

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ENSAYOS ESPECIALES DE LABORATORIO EN SUELOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en Ciencias  
con mención en Ingeniería Civil**

**AUTORA:**

Steisy Graciela Caparachin Vilca

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en Ciencias con  
mención en Ingeniería Civil**

**AUTORES:**

Kevin Gunter Aquino Chumbile

Rodrigo José Patiño Padilla

Jared Fernando Portal Espino

José Stefano Yeckle Damian

**ASESOR:**

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, diciembre, 2021

## RESUMEN

La geotecnia es una de las ramas de la ingeniería civil. Uno de sus campos de interés es el diseño de las cimentaciones de los diversos proyectos que se ejecuten. Para la realización de estos diseños, es fundamental determinar las características del suelo y los parámetros geotécnicos que definen su comportamiento como material de cimentación y construcción. Para obtener estos parámetros, se realizan múltiples ensayos de laboratorio tradicionales. En la actualidad, debido a los avances tecnológicos, es posible realizar ensayos de laboratorio de mecánica de suelos más avanzados en lo referente a precisión con la que se obtienen los parámetros geotécnicos de interés.

Existe un amplio número de ensayos modernos, los cuales se vienen desarrollando, en la mayoría de los casos, desde hace menos de 25 años. Para el presente trabajo, se realizó una búsqueda de información sobre cinco (5) ensayos que permiten determinar múltiples parámetros geotécnicos para diversos tipos de suelos. Los ensayos seleccionados para esta investigación son el ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzos, el ensayo triaxial cíclico, el ensayo de consolidación a deformación constante, el ensayo de consolidación inducida por flujo y el ensayo de consolidación incremental.

Para cada uno de los ensayos, se revisó el estado del arte de su aplicación en investigaciones geotécnicas reales y se realizó una descripción general del ensayo, de los equipos utilizados y del procedimiento estándar a seguir. Además, se detallaron los parámetros geotécnicos que pueden obtenerse con cada ensayo. Para ello, se enunciaron las ecuaciones matemáticas planteadas por otros autores. Asimismo, se explicó la aplicación a la ingeniería de cada uno de los ensayos y se compararon los ensayos modernos con sus contrapartes tradicionales.

Finalmente, sobre la base de la investigación realizada, se formularon las conclusiones principales sobre cada uno de los ensayos. Entre ellas, destacan la necesidad de realizar adaptaciones a equipos tradicionales (o reemplazarlos) para poder ejecutar los ensayos especiales, la capacidad de estudiar variables geotécnicas bajo condiciones de ensayo y ejecución que no serían posibles con los ensayos tradicionales, y que los ensayos especiales no suelen reemplazar íntegramente a sus contrapartes tradicionales por diferencias notorias entre parámetros obtenibles.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Alcance.....	1
1.4. Objetivos.....	2
1.5. Metodología.....	2
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo.....	3
2.2. Ensayo triaxial cíclico.....	5
2.3. Ensayo de consolidación a deformación constante.....	7
2.4. Ensayo de consolidación inducida por flujo.....	9
2.5. Ensayo de consolidación incremental.....	11
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
3.1. Ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo.....	13
3.1.1. Descripción del ensayo.....	13
3.1.2. Descripción del equipo.....	13
3.1.3. Procedimiento del ensayo.....	15
3.1.4. Parámetros obtenibles.....	17
3.1.5. Aplicaciones en la ingeniería.....	17
3.1.6. Comparación con el ensayo tradicional.....	17
3.2. Ensayo triaxial cíclico.....	18
3.2.1. Descripción del ensayo.....	18
3.2.2. Descripción del equipo.....	19
3.2.3. Procedimiento del ensayo.....	20
3.2.4. Parámetros obtenibles.....	20
3.2.5. Aplicaciones en la ingeniería.....	21
3.2.6. Comparación con otros ensayos.....	22
3.3. Ensayo de consolidación a deformación constante.....	22
3.3.1. Descripción del ensayo.....	22
3.3.2. Descripción del equipo.....	23
3.3.3. Procedimiento del ensayo.....	25
3.3.4. Parámetros obtenibles.....	25

3.3.5. Aplicaciones en la ingeniería .....	26
3.4. Ensayo de consolidación inducida por flujo.....	26
3.4.1. Descripción del ensayo.....	26
3.4.2. Descripción del equipo.....	27
3.4.3. Procedimiento del ensayo.....	28
3.4.4. Parámetros obtenibles .....	30
3.4.5. Aplicaciones en la ingeniería .....	31
3.4.6. Comparación con el ensayo tradicional. ....	31
3.5. Ensayo de consolidación incremental.....	32
3.5.1. Descripción del ensayo.....	32
3.5.2. Descripción del equipo.....	32
3.5.3. Procedimiento del ensayo.....	33
3.5.4. Parámetros obtenibles .....	34
3.5.5. Aplicaciones en la ingeniería .....	36
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....	37
4.1. Sobre el ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo.....	37
4.2. Sobre el ensayo triaxial cíclico.....	37
4.3. Sobre el ensayo de consolidación a deformación constante.....	38
4.4. Sobre el ensayo de consolidación inducida por flujo .....	39
4.5. Sobre el ensayo de consolidación incremental .....	40
Bibliografía.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cargador cíclico electroneumático. Extraído de Chan (1981).....	14
Figura 2: Arreglo experimental multiaxial de barrera flexible. Extraído de Bhattacharya & Prashant (2021). .....	15
Figura 3: Trayectorias de esfuerzos: (a) recompresión a esfuerzos in-situ, (b) evaluación de historia reciente de esfuerzos. Adaptado de Finno & Kim (2012). .....	16
Figura 4. Esquema de un equipo triaxial cíclico. Adaptado de Flores et al. (2013).....	19
Figura 5. Curva correspondiente a un ciclo de histéresis. Adaptado de Kim (1991). .....	21
Figura 6. Representación esquemática de un aparato para realizar el CRS. Adaptado de Moozhikkal et al., 2019. ....	24
Figura 7. Representación esquemática de un aparato del ensayo SICT. Adaptado de Tian (2020). .....	27
Figura 8. Equipo de consolidación. Extraído de Villar (2002).....	33
Figura 9. Índice de vacíos de arcilla pura frente a tensión vertical efectiva. Adaptado de Chu et al. (2017). .....	35
Figura 10. Conductividad hidráulica de M1 y M2 durante la carga. Adaptado de Andries et al. (2019). .....	35

# **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES**

## **1.1.Introducción**

Desde el surgimiento de la Mecánica de Suelos, los investigadores han buscado diferentes métodos y herramientas para describir, caracterizar y predecir el comportamiento del suelo. En la actualidad, el suelo es determinante para la ejecución de grandes proyectos de construcción, dado que este influye en el medio de sostenimiento de la estructura que se adoptará y en la viabilidad de su construcción en el lugar planteado. Este puede ser empleado como material de cimentación o como material de construcción. Por ejemplo, para las obras viales, el suelo es empleado como material de construcción; mientras que, para obras de edificación, es empleado como material de cimentación. En ambas situaciones, es imprescindible conocer las propiedades físico – mecánicas que tendrá el suelo estudiado, para su uso como cimentación se puede determinar los valores de las propiedades requeridas mediante ensayos in situ y ensayos en laboratorio. Por un lado, los ensayos in situ darán como resultado parámetros muy representativos de la realidad, pero estos ensayos están sujetos a la disponibilidad del lugar y se enfrentan a múltiples factores externos como el clima, accesos, equipos entre otros. Por otro lado, los ensayos de laboratorio brindan la opción de caracterizar las propiedades del suelo bajo una estricta metodología con condiciones controladas que busquen simular la realidad en la que se encuentra el suelo. El presente trabajo está orientado a recopilar información sobre distintos ensayos especiales ejecutables con máquinas modernas que brinden un mayor control de los parámetros de interés a estudiar.

## **1.2.Justificación**

Para los proyectos de ingeniería civil, el suelo es una variable fundamental cuyas propiedades físico – mecánicas deben estar correctamente definidas. La metodología más confiable y directa para caracterizar el suelo es a partir de ensayos de laboratorio realizados en muestras obtenidas de las exploraciones de campo. Entre los ensayos de laboratorio disponibles, los ensayos especiales modernos permiten estudiar los parámetros de interés del suelo frente a condiciones variables que este puede sufrir in situ o frente a condiciones más cercanas a la realidad.

## **1.3.Alcance**

El presente estudio se enfoca en realizar una investigación descriptiva – comparativa entre un grupo seleccionado de ensayos especiales modernos con sus versiones tradicionales, se

comparan los parámetros de entrada, el tipo de muestra requerida y los parámetros obtenidos con cada ensayo.

#### **1.4.Objetivos**

El objetivo principal de la investigación es presentar la descripción, aplicación y comparación de tres ensayos especiales modernos frente a los tradicionales. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Definir los ensayos especiales modernos a investigar
- Describir los ensayos especiales modernos y los parámetros obtenibles para cada uno de ellos
- Describir los campos de aplicación de los ensayos especiales modernos
- Comparar los ensayos especiales modernos con sus versiones tradicionales

#### **1.5.Metodología**

La metodología seguida se compone de los siguientes tres partes: revisión de literatura, comparación entre ensayos y recopilación de conclusiones y recomendaciones. Se definieron un total de cinco ensayos especiales modernos de interés. Para cada uno de ellos, se realizó una revisión de literatura de la normativa que emplea, el equipo necesario para su ejecución, la descripción del ensayo, las condiciones de operación para representar el suelo in situ y los parámetros obtenibles. Con este fin se revisaron diferentes publicaciones en artículos, tesis y libros. Asimismo, se investigó sobre la versión del ensayo original, sus limitaciones y restricciones. Luego, se compararon los ensayos elegidos con sus versiones tradicionales, así como, los parámetros obtenibles de los diferentes ensayos, su procedimiento y su accesibilidad. Por último, se presentaron las conclusiones obtenidas.

## CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

El presente capítulo describe de manera general algunos estudios y resultados obtenidos por otros autores con respecto a cada uno de los ensayos que son objeto de la presente investigación. Su importancia radica en que se requiere verificar la validez de los ensayos y su replicabilidad.

### 2.1. Ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo

Existen múltiples investigaciones que estudian las propiedades del suelo utilizando ensayos triaxiales, pero controlando de alguna forma la trayectoria del esfuerzo aplicado.

Finno & Kim (2012) estudiaron el efecto de la variación de la trayectoria de esfuerzos en la respuesta de arcillas glaciales de Chicago frente a deformaciones pequeñas. La variación se analizó con el parámetro de “historia reciente de esfuerzos”, definido por Atkinson et al. (citado en Finno & Kim, 2012) como el ángulo entre la dirección presente del esfuerzo aplicado con aquella de la trayectoria anterior. Para la evaluación de los efectos, se utilizaron tres sets de trayectorias: el primero se aplicó a muestras reconsolidadas por recompresión para emular el comportamiento in-situ; mientras que los otros dos sets se utilizaron para aislar el efecto de la historia reciente de esfuerzos, y se diferencian entre sí por tener direcciones previas al corte opuestas, separadas  $180^\circ$ . Los tres sets de trayectorias fueron denominados consolidación KC, consolidación y descarga KC-U, y consolidación por compresión isotrópica triaxial I-TC. Para la aplicación de los mismos, se utilizó una máquina de ensayo triaxial modificada, específicamente un Cargador Cíclico CKC e/p. Los ensayos se realizaron sin condiciones de deformación lateral nula, para evitar desviaciones involuntarias de las trayectorias de esfuerzo; y permitiendo un período de fluencia lenta tras alcanzar los esfuerzos deseados, para eliminar el efecto de las deformaciones de este tipo. Los resultados obtenidos de módulo de corte secante, deformación por corte, y relaciones esfuerzo-deformación en la etapa pre-corte, confirman una afectación en el comportamiento de las arcillas frente a deformaciones pequeñas, originada por la historia reciente de aplicación de esfuerzos sobre las mismas. En específico, el parámetro analizado impacta significativamente la degradación del módulo de corte, con respuestas más rígidas con trayectorias con menor diferencia respecto al esfuerzo pre-corte; y este impacto se observa en todas las muestras, demostrable al comparar los puntos de inicio del efecto de degradación. Sin embargo, también se concluyó que la historia reciente de esfuerzos no influye significativamente en el módulo de corte dinámico  $G_{BE}$ , ni en la respuesta esfuerzo-deformación para más del 1% de deformación por corte.

VandenBerge, Duncan, & Brandon (2015) estudiaron el efecto que tiene la reorientación de esfuerzos principales en la resistencia no drenada de arcillas compactas, propiedad que influye en el diseño de obras geotécnicas (presas y diques) frente a eventos extremos. La importancia de la investigación radica en que estos efectos solo se han estudiado en arcillas naturales, a pesar de que las arcillas compactas son un material más común en las aplicaciones mencionadas anteriormente. A fin de aplicar la reorientación, se utilizaron los ensayos de Extensión Triaxial (ACU-TE) y Compresión Triaxial con Reorientación de Esfuerzos (TC-SR), ambos utilizando dispositivos comunes de ensayo triaxial; posteriormente, los efectos obtenidos por ambos métodos son evaluados con ensayos de Corte Simple Directo (DSS). Para los ensayos, se prepararon muestras para ensayo triaxial y de corte simple directo a partir arcilla de Oak Harbor, utilizando un compactador en miniatura Harvard. A pesar de que los ensayos ACU-TE y TC-SR someten los especímenes a trayectorias de esfuerzo que generan una reorientación de 90°, ambos muestran resultados distintos. Al terminar los ensayos, los autores concluyeron que los ensayos de extensión no son adecuados para la evaluación de efectos de reorientación, por presentar resultados no representativos de la realidad; y que la reorientación de 90° de los esfuerzos principales no generó una reducción significativa de resistencia, aunque aún no puede determinarse si es resultado de la rigidez característica del grado de compactación, o si la reorientación no afecta la estructura de las arcillas compactas.

Finalmente, Bhattacharya & Prashant (2021) realizaron ensayos de trayectoria de esfuerzo en condiciones de deformación planar (PS, de *plane strain*, en inglés) utilizando un dispositivo de ensayo multiaxial con límites flexibles (FB, de *flexible boundary*). La investigación surge a partir de querer analizar el comportamiento del suelo con equipos y condiciones que reflejen adecuadamente las idealizaciones utilizadas en el diseño de estructuras geotécnicas, lo cual no sucede al utilizar ensayos triaxiales convencionales. Los autores describen los componentes del dispositivo de ensayo de la siguiente manera:

La estructura principal involucra seis carcasas de presión y un marco espacial de aluminio que sostiene el espécimen de suelo, [...] una membrana flexible de caucho (butilo) [...] colocada entre las paredes y el espécimen de suelo. Las condiciones de esfuerzo planar son impuestas colocando placas de plexiglás, rígidas y transparentes, en las dos caras opuestas en el eje Z (Bhattacharya & Prashant, 2021).

El dispositivo se utilizó para aplicar 8 sets de trayectorias de esfuerzo, cada uno con ratios de esfuerzo y condiciones específicas. Los resultados que se registraron no solo corresponden a los estados de fluencia y falla de los especímenes, sino que también se observó el desplazamiento continuado en el límite de deformación planar. De los resultados obtenidos, los autores llegan a las siguientes conclusiones: los puntos de fluencia de los especímenes coinciden con un modelo simplificado 2D de “lágrima”; y de los perfiles de deformación local por corte, se entiende que el comportamiento en los especímenes ensayados por el método propuesto logra ser uniforme.

Las tres investigaciones presentadas muestran la gran variedad de aplicaciones y formas de implementación del manejo de trayectorias de esfuerzo en ensayos triaxiales.

## **2.2. Ensayo triaxial cíclico**

El ensayo triaxial cíclico es un ensayo de laboratorio que permite la medición de las propiedades dinámicas bajo cargas cíclicas. En este ensayo se le aplica al espécimen estudiado cargas que simulan la acción de un sismo, aplicando un esfuerzo desviador cíclico y un confinamiento constante.

Si se realiza bajo condiciones de carga controladas se puede evaluar el comportamiento de licuefacción de los suelos. Nong et al. (2021) realizaron un estudio de la licuefacción de la arena del río Nakdong. Su estudio consistió en un comparativa de resultados obtenidos por un ensayo triaxial cíclico (CTX) y un ensayo de corte simple cíclico (CSS). Evaluaron el factor de discrepancia entre los resultados de ambos ensayos. Las comparaciones fueron realizadas bajo las siguientes condiciones: las muestras evaluadas fueron del mismo tipo, se utilizaron métodos de preparación de muestra similares y ambas pruebas se realizaron por un solo operador. En el ensayo CTX, la carga del terremoto es simulada mediante la aplicación de un esfuerzo desviador cíclico. Es decir, se aplica un incremento de esfuerzo de confinamiento en la dirección vertical mientras se disminuye el esfuerzo de confinamiento en la dirección horizontal. Respecto a la arena del río Nakdong, esta se clasificó según el sistema unificado de clasificación de suelos como una arena pobremente graduada (SP). Se prepararon especímenes con dos tipos de densidad relativa ( $D_r$ ): densas y sueltas, tanto para el ensayo CTX y CSS se consolidaron las muestras con diferentes esfuerzos efectivos ( $\sigma'$ ) y se les aplicaron distintos valores de relaciones de esfuerzo cortante estático inicial ( $\alpha$ ). Todas las muestras fueron ensayadas en condiciones no drenadas a volumen constante y los resultados de resistencia de licuefacción de ambos ensayos

fueron obtenidos después de 15 ciclos de carga y descarga y se le denominó  $CRR_{15}$ . Por último, para comparar la discrepancia entre los resultados se definió el término  $Cr$  como la relación entre  $CRR_{15CSS}/CRR_{15CTX}$ . La conclusión a la que llegó después de realizar múltiples comparaciones considerando los efectos del  $D_r$ ,  $\alpha$  y  $\sigma'$  fue la siguiente: la resistencia a la licuefacción obtenida del ensayo CTX fue siempre mayor a la obtenida del ensayo CSS. El valor de  $Cr$  disminuye a medida que aumenta la  $D_r$  o los valores de  $\alpha$ . El valor de  $Cr$  no se ve afectado significativamente por la variación de  $\sigma'$ . Por lo tanto, la diferencia en los valores obtenidos de resistencia a la licuefacción en los ensayos CTX y CSS aumenta para arenas densas y/o valores altos de relaciones de esfuerzo constante estático inicial.

Si el ensayo triaxial cíclico se realiza bajo condiciones controladas de deformación se puede determinar el módulo de elasticidad y el amortiguamiento que caracterizaría al suelo mediante curvas histeréticas. Choobbasti et al. (2018) realizaron un conjunto de ensayos para determinar el comportamiento de una arena cementada con nanosílice. Entre ellos, se realizó el ensayo triaxial cíclico para determinar el módulo de elasticidad cíclico y el amortiguamiento a diferentes combinaciones de porcentajes de nanosílice y presiones de confinamiento. El nanosílice es un tipo de nano material a base de cemento utilizado como estabilizador de suelos. Según los diferentes estudios de Choobbasti (años, citado por Choobbasti et al., 2018), el nanosílice tiene la capacidad de mejorar significativamente las propiedades ingenieriles del suelo incluso si este se encuentra presente en pequeñas cantidades. Este efecto se debe a su alta superficie específica. La importancia de la investigación de Choobbasti et al., (2018) radica en que fue el primero en realizar un estudio bajo condiciones dinámicas. Los especímenes estudiados fueron moldeados con diversos porcentajes de nanosílice (0%, 5%, 10% y 20%) y ensayados bajo diferentes presiones de confinamiento (50, 100 y 200 kPa). A partir de los resultados de las combinaciones de porcentaje de nanosílice y presión de confinamiento se analizó los valores del módulo de elasticidad cíclico y el amortiguamiento. Se llegó a la conclusión de que el módulo de elasticidad crece en función del aumento del porcentaje de nanosílice hasta un óptimo de 10% de nanosílice, si el porcentaje de nanosílice es superior, el módulo de elasticidad decrece. Adicionalmente, el módulo de elasticidad aumenta debido a un aumento de la presión de confinamiento, esto se debe a que hay mayor restricción de movimiento lateral para las partículas. Por otro lado, el amortiguamiento decrece en función del aumento del porcentaje de nanosílice hasta que alcanza el 10% de nanosílice, cuando se supera dicho porcentaje, el amortiguamiento crece. Asimismo, el amortiguamiento decrece en función del aumento de la presión de confinamiento cuando esta es superior a los 100 kPa.

Por último, Wang et al. (2020) realizaron un estudio donde propusieron un modelo de cálculo para la deformación plástica acumulada (APS) del suelo residual de granito bajo cargas cíclicas. Para ello, realizó un conjunto de ensayos triaxiales cíclicos. El suelo residual de granito es un tipo de suelo producto de la meteorización mecánica y química que presenta la roca de granito in situ. Según Yin et al. (2016) este material se puede emplear como subrasante. Cuando es empleado como material de subrasante, este suelo se somete a condiciones de carga dinámicas, por lo que resulta útil comprender y evaluar su deformación plástica. La muestra que se ensayó fue obtenida a una profundidad de 4.0 – 6.0 m en la ciudad de Jinjiang, China. Esta muestra se clasificó según el sistema SUCS como una arcilla arenosa (CL). Para el ensayo triaxial cíclico, se establecieron diferentes combinaciones de esfuerzo de consolidación efectiva (30, 40 y 50 kPa), esfuerzo desviador estático inicial (0, 10, 15, 20, 30 y 35 kPa) y de esfuerzo cortante cíclico (30, 40, 50 y 60 kPa). Se analizó la influencia de cada uno de los factores mencionados en el APS. Se llegó a la conclusión de que, para todos los casos, el APS aumenta hasta alcanzar un valor asintótico a medida que el número de ciclos aumenta. Frente a un aumento del esfuerzo desviador estático inicial o del esfuerzo cortante cíclico, el APS muestra un comportamiento creciente y valores asintóticos. Mientras que, para un aumento del esfuerzo de consolidación efectiva, con los otros valores constantes, el APS se desarrolla relativamente lento a medida que aumenta el número de cargas cíclicas.

### **2.3. Ensayo de consolidación a deformación constante**

El ensayo de consolidación a deformación constante (CRS, por sus siglas en inglés) es un ensayo utilizado principalmente para medir las propiedades de consolidación de suelos cohesivos, como las arcillas. Este método consiste en someter una muestra de suelo saturado, restringida lateralmente, a una compresión unidimensional controlada por desplazamientos a una tasa de deformación vertical constante y con drenaje único axial por su extremo superior (Fox et al., 2014).

Este tipo de ensayo está siendo muy utilizado en la actualidad debido a las múltiples ventajas que ofrece como la continuidad de los datos obtenidos y la rapidez para completarlo, en comparación a ensayos convencionales como la consolidación a carga incremental (IL, por sus siglas en inglés); asimismo, este ensayo ayuda a obtener el coeficiente de permeabilidad empleando los resultados y la ley de Darcy. Mesri y Feng (2019) realizaron ensayos CRS para siete arcillas blandas y dos turbas fibrosas, con el objetivo de comprobar la confiabilidad de este ensayo y obtuvieron los coeficientes de permeabilidad, para ello emplearon una tasa de

deformación vertical impuesta igual a 10 veces la tasa de deformación vertical end-of-primary (EOP) durante dos días. Además, analizan el impacto de la relación vacíos ( $e$ ), el coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) y el esfuerzo efectivo vertical ( $\sigma'v$ ) en los resultados finales.

A pesar de sus ventajas, el ensayo CRS presenta incertidumbres que obstaculizan un uso más generalizado de esta prueba en la práctica. Por ello, Fox et al. (2014) realizaron una investigación para medir la precisión de este ensayo mediante dos métodos de análisis: lineales y no lineales. Su investigación consistía en realizar simulaciones numéricas utilizando un modelo de consolidación de deformación para condiciones de carga CRS empleando las propiedades de materiales publicados para dos suelos arcillosos reconstituidos y tres tasas de deformación aplicadas.

Luego de realizar el análisis de las simulaciones, Fox et al. (2014) concluyeron que el método más apropiado para suelos considerando compresibilidad lineal es el método lineal detallado en la norma ASTM D4186; en cambio, para suelos con compresibilidad no lineal, el método más recomendable es el propuesto en la teoría no lineal modificada (MNL, por sus siglas en inglés) y advierten que las ecuaciones propuestas por la ASTM D4186 para análisis de datos no lineales, contienen errores y no deben emplearse. Asimismo, recomiendan que el análisis de datos finales debe realizarse utilizando el método apropiado en base a la relación de compresibilidad del suelo, debido a que en su mayoría presentaron resultados consistentes para la compresibilidad de la arcilla, la conductividad y el coeficiente de consolidación constante o variable. Finalmente, señalan que se deben emplear tasas de deformación bajas para suelos sobreconsolidados, debido a que en los ensayos realizados se producían errores cerca del esfuerzo de preconsolidación en condiciones sobreconsolidadas (Fox et al., 2014).

Actualmente existen muchas investigaciones en las que realizan comparaciones entre el ensayo CRS y el ensayo IL, una de estas investigaciones se presenta en un artículo realizado por Fox y Pu (2015). En este artículo se presenta una investigación numérica comparativa entre el ensayo de consolidación por carga incremental y el ensayo de consolidación a deformación constante para el transporte de solutos inducido por consolidación de grandes deformaciones unidimensionales. Este transporte ayuda a explicar la dispersión, difusión, advección, sorción lineal y no lineal y es consistente con variaciones temporales y espaciales de porosidad y velocidad de filtración en el suelo sometido a consolidación (Fox & Pu, 2015)

Para realizar esta comparación utilizaron la arcilla caolinita como material, la cual, gracias a sus propiedades, produce respuestas diferentes y significativas durante la aplicación de los dos ensayos de consolidación (IL y CRS) como la tensión aplicada, la tasa de asentamiento, el exceso de presión de poros y la deformación local. Esta diferencia también se manifestó al no coincidir los flujos de salida de masa de solutos durante el proceso de consolidación de ambos ensayos, debido que el ensayo en condiciones de carga incremental producía una mayor salida del fluido en el límite superior. Sin embargo, las salidas de masas y la concentración final del soluto coincidieron en general, siempre y cuando también coincidieran el tiempo total transcurrido y la deformación media final (Fox & Pu, 2015).

#### **2.4. Ensayo de consolidación inducida por flujo**

Janbaz y Maher (2017) estudiaron el comportamiento de consolidación y permeabilidad de los sedimentos dragados de la Bahía de Newark mediante una prueba de consolidación inducida por flujo. En la investigación, se explica que, anualmente, una gran cantidad de sedimentos blandos deben extraerse de la bahía de Nueva Jersey para crear suficiente profundidad en las vías fluviales para que los barcos puedan movilizarse. Una vez extraído el material, este debe desecharse en infraestructuras de eliminación de residuos, tales como vertederos.

Debido al impacto ambiental que puede ocasionar el movimiento del suelo, se requiere conocer el comportamiento y propiedades de los sedimentos, en especial su asentamiento temporal. Los sedimentos tienen una naturaleza fina (son limos y arcillas) y su contenido de agua es muy elevado. Además, sufren grandes deformaciones debido a su peso propio. Por estas razones, el ensayo de consolidación tradicional no es eficaz para este tipo de suelos.

Janbaz y Maher (2017) tomaron 11 muestras de sedimentos y se realizaron 11 ensayos de consolidación inducida por flujo (SICT por sus siglas en inglés). Para cada muestra, se inició con una prueba aparato con el que se realiza el ensayo. Entre este último paso y el segundo, se van aplicando esfuerzos de consolidación debido al peso propio en un cilindro graduado. Luego, se aplicó un esfuerzo de aproximadamente 0.3 kPa a la muestra que se encuentra bajo succión. Finalmente, se aplicó el nivel de esfuerzo deseado en cada ensayo tapando el estanque del intermedio que densifica a la muestra.

A partir de los resultados obtenidos en su investigación, Janbaz y Maher (2017) concluyen que el comportamiento de consolidación del sedimento blando no puede idealizarse siguiendo las

hipótesis de consolidación tradicional, debido a que estas no consideran deformaciones grandes, el efecto del peso propio y la variación de la permeabilidad con la relación de vacíos. Además, concluyeron que el ensayo proporciona conjuntos de datos fiables y repetibles para predecir el comportamiento y asentamiento de sedimentos blandos bajo cualquier aplicación de esfuerzo adicional.

Por otro lado, Tian, Bareither y Scalia (2019) describieron el diseño, construcción y evaluación de un aparato del ensayo de consolidación inducida por flujo. Además, realizaron ensayos utilizando 3 materiales para tener un rango de compresibilidad más grande: arcilla de caolín pura, arcilla de caolín combinada con harina de sílice (arcilla limosa) y harina de sílice combinada con arena (limo arenoso). Como parte de la investigación, se realizaron pruebas edométricas para evaluar la validez de este ensayo en la medición de la consolidación de los 3 materiales estudiados y comparar resultados con el SICT.

Para evaluar el comportamiento de la consolidación de los materiales, se utilizaron las ecuaciones que relacionan el esfuerzo efectivo con la relación de vacíos ( $\sigma'$  vs  $e$ ), y la conductividad hidráulica con la relación de vacíos ( $k$  vs  $e$ ). En total, se realizaron 12 ensayos. Para cada material, se realizaron tres SICT: el primero en la zona superior del espécimen; el segundo en la zona intermedia, y el tercero, en la zona inferior. El cuarto ensayo fue de consolidación edométrica.

Los resultados de la investigación indicaron que las relaciones  $\sigma'$  vs  $e$  y  $k$  vs  $e$  fueron comparables, en el caso del caolín puro, entre los SICT y consolidación edométrica. Las conductividades hidráulicas obtenidas en el SICT fueron menores que las obtenidas en el ensayo del edómetro. Además, los resultados de conductividad hidráulica y compresibilidad del SICT, realizados en cada una de las 3 muestras, produjeron relaciones entre esfuerzo y conductividad prácticamente iguales. A partir de ello, se concluyó que el ensayo es replicable para los tres materiales analizados.

Asimismo, se observó que la arcilla tenía una relación de vacíos y compresibilidad menores que los otros dos materiales, debido al porcentaje de limo (60%) que poseía. Sin embargo, su conductividad hidráulica era similar, debido al 40% de caolín que tenía. Además, las conductividades hidráulicas del limo arenoso obtenidas del SICT y del ensayo edométrico eran prácticamente iguales. Ello se debe a la gran conductividad de este material, por lo que la teoría de consolidación de pequeñas deformaciones (teoría tradicional) es aplicable.

Finalmente, Estepho (2014) realizó una investigación sobre la aplicación del SICT a los relaves mineros. El tiempo de consolidación de este material es muy largo, pudiendo llegar a siglos. El grado de consolidación y permeabilidad de los relaves es muy importante para diseñar adecuadamente la infraestructura donde se colocarán los residuos mineros.

Se realizaron 6 SICT en el laboratorio de la Universidad de Columbia Británica. Las muestras fueron arcilla caolinita. Los dos primeros ensayos fueron considerados como prueba, por lo que sus resultados no fueron publicados. La diferencia de los 4 ensayos restantes estuvo en la carga efectiva aplicada al final. Esta carga varió desde 45 kPa hasta 160 kPa.

La prueba que tuvo los resultados más dispersos fue la tercera: aquella cuyo esfuerzo efectivo final fue el más bajo. Esta diferencia puede atribuirse a que una fricción adicional en el sistema, como cargar el pistón con la fricción interna de la carcasa de la muestra, es más significativa cuando el esfuerzo efectivo final es más bajo. Por esta razón, Estepho (2014) concluye que el SICT debe ser realizado con esfuerzos efectivos finales altos.

### **2.5. Ensayo de consolidación incremental**

Chu et al. (2017) realizó pruebas con un edómetro de carga incremental en arcillas puras compuestas con caolín y bentonita en diferentes proporciones. El estudio consistió en comparar la relación de vacíos que se obtuvo en el ensayo con los resultados obtenidos mediante los métodos empíricos propuestos por Burland (1990) y Horpibulsuk et al. (2011). Para evaluar la diferencia entre estos métodos, se utilizó una línea de compresión intrínseca (ICL), la cual relaciona el esfuerzo efectivo  $\sigma_v$ , ocasionado por las cargas incrementales, con la relación de vacíos  $e$ . Las pruebas de edómetro paso a paso se realizaron siguiendo el ASTM estándar D2435. La primera carga aplicada fue de 12,5 kPa y la carga posterior se duplicó para cada paso hasta un valor máximo de 1600 kPa.

Se observó que los resultados son más consistentes cuando se utiliza el índice de vacíos  $I_v$  propuesto por Burland, que el índice de vacíos propuesto por Horpibulsuk  $I_{vH}$ . Por lo tanto, se concluye que la relación y la definición propuesta por Burland funciona perfectamente para arcillas puras del estudio, lo que indica que el efecto y presencia de caolín y bentonita en arcilla es casi insignificante al aplicar el marco de análisis de Burland.

Kurama et al. (2020) demostraron que el ensayo de consolidación de Terzaghi con el edómetro no es muy preciso para edificios de gran altura, ya que demandan una mayor profundidad de

cimentación. El estudio consistió en ensayar una misma muestra, pero con distintos tipos de edómetros de diferente año de fabricación, ya que antes los requisitos de carga no eran altos. Cada equipo se fabricó con sus especificaciones y limitaciones. Si se sobreespecifica el equipo, habrá cierta precisión que se vea comprometida y por lo tanto los valores obtenidos en los laboratorios no serán los correctos. Se compararon los resultados de consolidación entre tres diferentes equipos. El primero es una máquina de consolidación CRS que se fabricó en Estados Unidos. El segundo es el Oedometer E4 que se fabricó en Japón y el tercero es el Oedometer B3 que se fabricó en Singapur.

Como resultado del ensayo se obtuvo que el CRS y el Edómetro E4 dan resultados similares, mientras que el Edómetro B3 da un resultado completamente diferente para esfuerzos muy elevados. Solo se obtienen resultados similares hasta los primeros 500 kPa de esfuerzo. El edómetro B3 también muestra una mayor presión durante el ensayo y esto ocurre debido a que el suelo comienza a salir del anillo del edómetro, lo cual es muy común en los edómetros con modelo tipo yugo y viga.

Andries et al. (2019) realizaron el ensayo de deformación constante (CRS) y ensayo de consolidación incremental (IL) para una arcilla sobreconsolidada de alta plasticidad. El estudio consiste en comparar los resultados de IL y CRS de dos muestras de arcilla rígidas no perturbadas de la formación Maldegem (Paleógeno). Las principales ventajas de la prueba CRS son que los datos son continuos y que la prueba se puede completar considerablemente más rápido que una prueba IL para una misma muestra.

Como resultado se obtuvo que con ambos ensayos se hallaban los mismos resultados de compresibilidad y conductividad hidráulica, pero el IL demandaba mucho más tiempo de prueba respecto al CRS.

## CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describen con mayor detalle los ensayos especiales estudiados. Estos incluyen el ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo, el ensayo triaxial cíclico, el ensayo de consolidación a deformación constante, el ensayo de consolidación incremental y el ensayo de consolidación inducida por flujo.

### **3.1. Ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo**

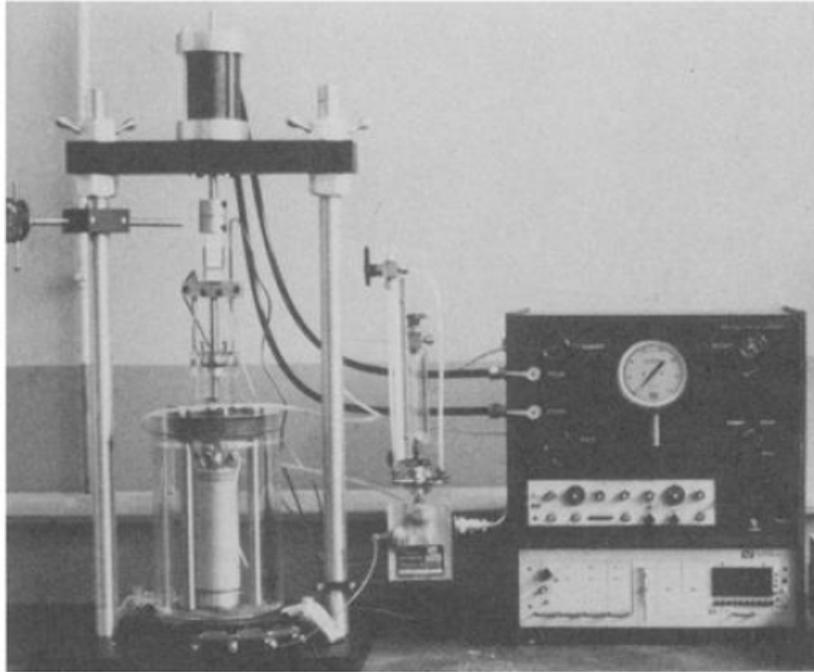
#### 3.1.1. Descripción del ensayo

La denominación de “ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo” engloba una serie de adaptaciones del ensayo triaxial convencional. Por ende, las características y aplicaciones propias del ensayo pueden variar dependiendo del estudio en los que se utilice. En su definición más simple, este tipo de ensayos están orientados a transmitir esfuerzos a los especímenes en trayectorias distintas a las usuales (axiales) por medio de la aplicación de esfuerzos desviadores.

#### 3.1.2. Descripción del equipo

Dada la variedad de implementaciones del ensayo, los equipos utilizados pueden variar en características. La característica en común de todos los equipos utilizados es la capacidad de ejercer esfuerzos sobre los especímenes en las trayectorias especificadas.

En el estudio de Finno & Kim (2012), se utiliza un cargador cíclico CKC e/p. Este tipo de equipo es descrito por Chan (1981) como un sistema de cargas controladas que depende de un transductor de presiones neumático para la aplicación de esfuerzos cíclicos. Este dispositivo puede aplicar esfuerzos máximos de 840 kPa, en relación directa con cambios de corriente continua (por esta razón, se le denomina “electrónico a neumático”), tanto en modalidades isotrópicas y anisotrópicas. Adicionalmente, destaca por el bajo costo inicial para su implementación. Una figura representativa del arreglo se presenta en la Figura 1.



*Figura 1.* Cargador cíclico electroneumático. Extraído de Chan (1981).

En la imagen, se aprecia que el arreglo experimental no difiere considerablemente a los utilizados tradicionalmente en ensayos triaxiales, en cuanto a su estructura. Otra aplicación de aparatos relativamente convencionales en ensayos con trayectoria de esfuerzos puede inferirse de las experiencias de VandenBerge et al. (2015). La reorientación de esfuerzos realizada por los autores de la investigación se basa en la consolidación anisotrópica de los especímenes, proceso que debería poder utilizarse con dispositivos que sigan los lineamientos del estándar para ASTM 7181-20 (ASTM, 2020b), que regula la ejecución de los ensayos triaxiales consolidados y drenados.

En contraposición, estudios como los de Bhattacharya & Prashant (2021) pueden llegar a proponer y utilizar sus propios arreglos experimentales. La composición del arreglo experimental de la investigación mencionada fue descrita en el capítulo 2.1, y se muestra en la Figura 2. Como se puede observar, este arreglo difiere del presentado líneas arriba, pero cumple de todas maneras con la aplicación de esfuerzos sobre el espécimen en más de un eje. El arreglo destaca por permitir la representación adecuada de condiciones de esfuerzos planares, y por poder realizar ensayos con control de cargas y deformación.

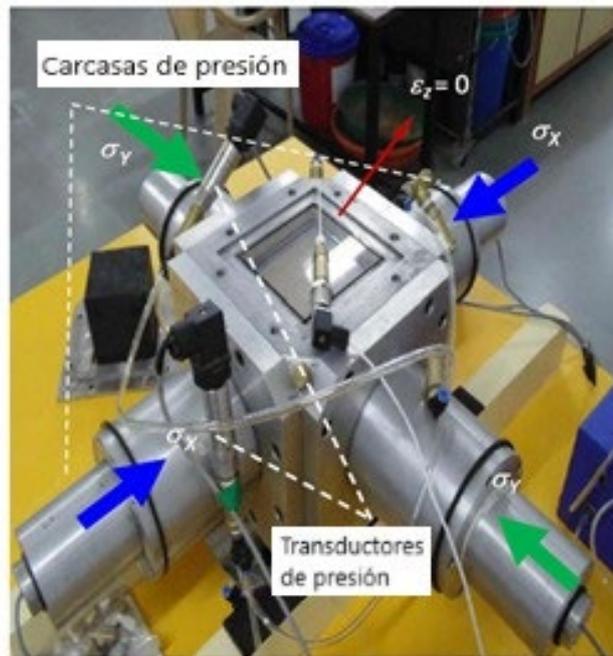


Figura 2: Arreglo experimental multiaxial de barrera flexible. Extraído de Bhattacharya & Prashant (2021).

Nota. Desde la izquierda, se señalan las carcasas de presión; y desde la derecha, los transductores de presión. Las flechas azules muestran la dirección de aplicación del esfuerzo en X, mientras que las verdes indican la dirección de los esfuerzos del eje Y. La flecha roja indica el estado de deformación nula en el eje Z, correspondiente a la configuración presentada.

### 3.1.3. Procedimiento del ensayo

En primer lugar, deben ensamblarse los arreglos experimentales a utilizar. Seguidamente, se preparan y moldean los especímenes a ensayar, con las características necesarias para cada aplicación particular. Posteriormente, los especímenes se colocan y aseguran dentro del arreglo experimental (ya sea en células ensamblables u otro espacio designado). Tras esta preparación estándar, la aplicación de las trayectorias puede variar entre investigaciones.

En el estudio de Finno & Kim (2012), que estudia la historia reciente de esfuerzos en ciertos especímenes, las trayectorias de esfuerzo se aplican utilizando esfuerzos axiales y radiales sobre los especímenes. Las trayectorias se caracterizan como relaciones entre el esfuerzo efectivo normal ( $p'$ ) y esfuerzo desviador ( $q$ ), calculados con las ecuaciones mostradas a continuación:

$$p' = \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_r}{3}$$

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$

Donde  $\sigma'_a$  es el esfuerzo efectivo axial y  $\sigma'_r$  es el esfuerzo efectivo radial.

Con este mecanismo, es posible plantear la aplicación de múltiples tipos de trayectoria. En la investigación anteriormente mencionada, se aplicaron trayectorias de consolidación anisotrópica o  $K_C$  (con y sin descarga) y consolidación isotrópica. Los diagramas que representan la aplicación de estas trayectorias se presentan a continuación:

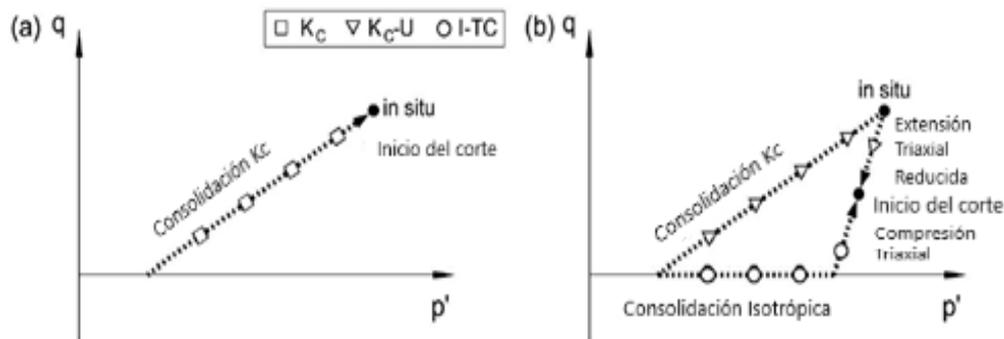


Figura 3: Trayectorias de esfuerzos: (a) recompresión a esfuerzos in-situ, (b) evaluación de historia reciente de esfuerzos. Adaptado de Finno & Kim (2012).

Equipos como el utilizado en Bhattacharya & Prashant (2021) aplican esfuerzos únicamente en las direcciones del plano. Sin embargo, los esfuerzos aplicados en cada una de ellas son independientes, por lo cual es posible aplicar trayectorias de esfuerzo representadas como relaciones entre los esfuerzos adicionales aplicados en los ejes Y y X.

El estudio de VandenBerge et al. (2015) plantea la reorientación de los esfuerzos principales. Para reorientaciones de  $90^\circ$ , los autores presentan los métodos de extensión triaxial (ACU-TE) y de compresión triaxial con reorientación de esfuerzos (TC-SR). La aplicación de ambos métodos sigue principios similares, como la consolidación anisotrópica y la igualdad de esfuerzos en todas las direcciones al momento de la falla. En el primer método, el esfuerzo vertical es mayor a los horizontales, y en la etapa de corte, este se disminuye hasta provocar la falla. En contraste, el segundo método realiza la consolidación anisotrópica con esfuerzos horizontales elevados, con los cuales se logra la falla y reorientación de esfuerzos por medio del incremento del esfuerzo vertical (VandenBerge et al., 2015).

#### 3.1.4. Parámetros obtenibles

Cuando se utilizan directamente para analizar especímenes, los ensayos triaxiales con trayectorias de esfuerzo permiten obtener ciertos parámetros. Entre ellos, destacan las deformaciones unitarias durante el ensayo, medidas con LVDTs; y el módulo de corte secante, en función del esfuerzo desviador y deformación cortante (Finno & Kim, 2012), utilizando las ecuaciones planteada a continuación:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$

$$G_{sec} = \frac{\Delta q}{3\varepsilon_{sh}}$$

Donde  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_r$  son las deformaciones unitarias axial y radial, respectivamente;  $\varepsilon_{sh}$  es la deformación unitaria por corte, y  $G_{sec}$  es el módulo de corte secante.

#### 3.1.5. Aplicaciones en la ingeniería

Los procedimientos utilizados en Finno & Kim (2012) y VandenBerge et al. (2015) muestran que el ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo puede utilizarse como un “ensayo intermedio” que permite simular diversas condiciones de suelo en los especímenes. Las variaciones en condiciones y su impacto en ciertos parámetros son luego evaluadas con otros ensayos, como el ensayo de corte simple directo (DSS). Alternativamente, estudios como los de Bhattacharya & Prashant (2021) obtienen y evalúan parámetros de forma directa, por observación de las deformaciones durante todo el ensayo.

Este tipo de ensayos son también útiles para observar el comportamiento de los especímenes bajo las condiciones simuladas. El comportamiento puede caracterizarse como relaciones entre parámetros como deformaciones unitarias, esfuerzos aplicados, deformaciones por corte, ángulos de dilatación, etc.; así como con la elaboración de superficies de fluencia.

#### 3.1.6. Comparación con el ensayo tradicional.

Utilizando equipos “convencionales”, la ejecución del ensayo triaxial con trayectorias no difiere del procedimiento tradicional, salvo en la forma de aplicación del esfuerzo total sobre el espécimen.

Existen tres tipos estandarizados de ensayo triaxial convencional: el ensayo no consolidado no drenado (UU), el consolidado no drenado (CU) y el consolidado drenado (CD). Para los dos primeros tipos de ensayo, la carga se aplica utilizando solo dispositivos de carga axial complementados por dispositivos de control de presión (ASTM, 2015, 2020a); para el caso específico del ensayo CU, se permite únicamente la consolidación isotrópica (ASTM, 2020a). En el caso del ensayo CD, se permite la aplicación de consolidación tanto isotrópica como anisotrópica en los especímenes, y el dispositivo de presión también es responsable de ejercer esfuerzos (ASTM, 2020b). En contraste, los ensayos con trayectorias se caracterizan por ejercer esfuerzos en más de un eje, ya sea de forma radial u axial; estas trayectorias se aplican tanto en consolidación isotrópica y anisotrópica como en la aplicación de cargas a la falla.

Todos los ensayos convencionales anteriormente mencionados están definidos para poder obtener la resistencia del suelo, las relaciones entre deformación y resistencia, y para poder elaborar los diagramas de círculo de Mohr (ASTM, 2015, 2020a, 2020b). Como se mencionó en la sección anterior, la diferencia de los ensayos con trayectoria de esfuerzos es que se enfocan más en la obtención de las relaciones de comportamiento que en el cálculo específico de algún parámetro.

### **3.2. Ensayo triaxial cíclico**

#### **3.2.1. Descripción del ensayo**

Las normas aplicables a los ensayos triaxiales son dos: la norma ASTM D5311-13 y la ASTM D3999-11. Ninguna de estas normas tiene un equivalente en las Normas Técnicas Peruanas. El ensayo triaxial dinámico es un ensayo de laboratorio que permite la medición de las propiedades dinámicas considerando altas deformaciones. Se le aplica al espécimen ensayado cargas que simulan la acción de un sismo, aplicando un esfuerzo desviador cíclico y un confinamiento constante, similar a un ensayo triaxial estático. Es decir, en este ensayo, el espécimen se somete a una presión de confinamiento y después a una tensión cíclica axial. Sin embargo, según Kim (1991) el ensayo triaxial cíclico presenta las siguientes limitaciones:

- Por debajo de  $10^{-2}$  %, las deformaciones no son representativas.
- Los resultados de las etapas de compresión y extensión para cada ciclo de carga son diferentes.
- En el interior del espécimen, se produce una redistribución de la relación de vacíos mientras se ejecuta el ensayo.

- Se produce una concentración de esfuerzos en dos secciones del espécimen: en su base y parte superior.
- El esfuerzo principal mayor cambia de dirección en 90° durante la prueba.

### 3.2.2. Descripción del equipo

El equipo triaxial cíclico se compone de los siguientes cuatro elementos: sistema hidráulico, un panel de control, un sistema de aplicación de presión y un sistema automatizado de captura y procesamiento de datos. El sistema hidráulico permite una aplicación de carga a la probeta mediante un sistema de presiones con aceite. Mientras que el sistema de ampliación de presión permite aplicar una presión de confinamiento y una contrapresión a la probeta ensayada. En el panel de control se regula los porcentajes de trabajo con respecto a un valor máximo de carga o de deformación. Para los ensayos cíclicos se mantiene una deformación alrededor de 7.50 cm. Por último, el sistema automatizado brinda las configuraciones para diseñar y ejecutar los siguientes cuatro tipos de pruebas: la prueba estática, la prueba dinámica senoidal, la prueba con patrón dinámico arbitrario y el desplazagrama (Flores et al., 2013). La figura 4 muestra el esquema de un equipo triaxial y las partes descritas.

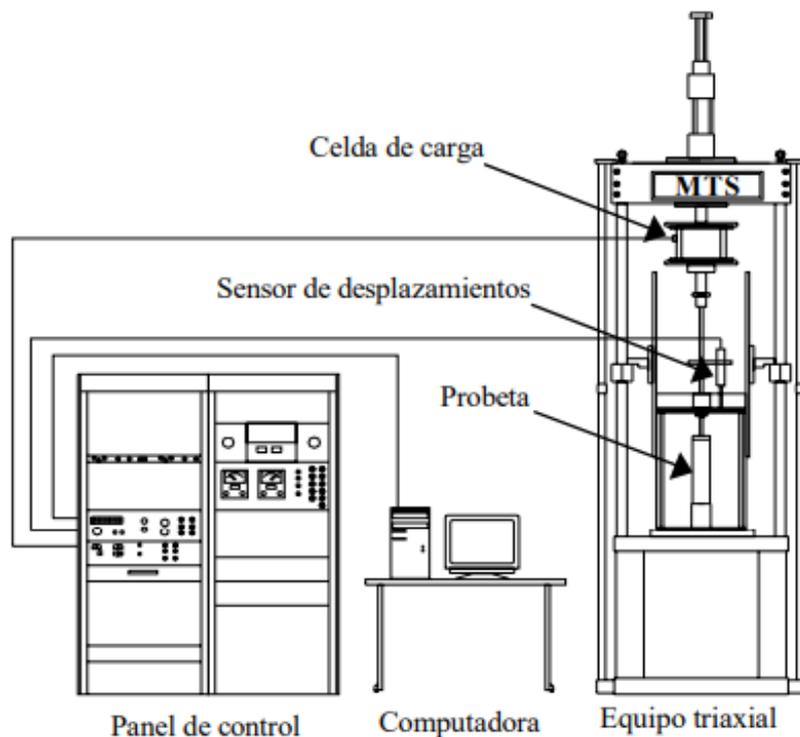


Figura 4. Esquema de un equipo triaxial cíclico. Adaptado de Flores et al. (2013).

### 3.2.3. Procedimiento del ensayo

El ensayo triaxial cíclico se puede ejecutar con dos metodologías en función de las condiciones de control según la norma ASTM aplicada. Cada metodología permite calcular parámetros distintos.

- Condiciones controladas de carga (ASTM D5311-13): Las cargas son de tipo hidráulicas o neumáticas. Se emplea para determinar la resistencia a la fuerza cortante o el potencial de licuefacción de la muestra de suelo. Este procedimiento presenta la desventaja de que si se considera más de una simulación de sismo se requieren de muchas pruebas.
- Condiciones controladas de deformación (ASTM D3999-11): Las cargas son de tipo mecánicas o hidráulicas. Se emplea para determinar el módulo de elasticidad y el amortiguamiento de los suelos

Los procedimientos para ambas metodologías son similares. A continuación, se detalla el procedimiento general para la ASTM D3999-11. En primer lugar, se prepara la probeta del espécimen a ensayar de forma análoga a la del ensayo triaxial estático. En la primera etapa, se aplica la presión de confinamiento al espécimen con la válvula de drenaje abierta para que este se consolide. Para la siguiente etapa, se aplica la carga cíclica sinusoidal con una frecuencia correspondiente al fenómeno simulado. Durante esta etapa, la válvula de drenaje se cierra. Según Seed (1975), un terremoto de magnitud 7.5, corresponde a 15 ciclos de carga y descarga.

### 3.2.4. Parámetros obtenibles

Por un lado, la norma ASTM D5311-13 brinda los lineamientos para determinar la resistencia a la licuefacción de una muestra ensayada. Con este ensayo se obtiene la curva de resistencia a la licuefacción (CRR). Según Seed (1975), con los resultados del ensayo triaxial cíclico, se calcula la resistencia a la licuación in situ a partir de la siguiente fórmula:

$$CRR_{in\ situ} = C_r * [CRR_{lab}]_{N=N_e}$$

Donde:  $C_r$ :factor que considera las condiciones de esfuerzo in situ,  $CRR_{lab}$ :curva de resistencia a la licuefacción de laboratorio,  $CRR_{in\ situ}$ : curva de resistencia a la licuefacción de in situ y  $N_e$ :número de cargas cíclicas equivalentes a una magnitud determinada.

Por otro lado, la norma ASTM D3999 - 11 brinda los lineamientos para determinar el módulo de elasticidad y amortiguamiento a partir del ensayo triaxial cíclico. El amortiguamiento es calculado a partir de las curvas histeréticas producidas en cada ciclo de carga y descarga. El módulo de elasticidad se calcula a partir de la relación entre el esfuerzo y deformación. De forma geométrica, es la pendiente máxima de una línea medida desde el origen hasta un punto de la curva de esfuerzo – deformación para un ciclo de histéresis.

Para el cálculo del módulo de elasticidad y amortiguamiento se emplea las siguientes fórmulas:

$$E = \frac{L_{DA}}{S_{DA}} * \frac{L_S}{A}$$

Donde:  $L_{DA}$ : carga de amplitud PP (kN),  $S_{DA}$ :deformación de amplitud PP (mm),  $L_S$ : Altura de la muestra después de la consolidación (mm) y  $A$ : área después de la consolidación (mm<sup>2</sup>) y  $E$ : módulo de Young (kPa).

$$D = \frac{A_L}{4 * \pi * A_T} * 100\%$$

Donde:  $A_L$ : área del ciclo de histéresis,  $A_T$ : área del triángulo sombreado en la figura 5 y  $D$ : relación de amortiguamiento (%).

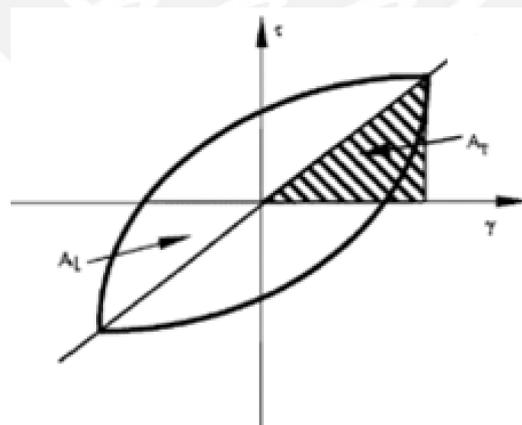


Figura 5. Curva correspondiente a un ciclo de histéresis. Adaptado de Kim (1991).

### 3.2.5. Aplicaciones en la ingeniería

El ensayo triaxial cíclico es aplicado cuando se requiere conocer el comportamiento del suelo frente a una acción de sismo. En el caso de arenas, se puede emplear para verificar su resistencia

a la licuefacción o de estudiar el comportamiento de nuevos materiales constructivos como la ceniza de carbón. Adicionalmente, se puede emplear para verificar el comportamiento dinámico de los suelos cementados o calcular las deformaciones acumuladas a las que se someten los suelos al estar expuestos a varios ciclos de carga y descarga in situ.

### 3.2.6. Comparación con otros ensayos

Por un lado, el ensayo triaxial cíclico comparte similitudes con el ensayo triaxial convencional en los aspectos de preparación de muestra, aplicación de carga de consolidación y toma de datos automatizadas. Sin embargo; debido a las condiciones dinámicas en las que se realiza el ensayo triaxial, los parámetros obtenibles en el ensayo triaxial cíclico y convencional no son comparables. Por otro lado, aunque el ensayo triaxial cíclico no comparta la misma metodología de preparación de muestra que el ensayo de corte simple cíclico. Si las muestras se preparan bajo condiciones similares y se ejecuta el ensayo triaxial cíclico siguiendo los lineamientos para la obtención de la resistencia a la licuefacción de la muestra, se obtiene que los parámetros obtenidos en el ensayo triaxial cíclico y en el ensayo de corte simple cíclico son comparables. Adicionalmente, según la investigación Nong et al. (2021), se pueden convertir valores del ensayo triaxial cíclico (o del ensayo de corte simple cíclico) en valores equivalentes del ensayo de corte simple cíclico (o del ensayo triaxial), debido a una correlación parabólica entre el factor de corrección y la relación de esfuerzos constante estático inicial que presentan ambos ensayos.

## **3.3. Ensayo de consolidación a deformación constante**

### 3.3.1. Descripción del ensayo

El ensayo de consolidación a deformación constante (CRS, por sus siglas en inglés) es una alternativa rápida y eficiente para analizar la consolidación de un suelo cohesivo en comparación con el ensayo tradicional de carga variable (IL, por sus siglas en inglés), también conocido como el ensayo del edómetro. El ensayo CRS fue desarrollado primero por Smith y Wahls en 1969; dos años después, Wissa et al. (1971) propusieron una teoría más completa para el análisis de los resultados y, desde entonces, se ha vuelto muy popular en la comunidad de ingeniería geotécnica y es muy aplicado en la actualidad (Moozhikkal et al., 2019).

El CRS es un ensayo en el que la muestra saturada del suelo fino se somete a cargas variables que mantienen una velocidad de deformación vertical constante durante todo el ensayo y permite obtener las propiedades de consolidación de la muestra, tales como la historia de esfuerzos, la compresibilidad, la conductividad hidráulica y el coeficiente de consolidación de

suelos (Fox et al., 2014). Este ensayo se rige por la norma ASTM D4186, la cual nos indica que para realizarlo se debe asumir lo siguiente:

- El suelo es homogéneo, saturado y se encuentra restringido lateralmente.
- La relación entre la permeabilidad del suelo y su compresibilidad es constante.
- El flujo de agua de los poros del suelo ocurre en una sola dirección vertical. Asimismo, se aplica la Ley de Darcy para el flujo a través de los poros.
- La compresibilidad de los granos del suelo y del agua es insignificante.
- El exceso de las presiones del agua intersticial se distribuye parabólicamente a lo largo de la muestra.
- Durante un intervalo de corta duración de carga, la relación entre el logaritmo del esfuerzo y la deformación es lineal.

Frente a los métodos convencionales para estudiar la consolidación, el CRS presenta múltiples ventajas, entre las cuales se pueden mencionar los periodos de tiempo más cortos para completar el ensayo y la recopilación automática y continua de los resultados. Gracias a ello se puede obtener una mayor cantidad de datos que permitirán determinar con mejor precisión los parámetros necesarios como el límite elástico de consolidación (Cong et al., 2019). A pesar de las ventajas mencionadas, el ensayo CRS presenta los siguientes problemas y limitaciones:

- No se puede obtener la compresión secundaria sin control de carga de retroalimentación.
- La presión de agua intersticial depende de la constante de deformación, por lo que esta tasa de deformación asume un rol muy importante en los resultados.
- No aborda los problemas de los efectos de la tasa de deformación.
- No es aplicable a suelos con permeabilidad alta, como arenas y otros suelos granulares, ni a suelos parcialmente saturados.

### 3.3.2. Descripción del equipo

En la figura 6, se presenta una representación esquemática del aparato de consolidación estándar descrito en la norma ASTM D4186. Dentro de sus principales componentes, se destacan la cámara de presión, la celda de la muestra, el control de filtración, el pistón de carga, el transductor de presión de poros y el sistema de contrapresión. Se puede observar que los componentes básicos son similares a los de una celda para realizar el ensayo de consolidación tradicional. La diferencia radica en la incorporación de la cámara de presión, similar al de una

celda triaxial, para aplicar contrapresión a la muestra de suelo para su saturación (Moozhikkal et al., 2019).

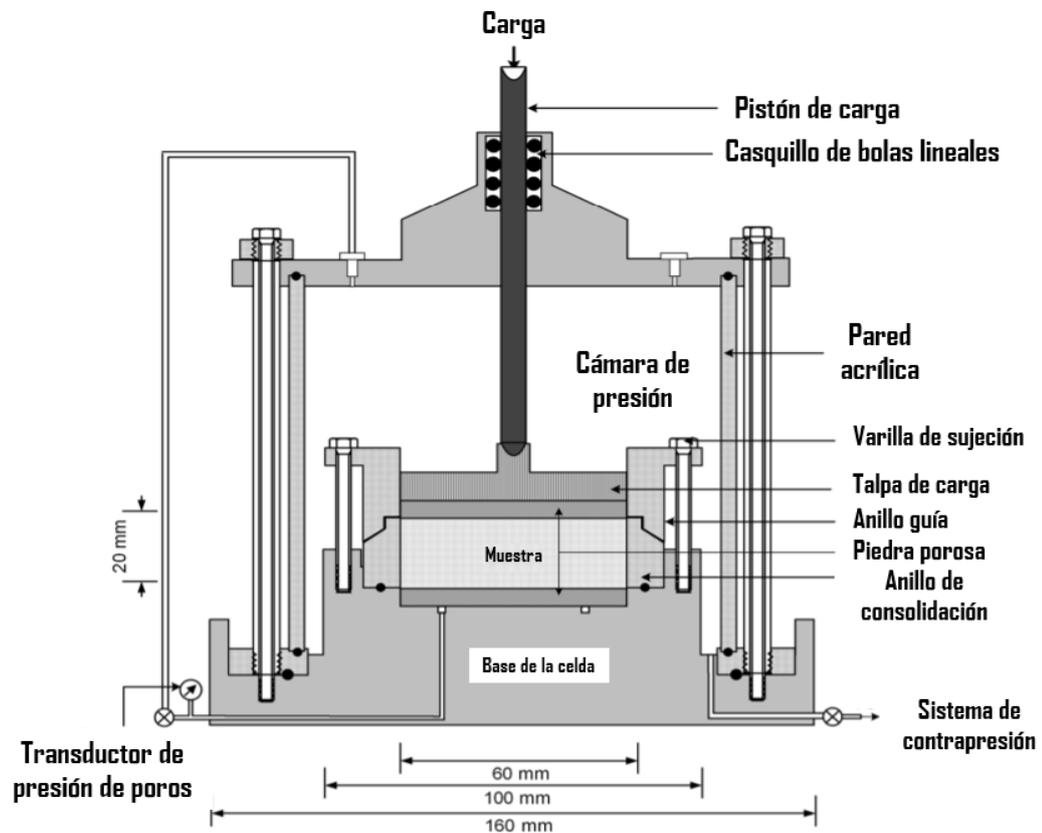


Figura 6. Representación esquemática de un aparato para realizar el CRS. Adaptado de Moozhikkal et al., 2019.

A continuación, se describirán las condiciones de operación de algunos componentes del aparato mostrado en la figura anterior. En primer lugar, el transductor de presión de poros y el sistema de contrapresión pueden usarse si ambos tienen la precisión requerida (0.25% del máximo anticipado para la presión de poros) y son monitoreados durante la realización del ensayo. Asimismo, el transductor debe ubicarse de manera que el agua intersticial en la base de la muestra pueda medirse con un drenaje insignificante en un lado del transductor; mientras que, en el otro extremo, se mide la contrapresión aplicada en la muestra. En segundo lugar, el indicador de deformación debe tener una sensibilidad de 0.002 mm y un rango de al menos el 50% de la altura de la muestra; en el caso de la masa de la muestra, debe tener una precisión de 0.1%. Finalmente, se sujeta la muestra en un anillo fijo a una base rígida, con piedras porosas en las caras de la muestra; en el fondo del anillo se formará un sello a prueba de fugas con la base rígida capaz de soportar presiones internas de 1400 kPa (200 psi). El consolidómetro debe

estar diseñado de tal manera que la colocación de la muestra en el anillo y el consolidómetro no atrapen aire en la base del espécimen.

### 3.3.3. Procedimiento del ensayo

El procedimiento para realizar este ensayo se encuentra detallado en la norma ASTM D4186. El ensayo comienza ensamblando el espécimen, el anillo, la piedra porosa y la placa de carga al consolidómetro empleado, evitando que quede aire atrapado entre la piedra porosa inferior y la muestra. Luego, el consolidómetro se coloca en el dispositivo de carga axial, ajustando el indicador de deformación y aplicando una presión constante que varía de 100 a 200 kPa. Se debe verificar que el sistema de contrapresión y el consolidómetro estén completamente desairado. Tras la verificación, se procede a abrir la válvula que conecta la base del consolidómetro a una fuente desairada y se aplica simultáneamente en la muestra (inferior y superior) el nivel apropiado de contrapresión para que se encuentre completamente saturada. Posteriormente, se aplica la carga axial a la muestra a una tasa de deformación adecuada y el sistema de adquisición de datos registra los valores de la carga, desplazamiento y la presión de poros durante el ensayo. Finalmente, una vez finalizada la fase de carga, se procede con la fase de descarga a una tasa de deformación 2 o 3 veces menor que la carga inicial y se obtienen las curvas de  $e$ - $\log \sigma$  para ambas fases, las cuales servirán para determinar el coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ) y el de recompresión ( $C_r$ ).

De acuerdo con la norma mencionada anteriormente, la selección de la velocidad de deformación se basa en la presión de poros. Esta velocidad es muy importante y por ello es deseable elegir una tasa de deformación que cause que el valor absoluto del exceso de la presión de poros varíe entre el 3 y el 30% de la tensión vertical aplicada en cualquier momento del ensayo para la determinación adecuada del coeficiente de consolidación “ $C_v$ ”.

### 3.3.4. Parámetros obtenibles

Mediante este ensayo se pueden obtener las propiedades de consolidación de un suelo cohesivo como los esfuerzos, el coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ) y recompresión ( $C_r$ ), conductividad hidráulica, coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) y el coeficiente de consolidación de suelos ( $C_v$ ). Para obtener estos parámetros la norma ASTM D4186 propone ecuaciones que dependen del método que se está empleando: Lineal o No lineal. Fox et al. (2014) realizaron una simulación de este ensayo empleando dichas ecuaciones y concluyeron que para suelos con coeficiente de compresibilidad y de consolidación no lineal, el método más recomendable es el propuesto en

la teoría no lineal modificada propuesta en su investigación (MNL, por sus siglas en inglés) y advierten que las ecuaciones propuestas por dicha norma para análisis de datos no lineales contienen errores y no deben emplearse.

### 3.3.5. Aplicaciones en la ingeniería

En la construcción de cualquier edificación, por más simple que parezca, es importante y fundamental realizar una adecuada caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo sobre el cual se va a asentar. Si se ejecuta de manera incorrecta esta labor, hay una alta probabilidad de que la estructura falle por la deficiencia en resistencia del mismo con respecto a las solicitaciones de carga por parte del diseño. Adicionalmente es necesario entender el comportamiento de los suelos como un sistema dinámico el cual cambia sus propiedades a través del tiempo obedeciendo posibles variaciones en humedad, temperatura y sobre todo carga soportada; omitir este análisis puede contribuir a la falla, no inmediata, pero a largo plazo.

En los suelos cohesivos, la consolidación es un proceso que debe tenerse en cuenta debido a la reducción que produce en su volumen, de tal forma que se generan asentamientos que pueden llegar a afectar a la edificación terriblemente. Por ello es importante obtener y analizar las propiedades de consolidación de este tipo de suelos mediante parámetros que estudien el comportamiento del suelo con respecto al tiempo y así conocer las condiciones bajo las cuales la muestra alcanzará cierto porcentaje de consolidación, según sea el interés. Existen ensayos que permiten obtener esta información; sin embargo, la mayoría de ellos demoran en realizarse y no son tan precisos. Por ello, el ensayo CRS es una buena alternativa, ya que se pueden obtener los parámetros de consolidación de manera rápida, automática y continua, permitiendo así una mejor precisión en los resultados y un análisis más adecuado.

## **3.4. Ensayo de consolidación inducida por flujo**

### 3.4.1. Descripción del ensayo

El ensayo de consolidación inducida por flujo (SICT por sus siglas en inglés) es un ensayo de laboratorio desarrollado por la Universidad de Columbia en el año 1991 que busca medir y determinar, en forma rápida y confiable, la compresibilidad y permeabilidad de un suelo. El ensayo comenzó como una prueba de consolidación que utilizaba un procedimiento basado en una fuerza de filtración. Originalmente, la prueba funcionaba aplicando una diferencia de

presiones constante a través de la muestra de suelo. La variación de presiones consolidaba la muestra.

El concepto del ensayo se basa en la idea de que el flujo a través del suelo, inducido por el gradiente de presiones, aplica una fuerza de filtración que se convierte en tensión de consolidación efectiva. El ensayo no está regido por las teorías de consolidación tradicional. Por esta razón, sirve como una forma directa para medir las propiedades del suelo. Sin embargo, de acuerdo con Estepho (2014), el SICT presenta algunas limitaciones como las siguientes:

- En una parte del ensayo, la muestra es cortada en rodajas. Debido a ello, se producirá un rebote que proporciona valores más altos que los valores reales al final del ensayo.
- El ensayo se limita por un rango de esfuerzos adecuados para obtener resultados más cercanos a la realidad. Este rango depende del comportamiento del suelo que se está estudiando. Además, se debe asegurar un esfuerzo suficientemente alto para reducir la perturbación de la muestra al cortarla.

### 3.4.2. Descripción del equipo

La figura 7 presenta una representación esquemática del aparato utilizado en el SICT. Dentro de sus principales componentes, se destacan el marco de carga, la celda de la muestra, el control de filtración, la placa de carga, el sistema computarizado de recopilación de datos y el sistema de control.

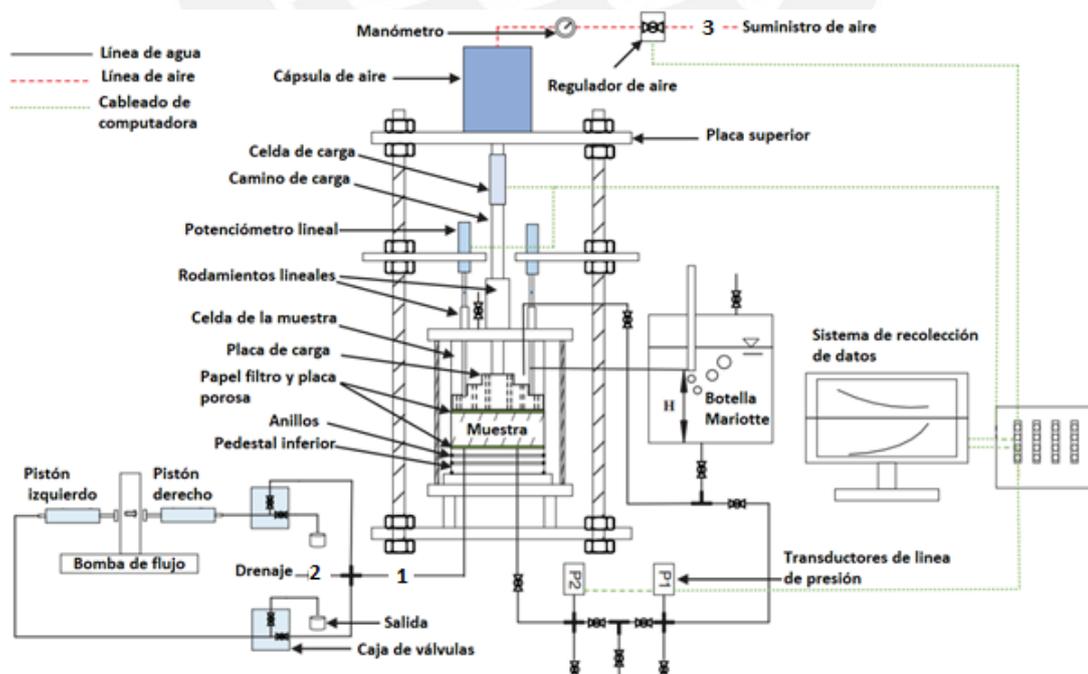


Figura 7. Representación esquemática de un aparato del ensayo SICT. Adaptado de Tian (2020).

A continuación, se describirán algunos componentes del aparato mostrado en la figura anterior, el cual fue desarrollado por Tian (2020). En primer lugar, la celda de carga está formada por un conjunto de varillas corrugadas, una campana de aire y dos placas metálicas: una inferior y una superior. Las placas crean una plataforma estable para la cápsula de aire y disipan la fuerza reactiva aplicada durante el ensayo. En segundo lugar, la celda de la muestra está formada por un tubo acrílico de 15.2 cm de diámetro interior que se desliza sobre un pedestal mecánico de cloruro. El pedestal tiene 3 funciones principales: proporciona una plataforma de apoyo para la muestra, la placa porosa y el papel filtro ubicados en la zona inferior; crea un sello hidráulico utilizando el tubo acrílico; y utiliza unos puertos de salida que se conectan a la bomba de flujo, para inducir la filtración, y a los transductores de presión, con el objetivo de medir la presión de poros máximas durante el ensayo. La celda de muestra del equipo descrito es más grande en comparación con otros equipos SICT, con el objetivo de reducir la velocidad del flujo obtenida con la ley de Darcy para una tasa de filtración determinada. Además, la configuración de la celda pretende disminuir la perturbación en la muestra y la fricción entre el suelo y las paredes laterales. En tercer lugar, se presenta la bomba de flujo. La bomba de flujo se encuentra conectada al pedestal con el fin de extraer agua de la muestra y ocasionar una filtración vertical hacia la zona inferior, lo cual produce una tensión efectiva. Al aumentar la velocidad de la bomba de flujo, se produce un incremento de la tensión efectiva. Además, la bomba de flujo es un componente formado por dos pistones que pueden adaptarse a diferentes tamaños de jeringas (0.5µl a 140 ml) para producir un gran rango de velocidades de flujo, que pueden variar desde 3.06 pl/min hasta 216 ml/min. Generalmente, se utilizan caudales bajos para evitar presiones de poros negativas en la parte inferior de la muestra, lo cual puede generar el fenómeno de cavitación. En cuarto lugar, la botella de Mariotte es el último componente de interés del aparato del SICT. Esta se usa como un depósito del tanque simple para proveer agua, en una condición de carga invariable, a la zona superior del espécimen.

#### 3.4.3. Procedimiento del ensayo

El ensayo tiene un procedimiento estándar que se describe a continuación. Antes de comenzar con todas las pruebas que forman parte del ensayo, se requiere expulsar todo el aire que se encuentra en las líneas de agua, mostradas en la figura 7. Una vez realizado ello, se coloca la placa porosa y el papel filtro en la zona superior del pedestal de la muestra. A continuación, se debe colocar la carcasa de la muestra en el pedestal. La muestra del ensayo es homogénea y se vierte en la carcasa utilizando un embudo estándar, con un diámetro de entrada de 19 cm y un

diámetro de salida de 1 cm. La altura de la muestra final en el aparato del ensayo debe estar entre 3.8 cm y 5.1 cm para que el ensayo tenga resultados adecuados. Asimismo, la muestra de suelo preparada debe tener una superficie horizontal o la parte central de la muestra debe tener una mayor altura que la zona perimetral con el objetivo de impedir que la placa de carga se atasque en la carcasa de la muestra. Para lograr esta condición, la carcasa de la muestra debe ser agitada lateralmente con suavidad.

Se registra la altura inicial del suelo y luego se coloca papel filtro encima de la muestra. Utilizando una jeringa de mano, se adiciona agua sobre el papel filtro para reducir las posibles alteraciones del suelo. Luego, se coloca un disco de plástico poroso saturado, con un diámetro estándar de 15 cm y un espesor de 0.3 cm encima del papel filtro. Esto último se realiza con el fin de tener una distribución uniforme de fluido a través de la superficie de la muestra durante el SICT. Después, la placa de carga se ubica sobre el disco poroso y las varillas de extensión se instalan en la zona superior de la placa de carga. Una vez realizada la preparación de la muestra y del equipo, comienza el ensayo de consolidación inducida por flujo.

Para comenzar con el ensayo, se debe abrir la válvula 1 (los números de las válvulas han sido indicado en la figura 7) y encender la bomba de flujo. El caudal de inicio del ensayo debe ser 0.4 ml/min. La primera etapa del ensayo se basa en la filtración y se ejecuta hasta llegar a una condición de estado estable. El estado estacionario es aquel estado en el que no se produce alguna variación en la presión diferencial durante, por lo menos, 1 hora. Una vez que las condiciones estacionarias se han alcanzado, se selecciona un caudal mayor para realizar una prueba de filtración posterior. Los pasos de esta prueba pueden detenerse cuando exista una diferencia de presión efectiva en la muestra de suelo entre 2 y 5 kPa.

Mientras se ejecuta la prueba de carga escalonada, la válvula 2 se cierra y la válvula 3 se abre con el objetivo de aportar una presión de aire para que la placa de aire proporcione una carga normal a la muestra. Se debe inducir un esfuerzo vertical mínimo de 10 kPa a la placa de carga ubicada en la zona superior. Cuando una carga escalonada es aplicada a la muestra de suelo, la presión de poros en el espécimen aumenta por efecto de la carga. El estado estacionario para la fase de carga escalonada se define para la fase de esfuerzo donde no se observan deformaciones verticales adicionales en el espécimen durante, por lo menos, 1 hora.

Como parte del ensayo, se lleva a cabo una prueba de permeabilidad de flujo constante con el fin de medir la conductividad hidráulica del suelo en estudio. Para ello, se abre la válvula 2 y

se utiliza la bomba de flujo con un caudal igual a la décima parte del caudal utilizado en la etapa de filtración del ensayo. Se elige una relación de aumento de carga de 1 para la carga escalonada si es que se requiere una compresión adicional del espécimen. La prueba de permeabilidad proporciona datos de carga escalonada redundantes, pero independientes a los resultados de las etapas anteriores.

Cuando se alcanza el estado estable en el ensayo, se debe registrar la altura de la muestra, la cual se necesitará para determinar la relación de vacíos. Una vez que el ensayo concluye, se extrae la muestra del equipo y se seca al horno para obtener la masa total de sólidos. Este dato servirá para calcular la relación final de vacíos y el contenido de sólidos.

#### 3.4.4. Parámetros obtenibles

El SICT utiliza la teoría de deformaciones grandes. Por esta razón, se necesita que las funciones para determinar la compresibilidad y la permeabilidad no se asuman como constantes. El ensayo utiliza las siguientes ecuaciones para determinar los parámetros indicados anteriormente:

$$e = A * (\sigma' + Z)^B$$

$$k = C * e^D$$

Las ecuaciones anteriores fueron formuladas por Liu y Znidarcic (1991) y son ampliamente aceptadas debido a que superan las limitaciones de otras ecuaciones en lo referente a la relación de vacíos, que tiende al infinito cuando los esfuerzos efectivos son nulos. Las constantes A y B son adimensionales, mientras que la constante Z tiene unidades de esfuerzo. Además, la ecuación de permeabilidad se ajusta adecuadamente para suelos de baja densidad. El parámetro C posee unidades de permeabilidad y la constante D es adimensional.

Los parámetros A, B, Z, C y D se obtienen utilizando las ecuaciones presentadas y los datos de los pasos 1 y 3 del ensayo, es decir, de la etapa de filtración y carga escalonada. Además, se calcula el  $\sigma'_{sb}$  (esfuerzo efectivo al fondo de la muestra) y Hss (altura de la muestra en el paso de análisis) en el estado estable en un esquema iterativo hasta que los valores de  $\sigma'_{sb}$  y Hss calculados sean iguales que los medidos.

#### 3.4.5. Aplicaciones en la ingeniería

El ensayo es aplicado para un grupo específico de suelos. De acuerdo con Prakash (2011), Las denominadas “arcillas blandas” se usan comúnmente para caracterizar a un sedimento de arcilla con un alto porcentaje de agua en su interior. Las arcillas blandas se caracterizan por su elevada compresibilidad y, en la mayoría de los casos, por su sensibilidad. Dentro de este grupo de arcillas, se encuentran los suelos (sedimentos) transportados por agua (lacustres y marinos). Además, en la actualidad, ha aumentado el número de actividades de recuperación de tierras en las que se extraen los materiales geológicos de grano fino. Comúnmente, este tipo de suelos presentan una estructura metaestable debido a su alto contenido de agua. Se ha encontrado un amplio número de problemas en este grupo de arcillas relacionados con algunas propiedades como relaciones de vacíos muy elevadas, compresibilidad muy alta, muy baja resistencia al corte, naturaleza sensible a la perturbación de la muestra. En la actualidad, las actividades de construcción desarrolladas en lugares donde existen depósitos de arcilla blanda necesitan caracterizar y definir las propiedades de este tipo de suelos. En ese sentido, el SICT se constituye como un ensayo de laboratorio simple, práctico y muy útil para obtener las características de compresibilidad de este tipo especial de suelo.

#### 3.4.6. Comparación con el ensayo tradicional.

Los suelos de baja densidad se someten a grandes deformaciones. Estos suelos tienen una gran consolidación, principalmente por efectos del peso propio. Además, presentan relaciones de compresibilidad y permeabilidad no lineales. Por ello, el ensayo estándar de consolidación, el cual aplica la teoría de deformaciones pequeñas, no es aplicable para este tipo de suelos. El SICT constituye una modificación del ensayo que considera las grandes deformaciones, la no linealidad de las propiedades y los efectos de peso propio.

Además, de acuerdo con Tian (2017), los resultados de ambas pruebas, realizadas en una arcilla caolín, muestran patrones similares, pero valores numéricos diferentes. Ambos ensayos mostraron tendencias similares de la disminución de la relación de vacíos  $e$  con el aumento del esfuerzo efectivo  $\sigma'$ . Además, en ambos ensayos, se observó que la conductividad hidráulica  $k$  disminuye cuando la relación de vacíos  $e$  también disminuye. Para valores de esfuerzo efectivo mayores que 7 kPa, los valores de relación de vacíos que se obtienen en ambos ensayos son similares. Esto se debe a que el SICT pierde precisión para valores de esfuerzo alto. Para valores menores de esfuerzo, inferiores a 5 kPa, los resultados de relación de vacíos del SICT eran

considerablemente mayores que los obtenidos en el ensayo tradicional. Además, las conductividades hidráulicas obtenidas en el ensayo tradicional fueron menores hasta en un 40% al compararlas con las obtenidas en el SICT. El  $k$  medido en el SICT posee un mayor grado de precisión, debido a que la ley de Darcy fue aplicada directamente a los datos del flujo. Por su parte, para calcular la conductividad hidráulica, el ensayo tradicional aplica la teoría de deformaciones pequeñas.

### **3.5. Ensayo de consolidación incremental**

#### 3.5.1. Descripción del ensayo

El ensayo de consolidación incremental está regulado por la norma ASTM D2435-11. Asimismo, permite determinar la tasa y la magnitud de la consolidación del suelo cuando está confinado lateralmente y se drena axialmente mientras se somete a una carga.

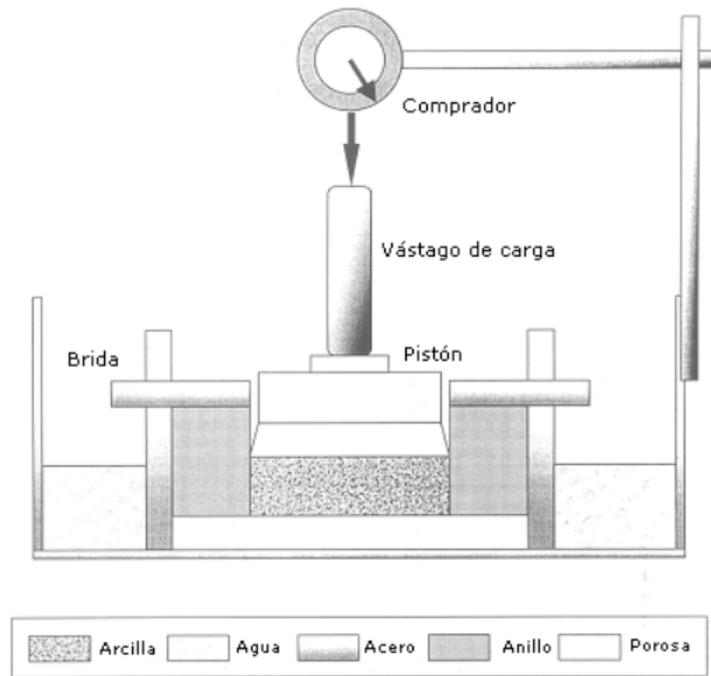
El método requiere que la muestra de suelo sea confinada lateralmente y cargada axialmente mediante incrementos. La aplicación de cada carga genera un esfuerzo constante y se aplica hasta que todo el exceso de presiones de poros se haya disipado. Durante el proceso de compresión, se toman medidas del decremento en la altura de la muestra. Estos datos son utilizados para calcular los parámetros que determinan la relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos. Además, sirven para calcular la velocidad a la cual la compresión del suelo puede ocurrir.

Según Zegarra (2019), este ensayo tiene las siguientes limitaciones:

- La extrapolación de los datos de laboratorio a problemas de evolución de asentamientos en el campo, mediante la teoría de la consolidación, no toma en cuenta la consolidación secundaria.
- La carga solo se aplica en la dirección vertical, ya que transversalmente con un anillo metálico se confina la muestra. Entonces, no se permite flujo de agua lateralmente. Todo el flujo de agua y el movimiento del suelo ocurre en la dirección vertical. En campo, por el contrario, sí ocurre movimiento lateral.

#### 3.5.2. Descripción del equipo

La siguiente figura presenta el equipo que se utiliza para el ensayo de consolidación incremental, el cual consta de un aparato tipo prensa que somete a la muestra a cargas verticales.



La muestra de un diámetro de entre 50 mm y 90 mm se introduce en un anillo rígido, el cual va impedir una deformación lateral. En la parte superior, se colocan unas placas porosas por donde se saturan las superficies inferiores y superiores de la muestra. Se observa que el pistón superior está conectado a un vástago de carga. Esta configuración permite medir con precisión el desplazamiento utilizando un comparador digital. La carga se aplica mediante un sistema de pesas por medio de una palanca.

### 3.5.3. Procedimiento del ensayo

El consolidómetro se ensambla de tal manera que se evite una pérdida de agua o provoque el hinchamiento de la muestra. Las muestras se colocan en los anillos de consolidación de 61,8 mm de diámetro y 20 mm de altura donde se golpea para minimizar las burbujas de aire atrapadas en las muestras. Para reducir la fricción entre la muestra y el interior del anillo, se lubrica previamente con grasa de silicona. Luego, se coloca el consolidómetro en el dispositivo de carga y se aplica un esfuerzo axial inicial de asentamiento de aproximadamente 5 kPa. Inmediatamente después de la aplicación de la carga de asentamiento, se toma lectura de la deformación inicial  $D_0$ . Posteriormente, la muestra se somete a incrementos de carga de esfuerzo axial constante. El programa de carga consiste en ir duplicando el esfuerzo axial total en cada paso. La primera carga aplicada es de 12.5 kPa y la siguiente es 25 kPa. El ensayo

continúa hasta llegar a un valor máximo según los requerimientos de cada una de las muestras. La duración del incremento de cada carga será de aproximadamente 24 h.

Finalmente, se tiene que registrar la deformación axial de la muestra,  $D$ , a intervalos de tiempo de 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 min y 1, 2, 4, 8 y 24 h medidos desde el momento de cada aplicación de incremento de carga. Este registro de deformaciones se debe realizar para, al menos, dos incrementos de carga, de los cuales al menos uno debe ser el incremento de carga después de que se haya superado el esfuerzo de preconsolidación. Para los demás incrementos, las lecturas deben ser tomadas cerca del final de la duración del incremento de carga para verificar la finalización de la consolidación primaria. La duración del incremento de carga, generalmente, se toma en un múltiplo de 24 horas y debe ser la duración estándar para todos los incrementos de carga de la prueba.

#### 3.5.4. Parámetros obtenibles

Las ecuaciones para calcular los índices de vacíos propuestas por Burland  $I_v$  y Horpibulsuk  $I_{vH}$  son las siguientes:

$$I_v = 2.45 - 1.285 \log \sigma'_v + 0.015(\log \sigma'_v)^3$$

$$I_{vH} = 0.029(\log \sigma'_v)^3 - 0.012(\log \sigma'_v)^2 - 0.733(\log \sigma'_v)^1 + 1.427$$

De acuerdo con Chu et al. (2017), se comprobó que la ecuación empírica propuesta por Burland (1990) es más adecuada que la propuesta por Horpibulsuk et al. (2011) para el cálculo del índice de vacíos en arcillas puras compuestas con minerales de bentonita y caolín a diferentes proporciones. En la figura 9, se observa que el índice de vacíos obtenidos con el ensayo calza perfectamente aplicando las líneas de compresión intrínseca propuesto por Burland (1990) a diferencia de la propuesta por Horpibulsuk et al. (2011) donde la línea se desvía. Actualmente, si se desea obtener valores de índices de vacíos correctos se descarta utilizar la fórmula de Horpibulsuk et al. (2011). Por lo tanto, utilizando las ecuaciones empíricas de Burland (1990) se obtienen resultados óptimos y funciona como alternativa para el cálculo del índice de vacíos que se presenta en el ASTM standard D2435 (2020).

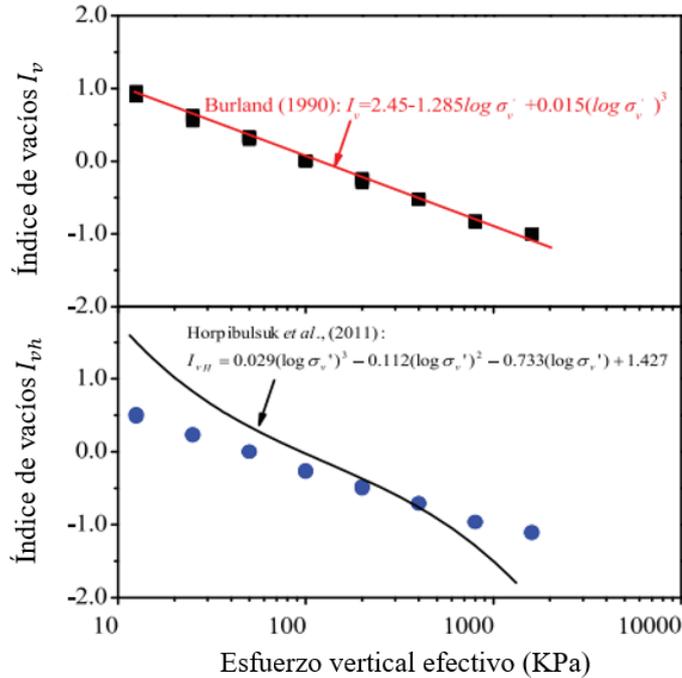


Figura 9. Índice de vacíos de arcilla pura frente a tensión vertical efectiva. Adaptado de Chu et al. (2017).

En la figura 10, se observa la conductividad hidráulica  $k$  obtenida durante los ensayos de IL y CRS en las muestras de arcilla M1 y M2. Los resultados de la conductividad hidráulica coinciden de forma razonable en el rango normalmente consolidado. Las diferencias pueden deberse a que durante la prueba de IL las muestras no estaban completamente saturadas y a la incertidumbre en la medición de la relación de vacíos durante las pruebas de IL y CRS. Entonces, en la actualidad, con ambos ensayos se obtienen valores de  $k$  igual de confiables.

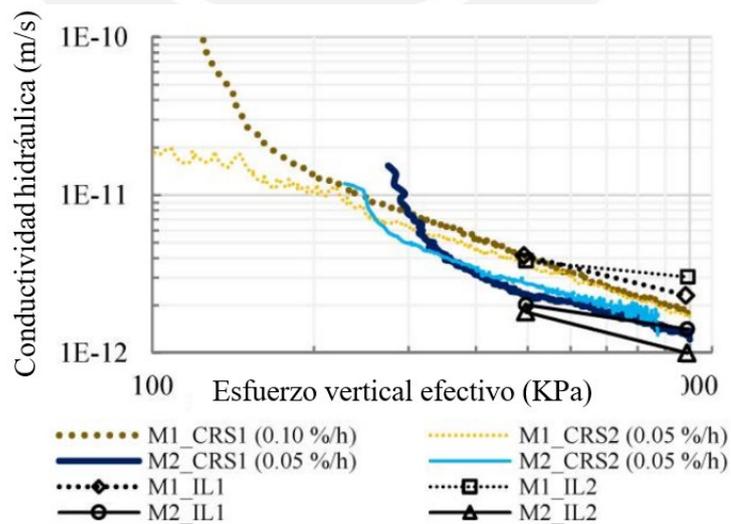


Figura 10. Conductividad hidráulica de M1 y M2 durante la carga. Adaptado de Andries et al. (2019).

### 3.5.5. Aplicaciones en la ingeniería

Muchos de los equipos para realizar el ensayo de consolidación incremental que se utilizan en los laboratorios peruanos son antiguos y no están diseñados para soportar altos esfuerzos axiales. Por ello, se presentarán métodos modernos para configurar estos equipos y puedan alcanzar mayores esfuerzos, ya que el uso incorrecto de la carga final podría generar imprecisiones en el resultado de la prueba de consolidación.

El primer método consiste en agregar más peso para aumentar la carga para la prueba. Para lograr ello, se puede tomar prestadas las pesas de los otros equipos, ya que estos juegos de pesas se encuentran calibrados y compatibles entre sí. Otra opción, es comprar otro juego de pesas de fabricación para agregar más carga. Sin embargo, este método es aplicable solo si las especificaciones del equipo lo permiten. También, se puede hacer un juego de pesas, pero cada pesa debe ser calibrada.

La segunda solución es reducir el diámetro de la muestra, ya que se incrementa la carga aplicada en el espécimen. Normalmente, el diámetro estándar de la muestra suele ser de 6.35 cm. Según ASTM D2435 (2020), el diámetro mínimo de la muestra es de 5 cm. Entonces, al disminuir el diámetro de la muestra, se está disminuyendo el área de aplicación de la carga. En consecuencia, se aumenta el esfuerzo vertical sobre las muestras. Sin embargo, cambiar el diámetro de 6,35 cm a 5 cm no es tan fácil como cambiar el anillo, ya que la mayoría de los anillos del edómetro se ajustan con su celda. Por lo tanto, se tiene que reemplazar toda la celda del edómetro para cambiar el tamaño de la muestra.

# CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

## **4.1.Sobre el ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo**

- El ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzos no está regulado por normativas estandarizadas. Esto implica que ciertos detalles de los criterios de ejecución y equipos utilizados pueden variar dependiendo de experiencias pasadas y los objetivos de cada investigación.
  - Por un lado, dependiendo de los objetivos planteados, es posible adaptar dispositivos de laboratorio convencionales para la aplicación de distintas trayectorias de esfuerzo, como en los casos de reorientación de esfuerzos principales.
  - Por otro lado, la inexistencia de una normativa estandarizada también permite la innovación en lo referente a arreglos experimentales, a fin de simular condiciones más complejas, como la aplicación de esfuerzos planares.
- Los estándares del ensayo triaxial tradicional no suelen considerar provisiones que permitan la reorientación de esfuerzos en su ejecución.
- El ensayo triaxial con trayectorias de esfuerzo permite aplicar condiciones simuladas sobre los especímenes, y observar su comportamiento.
- La ejecución de los ensayos triaxiales con trayectorias de esfuerzo difiere de los ensayos convencionales en la dirección de aplicación de los esfuerzos sobre los especímenes. El ensayo con trayectorias incluye esfuerzos desviadores considerables perpendiculares al primer eje de carga.
- A diferencia de los ensayos triaxiales convencionales, los ensayos triaxiales con trayectorias de esfuerzos no suelen utilizarse para calcular y analizar parámetros del suelo de forma directa.

## **4.2.Sobre el ensayo triaxial cíclico**

- El ensayo triaxial permite un amplio estudio del aspecto dinámico de los suelos, lo que permite complementar la investigación sobre el comportamiento de estos. A pesar de que este ensayo presenta un conjunto de limitaciones, se emplea en el estudio de comportamiento dinámico de arenas, suelos cementados o nuevos materiales constructivos.
- Este ensayo permite el estudio dinámico del suelo bajo los lineamientos de dos normas ASTM para calcular tres importantes parámetros para los suelos.

- Por un lado, se estudia un importante problema que presentan las arenas, la licuefacción. El ensayo permite simular el efecto sísmico al cual se someterían este tipo de suelos. El parámetro que se obtiene es la curva de resistencia a la licuefacción. Los parámetros obtenidos para el estudio de la licuefacción, pueden ser corroborados por otros ensayos dinámicos como el ensayo de corte simple cíclico
- Por el otro se estudia para caracterizar los parámetros de elasticidad y amortiguamiento de un suelo cuando está sometido a un tipo de carga cíclica sinusoidal. Los parámetros que se obtienen son el módulo de elasticidad y el amortiguamiento.
- La ejecución de ensayos triaxiales permite estar a la vanguardia del estudio dinámico de los suelos. Los laboratorios que cuentan con este tipo de equipos tienen la posibilidad de encabezar nuevas y novedosas investigaciones.

#### **4.3. Sobre el ensayo de consolidación a deformación constante**

- La consolidación de un suelo cohesivo es un proceso mediante el cual se produce una reducción del volumen del suelo, debido a un incremento de carga ocasionado por el exceso de presión hidrostática. Es importante estudiar este proceso, debido a que nos permite estimar (o predecir) la velocidad y los asentamientos que se producirán; si es que se llegan a formar asentamientos diferenciales, estos pueden ocasionar el colapso de la estructura.
- El ensayo CRS tiene múltiples ventajas frente a los ensayos tradicionales como el de carga incremental (IL), tales como:
  - Periodo de duración del ensayo CRS (aproximadamente 2 días) es menor al del ensayo tradicional que puede demorar de 7 a 10 días como mínimo.
  - Los resultados del ensayo son recopilados de manera automática y continua.
  - Permite obtener una mayor cantidad de datos, lo que ayuda a determinar de manera más precisa los parámetros de consolidación necesarios.
- Se concluye que a pesar de las ventajas que ofrece este ensayo, existen desventajas como la elección de la velocidad de la deformación aplicada, el cual es un factor muy importante para la realización de este ensayo; sin embargo, todavía no hay un consenso sobre dicho valor y sigue ocasionando gran incertidumbre en la ingeniería geotécnica. Además, no se puede obtener la compresión secundaria sin control de carga de retroalimentación y no es aplicable en suelos de alta permeabilidad.

#### **4.4. Sobre el ensayo de consolidación inducida por flujo**

- En la actualidad, las arcillas blandas forman parte de la costa nacional. Los proyectos de construcción en estas zonas, así como los proyectos de recuperación de tierras que implican masas de suelos con alto contenido de agua, requieren un estudio que permita determinar las propiedades de este suelo. Estas propiedades no pueden ser estimadas con los ensayos de consolidación tradicionales. Debido al incremento de este tipo de proyectos, se concluye que el SICT tiene un alto grado de importancia en la ingeniería actual.
- Se concluye que la mayoría de los problemas identificados para estimar razonablemente las propiedades de los suelos con alta cantidad de agua pueden solucionarse mediante un proceso de consolidación basado en la filtración simplificada. El ensayo utiliza instrumentos y procedimientos sencillos con los cuales se obtienen resultados cercanos a la realidad.
- Los resultados obtenidos utilizando el SICT y el ensayo de consolidación tradicional pueden ser comparables, aunque solo cualitativamente. En ambos ensayos, se verifica que, a mayor esfuerzo efectivo, se presenta una menor relación de vacíos y un menor coeficiente de conductividad hidráulica. Las conductividades hidráulicas obtenidas del SICT fueron más altas que las obtenidas en el ensayo de consolidación tradicional hasta en un 40%.
- La principal razón por la cual el ensayo tradicional no es aplicable en los suelos de arcilla blanda es la aplicación de la teoría de deformaciones pequeñas en un suelo que está sometido a esfuerzos bajos, pero que causa deformaciones elevadas. Por ello, se concluye que siempre que se tenga este tipo de suelos, se requiere emplear el SICT.
- Dependiendo de la etapa del ensayo, existen variables que pueden aumentar su incertidumbre. Para la primera etapa, de consolidación por filtración, el módulo de elasticidad de la capa porosa se constituye como la mayor fuente de incertidumbre en el asentamiento de la muestra, específicamente en la zona del drenaje. En la zona donde se produce la falla del suelo, el asentamiento es menor, por lo que el módulo de elasticidad no tiene influencia en esta zona.

#### **4.5. Sobre el ensayo de consolidación incremental**

- De los dos métodos de análisis normalizados propuestos por Burland (1990) y Horpibulsuk et al. (2011), se concluye que el índice vacío  $I_v$  y las curvas normalizadas son más adecuadas para evaluar el comportamiento de compresión de arcillas puras.
- Si la arcilla pura está compuesta por minerales como la bentonita y el caolín, no se ve afectado el comportamiento de compresión intrínseco propuesto por Burland et al. (1990).
- Al aplicar los métodos de CRS e IL se encontró que los valores de compresibilidad y conductividad hidráulica eran similares, pero el ensayo de IL demanda un mayor tiempo respecto al CRS.
- La gran mayoría de los aparatos de consolidación no tienen capacidad para pruebas de alta presión y se tiene que verificar el juego de pesos disponibles o el diámetro del anillo del edómetro para poder incrementar la capacidad del equipo.
- La compra de un equipo nuevo necesita verificar la capacidad del equipo, aunque la mayoría de los equipos nuevos pueden tener una alta presión de carga, pero no todos los equipos tienen especificaciones similares.

## Bibliografía

- Andries, J., Verastegui, D., De Beule, K., & Baertsoen, A. (2019). One-dimensional consolidation of overconsolidated clay using constant rate of strain testing. *E3S Web of Conferences*, 92, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199202011>
- ASTM. (2015). ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- ASTM. (2020). ASTM D4767-11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. <https://doi.org/10.1520/D4767-11R20>
- ASTM. (2020). ASTM D7181-20 Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils. <https://doi.org/10.1520/D7181-20>
- ASTM. (2020). ASTM D2435-11 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. <https://doi.org/10.1520/D2435-11>
- Bhattacharya, D., & Prashant, A. (2021). Stress Path Tests with Local Deformation Profile in Flexible Boundary Plane Strain Device. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(12), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002712](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002712)
- Burland, J. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3): 329–378. doi:10.1680/geot.1990.40.3.329.
- Chan, C. (1981). An Electropneumatic Cyclic Loading System. *Geotechnical Testing Journal*, 4(4), 183. <https://doi.org/10.1520/GTJ10788J>
- Choobbasti, A. J., Vafaei, A., & Soleimani Kutanaei, S. (2018). Static and Cyclic Triaxial Behavior of Cemented Sand with Nanosilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018269. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002464](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002464)
- Chu, C., Wu, Z., Deng, Y., Chen, Y., & Wang, Q. (2017). Intrinsic compression behavior of remolded sand–clay mixture. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 926–932. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0453>
- Estepho, M. (2014). *Seepage induced consolidation test: characterization of mature fine tailings*. Vancouver: The University of British Columbia. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0165838>
- Finno, R. J., & Kim, T. (2012). Effects of Stress Path Rotation Angle on Small Strain Responses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(4), 526–534. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000612](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000612)
- Flores, O., Gómez, E., Romo, M., & Flores, R. (2013). Instrumentación y automatización del equipo triaxial cíclico MTS. *Www.Sismica.Com.Mx*, 1–10. [http://www.sismica.com.mx/ACERVO-ART/Instrumentacion\\_equipo\\_triaxial\\_c.pdf](http://www.sismica.com.mx/ACERVO-ART/Instrumentacion_equipo_triaxial_c.pdf)
- Fox, P. J., Pu, H.-F., & Christian, J. T. (2014). Evaluation of Data Analysis Methods for the CRS Consolidation Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(6),

04014020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001103](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001103)

- Fox, P. J., & Pu, H. (2015). Consolidation-Induced Solute Transport for Constant Rate of Strain. II: Comparison with Incremental Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014128. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001265](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001265)
- Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., and Du, Y.J. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science*, 52: 150–159. doi: 10.1016/j.clay.2011.02. 014.
- Janbaz, M., & Maher, A. (2017). *Consolidation and permeability behaviour of Newark Bay's dredged sediments by seepage induced consolidation test*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-7. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19386362.2016.1195034>
- Kim, D. – S. (1991). *“Deformational characteristics of soils at small to intermediate strains from cyclic tests*. The University of Texas at Austin. USA.
- Kumara, A. N., Prakoso, W. A., & Ilyas, T. (2020). *Limitation in Conventional Oedometer Consolidation Test for Deep Layered Soil*. *Eic* 2018, 145–150. <https://doi.org/10.5220/0009007601450150>
- Liu, J.C. & Znidarcic, D. (1991). Modeling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117:1, pp. 164-171. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(162\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(162))
- Mesri, G., & Feng, T. W. (2019). Constant rate of strain consolidation testing of soft clays and fibrous peats. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(10), 1526–1533. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0259>
- Moozhikkal, R., Sridhar, G., & Robinson, R. G. (2019). Constant Rate of Strain Consolidation Test Using Conventional Fixed Ring Consolidation Cell. *Indian Geotechnical Journal*, 49(2), 141–150. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0299-1>
- Nong, Z. Z., Park, S. S., & Lee, D. E. (2021). Comparison of sand liquefaction in cyclic triaxial and simple shear tests. *Soils and Foundations*, 61(4), 1071–1085. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.05.002>
- Prakash, K. (2011). Seepage induced consolidation test for the evaluation of compressibility of soft clays. <https://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2011/articles/Invited%20Paper%20-%202012.pdf>
- Seed, H. B. (1975). *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*. National Technical Information Service.
- Tian, Z., Bareither, C., & Scalia, J. (2020). *Development and Assessment of a Seepage-Induced Consolidation Test Apparatus*. *Geotechnical Testing Journal*, 894-916.

[https://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ20180375.htm](https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ20180375.htm)

- Tian, Z. (2017). Seepage-induced consolidation test mine tailings. Colorado: The Colorado State University.  
[https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/181439/Tian\\_colostate\\_0053N\\_14172.pdf?sequence=1](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/181439/Tian_colostate_0053N_14172.pdf?sequence=1)
- VandenBerge, D. R., Duncan, J. M., & Brandon, T. L. (2015). Undrained Strength of Compacted Clay under Principal Stress Reorientation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(8), 04015035. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001332](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001332)
- Vikash, G., & Rachamadugu, R. (2019). Issues in Interpretation of Constant Rate of Strain Consolidation Test Data. *Sustainable Civil Infrastructures*, January, 69–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96241-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96241-2_6)
- Villar M. (2002). Caracterización Termo-Hidro-Mecánica de una Bentonita de Cabo de Gata. Tesis Doctoral, UPM. España.
- Wang, Y., Zhang, S., Yin, S., Liu, X., & Zhang, X. (2020). Accumulated Plastic Strain Behavior of Granite Residual Soil under Cycle Loading. *International Journal of Geomechanics*, 20(11), 04020205. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001850](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001850)
- Wissa, A. Z., Christian, J. T., Davis, E.H. & Heiberg, S. (1971). Consolidation at Constant Rate of Strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(10), 1393–1413. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001679>
- Yin, S., Kong, W., Yang, A., Mu, K., & Wang, T. (2016). *Tests for dynamic deformation characteristics of residual soil under cyclic loading*. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2017.11.035>
- Zegarra, J (2019). Laboratorio de Mecánica de Suelos. Guía de ensayos. Material de Enseñanza. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.