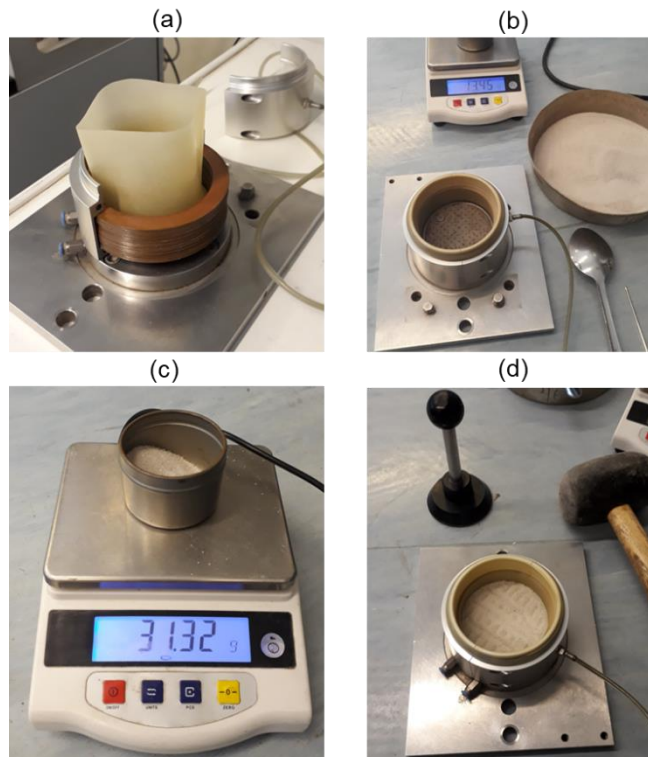


Figura 3-3: Proceso de preparación de probeta a ensayar: a) Montaje inicial, b) Succión aplicada, c) Cantidad de masa por capa aplicada, d) Probeta escarificada

3.4 Programa experimental

Se ha diseñado y ejecutado una campaña experimental compuesta por un conjunto ensayos monótonos, cíclicos y monótonos post cíclicos en equipo CDSS. Estas pruebas tienen por objetivo evaluar y analizar las variables relevantes que controlan las respuestas monótonas y cíclicas observadas en el suelo granular denso en estado seco descrito en la sección 3.1. A continuación, se describe el programa experimental y se indica el propósito de cada conjunto de pruebas.

- Ensayos monótonos (6 ensayos): realizados mediante control de deformaciones y bajo condiciones tanto de presión vertical como a volumen constante. Permiten tener un marco de valores para comparar los resultados de los ensayos monótonos post cíclicos realizados.
- Ensayos cíclicos (16 ensayos): realizados mediante control de esfuerzos y bajo condiciones de volumen constante. En base a los resultados de número de ciclos, variación de esfuerzo vertical, esfuerzo de corte, deformación angular, son obtenidos las diferentes componentes de deformaciones angulares (cíclico, acumulado, permanente), comportamiento del módulo de corte, CSR y trayectorias de esfuerzo para cada uno de los ensayos realizados. Además, comparaciones realizadas entre ensayos permiten agrupar aquellos que poseen similares comportamientos, con el fin de generar un diagrama de contorno para el suelo en estudio.
- Ensayos monótonos post ciclos (12 ensayos): realizados mediante control de deformaciones y bajo condiciones tanto de presión vertical como a volumen constante. En función de la magnitud de esfuerzo de corte cíclico aplicado y existencia de reconsolidación, son comparados los comportamientos de esfuerzo de corte, trayectoria de tensiones y variación de esfuerzo vertical en función de la deformación angular de los ensayos monótonos post ciclos con los resultados de los ensayos monótonos en donde no fue aplicada una etapa de ciclos previa.

Las Tabla 4-1, Tabla 5-1 y Tabla 6-1 presentan un resumen de los ensayos realizados en el equipo CDSS, para los ensayos monótonos, ensayos cíclicos y ensayos monótonos post cíclicos respectivamente.

4 Resultados: Ensayos monótonos

4.1 Introducción

Es realizada una etapa de 6 ensayos monótonos descritos en la Tabla 4-1. Los ensayos monótonos, realizados todos a una densidad relativa de 70%, constan de una primera etapa en donde es aplicado un esfuerzo de consolidación inicial (σ_c), posterior a ello, es aplicada una tasa de deformación horizontal constante de 0.1 [mm/min], la cual es aplicada hasta alcanzar un máximo de $\delta_{\text{máx}} = 7.5$ [mm] o que exista una tendencia clara con respecto al comportamiento del esfuerzo de corte la cual es observada durante la aplicación de la deformación horizontal, lo que ocurra primero. Estos ensayos son realizados bajo condiciones de presión o esfuerzo vertical constante (PC) como a volumen constante (VC).

Tabla 4-1: Ensayos monótonos realizados

ID	Dr [%]	σ_c [kPa]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	γ_{max} [%]	e inicial [-]	e post conso [-]	e post corte [-]
100 (PC)	70	100	7	29.93	0.566	0.555	0.597
300 (PC)	70	300	7.5	32.09	0.566	0.533	0.562
500 (PC)	70	500	7.5	31.68	0.566	0.544	0.578
100 (VC)	70	100	6.54	27.73	0.566	0.552	0.552
300 (VC)	70	300	5.26	22.21	0.566	0.547	0.547
500 (VC)	70	500	4.76	20.20	0.566	0.535	0.535

Los ensayos se ejecutaron a una deformación angular constante aplicada mediante una deformación horizontal a una velocidad de 0.1 [mm/min], la cual se obtuvo a partir de referencia de ensayos en arena de sílice (Porcino et. al, 2009). No es considerado el valor que plantea ASTM D6528 (ASTM, 2000), el cual corresponde a una velocidad horizontal de 0.0192 [mm/min] (asociado a un 5% de deformación angular por hora), debido a que es para muestras de suelos cohesivos en condiciones no drenadas, por lo tanto, no aplica en este caso.

4.2 Consolidación

La etapa inicial de consolidación se aplica por etapas, a partir de un esfuerzo inicial de 12.5 [kPa]. Tras lograr la estabilización del valor de la altura de la probeta, se continua con el proceso aumentando de forma secuencial hasta alcanzar el esfuerzo vertical objetivo con valores de consolidación deseados para cada uno de los ensayos 100, 300 o 500 [kPa]. Para ejemplificar, en la Figura 4-1 se presenta la aplicación del esfuerzo vertical de consolidación en el tiempo para el caso en que es alcanzado 500 [kPa] de esfuerzo vertical de consolidación. Cabe mencionar que los esfuerzos verticales alcanzados en esta etapa no generan rotura de partículas (Okada et. al, 2004; Hyodo et. al, 2017).

En la Figura 4-2 se grafica el comportamiento de la relación de vacíos en la etapa de consolidación de las muestras a las que posteriormente se aplica el esfuerzo de corte bajo condiciones de presión (esfuerzo vertical) y volumen constante. Es observado que todos los ensayos presentan un comportamiento dentro de una banda definida.

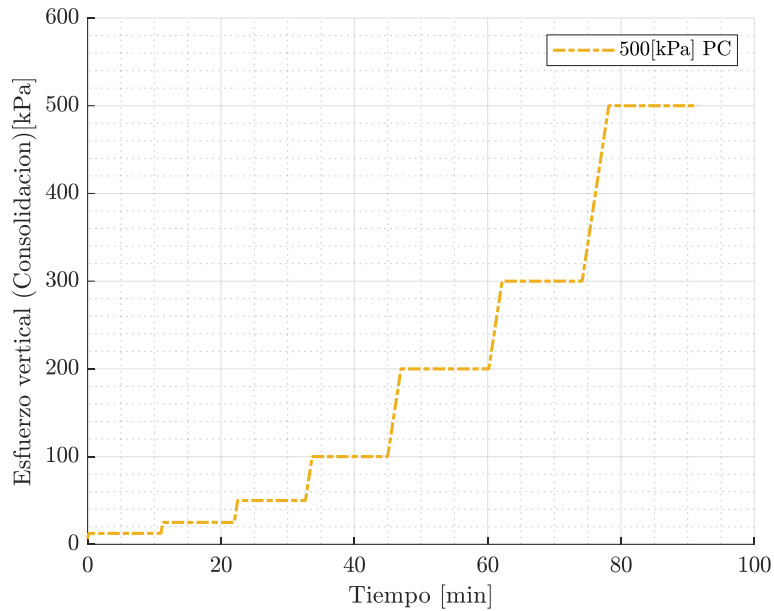


Figura 4-1: Aplicación esfuerzo vertical de consolidación en el tiempo

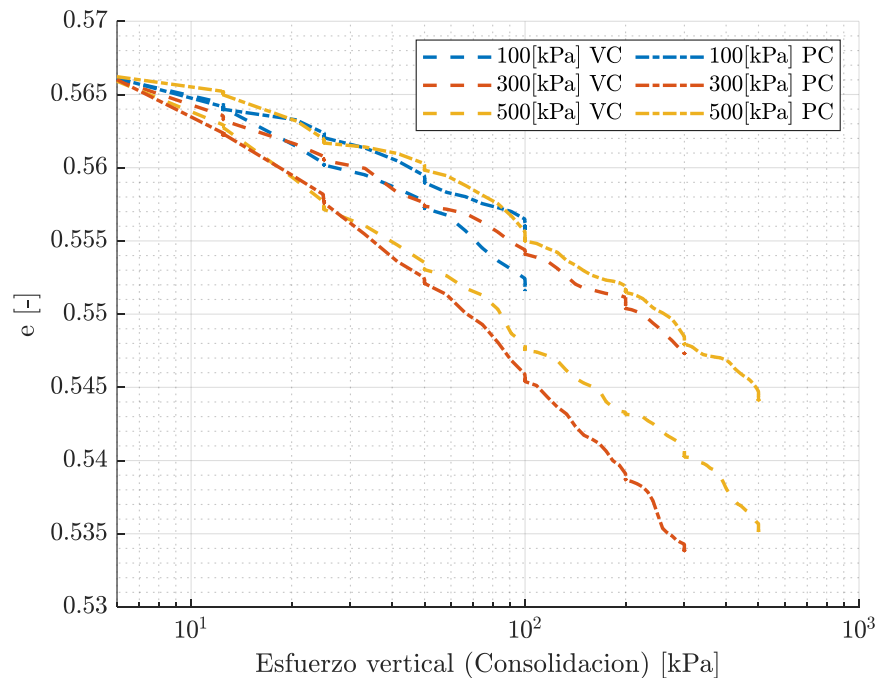


Figura 4-2: Relación de vacíos versus esfuerzo efectivo previo corte para ensayos de DSS monótonos bajo desplazamiento vertical nulo (VC) y bajo condiciones de presión constante (PC)

4.3 Ensayos presión o esfuerzo vertical constante (PC)

Se realizaron un total de 3 ensayos, presentados con la sigla PC en la Tabla 4-1. Posterior a la etapa de consolidación, inicia la etapa de corte de la probeta. Durante esta etapa, se mantiene la aplicación de un esfuerzo vertical constante

igual al del esfuerzo de consolidación, permitiendo la deformación volumétrica, representada como un cambio de altura en la probeta, dadas las características de confinamiento radial del equipo.

4.3.1 Esfuerzo de Corte versus Deformación Angular

En la Figura 4-3, se presenta el valor del esfuerzo de corte versus deformación angular para distintos grados de confinamiento vertical. Se observa que, para cada muestra, independiente del esfuerzo vertical de consolidación al que estén sometidos, siguen una misma tendencia. Con respecto a la diferencia entre el valor de esfuerzo de corte máximo y residual, es mayor a medida que aumenta el esfuerzo vertical de consolidación aplicado, lo cual es consistente con lo obtenido en ensayos monótonos con arena de sílice de similares características en otros estudios (Brandes, 2011; Blaker y Andersen, 2015; Bhaumik, 2018; Park y Manzanari, 2020).

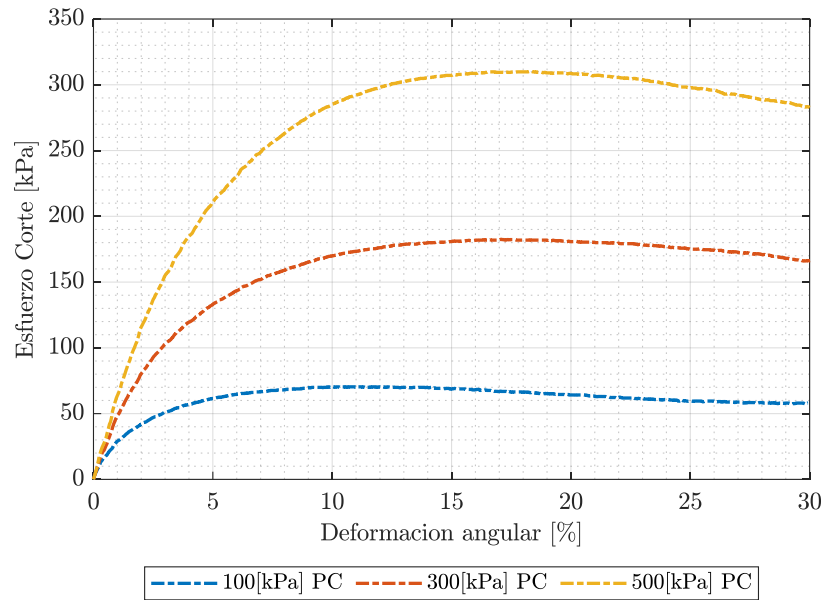


Figura 4-3: Esfuerzo de corte vs deformación angular ensayos monótonos a presión constante

En la Figura 4-4, se comparan los resultados obtenidos con estudios de literatura: para una arena de Ottawa 40/70, con $d_{50} = 0.29$ [mm] bajo una consolidación de 100 [kPa] (Bhaumik, 2018), para una arena densa de cuarzo que tuvo una consolidación hasta 200 [kPa] (Blaker, 2015) y para una arena de Ottawa con $d_{50} = 0.40$ [mm] bajo una consolidación de 500 [kPa] (Doygun, 2019).

Es observado que el ensayo a 100 [kPa] presenta tendencias similares a lo visto en literatura, con valores levemente menores (Bhaumik, 2018). Sin embargo, para el caso de valor de 200 [kPa] (Blaker, 2015) se observa que, en una etapa inicial, a pequeñas deformaciones, presenta mayor rigidez que las obtenidas en este estudio, esto puede ser debido a que este ensayo fue sometido a pre-cycling. Por otra parte, para el caso a 500 [kPa], en una etapa inicial a pequeñas deformaciones también la literatura (Doygun, 2019) presenta valores de mayor rigidez a diferencia de los resultados de este estudio, alcanzando valores similares a una deformación angular de 15[%]. La falta de un peak marcado de esfuerzo de corte, puede deberse a que el confinamiento lateral entregado sea pequeño en comparación

al esfuerzo normal aplicado (Lee, 1965), sin embargo, los valores finales de esfuerzo de corte a 15 [%] de deformación angular son similares a lo visto en literatura para todas las muestras.

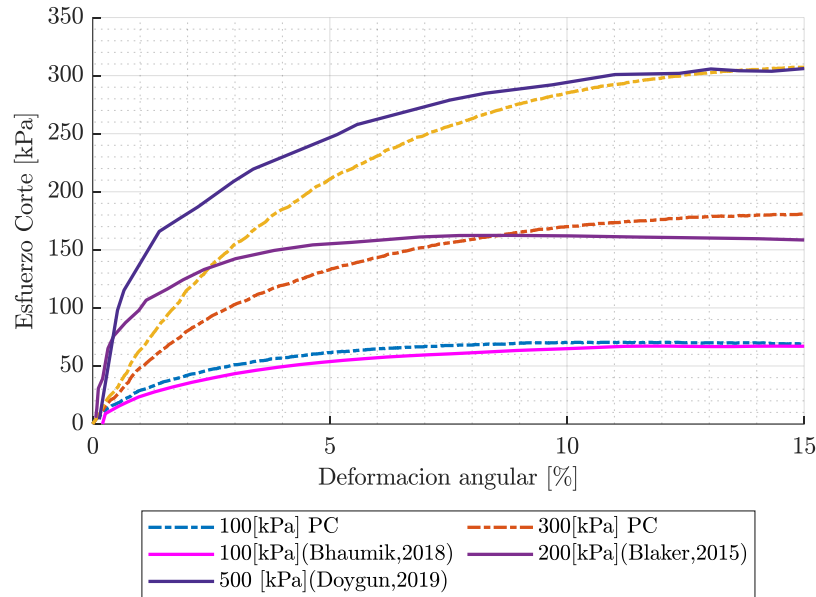


Figura 4-4: Comparación resultados con literatura (Blaker, 2015; Bhaumik,2018; Doygun, 2019)

4.3.2 Desplazamiento vertical versus deformación Angular

En la Figura 4-5 que presenta el desplazamiento vertical en función de la deformación angular, observándose un comportamiento propio de suelo denso-medio, el cual presenta una etapa inicial de contracción (que corresponde a los valores negativos de la Figura 4-5) para luego presentar comportamiento dilatante (que corresponde a valores positivos en la Figura 4-5). Existe diferencias en cuanto a los valores de deformación angular en el cual corresponde esta máxima contracción y el cambio de comportamiento de contractivo a dilatante, siendo de un 2% para el caso de 100 [kPa] y de 5% para los casos de 300 [kPa] y 500 [kPa].

Posterior a este punto, todos los ensayos presentan comportamiento dilatante a una misma razón de crecimiento, en el cual el ensayo a 100 [kPa] llega a un valor constante, mientras que en los ensayos tanto a 300 [kPa] como a 500 [kPa] no logran alcanzar un valor constante; por lo cual se establece que los 30% de deformación angular aplicados en estos ensayos no permiten establecer un correcto valor residual. Los resultados obtenidos son complementados con los valores de relación de vacíos alcanzados en las etapas de post consolidación y post corte, descritos en la Tabla 4-1, en donde se observa que la probeta a 100 [kPa] alcanza menor relación de vacíos en la etapa de consolidación, sin embargo, alcanza valores más elevados de relación de vacíos en la etapa final de aplicación de esfuerzo de corte.

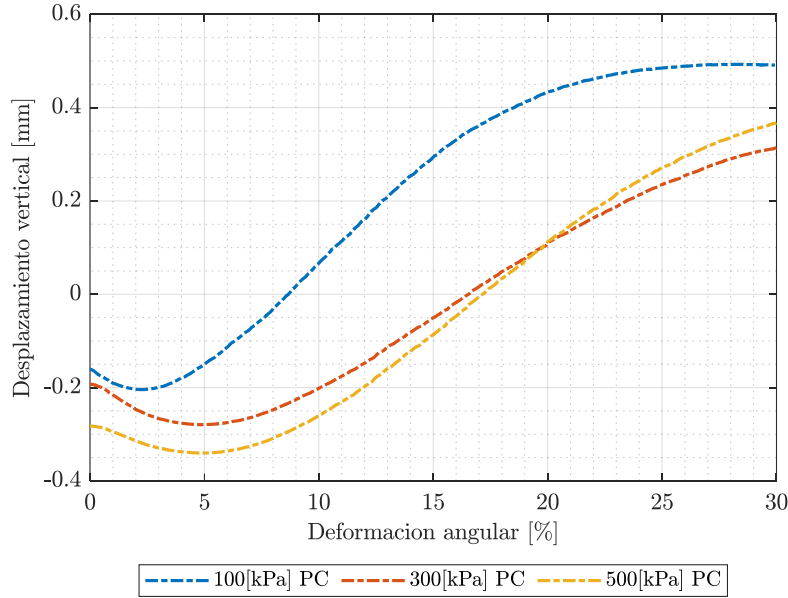


Figura 4-5: Deformación volumétrica vs Deformación angular post Corte

Comparando resultados con literatura (Doygun, 2019), en la Figura 4-6, para ensayos realizados a un esfuerzo de consolidación de 500 [kPa], se observa que presentan la misma tendencia (primero una etapa de contracción inicial para luego dilatar), sin embargo, es de menor magnitud esta diferencia, esto puede deberse a la diferencia granulométrica y de equipo utilizado.

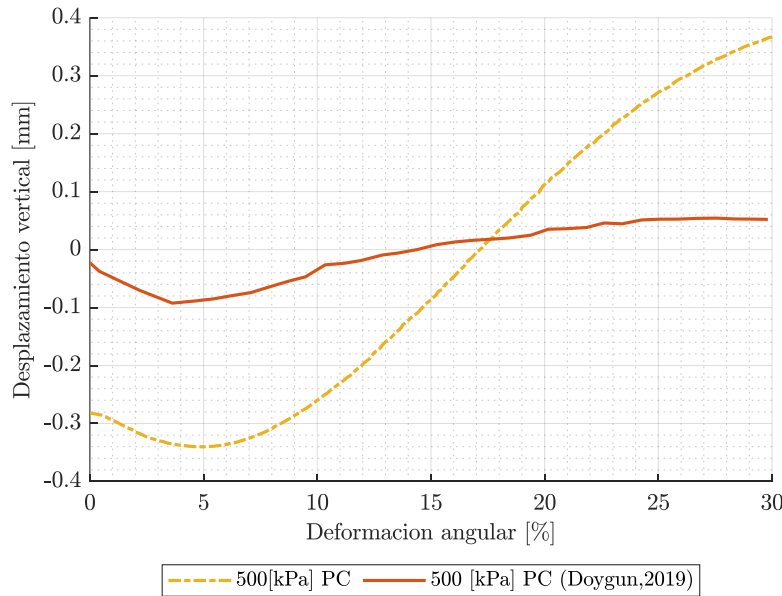


Figura 4-6: Comparación desplazamiento vertical vs deformación angular post corte (Doygun, 2019)

4.3.3 Esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical

En la Tabla 4-2 son presentados los valores de esfuerzo de corte máximo, valor de esfuerzo de corte a un valor de deformación angular al 30% y el porcentaje de variación entre el valor máximo y el residual, con sus

correspondientes componentes de cohesión y ángulo de fricción asociados; además es calculado el valor de ángulo de fricción considerando fricción nula. Se observa que a medida que aumenta el esfuerzo de consolidación aplicado, es menor la variación existente entre el esfuerzo de corte máximo y residual, lo cual es concordante con lo observado en la Figura 4-7.

Tabla 4-2: Valores de Esfuerzo cortante y deformación angular

ID	Esfuerzo de corte máximo [kPa]	Esfuerzo de corte residual a una deformación angular de 30% [kPa]	%entre valor máximo y residual [%]
100 [kPa] (PC)	70.4	58.0	21.4
300 [kPa] (PC)	182.7	166.1	9.9
500 [kPa] (PC)	310.2	282.6	9.9
Cohesion [kPa]	7.8	0.51	-
Φ [°]	30.9	29.31	-
Φ [°] (considerando cohesion nula)	31.5	29.37	-

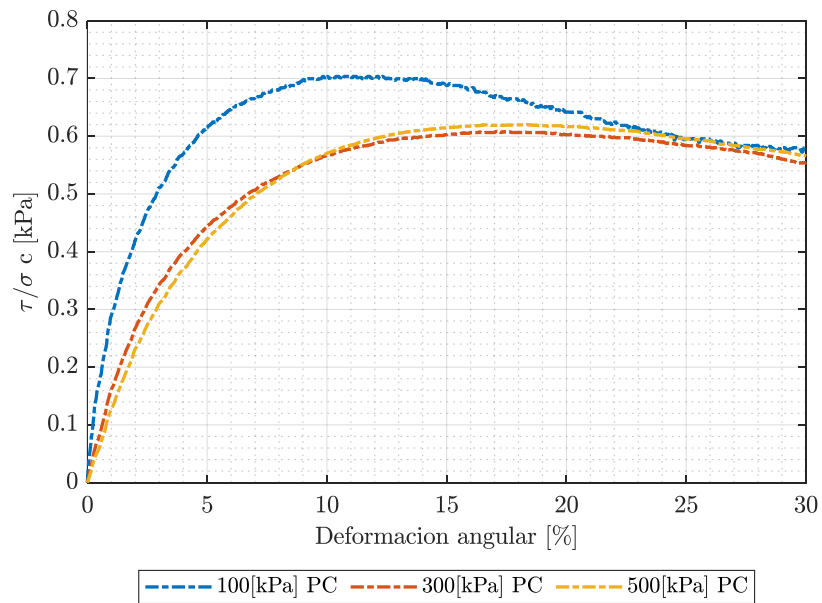


Figura 4-7: Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical de consolidación versus deformación angular

Para comparar los resultados de estos valores en literatura, se utiliza un valor de deformación angular de 15%, ya que es un valor al cual todos los ensayos revisados alcanzan valores razonables (Bhaumik, 2018; Doygun, 2019). A partir de la Figura 4-8, se observa que, independiente del esfuerzo vertical de consolidación a lo que se encuentren sometidos, todos los ensayos siguen una misma pendiente relacionada con el comportamiento del esfuerzo de corte en función del esfuerzo vertical a una deformación angular dada.

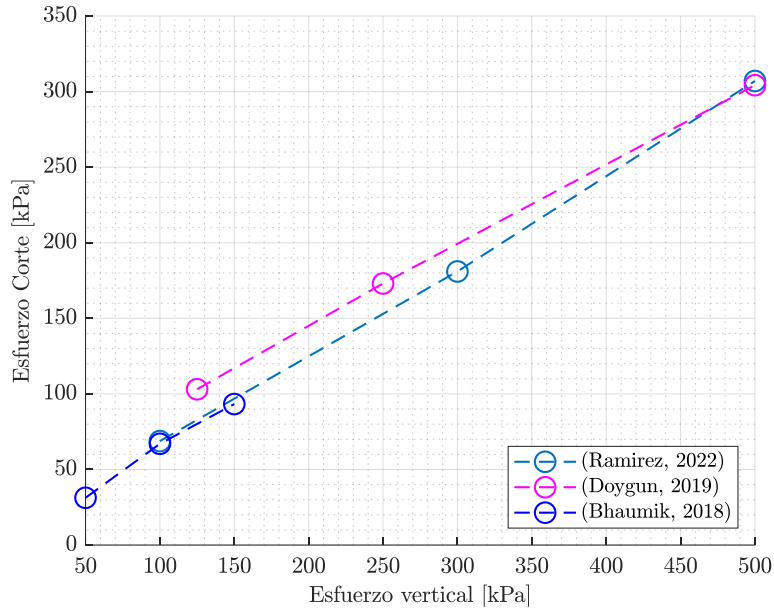


Figura 4-8: Esfuerzo de corte vs esfuerzo vertical

4.4 Ensayos a volumen constante (VC)

Se realizó una serie de 3 ensayos: a esfuerzo de consolidación de 100, 300 y 500 [kPa], siguiendo el proceso indicado en la sección 3.3. Los parámetros de los ensayos se encuentran en la Tabla 4-1 con la sigla VC. Durante la aplicación de la etapa de corte, se mantiene el volumen constante en todo momento, es decir, la altura de la probeta se fija en el valor alcanzado durante la consolidación.

4.4.1 Variación de esfuerzo vertical versus deformación angular

En la Figura 4-9 se observa el comportamiento de la variación del esfuerzo vertical en la muestra (Figura 4-9.a) y su correspondiente valor normalizado (Figura 4-9.b). Dado que los ensayos se realizaron en un material seco, la variación observada en el esfuerzo vertical se relaciona con el bloqueo existente de la dilatancia, producto del reordenamiento de los granos durante la etapa de corte.

Con respecto a la Figura 4-9.a, la probeta consolidada a 100 [kPa] presenta una disminución de aprox. 14 [kPa] en su esfuerzo vertical alcanzado a una deformación angular de 2 [%]. A medida que la deformación angular aumenta, los esfuerzos verticales alcanzan valores sobre los 500 [kPa]. En el caso de la probeta consolidada a 300 [kPa], disminuye a un valor de -76 [kPa] a una deformación angular de 3 [%] y luego incrementa a la misma proporción que la probeta anterior hasta alcanzar valores de 576 [kPa] (similar al obtenido a 100 [kPa]). Finalmente, para el caso de la probeta consolidada hasta 500 [kPa], la disminución de esfuerzo vertical alcanza un valor mínimo de 125 [kPa] a una deformación angular de 4 [%], el cual comienza a incrementar hasta un valor de 486 [kPa].

Según la Figura 4-9.b se observa la variación de esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación en función de la deformación angular. En una primera etapa, todas las muestras presentan una disminución en la variación del esfuerzo vertical, la cual es menor mientras menor es el esfuerzo de consolidación aplicado. A medida que la deformación angular aumenta, la variación de esfuerzo vertical normalizada alcanza una relación prácticamente lineal en los tres casos estudiados, no alcanzando un peak definido a una deformación angular de 20%, alcanzando mayores variaciones para el caso con esfuerzo de consolidación de 100 [kPa] (de casi 6 veces), a diferencia de los casos con esfuerzo de consolidación de 300 [kPa] y 500 [kPa], que alcanza variaciones de aproximadamente 2 y 1 vez respectivamente.

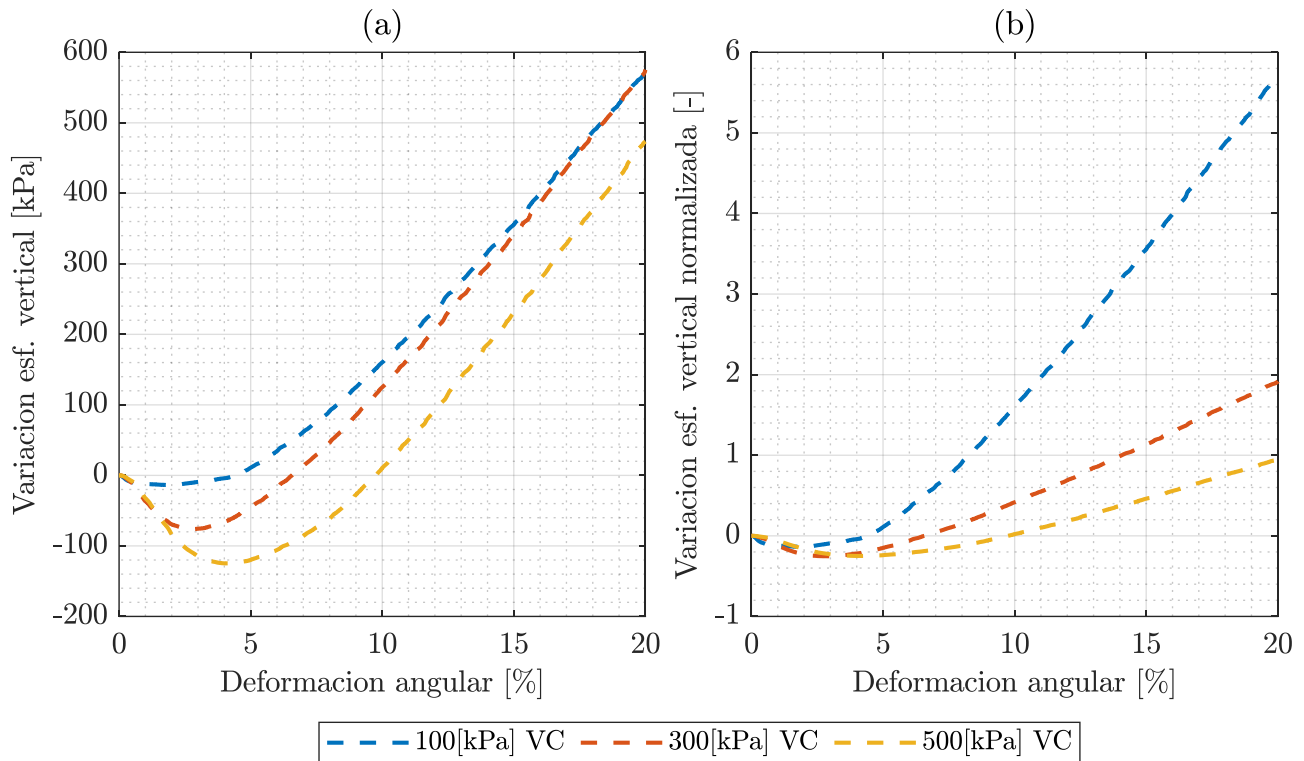


Figura 4-9: Comportamiento esfuerzo vertical vs deformación angular: (a) Variación esfuerzo vertical (b) Variación esfuerzo vertical normalizado.

4.4.2 Esfuerzo de corte versus deformación angular

En la Figura 4-10 se presenta tanto el comportamiento del esfuerzo de corte (Figura 4-10.a), como el comportamiento normalizado del esfuerzo de corte por el esfuerzo de consolidación del ensayo (Figura 4-10.b) y el comportamiento normalizado del esfuerzo de corte por el esfuerzo vertical generado durante el aumento de la deformación angular (Figura 4-10.c).

Con respecto al caso Figura 4-10.a, se observa que todas las muestras presentan comportamientos similares, el cual consiste en una primera etapa en donde aumenta rápidamente el esfuerzo de corte en función de la deformación angular, luego otra etapa en donde la razón entre el esfuerzo de corte y la deformación angular aumenta a una menor proporción, hasta llegar a una tercera etapa en donde el esfuerzo de corte y la deformación angular presentan un comportamiento casi lineal a medida que aumenta la deformación angular, no alcanzando un peak definido.

Este comportamiento descrito se presenta de igual manera en la Figura 4-10.b. Cabe destacar que mientras mayor esfuerzo de consolidación aplicado inicialmente, mayores esfuerzos de corte son alcanzados, sin embargo, al normalizar el esfuerzo de corte por el esfuerzo vertical de consolidación aplicado, se observa que la relación entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo de consolidación inicial aumenta mientras menor es el esfuerzo de consolidación.

Lo descrito antes, es observado claramente en la Figura 4-10.c, donde se aprecia que la relación entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo vertical generado en la etapa de corte de las muestras aumentan considerablemente hasta un valor de aproximadamente 10% de deformación angular, donde posteriormente alcanzan un valor constante de aproximadamente 0.6 [-], independiente de esfuerzo de consolidación inicial.

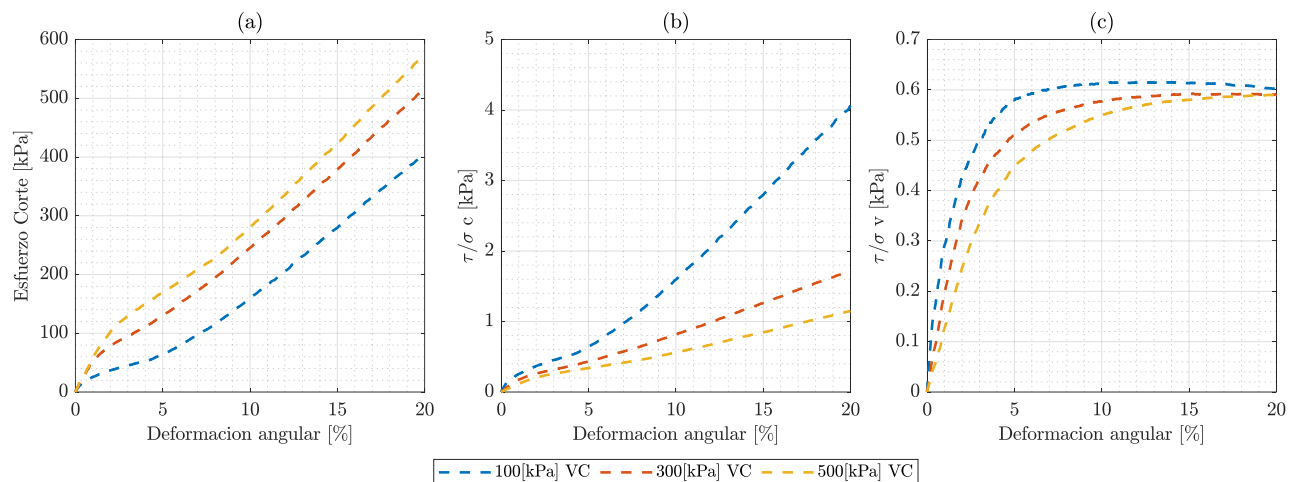


Figura 4-10: Esfuerzo de corte vs Deformación angular (a) Comportamiento esfuerzo corte (b) Comportamiento normalizado por esfuerzo de consolidación (c) Comportamiento normalizado por esfuerzo vertical.

En la Figura 4-11 se presenta una comparación entre los resultados de esta investigación, con los obtenidos por Blaker (Blaker, 2015) y Bhaumik (Bhaumik, 2018), y en la Figura 4-12 con los resultados de Parra, 2016. En Parra como en Bhaumik, estos ensayos fueron realizados a probetas vírgenes de arena de Ottawa, realizados a densidades relativas de 78 y 64% respectivamente, mientras que en los estudios de Blaker fueron realizados a una densidad relativa de 80% y previamente la muestra fue sometida a pre-cycling. Los resultados de (Parra, 2016) son para arena a un $D_r=78\%$ a 100 y 800 [kPa] mientras que a $D_r=81\%$ a 400 [kPa]. Se observa que todos los comportamientos se encuentran dentro de una banda que van aumentando, siguiendo una pendiente similar entre sí.

Con respecto a los resultados obtenidos, los valores presentados por Bhaumik (Bhaumik, 2018), en la Figura 4-11, a un esfuerzo de consolidación de 100[kPa] coinciden en valor y tendencias a lo visto en este estudio, tendencias similares a 100 [kPa] de esfuerzo de consolidación también presentan los resultados descritos por Parra en la Figura 4-12 (Parra, 2016), con valores levemente menores a medida que aumenta la deformación angular.

Caso contrario ocurre con los resultados a 200 [kPa] de esfuerzo de consolidación presentados por Blaker (Blaker, 2015) ya que para valores de deformación angular menor a 2%, presenta resultados similares a la muestra evaluada a 500 [kPa] en el presente estudio, aumentando en mayor proporción a medida que aumenta el desplazamiento angular. Este fenómeno puede ser resultado del pre-cycling aplicado a la muestra durante la preparación de los ensayos realizados por Blaker. Los resultados a 400 [kPa] provistos por Parra en la Figura 4-12, a valores menores 4% de deformación angular son similares a lo visto en este estudio en muestras a 500 [kPa], sin embargo, al sobrepasar este valor aumenta en mayor proporción.

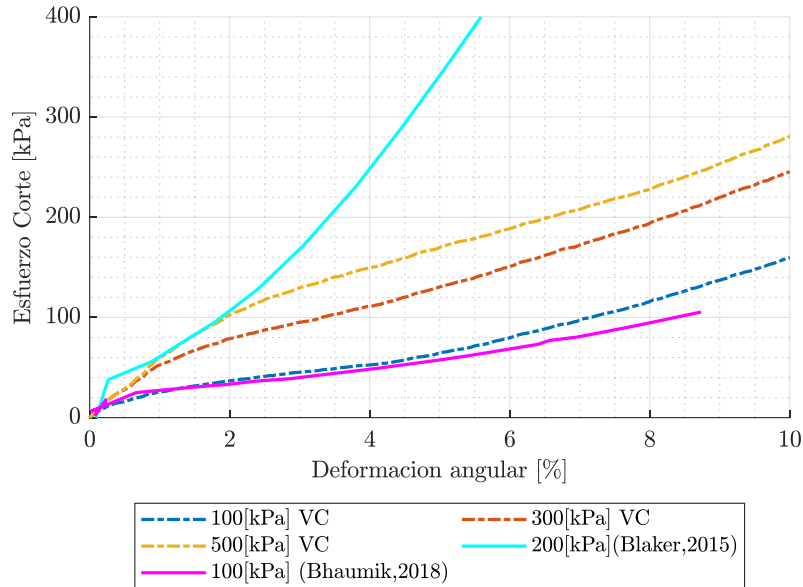


Figura 4-11: Comparación resultados esfuerzo de corte versus deformación angular (Blaker, 2015; Bhaumik, 2018)

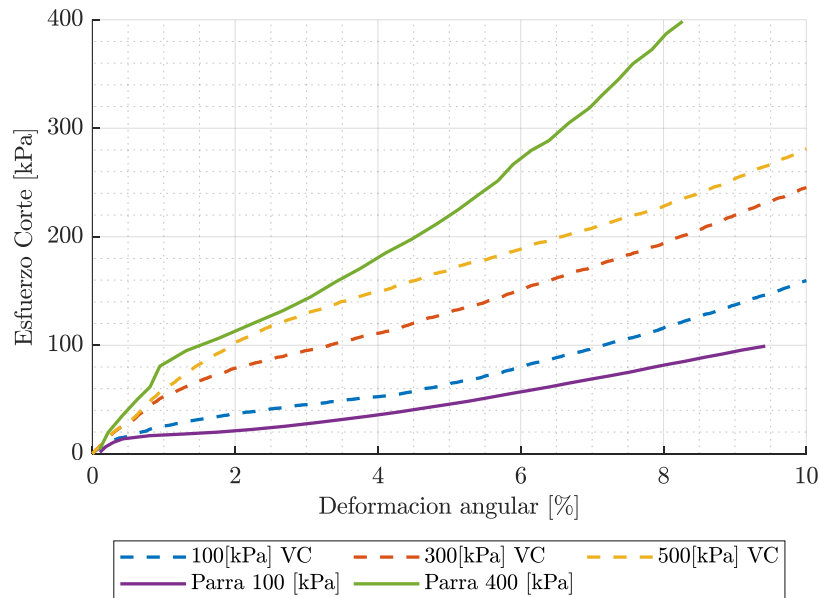


Figura 4-12: Comparación de resultados esfuerzo de corte versus deformación angular (Parra, 2016)

4.4.3 Variación del Esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical

La Figura 4-13 presenta la evolución del esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical durante la etapa de corte. Los puntos en donde es alcanzado el menor esfuerzo vertical en las probetas, es graficado como la línea de transformación de fase (PTL), ya que este punto coincide con el punto en el cual el comportamiento cambia de contractivo a dilatante. Superado este punto, se observa que, a menor esfuerzo de consolidación, más rápido es alcanzada la línea de estado crítico (CSL).

De acuerdo con (Kutter & Chen, 2014), el ángulo obtenido a partir de la línea de transformación de fase es menor a lo obtenido a partir de la línea de estado crítico, lo cual se verifica en este caso. Los valores de esfuerzo vertical mínimo y máximo (asociados a PTL y CSL respectivamente) para cada una de las muestras analizadas, se presentan en la Tabla 4-3. A partir de estos valores, es calculado el ángulo de fricción asociado tanto a la línea de transformación de fase como a la línea de estado crítico, con los valores correspondientes en la Tabla 4-3.

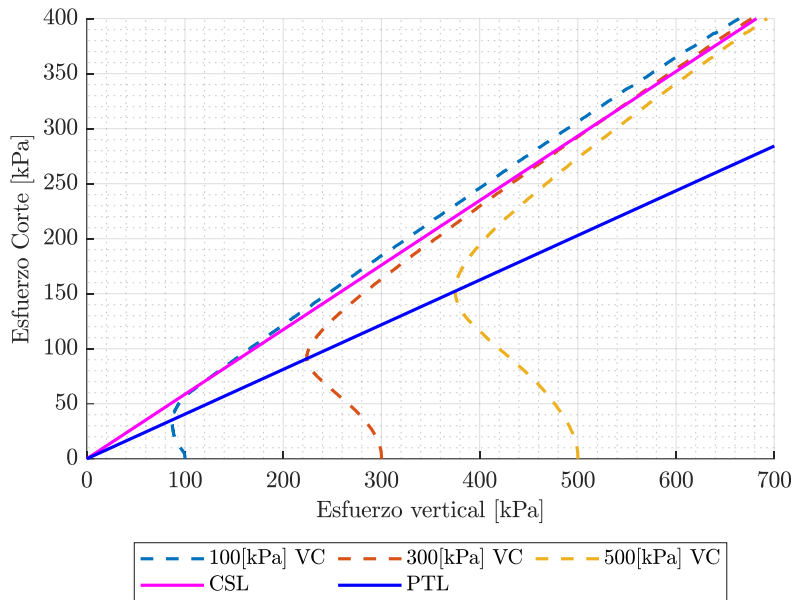


Figura 4-13: Trayectoria de tensiones durante ensayos de corte monótonos a volumen constante

Tabla 4-3: Valores mínimos y máximos de esfuerzo vertical alcanzados en ensayos monótonos a volumen constante

PTL			CSL		
Serie	Esfuerzo vertical mínimo[kPa]	Esfuerzo de corte [kPa]	Serie	Esfuerzo vertical máximo [kPa]	Esfuerzo de corte [kPa]
100 [kPa] VC	86	35	100 [kPa] VC	989	571
300 [kPa] VC	224	93	300 [kPa] VC	981	579
500 [kPa] VC	375	152	500 [kPa] VC	986	582
Angulo Fricción [°]		22.1	Angulo fricción [°]		30.4
Cohesión [kPa]		0.7	Cohesión [kPa]		0

4.5 Comparación resultados esfuerzo vertical y volumen constante

Con respecto a la relación de vacíos, se observa en la Figura 4-14 que, independiente de la condición del ensayo, las muestras, tras la aplicación del corte tienden a una línea única dentro del espacio relación de vacíos versus esfuerzo vertical. En la Figura 4-15 se compara la evolución del esfuerzo de corte versus esfuerzo vertical tanto para los ensayos a volumen constante como también los realizados a esfuerzo vertical constante. Se observa que los

máximos alcanzados de esfuerzo de corte son levemente mayores en los ensayos a esfuerzo vertical constante que, a volumen constante para un esfuerzo vertical dado, lo cual se aprecia en que el valor del ángulo de fricción máximo obtenido es mayor en este caso, como lo señala la Tabla 4-4. Dado lo analizado, se observa que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los resultados vistos en literatura.

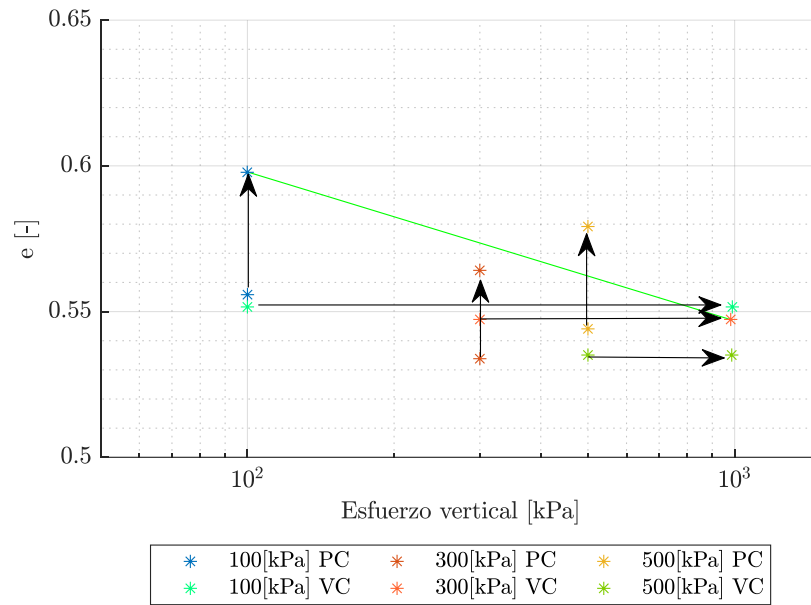


Figura 4-14: Relación de vacíos versus esfuerzo vertical bajo condiciones de esfuerzo vertical constante (PC) y volumen constante (VC)

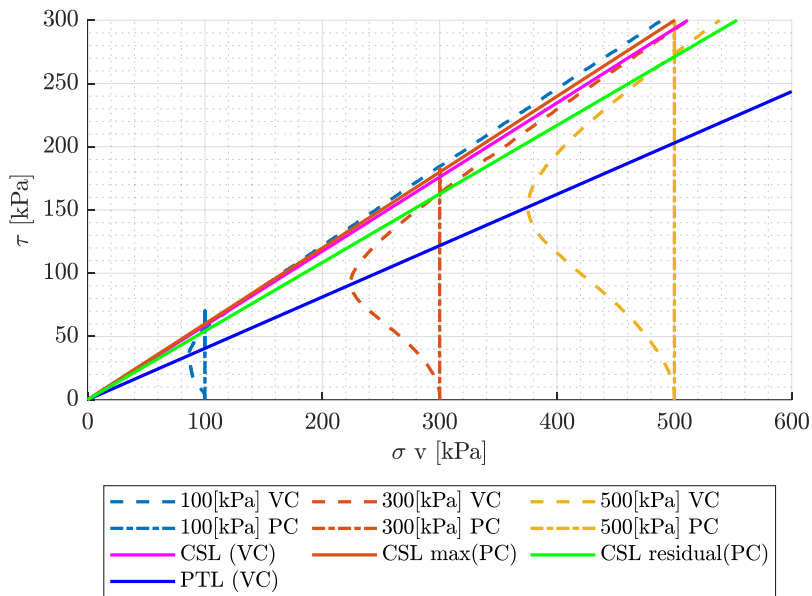


Figura 4-15: Trayectoria de esfuerzos de ensayos a volumen y esfuerzo vertical constante

Tabla 4-4: Comparación resultados de ángulo de fricción y cohesión a presión y volumen constante, comparación con literatura (Blaker,2015; Parra,2016)

Esfuerzo [kPa]	Presión constante		Volumen constante				
	t máximo [kPa]	t residual [kPa]	Línea transformación de fase (PTL)	Línea de estado crítico (CSL)	Línea transformación de fase (PTL) (Parra,2016)	Línea de estado crítico (CSL) (Parra,2016)	Línea de estado crítico (CSL) (Blaker,2015)
Angulo fricción [°]	30.95	28.47	22.1	30.4	24.6	26 - 30	31
Cohesión [kPa]	7.87	2.01	0.7	0	0	0	0

5 Resultados: Ensayos cíclicos

Con el objetivo de estudiar la degradación cíclica del material, se realizaron 16 ensayos CDSS con valores de CSR (τ_{cy} / σ_c) entre 0.125 y 0.24 y con aplicación de esfuerzo de corte medio (τ_{medio}). Para efectos de evaluación de los parámetros evaluados, se presenta la Figura 5-1a y Figura 5-1.b. En una primera etapa se aplica el esfuerzo de corte medio (preshearing) hasta alcanzar el valor requerido a evaluar; luego en todos los ensayos es aplicada la etapa cíclica, la cual se compone de dos partes: una etapa de acomodación, correspondiente al ciclo N=0, en donde es generado un ciclo con esfuerzo de corte cíclico del mismo valor requerido pero de mayor frecuencia a la evaluada (esto es debido a particularidades del equipo utilizado) y luego una etapa en donde comienza la aplicación del esfuerzo de corte cíclico según los parámetros de esfuerzo de corte cíclico y de frecuencia establecidos, considerándose el inicio de ésta como N=1.

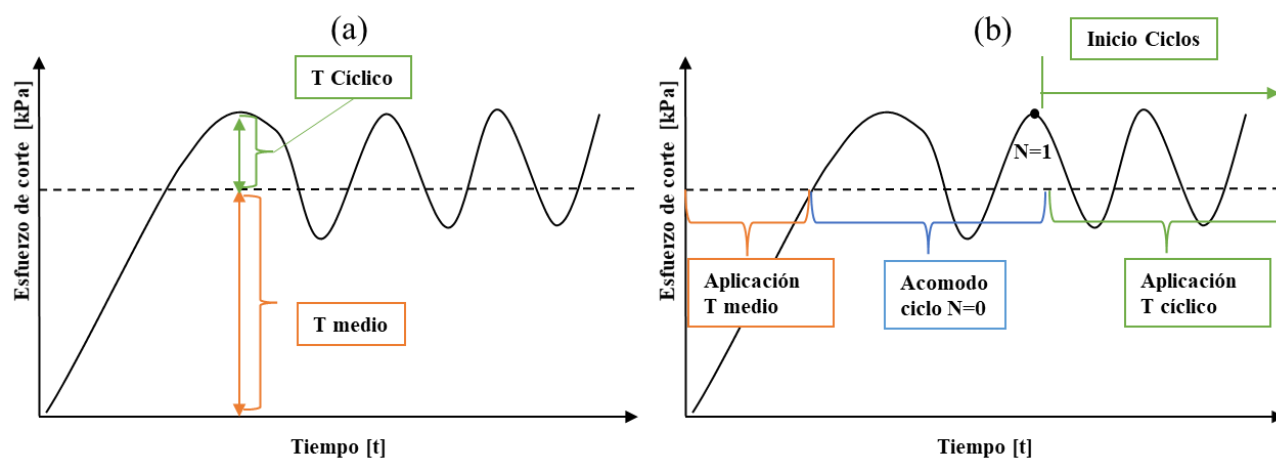


Figura 5-1: Evolución de esfuerzo de corte en el tiempo, a) Definición esfuerzo de corte cíclico y medio aplicado b) Aplicación de parámetros en equipamiento CDSS

El resumen de los ensayos realizados se presenta en la Tabla 5-1. La preparación de las probetas siguió el procedimiento indicado en la sección 3.3, además, el esfuerzo de consolidación aplicado inicialmente (σ_c) en todas las probetas es de 100 [kPa].

Con respecto a la Tabla 5-1, se presenta el ID de cada uno de los 16 ensayos realizados, el esfuerzo de consolidación inicial (σ_c), esfuerzo de corte cíclico (τ_{cy}), esfuerzo de corte medio o preshearing (τ_{medio}), parámetro alfa que representa la relación entre el esfuerzo de corte medio y el esfuerzo de consolidación (α), CSR, desplazamiento horizontal máximo alcanzado por cada uno de los ensayos y la frecuencia aplicada. Para efectos de este estudio, se busca observar la diferencia de resultados obtenidos variando valores de esfuerzo de corte cíclico y esfuerzo de corte medio en los distintos ensayos, teniendo como referencia los valores obtenidos en la etapa monótona descrita en la sección 4.

Para los ensayos que corresponde, un esfuerzo de corte medio es aplicado (τ_{medio}), representado por la aplicación de un desplazamiento angular a una tasa de deformación de 0.015 mm/min bajo condiciones de esfuerzo vertical constante (es decir, manteniendo el valor de esfuerzo de consolidación de 100 [kPa] durante la aplicación del corte monótono) hasta alcanzar la fuerza requerida asociada al esfuerzo de corte medio buscado. La aplicación de esfuerzo de corte medio (preshearing) bajo condiciones de esfuerzo vertical constante simula condiciones drenadas al realizar la analogía con estructuras offshore (Andersen, 2015).

La totalidad de los ensayos se ejecutaron, durante la etapa cíclica, bajo una condición de volumen constante, representado por una altura fija en la muestra post consolidación vertical o post aplicación de esfuerzo de corte medio, dependiendo sea el caso. Posterior a esto, se aplican los ciclos a una frecuencia determinada (0.05 o 0.03 [Hz], dependiendo del ensayo) hasta que alcanza el desplazamiento horizontal máximo en simple amplitud o son alcanzados una cantidad de 1000 ciclos, (Jardine et. al., 2012). El resumen de los ensayos realizados se presenta en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Ensayos cíclicos realizados

Número	ID	σ_c [kPa]	τ_{cy} [kPa]	τ_{medio} [kPa]	α [-]	CSR [-]	Desp. horizontal máx. alcanzado[mm]	Frecuencia [Hz]
1	0200v1	100	20	0	0	0.2	5	0.05
2	0200v4	100	20	0	0	0.2	2.3	0.03
3	0201v2	100	20	10	0.1	0.2	3.5	0.03
4	0202v2	100	20	20	0.2	0.2	3.5	0.03
5	01500v1	100	15	0	0	0.15	5	0.05
6	01501v1	100	15	10	0.1	0.15	3.5	0.03
7	015015v2	100	15	15	0.15	0.15	3.5	0.03
8	02400v1	100	24	0	0	0.24	2.3	0.05
9	02401v1	100	24	10	0.1	0.24	3.5	0.03
10	012500v1	100	12.5	0	0	0.125	2.3	0.03
11	01250125v1	100	12.5	12.5	0.125	0.125	3.5	0.05
12	013500v1	100	13.5	0	0	0.135	3.5	0.05
13	017500v1	100	17.5	0	0	0.175	2.3	0.05
14	017501v1	100	17.5	10	0.1	0.175	4	0.03
15	01750175v2	100	17.5	17.5	0.175	0.175	3.5	0.03
16	024020v1	100	24	20	0.2	0.24	3	0.05

5.1 Definición de parámetros de respuesta

En la Figura 5-2 se señalan las definiciones de los parámetros respuesta a analizar. En la Figura 5-2.a, en el gráfico esfuerzo de corte versus deformación angular, se define el módulo de corte G_1 , correspondiente al módulo de corte existente en el primer ciclo, además de definir la deformación angular acumulada, la cual consiste en el valor total de la deformación angular desde $N=1$. En la Figura 5-2.b, en un gráfico de deformación angular en función del tiempo, se definen los parámetros de deformación angular media (conocida en literatura también como deformación angular permanente), deformación angular cíclica, definida en este caso para amplitud simple y deformación angular máxima, considerada la suma de la componente de deformación angular media y cíclica.

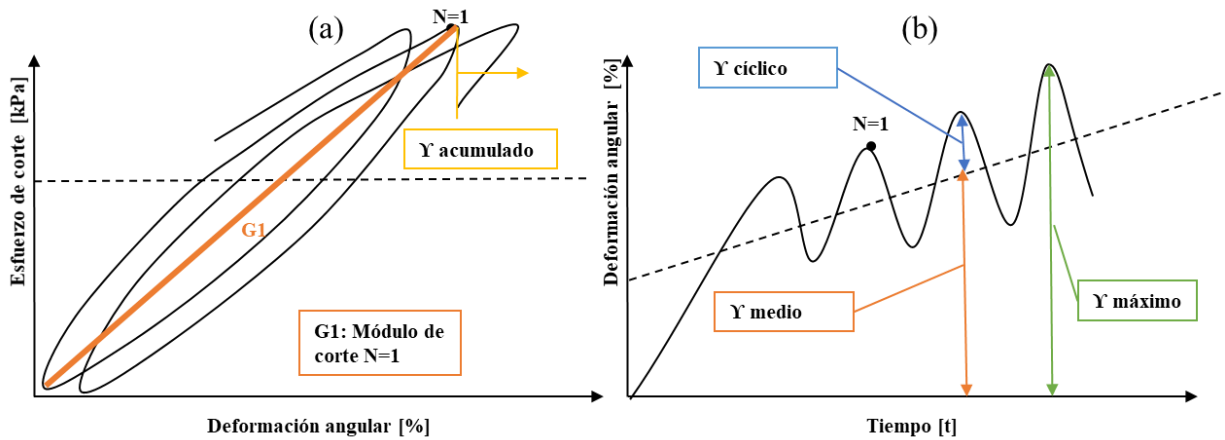


Figura 5-2: Definición parámetros respuesta, a) γ acumulada y $G1$ b) Definición de γ cíclico, γ medio, γ máximo

5.2 Efectos de aplicación esfuerzo de corte medio (preshearing)

En la Tabla 5-2 se presenta la variación de relación de vacíos asociado a la aplicación del esfuerzo de corte inicial, la cual es calculada como la diferencia entre la relación de vacíos posterior a la etapa de consolidación inicial (e post conso.) y la relación de vacíos posterior a la aplicación del corte medio (e post corte medio). En todos los casos se observa que la variación es menor que el 0.5%, lo que coincide con los resultados de Andersen, 2015.

En la Tabla 5-2 también se encuentra el valor de deformación angular alcanzada debido a esta etapa (γ post corte medio), en donde es esperado que sea mayor el valor mientras mayor sea el valor de esfuerzo de corte aplicado. Cabe mencionar que la deformación angular es medida desde posterior a la etapa de consolidación, es decir, se considera el efecto producido por el esfuerzo de corte medio aplicado en la muestra dentro de su evaluación en la parte cíclica, esto ya que en la realidad existe una acumulación de deformaciones permanentes que condiciona el estado de deformaciones de la estructura (Andersen, 2009).

Tabla 5-2: Variación relación de vacíos durante etapa de aplicación de corte medio

Número	ID	e post conso[-]	e post corte medio [-]	Variación [%]	Y post corte medio [%]
1	02_00v1	0.552	0.552	0.000	0
2	02_00v4	0.551	0.551	0.000	0
3	02_01v2	0.556	0.555	0.146	0.2074
4	02_02v2	0.554	0.553	0.203	0.603
5	015_00v1	0.551	0.551	0.000	0
6	015_01v1	0.547	0.546	0.183	0.2167
7	015_015v2	0.555	0.554	0.203	0.3596
8	024_00v1	0.553	0.553	0.000	0
9	024_01v1	0.555	0.554	0.124	0.2237
10	0125_00v1	0.557	0.557	0.000	0
11	0125_0125v1	0.553	0.552	0.309	0.3018
12	0135_00v1	0.553	0.553	0.000	0
13	0175_00v1	0.556	0.556	0.000	0
14	0175_01v1	0.556	0.555	0.130	0.2338
15	0175_0175v2	0.553	0.552	0.315	0.5308
16	024_020v1	0.551	0.548	0.454	0.601

5.3 Deformación angular con el número de ciclos

En la Tabla 5-3 se presentan los valores de deformación angular de cada uno de los ensayos: posterior a la aplicación del esfuerzo de corte medio (preshearing) y posterior a la etapa de ajuste (inicio N=1), los cuales se representan en la Figura 5-3. En el caso del ensayo ID024_02v1, el valor de deformación angular de 2.5% es alcanzado en la etapa de ajuste del ciclo (N=0).

Tabla 5-3: Valores de deformación angular previo a ciclos y posterior a etapa de ajuste

Número	ID	Y post corte medio [%]	Y inicio N=1 [%]	Número	ID	Y post corte medio [%]	Y inicio N=1 [%]
1	02_00v1	0	0.78	9	024_01v1	0.22	1.75
2	02_00v4	0	0.76	10	0125_00v1	0	0.27
3	02_01v2	0.21	1.31	11	0125_0125v1	0.30	0.96
4	02_02v2	0.60	2.17	12	0135_00v1	0	0.38
5	015_00v1	0	0.46	13	0175_00v1	0	0.53
6	015_01v1	0.22	1.13	14	0175_01v1	0.23	1.18
7	015_015v2	0.36	1.28	15	0175_0175v2	0.53	1.82
8	024_00v1	0	1.09	16	024_02v1	0.60	3.31

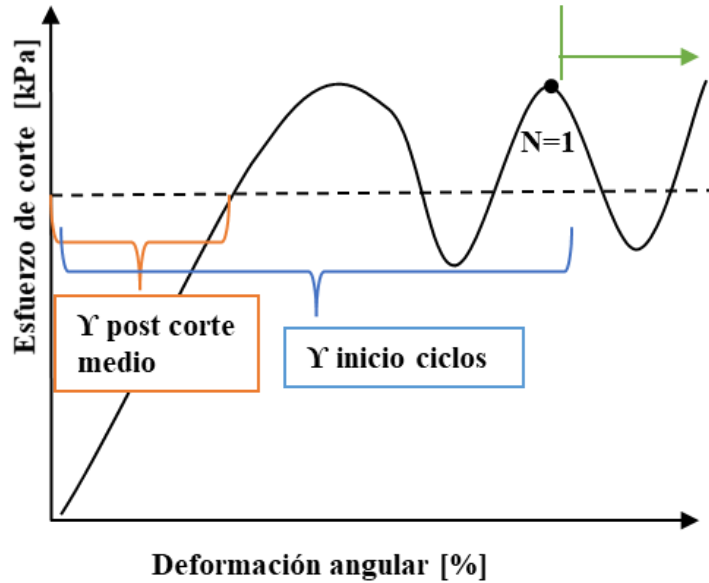


Figura 5-3: Definición Y post corte medio y Y inicio ciclos

Se define como deformación acumulada (Y acumulado) como la diferencia entre el valor de deformación angular obtenido en el ciclo N menos la deformación máxima obtenida en el inicio del ciclo $N=1$, como fue presentado en la Figura 5-2.a. El objetivo de analizar esta variable respuesta, consiste en observar la variación de deformación angular existente debido netamente al efecto cíclico, sin considerar los valores de deformación angular asociado al esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado y los valores generados debido al acomodo del ciclo $N=0$ en el equipo CDSS.

Las Tabla 5-4, Tabla 5-5 y Tabla 5-6 presentan los valores de las componentes de deformación angular máxima (Y máx), deformación angular mínima (Y mín), deformación angular cíclica (Y cyc) y deformación angular media (Y medio) cuando son alcanzados valores de deformación angular máxima o mínima de magnitudes correspondientes a 2.5, 5 y 10%. Los valores marcados con rosado, que corresponden a los ensayos con esfuerzo de corte medio igual al esfuerzo de corte cíclico aplicado: ID02_02v2, ID015_015v2, ID0125_0125v1, ID0175_0175v1; y el ensayo ID0125_00v1 que es el que presenta menor esfuerzo de corte cíclico aplicado, no alcanzaron el valor solicitado en 1000 ciclos, (valor de 902 para el ensayo de ID 0175_0175v1, debido a problemas operativos), por lo cual se da por finalizado el ensayo en estos casos por alcanzar el máximo de ciclos a evaluar, señalando en la tabla correspondiente los valores alcanzados de $Y_{máx}$ [%], $Y_{mín}$ [%], Y_{cyc} [%] y Y_{medio} [%].

De los resultados se observa la cantidad de ciclos requeridos para alcanzar la deformación máxima o mínima aumenta con menores valores de esfuerzo de corte cíclico aplicado en los casos en que no existe efecto de la aplicación de preshearing, y a su vez, aumenta mientras mayor preshearing es aplicado si es mantenido constante el esfuerzo de corte cíclico aplicado. Sin embargo, esto último señalado es para los casos a deformaciones angulares de 5% y 10%, ya que en el caso a 2.5% esto no necesariamente se cumple, debido a que durante la aplicación del preshearing es alcanzada esta deformación angular, ejemplos de ensayos que ocurre esto es ID02_02v2, ID0175_0175v2 e ID024_02v1.

Tabla 5-4: Valores de deformación angular con Υ máxima o mínima de 2.5%

Valor $\Upsilon = 2.5\%$						
Número	ID	Υ máx [%]	Υ min [%]	Υ cyc [%]	Υ medio [%]	N
1	02_00v1	2.018	-2.489	2.254	-0.235	13
2	02_00v4	2.276	-1.916	2.096	0.18	25
3	02_01v2	2.485	1.444	0.52	1.964	129
4	02_02v2	2.498	1.803	0.347	2.15	10
5	015_00v1	2.37	-2.045	2.208	0.162	200
6	015_01v1	2.497	1.896	0.301	2.197	273
7	015_015v2	2.213	1.718	0.248	1.966	1000
8	024_00v1	2.335	-1.918	2.126	0.209	5
9	024_01v1	2.461	0.908	0.777	1.684	10
10	0125_00v1	0.138	-0.379	0.258	-0.121	1000
11	0125_0125v1	1.543	1.095	0.224	1.319	1000
12	0135_00v1	0.786	-2.423	1.605	-0.818	480
13	0175_00v1	2.292	-2.312	2.302	-0.01	170
14	0175_01v1	2.434	1.329	0.552	1.881	177
15	0175_0175v2	2.5	1.907	0.296	2.203	126
16	024_02v1	2.5	NA	NA	NA	<1

Tabla 5-5: Valores de deformación angular con Υ máxima o mínima de 5%

Valor $\Upsilon = 5\%$						
Número	ID	Υ máx [%]	Υ min [%]	Υ cyc [%]	Υ medio [%]	N
1	02_00v1	4.141	-4.712	4.426	-0.285	20
2	02_00v4	4.944	-3.717	4.33	0.613	36
3	02_01v2	4.817	1.467	1.675	3.142	147
4	02_02v2	4.422	3.698	0.362	4.06	1000
5	015_00v1	4.872	-3.518	4.195	0.677	208
6	015_01v1	4.985	4.235	0.375	4.61	371
7	015_015v2	2.213	1.718	0.248	1.966	1000
8	024_00v1	4.976	-3.996	4.486	0.49	12
9	024_01v1	4.909	-0.869	2.889	2.037	17
10	0125_00v1	0.138	-0.379	0.258	-0.121	1000
11	0125_0125v1	1.543	1.095	0.224	1.319	1000
12	0135_00v1	1.85	-4.924	3.387	-1.537	491
13	0175_00v1	4.889	-4.267	4.578	0.311	183
14	0175_01v1	4.999	0.871	2.064	2.935	192
15	0175_0175v2	3.261	2.545	0.358	2.903	902
16	024_02_v1	4.929	3.7977	0.566	4.3636	11

Tabla 5-6: Valores de deformación angular con Υ máxima o mínima de 10%

Valor $\Upsilon = 10\%$						
Número	ID	Υ máx [%]	Υ mín [%]	Υ cyc [%]	Υ medio [%]	N
1	02_00v1	5.104	-5.902	5.503	-0.399	25
2	02_00v4	9.947	-4.955	7.451	2.496	74
3	02_01v2	9.84	1.029	4.406	5.435	163
4	02_02v2	4.422	3.698	0.362	4.06	1000
5	015_00v1	9.879	-6.499	8.189	1.69	229
6	015_01v1	9.933	8.361	0.786	9.147	515
7	015_015v2	2.213	1.718	0.248	1.966	1000
8	024_00v1	9.889	-5.631	7.76	2.129	39
9	024_01v1	9.964	-1.911	5.937	4.027	33
10	0125_00v1	0.138	-0.379	0.259	-0.121	1000
11	0125_0125v1	1.543	1.095	0.224	1.319	1000
12	0135_00v1	3.449	-9.902	6.676	-3.227	528
13	0175_00v1	9.886	-6.12	8.003	1.883	217
14	0175_01v1	9.88	1.426	4.227	5.653	215
15	0175_0175v2	3.261	2.545	0.358	2.903	902
16	024_02v1	9.999	9.061	0.469	9.528	281

En las Figura 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6, se presenta la evolución en función de la cantidad de ciclos de la deformación angular acumulada, deformación angular media y deformación angular cíclica respectivamente. Para observar el comportamiento de la deformación angular, ya sea acumulada, media o cíclica, en función del preshearing aplicado, las Figura 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6 se dividen en: a) cuando no existe preshearing aplicado, b) cuando es aplicado un preshearing de 10 [kPa] y c) cuando el preshearing aplicado es igual al esfuerzo de corte cíclico aplicado. Las figuras anteriormente señaladas se presentan en un gráfico semilogarítmico en X, con el fin de observar de mejor manera este comportamiento.

5.3.1 Comportamiento deformación angular acumulada en función del número de ciclos

En la Figura 5-4 se presenta la deformación angular acumulada en función del número de ciclos para los casos en donde no existe preshearing aplicado (Figura 5-4.a), cuando es aplicado un preshearing de 10 [kPa] (Figura 5-4.b) y cuando el preshearing aplicado es de la misma magnitud que el del esfuerzo de corte cíclico aplicado (Figura 5-4.c). Se observa para todos los casos que, a mayor esfuerzo de corte cíclico aplicado, se requiere un menor número de ciclos para alcanzar un valor determinado de deformación angular, sin embargo, la forma en que es alcanzado este valor varía según la aplicación o no del preshearing en la muestra.

La Figura 5-4.a presenta los casos en donde no existe aplicación de preshearing. Se observa una primera etapa en donde la deformación angular acumulada se mantiene en valores cercanos a cero, lo que implica que existe una oscilación constante en cuanto a los valores de deformación angular en función de los ciclos.

Dependiendo del esfuerzo de corte cíclico aplicado, para un valor determinado de número de ciclos, la deformación angular acumulada comienza a aumentar a una tasa de deformación constante; probetas sometidas a esfuerzos de corte cíclico mayores generan este aumento de deformación angular constante a tasas mayores (ID02400v1 = 0.37 [%/ciclo], ID0200v1=0.27 [%/ciclo], ID0200v4 = 0.23 [%/ciclo], ID017500v1=0.17 [%/ciclo], ID01500v1 = 0.21

[%/ciclo], ID013500v1= 0.06 [%/ciclo]). El ensayo ID012500v1 en particular mantiene sus valores cercanos a cero, lo cual se explica debido a que este en 1000 ciclos no alcanzó grandes desplazamientos.

La Figura 5-4.b presenta los ensayos en donde existe aplicación de preshearing de 10 [kPa]. Se observa una primera etapa en donde la deformación angular aumenta a una tasa de deformación de 0.07 [%/ciclo] para el ensayo ID024010v1, 0.008 [%/ciclo] para el ensayo ID0201v2 y de 0.005 para los ensayos ID0175010v1 e ID015010v1, luego llegando a un punto (que varía dependiendo del esfuerzo de corte cíclico aplicado) esta razón aumenta a 0.36 [%/ciclo] para el caso ID024010v1, 0.12 [%/ciclo] para los ensayos ID0201v2 e ID0175010v1 y de 0.02 [%/ciclo] para el ensayo ID015010v1. Es observado que la tasa de aumento de deformación angular aumenta mientras mayor es el esfuerzo de corte cíclico aplicado.

La Figura 5-4.c presenta los casos en donde el preshearing aplicado es igual al esfuerzo de corte cíclico aplicado. Se observa que un cambio en la tasa de aumento de la deformación angular acumulada a medida que son aplicados los ciclos, siendo mayor esta tasa de crecimiento mientras mayor esfuerzo de corte cíclico es aplicado. Existe una primera etapa donde la tasa de crecimiento presenta valores más elevados (valores para ID024020v1 =0.39 [%/ciclo], ID0202v2 e ID01750175v2= 0.02[%/ciclo], ID015015v2= 0.009 [%/ciclo] e ID01250125v1= 0.008 [%/ciclo]) la que bajo una cantidad determinada de ciclos presenta valores de tasa de crecimiento constante menores en todos los casos evaluados (valores para ID024020v1 =0.03[%/ciclo], ID0202v2= 0.002 [%/ciclo], ID01750175v2, ID015015v2 e ID01250125v1=0.001 [%/ciclo]).

En particular, el ensayo ID024020v1, a pesar de no coincidir el esfuerzo de corte cíclico aplicado con el preshearing correspondiente, presenta tendencias de comportamiento similares a los otros ensayos (ID0202v1, ID01750175v2, ID015015v2, ID01250125v1).

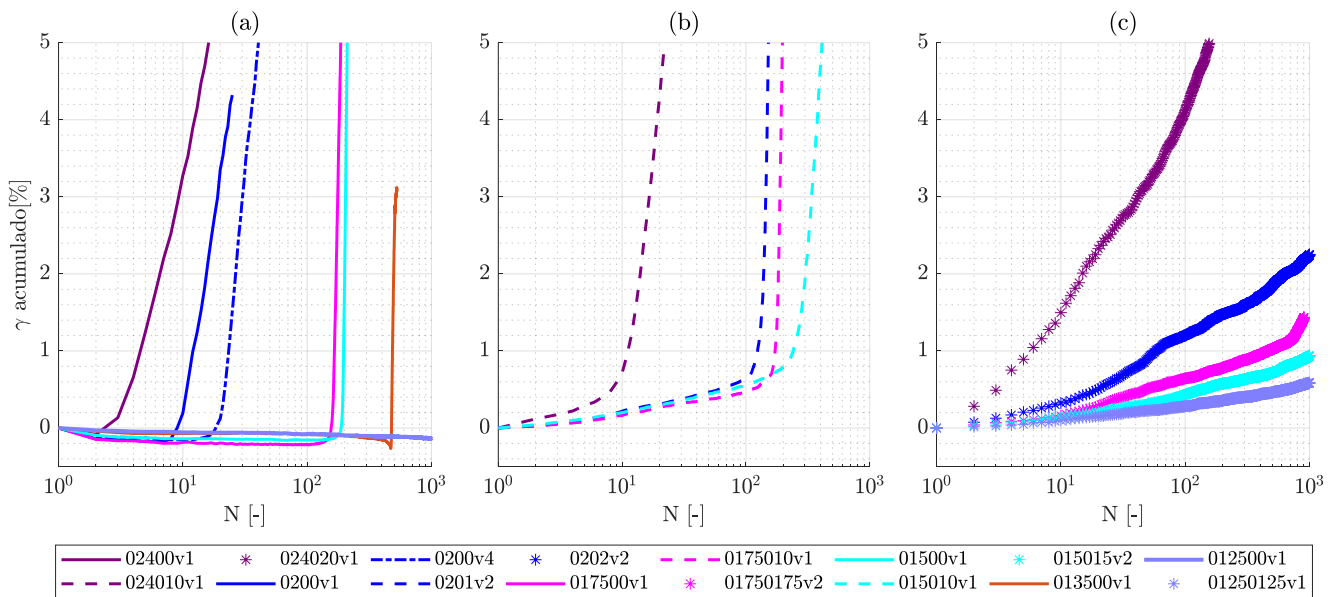


Figura 5-4: Deformación angular acumulada vs número de ciclos a) Sin preshearing; b) Preshearing de 10 [kPa] c) Preshearing= Esfuerzo corte cíclico

5.3.2 Comportamiento deformación angular media en función del número de ciclos

En la Figura 5-5 se presenta el comportamiento de la deformación angular media en función de los ciclos para los casos sin preshearing aplicado (Figura 5-5.a), con preshearing aplicado de 10 [kPa] (Figura 5-5.b) y con un preshearing igual a esfuerzo de corte cíclico aplicado para cada ensayo (Figura 5-5.c).

Con respecto a la Figura 5-5.a, cuando no existe preshearing aplicado, la tasa de aumento de deformación angular media se mantiene constante y cercana a cero para todos los casos, excepto para el caso ID02400v1, que aumenta a una tasa de 0.02 [%/ciclo] y para el caso ID0200v4, que aumenta a una tasa de 0.004 [%/ciclo]. Esto muestra que los ensayos evaluados con estas características mantienen sus deformaciones angulares medias constantes, a diferencia de los casos ID02400v1 e ID0200v4, que presentan una leve variación inicial.

Alcanzado un número de ciclos dado, el cual es menor mientras mayor es el esfuerzo de corte cíclico aplicado, la tasa de aumento de deformación angular media aumenta considerablemente en comparación al primer tramo (ID02400v1=0.06 [%/ciclo], ID0200v4=0.04 [%/ciclo], ID017500v1 e ID 01500v1= 0.03[%/ciclo]). Existen tres casos particulares: el caso ID0200v1, en donde se genera un aumento de 0.08 [%/ ciclo] (en sentido contrario a los otros ensayos) y luego se mantiene a un valor constante; el caso ID013500v1, en donde se genera un aumento de 0.01[%/ciclo], sin embargo, es en dirección opuesta a lo que ocurre con el resto de los ensayos; y el caso ID012500v1, en el cual el valor de deformación angular media se mantiene constante cercano a cero. Este punto se encuentra relacionado con el cambio de fase existente en la probeta, en donde comienza a aumentar considerablemente la componente cíclica de la deformación angular bajo un determinado número de ciclos.

Con respecto a la Figura 5-5.b, cuando existe un preshearing aplicado de 10 [kPa], se observa al inicio en un punto en común para todas ellas (deformación angular media de 0.77 [%]), excepto para el caso ID02401v1, que es levemente mayor (deformación angular media de 1.02 [%]). Esto es esperado, ya que el preshearing aplicado es igual en todos los casos, por lo que las condiciones iniciales de deformación angular media son igual en todos los casos.

A medida que aumentan los ciclos, existe un aumento del valor de la deformación angular media a una razón constante (ID024010v1 =0.07 [%/ciclo], ID 0201v2; ID0175010v1 e ID015010v1 = 0.01[%/ciclo]), sin embargo, dado un valor determinado de ciclos, esta razón aumenta para todos los ensayos a valores similares (ID024010v1 =0.1 [%/ciclo], ID0201v2=0.07 [%/ciclo], ID0175010v1=0.05 [%/ciclo] e ID015010v1 = 0.02 [%/ciclo]). Mientras mayor es el esfuerzo de corte cíclico, y por ende mayor la diferencia entre el esfuerzo de corte cíclico y medio, diferencias levemente mayores ocurren en la tasa de variación de deformación angular media.

Con respecto a la Figura 5-5.c, mientras mayor esfuerzo de corte cíclico, y por ende preshearing, el punto inicial (es decir N=1) aumenta, lo cual es esperado, ya que en la etapa de aplicación de preshearing se llegan a valores de esfuerzo de corte medio distintos en cada ensayo. A medida que aumentan los ciclos, existe una primera etapa en donde aumenta a una tasa constante el valor de deformación angular media (ID024020v1 =0.27[%/ciclo], ID0202v2= 0.03 [%/ciclo], ID01750175v2= 0.02 [%/ciclo], ID015015v2 e ID01250125v1=0.01 [%/ciclo]), para luego disminuir el valor de la tasa de aumento de este valor (ID024020v1 =0.12[%/ciclo], ID0202v2= 0.002 [%/ciclo], ID01750175v2, ID015015v2 e ID01250125v1=0.001 [%/ciclo]). En estos ensayos, es observado que el valor de la deformación angular media varía considerablemente en un inicio, sin embargo, luego este crecimiento se mantiene estable, llegando a alcanzar los 1000 ciclos.

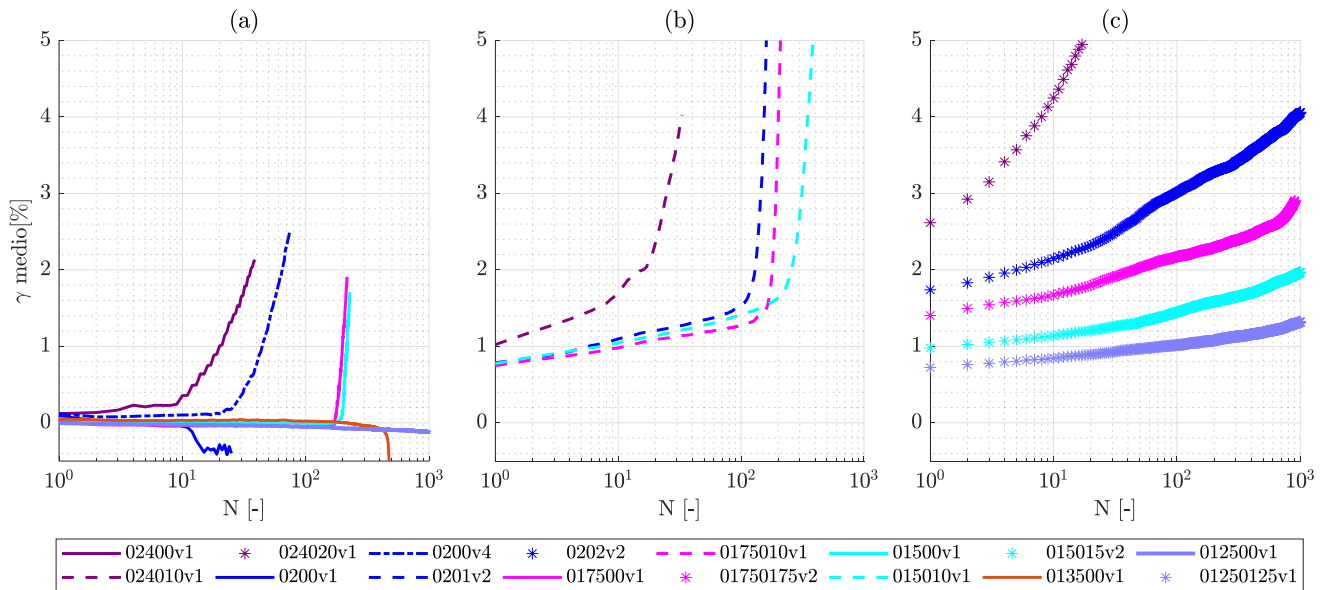


Figura 5-5: Gráfico deformación angular media vs número de ciclos a) Sin preshearing b) Preshearing de 10 [kPa] c) Preshearing= Esfuerzo corte cíclico

5.3.3 Comportamiento deformación angular cíclica en función del número de ciclos

En la Figura 5-6 se observa el gráfico de deformación angular cíclica en función del número de ciclos para los casos en donde no existe aplicación de preshearing (Figura 5-6.a), con aplicación de preshearing de 10 [kPa] (Figura 5-6.b) y con un preshearing aplicado igual al esfuerzo de corte cíclico (Figura 5-6.c).

En la Figura 5-6.a, para el caso en donde no es aplicado preshearing, mientras mayor sea el esfuerzo de corte cíclico aplicado, mayor es el valor inicial (punto de inicio) de la deformación angular cíclica. Este valor inicial de deformación angular cíclica se mantiene relativamente constante para cada uno de los ensayos hasta que, a un determinado número de ciclos, aumenta a una tasa constante (ID02400v1= 0.34 [%/ciclo], ID0200v4=0.3 [%/ciclo], ID017500v1 = 0.14 [%/ciclo], ID 01500v1= 0.2[%/ciclo], ID013500v1 = 0.12 [%/ciclo]). El número de ciclos al cual se genera este cambio en el comportamiento de las deformaciones angulares cíclicas es menor mientras mayor esfuerzo de corte cíclico es aplicado. Caso particular es lo ocurrido con el ensayo ID012500v1, en donde este valor se mantiene constante y de valor igual a 0.277 [%]. A partir del comportamiento presentado, se observa que existe una primera etapa en todos los ensayos en donde se mantiene prácticamente constante la deformación angular cíclica, para luego aumentar considerablemente a medida que aumentan los ciclos.

En la Figura 5-6.b, para el caso en donde un preshearing de 10 [kPa] es aplicado, existe un cambio en el punto inicial (N=1), el cual es mayor mientras mayor es el esfuerzo de corte cíclico aplicado. Este valor se mantiene constante hasta un determinado punto (el cual depende del esfuerzo de corte cíclico aplicado), en donde la deformación angular cíclica aumenta a una tasa constante (ID024010v1 =0.25 [%/ciclo], ID 0201v2 e ID0175010v1= 0.08 [%/ ciclo], ID015010v1 = 0.002[%/ciclo]). Es observado que existe un aumento de deformación angular cíclica, sin embargo, es menor que en el caso en donde no existe esfuerzo de corte medio aplicado.

En la Figura 5-6.c, para el caso en donde el preshearing aplicado es igual al esfuerzo de corte cíclico, se observa que el valor de la componente de deformación angular cíclica se mantiene constante, siendo mayor este valor mientras mayor es el esfuerzo de corte cíclico (y por ende preshearing) aplicado. Esto representa que en estos casos

no existe aumento en la componente de deformación angular cíclica, la cual se mantiene constante a medida que son alcanzados los 1000 ciclos.

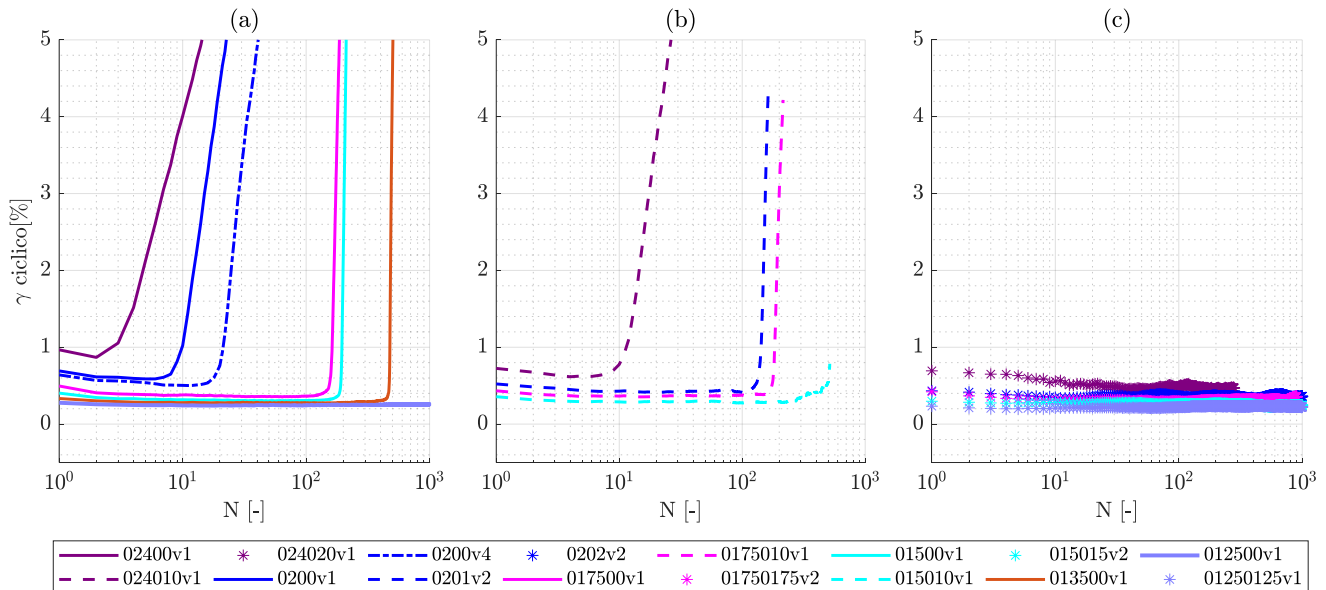


Figura 5-6: Gráfico deformación angular cíclica versus número de ciclos a) Sin preshearing; b) Preshearing de 10 [kPa] c) Preshearing= Esfuerzo corte cíclico

A partir de lo observado en las Figura 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6, la componente primordial que afecta en la generación de deformación angular acumulada depende de la existencia o no de esfuerzo de corte medio aplicado, como también de su magnitud. La influencia del aumento de la componente de deformación angular cíclica es observada en los ensayos sin esfuerzo de corte medio aplicado, mientras que el aumento de la componente de deformación angular media es observada en los ensayos en donde el esfuerzo de corte cíclico aplicado es igual al esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado. Una interacción de ambas componentes es observada en los ensayos en los cuales se aplicó un preshearing de 10 [kPa].

5.4 Diagrama de contorno

Realizando una analogía con los resultados obtenidos en la sección 5.3 y lo observado en pilotes por Poulos (Poulos, 1989), quien plantea que en casos con “*stress reversal*” (esfuerzos aplicados en dos direcciones “*two way*”, tensión y compresión) se genera la degradación cíclica de la fricción, mientras que en casos con esfuerzos aplicados en una dirección “*one way*” (o tensión o en compresión, variando magnitud de las componentes), generan acumulación de desplazamientos permanentes con el aumento de los ciclos.

Los casos observados con “*stress reversal*” en este estudio, los cuales corresponden a los casos sin preshearing aplicado y con preshearing aplicado de 10 [kPa], muestran que la componente asociada a la deformación angular cíclica es predominante en su comportamiento, siendo su efecto más marcado cuando no existe preshearing aplicado. En cambio, la analogía observada con la acumulación de desplazamientos permanentes es observada en este estudio con los ensayos en los cuales el esfuerzo de preshearing aplicado coincide con el esfuerzo de corte cíclico aplicado, generando ciclos “*one way*”, en donde se muestra que el comportamiento de la deformación angular media controla principalmente la acumulación de deformaciones angulares a medida que aumentan los ciclos.

Con el fin de representar las distintas combinaciones de esfuerzos de corte cíclico y medio aplicados, se utiliza el diagrama de contorno (Andersen, 1988), utilizado tanto en arcillas como en arenas. Graficando en sus ejes el esfuerzo de corte cíclico y esfuerzo de corte medio normalizado por el esfuerzo de consolidación permite evaluar la cantidad de ciclos a lo que es alcanzado un valor de deformación angular dada.

Se presentan los diagramas de contorno para los casos en donde es alcanzada una deformación angular media o cíclica de 2.5 y 4% (Figura 5-7 y Figura 5-8) y los valores de los ciclos necesarios para alcanzar estos valores (Figura 5-9 y Figura 5-10), mientras que los diagramas para deformaciones angulares de 1, 3 y 5% son presentados en el anexo 9.

En general, los casos en donde es aplicado un esfuerzo de corte medio (preshearing), se observa un aumento en el valor de las deformaciones angulares iniciales al momento de la aplicación de los ciclos, sin embargo, en el diagrama de contorno es observado que, a un mismo valor de esfuerzo de corte cíclico aplicado, mayores ciclos son requeridos para alcanzar la deformación angular umbral mientras mayor sea el esfuerzo de corte medio aplicado. Esto se explica debido a que, mientras mayor sea el esfuerzo de corte medio aplicado, existe menor inversión de esfuerzos aplicado, lo cual es similar a lo visto en literatura para pilotes (Poulos, 1989), en donde existe una acumulación permanente de deformaciones a medida que aumentan los ciclos.

5.4.1 Comportamiento deformación angular

Con el fin de conocer qué comportamiento es dominante dentro de las distintas componentes de deformación angular (media o cíclica), en las Figura 5-7 y Figura 5-8 son graficados los valores de deformación angular cíclica y media para cada uno de los ensayos, cuando es alcanzado un valor de 2.5 y 4% respectivamente, en alguna de sus componentes, ya sea en deformación angular cíclica o media. A partir de los resultados obtenidos, es posible distinguir cuatro diferentes tipos de comportamiento.

- Grupo 1: el valor evaluado (ya sea 2.5 o 4% de deformación angular) es alcanzado por la deformación angular cíclica, siendo considerable la diferencia en magnitud existente entre los valores de deformación angular media y deformación angular cíclica.
- Grupo 2: el valor evaluado (ya sea 2.5 o 4% de deformación angular) es alcanzado, ya sea por la componente de la deformación angular media o cíclica, sin embargo, no existe una diferencia marcada entre los valores de deformación angular media o cíclica.
- Grupo 3: el valor evaluado (ya sea 2.5 o 4% de deformación angular) es alcanzado por la deformación angular media, siendo considerable la diferencia en magnitud existente entre los valores de deformación angular media y deformación angular cíclica.
- Grupo 4: los ensayos no alcanzan los valores a evaluar de deformación angular en un máximo de $N=1000$.

Ensayos pertenecientes al grupo 1 son aquellos en los que no existe componente de esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado (ID02400v1, ID0200v1, ID0200v4, ID017500v1, ID01500v1, ID013500v1, ID012500v1).

Comportamientos asociados al grupo 2 son vistos en ensayos donde fue aplicado un esfuerzo de corte medio (preshearing) de 10 [kPa], tales como ID024010v1, ID 0201v2, ID0175010v1, a excepción del ensayo de ID01501v1. Se observa que para límites de deformaciones angulares menores a 3 [%], hay menor diferencia entre el valor de deformación angular media y cíclica mientras mayor sea la diferencia entre el esfuerzo de corte cíclico y el esfuerzo de corte medio aplicado; sin embargo, a medida que el umbral va aumentando, las diferencias entre los valores de deformación angular media y cíclica alcanzadas son independientes de los valores de esfuerzo de corte cíclico y esfuerzo de corte medio aplicado.

Ensayos pertenecientes al grupo 3 son aquellos en donde el esfuerzo de corte medio (preshearing) es del mismo valor que el esfuerzo de corte cíclico aplicado como son los ensayos ID024020v1, ID0202v2, ID01750175v2 (este último solo en casos de deformación angulares menores al 3 [%]) y en el ensayo con ID01501v1. Caso particular es lo que ocurre en este último ensayo, lo cual puede deberse a que la diferencia entre el esfuerzo de corte medio y cíclico aplicado es de 5 [kPa], lo cual es un valor que podría indicar un umbral en cuanto a la diferencia de comportamientos existentes entre los ensayos del grupo tres y del grupo dos.

El grupo 4 se compone de ensayos en donde la deformación angular cíclica es tan pequeña que no alcanza el valor de 1%, como ocurre con el ensayo ID012500v1, que presenta un valor máximo de 0.4%, o de ensayos que logran estabilizar sus valores dentro de un rango de deformación angular, que son principalmente los ensayos que presentan un esfuerzo de corte medio igual al esfuerzo de corte cíclico, como son los ensayos ID015015v2, ID01750175v2 (que se estabiliza en valores de deformación angular cercanos al 3%), ID0202v2 e ID01250125v1. Esta estabilización ocurre debido a la acumulación de deformaciones angulares medias, ya que no es observado un aumento en las amplitudes de deformaciones angulares cíclicas en estos ensayos. Dado que no es alcanzado el valor evaluado de deformación angular, estos valores no se encuentran graficados.

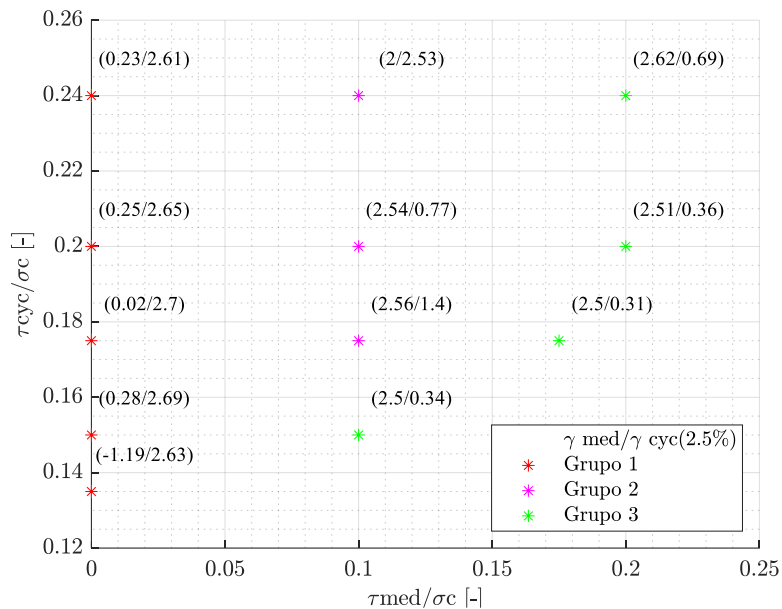


Figura 5-7: Diagrama de contorno a deformación angular =2.5%, separación en función de γ medio y γ cíclico

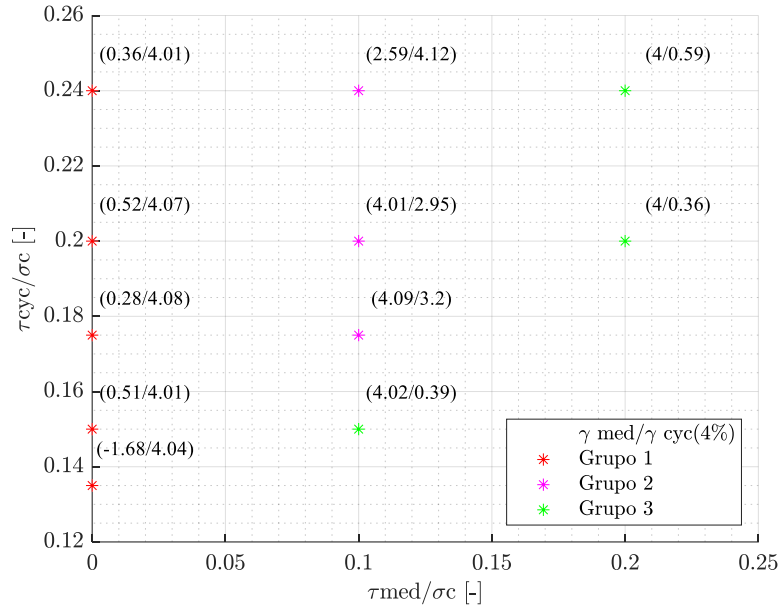


Figura 5-8: Diagrama de contorno a deformación angular =4% en función de γ medio y γ cíclico

5.4.2 Comportamiento número de ciclos

La cantidad de ciclos necesarios para alcanzar un valor de deformación angular media o cíclica de 2.5 o 4% se encuentran en las Figura 5-9 y Figura 5-10, respectivamente, observándose tendencias de comportamiento, agrupadas de la siguiente manera:

- Grupo 1: Son requeridos una cantidad pequeña de ciclos (menor a 100 ciclos) para alcanzar el valor de deformación angular media o cíclica.
- Grupo 2: Son requeridos una cantidad entre 100 a 210 ciclos para alcanzar la deformación angular media o cíclica.
- Grupo 3: Son requeridos más de 200 ciclos para alcanzar el valor de deformación angular media o cíclica.

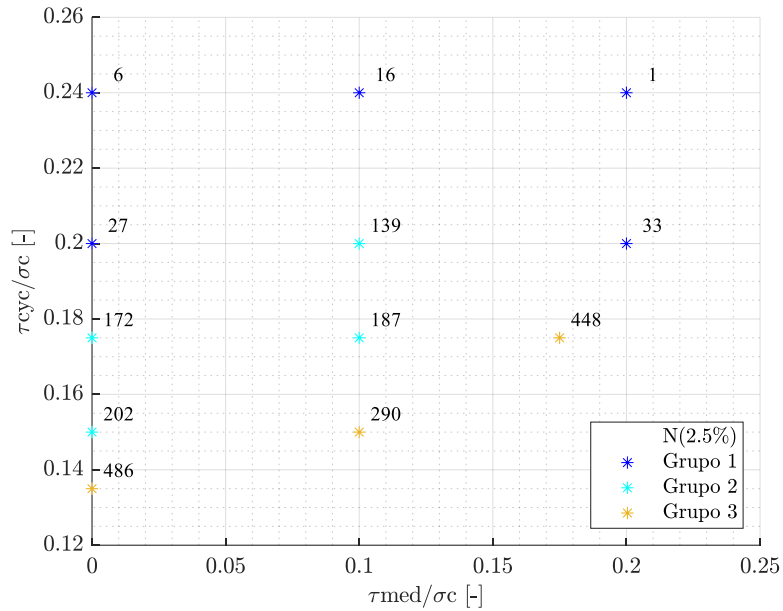


Figura 5-9: Diagrama de contorno a deformación angular =2.5% en función de N ciclos.

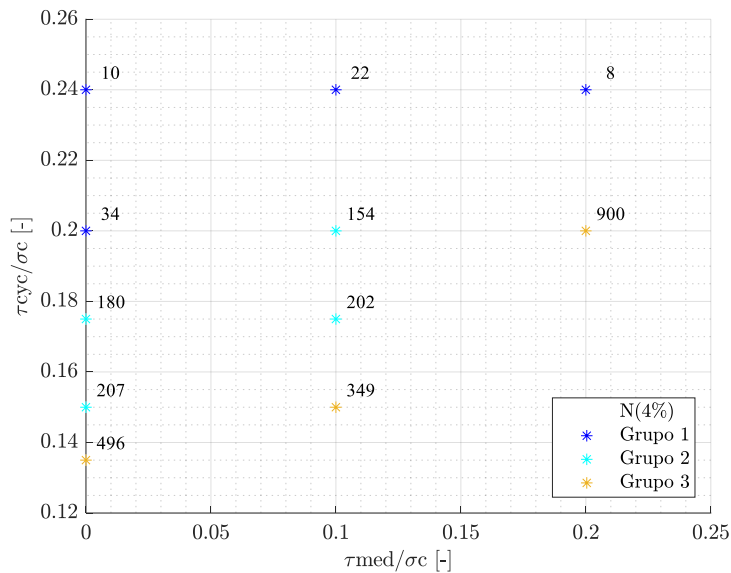


Figura 5-10: Diagrama de contorno a deformación angular =4% en función de N ciclos.

Es observado que mientras mayor esfuerzo de corte cíclico haya sido aplicado al ensayo, menor número de ciclos son requeridos para alcanzar la deformación angular media o cíclica evaluada, independiente del esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado. Con respecto al efecto del esfuerzo de corte medio aplicado (preshearing), bajo un mismo valor de esfuerzo de corte cíclico, mayores cantidades de ciclos son requeridas para alcanzar un mismo valor de deformación angular (media o cíclica) dada. Sin embargo, es necesario considerar el valor de deformación angular generado por el preshearing, ya que ensayos sometidos a altos preshearing, como es el caso de ID02402v1 para una deformación angular de 2.5%, pueden alcanzar este valor evaluado durante la aplicación del preshearing

o alcanzar valores cercanos, con tal de requerir una pequeña cantidad de ciclos para alcanzar el valor de deformación angular, como es el caso de ID0202v2.

Con respecto a la diferencia existente entre los comportamientos observados para los casos de deformación angular umbral de 2.5 y 4%, en general se observa que los grupos descritos anteriormente siguen un mismo patrón de comportamiento, independiente del valor de deformación angular media o cíclica a evaluar (2.5 o 4%). Los ensayos que se encuentran en el grupo 1 son los ensayos de ID02400v1, ID024010v1, ID024020v1 e ID0200v1. Los ensayos que se encuentran en el grupo 2 son ID0201v2, ID017500v1, ID0175010v1 e ID01500v1. Los ensayos pertenecientes al grupo 3 son ID013500v1, ID015010v1, ID01750175v2, que se encuentran graficados en las Figura 5-9 y Figura 5-10 como también los ensayos ID015015v2, ID01250125v2 e ID012500v1, los cuales no son presentados en los gráficos, debido a que son requeridos más de 1000 ciclos para alcanzar los valores evaluados.

Un caso particular es lo que ocurre con el ensayo ID0202v2, ya que 33 ciclos son requeridos para alcanzar una deformación angular de 2.5% lo cual lo sitúa en el grupo 1, mientras que 900 ciclos son requeridos para alcanzar una deformación angular de 4% situándolo en el grupo 3. Esta diferencia, que se puede observar en la Figura 5-11 radica en que, durante los primeros ciclos, alcanza rápidamente el valor de 2.5% de deformación angular ya que presenta una componente de deformación angular de 0.603 % asociada a la aplicación del corte medio (preshearing) y dado la amplitud cíclica de esfuerzo de corte, ocurre inicialmente un aumento de deformación angular, el cual empieza a estabilizarse con el transcurso de los ciclos.

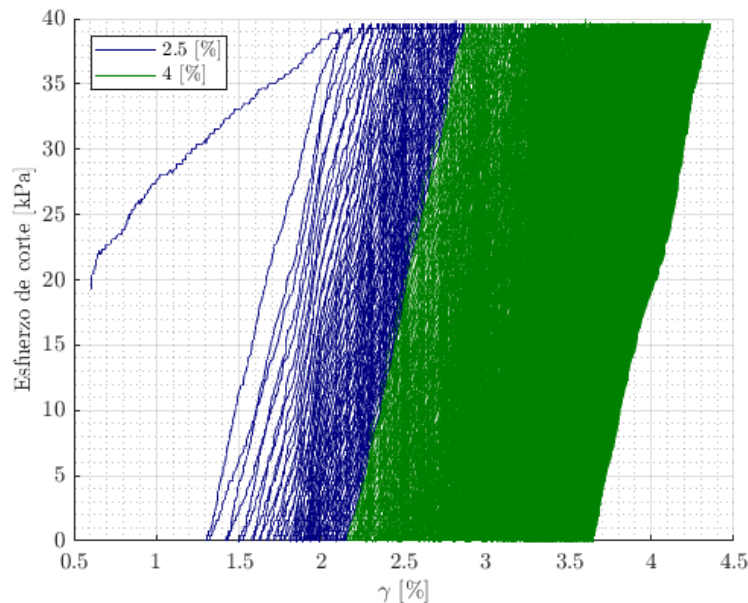


Figura 5-11: Comportamiento esfuerzo de corte versus deformación angular ensayo ID0202v2.

5.4.3 Diagrama de contorno propuesto para el suelo estudiado

En base a lo analizado en las secciones 5.4.1 y 5.4.2, se establece que la cantidad de ciclos requerida para un valor de deformación angular (media o cíclica) depende del esfuerzo de corte cíclico y medio (preshearing) aplicado al ensayo. Dependiendo de la combinación aplicada es la respuesta que tendrán las deformaciones angulares, ya sea media o cíclica del ensayo, generándose estabilización de la deformación angular acumulada a una cierta cantidad de ciclos bajo la existencia de esfuerzos de corte medio (preshearing) aplicados.

En caso de extrapolar estos resultados a comportamiento suelo-estructuras, es necesario conocer el valor de deformación angular umbral para el cual es válido considerar la validez de estos resultados, tal como los diagramas de contornos en literatura, que señalan, por ejemplo, valores de deformaciones angulares de 10% (Andersen, 2015). Para efectos de lo observado en los ensayos realizados y en función de sus comportamientos, se plantea el diagrama de contorno de la Figura 5-12 basado en el número de ciclos requerido para alcanzar una deformación angular media o cíclica de 4%. El “grupo 1” necesita menos de 100 ciclos, “el grupo 2” entre 100 y 250 y el “grupo 3” entre 250 hasta 1000 ciclos para alcanzar la deformación angular esperada. El “grupo 4” no se presenta en el gráfico, sin embargo, agrupa a aquellos ensayos que requieren más de 1000 ciclos para alcanzar la deformación angular cíclica o media evaluada.

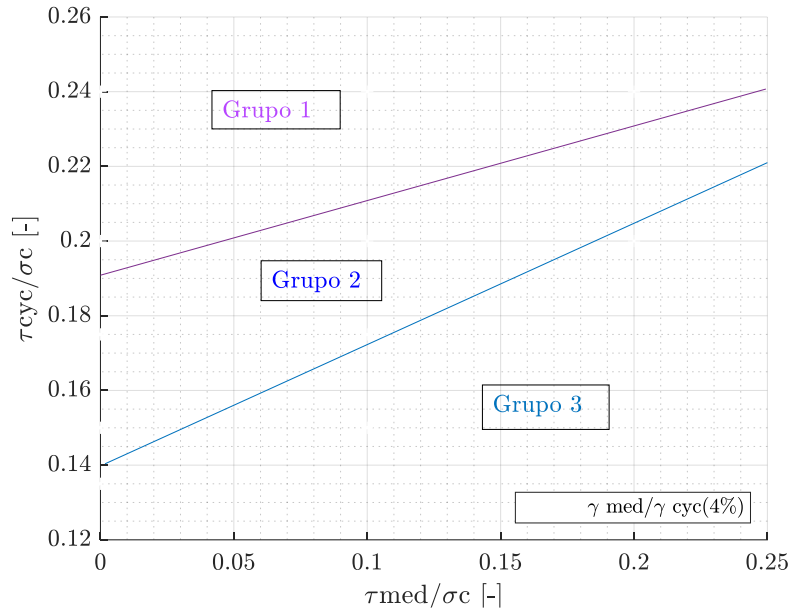


Figura 5-12: Grupos definidos en función de ciclos a deformación angular de 4%

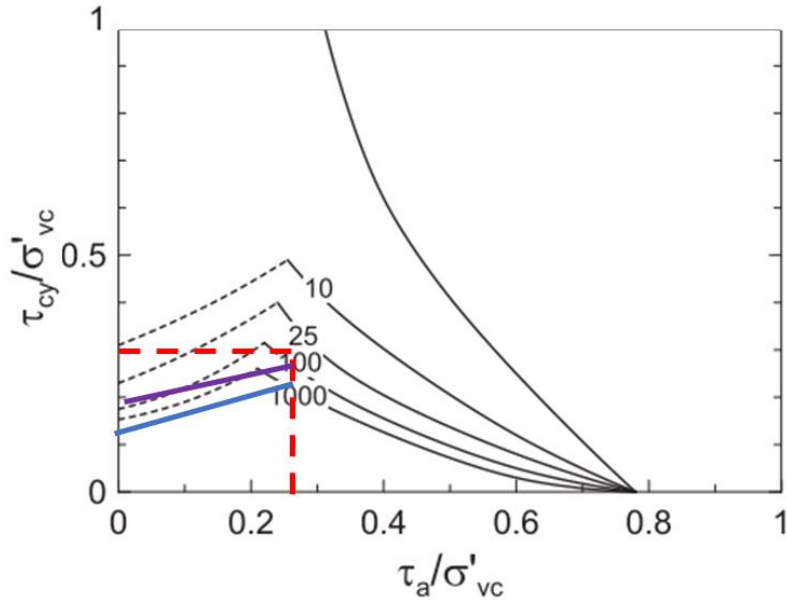


Figura 5-13: Diagrama de contorno a una deformación angular 5% (Extraído de Blaker y Andersen, 2019)

Al comparar este diagrama con los estados estable, metaestable e inestable (Jardine et. al, 2012), es observado que existe la tendencia sobre 1000 ciclos de un estado de estabilidad y por debajo de 100 ciclos un estado de inestabilidad concordante con lo descrito en literatura. Sin embargo, existe una subdivisión existente al comportamiento metaestable, en donde es postulado un estado intermedio más amplio, en el cual a efectos de este estudio se subdividió en los grupos 2 y 3.

En la Figura 5-13 se compara lo propuesto con el diagrama de contorno obtenido por Blaker y Andersen (Blaker y Andersen, 2019) para una arena limpia, a una densidad relativa de 77% y sometida a un precycling de 400 ciclos con un esfuerzo de corte cíclico de 12 [kPa]. Lo delimitado en rojo dentro de la figura, es el marco de valores a los que fueron sometidos los ensayos propios de este estudio, marcando con los colores correspondientes los límites definidos en este estudio (límite entre “grupo 1” y “grupo 2”; “grupo 2” y “grupo 3”). Se observan tendencias similares entre ambos resultados a pesar de la existencia de precycling en el resultado visto en literatura.

5.5 Trayectorias de esfuerzos

5.5.1 Efecto de amplitud de esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado

Con el fin de complementar lo descrito en las secciones anteriores, se realizan las trayectorias de esfuerzos de los ensayos cíclicos realizados, según lo descrito en la Tabla 5-1. Con el fin de presentar los comportamientos descritos para cada una de las combinaciones realizadas, son utilizados los ensayos ID0200v4 (Figura 5-14), ID0201v2 (Figura 5-15) e ID0202v2 (Figura 5-16), ya que presentan una componente de esfuerzo de corte cíclico de 20 [kPa], variando el esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado en cada uno de ellos.

En las Figura 5-14, Figura 5-15 y Figura 5-16 se presenta la trayectoria de esfuerzo asociada a los ciclos $N=5, 10, 100, 500, 1000$ o hasta que la deformación angular cíclica o media alcanza el valor de 5%, señalándose el valor de N correspondiente.

Se observa que, en general, con el aumento de los ciclos, la trayectoria de esfuerzos tiende a acercarse a la línea de estado crítico en todos los casos, sin embargo, existe una notoria diferencia referente a la variación de esfuerzo vertical dependiendo de la existencia o no de corte medio (preshearing). Mientras mayor preshearing es aplicado al

ensayo en la etapa previa a los ciclos, requiere de una cantidad mayor de ciclos para alcanzar la línea de estado crítico, estabilizándose al llegar a este punto.

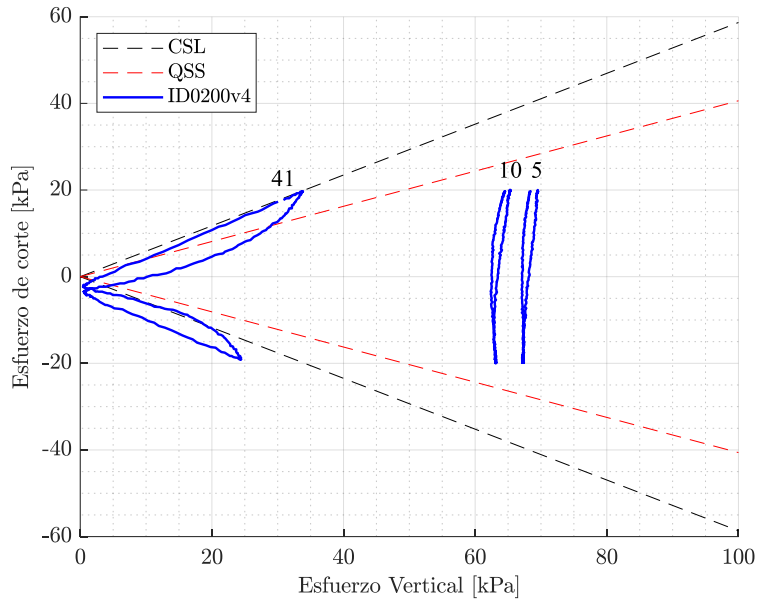


Figura 5-14: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID0200v4

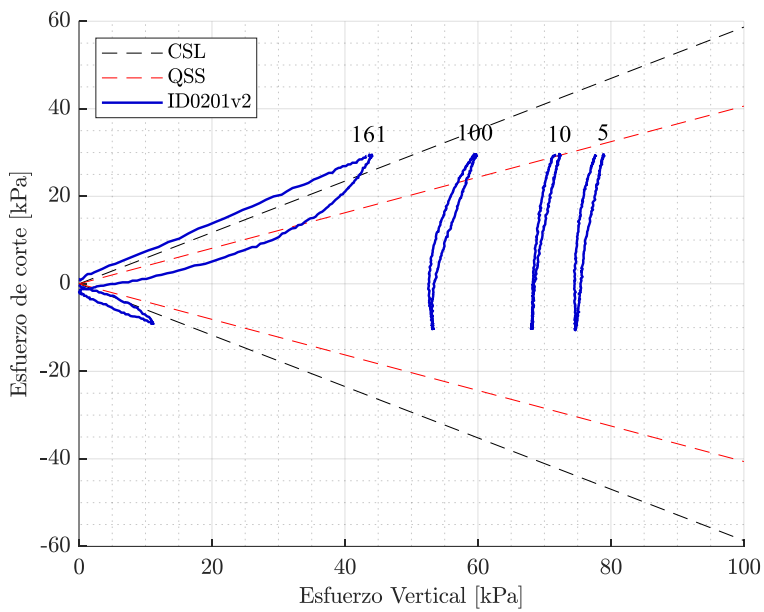


Figura 5-15: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID0201v2

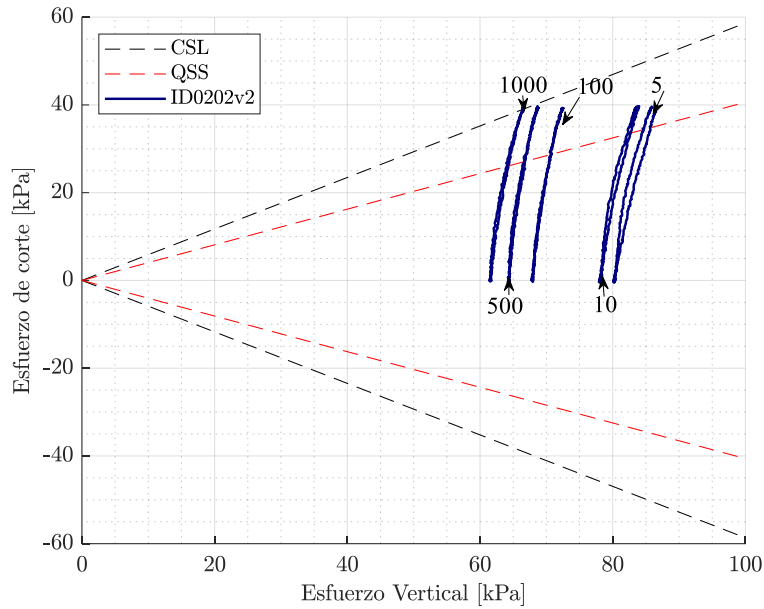


Figura 5-16: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID0202v2

Complementando lo señalado en las Figura 5-17, Figura 5-18 y Figura 5-19, se detalla el comportamiento de la deformación angular en función del esfuerzo de corte aplicado hasta que es alcanzado un límite de deformación angular media o cíclica de 5%.

Se observa que, para el ensayo ID0200v4 (Figura 5-17), a los pocos ciclos ($N=20$) comienza a aumentar drásticamente el valor de deformación angular, llegando en una cantidad corta de ciclos al valor evaluado. Para el caso ID0201v2 (Figura 5-18), existe una estabilización inicial, sin embargo, a una cierta cantidad de ciclos ($N=140$) existe un aumento en la deformación angular, la cual es predominante en una dirección, coincidiendo con la dirección asociada a la aplicación del preshearing. Para el caso ID0202v2 (Figura 5-19), se observa un aumento considerable en una primera etapa ($N=1$), asociado a la aplicación del preshearing, sin embargo, a medida que aumentan los ciclos, esta tasa de aumento de deformaciones angulares disminuye.

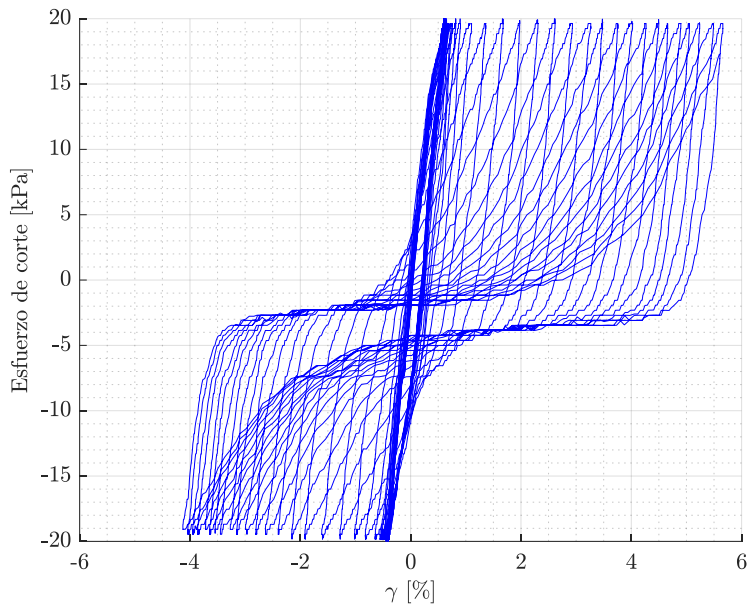


Figura 5-17: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID0200v4

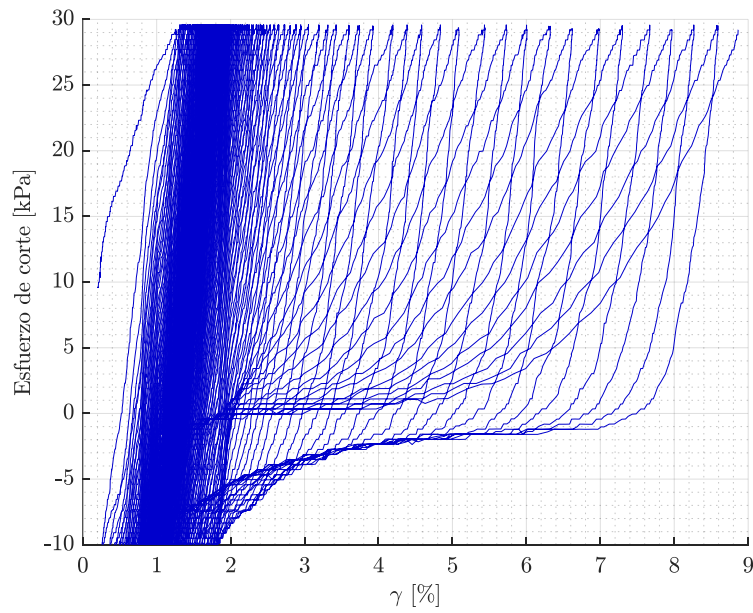


Figura 5-18: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID0201v2

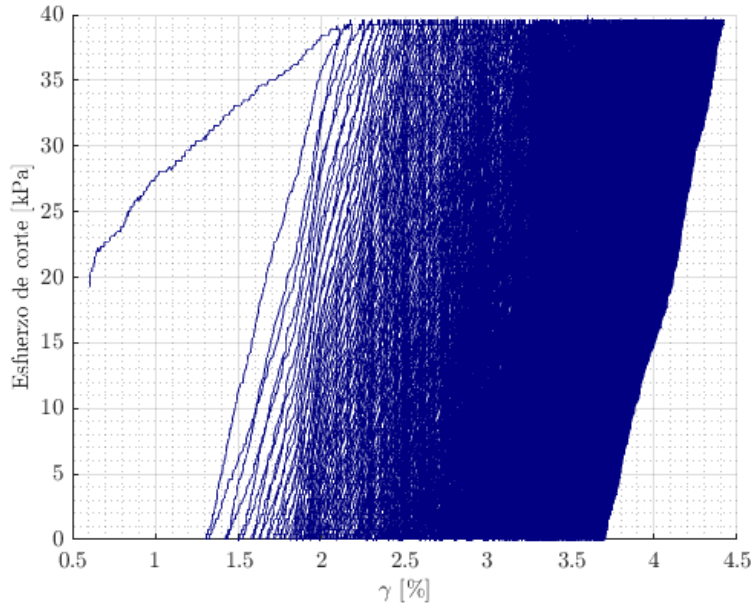


Figura 5-19: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID0202v2

Por lo tanto, la variación en el esfuerzo de corte medio (preshearing) influye en la tasa de variación del esfuerzo vertical existente, ya que mientras mayor preshearing aplicado, menor es la tasa de variación existente. Lo señalado, controla el comportamiento de la deformación angular. Mayores ciclos son requeridos para alcanzar valores de deformación angular mientras mayor esfuerzo de corte medio (preshearing) es aplicado, lo cual es reflejado en los diagramas de contorno descritos en la sección 5.4.

5.5.2 Efecto amplitud de esfuerzo de corte cíclico

Para analizar el efecto de la amplitud del esfuerzo del corte cíclico en el comportamiento del esfuerzo vertical, son analizados los ensayos ID024010v1 (Figura 5-20), ID017501v1 (Figura 5-21) e ID01501v1 (Figura 5-22). Estos tres ensayos seleccionados presentan la aplicación de un esfuerzo de corte medio (preshearing) de 10 [kPa], sin embargo, presentan una diferencia entre esfuerzo de corte cíclico y medio de 14 [kPa], 7.5 [kPa] y 5 [kPa] respectivamente. En las Figura 5-20, Figura 5-21y Figura 5-22 se presenta la trayectoria de esfuerzo asociada a los ciclos $N=5, 10, 100, 500, 1000$ o hasta que la deformación angular cíclica o media alcanza el valor de 5%, señalándose el valor de N correspondiente.

Se observa que, para el caso ID024010v1(Figura 5-20), es necesaria una menor cantidad de ciclos (27 ciclos) para alcanzar la línea de estado crítico, a diferencia del caso ID017501v1 (Figura 5-21)en donde para alcanzar la línea de estado crítico son requeridos 210 ciclos, mientras que para el caso ID01501v1 (Figura 5-22) son requeridos 389 ciclos. Es observado que la forma de la trayectoria de esfuerzos es similar para los casos ID024010v1 e ID017501v1, en donde es generada una trayectoria de esfuerzos con forma de mariposa “*Butterfly stress path*”, a diferencia del caso ID01501v1, en donde esto no es generado. Esta diferencia puede explicarse debido a que en ID01501v1 a pesar de que es alcanzada la línea de estado crítico, la reversión de esfuerzos existente no permite que exista una disminución total del esfuerzo vertical efectivo.

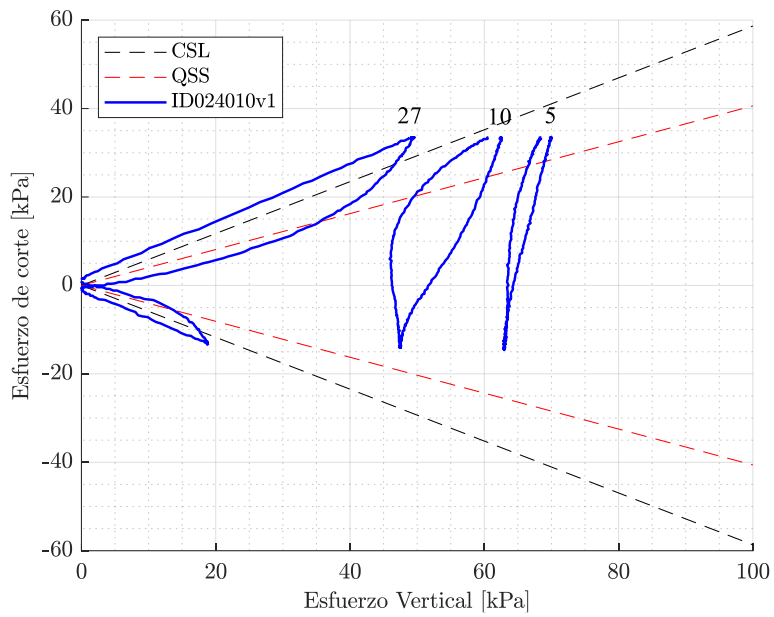


Figura 5-20: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID024010v1

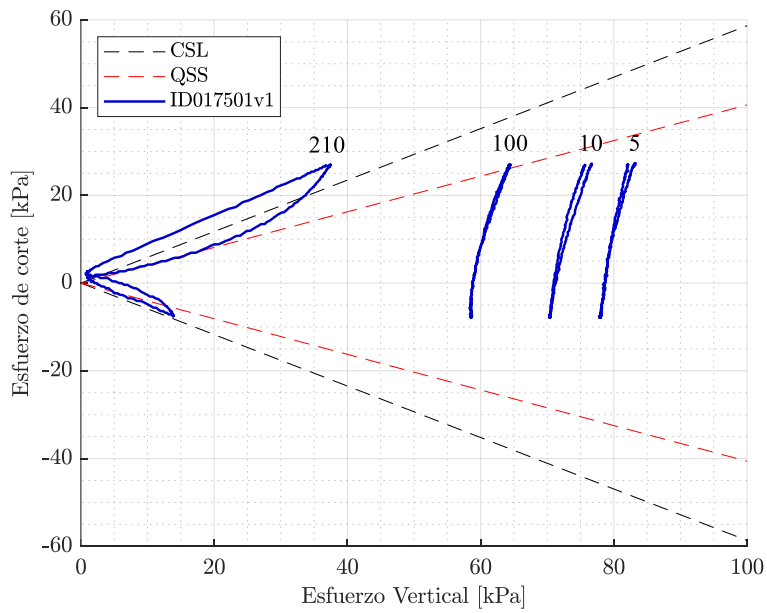


Figura 5-21: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID017501v1

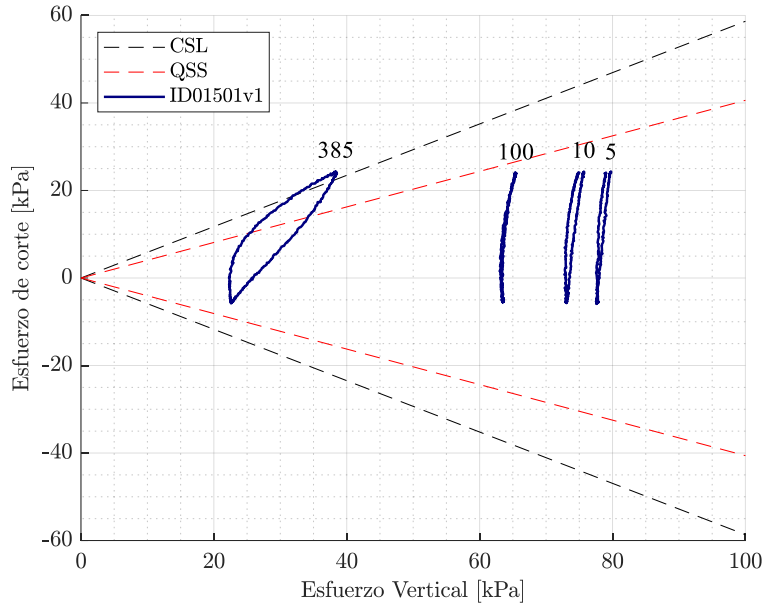


Figura 5-22: Trayectoria de esfuerzos ensayo ID01501v1

En las Figura 5-23, Figura 5-24 y Figura 5-25 se presenta el gráfico de deformación angular en función del esfuerzo de corte aplicado para los ensayos ID024010v1, ID0175010v1 e ID01501v1 respectivamente cuando es alcanzada una deformación angular o cíclica de 5%.

En el caso de ID024010v1, la deformación angular presenta un comportamiento levemente asimétrico, tal como es observada en la Figura 5-23. Para el caso ID017501v1, la deformación angular presenta un comportamiento inicial en donde existe una estabilización inicial de los valores de deformación angular, en donde luego se comporta de manera asimétrica en una dirección principal, generándose ciclos de histéresis con predominancia en la dirección del preshearing aplicado. Este cambio de comportamiento es relacionado con el efecto de alcanzar valores de esfuerzos verticales nulos. Respecto al caso ID01501v1, es observado que existe un comportamiento en el cual existe una tasa de crecimiento leve en el valor de deformación angular, no generándose los ciclos de histéresis vistos en los casos ID02401v1 e ID017501v1, ya que en el caso ID01501v1 no son alcanzados esfuerzos verticales nulos.

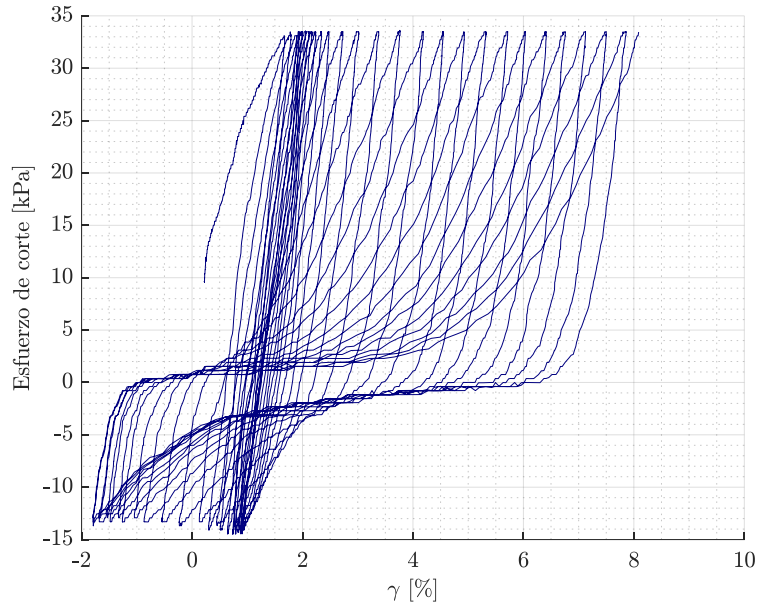


Figura 5-23: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID024010v1

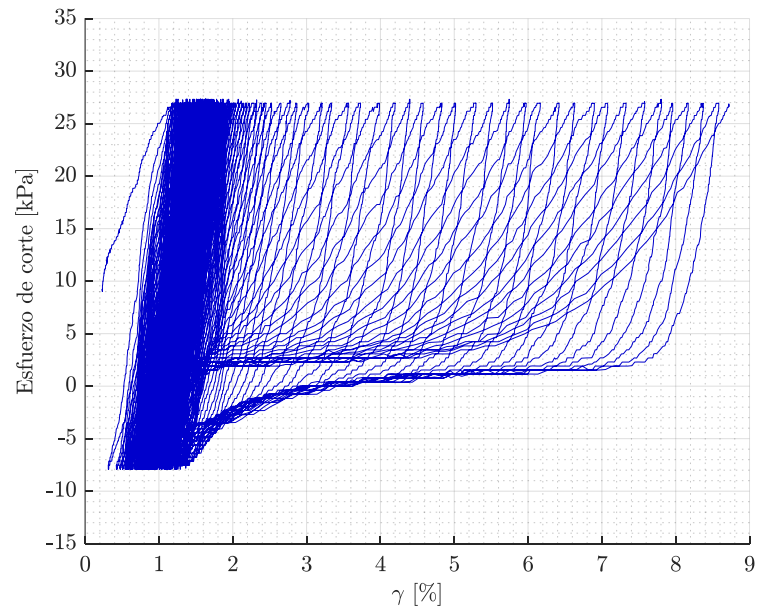


Figura 5-24: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID017501v1

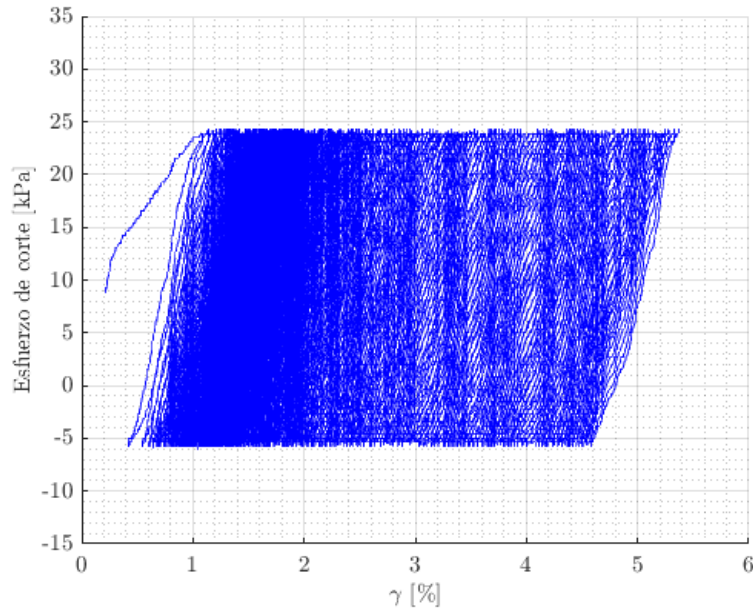


Figura 5-25: Comportamiento esfuerzo de corte vs deformación angular ensayo ID01501v1

5.6 Módulo de corte

El módulo de corte G es un parámetro importante en la respuesta dinámica de los suelos, ya que define el comportamiento existente entre el esfuerzo de corte y las deformaciones angulares. Para esta investigación se utilizó como referencia un valor de $G_{\text{máx}} = 55.5$ [MPa] (ElGhoraiby & Manzari, 2018), obtenido a partir de ensayos de medición de onda de corte utilizando una columna resonante en un suelo de similares características: Arena Ottawa F-65, con densidad relativa de 71.5% (valor densidad de 1671.9 [kg/m³]) y con esfuerzo vertical efectivo de 100 [kPa]. Este valor presenta una covarianza de 20.6%, es decir, oscila entre 66.933 y 44.607 [MPa], por lo tanto, es utilizado el valor promedio para fines de esta tesis.

5.6.1 Valores de módulo de corte versus amplitud cíclica

En la Figura 5-26 se presenta la variación del valor de módulo de corte normalizado por su valor máximo ($G_{\text{máx}}$) en función de la amplitud cíclica, es decir, la deformación angular cíclica en amplitud doble. Se observa una tendencia dentro de una franja definida, en donde el valor de módulo de corte va disminuyendo a medida que aumentan las deformaciones angulares.

En la Figura 5-27 se presentan los resultados del comportamiento del módulo de corte normalizado por su valor máximo ($G_{\text{máx}}$) en función de la deformación angular, para una arena Ottawa seca a un esfuerzo de consolidación de 100 [kPa], realizado por Alarcón-Guzmán (Alarcon –Guzman et al 1989, extraída de Oztopack y Bolton 2013). Son elegidos los resultados de este estudio dado las similitudes en cuanto al material y al esfuerzo de consolidación. Se comparan los resultados señalados por Alarcón-Guzmán y los resultados obtenidos en el presente estudio, presentándose comportamientos con tendencias similares.

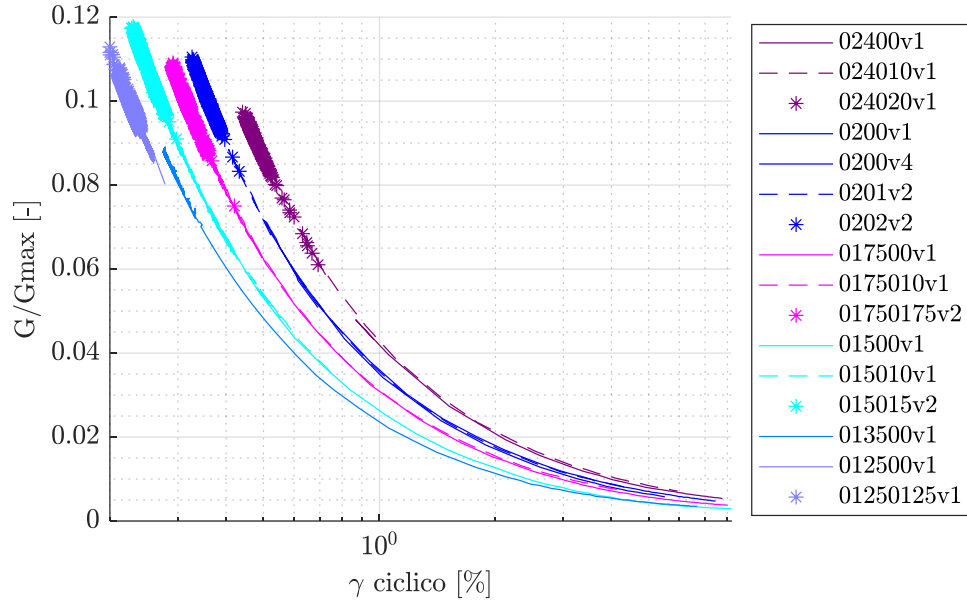


Figura 5-26: Módulo de corte versus deformación angular cíclica

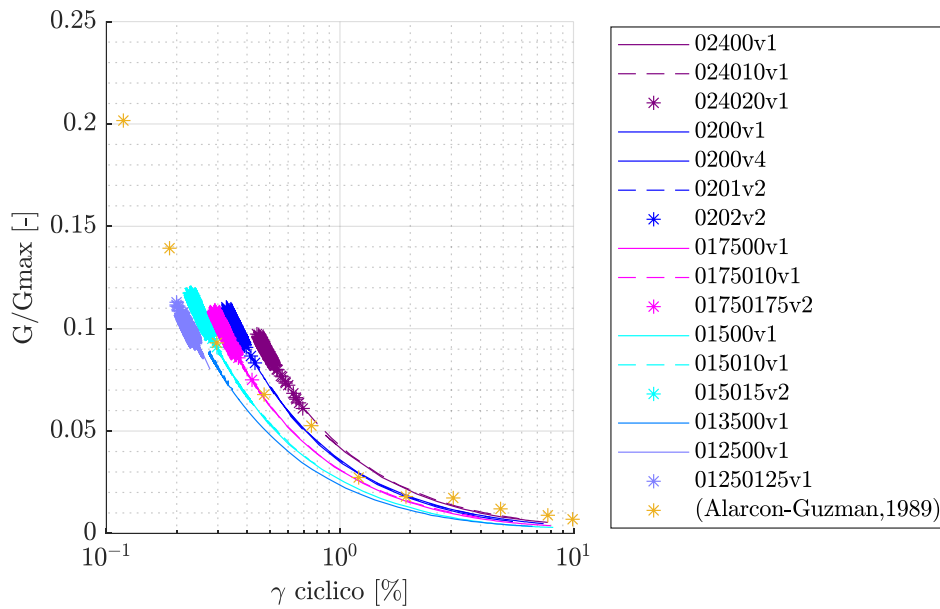


Figura 5-27: Comparación literatura módulo de corte versus deformación angular cíclica (Alarcon –guzman et al 1989, extraída de Oztopack y Bolton 2013)

5.6.2 Valores de módulo de corte versus número de ciclos

En las Figura 5-28, Figura 5-29 y Figura 5-30 se presenta el valor del módulo G normalizado por el valor de módulo G asociado al primer ciclo versus el número de ciclos (definido según Figura 5-2). Para una mejor claridad en los resultados obtenidos, estos son separados de acuerdo con los valores de esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado: en la Figura 5-28 cuando este valor es nulo, en la Figura 5-29 cuando es aplicado el esfuerzo de corte

medio de 10 [kPa] y en la Figura 5-30 cuando el esfuerzo de corte medio aplicado es igual al esfuerzo de corte cíclico.

En la Figura 5-28, cuando no existe aplicación de esfuerzo de corte medio (preshearing), se observa que mientras mayor sea el esfuerzo de corte cíclico aplicado, a una menor cantidad de ciclos comienza la disminución del valor del módulo de corte. Para los ensayos ID02400v1, ID0200v1 e ID0200v4 esto ocurre a una cantidad menor a 20 ciclos, mientras que para los ensayos ID017500v1, ID01500v1 e ID013500v1 esto ocurre pasado 100 ciclos. Para el ensayo ID012500v1, no existe variación significativa en el módulo de corte observable en 1000 ciclos. Con respecto a la tasa de variación del módulo de corte, se observa que para los ensayos ID02400v1, ID0200v1 e ID0200v4 ésta ocurre de forma gradual, mientras que para los ensayos ID017500v1, ID01500v1 e ID013500v1 ocurre de una manera abrupta.

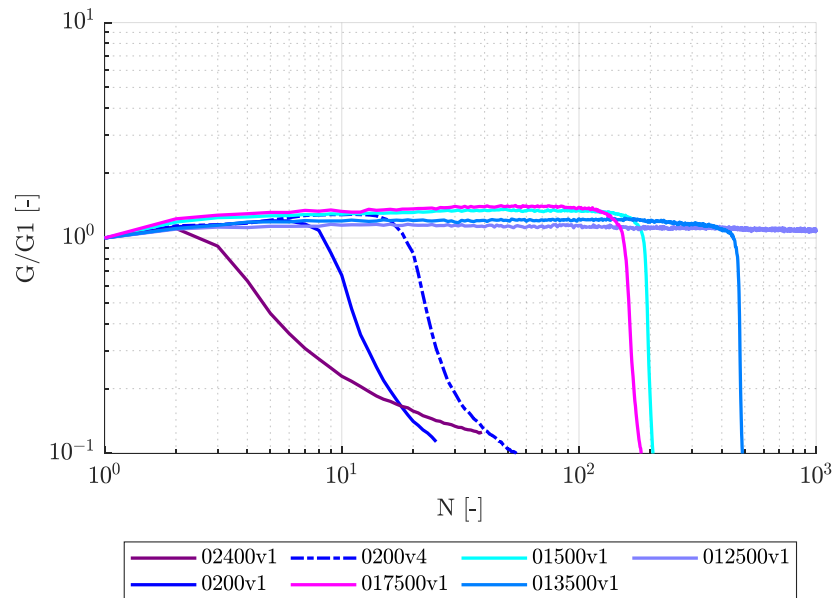


Figura 5-28: Módulo G versus ciclos - Caso $t_{med}=0$ [kPa]

En la Figura 5-29 se presentan los resultados del comportamiento del módulo G con existencia de preshearing de 10 [kPa]. Comportamientos similares al caso de esfuerzo de corte medio nulo aplicado ocurren, sin embargo, existe un aumento de la cantidad de ciclos a la que ocurre esta variación de módulo. Para el ensayo ID024010v1 ocurre a valores cercanos a 10 ciclos, mientras que para los ensayos ID0201v2 e ID0175010v1 ocurre cercano a los 100 ciclos. Para ID015010v1 esta variación de valor ocurre cerca de los 300 ciclos.

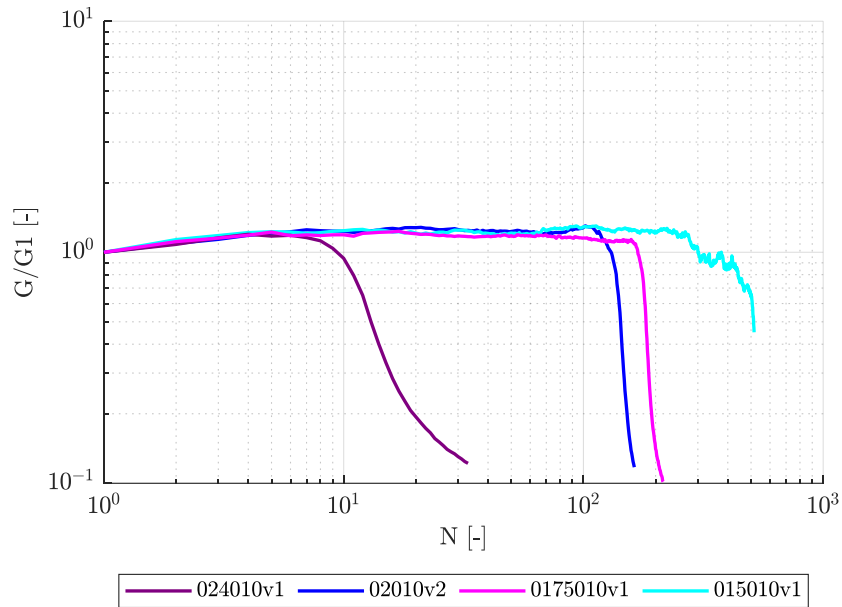


Figura 5-29: Módulo G versus ciclos - Caso $t_{med}=10$ [kPa]

En la Figura 5-30 se presenta el comportamiento del módulo G cuando el preshearing aplicado coincide con el esfuerzo cíclico de corte, tal como ocurre en los ensayos ID02020v2, ID01750175v2, ID015015v2 e ID01250125v2. Es observado que no se generan variaciones significativas en el módulo de corte, independiente del esfuerzo de corte cíclico aplicado.

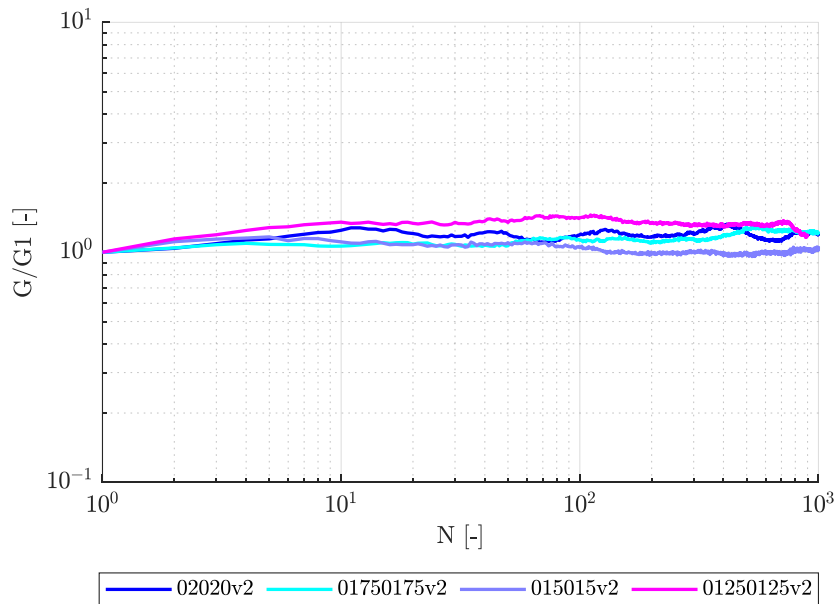


Figura 5-30: Módulo G versus ciclos - Caso $t_{med}=t_{cyc}$

A partir de lo observado en las Figura 5-28, Figura 5-29 y Figura 5-30, la aplicación del preshearing no genera un mayor aumento de resistencia en cuanto a magnitud, sin embargo, produce mayor resistencia en cuanto a la cantidad de ciclos requerida para comenzar a observar la degradación del material. Este comportamiento se encuentra

directamente ligado con el comportamiento de las deformaciones angulares cíclicas vistas en la Figura 5-6, ya que los patrones de comportamiento observados para el módulo de corte coinciden con lo visto para este parámetro. La deformación angular acumulada y la deformación angular media no influyen en el módulo de corte.

5.7 CSR vs número de ciclos

Se analiza el comportamiento de CSR en función de la deformación angular alcanzada por los ciclos, es decir, la suma entre la deformación angular media y la deformación angular cíclica, como fue definido en la Figura 5-2. En la Figura 5-31 se presentan los resultados obtenidos para este estudio, los que consisten en presentar valores de CSR (τ_{cy} / σ_c) versus el número de ciclos para alcanzar deformaciones angulares en amplitud simple de 3, 5 y 10%. Estos valores son presentados para ensayos cíclicos sin preshearing aplicado (ID02400v1, ID0200v4, ID017500v1, ID01500v1). En base a lo observado en la Figura 5-31, existe un aumento en la pendiente a medida que mayor es la deformación angular evaluada, observándose que para puntos de CSR igual a 0.15 y 0.175, los resultados son similares entre sí. Esto debido a que cuando son alcanzados estos valores de CSR, la muestra ya se encuentra aumentando rápidamente las deformaciones angulares generadas con los ciclos, lo cual se encuentra relacionado con el comportamiento visto en la sección 5.3.

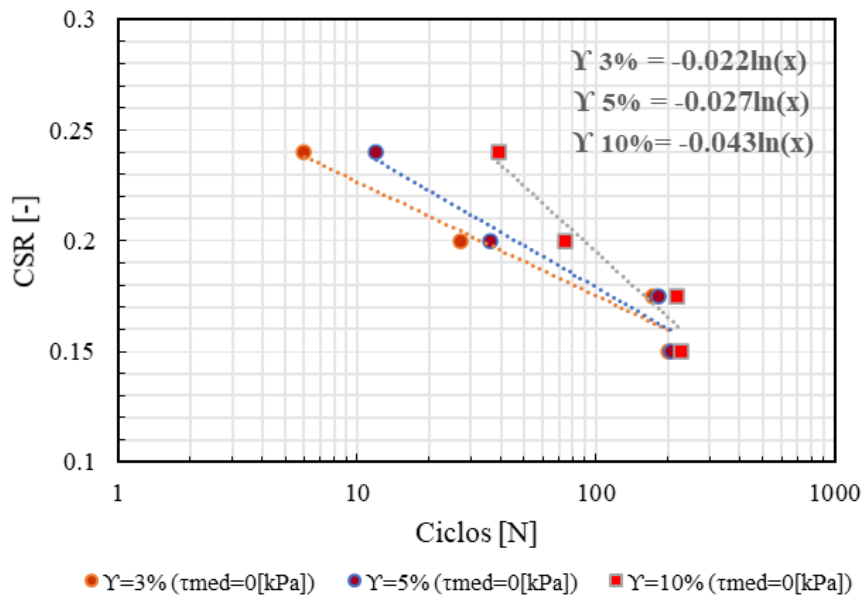


Figura 5-31: CSR vs número de ciclos

Las Figura 5-32, Figura 5-33 y Figura 5-34 se comparan los resultados obtenidos con otros ensayos realizados en equipo CDSS, en donde fueron evaluados valores de CSR versus el número de ciclos hasta alcanzar deformaciones angulares de 3% (Parra, 2016; Ziotopoulou y Morales, 2018), 5% (Parra, 2016; Blaker, 2019) y 10% (Blaker; 2019).

Los ensayos realizados por Parra (Parra,2016) fueron realizados en arena de Ottawa F-65, bajo condiciones de volumen constante, de manera saturada y a una densidad relativa de aproximadamente 70%, hasta un esfuerzo de consolidación de 100 [kPa]. Los ensayos de Ziotopoulou y Morales (Morales y Ziotopoulou, 2018), fueron realizados en arena de Ottawa F-65 a volumen constante, saturados y consolidados hasta un esfuerzo de consolidación de 100 [kPa], controlado por esfuerzos. Los ensayos propuestos por Blaker (Blaker, 2019) se ejecutaron hasta un esfuerzo de consolidación de 200 [kPa] en una arena de 93% de cuarzo, en la cual existe efecto de pre-cycling previo aplicado antes de los ciclos en condiciones de volumen constante.

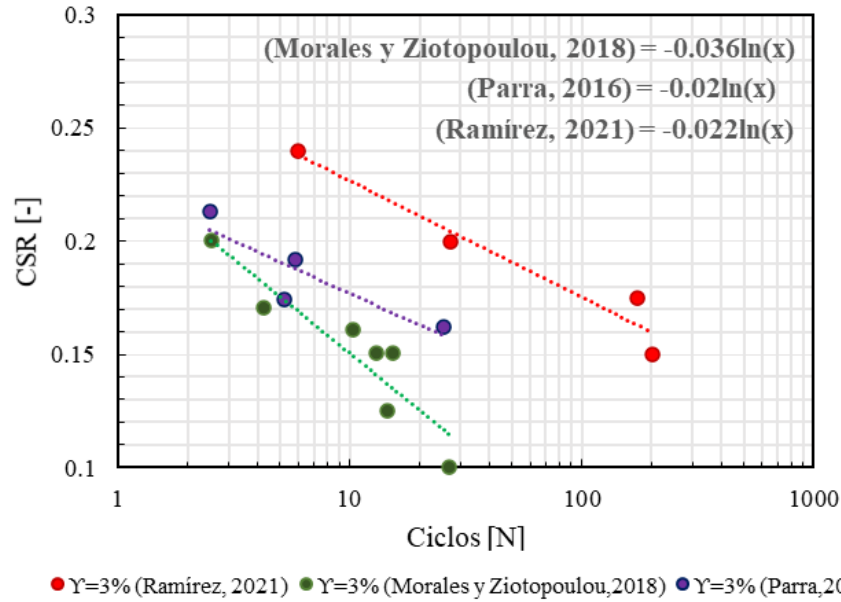


Figura 5-32: Comparación resultados CSR con literatura $\gamma=3\%$ (Parra, 2016; Morales y Ziotopoulou, 2018)

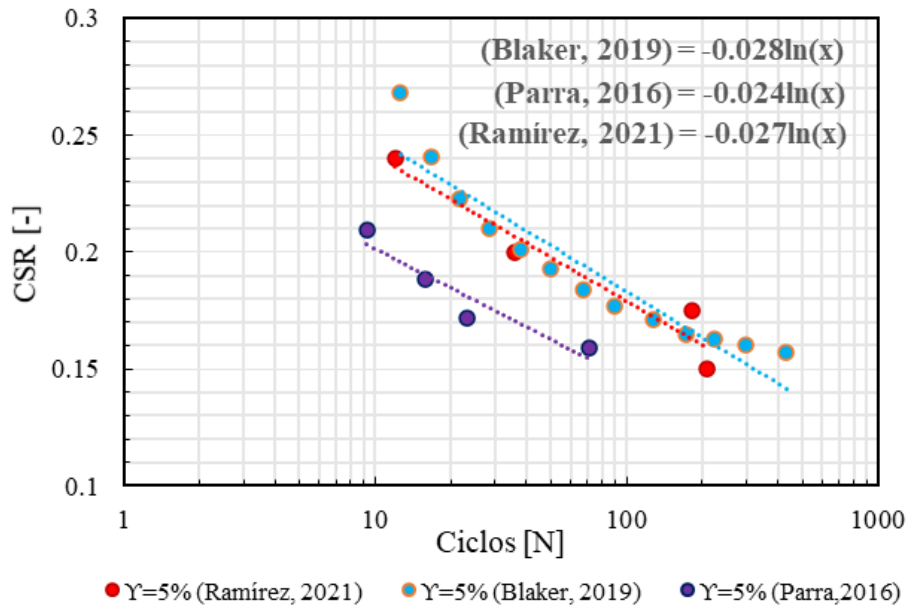


Figura 5-33: Comparación resultados CSR con literatura $\gamma=5\%$ (Parra, 2016; Blaker, 2019)

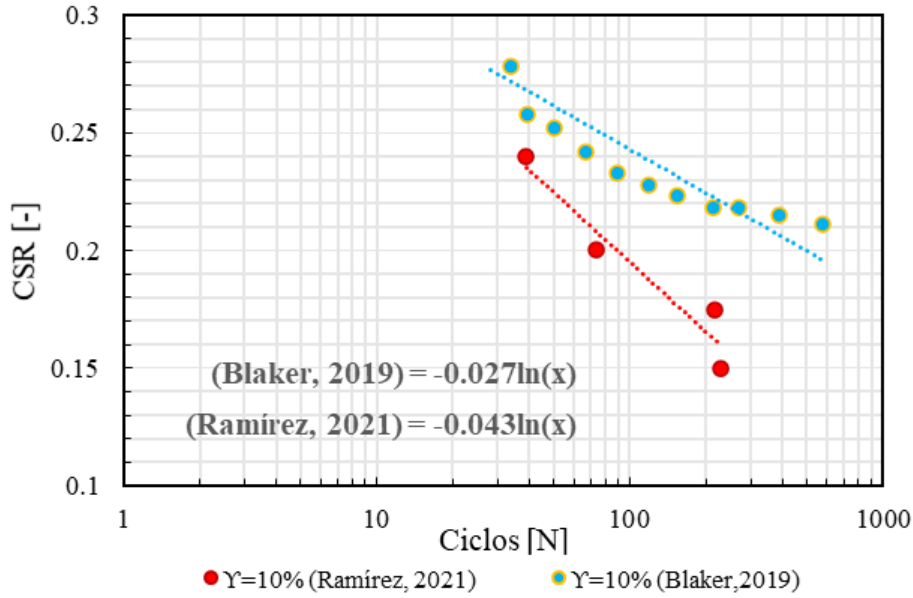


Figura 5-34: Comparación resultados CSR con literatura $\Upsilon=10\%$ (Blaker, 2019)

A partir de la Figura 5-32, se observa que los resultados obtenidos para este estudio presentan valores mayores a los obtenidos en literatura, es decir, fueron requeridos mayores cantidades de ciclos para alcanzar el valor de $\Upsilon=3\%$ evaluado. Sin embargo, al analizar la línea de tendencia de los resultados obtenidos, la pendiente obtenida en el presente estudio es similar a lo observado por Parra (Parra, 2016), mientras que valores mayores de pendiente fueron observados por Morales-Ziotopoulou (Morales y Ziotopoulou, 2018), la cual puede deberse a leves variaciones existentes en la granulometría utilizada.

En la Figura 5-33 se observa que los resultados obtenidos en este estudio, a $\Upsilon=5\%$ son, similares (Blaker, 2019) y mayores (Parra, 2016) a lo visto en literatura, sin embargo, las pendientes de las líneas de tendencia de cada uno de los ensayos presentan valores similares entre sí, sugiriendo que no existe efecto alguno en la diferencia de métodos de preparación de estos ensayos.

En la Figura 5-34, en cambio, existen diferencias considerables con lo visto en literatura (Blaker, 2019), ya que los resultados del presente estudios son menores a lo planteado por Blaker, es decir, fueron requeridos menores cantidades de ciclos para alcanzar el valor de $\Upsilon=10\%$, además, la pendiente de la línea de tendencia de los resultados obtenidos es mayor que la observada en los resultados de Blaker. Esto sugiere que existe un efecto asociado a la preparación de muestra que afecta en los resultados a deformaciones angulares elevadas.

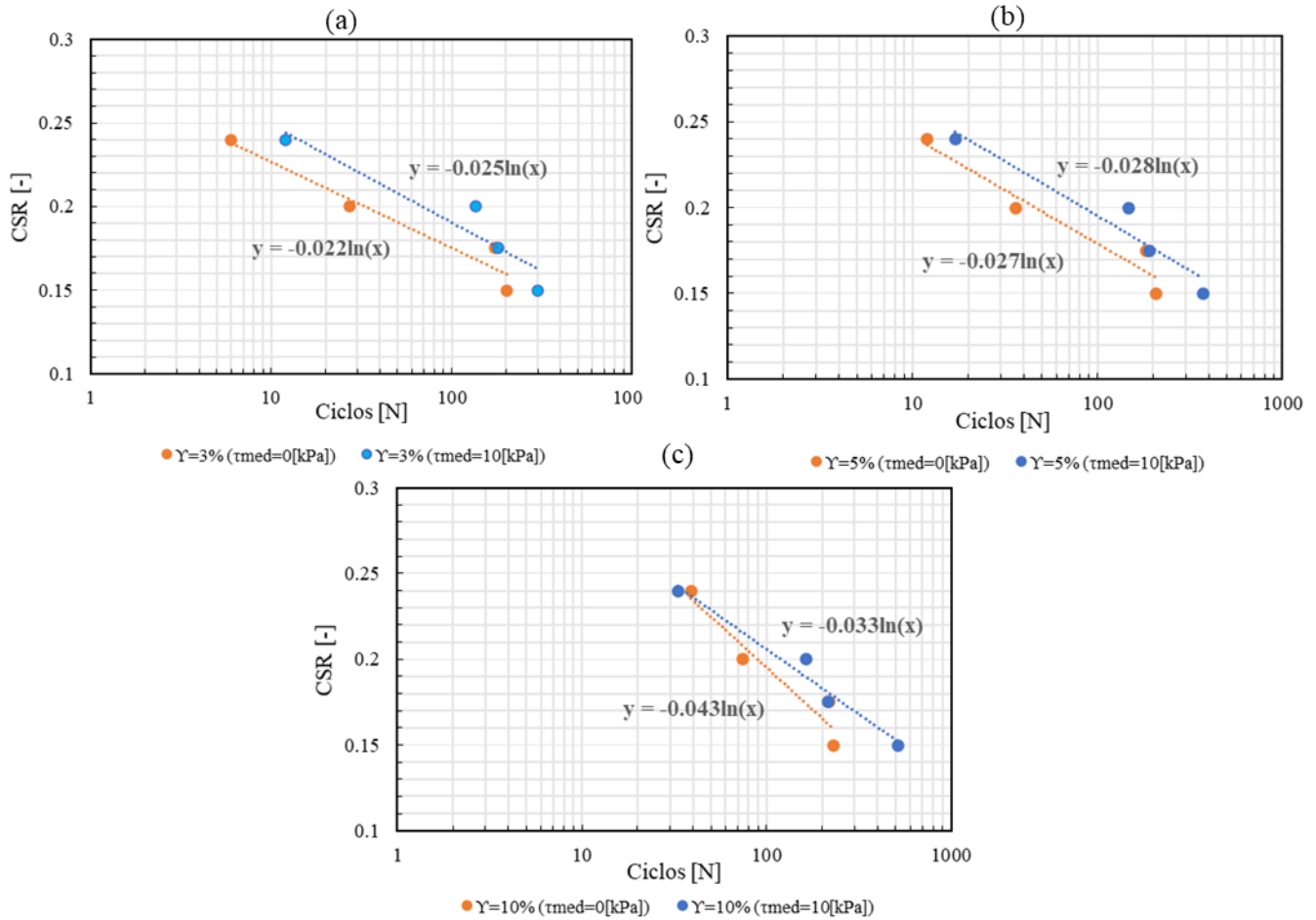


Figura 5-35: Comparación CSR con preshearing; a) $\gamma=3\%$ b) $\gamma=5\%$ c) $\gamma=10\%$.

En la Figura 5-35 se analiza el efecto de la aplicación de esfuerzo de corte medio de 10 [kPa] (preshearing) comparando los ensayos evaluados anteriormente con ensayos en donde fue aplicado este preshearing (ID02401v1, ID0201v1, ID017501v1, ID01501v1). En general para los casos a $\gamma=3\%$ y $\gamma=5\%$ (Figura 5-35.a y Figura 5-35.b), es observado un aumento de los valores de ciclos requeridos cuando el preshearing es aplicado, lo que también produce que, en el análisis de la línea de tendencia obtenida, se generen pendientes levemente mayores. Esto sugiere que el preshearing aplicado afecta en la deformación angular generada en los ensayos, estableciendo que la aplicación del preshearing genera menores deformaciones angulares, por ende, son requeridos mayor cantidad de ciclos para alcanzar una misma deformación angular.

Caso diferente se presenta a $\gamma=10\%$ (Figura 5-35.c), en donde a $CSR=0.24$ y $CSR=0.175$, son obtenidos valores similares de cantidad de ciclos requeridos, mientras que a $CSR=0.2$ y $CSR=0.15$ existe un aumento de ciclos requeridos cuando el preshearing es aplicado, esto último en concordancia al comportamiento visto en las Figura 5-35.a y Figura 5-35.b. La pendiente de la línea de tendencia es mayor en el caso cuando no existe preshearing aplicado y a su vez, ésta es considerablemente mayor que en el caso sin preshearing a $\gamma=5\%$ (diferencia de 0.016 [-]), a diferencia de lo que ocurre con la pendiente de la línea de tendencia para el caso en donde fue aplicado preshearing de 10 [kPa] (diferencia de 0.005), lo cual sugiere que la aplicación de preshearing genera una estabilización en los valores de deformación angular obtenidos a $\gamma=10\%$.

6 Resultados: Ensayos monótonos post ciclos

6.1 Introducción

Con el objetivo de estudiar la respuesta monótona post ciclos, se realizaron 12 ensayos CDSS con CSR (τ_{cy} / σ_c) de 0.15, 0.175 y 0.2 con un esfuerzo de corte medio (τ_{medio}) nulo. Los ensayos cíclicos se realizaron bajo condiciones de volumen constante y controlados por esfuerzos, con una tensión vertical inicial de 100 kPa.

Los ensayos monótonos se ejecutaron con posterioridad al alcanzar 1.15 [mm] durante la etapa cíclica, asociado a 5% de deformación angular. Para representar el corte monótono es aplicada una tasa de deformación horizontal constante de 0.1 [mm/min] hasta alcanzar un máximo de $\delta_{m\acute{a}x} = 5$ [mm]. Esta tasa de deformación se aplicó bajo condiciones de volumen constante (VC) como a presión vertical constante (PC).

En la Tabla 6-1 se presentan un resumen con las características de los ensayos realizados.

Los resultados de los ensayos monótonos post ciclos obtenidos se comparan con un valor referencial, siendo utilizados los valores de los ensayos ID_100_VC e ID_100_PC descritos en la sección 4.

Tabla 6-1: Ensayos realizados para el análisis de comportamiento monótono post ciclos

Número	ID	σ_c [kPa]	τ_{cy} [kPa]	CSR [-]	Número de ciclos requerido [-]	Aplicación corte monótono
1	02 A (VC)	100	20	0.2	19	Volumen cte.
2	02 A (PC)	100	20	0.2	23	Presión cte.
3	02 B	100	20	0.2	18	Volumen cte.
4	02 C	100	20	0.2	24	Volumen cte.
5	0175 A (VC)	100	17.5	0.175	157	Volumen cte.
6	0175 A (VC)	100	17.5	0.175	110	Presión cte.
7	0175 B	100	17.5	0.175	128	Volumen cte.
8	0175 C	100	17.5	0.175	34	Volumen cte.
9	015 A (VC)	100	15	0.15	248	Volumen cte.
10	015 A (PC)	100	15	0.15	314	Presión cte.
11	015 B	100	15	0.15	55	Volumen cte.
12	015 C	100	15	0.15	41	Volumen cte.

6.2 Consolidación

En la Figura 6-1 se aprecia el comportamiento de los ensayos frente a la consolidación inicial. Se observa que todas ellos se encuentran dentro de una misma banda, por lo cual se considera que presentan la misma condición inicial previo a los ciclos.

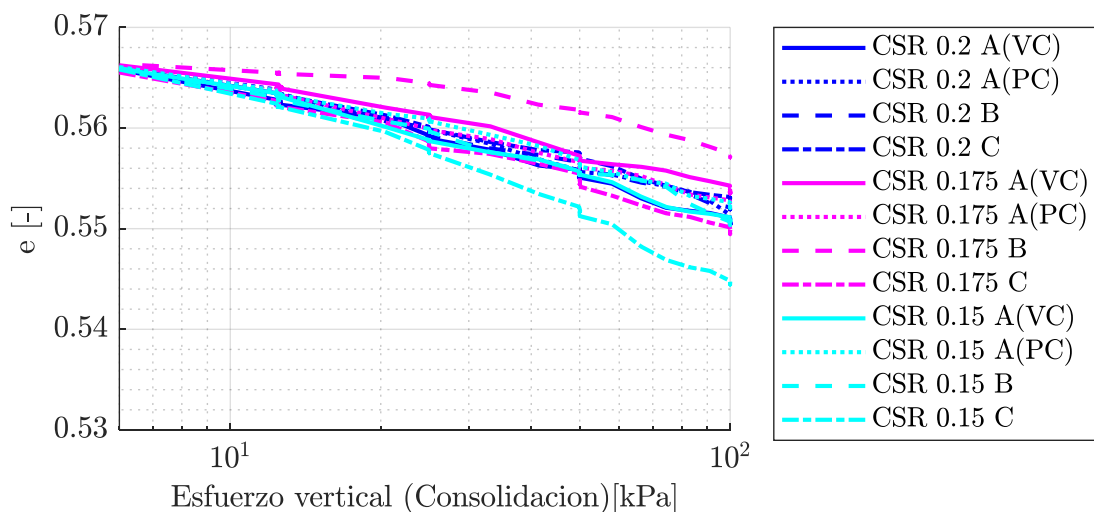


Figura 6-1: Consolidación de ensayos monótonos post ciclos

6.3 Etapa cíclica

La Tabla 6-2 presenta los valores de número de ciclos (N^*), esfuerzo de corte (τ residual post ciclos), deformación angular alcanzada (γ post ciclos) y esfuerzo vertical alcanzados para un γ de 5%. Existen diferencias entre el CSR aplicado y el número de ciclos N^* alcanzados, sin embargo, valores similares de esfuerzos verticales y de corte posteriores a esta etapa indican que en todos los casos el suelo ha presentado degradación de su respuesta.

Tabla 6-2: Valores alcanzados inmediatamente post ciclos

Número	ID	CSR	N^* [-]	τ residual post ciclos [kPa]	γ post ciclos [%]	Esfuerzo vertical [kPa]
1	02 A (VC)	0.2	19	-17.54	-5.08	24.27
2	02 A (PC)	0.2	23	18.83	5.04	27.19
3	02 B	0.2	18	-16.36	-5.07	29.23
4	02 C	0.2	24	-16.38	-5.07	23.96
5	0175 A (VC)	0.175	157	26.19	-5.05	26.19
6	0175 A (PC)	0.175	110	-16.04	-5.01	24.30
7	0175 B	0.175	128	15.3	-5.04	15.3
8	0175 C	0.175	34	28.22	5.08	28.22
9	015 A (VC)	0.15	248	-12.52	-5.07	20.18
10	015 A (PC)	0.15	314	-13.75	-5.03	19.21
11	015 B	0.15	55	12.67	5.07	22.72
12	015 C	0.15	41	9.23	5.11	21.76

*número de ciclos para alcanzar deformación angular de 5%

En detalles para cada ensayo de la Tabla 6-2 se presenta en el anexo 9.

Con respecto al comportamiento del suelo con los ciclos aplicados, presentan tendencias similares a los ensayos descritos en la sección 5, debido a que es realizado el mismo procedimiento. La diferencia radica en que para efectos

del análisis del ensayo monótono post ciclos, los ciclos se detuvieron cuando es alcanzado un desplazamiento horizontal de 1.15 [mm] (que representa un 5% de deformación angular).

6.4 Etapa monótona post ciclos

Inmediatamente concluida la etapa cíclica, tres posibles casos de condiciones iniciales para la etapa monótona post ciclos son presentados, los cuales son descritos como Caso A, Caso B y Caso C. El Caso A busca evaluar el efecto del cambio de volumen post ciclos, el Caso B busca evaluar el efecto de una deformación residual inicial en la respuesta monótona y el Caso C busca evaluar el efecto de un esfuerzo de corte residual inicial en la respuesta monótona. Los resultados obtenidos de esfuerzo de corte, deformación angular y esfuerzo vertical son presentados en la Tabla 6-3. Son analizadas las diferencias existentes dependiendo de las condiciones iniciales existentes en los casos monótonos post ciclos.

- Caso A: el esfuerzo de corte residual se lleva a 0, generándose un desplazamiento angular residual. A partir del esfuerzo vertical residual, una etapa de reconsolidación es aplicada hasta 100 [kPa] y es aplicado un corte monótono bajo condiciones de volumen y presión vertical constante a una velocidad de 0.1 [mm/min] hasta alcanzar un valor de deformación angular total de 30%. Para este caso, 6 ensayos son realizados: 3 a volumen constante y 3 a presión vertical constante.
- Caso B: el esfuerzo de corte residual se lleva a 0, generándose un desplazamiento angular residual. Se aplica un corte monótono bajo condiciones de volumen constante a una velocidad de 0.1 [mm/min] hasta alcanzar un valor de deformación angular total de 30%. A diferencia del caso A, no se re consolida la muestra. Para este caso, 3 ensayos son realizados.
- Caso C: retorno de deformación angular a cero, manteniendo un esfuerzo de corte residual y es aplicado un corte monótono bajo condiciones de volumen constante a una velocidad de 0.1 [mm/min] hasta alcanzar un valor de deformación angular total de 30%. A diferencia del caso A, no se re consolida la muestra. Para este caso, 3 ensayos son realizados.

Un diagrama de los casos antes mencionados se presenta en la Figura 6-2.

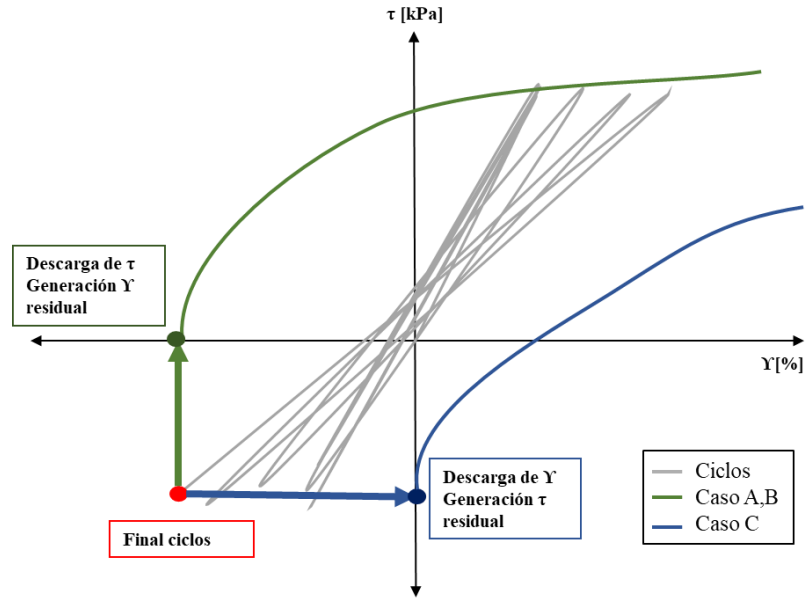


Figura 6-2: Diagrama explicativo Caso A, Caso B, Caso C

Tabla 6-3: Valores previo ensayo monótono post ciclo

Número	ID	τ inicio monótono [kPa]	γ inicio monótono [%]	Esfuerzo vertical inicio monótono [kPa]
1	02 A (VC)	-0.03	0.57	3.31
2	02 A (PC)	-0.02	2.54	0.4
3	02 B	0	-4.49	10.25
4	02 C	1.14	-0.02	2.88
5	0175 A (VC)	-0.03	-4.4	7.09
6	0175 A (PC)	-0.03	-3.37	1.73
7	0175 B	-0.02	-2.94	-0.42
8	0175 C	-6.17	0.03	0.84
9	015 A (VC)	0	-4.04	2.44
10	015 A (PC)	-0.05	0.32	1.52
11	015 B	0	4.65	7.77
12	015 C	-6.54	0.01	1.72

6.4.1 Caso A – Reconsolidación

En la Figura 6-3, se presenta la relación de vacíos generada entre la consolidación inicial y la reconsolidación post ciclos. La relación de vacíos presenta una variación de 1.8% al inicio de la etapa de reconsolidación, lo que implica una disminución de volumen con los ciclos. Con respecto a la reconsolidación de 100 [kPa] aplicada, en todos los casos genera una densificación del material.

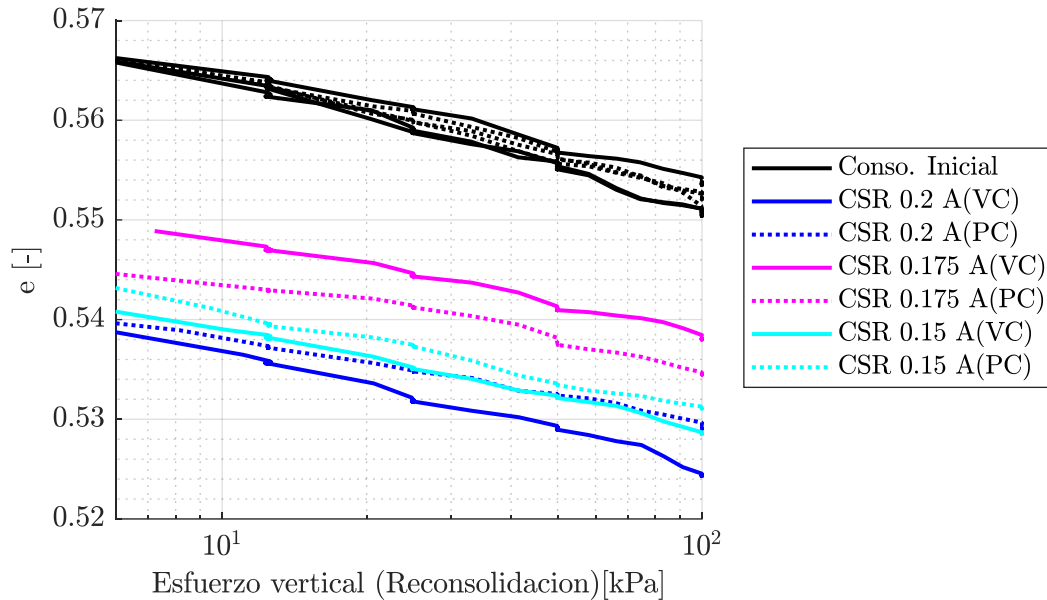


Figura 6-3: Reconsolidación casos A Volumen y Presión vertical constante

6.4.1.1 *Volumen constante*

En la Figura 6-4 se presentan los resultados de los ensayos realizados con esfuerzos de corte cíclicos de 20, 17.5 y 15 [kPa] con su correspondiente comparación con el ensayo monótono de esfuerzo de consolidación de 100 [kPa] previamente descrito en la sección 4.4. La Figura 6-4.a presenta el esfuerzo de corte en función de la deformación angular, la Figura 6-4.b presenta el comportamiento del esfuerzo vertical en función de la deformación angular, la Figura 6-4.c presenta el esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación y la Figura 6-4.d presenta el esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular.

En la Figura 6-4.a se presenta el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la deformación angular. Se observa que existe una variación del punto de partida referente a los desplazamientos angulares, lo cual es debido a la etapa cíclica y a las condiciones finales de este ensayo, sin embargo, el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la deformación angular en todos los casos presenta tendencias similares, reflejado en dos diferentes zonas de comportamiento y con variaciones leves en sus valores alcanzados.

En la Figura 6-4.b se presenta el comportamiento del esfuerzo vertical. Se observa una disminución del esfuerzo vertical inicial a medida que aumenta el desplazamiento angular, la cual es similar para todos los casos. Tras alcanzar un valor mínimo de 91 [kPa] para el caso ID02_A_VC y de 80 [kPa] para los casos ID0175_A_VC e ID015_A_VC, ésta comienza a aumentar a una tasa de crecimiento de 43.4 [kPa/%] similar en todos los casos. Para el caso referencial de 100 [kPa], la tasa de crecimiento de este valor es de 36 [kPa/%].

En la Figura 6-4.c se presenta el esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación. Es observada una contracción inicial reflejada en una disminución de tensiones verticales, para luego tener un aumento progresivo. Es posible que la densificación del material produce una recuperación en la leve pérdida de capacidad de resistencia obtenida.

En la Figura 6-4.d se presenta el comportamiento del esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular. Todos los ensayos presentan una tendencia similar, existiendo variación en el

valor inicial de la deformación angular, lo cual es debido a las condiciones iniciales existentes. Sin embargo, a medida que aumenta la deformación angular, todos los ensayos tienden a un mismo valor de 0.6 [-].

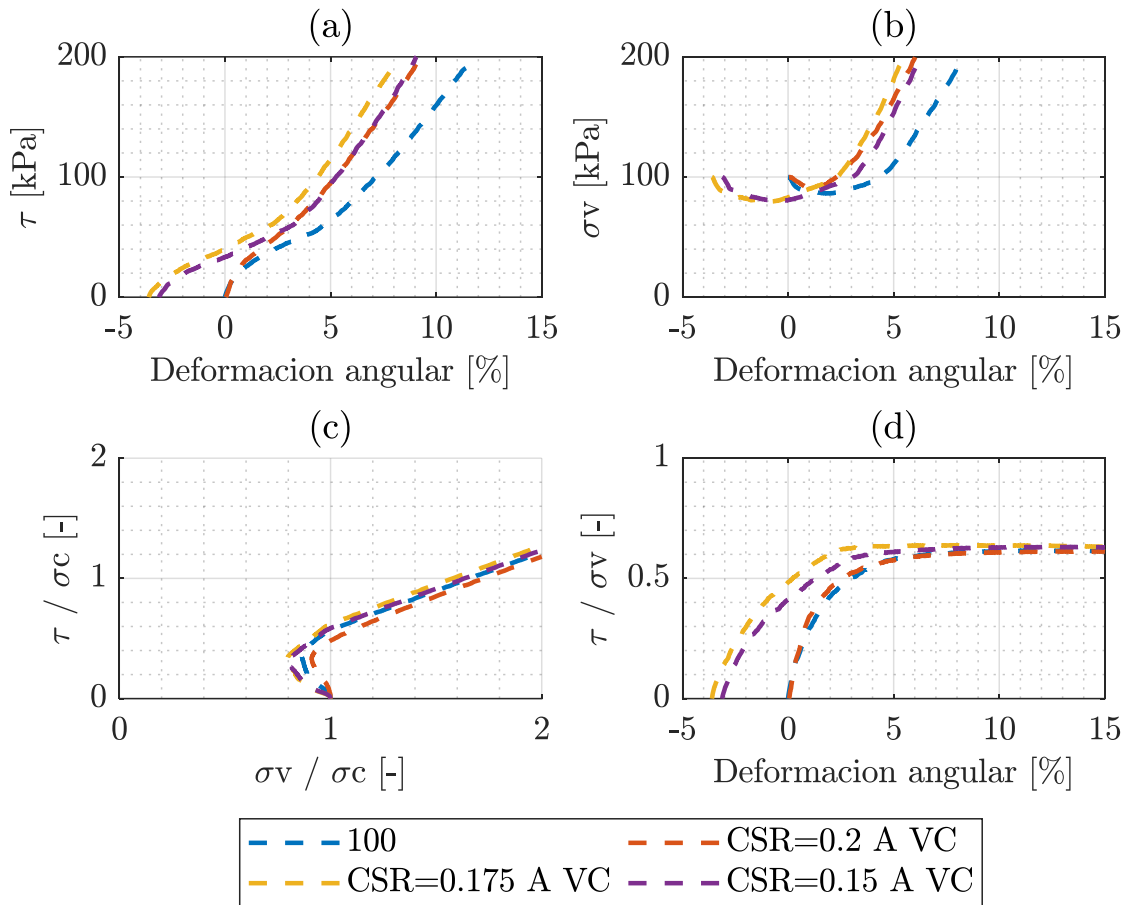


Figura 6-4: Comparación resultados ensayos monótonos post ciclos – Caso A Volumen constante a) Esfuerzo de corte vs deformación angular b) Esfuerzo vertical vs deformación angular c) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical de consolidación vs esfuerzo vertical normalizado por esfuerzo vertical de consolidación d) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical vs deformación angular

6.4.1.2 Presión constante

Para el análisis de los resultados obtenidos, en las Figura 6-5 y Figura 6-6 se presentan los resultados de los ensayos realizados con esfuerzos de corte cíclicos de 20,17.5 y 15 [kPa] con su correspondiente comparación con el ensayo monótono de esfuerzo de consolidación de 100 [kPa] previamente descrito en la sección 4.3.

En la Figura 6-5 se describe el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la deformación angular. Se observa que, a pesar de tener puntos de inicio distintos debido al estado inicial de deformaciones angulares que varía dependiendo del ensayo realizado, presentan el mismo comportamiento entre sí, sin embargo, existen diferencias en cuanto a los valores máximos y residuales. En general de la Figura 6-5, se observa que el ensayo CSR 0.15 presenta casi exactamente el mismo comportamiento que el observado en el ensayo monótono a 100 [kPa] referencial, esto puede ser debido a que, finalizada la etapa cíclica y al descargar la fuerza horizontal, el valor de la deformación angular es cercano a cero. Con respecto a los ensayos a CSR 0.2 y 0.175, presentan un desplazamiento en cuanto a su deformación angular, lo cual podría afectar en los valores máximos alcanzados, sin embargo, las

máximas diferencias alcanzadas son de aproximadamente 5 [kPa], lo que equivale a un 7% de variación aproximadamente.

En la Tabla 6-4 se presentan los valores de esfuerzo de corte máximo y de esfuerzo de corte residual alcanzado a una deformación angular de 20%, tanto de los ensayos evaluados (ID02_A_PC, ID0175_A_PC, ID015_A_PC) como del ensayo referencial utilizado (ID100_PC). Para el caso de esfuerzo de corte máximo se observa que el valor máximo obtenido aumenta mientras mayor amplitud cíclica es aplicada mientras que para el caso del valor de esfuerzo de corte residual a una deformación angular del 20% se observa que los ensayos con CSR de 0.15 y 0.175 presentan valores levemente mayores que el caso a comparar, sin embargo, para el ensayo de CSR 0.2 se observan valores mayores que los anteriores.

Tabla 6-4: Valores de esfuerzo de corte máximo y residual - Caso A Presión constante

Número	ID	τ máximo [kPa]	τ residual a $\gamma=20\%$ [kPa]
0	100 (PC)	70.36	64.19
2	02 A (PC)	75.38	70.74
6	0175 A (PC)	73.42	64.57
10	015 A (PC)	71.15	64.58

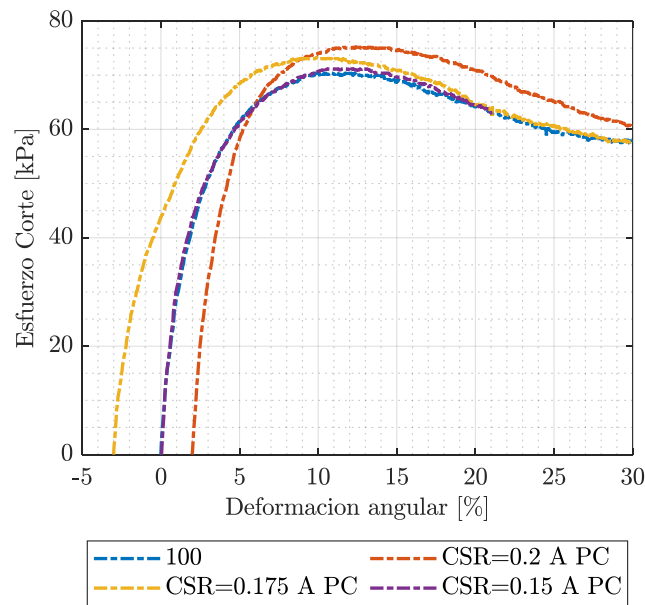


Figura 6-5: Comparación resultados ensayos monótonos post ciclos, comportamiento esfuerzo de corte y trayectorias de esfuerzo – Caso A Presión constante

En la Figura 6-6 se presentan dos gráficos: la Figura 6-6.a presenta la variación de desplazamiento vertical existente durante la etapa de corte monótono post cíclico en función de la deformación angular y la Figura 6-6.b presenta el comportamiento de la relación de vacíos en función de la deformación angular.

En el caso del desplazamiento vertical (Figura 6-6a), la variación experimentada presenta el mismo comportamiento en todos los casos, sin embargo, existen diferencias en cuanto a los valores máximos alcanzados, ya que para el

caso referencial (ID100_VC) la diferencia es de 0.5 [mm] mientras que para los casos a los que fue sometida la reconsolidación (ID02_A_VC, ID0175_A_VC, ID015_A_VC) es de alrededor de 1 [mm]. Esta diferencia radica en que, los ensayos al ser sometidos a una reconsolidación quedan en un estado más denso en comparación al estado referencial, por lo cual los efectos de dilatación generados durante la aplicación del esfuerzo de corte monótono son más marcados.

En la Figura 6-6.b, al observar el punto inicial de la relación de vacíos para los ensayos sometidos a reconsolidación, se reafirma lo dicho anteriormente. A medida que aumentan los valores de deformación angular se tiende a un valor único de relación de vacíos de la muestra para todos los casos. Esto se encuentra relacionado con la línea de estado crítico, la cual plantea que, independiente de la condición del ensayo, las muestras, tras la aplicación del corte tienden a una línea única dentro del espacio relación de vacíos versus esfuerzo vertical, tal como se presenta en la Figura 6-7 y similar a lo mostrado en la sección 4.5.

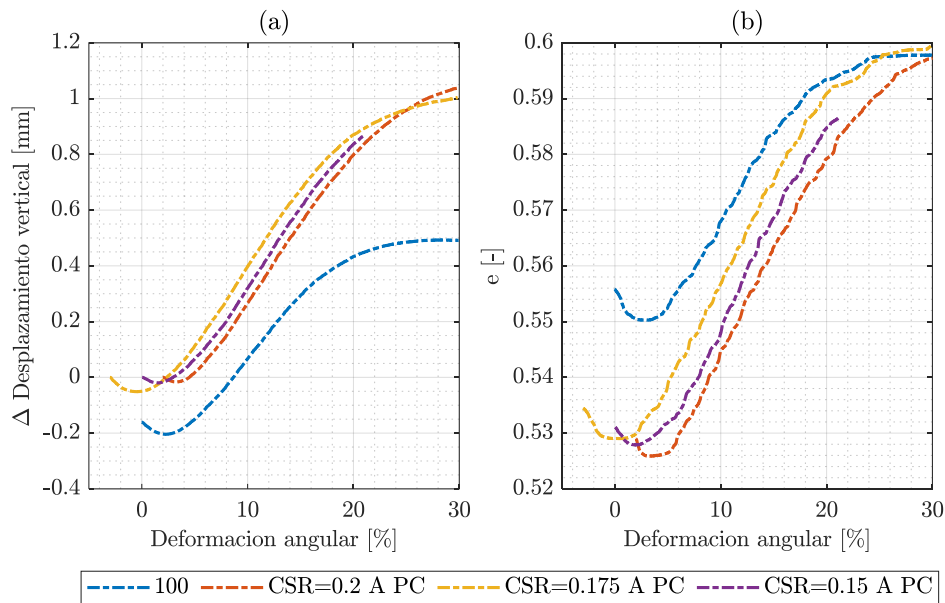


Figura 6-6: Comparación resultados ensayos monótonos post ciclos Caso A – Presión constante, a) Variación desplazamiento vertical vs deformación angular b) Relación de vacíos vs deformación angular

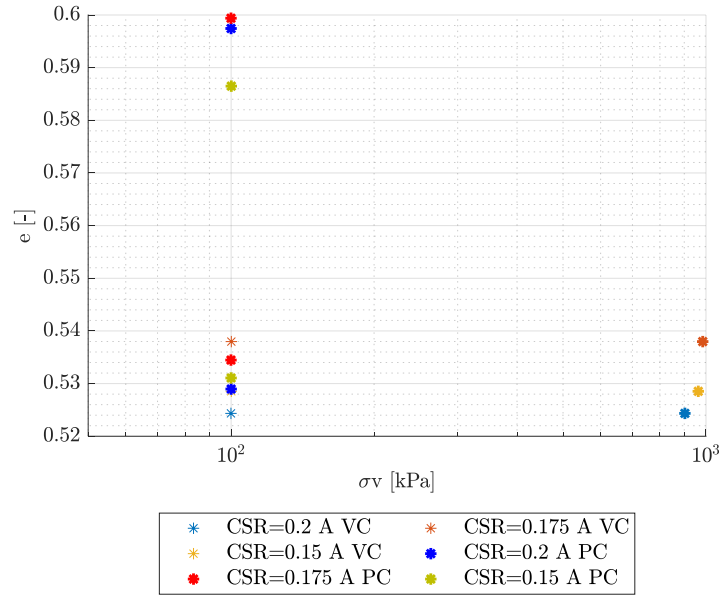


Figura 6-7: Tendencia línea de estado crítico

6.4.2 Caso B (Esfuerzo de corte residual cero)

En la Figura 6-8 se presentan los resultados asociados al Caso B (Esfuerzo de corte residual nulo: fuerza horizontal es descargada e inmediatamente es aplicado el esfuerzo de corte monótono bajo condiciones de volumen constante). Se grafica el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la deformación angular (Figura 6-8.a), esfuerzo vertical en función de la deformación angular (Figura 6-8.b), esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo de consolidación (Figura 6-8.c) y el esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular (Figura 6-8.d).

Con respecto al comportamiento de esfuerzo de corte en función de la deformación angular, en la Figura 6-8.a se observa que existe una disminución en la respuesta monótona post ciclos, ya que, a un mismo valor de deformación angular, se generan menores valores de resistencia a corte. La Figura 6-8.b presenta el comportamiento del esfuerzo vertical en función de la deformación angular. Se observa que el valor del esfuerzo vertical en el inicio del corte monótono post ciclos es muy pequeño, presentando valores muy cercanos a cero para los ensayos ID02_B_VC e ID0175_B_VC, por lo cual el material tiende solamente a dilatar. Explicación para la variación del esfuerzo vertical visto en la Figura 6-8.b puede deberse netamente a un reordenamiento interno de sus partículas, ya que este material fue ensayado en condición seca. Otro factor que influye es que, durante la etapa cíclica, la microestructura del material fue alterada permanentemente, sobrepasando el umbral que marca la diferencia del comportamiento en suelos, la cual para arena sin finos es de 0.01% (Vucetic, 1993).

En la Figura 6-8.c se observa que la pendiente observada en el gráfico de esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo de consolidación presenta el mismo comportamiento en todos los casos. Dado los valores iniciales cercanos a cero a los que se encuentran sometidos los ensayos al inicio de la aplicación del esfuerzo de corte monótono, es que no existe un punto inicial común con el ensayo referencial ID100_VC. Sin embargo, la pendiente generada tanto para el caso referencial ID100_VC como para los demás casos (ID02_B_VC, ID0175_B_VC, ID015_B_VC) coinciden entre sí.

En la Figura 6-8.d con respecto al comportamiento del esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular, a medida que aumenta la deformación angular, el esfuerzo vertical en todos los

ensayos va aumentando, tendiendo a un valor de 0.6[-], que corresponde al mismo valor observado para el caso monótono.

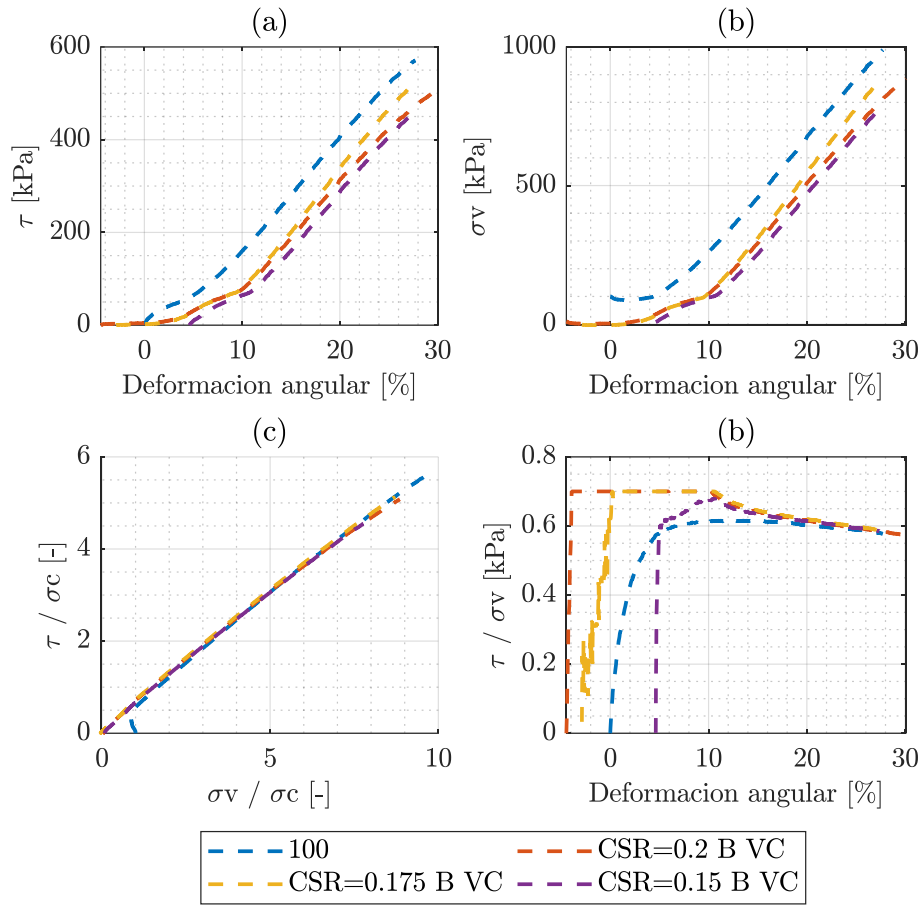


Figura 6-8: Comparación resultados ensayos monótonos post ciclos - Caso B a) Esfuerzo de corte vs deformación angular b) Esfuerzo vertical vs deformación angular c) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical de consolidación vs esfuerzo vertical normalizado por esfuerzo vertical de consolidación d) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical vs deformación angular

6.4.3 Caso C (Deformación angular cero)

En la Figura 6-9 se presentan los resultados asociados al Caso C, donde se grafica el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la deformación angular (Figura 6-9.a), y el esfuerzo vertical en función de la deformación angular (Figura 6-9.b), esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo de consolidación (Figura 6-9.c) y el esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular (Figura 6-9.d).

Con respecto al comportamiento de esfuerzo de corte en función de la deformación angular, en la Figura 6-9.a, se observa que existe una disminución en la respuesta monótona post ciclos, ya que, a un mismo valor de deformación angular, se generan menores valores de resistencia a corte. La Figura 6-9.b presenta el comportamiento del esfuerzo vertical en función de la deformación angular. Se observa que el valor del esfuerzo vertical en el inicio del corte monótono post ciclos es muy pequeño, presentando valores muy cercanos a cero por lo cual el material tiende solamente a dilatar. Explicación para la variación del esfuerzo vertical visto en la Figura 6-9.b puede deberse netamente a un reordenamiento interno de sus partículas, ya que este material fue ensayado en condición seca. Otro

factor que influye es que, durante la etapa cíclica, la microestructura del material fue alterada permanentemente, sobrepasando el umbral que marca la diferencia del comportamiento en suelos, la cual para arena sin finos es de 0.01% (Vucetic, 1993).

En la Figura 6-9.c se observa que la pendiente observada en el gráfico de esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo de consolidación en función del esfuerzo vertical normalizado por el esfuerzo de consolidación presenta el mismo comportamiento en todos los casos. Dado los valores iniciales cercanos a cero a los que se encuentran sometidos los ensayos al inicio de la aplicación del esfuerzo de corte monótono, es que no existe un punto inicial común con el ensayo referencial ID100_VC. Sin embargo, la pendiente generada tanto para el caso referencial ID100_VC como para los demás casos (ID02_C_VC, ID0175_C_VC, ID015_C_VC) coinciden entre sí.

En la Figura 6-9.d, con respecto al comportamiento del esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular, a medida que aumenta la deformación angular, todos los ensayos tienden a un valor de 0.6[-]. Este valor corresponde al mismo observado para el caso monótono sin ciclos previos.

Con respecto a los casos B y C, al observar las Figura 6-8 y Figura 6-9, los comportamientos descritos son similares, por lo cual no existe influencia alguna respecto a la existencia de deformación angular residual como esfuerzo de corte residual en la respuesta monótona post ciclos.

En cuanto a lo planteado en literatura, Con respecto a la variación de CSR evaluada, no presenta influencia alguna en los resultados. Esto es debido a que, una vez alcanzada una etapa en donde existe degradación de la respuesta, el comportamiento es similar, siendo acorde a lo planteado en literatura (Noorzad y Shakeri, 2017).

En cuanto a la diferencia entre el comportamiento monótono con y sin aplicación de ciclos, estudios realizados en arenas con limos aluviales mediante equipo CDSS (Dahl et. al, 2014) señalan que la razón entre la resistencia máxima entre la resistencia a corte obtenida post ciclos y la obtenida inicialmente disminuye a medida que aumenta el valor de deformación angular. Esto concuerda con lo visto en el presente estudio.

Por otra parte, ensayos monótonos post cíclicos realizados en arenas (Sivathayalan,1994) señalan que, si a un suelo que queda con esfuerzos verticales cercanos a cero es aplicada una carga monótona, el suelo en primera instancia deformará a nula rigidez. Mientras más denso el suelo, a menores valores de deformación angular comenzará a aumentar su rigidez hasta llegar a un valor constante, el cual será del mismo orden de magnitud que la rigidez de la arena cuando pasa la línea de transformación de fase durante los ciclos.

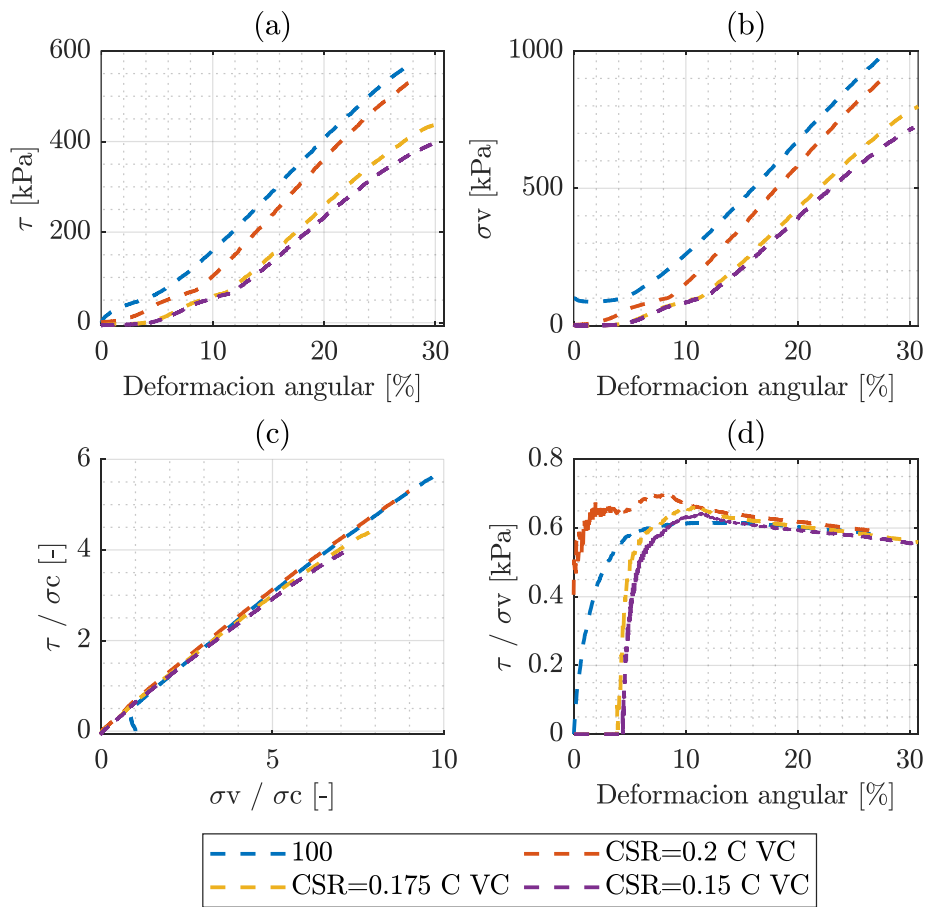


Figura 6-9: Comparación resultados ensayos monótonos post ciclos - Caso C a) Esfuerzo de corte vs deformación angular b) Esfuerzo vertical vs deformación angular c) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical de consolidación vs esfuerzo vertical normalizado por esfuerzo vertical de consolidación d) Esfuerzo de corte normalizado por esfuerzo vertical vs deformación angular

7 Conclusiones

7.1 General

Respecto al material estudiado, los valores obtenidos para este son concordantes a lo estudiado en literatura para otras arenas de Ottawa. El material se analizó en estado seco con el fin de evaluar netamente los efectos en el suelo, por lo cual lo planteado no se encuentra relacionado con efecto de licuefacción. Durante la etapa de consolidación inicial, todos los ensayos presentaron comportamientos similares, siendo los resultados obtenidos comparables entre sí.

7.2 Ensayos monótonos

Con respecto a los ensayos monótonos realizados, los ensayos a presión constante entregan resultados levemente mayores que los realizados a volumen constante, tanto de resistencia como de ángulo de fricción. Comparando los resultados obtenidos con los de diversos autores (Blaker, 2015; Parra, 2016; Bhaumik, 2018; Doygun, 2019), los resultados de los ensayos realizados bajo condiciones de presión vertical constante (PC), presentan rigideces iniciales menores a lo planteado en literatura. Sin embargo, a medida que aumenta la deformación angular son alcanzados valores similares de esfuerzo de corte. Con respecto a los ensayos realizados bajo condiciones de volumen constante (VC) los valores expuestos en literatura coinciden con lo del presente estudio. Los parámetros de ángulo de fricción y cohesión calculados presentan valores de 28° y 2 [kPa] de ángulo de fricción y cohesión respectivamente en el caso a presión vertical constante y de 30.4° de ángulo de fricción en el caso a volumen constante.

Es importante señalar que independiente del esfuerzo de consolidación, el comportamiento del esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular alcanza un valor constante de $0.6[-]$, lo cual sugiere que, tras la aplicación del corte, los ensayos tienden a una línea única dentro del espacio relación de vacíos versus esfuerzo vertical.

7.3 Ensayos cíclicos

En general, tendencias de comportamiento de lo observado en estos ensayos son similares a estudios y ensayos realizados a la interacción suelo-estructura (Poulos, 1989; Jardine et al, 2005; Jardine et. al, 2012), estableciéndose las siguientes conclusiones:

7.3.1 Referente a condiciones iniciales

La definición de preshearing adoptada se establece como la aplicación de un corte monótono bajo condiciones de presión vertical constante. Esto equivale a evaluar condiciones drenadas en estructuras offshore. La reducción en la relación de vacíos asociada a la aplicación del preshearing es menor, coincidiendo con lo planteado en literatura (Andersen, 2015).

No afecta significativamente en los resultados las particularidades propias del equipo (la presencia del ciclo de ajuste, de frecuencia distinta a lo estudiado), sin embargo, se hace necesario mencionar y aclarar este punto en caso de ser necesario para futuras comparaciones con otros estudios. Definir los parámetros a evaluar, (esfuerzo de corte medio y cíclico), como los parámetros respuesta (deformación angular media, cíclica y acumulada), es realizado para una mayor comprensión de los resultados expuestos.

7.3.2 Referente a la deformación angular

Al analizar la deformación angular acumulada, la cual busca evaluar el efecto de la generación de deformación angular debido a la etapa cíclica, indica que mientras mayor esfuerzo de corte cíclico es aplicado, mayores valores

son alcanzados para un determinado número de ciclos. En cuanto al efecto del preshearing, mientras mayor preshearing es aplicado, la tasa de crecimiento de la deformación angular acumulada comienza a disminuir. El comportamiento de la deformación angular acumulada es determinado por las componentes de deformación angular media y cíclica.

La deformación angular media, para los ensayos en donde no fue aplicado un preshearing, presenta un valor cero, sin embargo, es posible observar un aumento en este valor bajo un determinado número de ciclos. Esto es generado debido a que, al alcanzar la línea de estado crítico, la deformación angular generada comienza a aumentar levemente más en una dirección que en otra, reflejándose este resultado en los valores de la deformación angular media. Para los casos en donde existe un preshearing, la deformación angular media presenta un valor inicial acorde al preshearing aplicado, siendo la tasa de aumento menor mientras mayor es el preshearing aplicado.

La deformación angular cíclica en general es mayor mientras mayor magnitud de esfuerzo de corte cíclico es aplicada, sin embargo, a medida que aumenta el preshearing, menores valores constantes presenta.

En general, para el comportamiento de la deformación angular, existen diferencias considerables dependiendo de la existencia o no de esfuerzo de corte medio, como también de la magnitud del esfuerzo de corte cíclico aplicado. Esto se relaciona directamente con la aplicación de cargas “*one way*” y “*two way*”, que provocan inversión de esfuerzos (“*stress reversal*”) en el ensayo y es posible ver lo planteado por Poulos para pilotes (Poulos, 1989) en este estudio: es observada una influencia mayor de la deformación angular cíclica en la deformación angular acumulada en los casos en donde existe inversión de esfuerzos, mientras que mayor influencia de la deformación angular media sobre la deformación angular acumulada presentan los casos en donde no existe inversión de esfuerzos. Una mezcla de estas influencias es observada en los casos en donde existe aplicación de preshearing de 10[kPa], en donde mientras mayor valor de esfuerzo de corte cíclico es aplicado, presenta tendencias similares a lo visto en ensayos “*two way*” y mientras menor esfuerzo de corte cíclico es aplicado, tendencias similares a ensayos “*one way*” es observada. Cabe mencionar que existen ensayos en los cuales no se alcanzó el valor de deformación angular evaluado durante la aplicación de 1000 ciclos, esto debido a que en estos ensayos no se alcanzó la línea de estado crítico y presentan tendencias constantes durante el análisis.

7.3.3 Referente a diagrama de contorno

Con respecto a los diagramas de contorno, es utilizado el criterio de literatura para su realización (Andersen, 1989), graficando en el eje X el esfuerzo de corte medio normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación y en el eje Y el esfuerzo de corte cíclico normalizado por el esfuerzo vertical de consolidación, agrupando datos con tendencias de comportamiento similares. Para los datos evaluados, se generó el análisis respecto a las deformaciones angulares (medias o cíclicas) y el número de ciclos requerido para alcanzar un valor determinado de deformación angular.

Con respecto al análisis del diagrama de contorno en función del comportamiento de las componentes de deformación angular media y cíclica, se analizaron dos valores límite en estos valores (2.5% y 4%) tendencias similares se presentan en los ensayos, realizando los siguientes grupos:

- Grupo 1 en el cual la deformación angular evaluada es alcanzada por la componente cíclica (en donde se encuentran principalmente los ensayos a los que no existe aplicación de preshearing).
- Grupo 2 en donde la deformación angular evaluada fue alcanzada ya sea por la componente de deformación angular media o cíclica, pero con valores similares entre estas componentes (principalmente ensayos en donde fue aplicado un preshearing de 10 [kPa]).

- Grupo 3 en donde la deformación angular evaluada fue alcanzada por la componente de deformación angular media (principalmente ensayos en donde el preshearing aplicado fue igual al esfuerzo de corte cíclico).
- Grupo 4, compuesto por ensayos en donde no es alcanzado el valor de deformación angular evaluada durante la aplicación de 1000 ciclos.

Caso particular presenta el ensayo ID01501v1, ya que a pesar de tener un preshearing aplicado de 10[kPa], presenta comportamientos propios a ensayos del grupo 3, lo cual indica un valor umbral en donde el comportamiento pasa a ser propio de cargas “*one way*”.

Con respecto al comportamiento del número de ciclos requerido para alcanzar las deformaciones angulares evaluadas anteriormente, existen tendencias de comportamiento, agrupadas de la siguiente manera:

- Grupo 1: Son requeridos una cantidad pequeña de ciclos (menor a 100 ciclos) para alcanzar el valor de deformación angular media o cíclica.
- Grupo 2: Son requeridos una cantidad entre 100 a 210 ciclos para alcanzar la deformación angular media o cíclica.
- Grupo 3: Son requeridos más de 200 ciclos para alcanzar el valor de deformación angular media o cíclica.
- Grupo 4: Son requeridos más de 1000 ciclos para alcanzar el valor de deformación angular media o cíclica.

Al comparar los grupos obtenidos con los estados estable, metaestable e inestable propuestos en literatura (Jardine et. al, 2012), es observado que existe la tendencia sobre 1000 ciclos de un estado de estabilidad y por debajo de 100 ciclos un estado de inestabilidad concordante con lo descrito en literatura. Sin embargo, existe una subdivisión existente al comportamiento metaestable, en donde es postulado un estado intermedio más amplio, en el cual a efectos de este estudio se subdividió en los grupos 2 y 3. Es propuesto un diagrama de contorno, calculado para una deformación angular de 4%, el cual fue comparado con un diagrama de contorno obtenido en literatura para un suelo de similares características, observando tendencias similares (Blaker y Andersen, 2019).

7.3.4 Referente a trayectorias de esfuerzos

Con respecto al comportamiento visto de las trayectorias de esfuerzos, en general, a medida que aumentan los ciclos, la trayectoria de esfuerzos tiende a acercarse a la línea de estado crítico en todos los casos. Sin embargo, existe una notoria diferencia referente a la variación de esfuerzo vertical dependiendo de la existencia o no de corte medio (preshearing). Mientras mayor preshearing es aplicado requiere de una cantidad mayor de ciclos para alcanzar la línea de estado crítico, estabilizándose al llegar a este punto.

La variación de la magnitud del esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado influye en la tasa de variación del esfuerzo vertical existente. Mientras mayor preshearing aplicado, menor es la tasa de variación de esfuerzo vertical a medida que aumentan los ciclos. Lo señalado, controla el comportamiento de la deformación angular, ya que se logra una estabilización en la tasa de crecimiento de esta componente a mayores valores de esfuerzo vertical. El preshearing favorece que no se generen ciclos en dos direcciones, que son los más destructivos a la hora de hablar acerca de falla (Jardine, 1991). Los ciclos en dos direcciones “*two way*” favorece la disminución de los esfuerzos verticales hasta llegar a cero, lo cual produce un aumento considerable de las deformaciones angulares cíclicas.

7.3.5 Referente a módulo de corte

El comportamiento del módulo de corte en función de la amplitud angular cíclica (ie. doble amplitud de la deformación angular cíclica), es consistente con lo planteado en literatura (Alarcon –Guzman et al 1989, extraída

de Oztopack y Bolton 2013). El material, dado las deformaciones angulares que se evalúan, ya presenta un estado degradado de este módulo, es decir, presenta un valor menor que el valor máximo a una razón de $G/G_{\text{máx}}$ de 0.1-0.12 [-], disminuyendo esta razón a medida que aumenta la amplitud cíclica evaluada, presentando tendencias similares en todos los ensayos evaluados.

Con respecto al valor del módulo de corte en función de los ciclos, mientras mayor esfuerzo de corte cíclico es aplicado, la degradación del módulo de corte ocurre en una menor cantidad de ciclos. Con respecto al valor de esfuerzo de corte medio o preshearing aplicado, bajo un mismo valor de esfuerzo de corte cíclico aplicado, mientras mayor preshearing es aplicado, la degradación del módulo de corte es menor. Esto es concordante con lo observado en el comportamiento de la deformación angular, en donde mejoras en la resistencia es posible observar con la aplicación de preshearing. Esta mejora observada en el comportamiento de la degradación del módulo de corte es concordante con lo observado en pilotes, en donde los ciclos a niveles bajo el límite crítico pueden ser beneficiosos, enriqueciendo por ejemplo a mediano plazo la capacidad de pilotes en arenas (Jardine et al, 2005).

7.3.6 Referente a CSR

Con respecto a la relación entre CSR y número de ciclos, los resultados de esta investigación entrega valores mayores a lo observado en literatura (Parra, 2016; Ziotopoulou y Morales, 2018; Blaker, 2019), sin embargo, la pendiente de esta curva coincide con lo de las distintas investigaciones y se encuentran dentro de una banda consistente con lo estudiado.

La influencia del preshearing en el valor de CSR, se observa que a deformaciones angulares de 3% y 5%, la pendiente del gráfico CSR vs número de ciclos presente valores similares, sin embargo, al analizar deformaciones angulares mayores, como lo es 10%, la pendiente obtenida del gráfico CSR vs número de ciclos es mayor en el caso en donde no existe preshearing al caso en donde es aplicado un preshearing de 10 [kPa], lo cual indica que mejor capacidad de resistencia es obtenida con la aplicación del preshearing a largas deformaciones angulares.

7.4 Ensayos monótonos post ciclos

Se observa una disminución de la respuesta a corte existente en los casos evaluados, independiente de que si el esfuerzo cortante (Caso B) o las deformaciones angulares (Caso C) retornen a cero. Sin embargo, la existencia de reconsolidación (Caso A) provoca una leve recuperación de la respuesta a corte, debido a la densificación del material producida. Esta disminución de la respuesta a corte radica en que tanto el caso B como el caso C comenzaron a valores cercanos a cero de esfuerzo vertical, y a medida que aumenta la deformación angular aplicada, comienza a aumentar la rigidez del material, llegando a largas deformaciones a valores similares que el caso monótono inicial.

Con respecto a la variación de CSR evaluada, no presenta influencia alguna en los resultados. Esto es debido a que, una vez alcanzada una etapa en donde existe degradación de la respuesta, el comportamiento es similar, siendo acorde a lo planteado en literatura (Noorzad y Shakeri, 2017).

Con respecto al comportamiento del esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical en función de la deformación angular, se observa que mientras aumenta el valor de deformación angular, todos los ensayos tienden a un mismo valor de razón $\tau/\sigma = 0.6$ [-], siendo este valor independiente de los ciclos previos aplicados a la muestra. Esto se encuentra relacionado con la línea de estado crítico, la cual plantea que, independiente de la condición del ensayo, las muestras, tras la aplicación del corte tienden a una línea única dentro del espacio relación de vacíos versus esfuerzo vertical y fue observado tanto en ensayos monótonos post cíclicos en condiciones de volumen constante (VC) como en condiciones de presión vertical constante (PC).

7.5 Futuras investigaciones

Se plantean como futuras investigaciones complementarias a esta tesis las siguientes:

- Evaluar el efecto de los ciclos a distintos valores de esfuerzo de corte medio, con el fin de delimitar con mayor detalle los grupos aquí descritos y conocer los valores umbrales de los diagramas de contorno.
- Evaluar el efecto de la resistencia al corte monótono post ciclos para valores menores de CSR y con aplicación de esfuerzo de corte medio (preshearing) durante la etapa cíclica, con el fin de observar cómo el esfuerzo de corte medio (preshearing) aplicado en la etapa cíclica afecta en la resistencia monótona post ciclos.
- Evaluar efectos asociados a cambio de material, por ejemplo, arenas propias de la costa chilena, con el fin de tener información relevante para proyectos costeros y que puedan ser utilizados en etapas de anteproyecto.

8 Bibliografía

- Aghakouchak, A., Sim, W. W., & Jardine, R. J. (2015). Stress-path laboratory tests to characterise the cyclic behaviour of piles driven in sands. *Soils and Foundations*, 55(5), 917-928.
- Alarcon-Guzman, A., Chameau, J. L., Leonards, G. A., & Frost, J. D. (1989). Shear modulus and cyclic undrained behavior of sands. *Soils and Foundations*, 29(4), 105-119.
- Alshibli, K. A., Druckrey, A. M., Al-Raoush, R. I., Weiskittel, T., & Lavrik, N. V. (2015). Quantifying morphology of sands using 3D imaging. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04014275.
- American Society for Testing and Materials. (2006). *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. ASTM International.
- Andersen, K. H. (2009). Bearing capacity under cyclic loading—offshore, along the coast, and on land. The 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(5), 513-535.
- Andersen, K. H. (2015). Cyclic soil parameters for offshore foundation design. *Frontiers in offshore geotechnics III*, 5.
- Andersen, K. H., Kleven, A., & Heien, D. (1988). Cyclic soil data for design of gravity structures. *Journal of Geotechnical engineering*, 114(5), 517-539.
- ASTM (2007). "Standard D6528: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils." Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. (2006). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. ASTM International
- Atkinson, J. H., Coop, M. R., Stallebrass, S. E., & Viggiani, G. (1993). Measurements of stiffness of soils and weak rocks in laboratory tests. *Engineering geology special publication*, (8), 21-27.
- Baldi, G., Belottini, R., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, N.I. and Lo Presti, D.L.F. (1989), Modulus of sands from CPTs and DMTs. Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. I pp. 165-170.
- Bhaumik, L., Cerna-Diaz, A. A., Numanoglu, O. A., Olson, S. M., Rutherford, C. J., Hashash, Y. M., & Weaver, T. (2018). Comparing shear response of dense sands from centrifuge and direct simple shear tests with published correlations. In *Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics V: Slope stability and landslides, laboratory testing, and in situ testing* (pp. 122-131). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Bjerrum, L., & Landva, A. (1966). Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay. *Geotechnique*, 16(1), 1-20.
- Blaker, Ø., & Andersen, K. H. (2015). Shear strength of dense to very dense Dogger Bank sand. In *Frontiers in Offshore Geotechnics III: Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015)* (Vol. 1, pp. 1167-1172). Taylor & Francis Books Ltd

- Blaker, Ø., & Andersen, K. H. (2019). Cyclic properties of dense to very dense silica sand. *Soils and Foundations*, 59(4), 982-1000.
- Blanc, M., Thorel, L., Isorna, R., Dano, C., Kotronis, P., & Philippe, M. (2015, June). Centrifuge investigation of the axial cyclic behaviour of a single pile used for the foundation of a jacket type offshore wind turbine. In *3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG2015)* (pp. 521-526).
- Bouferra, R., Benseddiq, N., & Shahrour, I. (2007). Saturation and preloading effects on the cyclic behavior of sand. *International journal of geomechanics*, 7(5), 396-401.
- Boulon, M. (1986). Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling* (pp. 127-147).
- Brandes, H. G. (2011). Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(1), 113-126.
- BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie). (2015). Minimum requirements concerning the constructive design of offshore structures within the exclusive economic zone (EEZ).
- Chang, C. S., & Whitman, R. V. (1988). Drained permanent deformation of sand due to cyclic loading. *Journal of geotechnical engineering*, 114(10), 1164-1180.
- Dahl, K. R., DeJong, J. T., Boulanger, R. W., Pyke, R., & Wahl, D. (2014). Characterization of an alluvial silt and clay deposit for monotonic, cyclic, and post-cyclic behavior. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 432-440.
- Dakoulas, P., & Sun, Y. (1992). Fine Ottawa sand: experimental behavior and theoretical predictions. *Journal of geotechnical engineering*, 118(12), 1906-1923.
- Doygun, O., Brandes, H. G., & Roy, T. T. (2019). Effect of gradation and non-plastic fines on monotonic and cyclic simple shear strength of silica sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 3221-3240.
- ElGhoraiby, M. A., Park, H., & Manzari, M. T. (2020). Stress-strain behavior and liquefaction strength characteristics of Ottawa F65 sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, 106292.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-451.
- Ishihara, K., & Okada, S. (1978). Effects of stress history on cyclic behavior of sand. *Soils and Foundations*, 18(4), 31-45.
- Ishihara, K., & Okada, S. (1982). Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand. *Soils and Foundations*, 22(3), 109-125.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., & Yasuda, S. (1975). Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and foundations*, 15(1), 29-44.
- Jardine, R. J. (1991). The cyclic behaviour of large piles with special reference to offshore structures. In *Cyclic loading of soils: From theory to design* (pp. 174-248).
- Jardine, R. J. (1994). Review of offshore pile design for cyclic loading: North Sea clays. *HSE Offshore Technology Report, OTN*, 94(157.85).
- Jardine, R. J. (2014). Advanced laboratory testing in research and practice: the 2nd Bishop Lecture. *Geotechnical Research*, 1(1), 2-31.

- Jardine, R. J., & Standing, J. R. (2000). Pile load testing performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk, France. V. 1.
- Jardine, R. J., & Standing, J. R. (2012). Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. *Soils and foundations*, 52(4), 723-736.
- Jardine, R. J., Zhu, B. T., Foray, P., & Yang, Z. X. (2013). Interpretation of stress measurements made around closed-ended displacement piles in sand. *Géotechnique*, 63(8), 613-627.
- Jardine, R., Chow, F., Overy, R., & Standing, J. (2005). *ICP design methods for driven piles in sands and clays* (Vol. 112). London: Thomas Telford.
- Kaggwa, W. S., Booker, J. R., & Carter, J. P. (1991). Residual strains in calcareous sand due to irregular cyclic loading. *Journal of geotechnical engineering*, 117(2), 201-218.
- Kjellman, W. (1951). Testing the shear strength of clay in Sweden. *Géotechnique*, 2(3), 225-232.
- Kutter, B. L., & Chen, Y. R. (2014). Constant p' and constant volume friction angles are different. *Geotechnical Testing Journal*, 20(3), 304-316.
- Le, K. N. (2016). A direct simple shear device for the dynamic characterization of partially saturated soils (Doctoral dissertation, University of New Hampshire).
- Lee, K. L. (1965). Triaxial compressive strength of saturated sand under seismic loading conditions. University of California, Berkeley.
- Lehane, B. M., & White, D. J. (2005). Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand. *Canadian geotechnical journal*, 42(4), 1039-1052.
- Lehane, B. M., Jardine, R. J., Bond, A. J., & Frank, R. (1993). Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(1), 19-35.
- López-Querol, S., & COOP, M. R. (2012). Drained cyclic behaviour of loose Dogs Bay sand. *Géotechnique*, 62(4), 281-289.
- Lucks, A. S., Christian, J. T., Brandow, G. E., & Höeg, K. (1972). Stress conditions in NGI simple shear test. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(1), 155-160.
- Luong, M. P., & MP, L. (1982). Mechanical aspects and thermal effects of cohesionless soils under cyclic and transient loading.
- Merritt, A. S., Schroeder, F. C., Jardine, R. J., Stuyts, B., Cathie, D., & Cleverly, W. (2012, September). Development of pile design methodology for an offshore wind farm in the North Sea. In *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future*. OnePetro.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue.
- Morales and Ziotopoulou (2018) Direct Simple Testing of Ottawa F-65 Sand. Soil Interactions Laboratory Data Report.
- National Research Council. (1985). Liquefaction of soils during earthquakes. Committee on Earthquake Engineering.

- Noorzad, R., & Shakeri, M. (2017). Effect of silt on post-cyclic shear strength of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 133-142.
- Norén-Cosgriff, K., Jostad, H. P., & Madshus, C. (2015). Idealized load composition for determination of cyclic undrained degradation of soils. In *Frontiers in Offshore Geotechnics III: Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015)* (Vol. 1, pp. 1097-1102). Taylor & Francis Books Ltd.
- Okada, Y., Sassa, K., & Fukuoka, H. (2004). Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests. *Engineering geology*, 75(3-4), 325-343
- Oztoprak, S., & Bolton, M. D. (2013). Stiffness of sands through a laboratory test database. *Géotechnique*, 63(1), 54-70.
- Parra, A. M. (2016). Ottawa F-65 sand characterization. Phd Thesis, University of California, Davis.
- Pavlic, V., Matesic, L., & Kvasnicka, P. (2017). Numerical modelling of the NGI-DSS test and cyclic threshold shear strain for degradation in sand. *Granular Matter*, 19(2), 37.
- Porcino, D., Marcianò, V., & Nicola Ghionna, V. (2009). Influence of cyclic pre-shearing on undrained behaviour of carbonate sand in simple shear tests. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(2), 151-161.
- Poulos, H. G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of geotechnical engineering*, 114(8), 877-895.
- Poulos, H. G. (1989). Cyclic axial loading analysis of piles in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 115(6), 836-852.
- Puech, A., & Garnier, J. (Eds.). (2017). Design of piles under cyclic loading: SOLCYP recommendations. John Wiley & Sons.
- Randolph, M., & Gourvenec, S. (2009). *Offshore geotechnical engineering*. CRC press.
- Randolph MF and Wroth CP (1981) Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity in the driven piles. *Géotechnique* 31(1): 143–157.
- Roscoe, K. H. (1953). An apparatus for the application of simple shear to soil samples. In *Proc. 3rd ICSMFE* (Vol. 1, pp. 186-191).
- Salgado, R., Mitchell, J. K., & Jamiolkowski, M. (1997). Cavity expansion and penetration resistance in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 344-354.
- Shahnazari, H., Heshmati, A. A., & Sarbaz, H. (2015). Effect of cyclic pre-straining on the dynamic behavior of very dense sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 63-73.
- Shen, C. K., Sadigh, K., & Herrmann, L. R. (1978). An analysis of NGI simple shear apparatus for cyclic soil testing. In *Dynamic geotechnical testing*. ASTM International.
- Sim, W. W., Aghakouchak, A., & Jardine, R. J. (2013). Cyclic triaxial tests to aid offshore pile analysis and design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(2), 111-121.

- Sivathayalan, S. (1994). Static, cyclic and post liquefaction simple shear response of sands (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Tsuha, C. D. H. C., Foray, P. Y., Jardine, R. J., Yang, Z. X., Silva, M., & Rimoy, S. (2012). Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. *Soils and foundations*, 52(3), 393-410.
- Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical engineering*, 120(12), 2208-2228.
- Vucetic, M., & Lacasse, S. (1982). Specimen size effect in simple shear test. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(12), 1567-1585.
- Wichtmann, T., Niemunis, A., & Triantafyllidis, T. (2005). Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(12), 967-979.
- WU, Z. X., YIN, Z. Y., Christophe, D. A. N. O., & HICHER, P. Y. (2020). Cyclic volumetric strain accumulation for sand under drained simple shear condition. *Applied Ocean Research*, 101, 102200.
- Xiong, H., Cai, Y., Yang, Z., & Chai, J. (2017). Effect of drained static shear on cyclic deformation behavior of K0-consolidated sand. *Soils and Foundations*, 57(5), 720-732.
- Ziotopoulou, K., Montgomery, J., Bastidas, A. M. P., & Morales, B. (2018). Cyclic strength of Ottawa F-65 sand: Laboratory testing and constitutive model calibration. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Slope Stability and Landslides, Laboratory Testing, and In Situ Testing* (pp. 180-189). Reston, VA: American Society of Civil Engineers
- Zografou, D., Boukpeti, N., Gouvernec, S., & O'Loughlin, C. D. (2016). Definition of failure in cyclic direct simple shear tests on normally consolidated kaolin clay and presentation of shear strain contour diagrams. In *Proceedings of the 5th international conference on geotechnical and geophysical site characterisation (ISSMGE TC-102-ISC'5)* (Vol. 1, pp. 583-588). Sydney, Australia: Australian Geomechanics Society.

9 Anexos

Diagramas de contorno

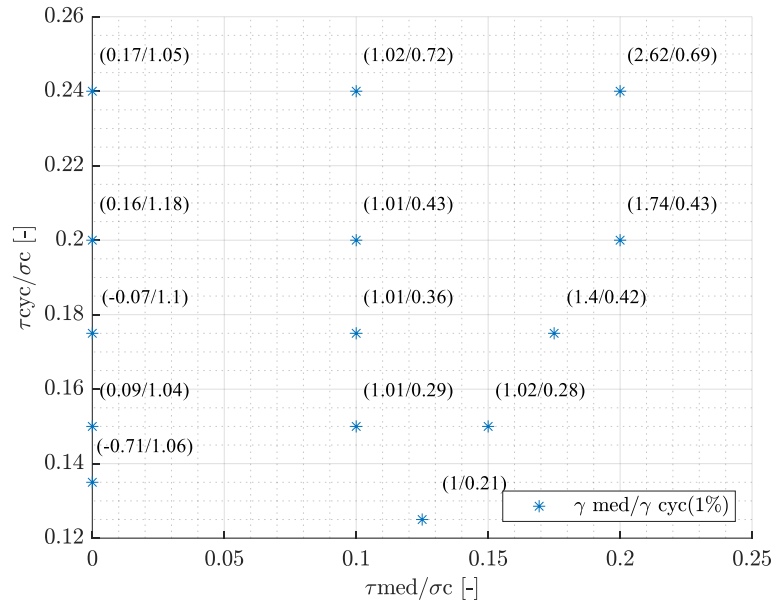


Figura 9-1: Diagrama de contorno a deformación angular =1%, separación en función de γ medio y γ cíclico

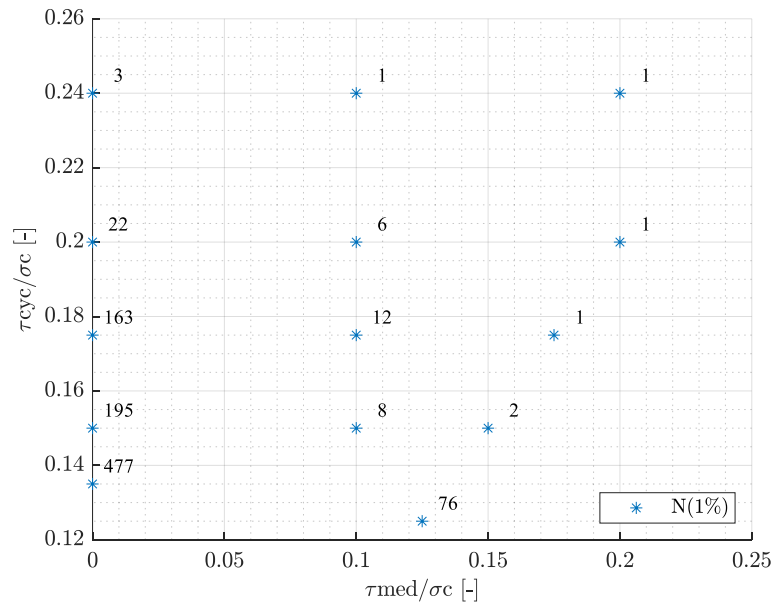


Figura 9-2: Diagrama de contorno a deformación angular =1% en función de N ciclos.

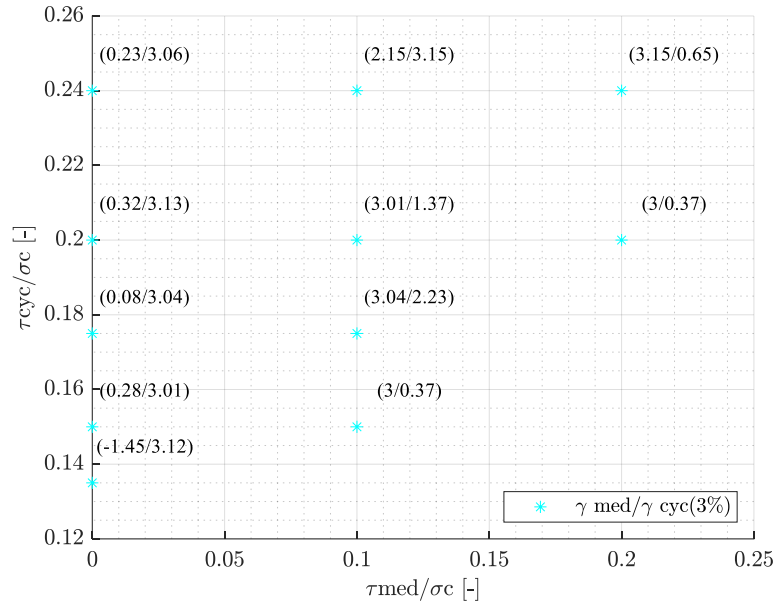


Figura 9-3: Diagrama de contorno a deformación angular =3%, separación en función de γ medio y γ cíclico

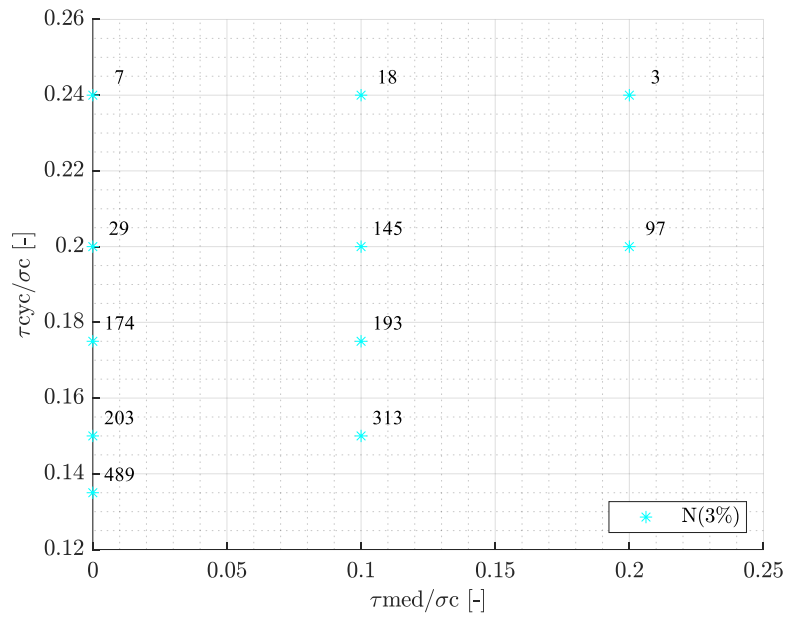


Figura 9-4: Diagrama de contorno a deformación angular =3% en función de N ciclos.

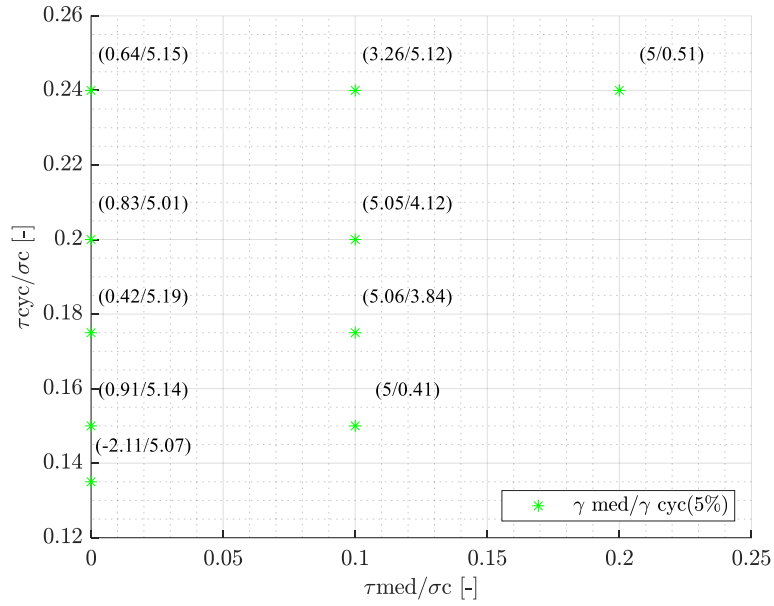


Figura 9-5: Diagrama de contorno a deformación angular =5%, separación en función de γ medio y γ cíclico

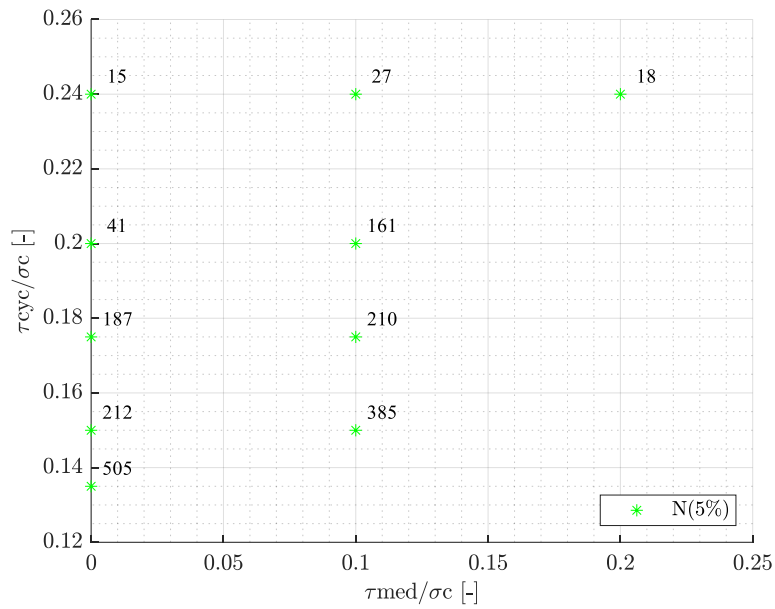


Figura 9-6: Diagrama de contorno a deformación angular =5% en función de N ciclos.

Etapa cíclica – Ensayos monótonos post ciclos

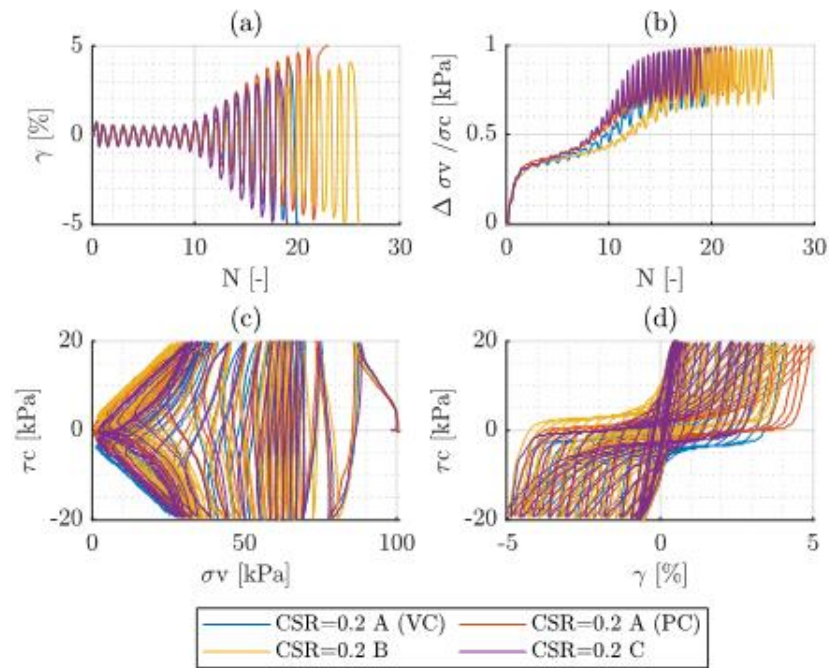


Figura 9-7: Comportamiento cíclico a CSR = 0.2 [-]

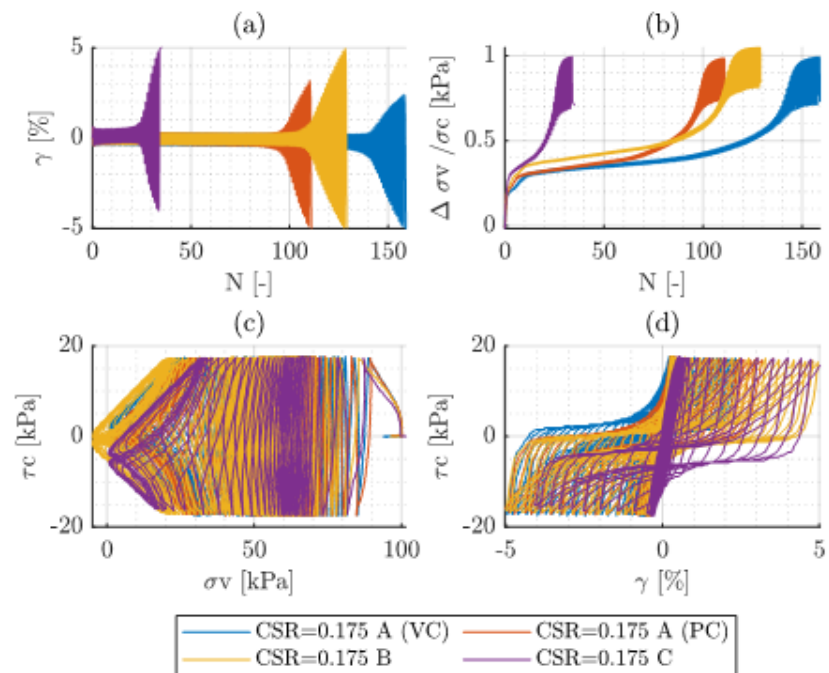


Figura 9-8: Comportamiento cíclico a CSR = 0.175 [-]

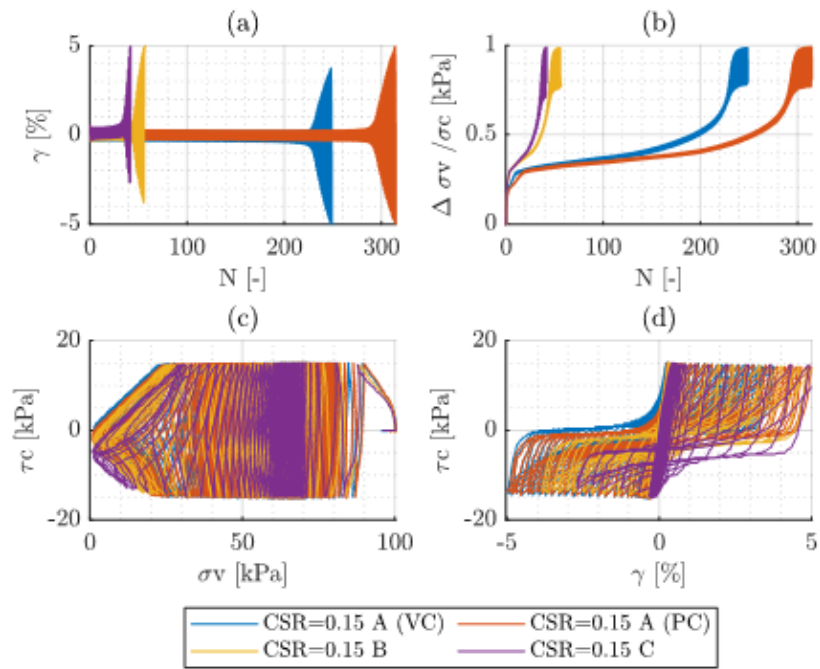


Figura 9-9: Comportamiento cíclico a CSR=0.15 [-]

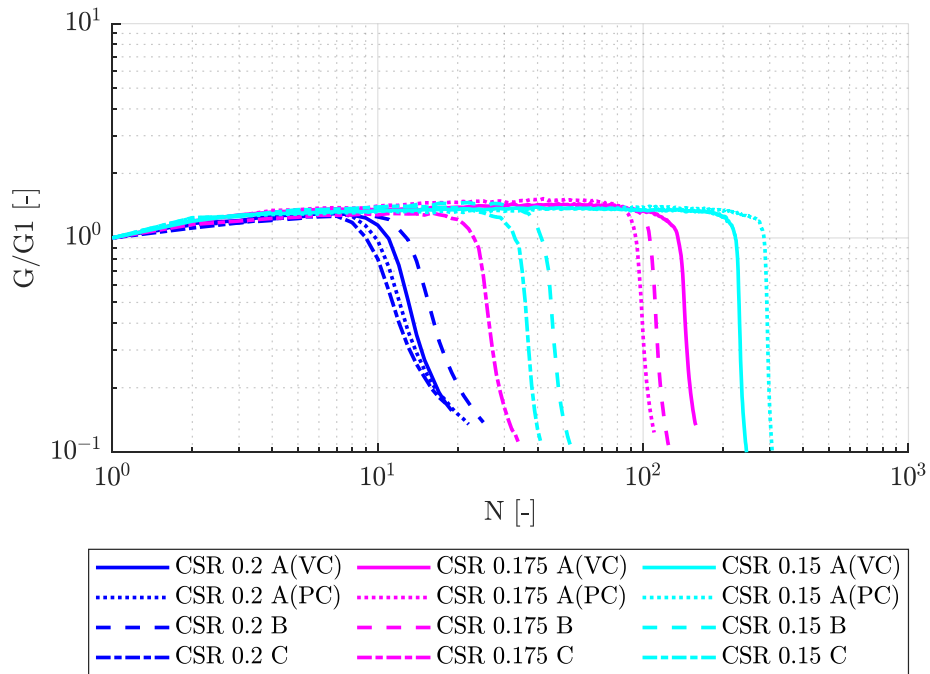


Figura 9-10: Módulo de corte versus número de ciclos

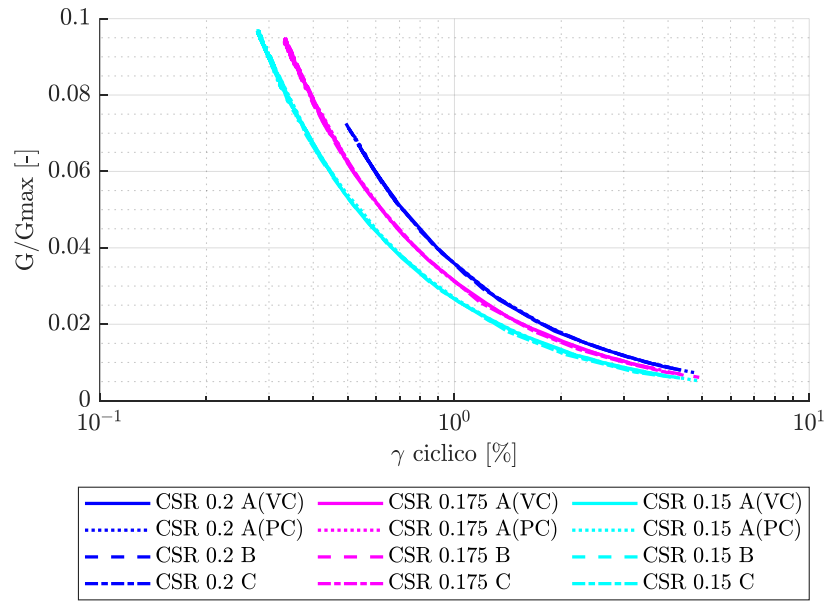


Figura 9-11: Módulo de corte versus deformación angular cíclica