



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-GEOTECNIA

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN LA
COMPRESIBILIDAD DE ARCILLAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EDWIN DAMIAN NOLASCO

TUTOR
DR. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD., MÉXICO, JUNIO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO

Secretario: DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

1er. Suplente: DR. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

2do. Suplente: DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

3er. Suplente: M.I JUAN LUIS UMAÑA ROMERO

Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

FIRMA

A mi madre Juana María por ser el pilar de inspiración en mi vida.

A mi hermano Yoni Efren por su nuevo compromiso con la familia.

A Devora Navil por su apoyo incondicional en esta trayectoria.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme vivir esta gran experiencia académica en el posgrado de ingeniería.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico para realizar los estudios de maestría.

A mi tutor de tesis, el Dr. Osvaldo Flores por su calidez humana de aceptarme como becario, su paciencia y compromiso de apoyo en este trabajo de investigación. Infinitas gracias por todas las atenciones brindadas antes y durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A mis sinodales Dr. Rigoberto Rivera Constantino, Dr. Eduardo Botero Jaramillo, Dra. Alexandra Ossa López y al M.I Juan Luis Umaña Romero por sus valiosas observaciones, comentarios y enriquecimiento académico que concretaron esta tesis experimental.

De manera especial a la M.I María Zárate por haber sido cimiento importante en mi formación académica, su percepción de enseñanza, su trato y amistad tan sincera, gracias por todo.

A mis compañeros de generación, amigos de cubículo y de laboratorio.

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN LA COMPRESIBILIDAD DE ARCILLAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Contenido

	Página
Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Objetivos.....	iii
Alcances y limitaciones.....	iii
Nomenclatura.....	iv
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1 Introducción y estudios previos	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Teorías para la interpretación de parámetros de compresibilidad.....	3
1.2.1 Modificación del modelo reológico de Terzaghi.....	3
1.2.2 Teoría de Smith y Wahls.....	4
1.2.3 Teoría de Wissa, Christian, David y Heiberg.....	6
1.3 Ensayos CRS en suelos finos.....	8
1.3.1 Literatura general.....	8
1.3.2 Arcillas de México.....	11
Capítulo 2 Descripción y calibración del equipo	14
2.1 Características del consolidómetro neumático.....	15
2.2 Centro de control de procesos.....	16
2.2.1 Módulo de calibración.....	16
2.2.2 Módulo de operación.....	17
2.3 Calibración y verificación de sensores.....	24
2.3.1 Sensores de presión.....	27
2.3.2 Sensor de desplazamiento.....	30
2.3.3 Verificación cruzada.....	34

Capítulo 3 Descripción de los materiales y método de ensayo	39
3.1 Descripción de los materiales	40
3.2 Método de ensayo	40
3.2.1 Preparación del equipo	41
3.2.2 Preparación de la probeta	42
3.2.3 Montaje	42
3.2.4 Saturación por contrapresión	44
3.2.5 Medición de B de Skempton	45
3.2.6 Etapa de carga	45
3.3 Cálculo de parámetros	45
Capítulo 4 Presentación y análisis de resultados	50
4.1 Generalidades de los ensayos de CI y CRS	51
4.2 Ensayos del grupo G1 para la condición $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2$	52
4.2.1 Curvas de desplazamiento	52
4.2.2 Desarrollo del esfuerzo axial	52
4.2.3 Curvas de compresibilidad	53
4.2.4 Efecto de la presión de poro	54
4.2.5 Parámetros de compresibilidad	56
4.3 Ensayos del grupo G2 para la condición $\dot{\epsilon}_1 \leq \dot{\epsilon}_2$	57
4.3.1 Curvas de desplazamiento	57
4.3.2 Desarrollo de esfuerzo axial	59
4.3.3 Curvas de compresibilidad	59
4.3.4 Comportamiento visco plástico	62
4.3.5 Efecto de la presión de poro	63
4.3.6 Parámetros de compresibilidad	68
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	75
5.1 Conclusiones	76
5.2 Recomendaciones	78
Referencias	79
ANEXO A Calibración y verificación de sensores	84
ANEXO B Resultados experimentales	101

Resumen

Con el objetivo de determinar un rango de velocidad permisible para ensayos de consolidación tipo CRS (Constant Rate of Strain), se realizó pruebas de compresibilidad en muestras de arcilla inalterada provenientes de la exploración geotécnica de la zona del ex lago de Texcoco.

El equipo empleado para la ejecución de los ensayos es un consolidómetro neumático del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este equipo permite realizar dos tipos de pruebas de consolidación unidimensional; velocidad de deformación constante CRS y de carga incremental CI. Cabe señalar que el equipo cuenta con un sistema de adquisición de datos que se distribuyen en el registro de 6 variables de interés; presión de confinamiento, presión de poro, contrapresión, presión axial, esfuerzo axial y de desplazamiento.

El programa de pruebas se constituye por un total de 9 ensayos, 7 de tipo CRS para un rango de velocidad de 0.15 a 1.20 %//h y, adicional de cada tubo muestreado, se realizó un ensayo con la metodología de CI para tener un patrón de comparación entre ambos ensayos. Se empleó dos esquemas de velocidad de prueba, en el grupo de muestras G1 se aplicó una velocidad de deformación uniforme para todo el ensayo, sin embargo, para el grupo G2 las pruebas CRS iniciaron con la velocidad más baja para el primer ciclo de carga-descarga (0.20 %/h); después se aplicó una velocidad mayor para el siguiente ciclo (recarga-descarga) comprendido dentro del rango indicado.

Parte de la metodología experimental consistió en asegurar la saturación de las muestras, por lo que en esta etapa se aplicó un esfuerzo axial y otro de contrapresión de 60 y 50 kPa, respectivamente. A partir de allí, a todas las muestras se les aplicó incrementos de 50 kPa en ambos sentidos hasta alcanzar un esfuerzo axial de 260 kPa y una contrapresión de 250 kPa, por lo que se indujo un esfuerzo efectivo de 10 kPa en cada incremento. La saturación para todos los ensayos se alcanzó en un periodo de 24 a 48 horas.

Los resultados de las pruebas de consolidación se presentan en términos del esfuerzo de preconsolidación σ'_{pc} (CI) y de fluencia σ'_y (CRS) para las etapas de carga y recarga, coeficiente de consolidación C_v , índices de compresión, expansión, recompresión y expansión C_c , C_s , C_{cr} y C_{sr} , respectivamente, además, se adjunta las propiedades índices del material y su correspondiente clasificación SUCS. Los parámetros anteriores, se comparan entre sí para diferentes tasas de deformación y principalmente con la prueba de CI para revisar ambos enfoques. Por otra parte, se registró el exceso de presión de poro u_b en todos los ensayos CRS la cual se comparó con el esfuerzo vertical total aplicado ya que la relación u_b/σ_v forma parte de los indicadores para limitar el rango de velocidad a emplear.

A partir de los resultados, se definió el intervalo de la velocidad en la que los parámetros de compresibilidad no se ven afectados de forma significativa por el efecto de la tasa de deformación para la arcilla del ex lago de Texcoco.

Abstract

In order to determine a permissible rate of strain for CRS tests, compressibility tests were performed in soil samples from the geotechnical exploration of the Lake Texcoco clays.

It was used a pneumatic consolidometer of the Institute of Engineering of the UNAM. This equipment allows performing two types of one-dimensional consolidation tests; constant rate of strain (CRS) and traditional odometer test (CI). It is important to mention that the machine has a data acquisition system that is distributed in the register of 6 variables of interest, in addition, it has five pressure sensors and one displacement transducer to measure the deformation and soil strength.

The test program consists of two incremental loading tests and seven CRS tests over the range of strain rate from 0.15 to 1.20 %/h. The group of samples G1 was applied a uniform strain rate for the entire test, on the other hand, the group G2 tests were performed at the lowest strain rate (0.20 %/h) in the first cycle (loading-unloading stage); after that it was applied a higher strain rate to the second cycle (reloading-unloading stage) as marked.

Part of the experimental methodology consisted in ensuring the saturation stage, it consisted of applying an axial and backpressure to the sample for 24 to 48 hours divided into four or five increments of pressure.

The results of the consolidation tests are presented in terms of the preconsolidation pressure σ'_{pc} and σ'_Y for CI and CRS tests, respectively. In addition, consolidation parameters are included for different deformation rates to compare both test approaches. Research provides the rate of strain in %/h where preconsolidation pressure is similar to Texcoco clay.

Finally, conclusions and recommendations of the experimental results are described as well as possible future works.

Objetivos

- Generales

La arcilla de la ciudad de México presenta un comportamiento un tanto particular por su capacidad de sufrir grandes deformaciones ante la aplicación de cargas prolongadas, condición que actualmente se conoce como creep. En este contexto, se evalúa la respuesta esfuerzo-deformación de la arcilla blanda del ex lago de Texcoco para ensayos tipo CRS descartando en cierta medida el fenómeno de consolidación secundaria.

Con base en lo anterior, el objetivo general es:

- Definir el intervalo de velocidad de deformación constante en %/h en el cual los parámetros de compresibilidad sean representativos de un ensaye de consolidación de carga incremental.

- Particulares

Para alcanzar el objetivo general se debe cumplir con una serie de requisitos particulares como se indica a continuación:

- Realizar la calibración y verificación de los sensores del consolidómetro neumático.
- Estimar las propiedades índices de la arcilla del ex lago de Texcoco.
- Interpretar el comportamiento de los parámetros de compresibilidad y la influencia que presenta para las diferentes velocidades de deformación.
- Analizar la respuesta de la subestimación del esfuerzo de preconsolidación para ensayos tipo CRS que involucran dos velocidades de deformación.
- Verificar que el exceso de presión de poro con respecto al esfuerzo vertical aplicado se encuentre entre los límites que se indican en la normativa correspondiente.

Alcances y limitaciones

El desarrollo del presente trabajo se basa en ensayos CRS y de CI para muestras de arcilla inalterada. El rango de la velocidad de prueba aplicada está comprendido entre 0.15 a 1.20 %/h y, para el caso de los ensayos de CI la aplicación de cada incremento/decremento de carga se realizó cuando el exceso de la presión de poro se había disipado.

Las muestras empleadas en el trabajo experimental pertenecen a dos sondeos de la zona del ex lago de Texcoco localizados a las siguientes profundidades: 19.20 y 26.90 m. Para ambos ensayos se siguió el siguiente esquema de prueba:

- Extracción y labrado de muestra
- Montaje
- Saturación por contrapresión
- Medición de B de Skempton
- Programación del ensaye de prueba
- Ejecución de prueba

Nomenclatura

A	Área Transversal de la muestra
a_v	Coeficiente de compresibilidad
b	Ordenada de calibración/verificación del sensor
b	Constante que depende de la variación de la relación de vacíos con la profundidad
B	Parámetro de B de Skempton
C_c	Índice de compresión (etapa de carga)
C_{cr}	Índice de recompresión (etapa de recarga)
C_s	Índice de expansión (etapa de descarga)
C_{sr}	Índice de expansión (etapa de descarga del segundo ciclo)
C_v	Coeficiente de consolidación
CF	Coeficiente de fracción de arcilla
CGT	Ensaye de compresibilidad a gradiente controlado
CI	Ensaye de carga incremental
CRS	Ensaye de velocidad de deformación constante
e	Relación de vacíos
\bar{e}	Relación de vacíos promedio
e_0	Relación de vacíos inicial
F_3	Factor adimensional de la teoría de Wissa
G_s	Densidad de sólidos
G_w	Grado de saturación
H	Altura de la muestra
H_0	Altura inicial de la muestra
H_d	Altura efectiva de fusión de agua
H_{ud}	Altura no efectiva en el proceso de fusión de agua
IP	Índice de plasticidad
k	Coeficiente de permeabilidad
m	Pendiente de calibración/verificación del sensor

m_v	Coeficiente de compresibilidad volumétrica
P_p	Presión patrón
P_s	Presión del sensor
r	Constante que depende de la velocidad de prueba y características físicas de la misma
r_w	Velocidad de deformación constante (Teoría de Wissa)
R	Velocidad de deformación constante (Teoría de Smith)
t	Tiempo
T_v	Factor tiempo de consolidación
u	Exceso de presión de poro (para ecuación de continuidad)
u_0	Exceso de presión de poro inicial
\bar{u}	Presión de poro promedio
u_z	Exceso de presión para una profundidad arbitraria z
u_b	Exceso de presión de poro medido en la base no drenante
u_h	Exceso de presión de poro medido en la base (Teoría de Wissa)
V	Volumen de la muestra
V_s	Volumen de sólidos de la muestra
w	Contenido de agua
w_L	Límite líquido
w_P	Límite plástico
z	Profundidad o espesor de arcilla
α	Relación de la presión de poro promedio
β	Relación de velocidad de prueba normalizada
γ_w	Peso específico del agua
δ	Deformación lineal
ε	Deformación unitaria
ε_v	Deformación volumétrica
$\dot{\varepsilon}_v$	Velocidad de deformación constante
Δu	Incremento de la presión de poro
$\Delta\sigma_\alpha$	Incremento del esfuerzo axial

$\Delta\bar{\sigma}_v$	Incremento de esfuerzo vertical efectivo
σ_a	Esfuerzo axial
σ_{cp}	Esfuerzo de contrapresión
σ_v	Esfuerzo vertical total
σ'_v	Esfuerzo efectivo vertical
σ'_0	Esfuerzo efectivo vertical a la profundidad $z = 0$
σ'_{pc}	Esfuerzo de preconsolidación
σ'_{pcr}	Esfuerzo de preconsolidación (etapa de recarga)
$\sigma'_{u,c}$	Esfuerzo efectivo último en la etapa de carga
σ'_Y	Esfuerzo de fluencia
σ'_{YR}	Esfuerzo de fluencia (etapa de recarga)

Lista de figuras

- Figura 1.1 Modelo mecánico de consolidación (Lowe, 1974)
- Figura 1.2 Efecto de velocidad en curvas de esfuerzo-relación de vacíos (Crawford y Hamilton, 1959)
- Figura 1.3 Esquema de movimiento de la condición de frontera en la difusión de la agua de poro durante la consolidación CRS, a) en una etapa temprana, b) en un instante intermedio, c) en un instante cuando la altura completa participa en el proceso de difusión
- Figura 2.1 Consolidómetro neumático
- Figura 2.2 Módulo de calibración
- Figura 2.3 Selección de sensor para la calibración
- Figura 2.4 Parámetros de calibración del sensor de presión de poro
- Figura 2.5 Parámetros de calibración del sensor de presión de poro
- Figura 2.6 Módulo de operación del consolidómetro neumático
- Figura 2.7 Módulo de operación (Datos del suelo)
- Figura 2.8 Módulo de operación (Configuración de prueba)
- Figura 2.9 Módulo de operación (Saturación)
- Figura 2.10 Módulo de operación (B de Skempton)
- Figura 2.11 Módulo de operación (Curvas de consolidación en Ensayes)
- Figura 2.12 Módulo de operación (curva de compresibilidad de Carga Incremental en Ensayes)
- Figura 2.13 Módulo de operación (curva de desplazamiento y presiones vs tiempo en Ensayes)
- Figura 2.14 Módulo de operación (curva de compresibilidad para prueba CRS en Ensayes)
- Figura 2.15 Módulo de operación (Relaciones volumétricas finales)
- Figura 2.16 Módulo de operación (Reportes)
- Figura 2.17 Módulo de operación (Diseño de vectores)
- Figura 2.18 Módulo de operación (Manual)
- Figura 2.19 Diagrama de la instrumentación de sensores del equipo
- Figura 2.20 Conexión de salida hacia la columna de mercurio
- Figura 2.21 Parámetros previos a la calibración del sensor de presión de poro
- Figura 2.22 Calibración del sensor de presión de poro (Módulo de calibración)
- Figura 2.23 Curva de calibración del sensor de presión de poro
- Figura 2.24 Curva de verificación del sensor de presión de poro
- Figura 2.25 Curva de error parcial del sensor de presión de poro
- Figura 2.26 Curva de error total del sensor de presión de poro
- Figura 2.27 Calibración del sensor de desplazamiento (Módulo de calibración)
- Figura 2.28 Curva de calibración del sensor de desplazamiento
- Figura 2.29 Curva de verificación del sensor de desplazamiento
- Figura 2.30 Curva de precisión del sensor de desplazamiento
- Figura 2.31 Curva de precisión del sensor de desplazamiento
- Figura 2.32 Módulo de operación (verificación cruzada)
- Figura 2.33 Verificación cruzada de los sensores de presión
- Figura 2.34 Verificación cruzada de presión de poro vs contrapresión
- Figura 2.35 Verificación cruzada de presión de poro vs presión de confinamiento
- Figura 2.36 Verificación cruzada de presión de poro vs esfuerzo axial

-
- Figura 2.37 Verificación cruzada de presión de poro vs presión axial
- Figura 3.1 Esquema resumido de distribución de sensores del consolidómetro
- Figura 3.2 Proceso de labrado de la muestra
- Figura 3.3 Secuencia de montaje
- Figura 3.4 Esquema de montaje y fijación del domo
- Figura 3.5 Esquema interno del domo
- Figura 3.6 Esquema de velocidad de carga para la prueba CRS
- Figura 3.7 Esquema de esfuerzo efectivo en la prueba CRS (adaptado Smith, 1969)
- Figura 3.8 Esquema de esfuerzo efectivo en la prueba CRS
- Figura 3.9 Registro de presión de poro en la prueba CRS
- Figura 3.10 Determinación del índice de compresión y expansión en los diferentes ciclos de la prueba
- Figura 3.11 Coeficiente de consolidación para la prueba CRS y de CI
- Figura 4.1 Esquema de prueba de CI y CRS
- Figura 4.2 Curva de velocidad de prueba
- Figura 4.3 Desarrollo de esfuerzo axial, grupo G1
- Figura 4.4 Curvas de compresibilidad del grupo G1
- Figura 4.5 Exceso de presión de poro para el grupo G1
- Figura 4.6 Exceso de presión de poro para la prueba T04 en a) Incremento 1 y b) Incremento 2
- Figura 4.7 Variación de la relación de vacíos con el exceso de la presión de poro
- Figura 4.8 Coeficiente de consolidación del grupo G1
- Figura 4.9 Curva de desplazamiento del grupo G2
- Figura 4.10 Desarrollo del esfuerzo axial del grupo G2
- Figura 4.11 Curvas de compresibilidad a) del grupo G2 (izquierda) y b) detalle de sobrestimación (derecha)
- Figura 4.12 Sobrestimación de σ'_{vR}/σ'_u
- Figura 4.13 Variación de esfuerzo efectivo-velocidad de deformación a diferentes velocidades para arcilla Batiscan (Leroueil *et al.*, 1985)
- Figura 4.14 Relación esfuerzo-deformación-velocidad de prueba, $\sigma'_v-\varepsilon_v-\dot{\varepsilon}'_v$
- Figura 4.15 Exceso de presión de poro u_b del grupo G2
- Figura 4.16 Exceso de presión de poro u_b del grupo G2 con relación a e
- Figura 4.17 Relación hidrodinámica $u_b-\varepsilon_v-\dot{\varepsilon}'_v$
- Figura 4.18 Relación de u_b/σ'_v con respecto a σ'_v en la etapa de carga
- Figura 4.19 Relación de u_b/σ'_v con respecto a σ'_v en la etapa de recarga
- Figura 4.20 Curvas esfuerzo-deformación en pruebas CRS a diferentes velocidades para Leroueil *et al.*, 1985 (izquierda), Akagi *et al.*, 1995 (derecha) y Sällfors, 1975 (inferior).
- Figura 4.21 Prueba de laboratorio en arcilla plástica para demostrar el desarrollo de resistencia en contra de la compresión durante 28 días de consolidación diferida (Bjerrum, 1967)
- Figura 4.22 Coeficiente de consolidación C_v del grupo G1 en etapa de carga
- Figura 4.23 Coeficiente de consolidación C_v del grupo G2
- Figura 4.24 Comparación del coeficiente de consolidación C_v del grupo G1 y G2
- Figura 4.25 Comparación del coeficiente de consolidación C_v para diferentes arcillas

Figura A.1 Curva de calibración del sensor de contrapresión
Figura A.2 Curva de verificación del sensor de contrapresión
Figura A.3 Curva de error parcial del sensor de contrapresión
Figura A.4 Curva de error total del sensor de contrapresión
Figura A.5 Curva de calibración del sensor de presión de línea
Figura A.6 Curva de verificación del sensor de presión de línea
Figura A.7 Curva de error parcial del sensor de presión de línea
Figura A.8 Curva de error total del sensor de presión de línea
Figura A.9 Curva de calibración del sensor de presión axial
Figura A.10 Curva de verificación del sensor de presión axial
Figura A.11 Curva de precisión del sensor de presión axial
Figura A.12 Curva de precisión del sensor de presión axial
Figura A.13 Curva de calibración del sensor de esfuerzo axial
Figura A.14 Curva de verificación del sensor de esfuerzo axial
Figura A.15 Curva de precisión del sensor de esfuerzo axial
Figura A.16 Curva de precisión del sensor de esfuerzo axial
Figura A.17 Verificación cruzada de contrapresión vs presión de poro
Figura A.18 Verificación cruzada de contrapresión vs presión de confinamiento
Figura A.19 Verificación cruzada de contrapresión vs esfuerzo axial
Figura A.20 Verificación cruzada de contrapresión vs presión axial
Figura A.21 Verificación cruzada de confinamiento vs presión de poro
Figura A.22 Verificación cruzada de confinamiento vs contrapresión
Figura A.23 Verificación cruzada de confinamiento vs esfuerzo axial
Figura A.24 Verificación cruzada de confinamiento vs presión axial
Figura A.25 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión de poro
Figura A.26 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs contrapresión
Figura A.27 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión de confinamiento
Figura A.28 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión axial
Figura A.29 Verificación cruzada de presión axial vs presión de poro
Figura A.30 Verificación cruzada de presión axial vs contrapresión
Figura A.31 Verificación cruzada de presión axial vs confinamiento
Figura A.32 Verificación cruzada de presión axial vs esfuerzo axial

Figura B.1 Curva de velocidad, prueba T01
Figura B.2 Curva de esfuerzo axial, prueba T01
Figura B.3 Relación de esfuerzos, prueba T01
Figura B.4 Exceso de presión de poro, prueba T01
Figura B.5 Coeficiente de consolidación, prueba T01
Figura B.6 Curva de compresibilidad, prueba T01
Figura B.7 Curva de velocidad, prueba T02
Figura B.8 Curva de esfuerzo axial, prueba T02
Figura B.9 Relación de esfuerzos, prueba T02
Figura B.10 Exceso de presión de poro, prueba T02
Figura B.11 Coeficiente de consolidación, prueba T02

Figura B.12 Curva de compresibilidad, prueba T02
Figura B.13 Curva de velocidad, prueba T03
Figura B.14 Curva de esfuerzo axial, prueba T03
Figura B.15 Relación de esfuerzos, prueba T03
Figura B.16 Exceso de presión de poro, prueba T03
Figura B.17 Coeficiente de consolidación, prueba T03
Figura B.18 Curva de compresibilidad, prueba T03
Figura B.19 Curva de compresibilidad, prueba T04
Figura B.20 Curva de velocidad, prueba T05
Figura B.21 Curva de esfuerzo axial, prueba T05
Figura B.22 Relación de esfuerzos, prueba T05
Figura B.23 Exceso de presión de poro, prueba T05
Figura B.24 Coeficiente de consolidación, prueba T05
Figura B.25 Curva de compresibilidad, prueba T05
Figura B.26 Curva de velocidad, prueba T06
Figura B.27 Curva de esfuerzo axial, prueba T06
Figura B.28 Relación de esfuerzos, prueba T06
Figura B.29 Exceso de presión de poro, prueba T06
Figura B.30 Coeficiente de consolidación, prueba T06
Figura B.31 Curva de compresibilidad, prueba T06
Figura B.32 Curva de velocidad, prueba T07
Figura B.33 Curva de esfuerzo axial, prueba T07
Figura B.34 Relación de esfuerzos, prueba T07
Figura B.35 Exceso de presión de poro, prueba T07
Figura B.36 Coeficiente de consolidación, prueba T07
Figura B.37 Curva de compresibilidad, prueba T07
Figura B.38 Curva de velocidad, prueba T08
Figura B.39 Curva de esfuerzo axial, prueba T08
Figura B.40 Relación de esfuerzos, prueba T08
Figura B.41 Exceso de presión de poro, prueba T08
Figura B.42 Coeficiente de consolidación, prueba T08
Figura B.43 Curva de compresibilidad, prueba T08
Figura B.44 Curva de compresibilidad, prueba T09

Lista de tablas

Tabla 1.1	Propiedades índices y pruebas realizadas (Mendoza <i>et al</i> , 1996)
Tabla 1.2	Velocidades de deformación constante por varios autores
Tabla 2.1	Descripción general de sensores del consolidómetro neumático
Tabla 2.2	Registro de presiones para la calibración del sensor de presión de poro
Tabla 2.3	Registro de presiones para la verificación del sensor de presión de poro
Tabla 2.4	Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión de poro
Tabla 2.5	Registro de desplazamiento para la calibración del sensor de desplazamiento
Tabla 2.6	Registro de desplazamiento para la verificación del sensor de desplazamiento
Tabla 2.7	Registro de desplazamientos para determinar la precisión del sensor de desplazamiento
Tabla 2.8	Resumen de las parámetros de calibración y verificación de los sensores
Tabla 2.9	Registro de presiones de la verificación cruzada de los transductores
Tabla 3.1	Resumen de las propiedades del material.
Tabla 3.2	Clasificación SUCS del material en estudio.
Tabla 3.3	Programa de prueba.
Tabla 4.1	Relación de esfuerzo de fluencia contra esfuerzo de preconsolidación del grupo G1.
Tabla 4.2	Índice de compresión y expansión del grupo G1.
Tabla 4.3	Resumen de las velocidades de prueba aplicadas.
Tabla 4.4	Relación de esfuerzos de fluencia entre el esfuerzo efectivo último de la etapa de carga.
Tabla 4.5	Máxima relación u_b / σ_v .
Tabla 4.6	Exceso de presión de poro de varios autores
Tabla 4.7	Resumen de índices de compresión y expansión.
Tabla A.1	Registro de presiones para la calibración del sensor de contrapresión
Tabla A.2	Registro de presiones para la verificación del sensor de contrapresión
Tabla A.3	Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de contrapresión
Tabla A.4	Registro de presiones para la calibración del sensor de presión de línea
Tabla A.5	Registro de presiones para la verificación del sensor de presión de línea
Tabla A.6	Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión de línea
Tabla A.7	Registro de presiones para la calibración del sensor de presión axial
Tabla A.8	Registro de presiones para la verificación del sensor de presión axial
Tabla A.9	Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión axial
Tabla A.10	Registro de presiones para la calibración del sensor de esfuerzo axial
Tabla A.11	Registro de presiones para la verificación del sensor de esfuerzo axial
Tabla A.12	Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de esfuerzo axial
Tabla B.1	Resumen de prueba T04
Tabla B.2	Resumen de prueba T09

Capítulo 1 Introducción y estudios previos

1.1 Introducción

La caracterización de la arcilla de la ciudad de México ha permitido externar la singularidad del suelo que se tiene y, a su vez, el contraste significativo que existe con respecto a los resultados de otros suelos estudiados en la literatura (Marsal *et al.*, 1956; Zeevaert, 1972; Díaz *et al.*, 1992; Ovando, 2011). En este sentido, la compresibilidad que se presenta en este sitio y que usualmente se estudia en ensayos de carga incremental CI, recientemente se ha investigado bajo el enfoque de deformación constante CRS para analizar la compatibilidad que existe con respecto a la metodología convencional (Mendoza *et al.*, 1996; López, 2002; Montes, 2006; Pinzón, 2007; Romero, 2017).

En la mecánica de suelos, la determinación de los parámetros de compresibilidad se realiza, en su gran mayoría, mediante el uso de un consolidómetro de palanca con aplicación de cargas cada 24 horas o en su defecto, considerando la disipación del exceso de presión de poro en la base no drenante de la muestra. Sin embargo, a mediados del siglo XX, Hamilton y Crawford (1959) introdujeron los ensayos CRS que permiten determinar el esfuerzo de preconsolidación σ'_{pc} de forma rápida en comparación con la metodología convencional. Esta investigación se realizó con apoyo de un marco de carga triaxial instrumentado para aplicar una tasa de deformación uniforme durante toda la prueba, tiempo más tarde, en un contexto innovador y con el avance en la instrumentación y automatización de equipos de laboratorio se permitió crear una celda para estudiar el mismo fenómeno. Fue entonces que en la universidad de Manchester, UK, el profesor P.W. Rowe desarrolló una celda que lleva su mismo nombre, que a diferencia del consolidómetro convencional la *Celda Rowe* (Rowe y Barden, 1966) permite realizar ensayos a esfuerzo controlado mediante la aplicación de presión por mecanismo neumático. Las ventajas de este nuevo equipo de ensaye están en función de minimizar los efectos de vibración, aplicación de presión por encima de 1,000 kPa (dependiendo de la presión de línea), control de las condiciones de drenaje de la muestra, medición de la presión de poro, saturación de la muestra por contrapresión, medición del agua expulsada de la muestra, entre otros (Head, 1985; Premchitt *et al.*, 1995).

Actualmente, el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta con 2 equipos realizar investigación de la consolidación mediante ensayos de CI y CRS (Salazar, 2014). El consolidómetro neumático es el equipo que se empleó para la presente investigación de compresibilidad de la arcilla de la ciudad de México, cabe señalar que su sistema de adquisición de datos y conexiones línea muy detallado permite al usuario operar en forma automatizada y con registro continuo de las variables de interés.

El programa de pruebas contempló 2 series de ensayos con un total de nueve pruebas de consolidación. Para un grupo de prueba CRS en particular se aplicó en el primer ciclo (carga-descarga) la velocidad más baja (0.20 %/h); continuando el segundo ciclo (recarga-descarga) a una velocidad mayor a la inicial. Adicional a los ensayos CRS, se ensayó una muestra bajo la metodología de carga incremental para contrastar los resultados. La aplicación de diferentes tasas de deformación en un mismo ensayo abre las puertas de la literatura geotécnica para medir la subestimación de parámetros que permite al especialista determinar una velocidad equivalente entre una prueba CRS con respecto a una de CI, ya que el principal problema que se presenta para esta prueba de consolidación continua es determinar la apropiada velocidad de deformación a la que se someterá la muestra (Ozer *et al.*, 2012; Khairul *et al.*, 2016).

1.2 Teorías para la interpretación de parámetros de compresibilidad

Diversas investigaciones se han realizado para estudiar el comportamiento de la compresibilidad de los suelos finos a raíz del modelo reológico propuesto por Terzaghi (1925) y el nuevo enfoque que se ha tenido de la consolidación mediante los ensayos a velocidad de deformación constante. Por ello, debido al acervo tan extenso que se cuenta sobre el tema, en el presente trabajo se decidió acotar las referencias en existencia para incluir únicamente los primeros trabajos realizados mediante las pruebas CRS, las recientes investigaciones que se han realizado en la literatura general y el trabajo experimental que se ha desarrollado para la arcilla de la ciudad de México.

1.2.1 Modificación del modelo reológico de Terzaghi

Para representar la influencia que tiene la velocidad de deformación constante sobre la compresibilidad de suelos finos se realizó una modificación del modelo reológico de Terzaghi que describe el comportamiento ante este fenómeno de viscosidad. El mecanismo de deformación Lowe (1974) se presenta en la Figura 1.1 y lo describe de la siguiente forma:

“En el modelo para la modificación de la teoría, los resortes en espiral (Modelo de Terzaghi) son reemplazados por ballestas que tienen un relleno de un material viscoso entre las hojas. La carga que puede tomar esas ballestas depende de la tasa de compresión impuesta. Si la carga de compresión impuesta es muy rápida, el material viscoso entre las hojas desarrolla apreciable resistencia al corte y las pilas de hojas actúan como una unidad. Si el rango de compresión impuesta es muy lento, el material viscoso de relleno puede deformarse rápidamente y cada una de las láminas trabaja como elementos individuales. La resistencia a la compresión cuando la pila de hojas actúa como elementos individuales es mucho menor que la resistencia cuando las hojas se comportan como una viga combinada bajo condiciones de carga rápida.”

El efecto de los ensayos CRS se atribuye a la respuesta que presenta el material ante la imposición de una tasa continua de desplazamiento. De acuerdo con Gorman (1981), este efecto es un resultado de la viscosidad natural de las partículas del suelo y su comportamiento depende de las características intrínsecas del material. Se comprobó con el trabajo experimental que a bajas velocidades de deformación el comportamiento de esfuerzo-deformación es muy semejante a los ensayos de carga incremental que contrasta en forma diferente para altas velocidades, donde se presenta un cambio significativo en la resistencia del material.

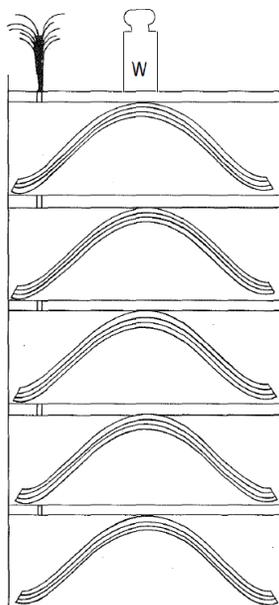


Figura 1.1 Modelo mecánico de consolidación (Lowe, 1974)

1.2.2 Teoría de Smith y Wahls

La determinación de la presión de poro, esfuerzo efectivo promedio y coeficiente de consolidación mediante la relación con la distribución de la relación de vacíos a cualquier profundidad de la muestra durante el ensaye CRS fueron las primeras formulaciones que se realizaron para determinar los parámetros de compresibilidad en la nueva modalidad de ensaye.

Smith *et al.*, 1969 propuso un modelo matemático para describir el comportamiento de la prueba CRS que considera algunos aspectos de la teoría unidimensional de Terzaghi. Para el modelo básico se retomaron las siguientes consideraciones que se enlistan a continuación:

- El suelo es homogéneo y está saturado.
- Tanto el agua como los sólidos son relativamente incompresibles al esqueleto del suelo.
- La Ley de Darcy es aplicable para el flujo en el suelo.
- El suelo está confinado lateralmente y el drenaje ocurre en una única dirección vertical.
- Tanto el esfuerzo efectivo y total son uniformes a lo largo del plano horizontal.

Basado en la continuidad del flujo a través del elemento del suelo, la ecuación de consolidación es:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1.1)$$

Donde:

- k Coeficiente de permeabilidad del suelo
- e Relación de vacíos
- u Exceso de presión de poro

La ecuación 1.1 es no lineal, parcial, diferencial que se puede reducir a la ecuación clásica unidimensional introduciendo las suposiciones de Terzaghi. Además, se asume que el coeficiente de permeabilidad k , es

una función de la relación de vacíos promedio \bar{e} de la muestra. Por lo tanto, k se convierte una función de tiempo única y dependiente de la posición. La validación de esta suposición depende de la extensión de variación de la relación de vacíos de la muestra.

Para k se asume independiente de z , se tiene:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1.2)$$

En donde $k = k(\bar{e})$

El procedimiento de los ensayos CRS requiere que la tasa de deformación vertical sea constante. Para el confinamiento lateral, la tasa del cambio de volumen V , casi puede ser constante y se expresa con la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \frac{1}{V_s} \frac{dV}{dt} = \frac{-RA}{V_s} = -r = \text{constante} \quad (1.3)$$

En donde R = velocidad de deformación, A = sección transversal de la muestra, V_s = volumen de los sólidos y la relación de vacíos promedio se define por:

$$\bar{e} = \frac{1}{H} \int_0^H e \, dz \quad (1.4)$$

De las ecuaciones 1.3 y 1.4, se presenta la limitación que la relación de vacíos es una función lineal que depende del tiempo. De las anteriores expresiones, se observa que la relación de vacíos se puede aislar como la sumatoria de dos elementos:

$$e(z, t) = g(z)t + e_0 \quad (1.5)$$

Donde $g(z)$ es una función que depende únicamente de la profundidad y e_0 es la relación de vacíos inicial.

Para determinar la presión de poro en la base durante el ensayo CRS, se puede estimar con la siguiente expresión:

$$u_{z=H} = u_b = \frac{\gamma_w r H^2}{k(1+\bar{e})} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad (1.6)$$

Donde b es una constante que depende de la variación en la relación de vacíos con la profundidad y el tiempo y, la relación adimensional b/r , representa la distribución de la relación de vacíos con respecto a la profundidad. Para un valor de $b/r=0$, e es uniforme con la profundidad y para un valor de $b/r=2$, indica que e en la base de la muestra permanece constante. Smith *et al.*, 1969 sugiere que se utilice el rango práctico de $0 \leq b/r \leq 2$.

La determinación del esfuerzo efectivo promedio requiere de las variables que se miden durante el ensayo; esfuerzo vertical σ_1 , presión en la base, u_b , y la velocidad de deformación, por lo que resulta:

$$\overline{\sigma'_1} = \sigma_1 - \alpha u_b \quad (1.7)$$

Donde α = relación de la presión de poro promedio, la cual relaciona las presiones de poro promedio y la de la base, como sigue:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b} = \frac{1}{H} \frac{\int_0^H u dz}{u_b} \quad (1.8)$$

Partiendo de la consideración del coeficiente de consolidación C_v propuesto por Terzaghi, Smith *et al.*, 1969 define la determinación de C_v , en términos de cualquier relación de vacíos.

$$C_v = \frac{H^2}{2 u_b} \left(\frac{r}{a_v} \right) \quad (1.9)$$

1.2.3 Teoría de Wissa, Christian, David y Heiberg

La solución que presentó Smith *et al.*, 1969, aplica después que el estado transitorio se ha disipado, se asume que la permeabilidad del suelo es constante con la profundidad para cualquier tiempo y que la relación de vacíos varía linealmente con la profundidad. Por otra parte, para los ensayos de gradiente controlado (Lowe *et al.*, 1969) donde se supone que la permeabilidad es independiente de la profundidad para cualquier tiempo y que solamente existen deformaciones infinitesimales, no se consideró la condición de estado transitorio (Wissa *et al.*, 1971) por lo que en las pruebas CRS surge la necesidad de realizar mediante un modelo matemático simple la inclusión de estas condiciones.

Wissa *et al.*, 1971 establecieron un análisis para la interpretación de los ensayos de consolidación CRS, donde incluyen las condiciones que se desarrollan en la prueba; condición transitoria inicial y condición de estado estable. El desarrollo matemático asume que existen deformaciones infinitesimales y que el coeficiente de consolidación C_v , es independiente de la profundidad para cualquier tiempo. Señalaron que para comprender el fenómeno es necesario realizar suposiciones que permitan obtener soluciones teóricas para el problema de consolidación donde las condiciones de frontera sean diferentes a las pruebas odométricas convencional. Lo anterior representa que el coeficiente de consolidación responde a cambios de deformación considerables, que no necesariamente tiene que ser grandes.

Condición de estado estable

Se establece que esta condición se desarrolla en el suelo después de que se ha disipado la condición transitoria, es decir, esta condición se alcanza cuando el valor de C_v de una prueba de CRS converge con respecto a una prueba edométrica (Khairul, 2016). Para cualquier tiempo t , la diferencia entre la deformación en la parte superior e inferior se determina:

$$\Delta \varepsilon = \frac{rH^2}{2C_v} \quad (1.10)$$

Para cualquier punto z , la diferencia entre las deformaciones para un intervalo de tiempo t_1 y t_2 es $r(t_2 - t_1)$, donde r es la velocidad de deformación constante.

En la parte superior de la muestra se aplica el esfuerzo total efectivo, σ_v , allí el exceso de presión de poro, u_0 , es cero. En la parte inferior de la muestra se mide la presión de poro, u_h , por consiguiente el esfuerzo vertical efectivo es, $\bar{\sigma}_{vh} = \sigma_v - u_h$,

Por lo tanto, la diferencia entre el esfuerzo efectivo de la parte superior entre la inferior es:

$$\Delta\bar{\sigma}_v = u_h \quad (1.11)$$

Además, la relación de esfuerzo efectivo-deformación se define por una constante del coeficiente de compresibilidad, m_v , por lo que se asume la siguiente linealidad

$$\Delta\bar{\sigma}_v = \frac{\Delta\varepsilon}{m_v} \quad (1.12)$$

Donde ε = es la deformación vertical y el coeficiente de permeabilidad entonces se reescribe por:

$$k = \frac{1}{2} \frac{rH^2\gamma_w}{u_h} \quad (1.13)$$

Se considera que el cambio en la tasa de deformación para cualquier punto es constante, por lo tanto el cambio de $\bar{\sigma}_v$ y la distribución de la presión de poro también deben de ser constantes, por lo que la ecuación 1.12 se puede escribir en términos de cambio de esfuerzo efectivos:

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma_v} = r \left(\frac{\Delta t}{\Delta\sigma_v} \right) \quad (1.14)$$

Donde $\Delta\sigma_v$ es el cambio en la medición del esfuerzo total sobre el incremento del tiempo (velocidad de prueba en término de esfuerzo), por lo tanto Wissa *et al.*, 1971 obtuvieron la misma expresión de Smith *et al.*, 1969 (ecuación 1.9) para determinar el coeficiente de consolidación:

$$C_v = \frac{H^2}{2u_h} \left(\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (1.15)$$

Para un registro en diferentes tiempos, se puede escribir como:

$$C_v = - \frac{H^2 \log \left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2 \Delta t \log \left(1 - \frac{u_h}{\sigma_v} \right)} \quad (1.16)$$

Condición de estado transitorio

Esta condición se da inmediatamente después que el pistón de carga se moviliza para consolidar a la muestra, la cual se debe de disipar una vez que se establezca la condición estable. Además, explica el cambio de esfuerzos efectivos que sufre la muestra para cualquier tiempo t , por lo que la relación esfuerzo-deformación se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\varepsilon(H, t)}{\varepsilon(0, t)} = F_3(T_v) \quad (1.17)$$

Donde H = es el espesor de la muestra, el factor tiempo $T_v = C_v t/H^2$ y F_3 es un término que solamente depende de T_v .

Para un material lineal las deformaciones serán proporcionales al cambio de esfuerzos efectivos.

$$F_3 = \frac{(\sigma_v - \sigma_v \text{ en } t = 0) - u_h}{(\sigma_v - \sigma_v \text{ en } t = 0)} \quad (1.18)$$

Y en los materiales no lineales el factor F_3 se define:

$$F_3 = \frac{\log(\sigma_v - u_h) - \log(\sigma_v \text{ en } t = 0) - u_h}{\log(\sigma_v) - \log(\sigma_v \text{ en } t = 0)} \quad (1.19)$$

1.3 Ensayes CRS en suelos finos

1.3.1 Literatura general

El primer estudio experimental de compresibilidad variando la velocidad de deformación se realizó en suelo marino de Canadá (Crawford y Hamilton, 1959). La arcilla limosa presentó un límite líquido de 48%, límite plástico de 25% y un contenido de agua de 53% a 62%. Además, su contenido de sal fue de 0.5 g por litro.

Los ensayos de laboratorio que realizaron fueron de carga incremental, esfuerzo controlado y por primera vez se introdujo las pruebas de deformación constante (CRS). En las pruebas de carga incremental modificaron el esquema convencional de aplicación (duplicación de incrementos) por la relación de incrementos de carga de 1/2, 1/3 y 1/10. Para la ejecución de pruebas CRS se seleccionó un rango de velocidad de carga de 0.1 a 3 kg/cm²/h y en el caso de los ensayos de CRS se aplicó 3 tasas de deformación; 0.3, 4.5, 9%/h. Los resultados obtenidos de estas pruebas se compararon con las curvas de compresibilidad obtenidas de las pruebas de carga incremental, lo anterior como parámetro estándar de comparación lo que representó resultados prometedores. A partir de esta investigación, la principal conclusión fue obtener de manera rápida el valor del esfuerzo de preconsolidación de campo y parámetros de compresibilidad.

En la Figura 1.2 se presenta el efecto de la velocidad de deformación para las velocidades aplicadas. Se observa que el valor del esfuerzo de preconsolidación con la velocidad más baja (0.3%/h) es mayor al obtenido de la prueba de carga incremental y, por consiguiente, la tasa de deformación mayor (9%/h) presentó el esfuerzo de preconsolidación más grande de los cuatro ensayos.

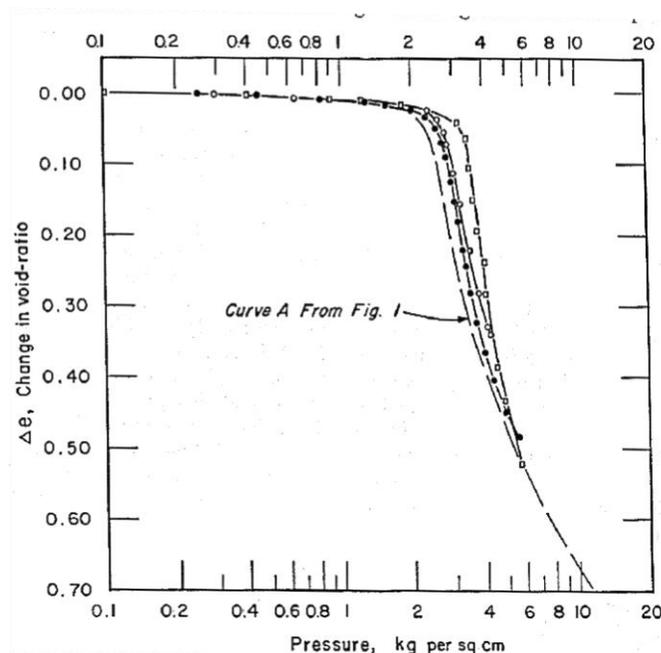


Figura 1.2 Efecto de velocidad en curvas de esfuerzo-relación de vacíos (Crawford y Hamilton, 1959)

Por otra parte, muestras de arcillas provenientes de un túnel, en la ciudad de Ottawa a una profundidad de 33 ft formaron parte de los trabajos de Crawford (1964) para la interpretación de los ensayos de consolidación en su forma convencional y de tipo CRS. El suelo presentó un contenido de agua promedio de 58.4%, un límite líquido de 54%, y un límite plástico de 25%. El máximo registro del exceso de presión de poro con respecto al esfuerzo total en la base de la muestra fue del 5%. La velocidad empleada para todos los ensayos fue de 0.0009 in/min, sin embargo, por las condiciones del anillo, se aplicaron dos velocidades de deformación; 4 %/h para la carga de preconsolidación y después, 7 a 14 %/h, dependiendo del espesor de la muestra (1 a 2 cm). Crawford concluyó que en las pruebas CRS la consolidación se debe al efecto plástico en vez que, al efecto hidrodinámico, por lo cual la compresión es totalmente secundaria (Crawford, 1964 y Smith *et al.*, 1969).

Crawford (1965) continuó con los ensayos CRS para su siguiente investigación. El material empleado fue arcilla de una profundidad de 53 ft de una excavación en la ciudad de Ottawa. La arcilla tuvo un límite líquido de 31%, límite plástico de 23% y un contenido de agua de 55%. El rango de velocidad aplicada fue de 0.16 a 8.0 %/h, respectivamente. Para la velocidad más baja obtuvo un registro máximo de presión de poro de 0.9 % del esfuerzo total aplicado y, un máximo valor de 15% para la velocidad más alta. El trabajo de investigación concluyó que la estructura del suelo tiene una importancia resistencia a la compresión dependiente del tiempo y que esa resistencia tenga una sustancial influencia en el coeficiente de permeabilidad y en la estimación de la velocidad de consolidación de campo.

Smith *et al.*, 1969, realizaron un total de 21 pruebas CRS bajo diferentes velocidades de deformación (0.24, 0.12, 0.06, 0.024 y 0.0096 %/min, respectivamente). Los resultados de los ensayos CRS se compararon con 11 pruebas de consolidación realizadas en su forma convencional. El estudio comprendió tres materiales, dos de ellos fueron comprados y preparados en el laboratorio (montmorillonita de calcio y caolinita) y el último fue una arcilla sensitiva de Massena, Nueva York. De los resultados experimentales, estudiaron el

comportamiento del coeficiente de consolidación para las velocidades indicadas. En las pruebas CRS obtuvieron un exceso de la presión de poro en la base por encima del 50% del esfuerzo total en las condiciones de esfuerzo máximo.

Por otra parte, Wissa *et al.*, 1971, llevó a cabo pruebas CRS en arcillas de Boston para el siguiente rango de velocidad 1.6 y $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Su programa de carga para los ensayos CRS consistió en llevar la muestra de suelo a un nivel de esfuerzos dado bajo una velocidad de deformación y después dejar constante el esfuerzo por un lapso de 24 horas. La selección de la adecuada velocidad de deformación está en función del desarrollo del exceso de presión de poro durante el ensayo, en velocidades bajas puede ser despreciable, por lo que puede resultar complicado determinar el coeficiente de consolidación y, para velocidades altas, en la base de la muestra se desarrolla alta presión de poro y la muestra está sujeta a grandes gradientes hidráulicos, los cuales no son representativos de las condiciones de campo. De forma práctica, se debe de seleccionar una velocidad de deformación que compense la construcción de la curva esfuerzo-deformación y a su vez, se obtenga el coeficiente de consolidación. De acuerdo con Wissa *et al.*, 1971, concluyó que esto se obtiene para la relación del exceso de presión de poro entre el esfuerzo vertical comprendido entre $2\% \leq u_b/\sigma_v \leq 5\%$.

El trabajo experimental de Gorman (1981) en muestras de caolinita remoldeadas permitió generar una guía para la selección de la velocidad de deformación en los ensayos CRS. Dentro del alcance de sus estudios incluyó evaluar la relación que guarda la presión de poro en exceso con relación al esfuerzo vertical efectivo, calcular el coeficiente de consolidación y observar la respuesta del grado de saturación para las diferentes velocidades aplicadas. Las propiedades del caolín empleado presentaron las siguientes características índices; límite líquido 59%, límite plástico 34%, densidad del material seco 1302 kg/m^3 , clasificación SUCS MH, contenido de limo 21% y de arcilla 79%. Las muestras ensayadas tuvieron una geometría de 2.5 in de diámetro y 1 in de altura. Además, las velocidades aplicadas fueron de 0.017 hasta 0.096 %/min, respectivamente.

De los estudios de Gorman (1981) permitió establecer un valor límite de 0.20 de la relación existente de la presión de poro en exceso y el esfuerzo vertical (u_b/σ_v) para obtener un comportamiento apropiado del esfuerzo de preconsolidación. Para los ensayos CRS la velocidad de deformación constante apropiada debe acotarse entre 0.00001 a 0.05 %/min (0.006 a 3.0 %/h). De forma particular, si del material en estudio se conoce el coeficiente de consolidación C_v , Gorman (1981) propuso emplear gráficos que permite correlacionar y obtener una velocidad equivalente de deformación r (%/min) para reproducir un ensaye de compresibilidad representativo al convencional de carga incremental.

Además de lo anterior, se han realizado estudios que contemplan la revisión de varias teorías para interpretar los parámetros de los ensayos CRS y el principal problema recae en la etapa inicial del ensayo, donde el exceso de presión tiene un impacto significativo (Vikash, 2013). No obstante, para comprobar la influencia que se tiene con respecto al coeficiente de consolidación C_v y el coeficiente de permeabilidad k . Con este enfoque, Amit *et al.*, 2014 realizó ensayos CRS a 0.02 y 0.01 mm/min (carga y descarga, respectivamente) para remarcar las diferencias entre la teoría de Wissa *et al.* 1971 y lo propuesto por el trabajo doctoral de Vikash (2013).

Cuando inicia el ensayo CRS se asume que hay un proceso de difusión de la expulsión de agua a través de los poros del suelo que se da en la parte cercana a la zona de drenaje por lo que existen dos zonas delimitadas por la alturas H_d y H_{ud} , respectivamente. Esta zona neutra es móvil, al iniciar el ensayo H_d es

cero y aumenta progresivamente hasta llegar a la altura completa del espécimen para un tiempo determinado como se indica en la Figura 1.3 (Vikash, 2013; Amit *et al.*, 2014). La determinación de la altura H_d se obtiene mediante un parámetro τ que se calibra con relación al registro del exceso de presión de poro de la base.

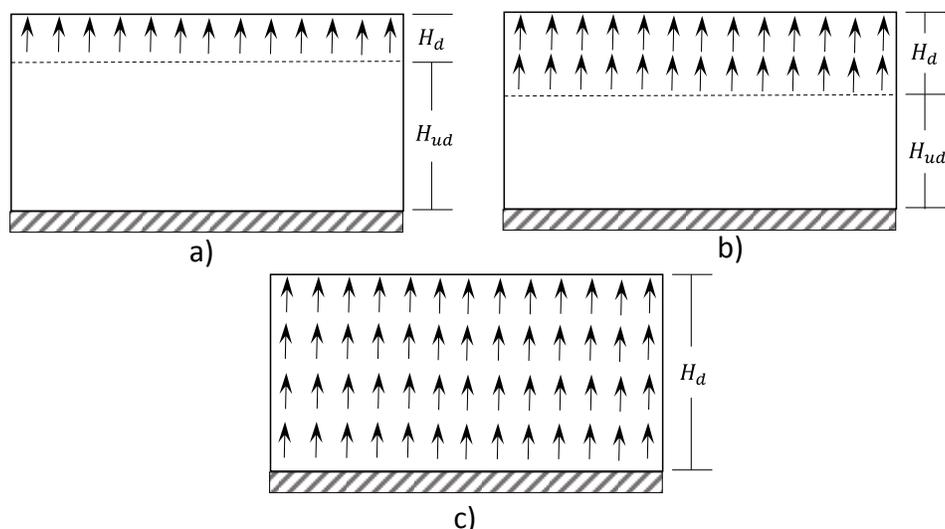


Figura 1.3 Esquema de movimiento de la condición de frontera en la difusión de la agua de poro durante la consolidación CRS, a) en una etapa temprana, b) en un instante intermedio, c) en un instante cuando la altura completa participa en el proceso de difusión

El coeficiente de consolidación y la permeabilidad reportados por Vikash (2013) indicaron que en buena medida que son aceptables y muy semejantes a los obtenidos por Wissa *et al.*, 1971, pero eliminando el problema con la presión de poro para el inicio de la prueba y para la etapa de descarga.

En la continua búsqueda de definir una velocidad de prueba CRS compatible con un ensaye CI Khairul *et al.*, 2016 desarrollaron su propio consolidómetro denominado RACE que cumpliera con las características que se requieren en los ensayos CRS. Su criterio para estimar una tasa de deformación aceptable fue basado en una relación de una velocidad de prueba normaliza, β , y proponiendo un nuevo coeficiente de fracción de arcilla (CF) para ensayar suelos finos. Sus resultados condujeron que la relación mínima sugerida de prueba u_b/σ_v es de 0.01 con lo que se asegura que el exceso de presión de poro se encuentre dentro de los límites que se establece en la norma ASTM 4186. Por consiguiente, con base a sus resultados esta relación de esfuerzos se obtiene para una velocidad de prueba comprendida entre 0.6 y 1.8 %/h.

1.3.2 Arcillas de México

En México, las pruebas CRS se introdujeron por medio de un equipo prototipo elaborado en el Laboratorio de Dinámica de Suelos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) a manos de investigadores del Instituto de Ingeniería (II) y del Cenapred (Mendoza *et al.*, 1996). El trabajo experimental se presentó como una técnica alternativa de los estudios de compresibilidad.

Las características del equipo empleado fue un anillo fijo de un área transversal de 50 cm^2 y 26.84 mm de altura, transductores con las siguientes capacidades máximas: 7.0 kg/cm^2 (presión relativa), 450 kg (fuerza), 12.7 mm (desplazamiento); su resolución es de al menos 0.5% de su escala total. El rango de

velocidad aplicable se comprende de 0.00001 a 6 mm/min. Las señales se adquieren en forma automática por una tarjeta analógica-digital, la cual envía información a la memoria de una PC.

El programa experimental incluyó el ensaye de cuatro tipos de suelos inalterados diferentes en las que se emplearon un rango de deformación de 0.0112 y 0.0373 %/min, respectivamente. Las propiedades y características de los ensayos se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Propiedades índices y pruebas realizadas (Mendoza *et al*, 1996)

Suelo ensayado	Profundidad	Contenido de agua	Límite líquido	Índice de plasticidad	Tipo de ensaye	
	z m	w (%)	w _L (%)	IP (%)	CI	CRS
Puente Impulsora	10.20	355	368	268	1	2
Central de Abastos	25.00	238	348	215	1	2
Hospital Juárez	11.70	268	399	277	1	1
Limo lacustre Mexicali	0.30	32	29	4	1	1

Cabe señalar que el equipo empleado no pudo asegurar la saturación de la muestra, como se indica en la norma ASTM (D4186, 1989). Sin embargo, los resultados indujeron que lo anterior no fue de gran injerencia en las propiedades de compresibilidad determinadas. Mendoza *et al.*, 1996 concluyeron que las curvas de compresibilidad obtenidas por medio de los dos en ensayos (CRS y de carga incremental) bajo una velocidad de 0.003 a 0.007 mm/min prácticamente mostraron coincidencia geométrica, siempre y cuando se mantenga el 30% de la presión de poro con respecto a la presión total inducida y, además, que en los ensayos de CI las masas se coloquen respetando el lapso de 24 horas.

Por otra parte, López (2002) realizó la comparación de los ensayos de compresibilidad mediante las pruebas de gradiente controlado (CGT), carga incremental (CI) y de velocidad de deformación constante (CRS) en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Empleó arcilla inalterada de tres sitios representativos de la zona lacustre de la ciudad de México y para todos los ensayos registró la lectura de la presión de poro en la base con el objeto de estudiar la respuesta entre ellas. De las pruebas CRS el exceso de presión de poro con respecto al esfuerzo vertical efectivo para la velocidad más rápida (1%/h) estuvo ligeramente por encima del 20%, muy semejante a las pruebas CGT, donde obtuvo un registro no mayor al 25%. De acuerdo con los resultados experimentales, propuso una ecuación en función del índice de liquidez, el índice de plasticidad y del esfuerzo de preconsolidación como guía para seleccionar una velocidad de deformación que reproduzca el comportamiento de la prueba convencional de CI.

Los resultados de los ensayos CRS han contribuido para generar la evaluación de modelos de comportamiento elasto visco plástico. En este sentido, Montes (2006) realizó ensayos CRS en arcilla inalterada de la zona lacustre del Valle de México, cuyas propiedades índices en promedio fue el contenido de agua 323 a 367%, límite líquido 365%, límite plástico 155%. El trabajo experimental se realizó en el consolidómetro neumático del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual registró valores inferiores al 30% de la relación del exceso de presión de poro entre el esfuerzo efectivo para diferentes velocidades de deformación (Tabla 1.2).

En el caso de Pinzón (2007) su trabajo experimental se basó en estudiar el comportamiento del coeficiente de permeabilidad aplicando el modelo M propuesto por Alberro (2006). Las pruebas de laboratorio se realizaron en una Celda Rowe para un programa experimental de cinco pruebas de consolidación

alternadas con pruebas de permeabilidad directas en muestras de arcilla inalteradas provenientes de la zona metropolitana del D.F en el Estado de México. El autor concluyó que el coeficiente de permeabilidad obtenido por medio del modelo M representa buen método ya que toma en cuenta los efectos visco- plásticos del suelo y el paulatino cambio de la geometría del estrato en el proceso de consolidación. Para las diferentes velocidades aplicadas registró como valor máximo de 10% de relación de presión de poro entre el esfuerzo efectivo.

La más reciente investigación del comportamiento visco plástico de la arcilla de la Ciudad de México en ensayos CRS se realizó por Romero, 2017. El programa experimental comprendió un total de 9 ensayos en un rango de velocidad de 0.033 a 50 %/h. En todas las pruebas se registró el exceso de presión de poro en la base de la muestra, donde el valor máximo alcanzado no supera el 3% de la relación de la presión de poro entre el esfuerzo vertical efectivo para una velocidad de 0.5 %/h. Se estudió la variación del coeficiente de permeabilidad y parámetros de compresibilidad respecto a diferentes velocidades.

Para resumir todos los trabajos descritos en los anteriores párrafos se presenta la Tabla 1.2. Aquí se incluye en forma ordenada las velocidades de deformación empleadas para diferentes arcillas. En el caso de la arcilla blanda del valle de México, el rango de velocidad de deformación que comúnmente se usa para investigación experimental está comprendido entre 0.1 a 5 %/h.

Tabla 1.2 Velocidades de deformación constante por varios autores

Autores	Año	Velocidad de prueba		
		$\times 10^{-2}$ (mm/min)	$\dot{\epsilon}_v$ (%/h)	$\times 10^{-6}$ (s ⁻¹)
Hamilton y Crawford	1959	0.1, 1.5 y 3	0.3, 4.5 y 9.0	83.3, 12.5 y 25
Crawford	1964	-----	4.0, 7.0 y 14.0	-----
Crawford	1965	0.053 a 2.66	0.16 a 8.0	0.44 a 22.22
Smith y Wahls	1969	-----	0.144 a 14.4	4.7 a 40
Wissa et al	1971	0.18 y 0.91	0.57 y 2.88	1.6 y 8.0
Leroueil et al.	1985	0.00153 a 3.6	0.00612 a 14.4	0.017 a 40.0
Mendoza et al.	1996	0.3 a 0.7	0.67 y 1.56	1.87 a 4.35
Mesri et al.	1997	0.12606 y 0.26358	0.396 y 0.828	1.1 y 2.3
López	2002	0.15 a 0.42	0.35 a 1.0	0.984 a 2.78
Montes	2006	0.04572 a 3.048	0.108 a 7.2	0.3 a 20
Pinzón	2007	0.18 a 0.27	0.36 a 0.54	1.0 a 1.5
Amit et al.	2014	2.00	-----	-----
Hojjat et al.	2014	-----	0.06 a 1.44	-----
Khairul et al.	2016	1.00 a 10.0	2.4 a 24.0	6.66 a 66.66
Romero	2017	-----	0.033 a 50	0.0917 a 138.9

Capítulo 2 Descripción y calibración del equipo

2.1 Características del consolidómetro neumático

La primera investigación que permitió estudiar el comportamiento de la compresibilidad de suelos finos bajo deformaciones controladas se realizó en una cámara triaxial de compresión (Crawford *et al.*, 1959). El equipo de prueba se complementó con un dispositivo que permitía controlar la variable de la tasa de deformación. Años después, la constante transformación en la ingeniería dio origen a la Celda Rowe (Rowe *et al.*, 1966) por lo que representó grandes ventajas con respecto a su principal antecesor, el consolidómetro de palanca.

El laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería, UNAM, cuenta con un consolidómetro neumático (Figura 2.1) que permite aplicar carga bajo condiciones de deformación o de esfuerzo controlado a una muestra de suelo en el interior de un domo metálico. El espécimen de suelo se resguarda dentro de un anillo fijo de diámetro interior de 6.35 cm y una altura de 2.54 cm que, a su vez, en la parte superior como la parte inferior se encuentra en contacto con piedras porosas. La aplicación de presiones se realiza cuando el domo sella herméticamente a la muestra y se ejecuta por dos medios; aceite e interfaz agua-aire. La aplicación del esfuerzo axial se realiza presurizando el aceite suministrado al domo con lo que se permite desplazar el plato de compresión en dirección vertical hacia abajo. Simultáneamente, la contrapresión se aplica mediante agua presurizada proveniente de la interfaz agua-aire y se suministra en la parte inferior de la muestra. El consolidómetro cuenta con transductores, reguladores, válvulas solenoides y un sistema muy detallado de conexión de línea que lo convierte en un equipo automatizado para el registro y aplicación de datos de interés durante el ensayo.



Figura 2.1 Consolidómetro neumático

La interfaz de operación entre el usuario y las variables (presiones y deformaciones), se presentan mediante el lenguaje de programación LabVIEW[®]. Este software de ingeniería se programa por medio de un diagrama de bloques que habitualmente está conformado por controles (sirven de entrada para los datos), funciones y estructuras (realizan una o varias operaciones con los datos) e indicadores (sirven de salida para los datos), (Lajara *et al.*, 2011). Este proceso permite al usuario hacer intervenciones de corto tiempo durante las pruebas de laboratorio.

2.2 Centro de control de procesos

La instrumentación y control, como especialidad de ingeniería, es aquella parte de la ingeniería que es responsable de definir el nivel de automatización de cualquier planta de proceso, la instrumentación de equipos y el sistema de control para un buen funcionamiento del mismo, dentro de la seguridad para el usuario y el medio de trabajo, con pertinencia en la calidad de los resultados (GEEEC, 2018).

La instrumentación y control aplicado a los equipos de laboratorio permite:

- Capturar las variables de los procesos
- Analizar las variables de los procesos
- Modificar las variables de los procesos
- Controlar los procesos
- Traducir los procesos a unidades de ingeniería

Los anteriores conceptos se aplican directamente a la instrumentación y automatización que cuenta el consolidómetro neumático, lo que se traduce como dos interfaces de conexión para el usuario: módulo de calibración y módulo de operación.

2.2.1 Módulo de calibración

El usuario debe abrir la interfaz de calibración (Figura 2.2) que permite realizar diferentes actividades, siendo las principales *Calibrar Sensores*, *Cambiar Constantes de Sensores* y *Verificar Constantes de Calibración*.



Figura 2.2 Módulo de calibración



Figura 2.3 Selección de sensor para la calibración

En la sección de Calibrar Sensores muestra una lista desplegable de los seis sensores que cuenta el consolidómetro: presión axial, esfuerzo axial, presión de poro, contrapresión, presión de línea y desplazamiento (Figura 2.3). Al seleccionar un sensor, éste resguarda información referente a los parámetros de calibración (pendiente y ordenada) con las que opera el equipo y la fecha de la última calibración que se realizó (Figura 2.4).



Figura 2.4 Parámetros de calibración del sensor de presión de poro

Después de seleccionar un transductor, la interfaz de la programación LabVIEW® permite visualizar tres secciones que conforman la calibración de los sensores. En la sección 1 se tiene el regulador de presión axial y el de contrapresión. El primer regulador permite calibrar los sensores de presión axial y de esfuerzo axial, por otra parte, el segundo regulador se emplea para los sensores de presión de línea (presión de confinamiento) y contrapresión. Se hace hincapié que la calibración del sensor de presión de poro se realiza mediante un regulador manual el cual no tiene físicamente el equipo, pero se puede emplear de algún equipo externo. La sección 2 es el apartado donde se digita el indicador que corresponde a la altura de la columna de mercurio, posteriormente ese indicador se convierte de forma automática a presión en kg/cm^2 y su respectivo valor en voltaje se indica en la parte inferior. Finalmente, la sección 3 es el área donde se grafica la curva de calibración, siendo el eje de las abscisas para el valor del voltaje y el eje de las ordenadas para la magnitud de la variable de interés (presión o desplazamiento).



Figura 2.5 Parámetros de calibración del sensor de presión de poro

2.2.2 Módulo de operación

El módulo de operación es el control directo que el usuario tiene para diseñar el método de ensayo que se ejecutará en el consolidómetro. Éste se conforma por 9 elementos que en conjunto permiten realizar ensayos de carga incremental y a velocidad controlada (Figura 2.6), los cuales se indican a continuación:

1. Datos del suelo
2. Configuración de la prueba
3. Saturación
4. B de Skempton
5. Ensaye
6. Relaciones volumétricas finales
7. Reportes
8. Diseño de vectores
9. Manual

El ordenamiento de las ventanas no implica que sea la secuencia con la que se opera los ensayos experimentales. Hay procesos que se tienen que hacer de forma previa y otros que se vuelven a rectificar durante la ejecución de una prueba.



Figura 2.6 Módulo de operación del consolidómetro neumático

1. Datos del suelo.

Este apartado se indica la dirección en la memoria del computador donde se guardará la información del ensayo (Figura 2.7). En la ventana *Generales*, se agrega la reseña que corresponde al nombre y ubicación del proyecto, número de sondeo y muestra, profundidad y operador. Las características geométricas de la probeta y propiedades índices iniciales (densidad relativa de sólidos y contenido de humedad) se almacenan en la sección de *Datos Prueba*. De acuerdo con la información previamente registrada, el usuario puede visualizar las relaciones volumétricas iniciales.

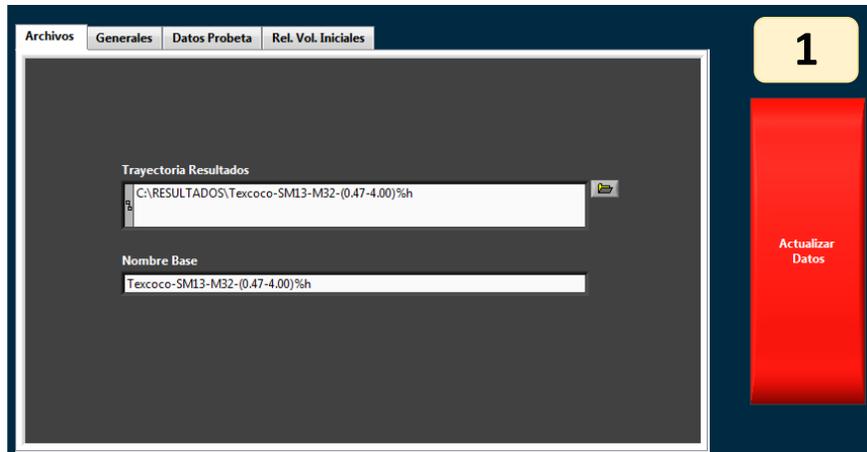


Figura 2.7 Módulo de operación (Datos del suelo)

2. Configuración de la prueba CI.

→ Prueba de carga incremental

El vector de carga se configura con base a puntos discretizados que, graficados de forma continua construyen la curva de compresibilidad (Figura 2.8 - 2b). Como actividad previa, el usuario debe de diseñar un vector de tiempo por etapa que generalmente contempla un periodo de tiempo de 72 horas.

→ Prueba de velocidad de deformación constante CRS

La asignación del vector de velocidad se realiza en esta ventana (Figura 2.8 - 2a). Este vector está diseñado por etapas que intervienen en la curva de compresibilidad volumétrica (carga, descarga, recarga y descarga), donde se puede modificar el nivel de esfuerzos que se desea alcanzar para cada una, así como su respectiva velocidad de deformación constante en mm/min.

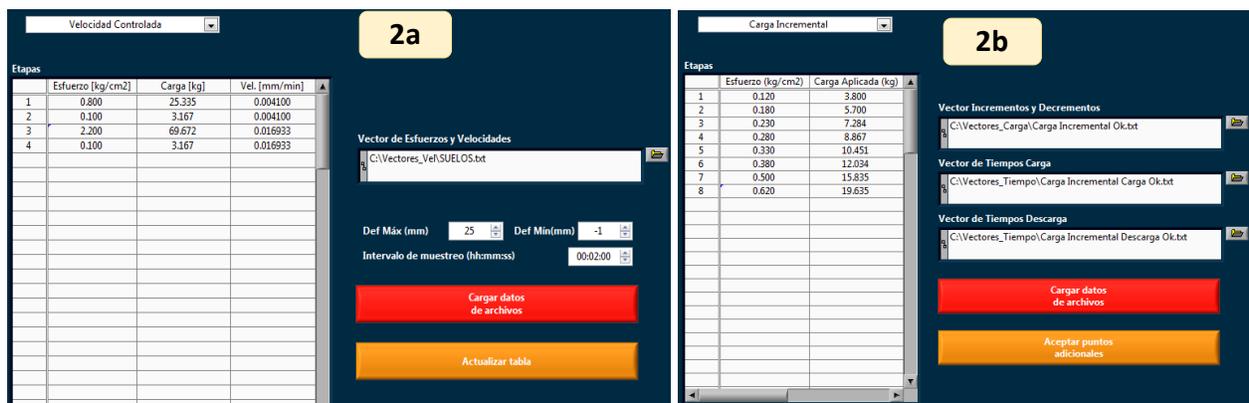


Figura 2.8 Módulo de operación (Configuración de prueba)

3. Saturación.

La etapa de saturación permite aplicar incrementos de esfuerzo axial y de contrapresión. En la parte derecha de la interfaz se muestra un panel con las lecturas de los sensores y sus respectivas variaciones cuando se aplican las presiones (Figura 2.9 - 3a) y de forma gráfica se puede visualizar en la parte inferior, lo cual permite al usuario monitorear en tiempo real la oscilación entre cada incremento (Figura 2.9 - 3b).



Figura 2.9 Módulo de operación (Saturación)

4. B de Skempton.

Por medio del regulador de *Esfuerzo axial*, la interfaz de *B de Skempton* permite aplicar un incremento en la presión axial que da como resultado un exceso de presión de poro requerido para verificar si la muestra se encuentra saturada. En la Figura 2.10 - 4a se grafica la presión de poro que se obtiene al suministrar el incremento de esfuerzo, además, de manera automática se obtiene el valor de *B de Skempton* como se presenta en la Figura 2.10 - 4b. Sin embargo, se hace énfasis que en la prueba de carga incremental este parámetro se debe de medir en forma manual debido a que la válvula no aplica el incremento axial.

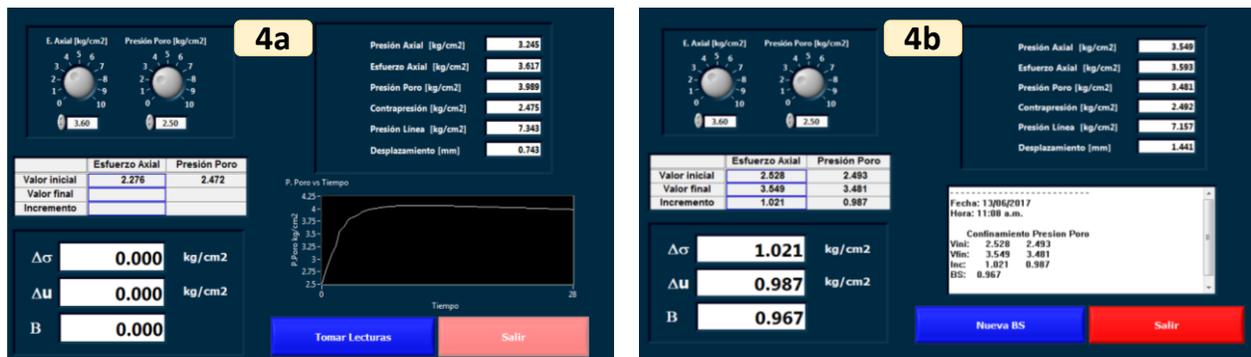


Figura 2.10 Módulo de operación (B de Skempton)

5. Ensaye.

→ Prueba de carga incremental

La interfaz de operación en el apartado de *Ensaye* permite monitorear los esfuerzos y deformaciones que se están aplicando en tiempo real. De acuerdo con el vector de carga asignado, se grafican las curvas de consolidación de *Casagrande* y *Taylor* (Figura 2.11 - 5a). También, el usuario dispone de dos formas para concluir una etapa e iniciar la siguiente; asignando un vector de tiempo específico o finalizando en forma manual.

Por otra parte, en la ventana subsecuente de *Compresibilidad* (Figura 2.12 - 5b) se grafican los esfuerzos aplicados en cada etapa. Conforme se desarrolla el ensaye, en la parte inferior se almacena un resumen que contiene información de la deformación lineal y volumétrica, variación de la relación de vacíos, volumen final y cambio volumétrico por etapa.

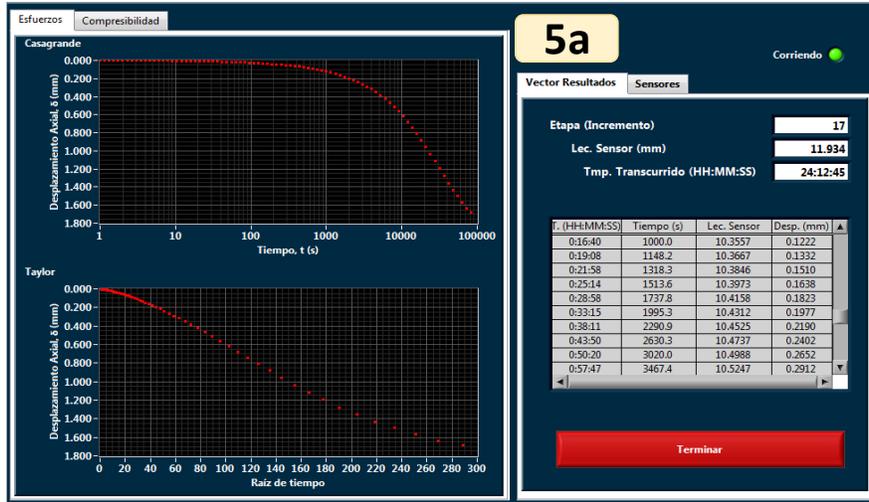


Figura 2.11 Módulo de operación (Curvas de consolidación en Ensayes)



Figura 2.12 Módulo de operación (curva de compresibilidad de Carga Incremental en Ensayes)

→ Prueba de velocidad de deformación constante CRS

Iniciar un ensaye CRS sólo requiere que se haya asignado correctamente el vector de velocidad de deformación. Al dar clic en el área de *Iniciar Prueba* (Figura 2.13 - 5c) de forma automática se realiza un registro del tiempo y las correspondientes lecturas de desplazamientos y presiones. Las anteriores variables se presentan en el área del gráfico derecho a escala natural.

Una de las ventajas de la configuración del programa para los ensayes CRS es la adquisición de datos que permite graficar de manera continua la curva de compresibilidad volumétrica (Figura 2.14 - 5d). Lo anterior otorga al usuario la posibilidad de redefinir el nivel de esfuerzos que considere conveniente alcanzar para cada etapa.

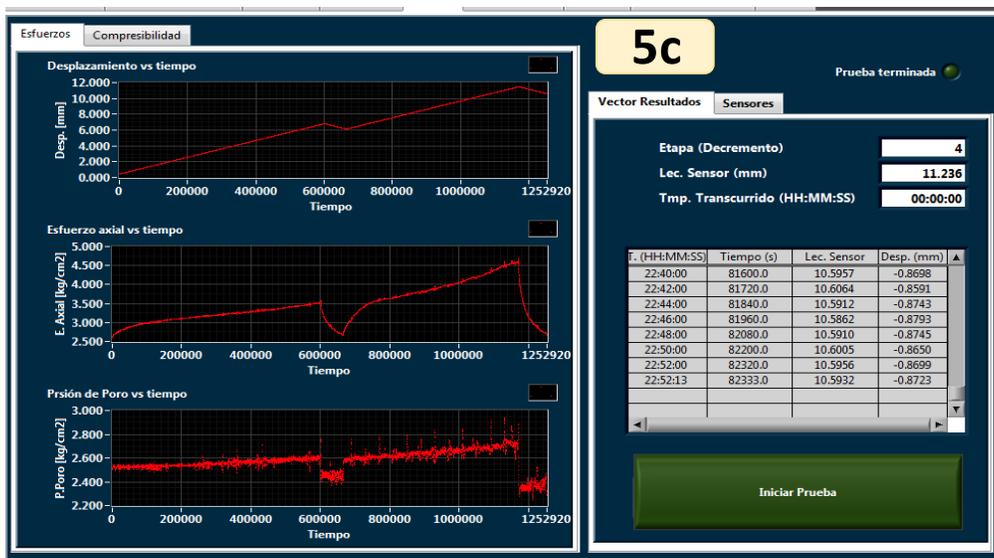


Figura 2.13 Módulo de operación (curva de desplazamiento y presiones vs tiempo en Ensayes)

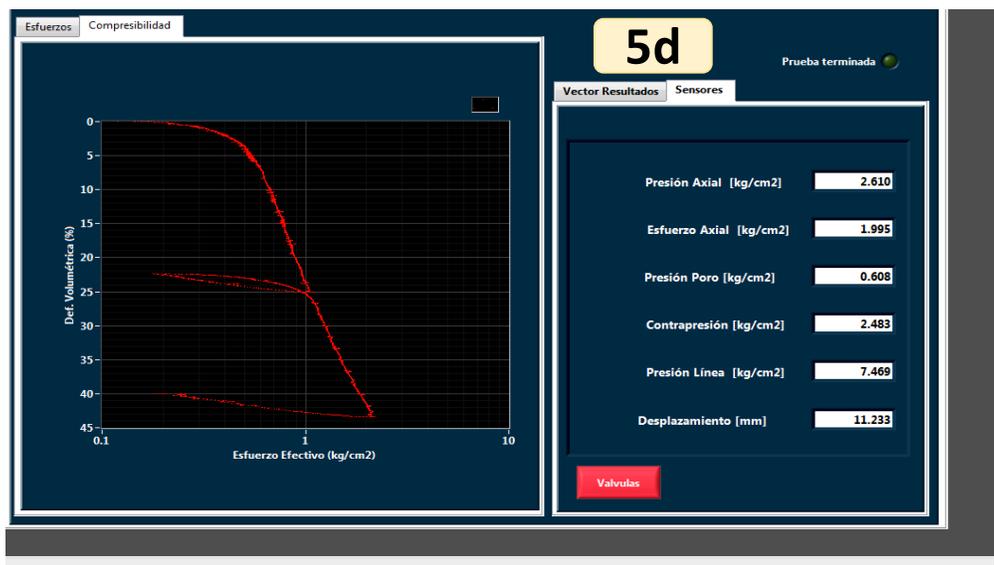


Figura 2.14 Módulo de operación (curva de compresibilidad para prueba CRS en Ensayes)

6. Relaciones volumétricas finales.

En este módulo el usuario debe de calcular el contenido de agua final de la muestra e introducir la información en la sección correspondiente (Figura 2.15). Con base en la información anterior y a las propiedades índices iniciales, el programa calcula las relaciones volumétricas finales.



Figura 2.15 Módulo de operación (Relaciones volumétricas finales)

7. Reportes

El usuario puede seleccionar una etapa de un ensayo de carga incremental y visualizarlo en cualquier momento. La información que se presenta en este apartado se enfoca en mostrar las curvas de consolidación de *Casagrande* y de *Taylor*, así como las respectivas lecturas de tiempo, desplazamiento y presión de poro (Figura 2.16).

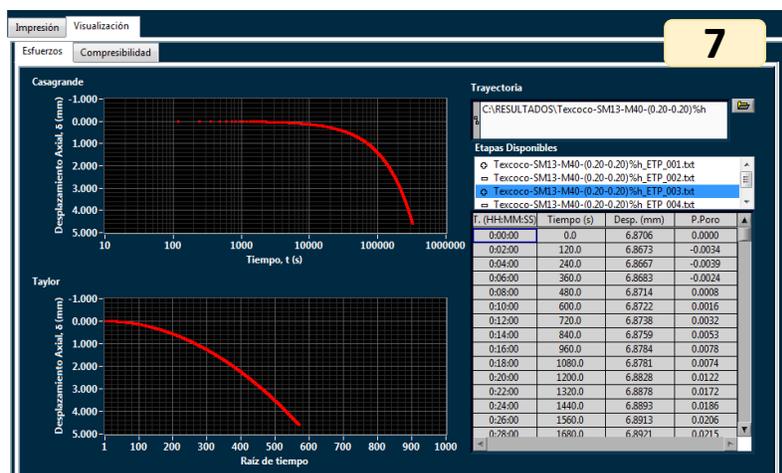


Figura 2.16 Módulo de operación (Reportes)

8. Diseño de vectores

Existen dos tipos de vectores que se pueden diseñar en este apartado. El vector de tiempo para las pruebas de carga incremental considera un lapso de tiempo que generalmente son 72 horas y las discretiza en intervalos de frecuencia en que los sensores de presiones y de deformación registraran las correspondientes lecturas (Figura 2.17). Para los ensayos de CRS el usuario indica el intervalo de periodicidad, en minutos, para la toma de lectura de los sensores que, a diferencia del primer vector, este tiende a finalizar una vez que se haya alcanzado el esfuerzo efectivo de la etapa en curso (Figura 2.8 - 2a).

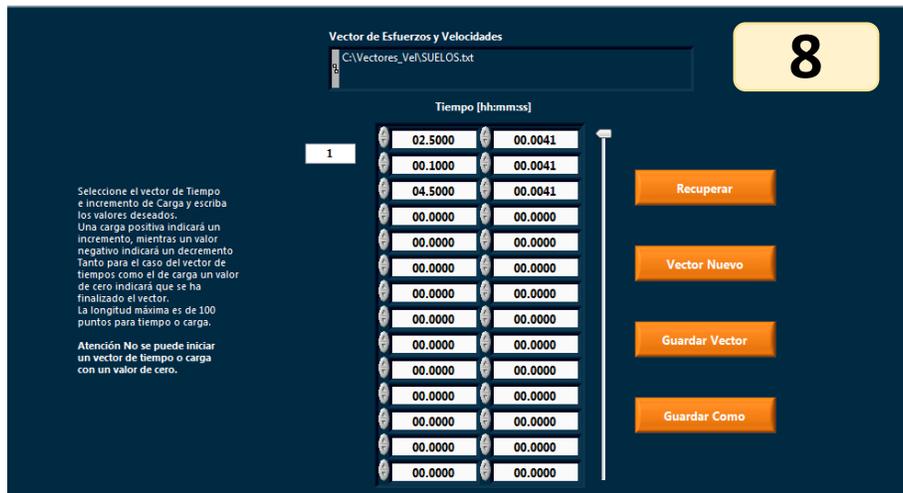


Figura 2.17 Módulo de operación (Diseño de vectores)

El vector de carga para los ensayos de carga incremental, el usuario indica el valor de esfuerzo que desea aplicar a la muestra. Para el caso de las pruebas CRS el vector de carga representa el nivel de esfuerzos que alcanzará la muestra bajo una velocidad de deformación constante.

9. Manual

La configuración LabVIEW® muestra en este apartado la magnitud de presión y desplazamiento en tiempo real los sensores (Figura 2.18). Este apartado resulta de mucho interés ya que se emplea en la etapa de medición de *B de Skempton Manual* (para los ensayos de carga incremental) y en la *Verificación de los Sensores*.



Figura 2.18 Módulo de operación (Manual)

2.3 Calibración y verificación de sensores

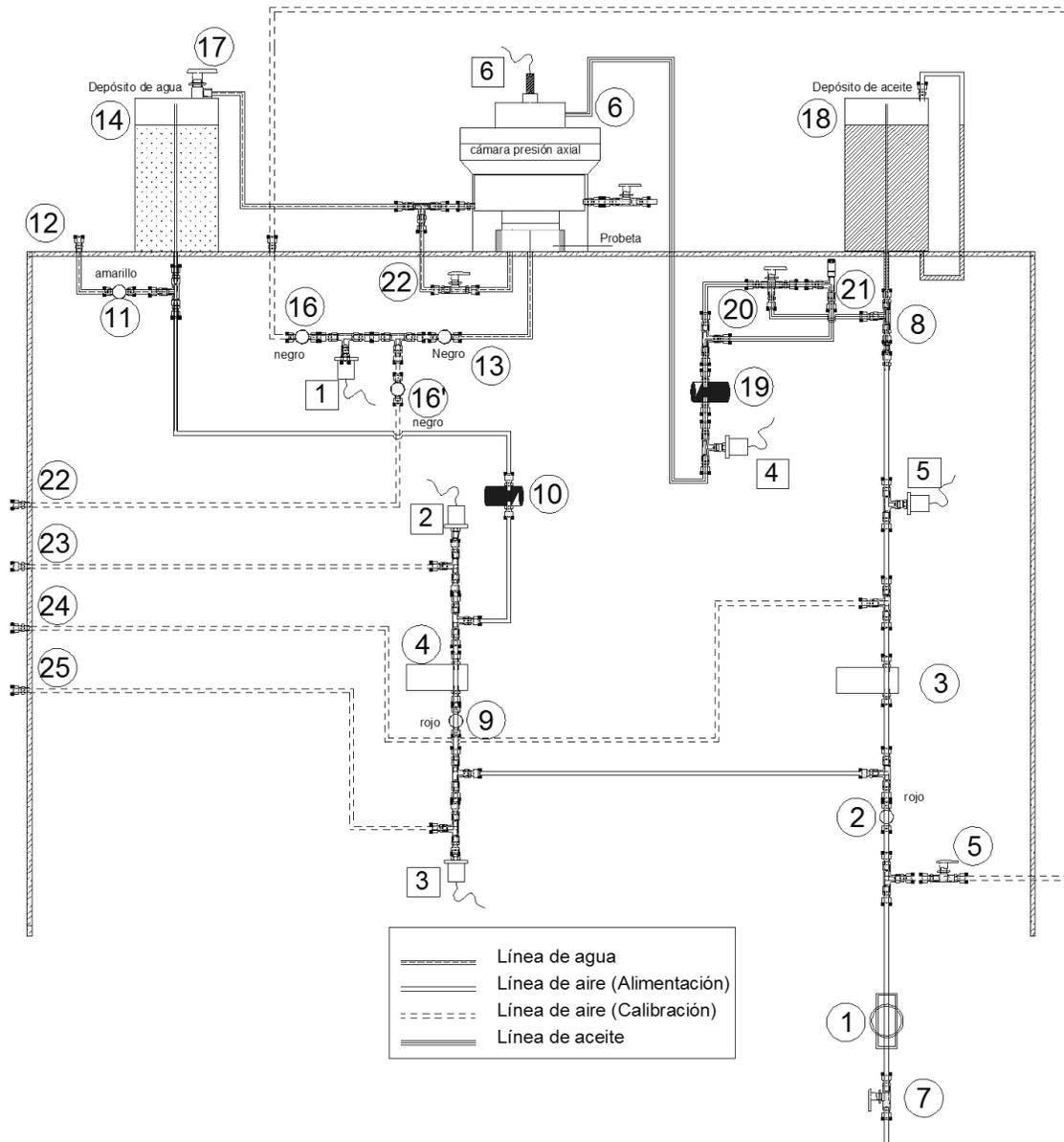
El consolidómetro neumático tiene seis sensores que se distribuyen dentro del equipo de forma conveniente para el registro de las lecturas en los ensayos (Figura 2.19). A continuación se describe de forma general su función y su medio de alimentación.

Tabla 2.1 Descripción general de sensores del consolidómetro neumático

Tipo de sensor	Descripción
1 Presión de poro	Se encuentra debajo de la línea que conecta a la piedra porosa inferior. Su función principal es medir la presión de agua que recibe la muestra en la base en sus diferentes etapas; <i>medición de B de Skempton y Ensaye</i> .
2 Contrapresión	Se localiza en la parte inferior del depósito de agua. Su función principal es medir la presión que suministra el regulador de contrapresión con la intención de presurizar el depósito de agua mediante aire para que este se emplee en las diferentes etapas; <i>Saturación y Ensaye (ayuda a estabilizar a la muestra para que los esfuerzos sean efectivos)</i> .
3 Presión de línea	La presión de línea llega directamente a este sensor. Su función fundamental es verificar la presión de confinamiento (en aire) disponible que se puede suministrar a los reguladores axial y de contrapresión para que se ejecute el ensayo.
4 Presión axial	El sensor se localiza antes de llegar al depósito de aceite. Se emplea para medir la presión de aire que envía el regulador axial con la intención de presurizar al depósito de aceite para dar paso a las diferentes etapas; <i>Saturación, medición de B Skempton y Ensaye</i> .
5 Esfuerzo axial	Se localiza después de llegar al depósito de aceite. Se utiliza para medir la presión (aceite presurizado) que proviene del respectivo depósito y se dirige hacia el domo del equipo para dar inicio a las diferentes etapas; <i>Saturación, medición de B de Skempton y Ensaye</i> .
6 Desplazamiento	Se ubica en la parte superior del domo. Se emplea para medir las expansiones y compresión que sufre la muestra de suelo desde que se da inicio en la etapa de <i>Saturación</i> y que concluye en el <i>Ensaye</i> .

El proceso de calibración de los sensores consiste en observar el comportamiento de la variable de interés (esfuerzos o desplazamientos) con relación a la respuesta del voltaje cuando se aplican pequeños incrementos de presiones o desplazamientos.

Cada sensor se calibra en pequeños incrementos de las variables a estudiar cuando menos al 80% de la capacidad total, o en su defecto, se debe realizar por encima de los valores máximos empleados en la ejecución del ensayo. Los datos experimentales se grafican en un sistema coordenado; voltaje en las abscisas y esfuerzos o deformaciones en el eje de las ordenadas.



- | | | |
|--|--|---|
| ① Trampa de aire | ⑫ Manguera para purga de agua | ⑳ Calibración de Presión de Poro |
| ② Válvula de aguja (presión de línea) | ⑬ Válvula de aguja (equalizador) | ㉑ Calibración de Contrapresión |
| ③ Regulador de presión axial | ⑭ Interfaz agua - aire | ㉒ Calibración de Presión Axial |
| ④ Regulador de contrapresión | ⑮ Línea de llenado de agua del domo | ㉓ Calibración de Presión de Línea |
| ⑤ Llave de paso para presión al trasductor de P. de poro | ⑯ Válvula de aguja para calibrar el trasductor de P. de poro | ㉔ Switch de mando (manual/computer) |
| ⑥ Suministro de presión axial al domo con aceite | ⑰ Alimentación de agua al domo | ① Trasdutor de presión de poro |
| ⑦ Llave de paso de línea de alimentación | ⑱ Interfaz aceite - aire | ② Trasdutor de contrapresión |
| ⑧ Trampa para suministrar aire al depósito de aceite | ⑲ Válvula check (presión axial) | ③ Trasdutor de presión de línea (confinamiento) |
| ⑨ Válvula de aguja (contrapresión) | ⑳ Válvula de tres vías (para elegir la velocidad de carga) | ④ Trasdutor de esfuerzo axial (aceite) |
| ⑩ Válvula check (contrapresión) | ㉑ Regulador de velocidad | ⑤ Trasdutor de presión axial (aire) |
| ⑪ Válvula de aguja (purga) | ㉒ Válvula de paso para medir presión de poro | ⑥ Trasdutor de desplazamiento |

Figura 2.19 Diagrama de la instrumentación de sensores del equipo

2.3.1 Sensores de presión

Para realizar la calibración de un sensor de presión se debe de considerar los elementos que intervienen directamente en el proceso; aplicación de la presión con un regulador al sensor en estudio (digital o manual) y realizar en forma conveniente las conexiones que dan salida para la lectura del elemento patrón (columna de mercurio). Es importante señalar que para la calibración como para la verificación de los sensores de presión se empleó el regulador manual que está en la celda Rowe, debido a que el propio consolidómetro neumático no cuenta con uno.

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la calibración del sensor de presión de poro. Con base al diagrama de distribución de los sensores del equipo (Figura 2.19) se conectó una manguera en la salida 22 con dirección a la columna de mercurio como se muestra en la Figura 2.20. Se aislaron las válvulas manuales 2 y 13, consecuentemente se abrieron las válvulas 5, 16 y 16'.



Figura 2.20 Conexión de salida hacia la columna de mercurio

Del módulo de operación se selecciona el sensor que corresponde al de presión de poro. En la interfaz se presenta los parámetros actuales con los cuales opera el equipo, así como la fecha de la última calibración realizada (Figura 2.21).

Transductor	Presión de Poro		Continuar	
Datos de la última calibración				
Fecha de Calibración	jueves, 04 de junio de 2015			
Pendiente	0.705	Ordenada		-0.002
Parámetros del patrón				
Unidades	kg/cm ²			
Pendiente	0.01356	Ordenada	0.00000	

Figura 2.21 Parámetros previos a la calibración del sensor de presión de poro

Se aplicaron 10 incrementos de aproximadamente 0.50 kg/cm² para la calibración. Al suministrar la presión al sensor se obtiene una respuesta de voltaje que, de forma consecutiva construyen una pendiente que representa la curva de calibración (Figura 2.22).

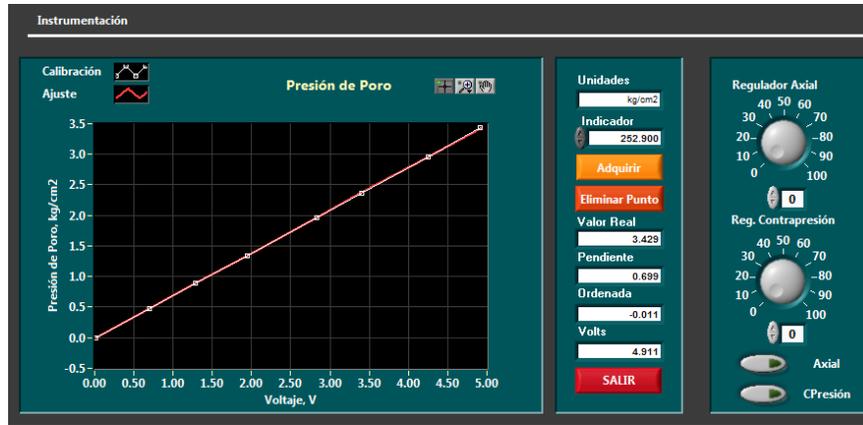


Figura 2.22 Calibración del sensor de presión de poro (Módulo de calibración)

En la Tabla 2.2 se presentan los valores de presión aplicados al transductor. La curva de calibración y la pendiente se presentan en la Figura 2.23, con un nivel de ajustes de las lecturas de $R^2=1$.

Tabla 2.2 Registro de presiones para la calibración del sensor de presión de poro

PRESIÓN DE PORO	
Voltaje V volts	Presión P kg/cm ²
0.009	0.000
0.695	0.475
1.285	0.887
1.942	1.348
2.826	1.962
3.409	2.369
4.251	2.963
4.912	3.429
5.663	3.958
6.267	4.387
7.067	4.954

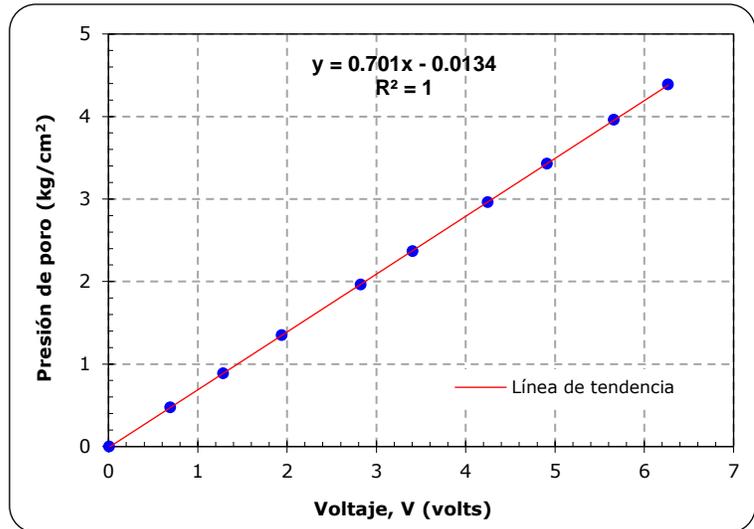


Figura 2.23 Curva de calibración del sensor de presión de poro

La verificación consiste en medir para una presión dada, la lectura que registra el sensor y la que se obtiene en el elemento patrón. Por lo tanto, si el funcionamiento del sensor es correcto debe existir una linealidad entre las lecturas de ambos elementos. Este proceso inicia aplicando aproximadamente un incremento de 0.50 kg/cm² mediante el regulador manual, por consiguiente, se registra la lectura de la columna de mercurio cuando se haya estabilizado y en forma paralela se toma la lectura del sensor en el módulo de operación en la ventana *Manual*. El rango de los incrementos para realizar la verificación debe ser de al menos el mismo valor en el que se realizó en la etapa de calibración, para este caso, el sensor de presión de poro se tomó de referencia una presión de 5.0 kg/cm².

Los valores obtenidos de la verificación y la correspondiente curva se presentan en la Tabla 2.3 y Figura 2.24, respectivamente.

Tabla 2.3 Registro de presiones para la verificación del sensor de presión de poro

PRESIÓN DE PORO	
Presión patrón Pp kg/cm ²	Presión sensor Ps kg/cm ²
0.000	-0.008
0.504	0.503
0.911	0.909
1.356	1.355
1.972	1.977
2.399	2.406
2.986	2.991
3.387	3.390
3.950	3.951
4.355	4.351
4.934	4.927

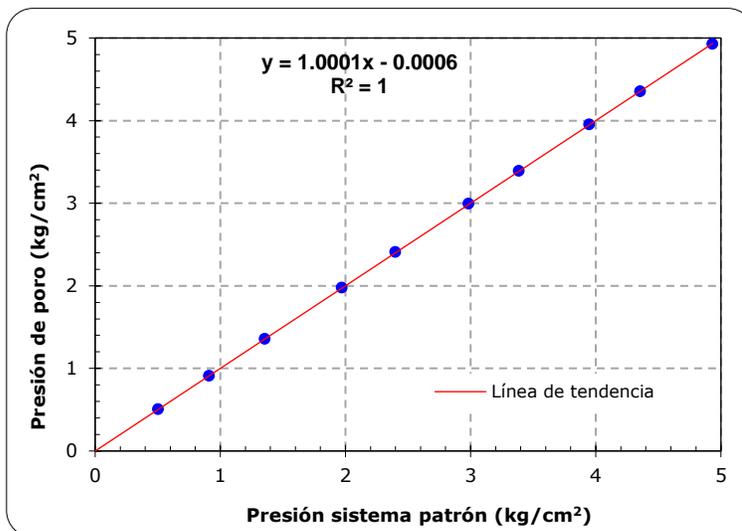


Figura 2.24 Curva de verificación del sensor de presión de poro

Con el registro de la Tabla 2.3 se selecciona la diferencia mayor entre la lectura del elemento patrón y la obtenida en el sensor (en valor absoluto) y se multiplica por 100, es decir, con este operación se estima la precisión parcial con la que opera el sensor.

Tabla 2.4 Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión de poro

PRESIÓN DE PORO					
Presión patrón Pp kg/cm ²	Presión sensor Ps kg/cm ²	Precisión Pp-Ps kg/cm ²	Error parcial $\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{P_{patrón}}$ (%)	Error total $\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{Cap_sensor}$ (%)	Tolerancia $\frac{ Dif\ mayor \times 100}{P_{patrón}}$ (%)
0.000	-0.008	0.008	---	---	---
0.504	0.503	0.001	0.284	0.020	1.586
0.911	0.909	0.002	0.245	0.032	0.878
1.356	1.355	0.001	0.074	0.014	0.590
1.972	1.977	0.005	0.273	0.076	0.406
2.399	2.406	0.007	0.302	0.103	0.334
2.986	2.991	0.005	0.170	0.072	0.268
3.387	3.390	0.003	0.080	0.039	0.236
3.950	3.951	0.001	0.025	0.014	0.203
4.355	4.351	0.004	0.103	0.064	0.184
4.934	4.927	0.007	0.152	0.106	0.162

La precisión de medición que tiene el sensor de presión de poro es de 0.008 kg/cm² como se muestra en la Tabla 2.4. De igual forma, se permite graficar las curvas del porcentaje de error parcial y total de acuerdo al registro en la etapa de verificación del sensor como se presenta en las Figuras 2.25 y 2.26. Cabe señalar

que el error total se determina con respecto a la capacidad total del sensor, en el caso de los 5 sensores de presión que cuenta el consolidómetro se toma el valor de 7.0307 kg/cm².

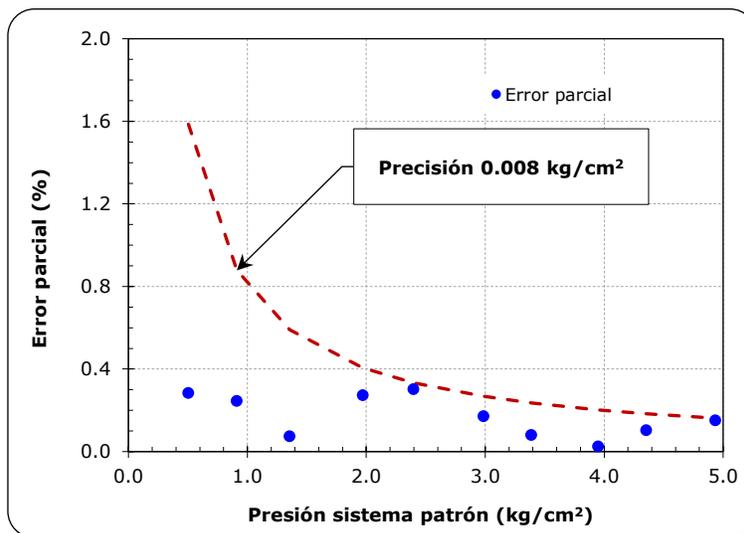


Figura 2.25 Curva de error parcial del sensor de presión de poro

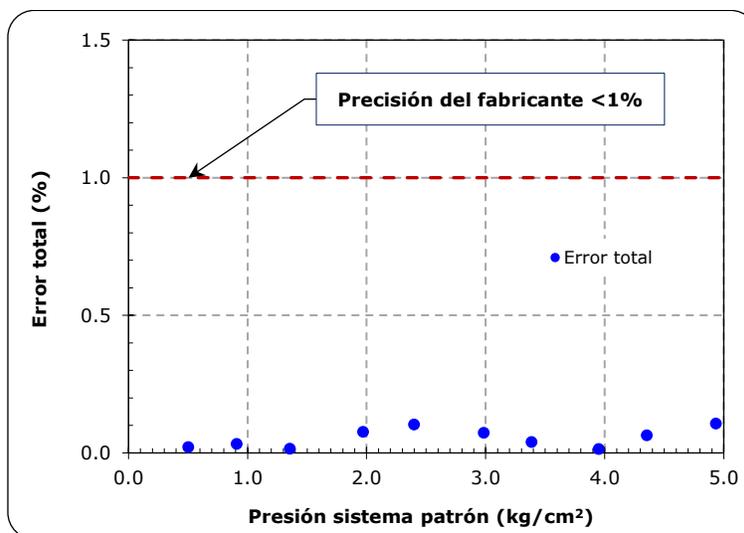


Figura 2.26 Curva de error total del sensor de presión de poro

2.3.2 Sensor de desplazamiento

La calibración del sensor de desplazamiento requiere como elemento patrón el uso de un tornillo micrométrico. El transductor de desplazamiento se fija en dirección longitudinal sobre el plano, en este proceso se debe evitar el pandeo del vástago del sensor que pueda generar desplazamiento con cierto grado de inclinación. Calibrar este sensor requiere aplicar incrementos de desplazamientos mediante el tornillo micrométrico y observar la respuesta del voltaje del sensor. La curva de calibración en el módulo se presenta en la Figura 2.27.

El rango de desplazamiento que se empleó para la calibración fue de 0 a 32 mm, aproximadamente (Tabla 2.5). Los parámetros de calibración se presentan en la curva de la Figura 2.28.



Figura 2.27 Calibración del sensor de desplazamiento (Módulo de calibración)

Tabla 2.5 Registro de desplazamiento para la calibración del sensor de desplazamiento

DESPLAZAMIENTO	
Voltaje V volts	Desplazamiento δ mm
0.121	0.0
0.520	2.0
0.923	4.0
1.317	6.0
1.716	8.0
2.116	10.0
2.506	12.0
2.887	14.0
3.273	16.0
3.657	18.0
4.030	20.0
4.406	22.0
4.783	24.0
5.154	26.0
5.509	28.0
5.856	30.00
6.190	32.00

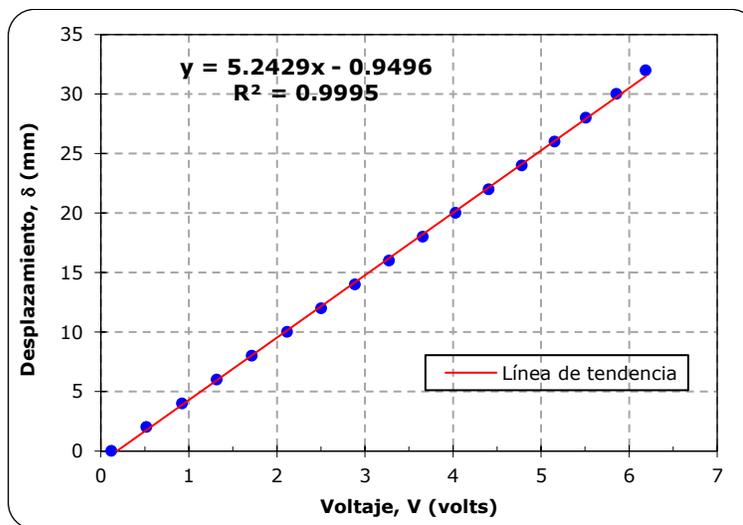


Figura 2.28 Curva de calibración del sensor de desplazamiento

El proceso de verificación del sensor consiste en medir para un desplazamiento aplicado, la lectura que registra el transductor y la que se obtiene en el elemento patrón. Este proceso inicia aplicando incrementos de desplazamiento de aproximadamente 4 mm mediante el tornillo micrométrico, por consiguiente, se registra la lectura que marca la carátula del tornillo y la que se registra el sensor en el módulo de operación en la ventana *Manual*.

La verificación del sensor se realizó para un desplazamiento máximo de 32 mm, como se observa en la *Tabla 2.6* y la curva de calibración obtenida con sus respectivos parámetros que se presentan en la *Figura 2.29*.

Tabla 2.6 Registro de desplazamiento para la verificación del sensor de desplazamiento

DESPLAZAMIENTO	
Desplazamiento patrón δ_p mm	Desplazamiento sensor δ_s mm
0.000	0.006
4.008	4.021
8.343	8.362
12.001	12.029
16.001	16.018
20.003	20.054
24.000	24.038
28.000	28.028
32.002	32.025

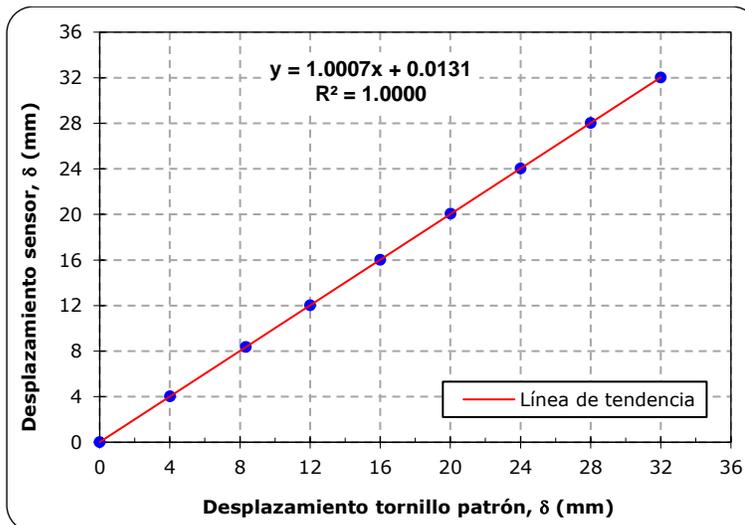


Figura 2.29 Curva de verificación del sensor de desplazamiento

De acuerdo con los valores obtenidos del proceso de verificación se determinó la precisión del transductor de desplazamiento, en la Tabla 2.7 se presentan los respectivos cálculos.

Tabla 2.7 Registro de desplazamientos para determinar la precisión del sensor de desplazamiento

DESPLAZAMIENTO					
Presión patrón δ_p mm	Presión sensor δ_s mm	Precisión $ \delta_p - \delta_s $ mm	Error parcial $\frac{ \delta_{patrón} - \delta_{sensor} \times 100}{\delta_{patrón}}$ (%)	Error total $\frac{ \delta_{patrón} - \delta_{sensor} \times 100}{Cap_{sensor}}$ (%)	Tolerancia $\frac{ Dif_{mayor} \times 100}{\delta_{patrón}}$ (%)
0.000	0.006	0.006	---	---	---
4.008	4.021	0.013	0.324	0.051	1.272
8.343	8.362	0.019	0.228	0.075	0.611
12.001	12.029	0.028	0.233	0.110	0.425
16.001	16.018	0.017	0.106	0.067	0.319
20.003	20.054	0.051	0.255	0.201	0.255
24.000	24.038	0.038	0.158	0.150	0.212
28.000	28.028	0.028	0.100	0.110	0.182
32.002	32.025	0.023	0.072	0.091	0.159

La precisión con la que opera el transductor de desplazamiento es 0.051 mm, este valor representa la dispersión máxima obtenida entre la lectura del transductor y la del elemento patrón (Tabla 2.7). Consecuentemente, con los parámetros obtenidos en la Tabla 2.7 se graficaron las curvas de error parcial y que considera las precisiones obtenidas por el elemento patrón y la capacidad del sensor, respectivamente (Figuras 2.30 y 2.31).

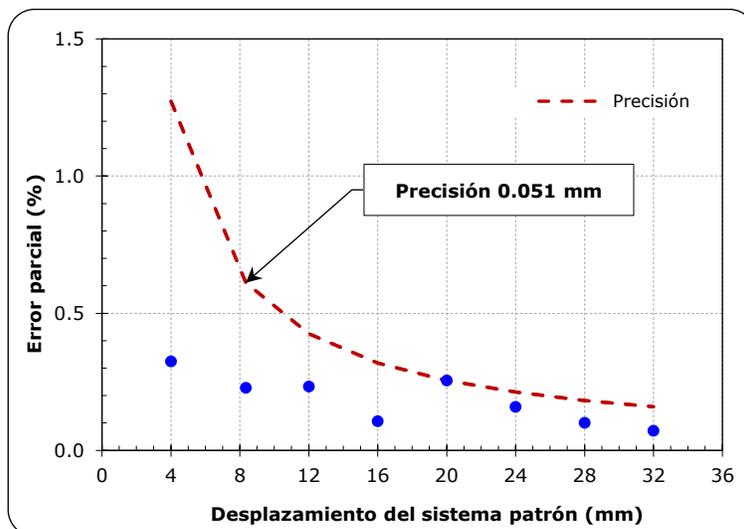


Figura 2.30 Curva de precisión del sensor de desplazamiento

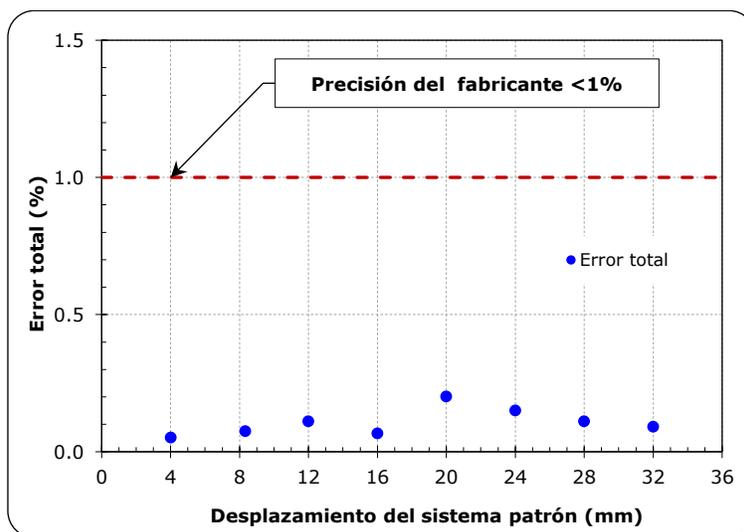


Figura 2.31 Curva de precisión del sensor de desplazamiento

Los parámetros de calibración y verificación de los seis sensores del consolidómetro, así como las características de marca y modelo se presentan en el resumen de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Resumen de los parámetros de calibración y verificación de los sensores

Sensor	Marca	Modelo	Rango de medición	Constantes de calibración		Constantes de verificación		Precisión
			<i>mm o kg/cm²</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>mm o kg/cm²</i>
Desplazamiento	Schaevitz sensors	1000 HR	± 25.4	5.2429	-0.9496	1.0007	0.0131	0.0510
Presión de poro	Measurement Specialties	MSP-300-100-P-2-N-1	7.0307	0.7010	-0.0134	1.0001	-0.0006	0.0080
Contrapresión	Measurement Specialties	MSP-300-100-P-2-N-1	7.0307	0.7071	-0.0192	0.9999	0.0000	0.0083
Presión de línea	Measurement Specialties	MSP-300-100-P-2-N-1	7.0307	0.7018	3.4880	0.9998	-0.0033	0.0122
Presión axial	Measurement Specialties	MSP-300-100-P-2-N-1	7.0307	0.7058	-0.0092	0.9981	0.0012	0.0110
Esfuerzo axial	Measurement Specialties	MSP-300-100-P-2-N-1	7.0307	0.7079	-0.0314	1.0015	-0.0081	0.0110

2.3.3 Verificación cruzada

La verificación cruzada se realiza a los sensores que tienen la capacidad de medir la misma variable, por ejemplo, el sensor de presión de poro con respecto al sensor de contrapresión. En este contexto, este tipo de verificación tiene por objeto contrastar entre cada uno la magnitud que se registra en ellos cuando se someten a una misma presión. Los transductores que se verificaron en forma cruzada fueron los 5 de presión que se enlistan en la Tabla 2.8.

Este procedimiento se realizó considerando que la conexión dentro del consolidómetro neumático permitiera aplicar la presión de línea a todos los sensores de manera simultánea. Además, fue necesario apoyarse del módulo de operación del equipo y del regulador de la celda Rowe. Para iniciar esta etapa se fijó en cero la presión mediante el regulador manual y, posteriormente, se dejaron abiertas las válvulas de confinamiento y axial a una presión de 5 kg/cm² (Figura 2.32) para permitir el paso de la presión aplicada.

Los incrementos de presión se realizaron cada 0.50 kg/cm², aproximadamente y para cada aplicación se tomó lectura de la presión que registró cada sensor en forma simultánea. La Tabla 2.9 presenta el resumen del elemento patrón y de la presión en cada sensor.



Figura 2.32 Módulo de operación (verificación cruzada)

Tabla 2.9 Registro de presiones de la verificación cruzada de los transductores

REVISIÓN CRUZADA DE SENSORES					
Presión patrón	Presión del sensor				
Pp kg/cm ²	Presión de poro kg/cm ²	Contrapresión kg/cm ²	Confinamiento kg/cm ²	Esfuerzo axial kg/cm ²	Presión axial kg/cm ²
0.000	-0.011	-0.015	0.032	0.013	-0.009
0.542	0.537	0.533	0.578	0.545	0.538
0.997	0.998	0.995	1.037	1.006	1.000
1.448	1.448	1.445	1.486	1.456	1.450
2.018	2.022	2.020	2.059	2.029	2.025
2.502	2.515	2.514	2.550	2.521	2.518
3.051	3.055	3.055	3.090	3.061	3.059
3.509	3.511	3.511	3.544	3.517	3.515
3.993	3.994	3.995	4.027	4.001	3.999
4.494	4.495	4.510	4.538	4.515	4.513

Cada sensor se reportó en forma cruzada para asegurar que la variación entre cada uno no afectara significativamente (Figura 2.33).

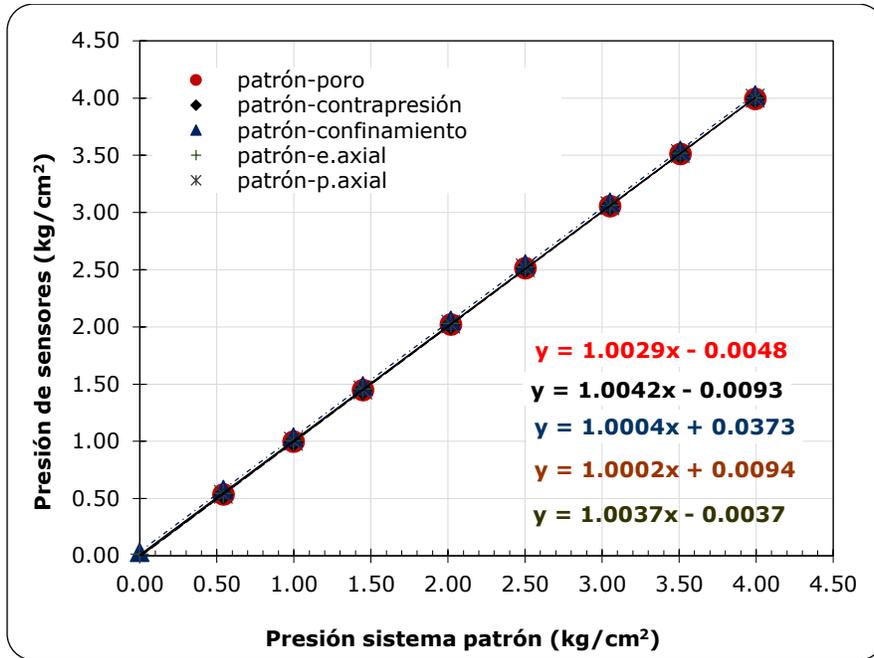


Figura 2.33 Verificación cruzada de los sensores de presión

En las Figuras 2.34 y 2.37 se presenta la verificación cruzada del sensor de presión de poro, por lo que los demás sensores se presentaron en el Anexo A. Por otra parte, en cada incremento sólo existe una única presión, los sensores están sujetos a leer un valor muy cercano entre sí, por consiguiente, se tiene una línea de tendencia con un valor de pendiente muy cercano a 1.

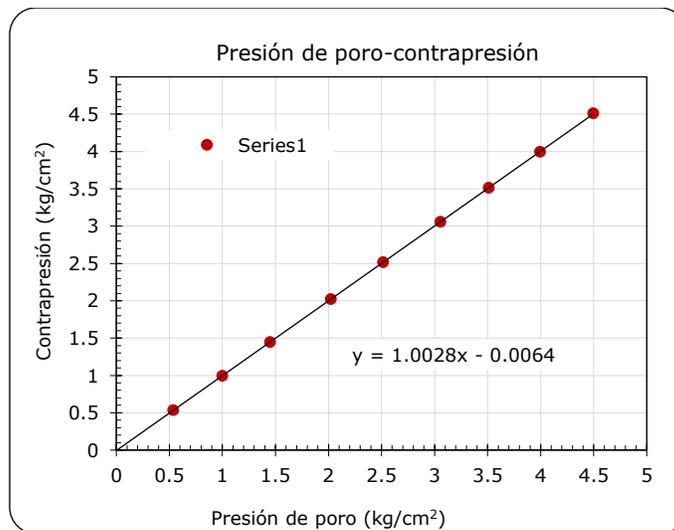


Figura 2.34 Verificación cruzada de presión de poro vs contrapresión

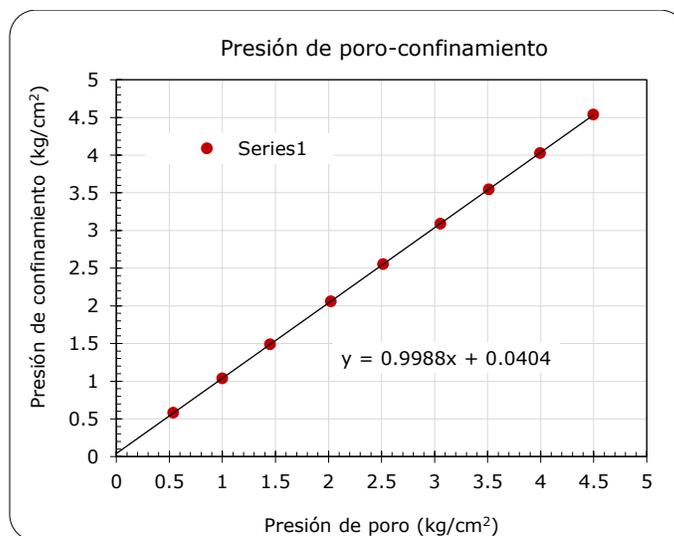


Figura 2.35 Verificación cruzada de presión de poro vs presión de confinamiento

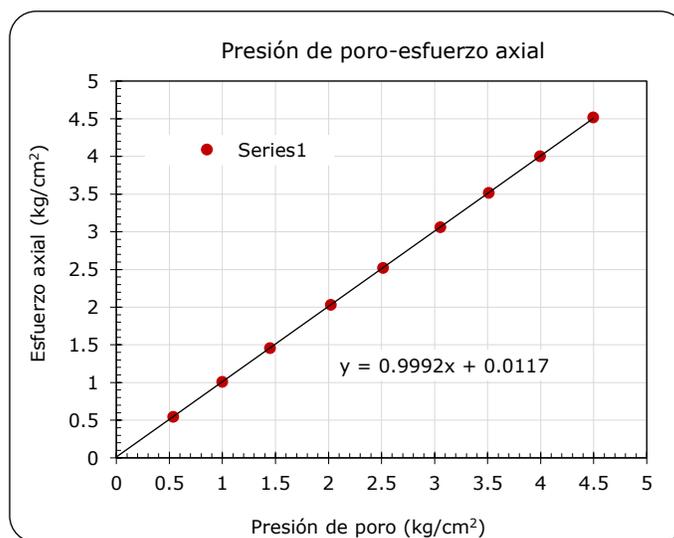


Figura 2.36 Verificación cruzada de presión de poro vs esfuerzo axial

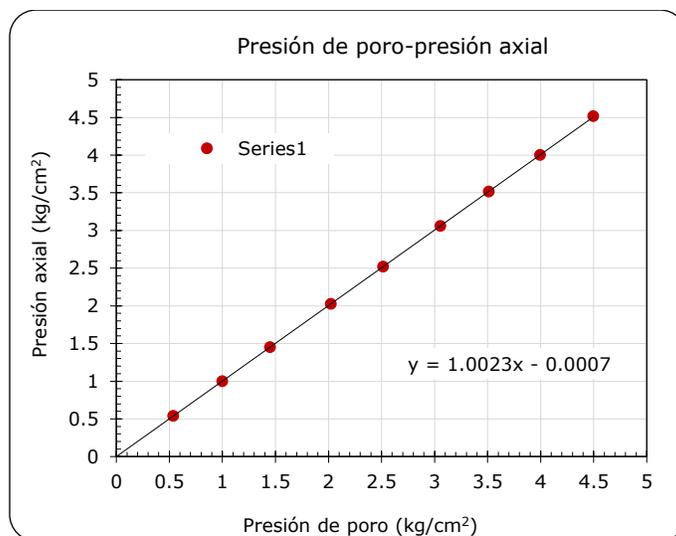


Figura 2.37 Verificación cruzada de presión de poro vs presión axial

Capítulo 3 Descripción de los materiales y método de ensayo

3.1 Descripción de los materiales

El material empleado para las pruebas de compresibilidad proviene del subsuelo del ex lago de Texcoco que, de acuerdo con su clasificación SUCS, el grupo G1 y G2 son arcillas y limos de alta compresibilidad CH y MH, respectivamente. Las propiedades índices se mencionan en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Resumen de las propiedades del material.

Grupo	Prueba	Profundidad	Densidad relativa de sólidos	Relación de vacíos	Contenido de agua	Grado de saturación
		z (m)	G_s -	e -	w (%)	G_w (%)
G1	T-01	19.20-18.90	2.92	4.47	147.57	96.31
	T-02		2.92	4.97	205.06	97.29
	T-03		3.10	5.82	184.29	98.02
	T-04		2.99	5.76	178.96	92.85
G2	T-05	26.90-27.50	2.59	5.29	197.31	96.52
	T-06		2.60	6.42	239.57	97.01
	T-07		2.50	5.83	233.33	99.92
	T-08		2.65	5.82	214.58	97.79
	T-09		2.48	4.78	191.67	99.36

Tabla 3.2 Clasificación SUCS del material en estudio.

Grupo	Prueba	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	SUCS
		w_L (%)	w_P (%)	PI (%)	
G1	T-01	235.69	66.81	168.88	CH - Arcilla de alta plasticidad
	T-02	256.15	80.45	175.70	CH - Arcilla de alta plasticidad
	T-03	297.31	71.67	225.64	CH - Arcilla de alta plasticidad
	T-04	288.64	68.35	220.29	CH - Arcilla de alta plasticidad
G2	T-05	165.12	73.02	92.10	MH - Limo de alta plasticidad
	T-06	186.71	65.84	120.87	MH - Limo de alta plasticidad
	T-07	178.66	73.40	104.64	MH - Limo de alta plasticidad
	T-08	141.31	70.14	71.17	MH - Limo de alta plasticidad
	T-09	148.47	67.99	80.48	MH - Limo de alta plasticidad

3.2 Método de ensayo

Se designa método de ensayo a todas las actividades que intervienen durante la realización de la prueba, en ellas se incluye la preparación del equipo, formación de probeta y la configuración de la etapa de prueba en el módulo de operación del consolidómetro neumático.

3.2.1 Preparación del equipo

Depósito con agua destilada

Se verifica que el depósito con agua destilada se encuentre por lo menos a un medio de su contenido total; de lo contrario, se debe destilar y desalear agua, la cual podrá emplearse para el ensayo únicamente cuando se encuentre a temperatura ambiente.

Nivel de aceite del tanque

Cuando el equipo se encuentra desmontado, se debe de regresar el aceite que se encuentra en su interior hacia el propio depósito. Esto se realiza abriendo la válvula axial sobre el módulo de operación y después se hace presión en dirección vertical hacia abajo apoyándose en la cubierta del domo. El nivel de aceite se puede verificar con la manguera externa, la cual tiene una marca que indica el nivel mínimo con el que puede operar el equipo.

Saturación de piedras porosas

Se vierte agua destilada en una charola de aluminio y se coloca las piedras porosas junto a los papales filtros, previamente cortados.

Saturación de líneas de drenaje

El equipo cuenta con dos líneas de drenaje exterior en la parte izquierda (Figura 3.1). El dren superior (manguera larga) y dren inferior (manguera corta) permiten conectar el domo con el vaso de agua del equipo, ambas se deben saturar antes de iniciar el ensayo.

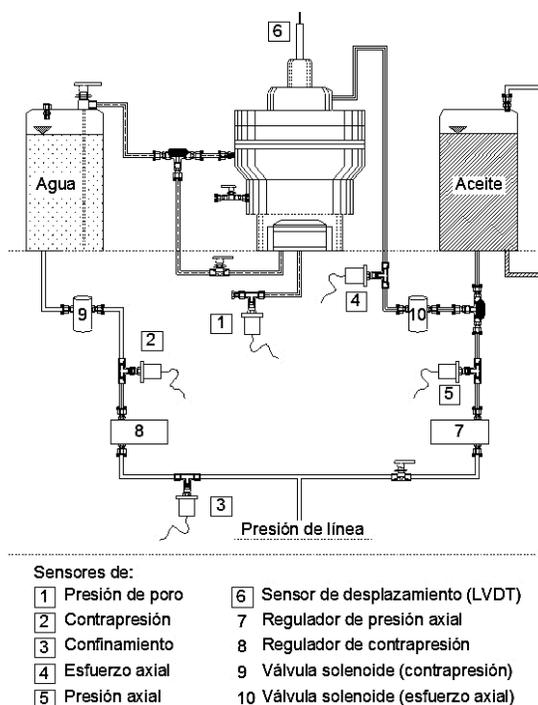


Figura 3.1 Esquema resumido de distribución de sensores del consolidómetro

3.2.2 Preparación de la probeta

Del tubo shelby se extrae una muestra de aproximadamente 70 mm de longitud, identificando la orientación superior e inferior de la muestra (orientación de extracción en campo). Posteriormente, con apoyo del torno de labrado se realiza una marca con el bisel del anillo en la parte inferior de la muestra y se procede a realizar cortes empleando el arco de alambre. Cuando la muestra de arcilla tenga una holgura de 3 a 5 mm en toda la circunferencia, con respecto a la marca del anillo, se procede a hincar en etapas evitando que existan agrietamientos en dirección transversal que pueda dañar a la muestra. La secuencia de formación de la probeta se presenta en la Figura 3.2.



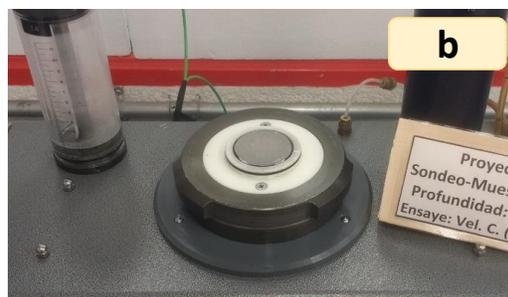
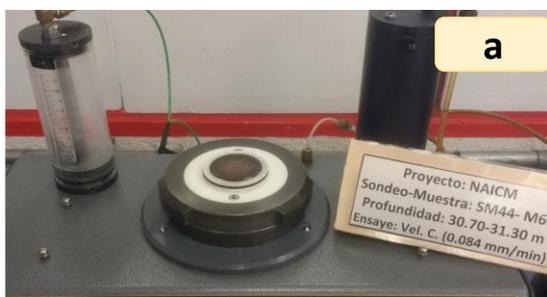
Figura 3.2 Proceso de labrado de la muestra

3.2.3 Montaje

Se colocarán los accesorios de carga y de confinamiento conforme se observa en la Figura 3.3. Es importante señalar que estas piezas deben de lubricarse con aceite de silicón para disminuir el efecto de fricción cuando se deslice la muestra en el interior del anillo de confinamiento del equipo.

El orden para colocar los accesorios y muestras que se reguardarán dentro del domo es el siguiente:

- a. Colocar la piedra porosa encima del área de montaje.
- b. Colocar de forma concéntrica un papel filtro encima de la piedra porosa.
- c. Engrasar con aceite de silicón ligeramente el anillo de confinamiento y colocarlo encima del área de montaje.
- d. De forma cuidadosa retirar la tapa, rompiendo la fricción entre la misma y el área de contacto de la muestra, después se coloca encima del anillo de confinamiento.
- e. Tomar la piedra porosa superior y colocarle de forma concéntrica el papel filtro.
- f. Posteriormente, se coloca de forma centrada encima de la muestra la piedra porosa con el papel filtro.
- g. Se engrasa ligeramente el accesorio de carga y se coloca encima de la piedra porosa, se debe asegurar que embonen la concavidad de los accesorios.
- h. Con apoyo de los pulgares se realiza una ligera presión en dirección vertical de tal forma que se deslice la muestra hacia el anillo fijo de confinamiento.



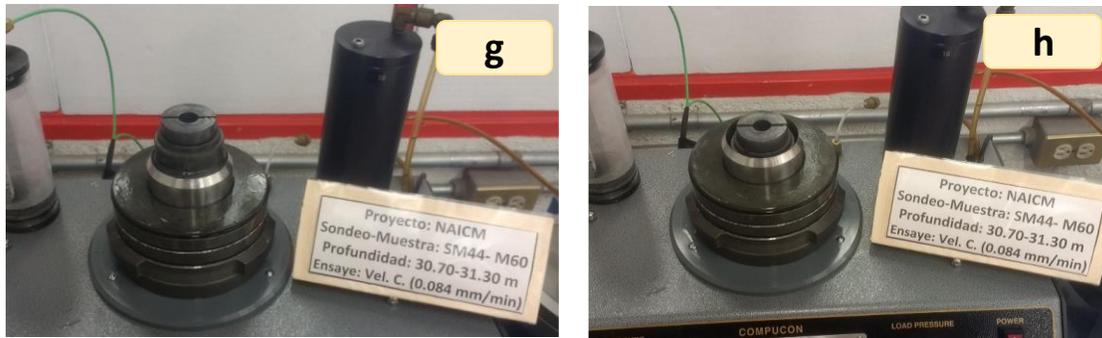


Figura 3.3 Secuencia de montaje

Finalmente, el esquema de los accesorios de carga y el montaje del domo metálico se observa como en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Esquema de montaje y fijación del domo

3.2.4 Saturación por contrapresión

Este proceso tiene la finalidad de llenar los vacíos dentro de la muestra de suelo con agua, esta condición debe lograrse para poder interpretar los resultados de la prueba de acuerdo con la teoría de consolidación de Terzaghi (Figura 3.5). La etapa se inicia aplicando un esfuerzo axial y otro de contrapresión de 60 y 50 kPa, respectivamente. Después, se continúa en incrementos de 50 kPa en ambos sentidos hasta alcanzar un valor de 260 kPa de esfuerzo axial y 250 kPa de contrapresión, por lo que se induce un esfuerzo efectivo de 10 kPa para todos los incrementos.

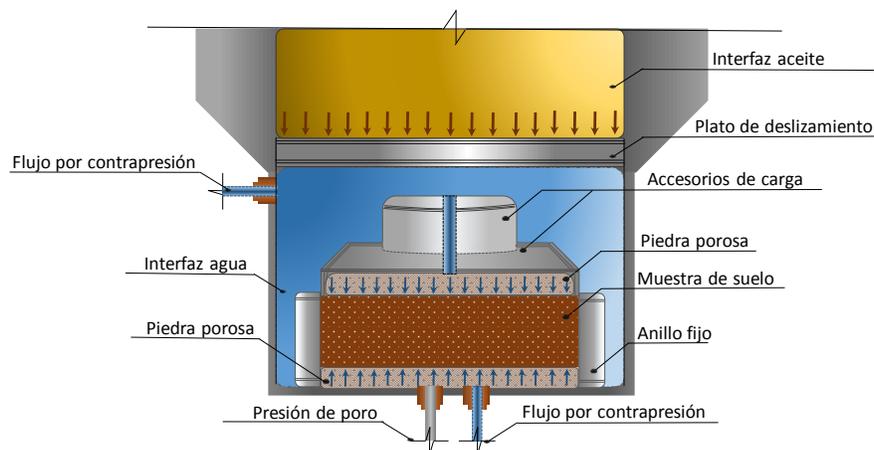


Figura 3.5 Esquema interno del domo

El esfuerzo axial se aplica mediante la interfaz de aceite en dirección vertical hacia abajo, mientras que la contrapresión se realiza por ambos drenes que suministran agua al domo (Figuras 3.1 y 3.5). La saturación para todos los ensayos se alcanzó en un periodo de tiempo de 24 a 48 h.

3.2.5 Medición de B de Skempton

Este parámetro permite estimar el grado de saturación de la muestra antes de iniciar el ensayo y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_a} \quad (3.1)$$

Donde:

- B B de Skempton
- Δu Incremento de la presión de poro
- $\Delta \sigma_a$ Incremento del esfuerzo axial

Se considera que la muestra está saturada cuando se obtiene una relación de $B \geq 0.96$.

3.2.6 Etapa de carga

Las pruebas de CRS se programaron para un rango de velocidad de deformación comprendido entre 0.15 hasta 1.20%/h, mientras que las pruebas de CI se configuró un vector de carga que contempló en promedio de 17 a 20 incrementos de esfuerzo efectivos aplicados cada 24 horas, aproximadamente, con lo que se permitió construir la curva de compresibilidad en sus dos ciclos (carga-descarga y recarga-descarga).

La tasa de deformación empleada para cada prueba se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Programa de prueba.

Grupo	Prueba	Tipo de ensayo	Velocidad de deformación	
			$(\dot{\epsilon}_{v1} - \dot{\epsilon}_{v2})$	
			%/h	$\times 10^{-4}$ (mm/min)
G1	T-01	CRS	0.15-0.15	6.350-6.350
	T-02	CRS	0.20-0.20	8.467-8.467
	T-03	CRS	0.30-0.30	12.70-12.70
	T-04	CI	---	---
G2	T-05	CRS	0.20-0.20	8.467-8.467
	T-06	CRS	0.20-0.60	8.467-25.40
	T-07	CRS	0.20-0.80	8.467-33.86
	T-08	CRS	0.20-1.20	8.467-50.80
	T-09	CI	---	---

3.3 Cálculo de parámetros

Los parámetros que se revisaron en los ensayos CRS y de CI son los siguientes:

- Velocidad de prueba. Todas las pruebas registran información del tiempo y del correspondiente desplazamiento a la que se somete la muestra durante el ensayo, por lo que su velocidad se diseña en mm/min en la interfaz de operación. Sin embargo, para homologar con las velocidades de

prueba utilizados por otros autores se decidió expresar en términos de %/h, tomando de referencia la altura total H de la probeta como el 100% (Figura 3.6).

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 indican la determinación de la velocidad de deformación constante y la deformación volumétrica para los ensayos CRS.

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta t} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\delta}{H_0} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde:

- $\dot{\varepsilon}_v$ Velocidad de deformación constante, en %/h
- $\Delta\varepsilon_v$ Incremento de la deformación volumétrica, en %
- Δt Incremento de tiempo, en h
- ε_v Deformación volumétrica, en %
- δ Deformación axial, en mm

En el esquema de la Figura 3.6 se observa la curva de desplazamiento para una prueba CRS de dos ciclos de carga. Se constituye por cuatro pendientes consecutivamente que indican la carga, descarga, recarga y descarga. Cabe señalar que el primer ciclo de prueba (carga y descarga) la velocidad aplicada es $\dot{\varepsilon}_{v1}$ y en el siguiente ciclo (recarga-descarga) se asigna la velocidad $\dot{\varepsilon}_{v2}$.

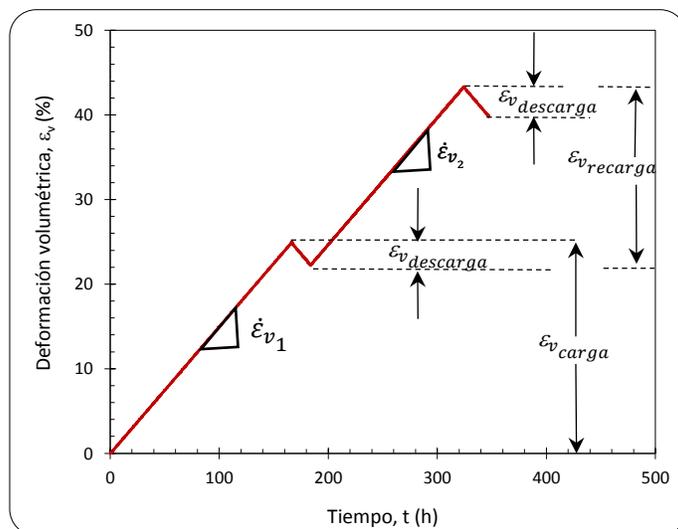


Figura 3.6 Esquema de velocidad de carga para la prueba CRS

- Esfuerzo vertical y efectivo. Los ensayos de CI y CRS parten con el último valor del esfuerzo vertical de la etapa de saturación (igual o mayor a 260 kPa) y un esfuerzo de contrapresión que se mantiene constante durante todo el ensayo (igual o mayor a 250 kPa). A partir de allí, la prueba inicia con un esfuerzo vertical de 10 kPa (esfuerzo vertical menos el esfuerzo por contrapresión) para un tiempo $t = 0$, después, incrementa de forma continua el esfuerzo vertical (en pruebas CRS) generando un exceso de presión de poro en la base no drenante.

La distribución del exceso de la presión de poro que se desarrolla en la muestra es de forma parabólica (Figura 3.7), en la superficie de la muestra la presión de poro es nula debido a que en esa cara se drena el agua proveniente del proceso de consolidación, por consiguiente, a la profundidad H se desarrolla la máxima presión de poro en exceso. Varios autores sugieren que debe acotarse dicha presión a $2/3$ del valor de u_b con el fin de considerar una presión equivalente dentro del espécimen (Smith, 1969; Gorman, 1981; Mesri *et al.*, 1992).

En ese sentido, el esfuerzo efectivo se determina mediante la ecuación 3.3.

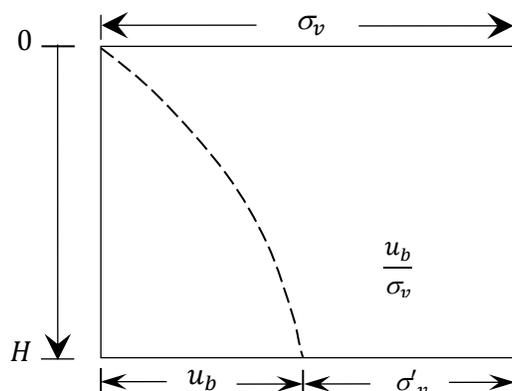


Figura 3.7 Esquema de esfuerzo efectivo en la prueba CRS (adaptado Smith, 1969)

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \quad (3.3)$$

Donde

- σ'_v Esfuerzo efectivo, en kPa
- σ_v Esfuerzo vertical total, en kPa
- u_b Exceso de la presión de poro, en kPa

Por otra parte, la Figura 3.8 indica el desarrollo del esfuerzo efectivo a través del tiempo para una prueba convencional CRS. El esquema de esfuerzo efectivo se integra por las cuatro etapas que constituyen la curva de compresibilidad (carga-descarga y recarga-descarga), nótese que el esfuerzo efectivo inicia a partir de 10 kPa correspondiente al fin de la etapa de saturación e inicio de la prueba. Para el primer ciclo, el incremento del esfuerzo σ'_v es ascendente para determinado tiempo y después, para la etapa de descarga, la caída de la curva indica una despresurización hasta llegar a la condición inicial de esfuerzo (muy cercano a 10 kPa). Este proceso se repite para el siguiente ciclo de recarga-descarga.

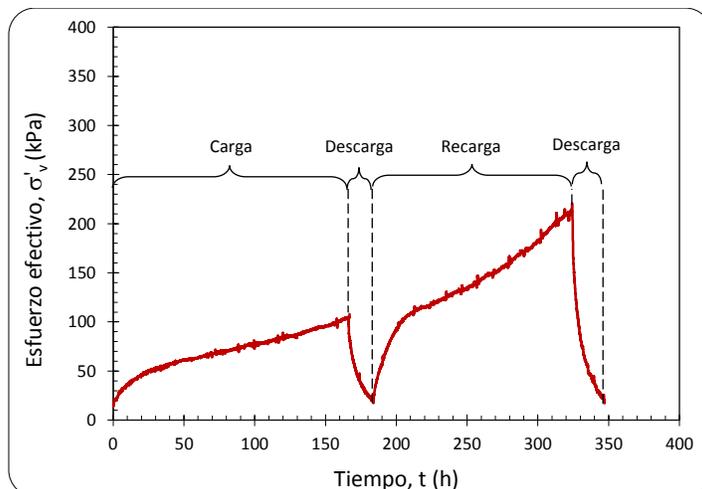


Figura 3.8 Esquema de esfuerzo efectivo en la prueba CRS

- Presión de poro. El transductor de presión de poro responde directamente al nivel de esfuerzo vertical al que se somete la muestra para una velocidad determinada, por lo que en la base no drenante se registra la presión de poro en exceso y su magnitud se obtiene al normalizar su valor a cero como se expresa en la ecuación 3.4.

$$u_b = \Delta u_b - u_0 \tag{3.4}$$

Donde

- u_b Exceso de la presión de poro, en kPa
- Δu_b Incremento de la presión de poro (para $t > 0$), en kPa
- u_0 Presión de poro inicial (para $t = 0$), en kPa

El gráfico del exceso de la presión de poro que se reporta en los siguientes capítulos se integra por cuatro pendientes que representan las etapas de prueba (carga-descarga y recarga-descarga). El desarrollo de u_b para las etapas de carga y recarga se indica por pendientes en ascenso para cualquier tiempo y en las etapas de descarga se obtiene una pendiente muy cercano a cero debido al efecto de despresurización dentro del domo (Figura 3.9).

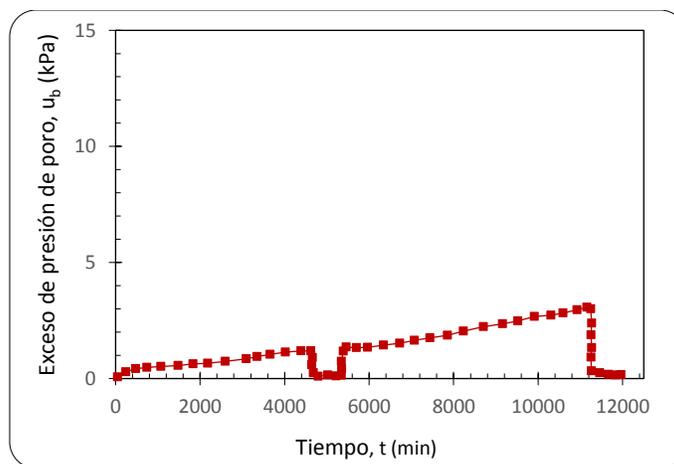


Figura 3.9 Registro de presión de poro en la prueba CRS

- Índice de compresión y expansión. Estos parámetros se determinaron con base a las expresiones que se indican en la Figura 3.10.

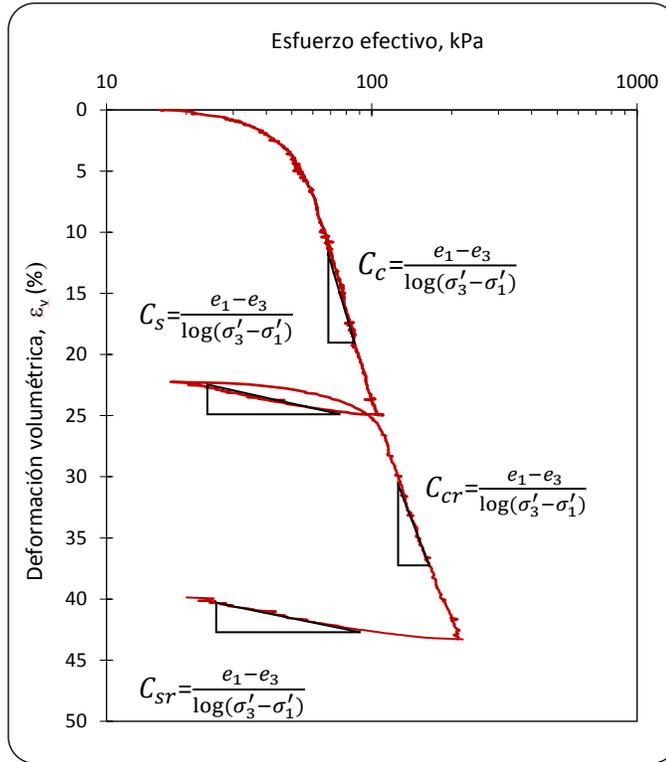


Figura 3.10 Determinación del índice de compresión y expansión en los diferentes ciclos de la prueba

- Coeficiente de consolidación. En las pruebas de CI el coeficiente C_v se estimó con relación a lo indicado en la norma ASTM D2435–96 y para los ensayos CRS se determinó considerando que el estado transitorio se ha disipado por lo que se empleó la misma expresión que obtuvieron Smith *et al.*, 1969 y Wissa *et al.*, 1971 (Figura 3.11).

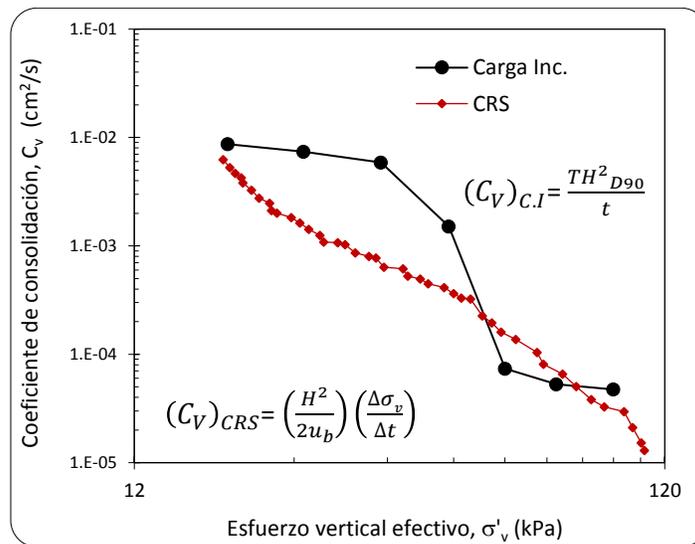


Figura 3.11 Coeficiente de consolidación para la prueba CRS y de CI

Capítulo 4 Presentación y análisis de resultados

4.1 Generalidades de los ensayos de CI y CRS

La compresibilidad de los materiales finos hasta la actualidad se puede estudiar con las siguientes modalidades de prueba: carga incremental-CI (Terzaghi, 1925); velocidad de deformación constante-CRS (Hamilton *et al.*, 1959); velocidad de esfuerzo constante o de carga continua-CL (Hamilton *et al.*, 1959; Janbu *et al.*, 1981) y de gradiente controlado-CGT (Lowe, 1969). Esta gama variada de ensayos es de interés profesional por la condición en que se ejecuta dentro del laboratorio; condiciones de prueba, instrumentación del equipo e interpretación de resultados.

Las dos pruebas abordadas en el presente trabajo tienen condiciones de entrada que difieren un poco, sin embargo, ambos casos pretenden encontrar la resistencia máxima a la que se ha sometido el suelo en el campo. La característica fundamental en el ensayo de CI se enfoca en discretizar un vector de carga en pequeños incrementos que se aplican en periodos de tiempo continuo (lapsos de 24 a 72 horas), a su vez, estos deben de aplicarse cuando el exceso de presión de poro que se registra en la parte no drenada de la muestra se ha disipado o se encuentra muy cercano a cero. De la condición de entrada se obtienen curvas de consolidación que representan las deformaciones debido a cada esfuerzo aplicado, siguiendo el procesamiento de información, para cada esfuerzo existe una deformación volumétrica que graficada en forma continua construye la curva de compresibilidad, de donde se obtiene el esfuerzo de preconsolidación de campo σ'_{pc} . Por otra parte, en las pruebas CRS la condición de entrada es la aplicación de una tasa de deformación continua que provoca que la muestra de suelo se deforme linealmente a un nivel de esfuerzos y gradiente hidráulico desconocido, además, el exceso de presión de poro debido a la carga inducida por la velocidad se debe de conservar dentro de los valores que se indican en la norma ASTM 4186 –98. En este tipo de ensayo el esfuerzo que se determina por medio del método semilogarítmico de Casagrande es el esfuerzo de fluencia, como se indica en la Figura 4.1.

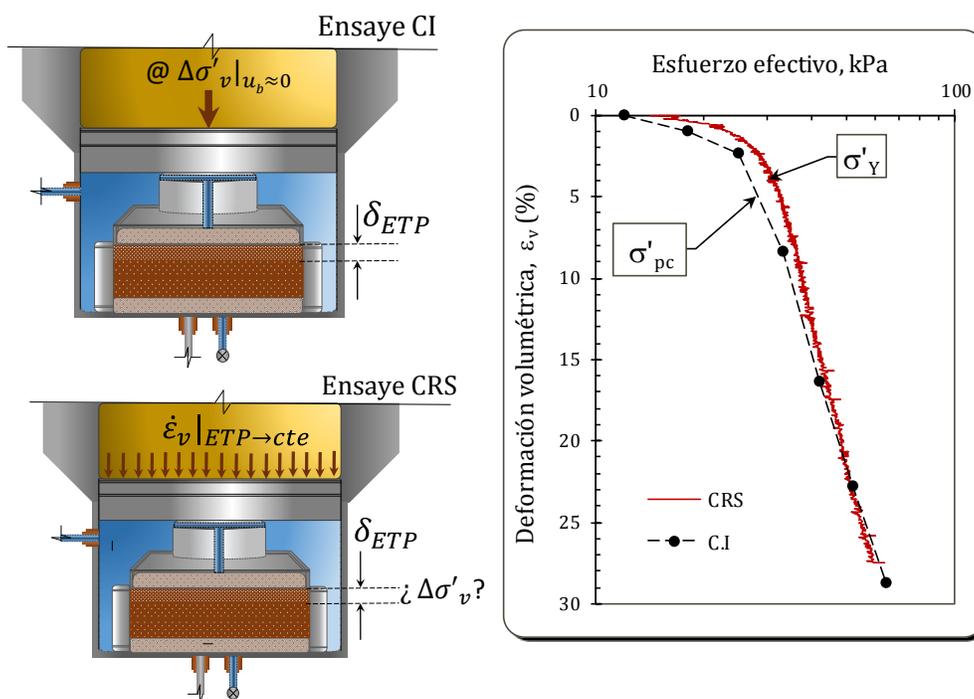


Figura 4.1 Esquema de prueba de CI y CRS

4.2 Ensayos del grupo G1 para la condición $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2$

El grupo G1 contempla 3 ensayos CRS a una tasa de deformación uniforme para los dos ciclos de prueba (carga-descarga y recarga-descarga) y una prueba bajo el esquema de ensaye a carga incremental, como se indicó en la tabla 3.3 del capítulo III.

4.2.1 Curvas de desplazamiento

La trayectoria de desplazamiento que se presenta para cada ensayo se construye por cuatros pendientes consecutivas que representan la carga, descarga, recarga y descarga. El incremento de la pendiente indica que aumenta la velocidad de prueba (0.15, 0.20 y 0.30 %/h, respectivamente) para las etapas de carga y recarga, caso similar para las etapas de descargas con un valor negativo de la pendiente. La deformación volumétrica objetivo para esta serie de ensayos fue alrededor del 25% (6.35 mm), como indica la Figura 4.2.

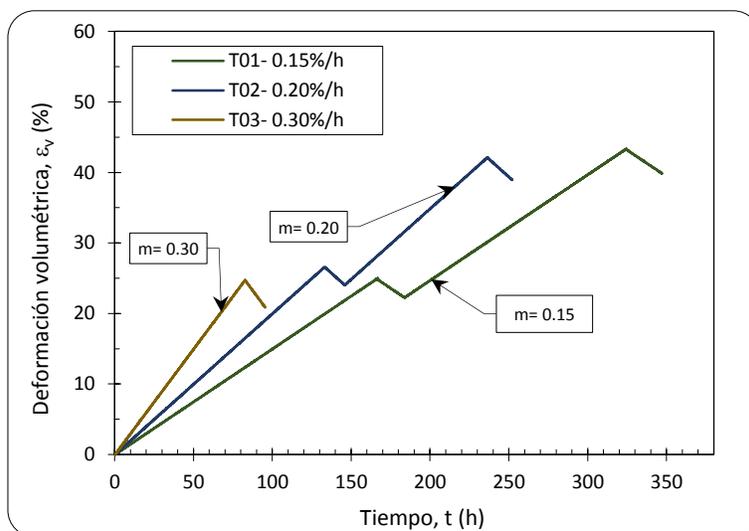


Figura 4.2 Curva de velocidad de prueba

Por cuestiones de operación del equipo de ensayo, la prueba T03 sólo se ejecutó para el primer ciclo de carga y descarga.

4.2.2 Desarrollo del esfuerzo axial

La máxima magnitud del esfuerzo axial depende en gran medida del nivel de deformación volumétrica a la que se somete la muestra en sus diferentes etapas, factor que resulta hasta cierto punto difícil de controlar dentro del módulo de operación del equipo. Sin embargo, geoméricamente el esfuerzo efectivo a través del tiempo se comporta muy similar a una curva de compresibilidad, como se observa en la Figura 4.3, por lo que la variación entre ellas se debe al tiempo requerido para alcanzar la deformación volumétrica objetivo.

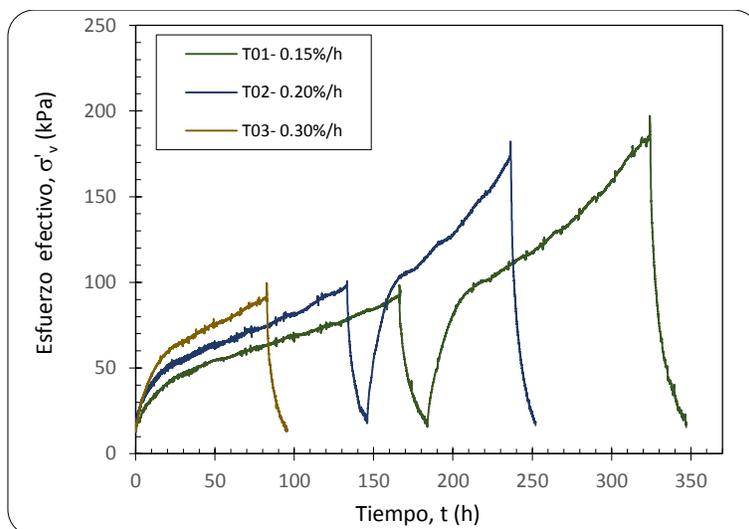


Figura 4.3 Desarrollo de esfuerzo axial, grupo G1

4.2.3 Curvas de compresibilidad

Varios autores han demostrado que el esfuerzo de fluencia incrementa conforme aumenta la velocidad de prueba en el ensayo CRS (Hamilton *et al.*, 1959; Crawford, 1964; Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1981; Mendoza, 1996; López, 2002; Ovando, 2011; entre otros). Es de interés observar que el resultado del ensayo T02 tiene compatibilidad con respecto a la prueba T-04 en la magnitud de esfuerzos efectivos alcanzado en la deformación volumétrica, es decir, la velocidad $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$ permite reproducir el comportamiento esfuerzo-deformación que se tiene en campo (Figura 4.4).

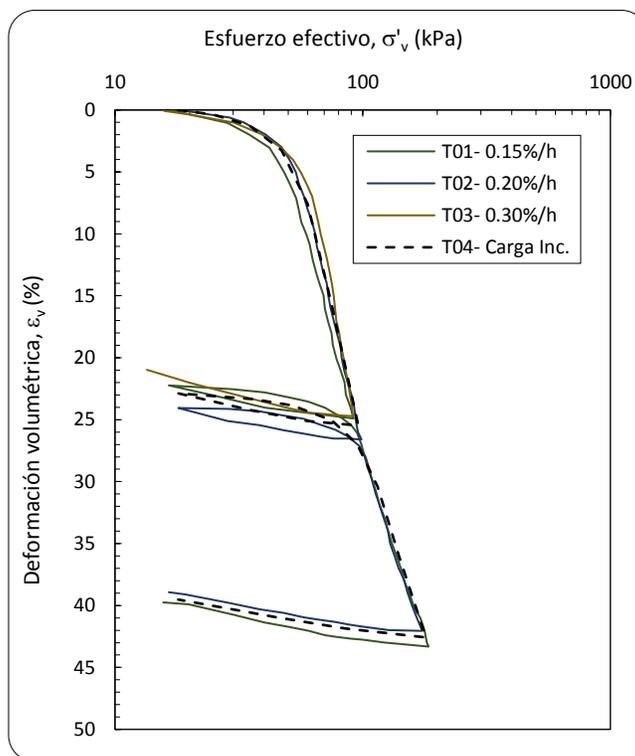


Figura 4.4 Curvas de compresibilidad del grupo G1

La curva de compresibilidad obtenida de la prueba T01 está ligeramente hacia la izquierda con respecto a la prueba T04 para el ciclo de carga y, posteriormente, en la etapa de recarga se alinea de forma consistente, tal comportamiento indica que el esfuerzo de fluencia a una velocidad $\dot{\epsilon}_v = 0.15\%/h$ subestima el esfuerzo de preconsolidación de la prueba T04. De forma opuesta se presenta la prueba T03 con un efecto de sobrestimación mínima del esfuerzo efectivo con respecto a la prueba de carga incremental.

El esfuerzo de fluencia σ'_v y esfuerzo de preconsolidación σ'_{pc} de las pruebas CRS y de CI, respectivamente, se presenta en la Tabla4.1. De acuerdo con los resultados, la velocidad $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$ es la velocidad óptima a emplear debido a que presentó un nivel de sobrestimación menor al 1.0% con relación a la prueba de CI.

Tabla4.1 Relación de esfuerzo de fluencia contra esfuerzo de preconsolidación del grupo G1.

Grupo	Prueba	Velocidad de prueba	Esfuerzo de preconsolidación o de fluencia	Sobrestimación de relación de esfuerzos
-----	-----	$\dot{\epsilon}_v$ (%/h)	σ'_{pc} o σ'_v (kPa)	$100(\sigma'_v/\sigma'_{pc}) - 100$ (%)
G1	T-01	0.15	52.42	-3.82
	T-02	0.20	54.75	0.46
	T-03	0.30	56.12	2.97
	T-04	-----	54.50	---

4.2.4 Efecto de la presión de poro

El exceso de la presión de poro medido en la base no drenante de las muestras a través del tiempo se ilustra en la Figura 4.5. Para cada ensayo la curva se constituye por dos pendientes en ascenso que representan el incremento de la presión de poro para las etapas de carga y recarga y, consecuentemente, una caída debido a la despresurización que se da en la muestra por el efecto de la etapa de descarga.

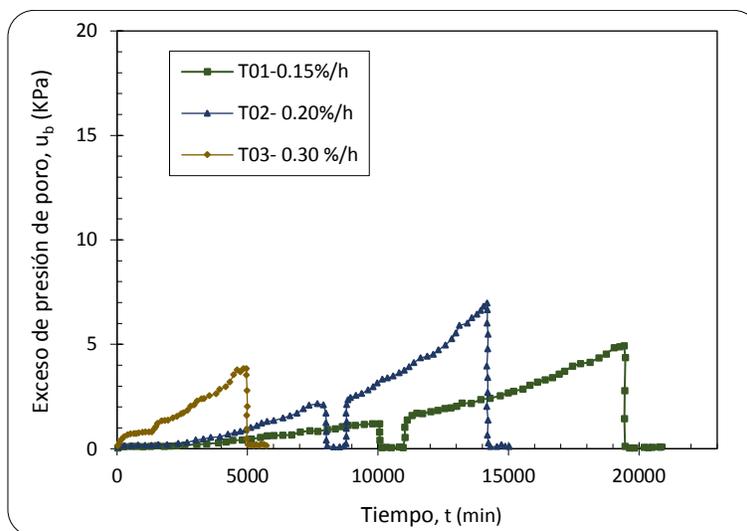


Figura 4.5 Exceso de presión de poro para el grupo G1

Una característica a señalar está en función de las pendientes, se observa que el grado de inclinación de ellas aumenta conforme incrementa la velocidad de prueba, es decir, no existe estabilización en las etapas de carga y recarga en la presión de poro debido a que en todo momento hay un aumento del esfuerzo axial aplicado.

El comportamiento del exceso de la presión de poro para las pruebas de carga incremental se compone por una zona de transición y otra de estabilización. Antes de iniciar la prueba, la magnitud de la presión de poro y la contrapresión son muy similares que para fines prácticos es el mismo valor, después se aplica el primer incremento de carga y la muestra en la base no drenante parte de la condición anterior y aumenta súbitamente generando un exceso en la presión de poro que disminuye hasta ingresar a la zona de estabilización conforme incrementa el tiempo (Figura 4.6a). El comportamiento es similar para todos los incrementos de carga, la diferencia entre cada curva se basa en el tiempo requerido para estabilizar la presión pico alcanzada, a mayor incremento de carga mayor tiempo se requiere para disipar el exceso de la presión de poro (Figura 4.6b).

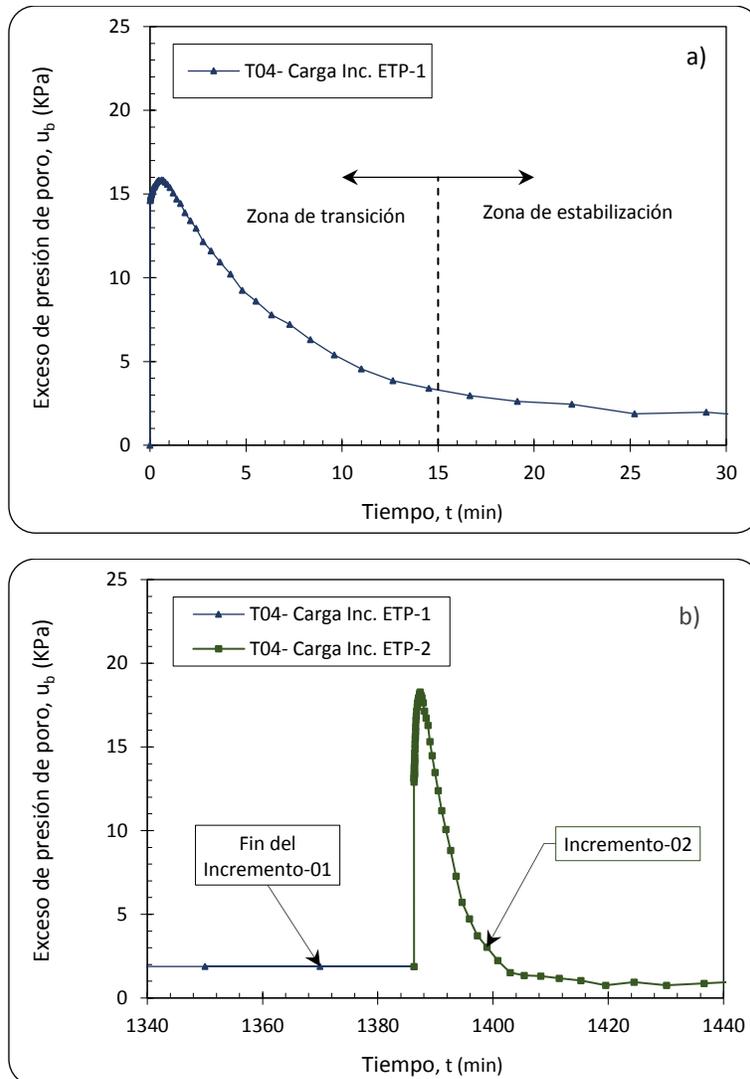


Figura 4.6 Exceso de presión de poro para la prueba T04 en a) Incremento 1 y b) Incremento 2

Smith *et. al.* 1969 realizó una serie de ensayos para muestras de calcio montmorillonita donde obtuvo una variación lineal entre la relación de vacíos e y el exceso de la presión de poro u_b , además, concluyó que para velocidades rápidas se presenta una mayor magnitud de u_b . En las pruebas T01 a la T03 se obtuvo un comportamiento similar al de Smith *et al.*, 1969 como se ilustra en la Figura 4.7. De estos resultados se obtuvo una linealidad del exceso de la presión de poro para las etapas de carga y recarga, lo cual indica que en la última etapa el suelo adquiere de nuevo la magnitud de u_b para la relación de vacíos e_{YR} que pertenece al punto donde se determina el esfuerzo de fluencia del suelo.

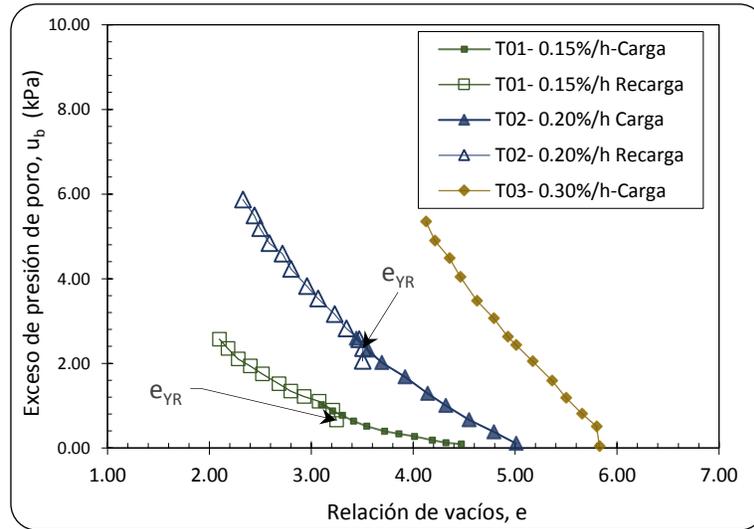


Figura 4.7 Variación de la relación de vacíos con el exceso de la presión de poro

4.2.5 Parámetros de compresibilidad

La variación del coeficiente de consolidación del grupo G1 se presenta en la Figura 4.8. De acuerdo con la expresión 1.15 del capítulo 1, el factor principal que influye en la magnitud del coeficiente C_v es el exceso de la presión de poro, a menor exceso de u_b mayor magnitud de C_v se obtiene.

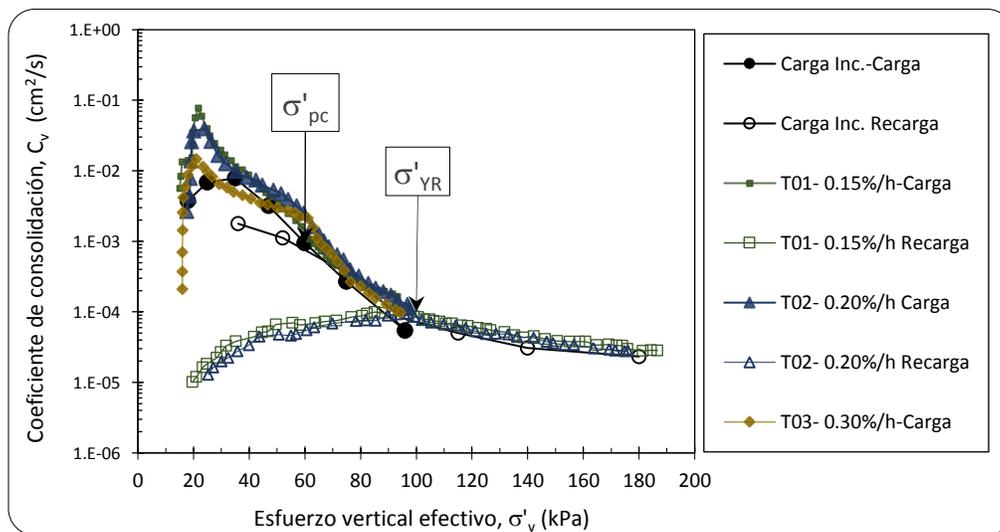


Figura 4.8 Coeficiente de consolidación del grupo G1

Al iniciar la etapa de carga se observa una ligera variación del coeficiente C_v para todas las pruebas, sin embargo, las curvas se alinean cuando la muestra experimenta un nivel de esfuerzos cercano al esfuerzo de preconsolidación σ'_{pc} de la prueba T04. Después, en la etapa de recarga existe divergencia en la magnitud de C_v muy considerable entre las pruebas CRS y la de CI, este efecto se debe a que las pruebas CRS experimentan diferentes niveles de u_b en un inicio y después tiende a ser igual cuando el de esfuerzo efectivo aplicado es muy cercano al esfuerzo de fluencia σ'_{YR} en la etapa de la recarga.

El resumen de la variación del índice de compresión y expansión se presenta en la Tabla 4.2. En este apartado se describen numéricamente los valores obtenidos para las pruebas CRS y de CI que se deben de cotejar de forma gráfica con la Figura 4.4. Con base a los resultados, se tiene que las pruebas T01 y T02 presentaron mejor ajuste con respecto a los índices obtenidos en la prueba de CI y, en contraste muy diferente la prueba T03 muestra una dispersión mayor como se observa en las curvas de compresibilidad. Por lo tanto, la velocidad $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$ se ajusta en forma muy consistente con los parámetros de compresibilidad de la prueba de CI.

Tabla 4.2 Índice de compresión y expansión del grupo G1.

Grupo	Prueba	Velocidad de deformación	Índice de compresión	Índice de expansión	Índice de recompresión (recarga)	Índice de expansión (descarga)
		$\dot{\epsilon}_{v1}$	C_c	C_s	C_{cr}	C_{sr}
		(%/h)	-	-	-	-
G1	T-01	0.15	5.079	0.224	3.584	0.208
	T-02	0.20	5.407	0.215	3.788	0.134
	T-03	0.30	6.480	1.104	---	---
	T-04	-----	5.478	0.223	3.910	0.191

4.3 Ensayos del grupo G2 para la condición $\dot{\epsilon}_1 \leq \dot{\epsilon}_2$

El grupo G2 se conforma por cuatro pruebas bajo la modalidad de velocidad controlada y una prueba con condición de esfuerzo controlado. Para las pruebas CRS el primer ciclo de carga-descarga se realizó a la velocidad de $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$, dando continuidad con el segundo ciclo de recarga-descarga a una velocidad de prueba mayor, según lo indicado en el capítulo III, Tabla 3.3.

4.3.1 Curvas de desplazamiento

Las curvas de desplazamiento de las pruebas CRS se presentan en la Figura 4.9. En las pruebas T05 a la T08 se observa que el primer ciclo de prueba (carga-descarga) tienen la misma pendiente, lo que representa que se sometieron a la misma velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$, después, en el siguiente ciclo (recarga-descarga) el grado de inclinación de las pendientes va en aumento, partiendo de un valor de 0.20, hasta llegar a 1.20.

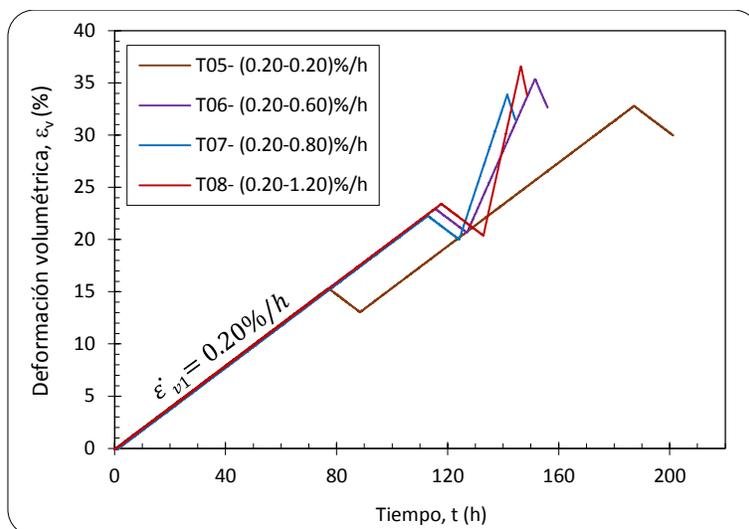


Figura 4.9 Curva de desplazamiento del grupo G2

En la Tabla 4.3 se presenta la comparación entre la velocidad objetivo con respecto a la velocidad real que experimentaron todas las pruebas CRS. El vector de velocidad objetivo $\dot{\epsilon}_{v1}$ (carga–descarga) y la $\dot{\epsilon}_{v2}$ (recarga– descarga) diseñado para todas las pruebas CRS se aplicó en forma consistente; sin embargo, se obtuvo una ligera variación para la descarga $\dot{\epsilon}_{v2}$ del grupo G2, específicamente en las muestras T06 a la T08. El efecto anterior se debe a que el equipo está diseñado para trabajar bajo esfuerzo controlado a través del tiempo, en este sentido las etapas de descarga generalmente tienen un nivel de deformación volumétrica del 2.5% lo que significa que a velocidades mayores al 0.50%/h el tiempo de prueba es menor dando, como resultado complejo estabilizar la velocidad del ensayo.

Tabla 4.3 Resumen de las velocidades de prueba aplicadas.

Grupo	Prueba	Tipo de ensayo	Velocidad objetivo		Velocidad aplicada	
			(carga-descarga)	(recarga-descarga)	(carga-descarga)	(recarga-descarga)
			$\dot{\epsilon}_{v1}$	$\dot{\epsilon}_{v2}$	$\dot{\epsilon}_{v1}$	$\dot{\epsilon}_{v2}$
			%h		%h	
G1	T-01	CRS	(0.15-0.15)	(0.15-0.15)	(0.15-0.15)	(0.15-0.15)
	T-02	CRS	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)
	T-03	CRS	(0.30-0.30)	---	(0.30-0.30)	---
	T-04	CI	----	----	----	----
G2	T-05	CRS	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)	(0.20-0.20)
	T-06	CRS	(0.20-0.20)	(0.60-0.60)	(0.20-0.20)	(0.60-0.61)
	T-07	CRS	(0.20-0.20)	(0.80-0.80)	(0.20-0.20)	(0.80-0.82)
	T-08	CRS	(0.20-0.20)	(1.20-1.20)	(0.20-0.20)	(1.20-1.26)
	T-09	CI	---	---	---	---

4.3.2 Desarrollo de esfuerzo axial

La aplicación del esfuerzo axial para las pruebas presentadas en la Figura 4.10 es uniforme en el primer ciclo debido a que su tasa de deformación es igual para todas; posteriormente, se presenta un cambio de magnitud y de duración en respuesta a la velocidad que se aplicó en cada ensayo. Al incrementar la velocidad de prueba se tiene un aumento de la resistencia axial, es decir, incrementa el esfuerzo efectivo para un tiempo menor de prueba.

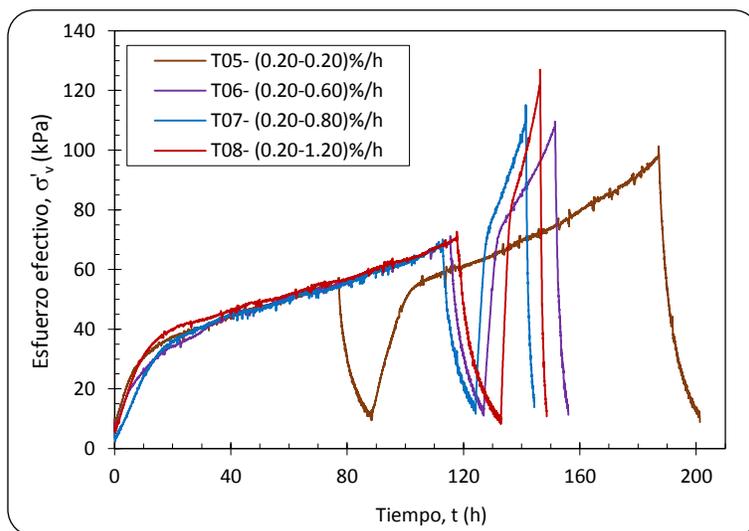


Figura 4.10 Desarrollo del esfuerzo axial del grupo G2

4.3.3 Curvas de compresibilidad

En la serie de ensayos CRS del grupo G2 se fijó la tasa de deformación con la siguiente relación $\dot{\epsilon}_{v1} \leq \dot{\epsilon}_{v2}$ para las pruebas T05 a la T08, que posteriormente se comparan con la prueba de carga incremental T09 (Figura 4.11 a). Con relación a los resultados obtenidos de la Tabla 4.1, se decidió fijar la velocidad de prueba $\dot{\epsilon}_{v1} = 0.20\%/h$, con el objetivo de identificar que para un mismo tubo shelby el esfuerzo de fluencia σ_Y de las pruebas CRS es muy semejante al esfuerzo de preconsolidación σ'_{pc} del ensayo de CI. Lo anterior se pudo corroborar para todas las pruebas, ya que se obtuvo incidencia de forma muy similar para los valores de esfuerzo de σ_Y y de σ'_{pc} . Posteriormente, se incrementó la velocidad de prueba según lo indicado en la tabla 3.3, donde resulta concluyente la respuesta del esfuerzo axial para el ciclo de la recarga ya que se requiere una mayor magnitud de esfuerzo para deformar linealmente a la muestra al incrementar la velocidad del ensayo. En este sentido, de forma gráfica se visualiza con un ligero corrimiento hacia la derecha de la curva de compresibilidad para las pruebas T06 a la T08 en la etapa de recarga (Figura 4.11 b), es decir, se tiene un estado de esfuerzos efectivos mayor al de la prueba T05 cuya condición de velocidad es $\dot{\epsilon}_{v1} = \dot{\epsilon}_{v2}$.

Es importante señalar que la prueba T05 muestra similitud consistente con respecto a la prueba de CI para todas las etapas, reproduciendo perfectamente el comportamiento de esfuerzo-deformación para la velocidad constante de $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$.

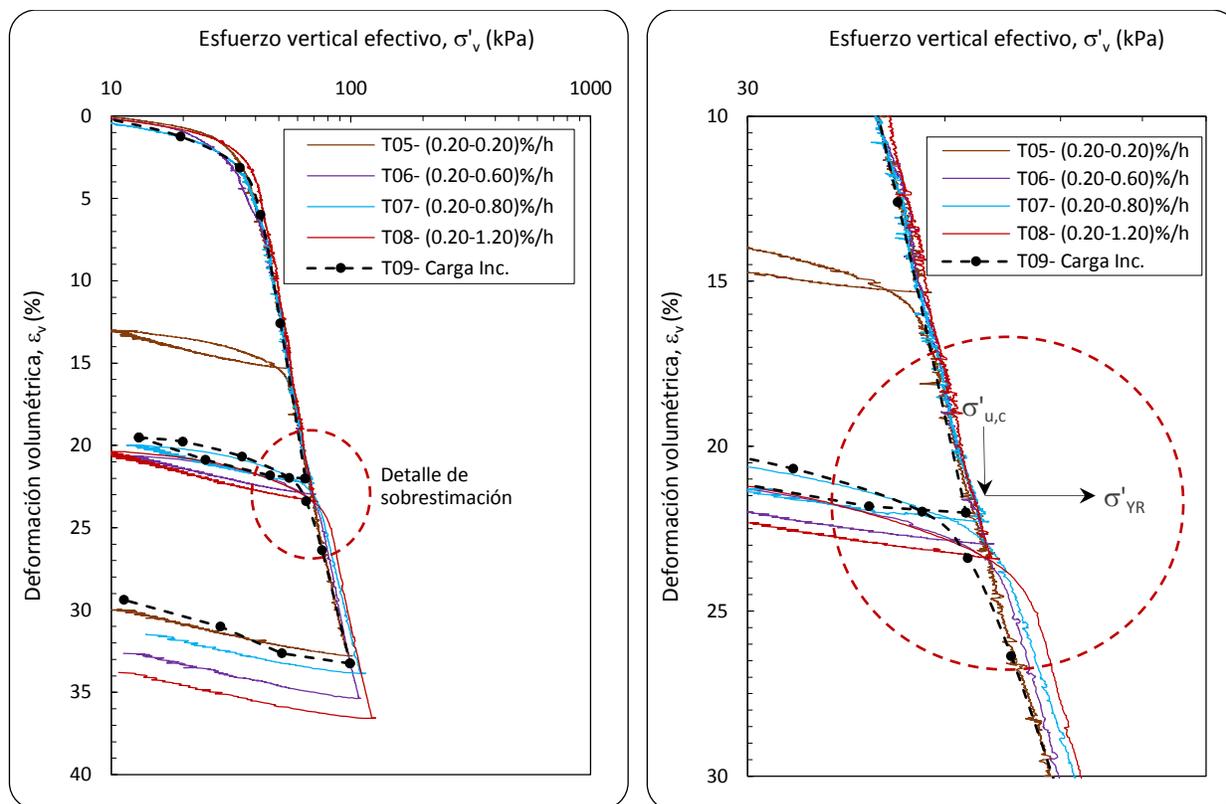


Figura 4.11 Curvas de compresibilidad a) del grupo G2 (izquierda) y b) detalle de sobrestimación (derecha)

Con el fin de presentar en forma gráfica la influencia de la subestimación o sobrestimación del esfuerzo de preconsolidación de campo, se emplearon los resultados del grupo G1 y G2 donde a cada ensayo se estimó el valor del esfuerzo de fluencia en la rama de compresión y en la recompresión, σ'_Y y σ'_{YR} , respectivamente. En este sentido, la literatura conduce que en una prueba de carga incremental el valor del esfuerzo de preconsolidación de la etapa de recarga dividido entre el esfuerzo efectivo último en la etapa de carga es cercano a 1 ($\sigma'_{pcr} / \sigma'_{u,c}$). Datos experimentales de varios autores muestran que la relación de esfuerzos anterior está comprendido para el siguiente rango $1.00 \leq \sigma'_{pcr} / \sigma'_{u,c} \leq 1.10$ (Wissa *et al.*, 1971; Garrido, 2006; Acevedo, 2014). Por otra parte, Umar *et al.*, 2016 presentó resultados de una serie de ensayos CRS donde compara el esfuerzo de preconsolidación en la etapa de recarga obtenido mediante el método semilogarítmico de Casagrande con respecto al esfuerzo vertical último aplicado en la etapa de carga, obteniendo una relación de esfuerzos de hasta $\sigma'_{pcr} / \sigma'_{u,c} \approx 1.30$. Para el caso en estudio, se seleccionaron las pruebas T01 y T03 del grupo G1 y las pruebas T05 a la T08 del grupo G2 donde se graficó la relación de esfuerzos $\sigma'_{YR} / \sigma'_{u,c}$ la cual se muestra en la Figura 4.12.

El nivel de ajuste que aparece dentro del gráfico se representa por la línea punteada y envuelve a todas las velocidades que se emplearon en las pruebas CRS. Partiendo de la ecuación descrita dentro del gráfico, se selecciona el valor objetivo de la relación $\sigma'_{YR} / \sigma'_{u,c} \approx 1.00$ y se obtiene una velocidad de deformación constante de $\dot{\epsilon}'_v = 0.23 \text{ \%}/\text{h}$. Esta velocidad representa que para esa tasa de deformación debe existir convergencia entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de preconsolidación ($\sigma'_Y \approx \sigma'_{pc}$) para la etapa de

carga y similitud entre el esfuerzo efectivo último y el esfuerzo de fluencia en la recompresión ($\sigma'_{u,c} \approx \sigma'_{YR}$), como se observó en las curvas de compresibilidad del grupo G1 y G2 (Figura 4.4 y 4.11). Figura 4.11).

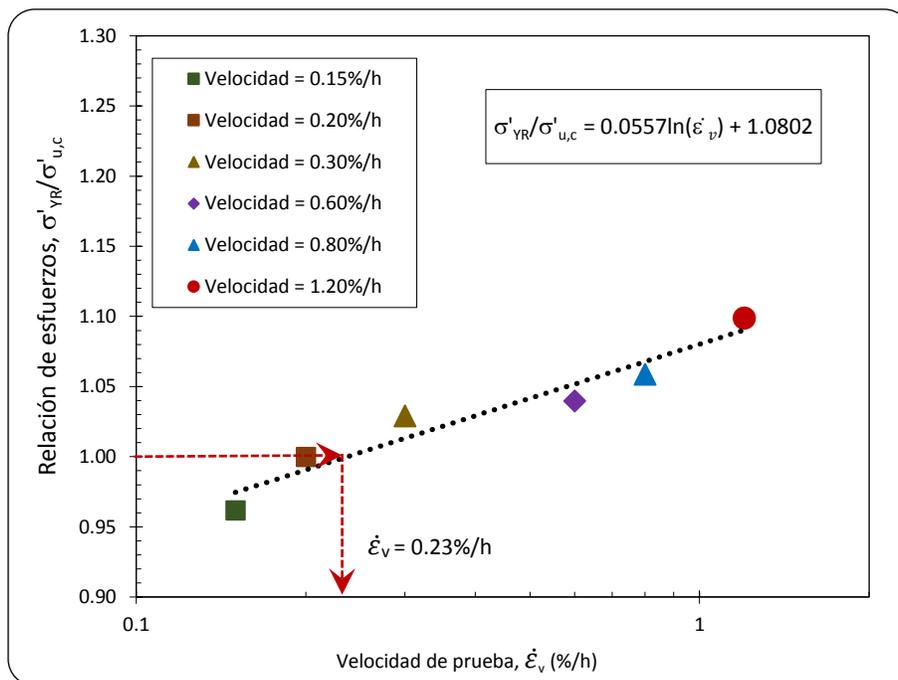


Figura 4.12 Sobreestimación de σ'_{YR}/σ'_u

Los valores numéricos empleados para el gráfico la Figura 4.12, se presenta en la Tabla 4.4. Para indicar la sub o sobrestimación del esfuerzo de fluencia con respecto al esfuerzo axial del grupo G1 se empleó como parámetro de referencia el esfuerzo de preconsolidación obtenido de la etapa de carga debido a que esta serie de pruebas se realizó para una condición de velocidad $\dot{\epsilon}_{v1} = \dot{\epsilon}_{v2}$. En el caso del grupo G2 el efecto de sobrestimación se midió con base al esfuerzo de fluencia de la etapa de recarga dividido entre el esfuerzo efectivo último de la etapa de carga ya que en esta serie de pruebas la condición de velocidad $\dot{\epsilon}_{v1} \leq \dot{\epsilon}_{v2}$.

Tabla 4.4 Relación de esfuerzos de fluencia entre el esfuerzo efectivo último de la etapa de carga.

Grupo	Velocidad de deformación	Esfuerzo efectivo último de carga	Esfuerzo de fluencia	Relación de esfuerzos
	$(\dot{\epsilon}_{v1} - \dot{\epsilon}_{v2})$ %/h	$\sigma'_{u,c}$ kPa	σ'_{YR} kPa	$\sigma'_{YR} / \sigma'_{u,c}$
G1	(0.15-0.15)	54.50	52.42	0.962
	(0.20-0.20)	54.50	54.75	1.004
	(0.30-0.30)	54.50	56.12	1.029
	C.I	54.50	54.50	1.000
G2	(0.20-0.20)	53.00	53.00	1.000
	(0.20-0.60)	69.19	71.94	1.040
	(0.20-0.80)	68.37	72.39	1.059
	(0.20-1.20)	70.24	77.19	1.099
	C.I	64.60	64.60	1.000

Los resultados de pruebas CRS en arcillas de la Ciudad de México reportados por Romero (2017) indican que hay similitud entre el esfuerzo σ'_{pc} y σ'_{YR} para el rango de velocidad comprendido entre $0.033 < \dot{\epsilon}_v < 0.50\%/h$, mientras que López (2002) reportó convergencia entre dichos esfuerzos para una tasa de deformación constante de $0.35 < \dot{\epsilon}_v < 0.61\%/h$. Por otra parte, para arcillas de Ottawa Crawford (1965) concluyó que la convergencia entre las pruebas CRS y de CI se obtiene para tasas de deformación muy bajas; determinó que la relación $\sigma'_v/\sigma'_{pc} = 1.0$ para la velocidad de $\dot{\epsilon}_v = 0.16\%/h$. Sin embargo, Mesri *et al.*, 1992 obtuvo valores de $\sigma'_v/\sigma'_{pc} \approx 1.0$ empleando una velocidad de prueba $\dot{\epsilon}_1 = 10\dot{\epsilon}_p$, donde $\dot{\epsilon}_p$ está en función del coeficiente de permeabilidad, índice de compresión, índice de compresión secundaria, peso volumétrico del agua y el esfuerzo de preconsolidación obtenidos para un nivel de esfuerzos $\sigma'_v = \sigma'_{pc}$.

4.3.4 Comportamiento visco plástico

Existe una dependencia entre el esfuerzo efectivo–deformación volumétrica–velocidad de prueba, tal como lo demostró Leroueil *et al.*, 1985 (Figura 4.13). Para velocidades rápidas el esfuerzo efectivo axial aplicado a una muestra es mayor si se compara con una velocidad de prueba menor al mismo nivel de deformación volumétrica. Lo anterior implica que exista una disminución gradual en el esfuerzo efectivo conforme se disminuye la velocidad de prueba sometida a cierto grado de deformación volumétrica.

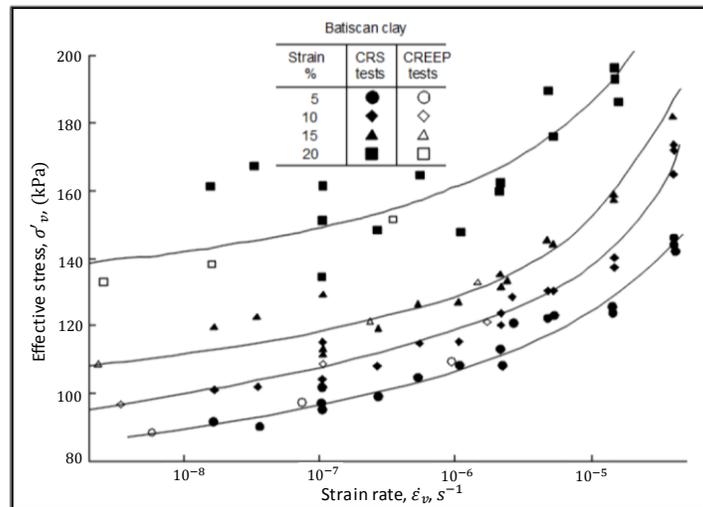


Figura 4.13 Variación de esfuerzo efectivo-velocidad de deformación a diferentes velocidades para arcilla Batiscan (Leroueil *et al.*, 1985)

El comportamiento de la arcilla del ex lago de Texcoco presenta un muy buen ajuste para la relación de $\sigma'_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$, como se indica en la Figura 4.14. De las pruebas T05 a la T08 se seleccionaron las deformaciones volumétricas al 24, 26, 28, 30 y 32% y el respectivo esfuerzo efectivo para ese nivel de deformación. Si comparamos la velocidad de prueba de 0.20 y 1.20%/h para un nivel de deformación volumétrica de 32%, se deduce que la prueba más rápida aplica un esfuerzo efectivo mayor en 12% con respecto a la prueba más lenta, por lo que esta variación va disminuyendo si se selecciona la velocidad de 0.60 o 0.80%/h. En general, se traza una envolvente de deformación volumétrica que intersecta a las diferentes tasas de deformación de prueba, así como el respectivo nivel de esfuerzo efectivo alcanzado σ'_v .

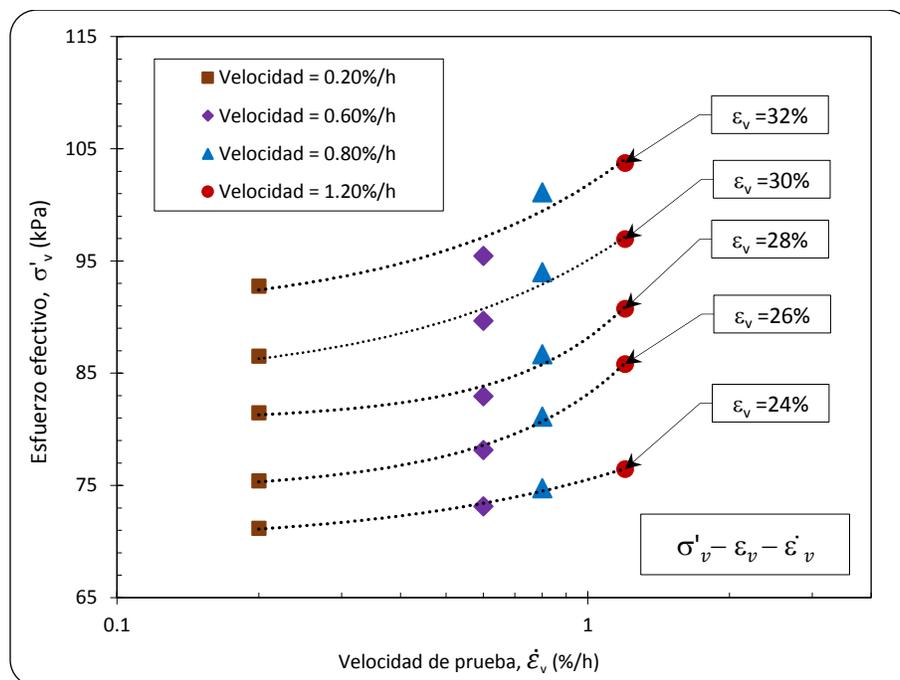


Figura 4.14 Relación esfuerzo-deformación-velocidad de prueba, $\sigma'_v - \varepsilon_v - \dot{\varepsilon}_v$

4.3.5 Efecto de la presión de poro

La aplicación de la carga axial para los ensayos CRS es continua y de magnitud creciente conforme aumenta el tiempo para todos los ensayos, esto provoca que el exceso de la presión de poro u_b medido en la base no drenante también tenga una respuesta en aumento, como se indica en la Figura 4.15. Para las pruebas T05 a la T08 el primer ciclo de carga y descarga presentan para fines prácticos el mismo exceso de presión de poro debido a que se sometieron a la velocidad de $\dot{\varepsilon}_v = 0.20\%/h$. Posteriormente, la prueba T05 indica continuidad en la pendiente para la etapa de recarga ya que continuó con la misma velocidad de prueba, sin embargo, las pruebas T06 a la T08 se observa que la pendiente de la presión de poro en exceso incrementa siendo el caso más crítico para la velocidad de $\dot{\varepsilon}_v = 1.20\%/h$.

Por otra parte, el exceso de la presión de poro se graficó con respecto a la relación de vacíos para cada muestra en sus etapas de carga y recarga, como se presenta en la Figura 4.16. A pesar de que la relación e de las muestras tiene una variación entre 4.5 y 6.50, el grado de inclinación de las pendientes para la etapa de carga (para la velocidad $\dot{\varepsilon}_v = 0.20\%/h$) para fin práctico es similar, esto implica que a pesar a tener relaciones de volumétricas diferentes previas al ensayo no es un factor de gran influencia si las pruebas se someten a la misma tasa de deformación.

En el caso de las pruebas T06 a la T08 al iniciar la etapa de recarga presenta un incremento de la presión u_b de forma curva que posteriormente se vuelve lineal. Esta curvatura se genera en un intervalo donde la relación de vacíos se encuentra en la recompresión del suelo, es decir, para valores de e menores donde se localiza el esfuerzo de fluencia.

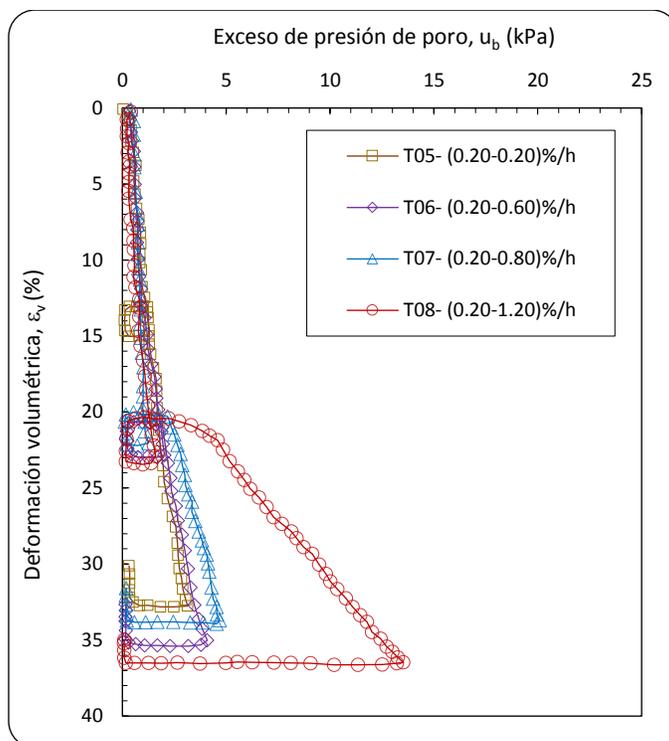


Figura 4.15 Exceso de presión de poro u_b del grupo G2

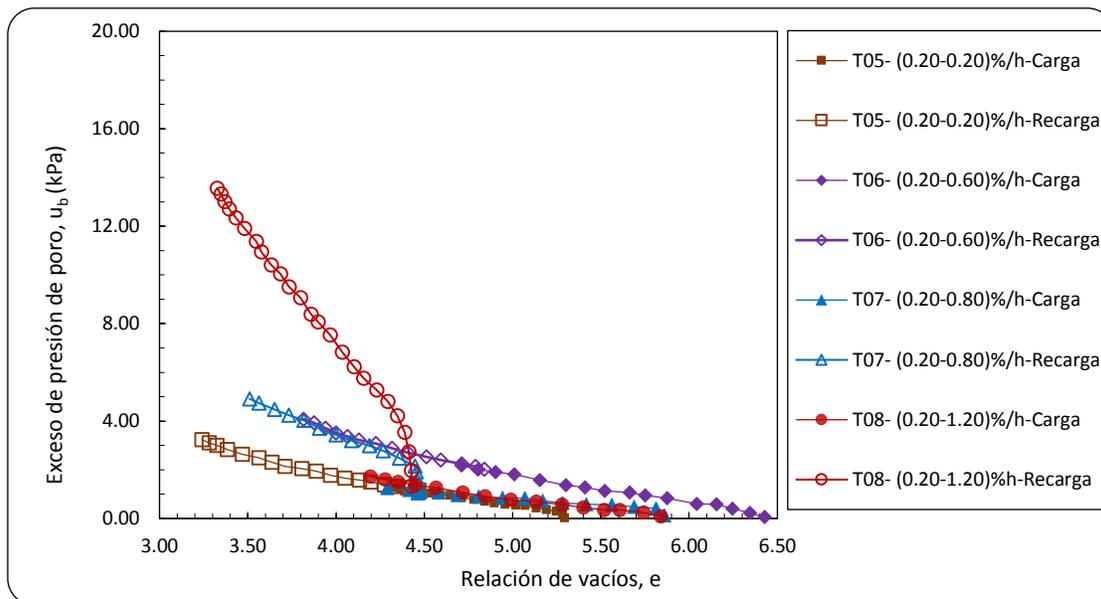


Figura 4.16 Exceso de presión de poro u_b del grupo G2 con relación a e

Con las curvas de la Figura 4.15 se determinó la relación hidrodinámica que se constituye por el exceso de la presión de poro, la deformación volumétrica y la velocidad de prueba, $u_b - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$. Para observar este comportamiento se fijó la deformación volumétrica al 22, 26, 30 y 32% y la respectiva magnitud de u_b . El resultado se indica en la Figura 4.17 con envolventes que intersectan a las velocidades aplicadas para diferentes niveles de la deformación ϵ_v .

Resulta de interés observar que para velocidades comprendidas entre 0.20 a 0.60%/h el exceso de la presión de poro no tiene aumento significativo con respecto a la velocidad de 0.15%/h; sin embargo, para la velocidad de 0.80%/h presenta una sobrestimación de hasta el 50% del u_b y un valor de 350% para la velocidad de 1.20%/h si se fija la velocidad más lenta como punto de comparación.

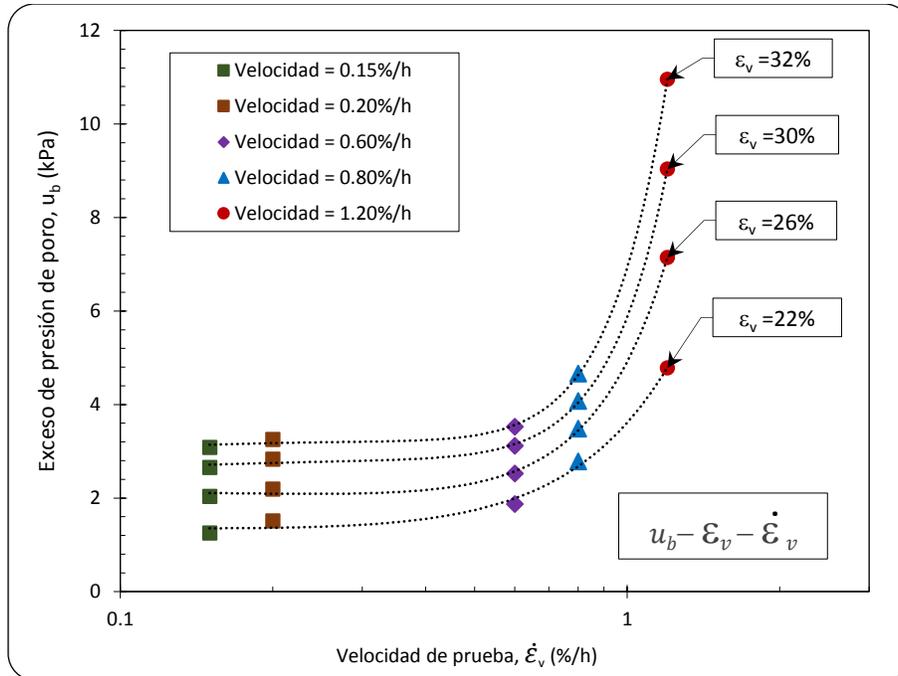


Figura 4.17 Relación hidrodinámica $u_b - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$

Varias investigaciones (Smith *et al.*, 1969; Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1976; Gorman, 1981; Mendoza *et al.*, 1997; López, 2002; entre otros) han conducido que se debe de limitar el exceso de la presión de poro que se genera durante el ensaye para tener un comportamiento adecuado de los parámetros de compresibilidad en los ensayos CRS con respecto a los de CI. En este contexto, la norma ASTM D-4186 ha establecido que la velocidad a elegir debe ser tal que el valor del exceso de la presión de poro con respecto al esfuerzo vertical aplicado no debe ser mayor al 30%.

En la Figura 4.18 se presenta la presión hidráulica que se desarrolla dentro de la muestra con respecto al esfuerzo total aplicado para la etapa de carga. La relación u_b/σ_v que se obtuvo de las pruebas T05 a la T08 inician con un valor de hasta 12% que posteriormente se atenúa para un magnitud alrededor del 2% para la velocidad de $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$. Este comportamiento se debe a que en el inicio de la prueba el esfuerzo total aplicado es muy susceptible a cualquier cambio en el exceso de la presión de poro y conforme avanza el ensayo el esfuerzo axial es de mayor magnitud en comparación con el registro de la presión u_b .

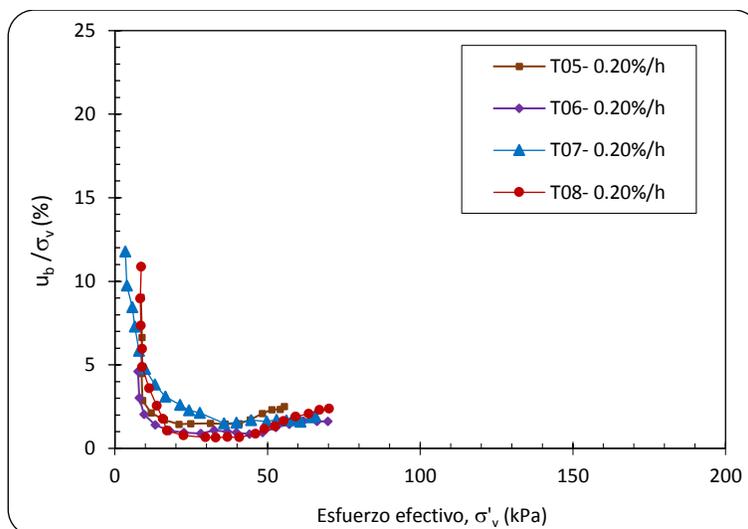


Figura 4.18 Relación de u_b/σ_v con respecto a σ'_v en la etapa de carga

Por otra parte, en la etapa de recarga se observa que a mayor velocidad mayor magnitud se tiene en la relación u_b/σ_v como se indica en la Figura 4.19. Es importante señalar que la prueba T08 presenta un ligero aumento después de alcanzar un esfuerzo efectivo de 80 kPa, dicho efecto se debe a que la muestra se encuentra en una zona de transición en el cual el esfuerzo axial está cercano al esfuerzo de fluencia por lo que la susceptibilidad de la presión de poro afecta de forma significativa pero, posteriormente se estabiliza hacia un valor de $u_b/\sigma_v = 11\%$ cuando la muestra experimenta la compresión virgen.

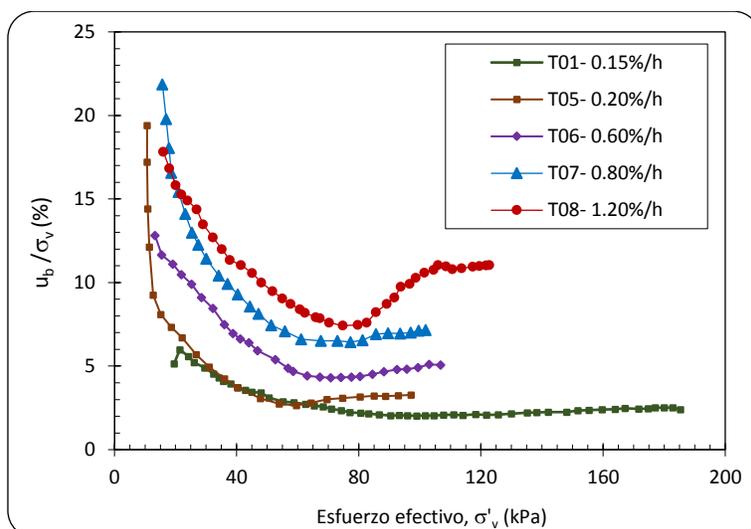


Figura 4.19 Relación de u_b/σ'_v con respecto a σ'_v en la etapa de recarga

En las pruebas T01 y la T05 a la T07 la estabilización del cociente u_b/σ_v se obtuvo de forma uniforme a causa de la similitud que existe del exceso de la presión de poro en la etapa de carga y de la recarga (Figura 4.15), en este sentido se induce que a velocidades menores de 0.80%/h la sobrestimación del exceso de presión u_b no afecta el desarrollo u_b/σ_v a lo largo del esfuerzo efectivo aplicado.

La Tabla 4.5 presenta el resumen de la relación u_b/σ_v de cada ensayo para la etapa de carga y de recarga. Cabe señalar que se seleccionó el valor u_b/σ_v después de alcanzar el esfuerzo de fluencia donde el exceso de la presión de poro está estabilizada con respecto al esfuerzo axial aplicado. Los resultados reportados indican que se obtuvo la relación $u_b/\sigma_v < 3.0\%$ en la etapa de carga para velocidades menores a $0.30\%/h$ y la relación $2.07 \leq u_b/\sigma_v \leq 11.04\%$ para velocidades entre una rango de 0.15 a $1.20\%/h$.

Tabla 4.5 Máxima relación u_b/σ_v .

Grupo	Prueba	Velocidad de deformación	Relación u_b/σ_v en la etapa de carga	Relación u_b/σ_v en la etapa de recarga
		$(\dot{\epsilon}_{v1} - \dot{\epsilon}_{v2})$ %/h	u_b/σ_v (%)	u_b/σ_v (%)
G1	T01	(0.15-0.15)	1.78	2.07
	T02	(0.20-0.20)	1.89	3.58
	T03	(0.30-0.30)	2.44	----
G2	T05	(0.20-0.20)	2.34	3.27
	T06	(0.20-0.60)	1.60	5.07
	T07	(0.20-0.80)	2.30	7.15
	T08	(0.20-1.20)	2.36	11.04

Por otra parte, se presenta un breve resumen del valor $(u_b/\sigma_v)_{\max}$ de varios autores obtenido para las tasas de deformaciones indicadas (Tabla 4.6). Es importante señalar que los valores reportados en la tabla provienen de arcillas inalteradas y remoldeadas, de un proceso de sedimentación diferente (lacustre o marino), por consiguiente, sus propiedades índices varían y en algunas pruebas no se pudo aseverar que antes de iniciar el ensayo la muestra se encontraba completamente saturada (Mendoza *et al.*, 1996) y, además, otros autores (Crawford, 1964; Amit *et al.*, 2014) aplicaron dos tasas de deformación para el primer ciclo de carga; con un valor de $\dot{\epsilon}_{v1}$ al llegar al esfuerzo de fluencia y continuar con otro valor $\dot{\epsilon}_{v2}$ para el tramo de compresión virgen. Sin embargo, se toman los valores referenciados para hacer una comparación con la presente investigación, en la cual se concluye que el valor de $(u_b/\sigma_v)_{\max}$ para la arcilla del valle de México algunos autores han reportado hasta un valor de $u_b/\sigma_v \approx 25\%$ para una tasa de deformación de $0.033 \leq \dot{\epsilon}_v \leq 1\%/h$.

Tabla 4.6 Exceso de presión de poro de varios autores

Autor	Año	Velocidad de prueba	Exceso de presión de poro en contra del esfuerzo aplicado
		$\dot{\epsilon}_v$ (%/h)	u_b/σ_v (%)
Hamilton y Crawford	1959	0.3, 4.5 y 9.0	No medido
Crawford	1964	4.0, 7.0 y 14.0	5.0 a 8.0
Crawford	1965	0.16 a 8.0	0.90 a 15.0
Smith y Wahls	1969	0.144 a 14.4	1.0 a 85.0
Wissa et al.	1971	0.57 y 2.88	2.0 a 5.0
Leroueil et al.	1985	0.00612 a 14.4	No medido
Mendoza et al.	1996	0.67 y 2.24	≈ 2.50 a 27.0 *
Mesri et al.	1997	0.396 y 0.828	10.0 a 25.0
López	2002	0.35 a 1.0	≈ 21.0 *
Montes	2006	0.108 a 7.2	7.0 a 15.0
Pinzón	2007	0.36 a 0.54	< 10.0
Amit et al.	2014	(0.02 mm/min)	≈ 3.0 a 6.0
Khairul et al.	2016	2.4 a 24.0	0.7 a 6.1
Romero	2017	0.033 a 50	< 3.0

Valores tomados en forma aproximada de los gráficos

4.3.6 Parámetros de compresibilidad

Las curvas esfuerzo-deformación de pruebas CRS en arcillas han demostrado que el índice de compresión C_c es un parámetro de compresibilidad que es independiente, para fines prácticos, de la velocidad de deformación (Figura 4.20). En este sentido, el índice C_c resulta ser una propiedad inherente del suelo que se obtiene de igual valor sin importar si el ensaye se realiza a velocidades bajas o altas. Este efecto ha sido reportado por varios investigadores para diferentes arcillas marinas y lacustres (Sällfors, 1975; Leroueil *et al.*, 1985; Mesri *et al.*, 1992; Akagi *et al.*, 1995; Mendoza *et al.*, 1996; López, 2002; entre otros).

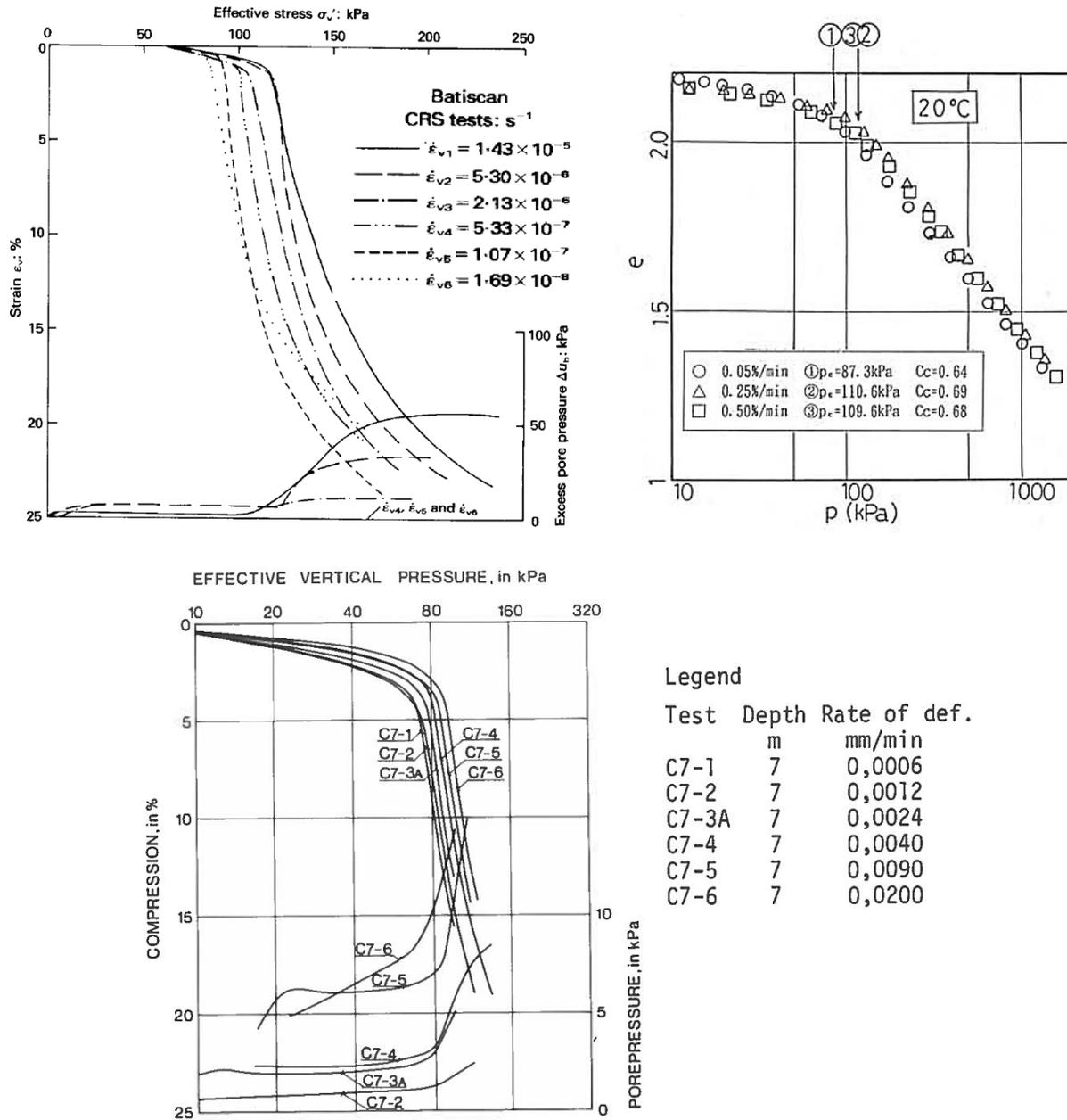


Figura 4.20 Curvas esfuerzo-deformación en pruebas CRS a diferentes velocidades para Leroueil *et al.*, 1985 (izquierda superior), Akagi *et al.*, 1995 (derecha superior) y Sällfors, 1975 (inferior).

En la Figura 4.20 (gráfico derecho) se indican los resultados obtenidos de la arcilla marina del Aeropuerto Internacional de Tokio que evalúa el comportamiento de la deformación del suelo en pruebas CRS. Akagi *et al.*, (1995) determinó que a pesar de emplear un rango de velocidad de 3 a 30%/h obtuvo una variación insignificante del índice C_c .

En un contexto similar, en las pruebas convencionales de carga incremental Bjerrum (1967) demostró que la deformación del suelo es función de la magnitud y tiempo de la aplicación del esfuerzo (Ossa, 2002), es

decir, la deformación diferida al suelo da un comportamiento esfuerzo-deformación paralelo para diferentes tiempos de aplicación de carga (Figura 4.21).

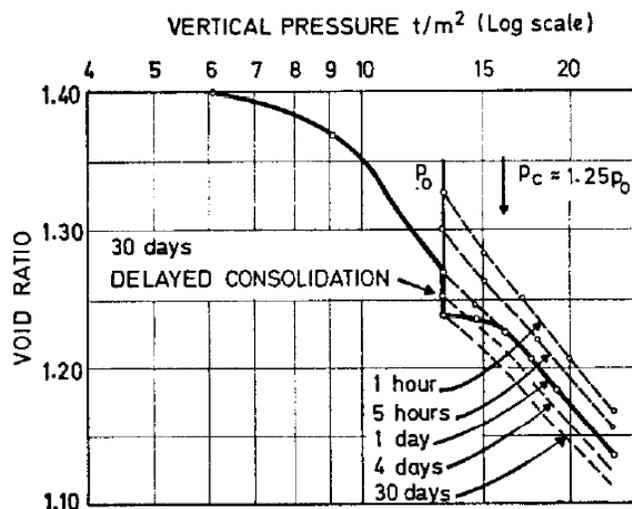


Figura 4.21 Prueba de laboratorio en arcilla plástica para demostrar el desarrollo de resistencia en contra de la compresión durante 28 días de consolidación diferida (Bjerrum, 1967)

El resumen del índice de compresión y expansión para el grupo G2 se indica en la Tabla 4.7. La variación que se obtuvo entre las pruebas CRS en comparación con la de CI es mínima, tanto para la etapa de carga como la descarga del ensayo, con esto se confirma el comportamiento descrito anteriormente.

Tabla 4.7 Resumen de índices de compresión y expansión.

Prueba	Velocidad	Índice de compresión	Índice de expansión	Índice de recompresión (recarga)	Índice de expansión (descarga)
	$\dot{\epsilon}_{v1} - \dot{\epsilon}_{v2}$ (%/h)	C_c	C_s	C_{cr}	C_{sr}
T05	0.20-0.20	5.744	0.200	4.500	0.196
T06	0.20-0.60	5.903	0.204	4.656	0.199
T07	0.20-0.80	5.665	0.201	4.128	0.176
T08	0.20-1.20	5.875	0.230	4.837	0.173
T09	C.I	5.625	0.223	4.285	0.254

Se determinó el coeficiente de consolidación C_v para los ensayos CRS mediante la metodología propuesta por Wissa *et al.*, 1971 que coincide con la obtenida por Smith *et al.*, 1969 para una condición de estado estable del flujo hidráulico y, para el caso de la prueba de carga incremental se realizó con base en lo indicado en la norma ASTM D 2435-96. Cabe señalar que existen autores (Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1981) que mencionan que el coeficiente C_v se debe de calcular cuando el exceso de presión de poro haya excedido los 3 kPa debido a que en el inicio de la prueba el valor de u_b es muy pequeño con lo

que proporcionaría resultados de C_v muy grandes (ecuación 1.15), sin embargo, con base a los resultados presentados de u_b (Figura 4.15) se determinó el coeficiente de consolidación desde el inicio de la prueba ya que la relación u_b/σ_v (Figura 4.18 y 19) no es tan distante por lo que se obtienen valores de C_v muy consistentes desde el inicio del ensayo.

La variación del coeficiente de consolidación para la etapa de carga se presenta en la Figura 4.22. Al iniciar la prueba, la susceptibilidad de la presión de poro en exceso rige fuertemente el comportamiento del coeficiente C_v , esto se traduce en la ligera dispersión que tienen las pruebas T05 a la T08 a pesar de estar sometido a la misma tasa de deformación. Después, conforme avanza el ensayo el esfuerzo efectivo es mucho mayor en comparación con el registro de la presión u_b , esto implica que se atenúen las curvas para esfuerzos efectivos cercanos al esfuerzo de fluencia del suelo. Por otra parte, si la velocidad prueba aplicada reproduce el comportamiento esfuerzo-deformación de la prueba de CI, se obtiene convergencia entre la curva del coeficiente de consolidación del ensayo CRS y de CI, es decir, se presenta una zona de concurrencia del coeficiente de consolidación para un nivel de esfuerzo similar $\sigma'_{pc} \approx \sigma_v$, esto se ha reportado por varios autores (Smith *et al.*, 1969; Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1981; Khairul *et al.*, 2016).

Las curvas del coeficiente C_v para la etapa de recarga presenta una distribución geométrica similar a la etapa de carga, sin embargo, su magnitud es mucho menor debido a que la muestra está sometida a un nivel de deformación volumétrica mayor (Figura 4.23). El incremento ΔC_v que se indica en el gráfico está en función del incremento del exceso de la presión de poro obtenido al aumentar la velocidad de prueba ($\dot{\epsilon}_{v1} \leq \dot{\epsilon}_{v2}$), esto conduce que a mayor presión u_b la curva del coeficiente C_v en la etapa de recarga decrezca al aumentar la velocidad de prueba. Por otra parte, se observa una continuidad de la curva del coeficiente C_v en la etapa de carga y recarga para un nivel de esfuerzos cercano a $\sigma'_{u,c} \approx \sigma'_{YR}$, debido a que en ese intervalo de esfuerzos la prueba registra un valor similar de u_b y de ϵ_v .

La Figura 4.24 ilustra la comparación del coeficiente de consolidación obtenido del grupo de ensayos G1 y G2. Nótese que para el grupo G2, las curvas del coeficiente C_v se graficó de forma continua, es decir, en la etapa de recarga se eliminaron los valores de C_v obtenidos cuando el esfuerzo efectivo es menor al esfuerzo de fluencia $\sigma'_v < \sigma'_{YR}$ (Figura 4.23), en este sentido se esquematiza únicamente el coeficiente C_v para esfuerzos efectivos en aumento a través del tiempo. De los resultados presentados se indica que C_v varía linealmente con respecto a σ'_v , tal como lo presentó Wissa *et al.*, 1971 y, que para velocidades comprendidas entre $0.15 \leq \dot{\epsilon}_v \leq 0.80\%/h$ la magnitud del coeficiente C_v es similar entre las pruebas CRS y de CI.

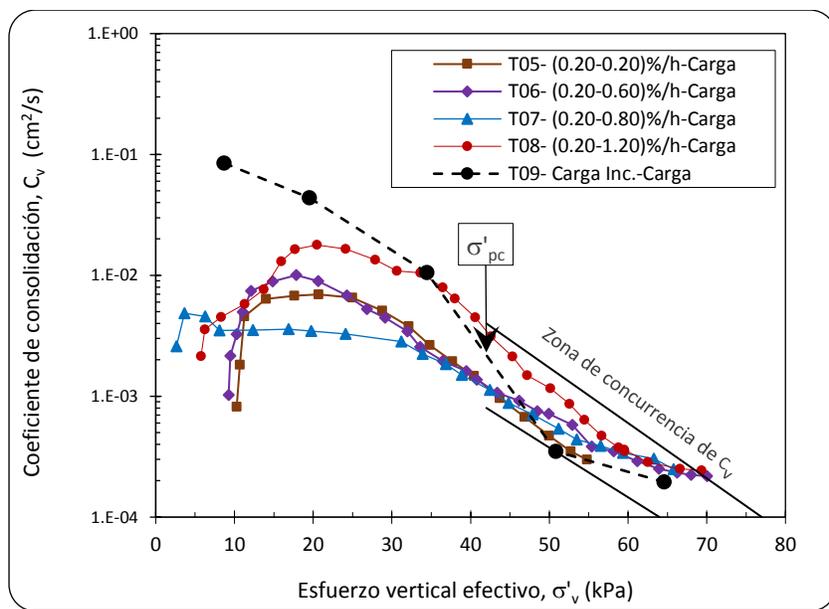


Figura 4.22 Coeficiente de consolidación C_v del grupo G1 en etapa de carga

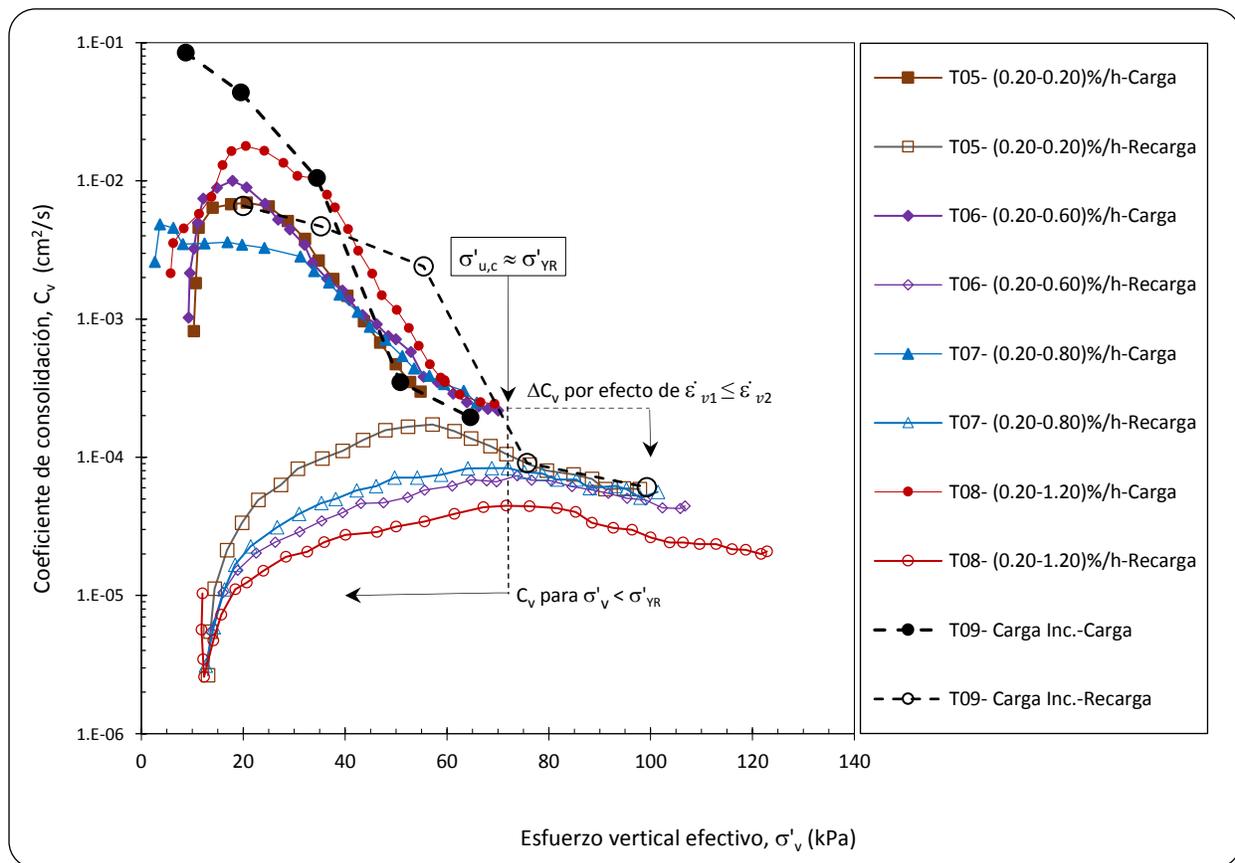


Figura 4.23 Coeficiente de consolidación C_v del grupo G2

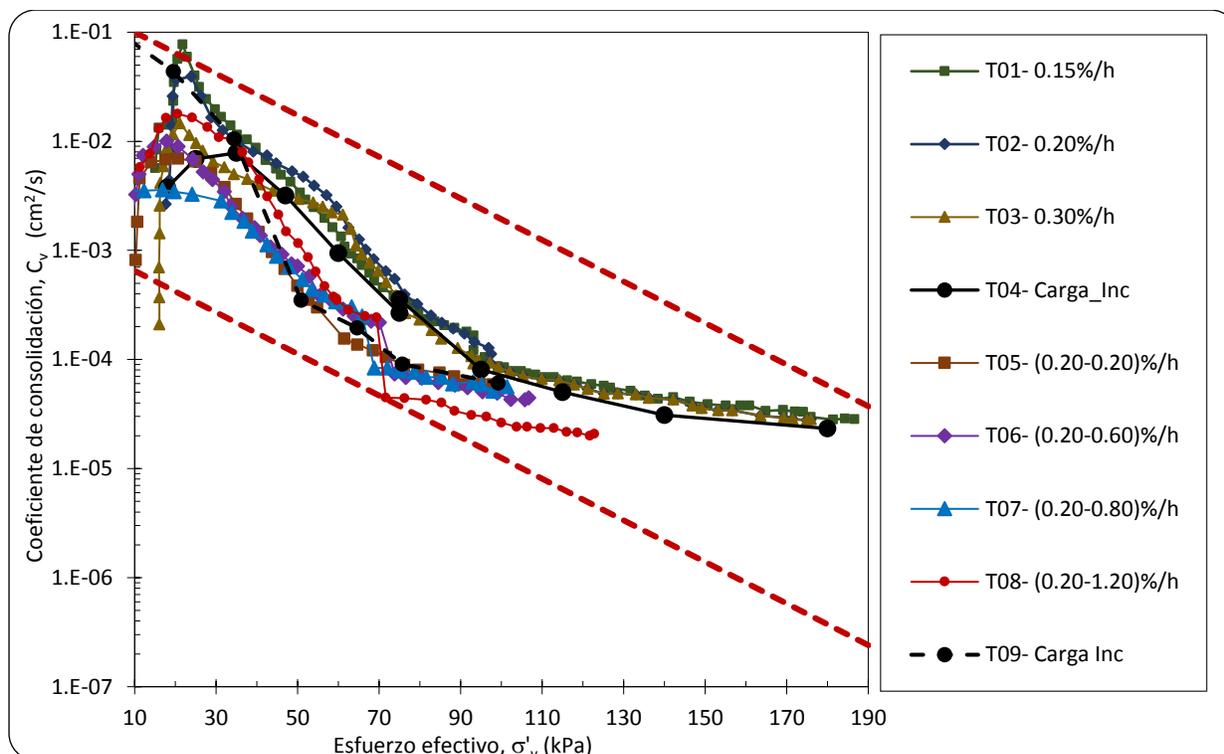


Figura 4.24 Comparación del coeficiente de consolidación C_v del grupo G1 y G2

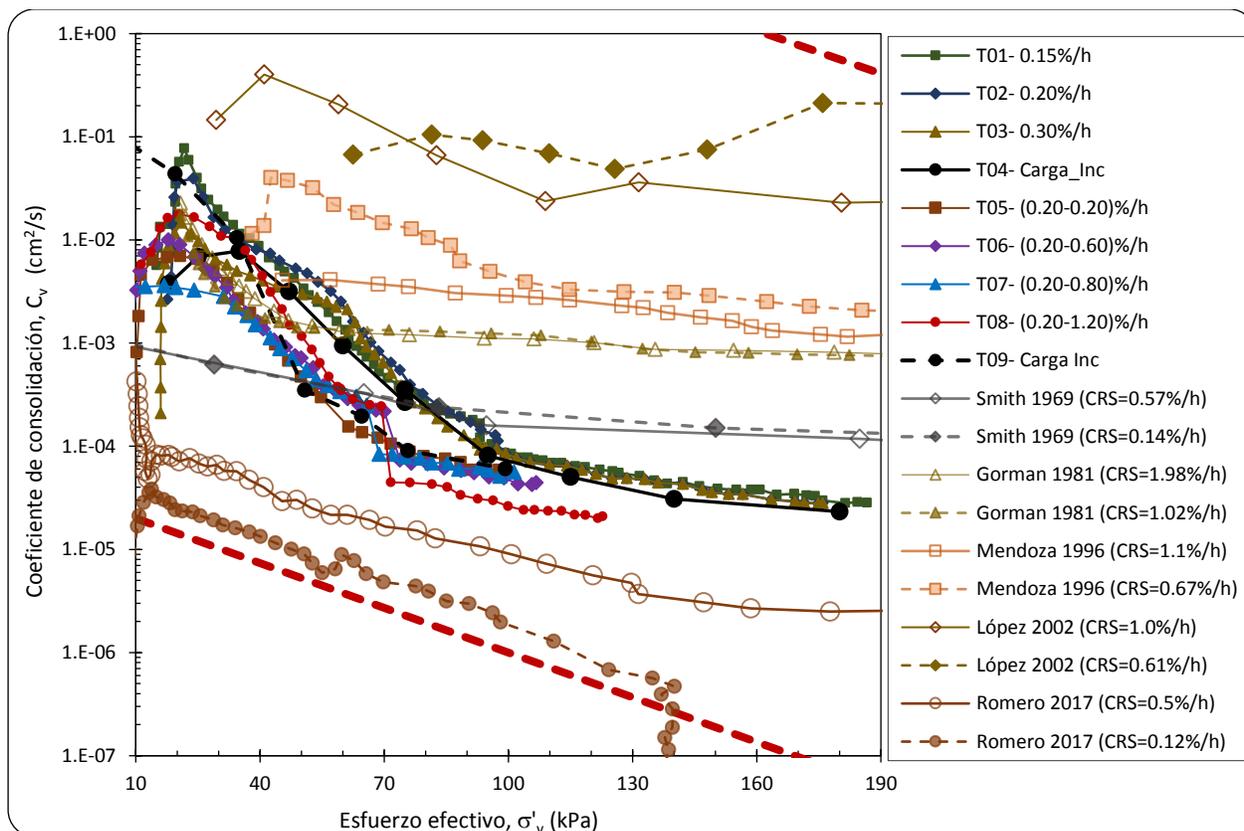


Figura 4.25 Comparación del coeficiente de consolidación C_v para diferentes arcillas

Diferentes coeficientes de consolidación determinados de varias arcillas se comparan en la Figura 4.25. Se remarca que los resultados reportados en el gráfico se determinaron con base a las teorías propuesta por Smith *et al.*, 1969 y la de Wissa *et al.*, 1971. Por otra parte, los materiales inalterados que se reportan son las arcillas del valle de México (Mendoza *et al.*, 1996; López, 2002; Romero, 2017) así como la arcilla de Florida, EEUU, para muestras remoldeadas (Gorman, 1981) y, además, calcio montmorillonita preparada en laboratorio (Smith *et al.*, 1969). Lamentablemente, los resultados presentados por Wissa *et al.*, 1971 están muy por encima de los valores del gráfico ($C_v > 10.0 \text{ cm}^2/\text{s}$), por lo cual se decidió no exponerlos a manera de comparación. Es importante señalar que el nivel de esfuerzos efectivos de prueba para todos los materiales que se presentan están por encima de los 200 kPa, llegando algunos autores hasta los 2000 kPa (Gorman, 1981), esto pone en evidencia el nivel bajo de esfuerzos efectivos aplicados a la arcilla blanda de la presente investigación, sin embargo, se pudo definir una franja delimitada por las líneas rojas que engloban los valores típicos de C_v en pruebas CRS para diferentes tasas de deformación.

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

A continuación se darán las aportaciones obtenidas del trabajo de investigación experimental, la cual se discretizó en los siguientes subtemas: instrumentación y calibración del consolidómetro neumático, el proceso de labrado y montaje de la prueba, la metodología experimental y la presentación de los resultados obtenidos.

Calibración y verificación del consolidómetro

- De acuerdo con el Anexo A, las verificaciones realizadas a los seis transductores (LVDT y de presión) reportan que se encuentran en óptimas condiciones para usarse, ya que el porcentaje de error total, tanto para los sensores de desplazamiento como para los de presión, son inferiores al 1%, además, la precisión de cada sensor es concluyente en la medición; presión de confinamiento (0.0122 kg/cm²), presión de poro (0.0080 kg/cm²), contrapresión (0.0083 kg/cm²), presión axial (0.011 kg/cm²), esfuerzo axial (0.011 kg/cm²) y desplazamiento (0.051 mm).

Metodología experimental

- La etapa de saturación se logró para todos los ensayos en un periodo cercano a las 24 horas; sin embargo, las muestras que presentaron un valor de B de Skempton inferior a 0.96 se aplicaron hasta dos incrementos más, quedando en el caso extremo un esfuerzo axial y de contrapresión con un valor de 360 y 350 kPa, respectivamente.

Análisis y presentación de resultados

- La comparación entre la velocidad de prueba objetivo y la velocidad aplicada se presenta en la Tabla 4.3 y de forma gráfica para cada prueba se indica en el Anexo B. La velocidad $\dot{\epsilon}_{v2}$ en la etapa de descarga del grupo G2 presentó una mínima variación con relación a la velocidad objetivo, siendo la condición más crítica la prueba T08, sin embargo, se concluye que la velocidad objetivo se aplicó de forma satisfactoria para todos los ensayos.
- El desarrollo del esfuerzo axial con respecto al tiempo presentó la misma tendencia geométrica para todos los ensayos (Figuras 4.3 a 4.14). Su variación estuvo dada únicamente por el tiempo de aplicación y magnitud, siendo mayor para las pruebas que se sometieron a una tasa de deformación rápida.
- Se determinó que la arcilla de la ciudad de México se encuentra fuertemente influenciada por la velocidad de prueba para un ensayo CRS, esto se ha externado por varios autores que determinaron que el esfuerzo de fluencia incrementa conforme aumenta la velocidad de prueba en el ensayo (Hamilton *et al.*, 1959; Crawford, 1964; Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1981; Mendoza, 1996; López, 2002; Ovando, 2011; entre otros).
- De la curva de compresibilidad obtenida del grupo G1 (Figura 4.4) y de los valores reportados en la Tabla 4.1 indica que la sobrestimación obtenida en el rango de velocidad aplicado para fines prácticos se encuentra dentro de las diferencias experimentales.
- El exceso de la presión de poro de las pruebas T01 a la T03 indica un comportamiento lineal ascendente a través del tiempo (Figura 4.5). La magnitud de u_b aumenta al incrementar la velocidad de prueba y para el caso de la descarga, la presión u_b decrece debido a que el esfuerzo aplicado tiende hacia la condición inicial del ensayo. En el caso de la prueba de CI, se indicó que la

presión u_b incrementa súbitamente cuando se aplica la carga, pero se disipa a través del tiempo hasta alcanzar una condición nula (Figura 4.6).

- En el sondeo G2 para la velocidad de prueba con la relación $\dot{\epsilon}_{v1} \leq \dot{\epsilon}_{v2}$ (Figura 4.11), se identificó en la etapa de carga la compatibilidad entre el esfuerzo de fluencia y el de preconsolidación para los ensayos CRS y de CI y, posteriormente, al aumentar la velocidad en la etapa de recarga, existe una respuesta mayor del esfuerzo efectivo para deformar linealmente a la muestra. En esta condición de ensayo se evaluó la sobreestimación del esfuerzo de fluencia en la recarga σ_{YR} de forma precisa, ya que su valor está relacionado con el esfuerzo efectivo último en la etapa de carga $\sigma_{u,c}$. Varios autores indican que en el ensayo de CI la relación de esfuerzos se define en el siguiente rango $1.00 \leq \sigma'_{pcr} / \sigma'_{u,c} \leq 1.10$ (Wissa *et al.*, 1971; Garrido, 2006; Acevedo, 2014) y, de forma similar sucede en los ensayos CRS.
- Seleccionar la tasa de deformación que reproduzca las características de compresibilidad del ensayo de CI en un ensayo CRS se puede realizar evaluando las propiedades índices (índice de plasticidad, grado de saturación) o restringiendo la relación de la presión de poro en exceso con respecto al esfuerzo total aplicado u_b / σ_v . Sin embargo, se optó por elegir la sobrestimación de esfuerzos $\sigma'_{YR} / \sigma'_{u,c}$ para cotejar dicha influencia a diferentes tasas de deformación. En este sentido, la velocidad de prueba $\dot{\epsilon}_v = 1.20\%/h$ sobrestima el esfuerzo de preconsolidación de campo en aproximadamente un 10% y, el mejor ajuste se tiene a la velocidad $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%/h$ ya que la sobrestimación σ'_v / σ'_{pc} es menor al 1% (Figura 4.12 y Tabla 4.4).
- Se definió el comportamiento visco plástico de la arcilla del ex lago de Texcoco que relaciona las variables esfuerzo efectivo, deformación volumétrica y velocidad de prueba $\sigma'_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ (Figura 4.14), que es coincidente a lo reportado por Leroueil *et al.*, 1985. Lo anterior indica que, para velocidades rápidas, la resistencia que opone el suelo a ser deformada es mayor en comparación con velocidades lentas.
- Las lecturas del exceso de presión de poro del grupo G2 permitió graficar la relación hidrodinámica $u_b - \dot{\epsilon}_v - \dot{\epsilon}_v$ (Figura 4.17). Se concluye que la respuesta u_b es mayor y de comportamiento lineal a través del tiempo y, para fines prácticos, su magnitud está ligada a la velocidad de prueba y no a la relación de vacíos (Figuras 4.7 y 4.16).
- La máxima relación de la presión de poro en exceso con respecto al esfuerzo total aplicado es de $u_b / \sigma_v \approx 11\%$ para la velocidad $\dot{\epsilon}_v = 1.20\%/h$, dicha relación disminuye al decrecer la velocidad del ensayo (Tabla 4.5). Se concluye que las pruebas CRS presentadas se encuentran comprendido dentro de los límites que se establece en la norma ASTM D-4186.
- El índice de compresión C_c es un parámetro de compresibilidad que es independiente, para fines prácticos, de la velocidad de deformación, lo cual conduce a ser una propiedad inherente del suelo que se obtiene de igual valor sin importar si el ensayo se realiza a velocidades bajas o altas (Tabla 4.7). Este efecto ha sido reportado por varios investigadores para diferentes arcillas marinas y lacustres (Leroueil *et al.*, 1985; Mesri *et al.*, 1992; Akagi *et al.*, 1995; Mendoza *et al.*, 1996; López, 2002; entre otros).
- El coeficiente de consolidación C_v está fuertemente influenciado por el exceso de presión de poro que se genera durante el ensayo, además, esta susceptibilidad es mayor cuando inicia el ensayo debido a que el nivel de esfuerzo efectivo y el exceso de la presión de poro son muy cercanos.
- En la Figura 4.22 se identificó que hay convergencia de C_v entre las pruebas CRS y CI cuando el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de preconsolidación tienden a ser el mismo $\sigma'_{pc} \approx \sigma'_v$, esto se ha

reportado por varios autores (Smith *et al.*, 1969; Wissa *et al.*, 1971; Gorman, 1981; Khairul *et al.*, 2016). Para que esta condición se dé, la velocidad aplicada debe ser baja para que no exista una sobrestimación considerable entre el esfuerzo de fluencia con respecto al esfuerzo de preconsolidación σ_v/σ'_{pc} .

- El tiempo que se optimiza en un ensaye CRS es considerablemente amplio con respecto a un ensaye de CI. La prueba a la velocidad de $\dot{\epsilon}_v = 0.20\%$ se obtuvo en 8 días en comparación al ensaye de carga incremental con una duración de 17 días. Esto representa que haya un ahorro de tiempo de hasta el 50%, para una sobrestimación casi nula de los parámetros de compresibilidad.
- Evaluando los comportamientos esfuerzo-deformación e hidrodinámico de los ensayos realizados, se sugiere que el rango de velocidad óptimo de pruebas CRS es de 0.15 a 0.60 %/h para arcillas normalmente consolidadas de la Ciudad de México.

5.2 Recomendaciones

Calibración y verificación del consolidómetro

- Se recomienda realizar las calibraciones y verificaciones en al menos al 80% de la capacidad del sensor o en su defecto, si se define previamente el nivel de esfuerzo y deformación de prueba, la calibración debe cubrir dichas magnitudes.

Metodología experimental

- Un buen proceso de extracción y de labrado de la muestra permite tener resultados satisfactorios durante el desarrollo de los ensayos. Se realizaron pruebas donde ligeramente las caras se resellaban con material para cubrir las imperfecciones realizadas durante el labrado, así como muestras que durante la etapa de extracción tenían fisuras de aproximadamente 15 mm, sin embargo, se determinó en forma consistente que el comportamiento de la compresibilidad se ve fuertemente influenciado cuando el material sufre alteraciones. Estas pruebas no se incluyen dentro del presente trabajo ya que la curva de compresibilidad obtenida no presentó un comportamiento lineal de $e-\log \sigma'_v$.

Análisis y presentación de resultados

- Existen principalmente dos teorías para estimar el comportamiento del coeficiente de consolidación en los ensayos CRS (Smith *et al.*, 1969; Wissa *et al.*, 1971). Para investigaciones futuras se recomienda realizar un análisis comparativo entre ellas y estimar si la diferencia es significativa para fines prácticos.
- En muestras remoldeadas la resistencia del suelo disminuye considerablemente en comparación a su estado inalterado. En este sentido, resultaría de interés definir un rango de velocidad que permita estimar compatibilidad entre el ensaye CRS y de CI.
- Se recomienda realizar pruebas CRS en arcillas ajenas a la ciudad de México y validar si efectivamente la relación hidrodinámica obtenida es independiente de la relación de vacíos.

Referencias

REFERENCIAS

- Acevedo, V. [2014]. Determinación experimental del índice de compresión en las arcillas del Valle de México y la relación que guarda con las propiedades índice. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería, UNAM.
- Alberro, A. J. [2006]. La consolidación de suelos visco plásticos, un análisis para asentamientos grandes. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Akagi, H. and Komiya, K. [1995]. Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature. *Proc. Int. Symp. On compression and consolidation of clayey soils* (eds H. Yoshikuni and O. Kusakabe), 1, pp: 3-8. Rotterdam: A. A. Balkema.
- Amit, P. and Vikash, G. (2014). Consolidation characteristics of clay using constant rate of deformation test. Golden Jubilee Conference of the IGS, Bangalore Chapter, Geo-Innovations.
- ASTM D 2435–96. One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
- ASTM D 4186–98. One-Dimensional Consolidation Properties of Soils using Controlled-Strain loading. Vol. 04-08.
- Bjerrum, L. [1967]. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as relates settlements of buildings. 7th Ranking Lecture. *Geotechnique* Vol. 17, No. 2, pp. 81-118.
- Crawford, C. B. [1964]. Interpretation of the Consolidation Test. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 90, No. SM5, Proc. Paper 4056, pp. 87-102.
- Crawford, C. B. [1965]. The Resistance of Soil Structure to Consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, Vol. 2, No. 2, pp. 90-115.
- Diaz, J., Leroueil, S., and Aleman, J. [1992]. Yielding of Mexico City clay and other natural clays. *J Geotech Engineering. Div., ASCE*, 118(7), pp. 981-9985.
- Garrido, G. [2006]. La consolidación de suelos: una revisión. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería, UNAM.
- GEEEC. [2018]. Equipos de instrumentación y control de procesos. Sitio web: <http://geeec.com/productos/equipos-de-instrumentacion-y-control-de-procesos/>
- Gorman, C.T. Constant-Rate Selection in the Constant-Rate-of Strain Consolidation Test. Research Report 556, Division of Search, Kentucky Department of Transportation.
- Hamilton, J.J. and Crawford, C.B. [1959]. Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay. Special Technical Publication No. 254. American Society for Testing and Materials, pp. 254-270.

- Head, K.H. [1985]. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 3. Effective Stress Tests, pp. 1129-1225.
- Hojjat, A., Hassan, R., Abbas, S., and Claes, A. [2014]. Experimental research on variation of pore water pressure in constant rate of strain consolidation test. ACTA Geotechnical Slovenica. Pp. 47 – 57.
- J. Premchitt, K.S Ho and N.C. Evans. [1996]. Conventional and CRS Rowe Cell Consolidation Test on Some Hong Kong Clays. Geo Report No. 55, 21p.
- Janbu N., Tokheim O. and Senneset K. [1981]. Consolidation tests with continuous loading. Proceeding of the 13th. International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm 1, pp. 645-654.
- Khairul, A.K., Ahmad, S.A.R., Ahmad., B.H.K., Chong, S.Y., and Lam, C.S. (2016). Criteria of acceptance for constant rate of strain consolidation test for tropical cohesive soil. Geotech Geol. Eng. Springer International Publishing Switzerland.
- Lajara, J. y Pelegrí, J. [2011]. LabVIEW Entorno gráfico de programación. Segunda Edición, Marcombo ediciones técnicas, España.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. y Bouchard, R. [1985]. Stress–strain–strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. Geotechnique 35, Number 2, pp. 159-180.
- López, O. [2002]. Compresibilidad unidimensional de la arcilla de la Ciudad de México bajo diferentes condiciones de carga y determinación del coeficiente K_0 . Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, UNAM.
- Lowe J., Jonas E., and Vladimir O. [1969]. Controlled Gradient Consolidation Test. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proc, paper 6327, pp. 77-97.
- Lowe, J. [1974]. New Concepts in Consolidation and Settlement Analysis. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 100, No. GT6, New York.
- Marsal, R. J. y Mazari, M. [1959]. “El Subsuelo de la Ciudad de México”. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza M. J., Ibarra E. Noriega I., y Orozco M. [1996]. Consolidación bajo velocidad constante de deformación, una técnica alternativa. XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, pp. 407-414.
- Mesri, G. and Feng, T.W. [1992]. Constant Rate of Strain Consolidation Testing of Soft Clays. Vol. Raúl Marsal, pp. 49-59, SMMS, México D.F.

- Mesri, G., J. E. Hedié, and M. Shahien. [1997]. Geotechnical Characteristics and Compression of Pisa Clay. Proceedings, 14th International Conference in Soil.
- Montes (2006). Comportamiento visco-plástico de la arcilla de la ciudad de México bajo condiciones de deformación controlada. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ovando, E. Shelley. [2011]. Some geotechnical properties to characterize Mexico City Clay. Proceedings of the -14th Panamerican conference of soil mechanics and geotechnical engineering. Paper 889, Canadian Geotechnical society.
- Ossa, L. [2004]. Modelo elastoviscoplastico (EVP) para el estudio de la consolidación unidimensional de los suelos. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ozer AT, Lawton EC, Bartlett SF. (2012). New method to determine proper strain rate for constant rate-of-strain consolidation tests. Can Geotech J 49(1):18-26.
- Pinzón (2007). Comportamiento visco plástico del suelo en pruebas de consolidación a velocidad de desplazamiento constante, aplicadas a la determinación de la permeabilidad. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Romero (2017). Compresibilidad del subsuelo de la ciudad de México mediante ensayos de velocidad de deformación constante. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México
- Rowe, P.W. and Barden, L. [1966]. A new consolidation cell. Geotechnique, Vol.16, No.2, pp.162-170.
- Salazar, C. [2014]. Automatización de un consolidómetro neumático. Tesis para obtener el grado de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.
- Sällfors G. [1975]. Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology. pp. 231.
- Smith, R. E., and Wahls, H. E. [1969]. Consolidation Under Constant Rates of Strain. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 95, No. SM2.
- Terzaghi, Karl Von. (1925). Erdbaumechanik, Ed. Deuticke, Viena.
- Umar, Muhammad y Sadrekarimi, Abouzar. [2016]. Accuracy of determining pre-consolidation pressure from laboratory tests. Canadian Geotechnical Journal, pp. 1-34.
- Vikash, G. [2013]. A new CRS consolidation theory and a compressibility model for Kaolin clay with microfabric effects, Ph.D Thesis, Indian Institute of Technology Kanpur.

- Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S. [1971]. Consolidation at Constant Rate of Strain. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 97, No. SM10, New York.
- Zeevaert, L. (1972). Foundation engineering for difficult subsoil conditions. Van Nostrans-Reinhold Co., New York.

ANEXO A Calibración y verificación de sensores

1. Calibración, verificación y precisión del sensor de contrapresión

Tabla A.1 Registro de presiones para la calibración del sensor de contrapresión

COTRAPRESIÓN	
Voltaje V volts	Presión P kg/cm ²
0.018	0.000
0.673	0.458
1.469	1.020
2.271	1.583
3.067	2.144
3.855	2.700
4.647	3.265
5.445	3.833
6.222	4.388

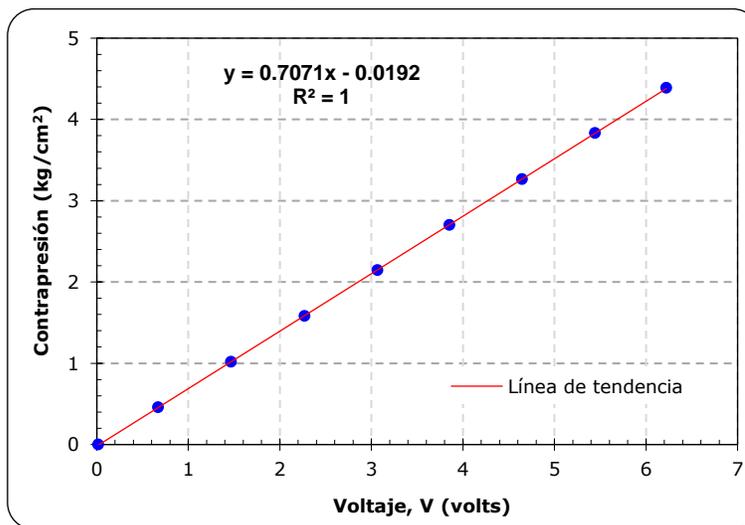


Figura A.1 Curva de calibración del sensor de contrapresión

Tabla A.2 Registro de presiones para la verificación del sensor de contrapresión

CONTRAPRESIÓN	
Presión patrón Pp kg/cm ²	Presión sensor Ps kg/cm ²
0.000	-0.007
0.462	0.461
0.970	0.968
1.474	1.476
1.981	1.986
2.477	2.484
2.985	2.990
3.496	3.496
4.003	3.999
4.503	4.495

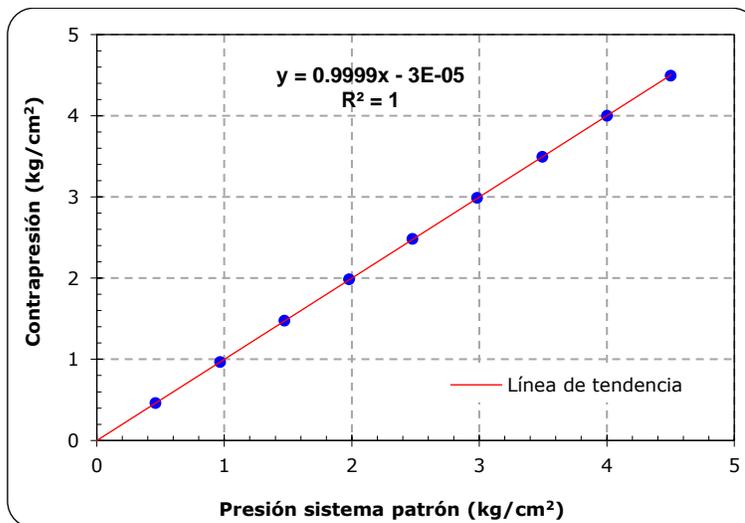


Figura A.2 Curva de verificación del sensor de contrapresión

Tabla A.3 Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de contrapresión

CONTRAPRESIÓN					
Presión patrón	Presión sensor	Precisión	Error parcial	Error total	Tolerancia
Pp kg/cm ²	Ps kg/cm ²	Pp-Ps kg/cm ²	$\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{P_{patrón}}$ (%)	$\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{Cap_{sensor}}$ (%)	$\frac{ Dif_{mayor} \times 100}{P_{patrón}}$ (%)
0.000	-0.007	0.007	---	---	---
0.462	0.461	0.001	0.302	0.020	1.790
0.970	0.968	0.002	0.159	0.022	0.854
1.474	1.476	0.002	0.138	0.029	0.561
1.981	1.986	0.005	0.247	0.069	0.418
2.477	2.484	0.007	0.266	0.094	0.334
2.985	2.990	0.005	0.182	0.077	0.277
3.496	3.496	0.000	0.007	0.003	0.237
4.003	3.999	0.004	0.098	0.056	0.207
4.503	4.495	0.008	0.184	0.118	0.184

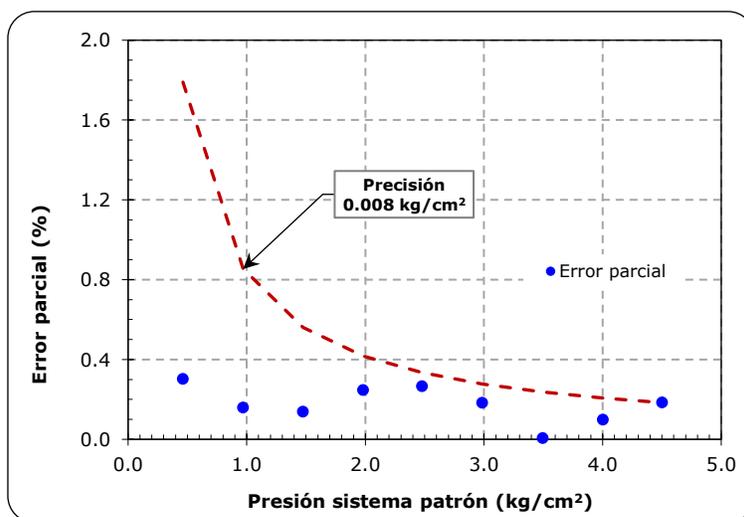


Figura A.3 Curva de error parcial del sensor de contrapresión

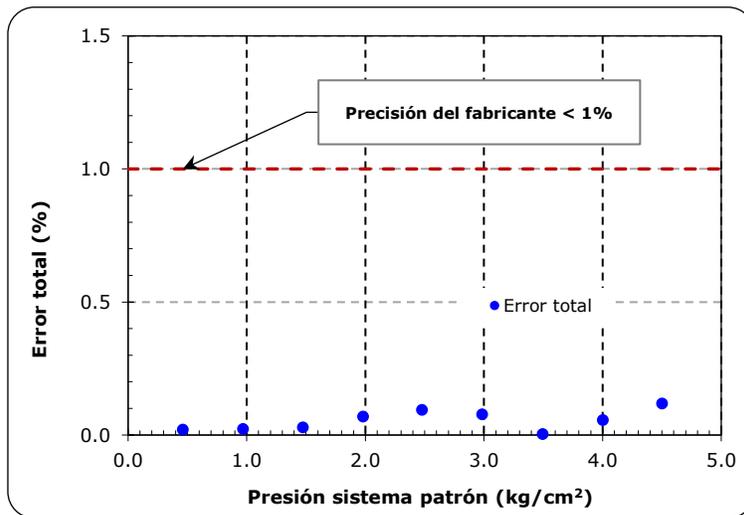


Figura A.4 Curva de error total del sensor de contrapresión

2. Calibración, verificación y precisión del sensor de presión de línea (confinamiento)

Tabla A.4 Registro de presiones para la calibración del sensor de presión de línea

CONFINAMIENTO	
Voltaje	Presión
V volts	P kg/cm ²
-4.977	0.0
-4.175	0.6
-3.641	0.9
-3.029	1.4
-2.161	2.0
-1.338	2.5
-0.697	3.0
-0.058	3.4
0.709	4.0
1.302	4.4

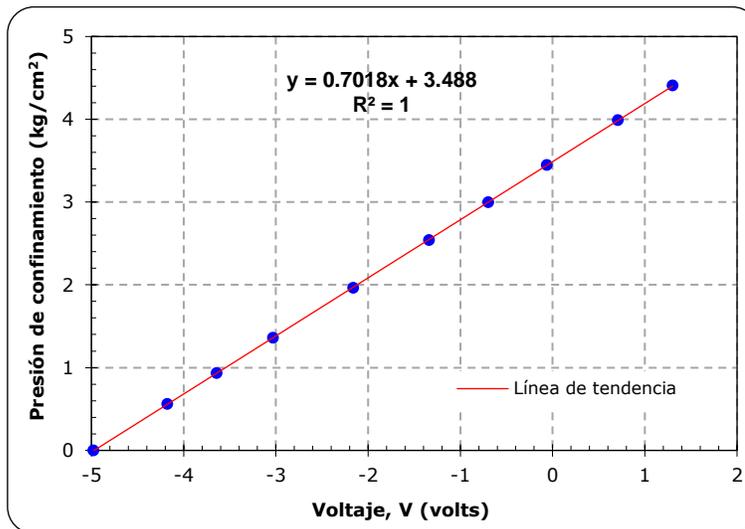


Figura A.5 Curva de calibración del sensor de presión de línea

Tabla A.5 Registro de presiones para la verificación del sensor de presión de línea

CONFINAMIENTO	
Presión patrón	Presión sensor
Pp kg/cm ²	Ps kg/cm ²
0.000	-0.008
0.537	0.532
0.951	0.944
1.393	1.390
1.991	1.992
2.477	2.481
3.018	3.020
3.469	3.466
4.000	3.993
4.438	4.426

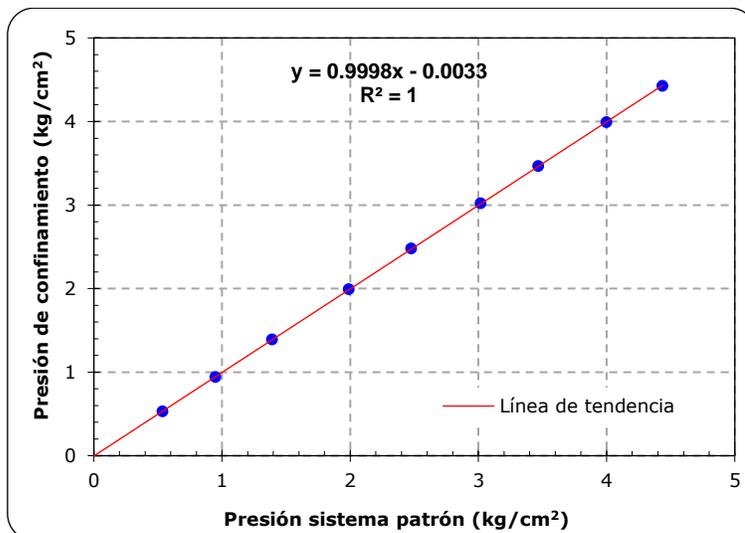


Figura A.6 Curva de verificación del sensor de presión de línea

Tabla A.6 Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión de línea

CONFINAMIENTO					
Presión patrón	Presión sensor	Precisión	Error parcial	Error total	Tolerancia
P_p	P_s	$ P_p - P_s $	$\frac{ P_{patrón} - P_{sensor} \times 100}{P_{patrón}}$	$\frac{ P_{patrón} - P_{sensor} \times 100}{Cap_sensor}$	$\frac{ Dif\ mayor \times 100}{P_{patrón}}$
kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)	(%)
0.000	-0.008	0.008	---	---	---
0.537	0.532	0.005	0.927	0.071	2.270
0.951	0.944	0.007	0.690	0.093	1.282
1.393	1.390	0.003	0.188	0.037	0.875
1.991	1.992	0.001	0.070	0.020	0.612
2.477	2.481	0.004	0.145	0.051	0.492
3.018	3.020	0.002	0.051	0.022	0.404
3.469	3.466	0.003	0.076	0.038	0.351
4.000	3.993	0.007	0.180	0.102	0.305
4.438	4.426	0.012	0.275	0.173	0.275

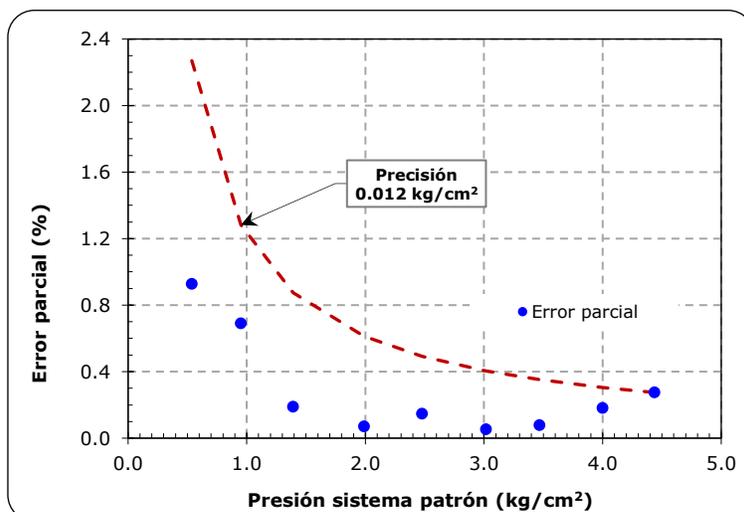


Figura A.7 Curva de error parcial del sensor de presión de línea

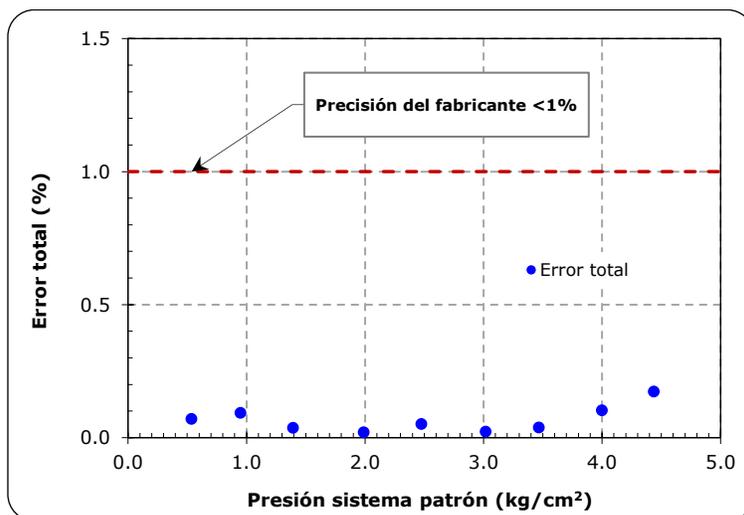


Figura A.8 Curva de error total del sensor de presión de línea

3. Calibración, verificación y precisión del sensor de presión axial

Tabla A.7 Registro de presiones para la calibración del sensor de presión axial

PRESIÓN AXIAL	
Voltaje volts	Presión Axial k/cm ²
0.0013	0.0000
0.7582	0.5302
1.4767	1.0333
2.2927	1.6055
3.1032	2.1737
3.9094	2.7418
4.7246	3.3195
5.5284	3.8917
6.2936	4.4355
7.0789	4.9982

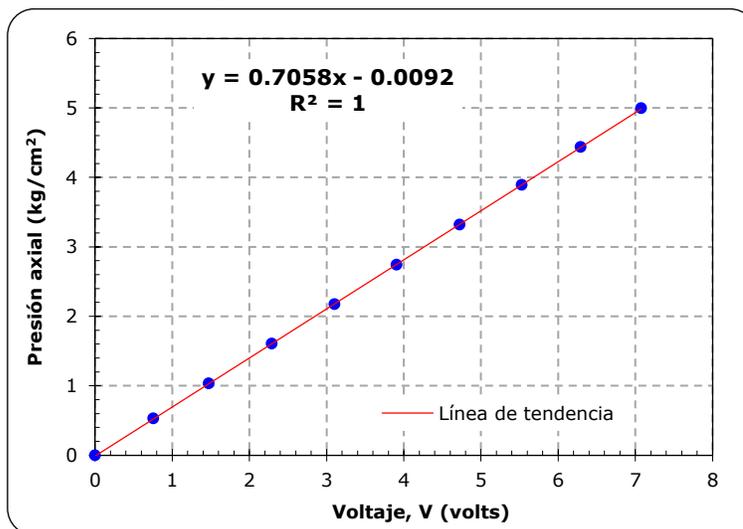


Figura A.9 Curva de calibración del sensor de presión axial

Tabla A.8 Registro de presiones para la verificación del sensor de presión axial

PRESIÓN AXIAL	
Presión sensor Es kg/cm ²	Presión patrón Ep kg/cm ²
0.000	-0.008
0.385	0.385
0.907	0.907
1.371	1.373
1.928	1.934
2.434	2.445
2.999	3.007
3.462	3.468
3.964	3.969
4.480	4.480

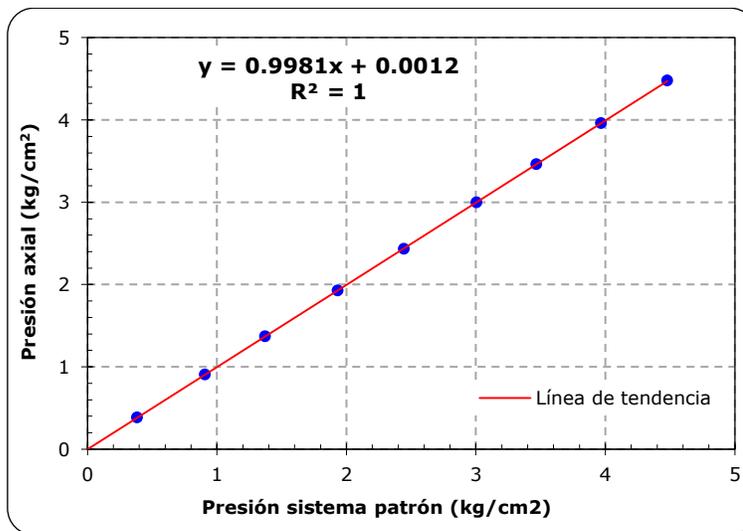


Figura A.10 Curva de verificación del sensor de presión axial

Tabla A.9 Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de presión axial

PRESIÓN AXIAL					
Presión patrón	Presión sensor	Precisión	Error parcial	Error total	Tolerancia
P_p	P_s	$ P_p - P_s $	$\frac{ P_{patrón} - P_{sensor} \times 100}{P_{patrón}}$	$\frac{ P_{patrón} - P_{sensor} \times 100}{Cap_sensor}$	$\frac{ Dif_mayor \times 100}{P_{patrón}}$
kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)	(%)
0.000	-0.008	0.008	---		---
0.385	0.385	0.000	0.027	0.001	2.851
0.907	0.907	0.000	0.018	0.002	1.210
1.371	1.373	0.002	0.152	0.030	0.801
1.928	1.934	0.006	0.299	0.082	0.569
2.434	2.445	0.011	0.451	0.156	0.451
2.999	3.007	0.008	0.251	0.107	0.366
3.462	3.468	0.006	0.177	0.087	0.317
3.964	3.969	0.005	0.137	0.077	0.277
4.480	4.480	0.000	0.005	0.003	0.245

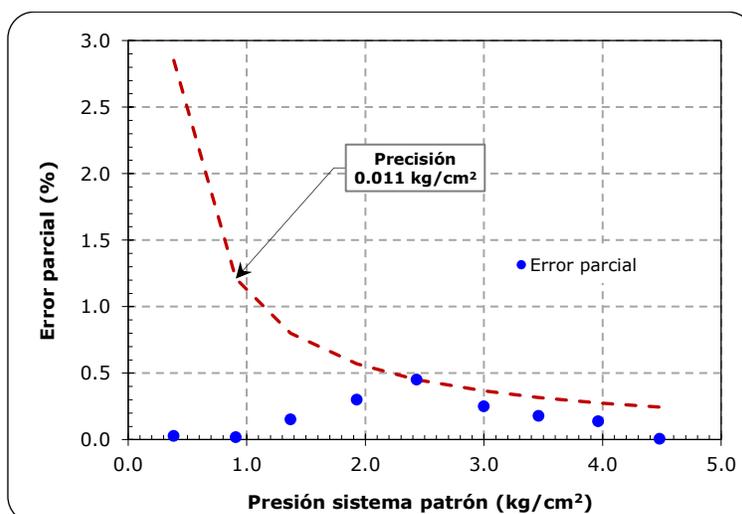


Figura A.11 Curva de precisión del sensor de presión axial

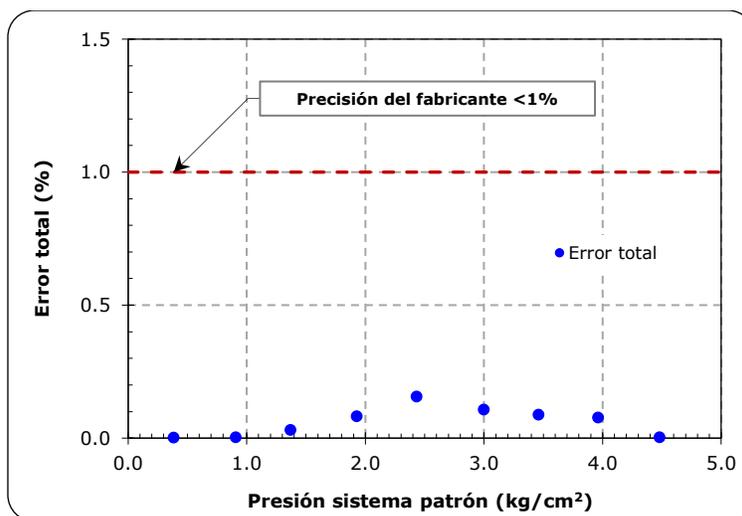


Figura A.12 Curva de precisión del sensor de presión axial

4. Calibración, verificación y precisión del sensor de esfuerzo axial

Tabla A.10 Registro de presiones para la calibración del sensor de esfuerzo axial

ESFUERZO AXIAL	
Voltaje V volts	Esfuerzo axial E. Axial k/cm ²
0.036	0.000
0.876	0.589
1.414	0.970
2.074	1.436
2.925	2.034
3.449	2.404
4.281	2.997
4.945	3.470
5.744	4.042

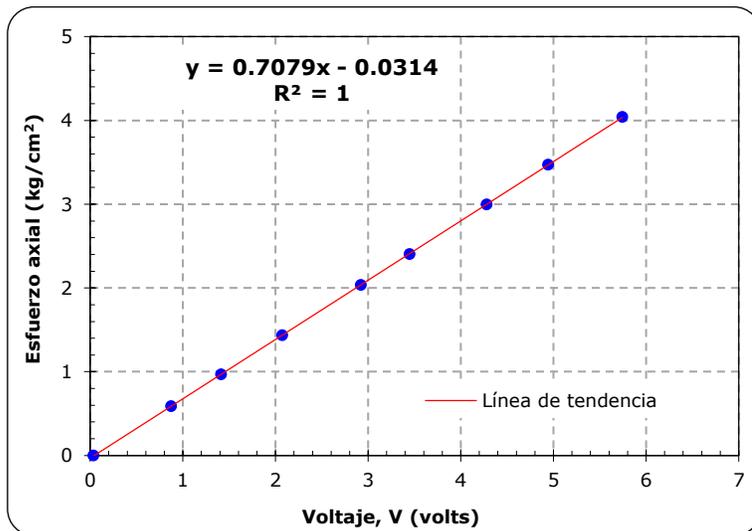


Figura A.13 Curva de calibración del sensor de esfuerzo axial

Tabla A.11 Registro de presiones para la verificación del sensor de esfuerzo axial

ESFUERZO AXIAL	
Esfuerzo sensor Es kg/cm ²	Esfuerzo patrón Ep kg/cm ²
0.000	0.011
0.385	0.389
0.907	0.910
1.371	1.375
1.928	1.935
2.434	2.444
2.999	3.006
3.462	3.466
3.964	3.965
4.480	4.477

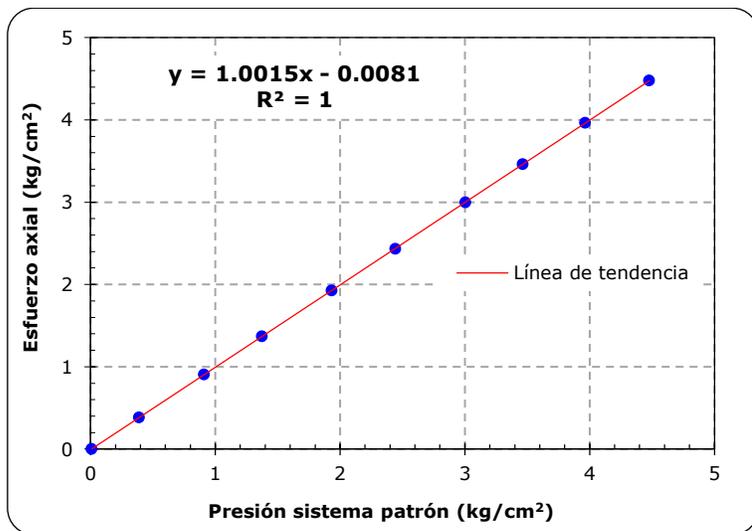


Figura A.14 Curva de verificación del sensor de esfuerzo axial

Tabla A.12 Registro de presiones para determinar la precisión del sensor de esfuerzo axial

ESFUERZO AXIAL					
Presión patrón	Presión sensor	Precisión	Error parcial	Error total	Tolerancia
Es kg/cm ²	Ep kg/cm ²	Pp-Ps kg/cm ²	$\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{P_{patrón}}$ (%)	$\frac{ P_{patrón}-P_{sensor} \times 100}{Cap_{sensor}}$ (%)	$\frac{ Dif_{mayor} \times 100}{P_{patrón}}$ (%)
0.000	0.011	0.011	---	---	---
0.385	0.389	0.004	1.012	0.055	2.856
0.907	0.910	0.003	0.313	0.040	1.213
1.371	1.375	0.004	0.298	0.058	0.802
1.928	1.935	0.007	0.351	0.096	0.570
2.434	2.444	0.010	0.410	0.142	0.452
2.999	3.006	0.007	0.218	0.093	0.367
3.462	3.466	0.004	0.119	0.059	0.318
3.964	3.965	0.001	0.036	0.020	0.278
4.480	4.477	0.003	0.072	0.046	0.246

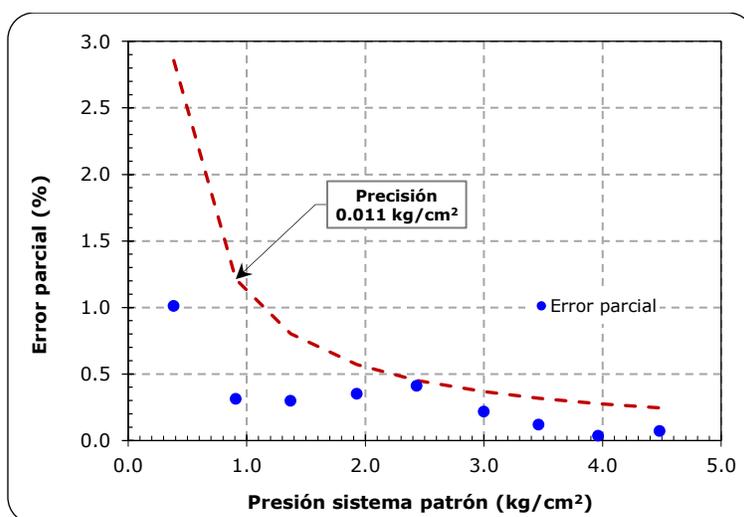


Figura A.15 Curva de precisión del sensor de esfuerzo axial

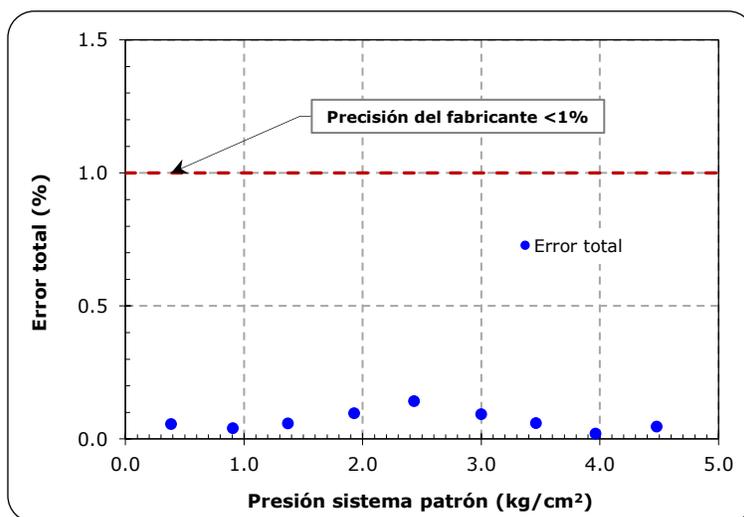


Figura A.16 Curva de precisión del sensor de esfuerzo axial

5. Verificación cruzada del sensor de contrapresión

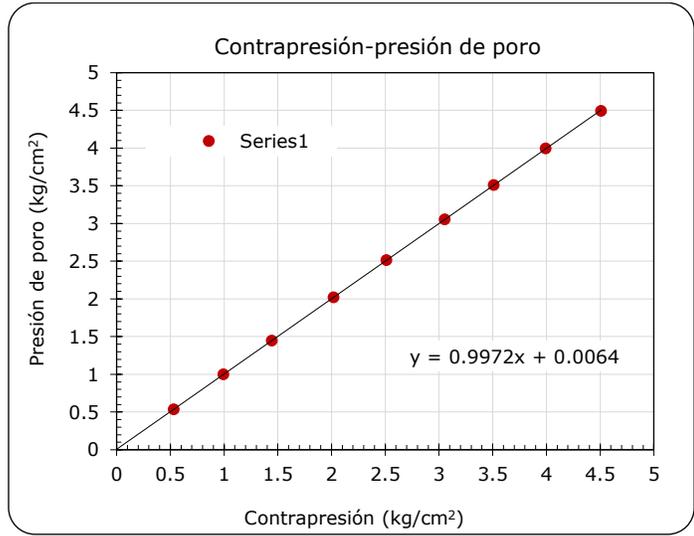


Figura A.17 Verificación cruzada de contrapresión vs presión de poro

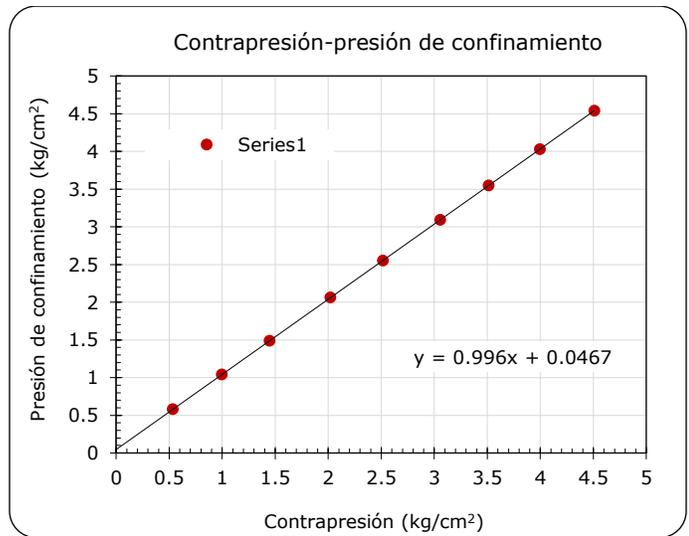


Figura A.18 Verificación cruzada de contrapresión vs presión de confinamiento

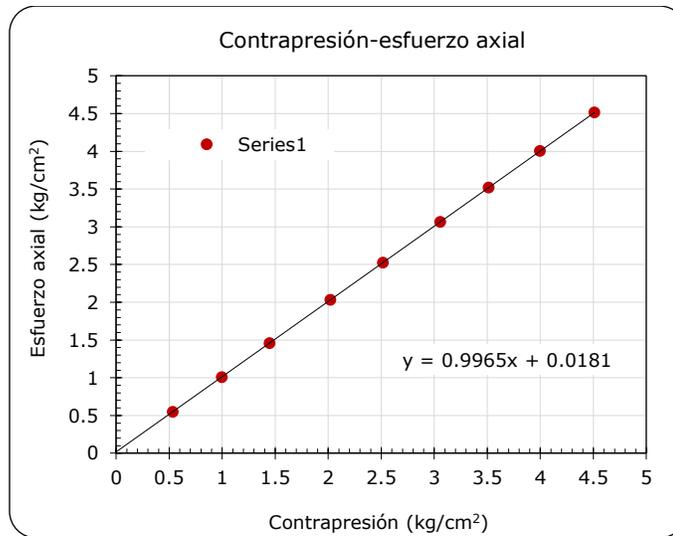


Figura A.19 Verificación cruzada de contrapresión vs esfuerzo axial

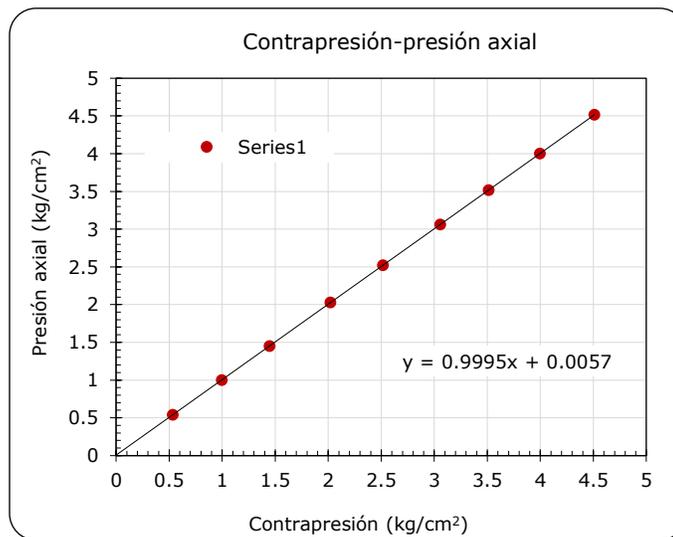


Figura A.20 Verificación cruzada de contrapresión vs presión axial

6. Verificación cruzada del sensor de presión de línea (confinamiento)

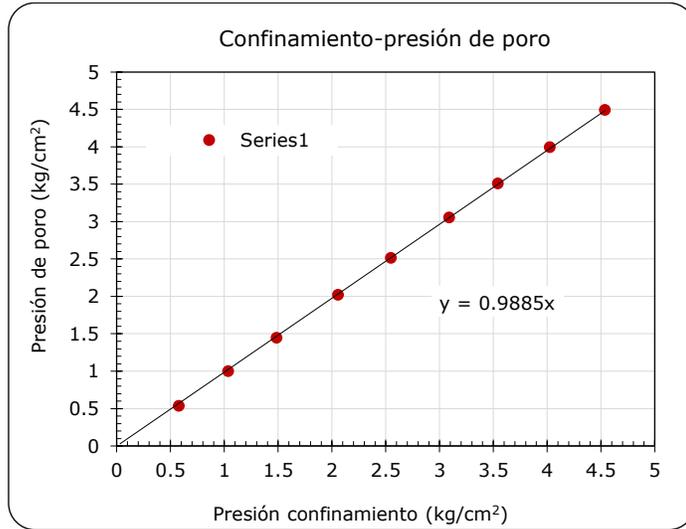


Figura A.21 Verificación cruzada de confinamiento vs presión de poro

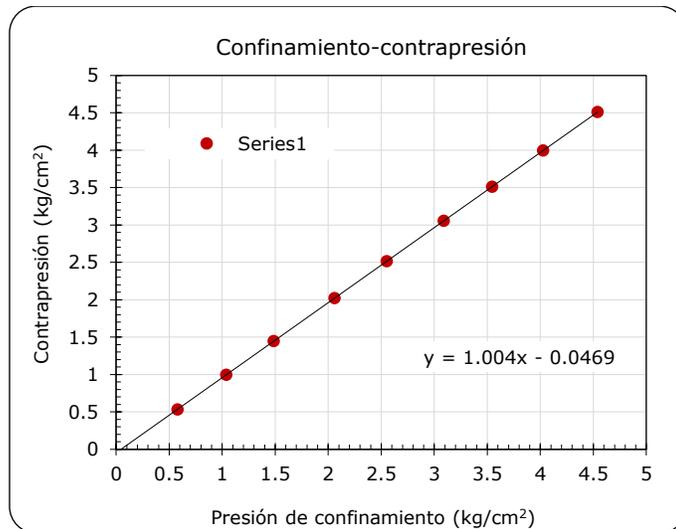


Figura A.22 Verificación cruzada de confinamiento vs contrapresión

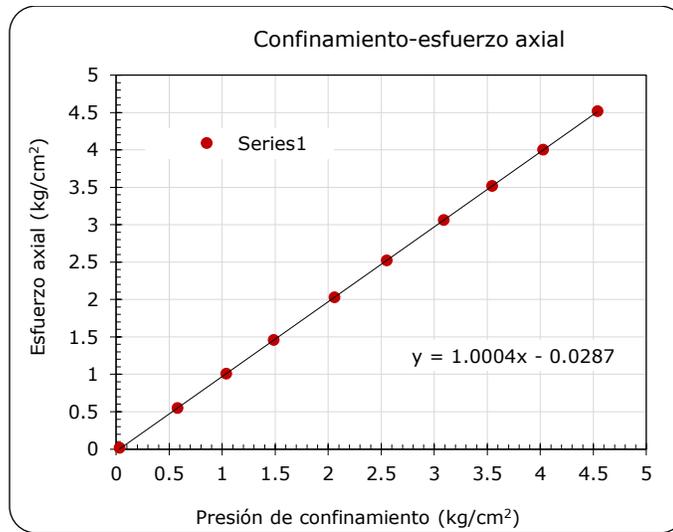


Figura A.23 Verificación cruzada de confinamiento vs esfuerzo axial

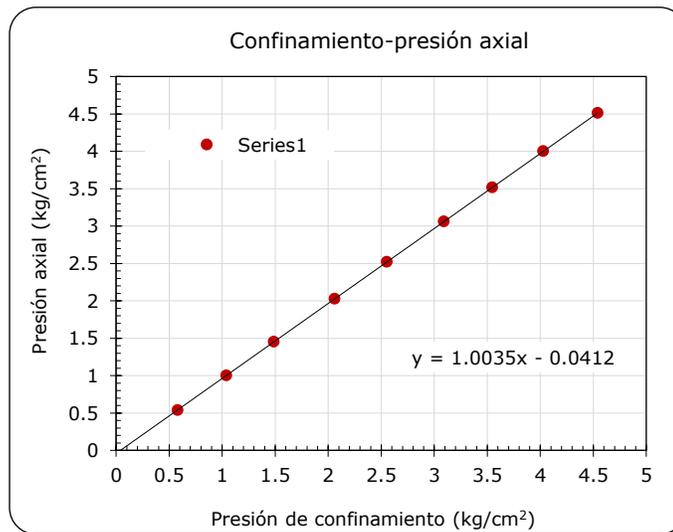


Figura A.24 Verificación cruzada de confinamiento vs presión axial

7. Verificación cruzada del sensor de esfuerzo axial

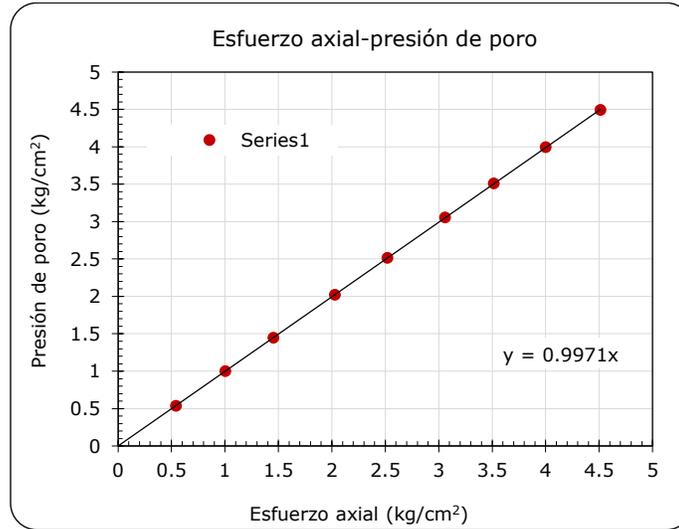


Figura A.25 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión de poro

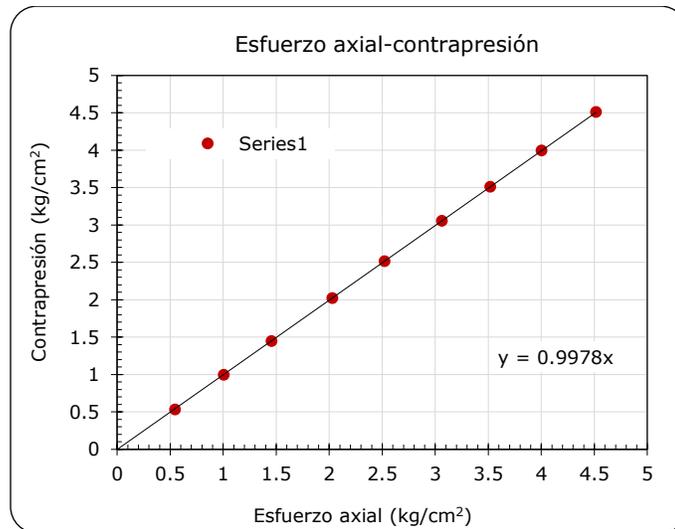


Figura A.26 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs contrapresión

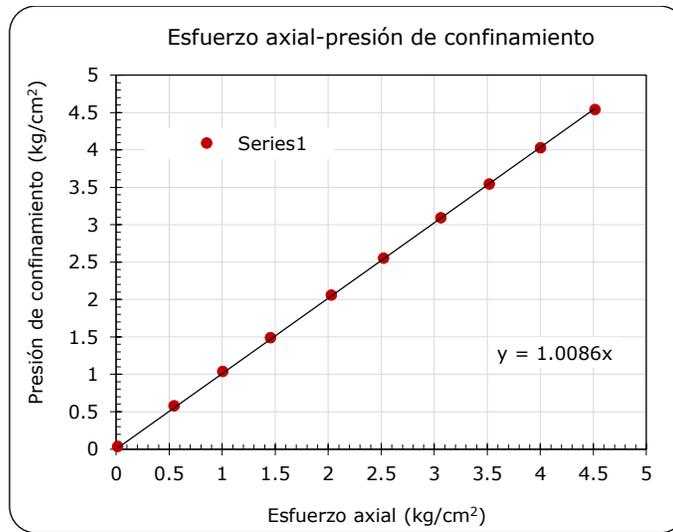


Figura A.27 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión de confinamiento

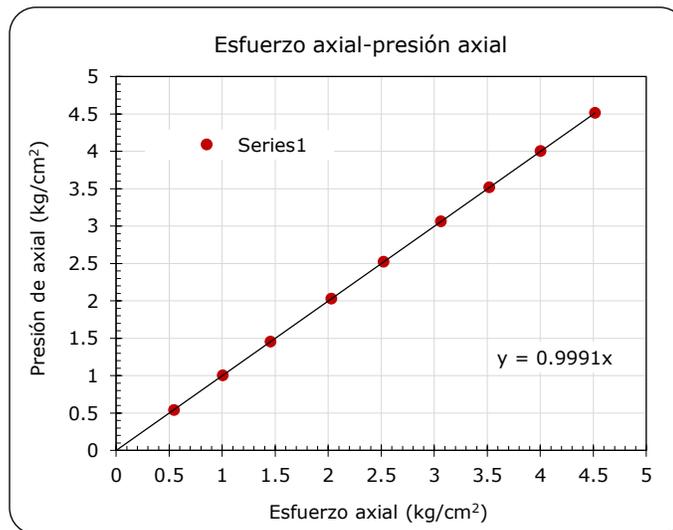


Figura A.28 Verificación cruzada de esfuerzo axial vs presión axial

8. Verificación cruzada del sensor de presión axial

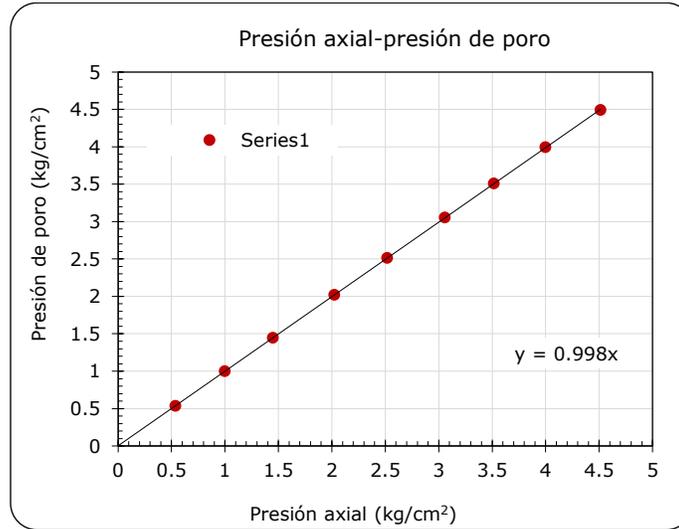


Figura A.29 Verificación cruzada de presión axial vs presión de poro

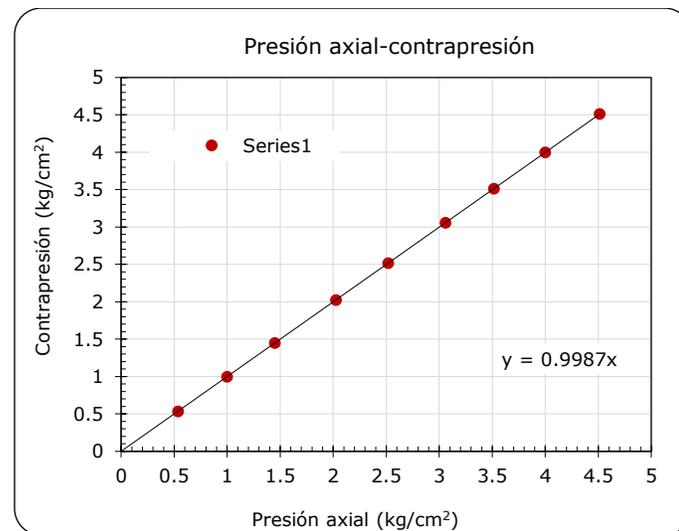


Figura A.30 Verificación cruzada de presión axial vs contrapresión

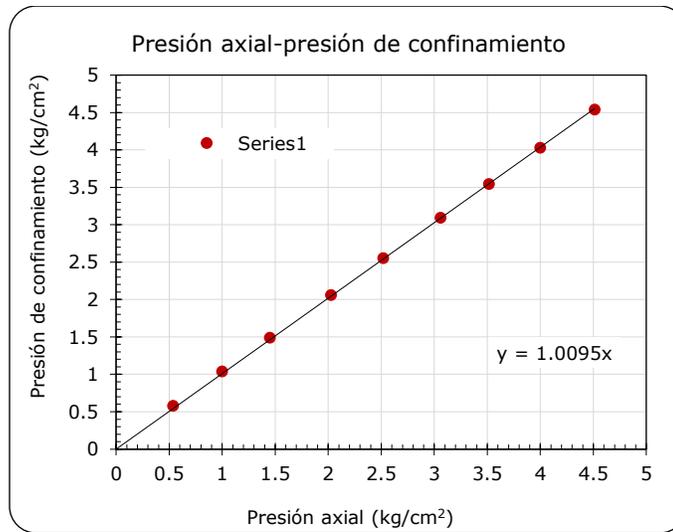


Figura A.31 Verificación cruzada de presión axial vs confinamiento

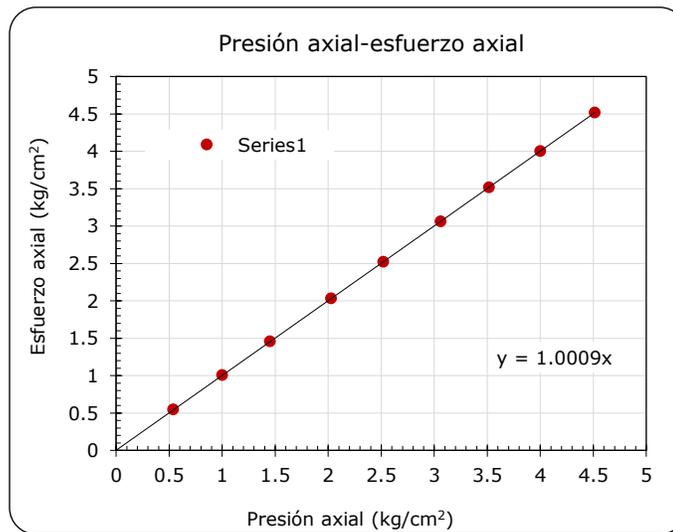


Figura A.32 Verificación cruzada de presión axial vs esfuerzo axial

ANEXO B Resultados experimentales

1. Prueba T-01 (CRS = 0.15%/h)

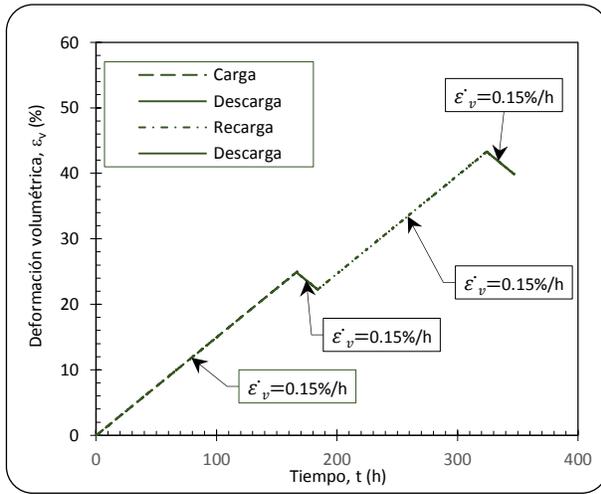


Figura B.1 Curva de velocidad, prueba T01

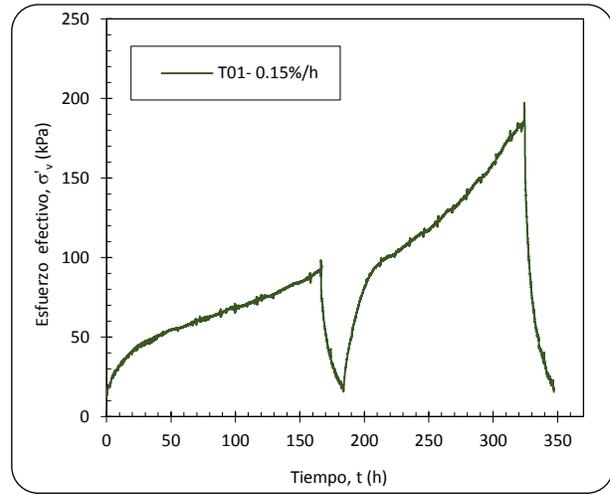


Figura B.2 Curva de esfuerzo axial, prueba T01

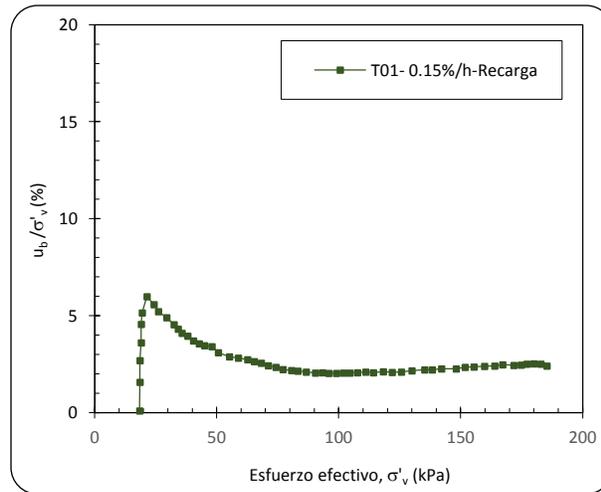


Figura B.3 Relación de esfuerzos, prueba T01

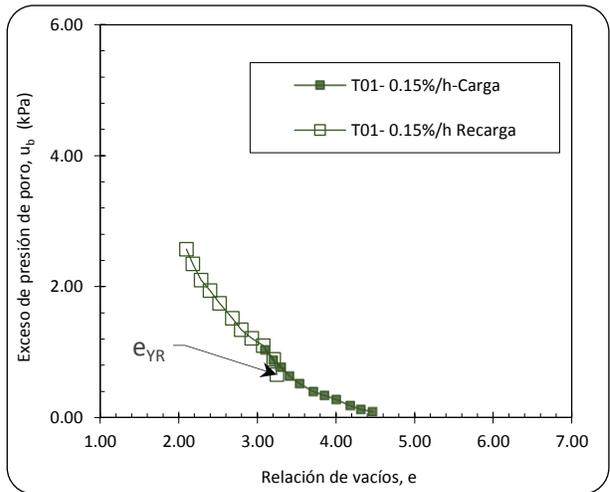


Figura B.4 Exceso de presión de poro, prueba T01

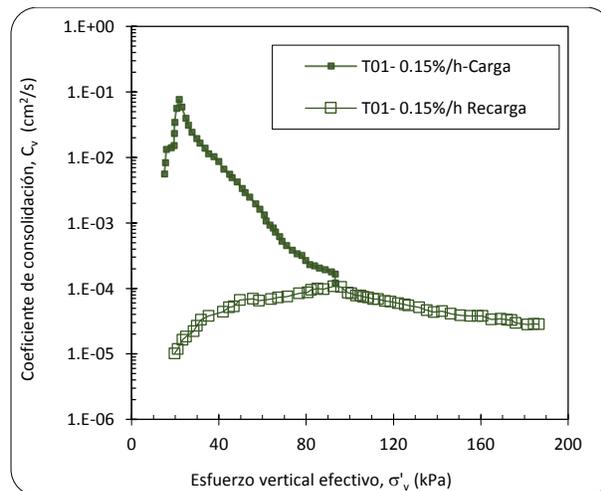


Figura B.5 Coeficiente de consolidación, prueba T01

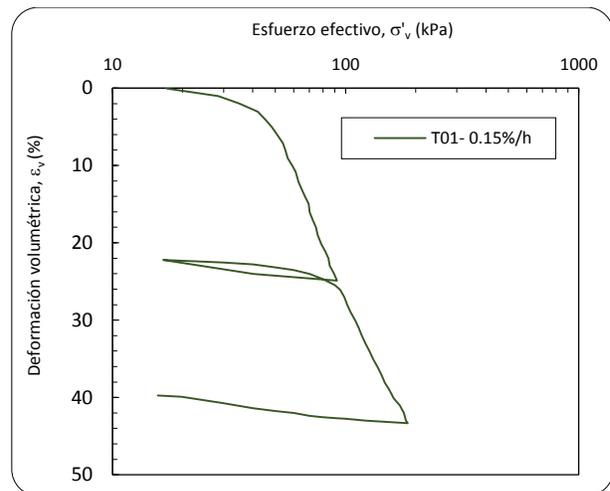


Figura B.6 Curva de compresibilidad, prueba T01

2. Prueba T-02 (CRS = 0.20%/h)

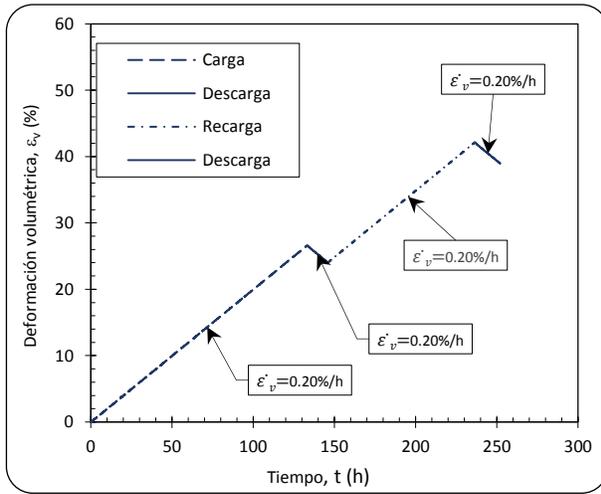


Figura B.7 Curva de velocidad, prueba T02

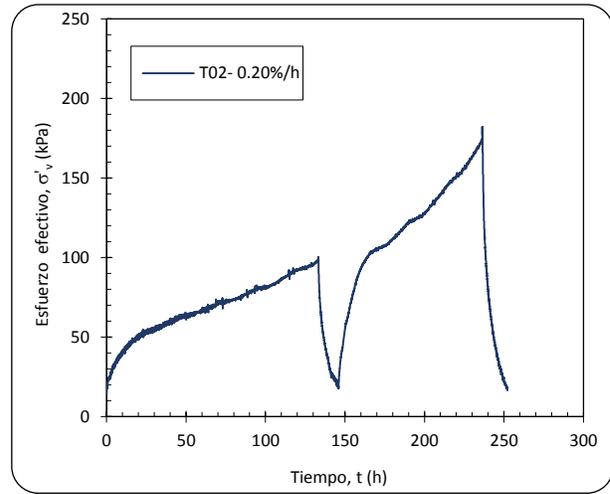


Figura B.8 Curva de esfuerzo axial, prueba T02

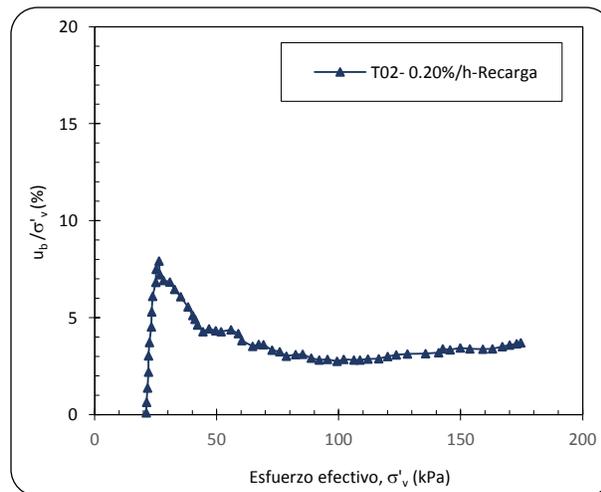


Figura B.9 Relación de esfuerzos, prueba T02

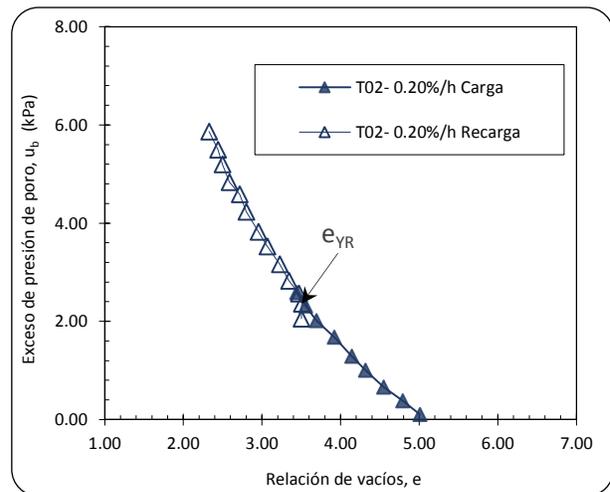


Figura B.10 Exceso de presión de poro, prueba T02

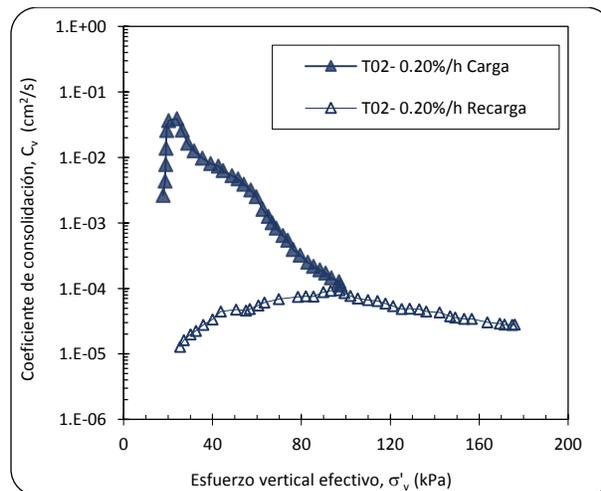


Figura B.11 Coeficiente de consolidación, prueba T02

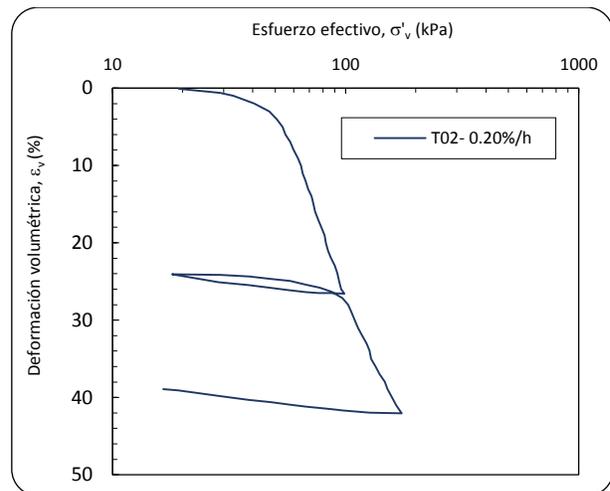


Figura B.12 Curva de compresibilidad, prueba T02

3. Prueba T-03 (CRS = 0.30%/h)

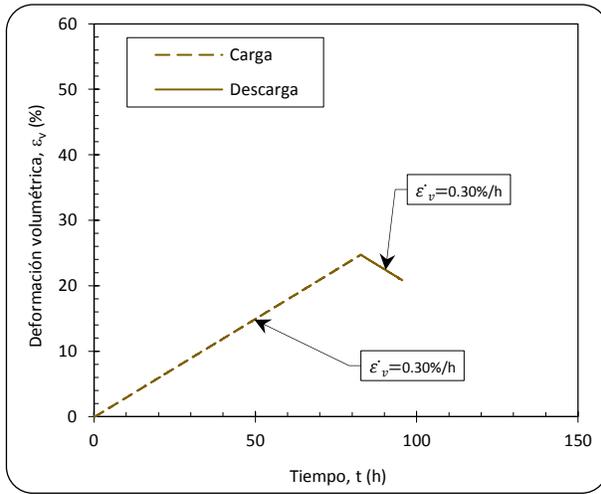


Figura B.13 Curva de velocidad, prueba T03

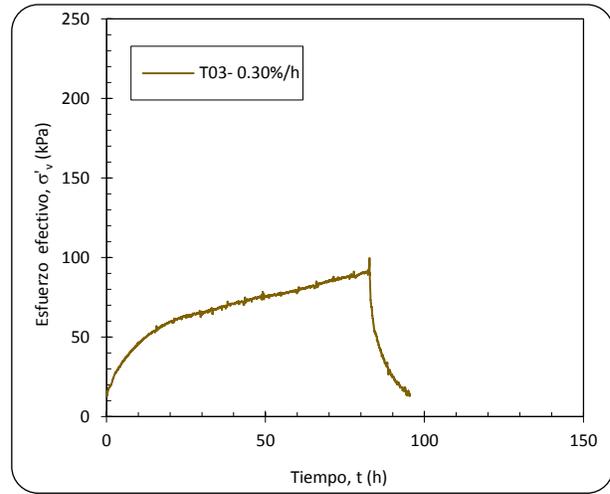


Figura B.14 Curva de esfuerzo axial, prueba T03

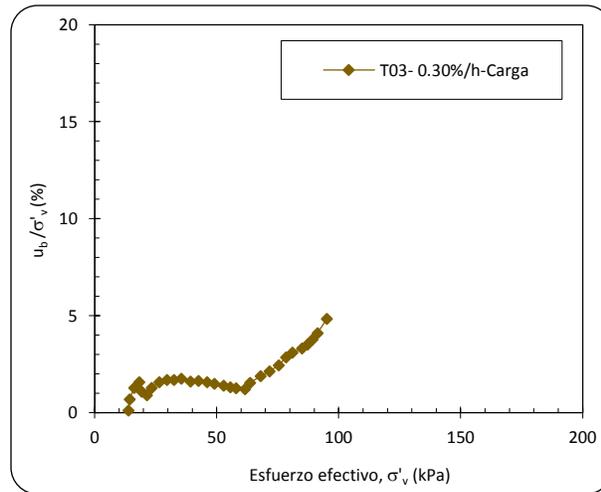


Figura B.15 Relación de esfuerzos, prueba T03

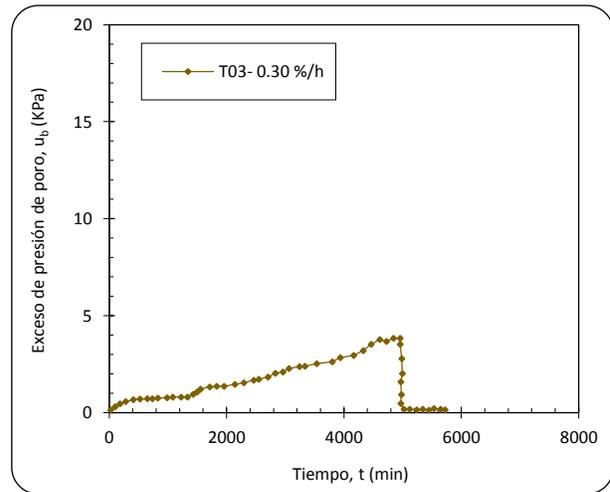


Figura B.16 Exceso de presión de poro, prueba T03

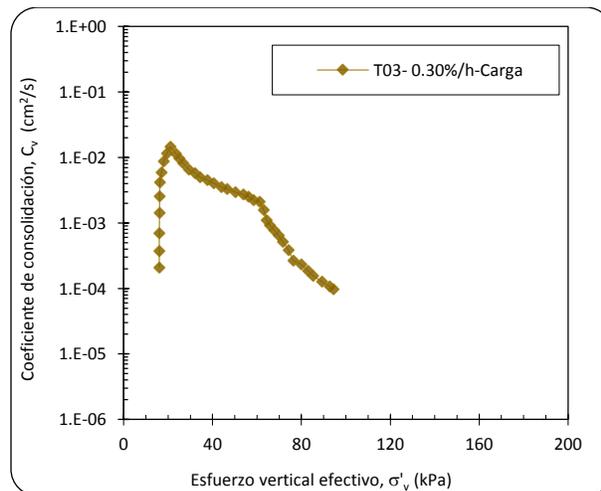


Figura B.17 Coeficiente de consolidación, prueba T03

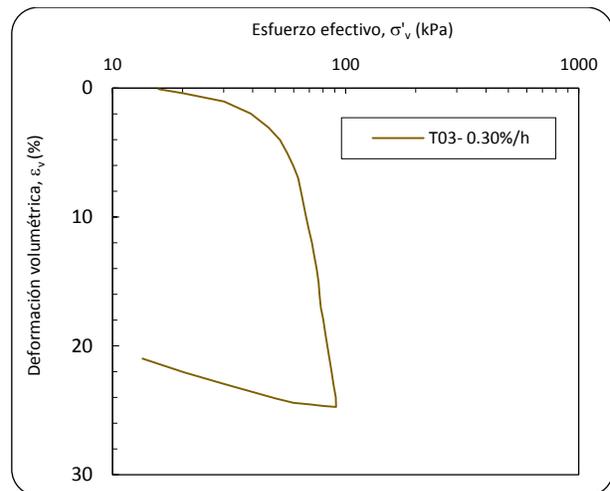


Figura B.18 Curva de compresibilidad, prueba T03

4. Prueba T-04 (Carga Incremental)

Tabla B.1 Resumen de prueba T04

	PRESION	Lec _{SENSOR}	δ_{lineal} (ΔH)	δ_{vol} ($\Delta H/H$)	Δe	e	V_f	δ_{vol} ($\Delta H/H$)	δ_{lineal} (ΔH)	PRESION
	kg/cm ²	mm	mm	%			cm ³	Norm	Norm	kPa
Carga	0	0.6050	0.0000	0.0000	0.000	5.7579	80.440	100.0000		0.0000
	0.180	0.6050	0.1043	0.4106	0.028	5.7301	80.110	99.5894	0.000	17.9987
	0.250	0.7175	0.2013	0.7923	0.054	5.7043	79.802	99.2077	0.097	24.9992
	0.350	0.8455	0.4258	1.6763	0.113	5.6446	79.091	98.3237	0.321	34.9995
	0.470	1.0986	0.9302	3.6624	0.247	5.5104	77.494	96.3376	0.826	47.0018
	0.600	1.6354	2.0303	7.9933	0.540	5.2177	74.010	92.0067	1.926	60.0019
	0.750	2.8278	4.1141	16.1973	1.095	4.6633	67.411	83.8027	4.010	75.0008
	0.960	4.9483	6.5705	25.8682	1.7481	4.0097	59.6314	74.1318	6.4662	95.9992
Descarga	0.600	7.4728	6.4802	25.5128	1.7241	4.0337	59.9174	74.4872	6.3759	60.0019
	0.350	7.363	6.251	24.612	1.663	4.095	60.642	75.3882	6.1471	34.9995
	0.180	7.1165	5.9133	23.2808	1.573	4.1846	61.713	76.7192	5.809	17.9987
Recarga	0.360	6.7830	6.0345	23.7580	1.606	4.1523	61.329	76.2420	5.930	36.0005
	0.520	6.9178	6.1608	24.2553	1.639	4.1187	60.929	75.7447	6.057	52.0004
	0.750	7.0620	6.4678	25.4637	1.721	4.0371	59.957	74.5363	6.363	75.0008
	0.950	7.3862	6.9507	27.3648	1.849	3.9086	58.428	72.6352	6.846	95.0014
	1.150	7.8888	7.8299	30.8263	2.083	3.6747	55.643	69.1737	7.726	115.0021
	1.400	8.7856	9.2347	36.3572	2.457	3.3009	51.194	63.6428	9.130	140.0013
Descarga	1.800	10.2335	10.9191	42.9886	2.905	2.8527	45.860	57.0114	10.815	180.0025
	0.850	11.9057	10.7343	42.2612	2.856	2.9019	46.445	57.7388	10.630	85.0011
	0.450	11.7032	10.5069	41.3656	2.795	2.9624	47.165	58.6344	10.403	44.9998
	0.180	11.4567	10.1447	39.9399	2.699	3.0588	48.312	60.0601	10.040	17.9987

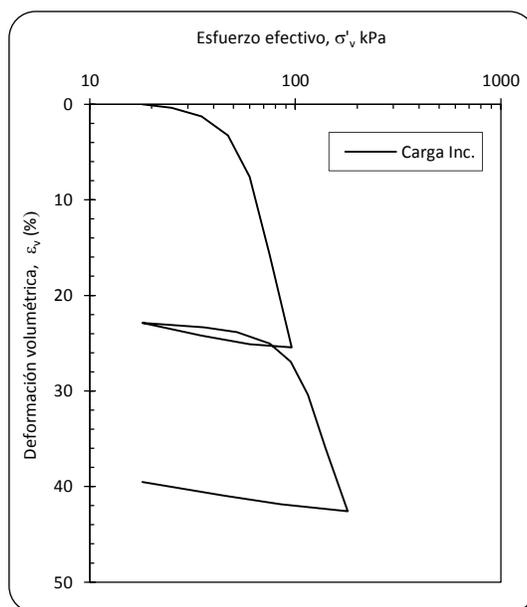


Figura B.19 Curva de compresibilidad, prueba T04

5. Prueba T-05 ($\text{CRS} = 0.20-0.20\%/h$)

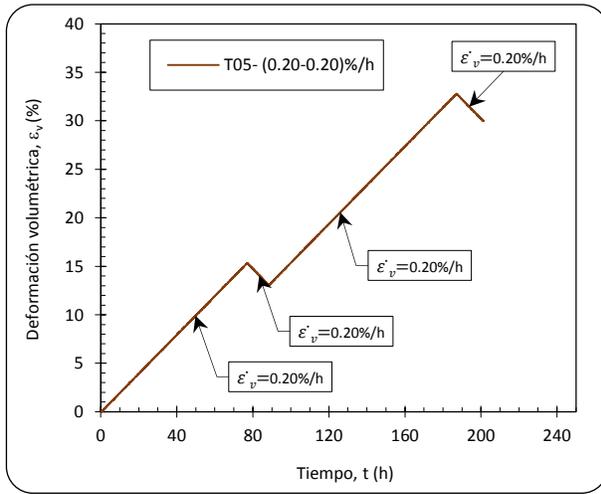


Figura B.20 Curva de velocidad, prueba T05

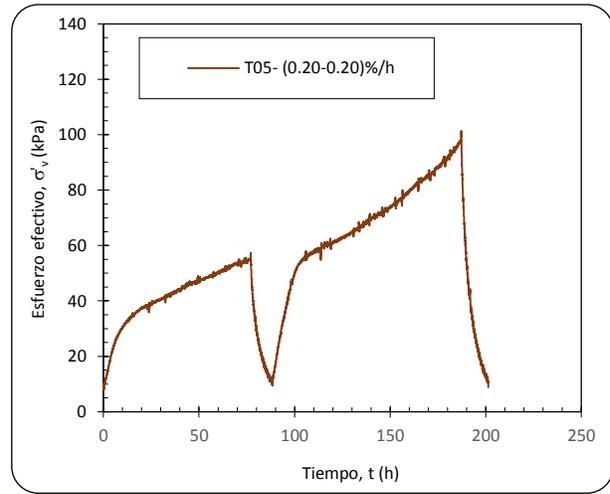


Figura B.21 Curva de esfuerzo axial, prueba T05

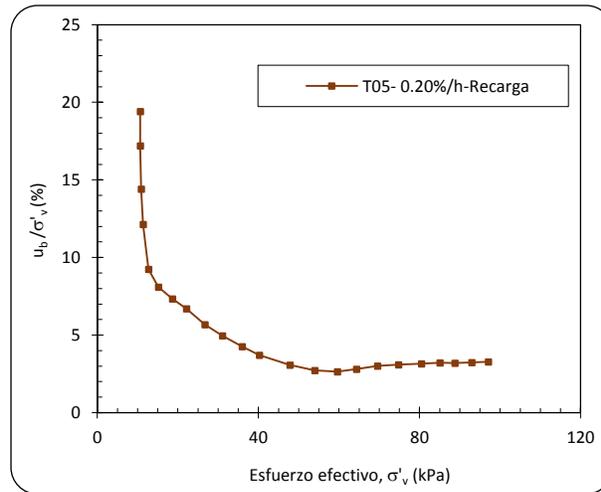


Figura B.22 Relación de esfuerzos, prueba T05

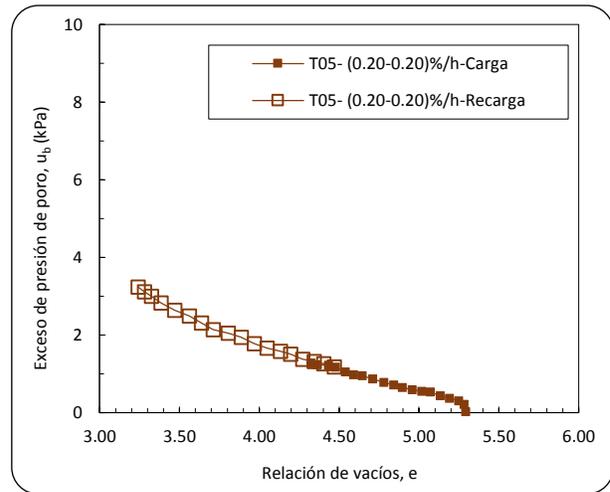


Figura B.23 Exceso de presión de poro, prueba T05

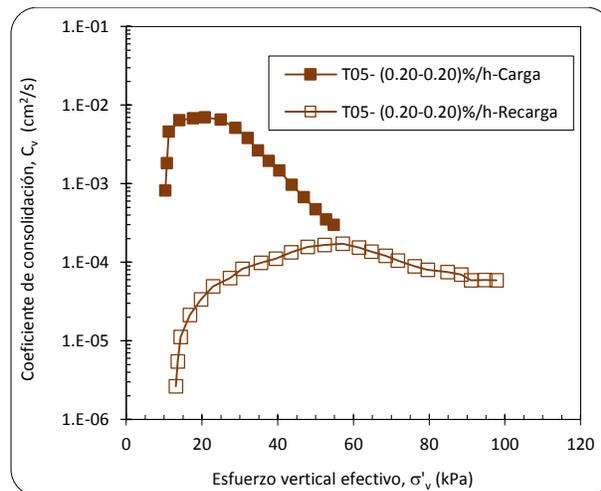


Figura B.24 Coeficiente de consolidación, prueba T05

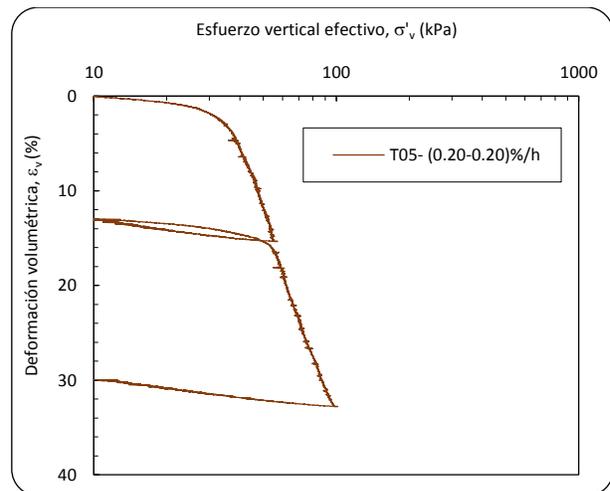


Figura B.25 Curva de compresibilidad, prueba T05

6. Prueba T-06 (CRS =0.20-0.60%/h)

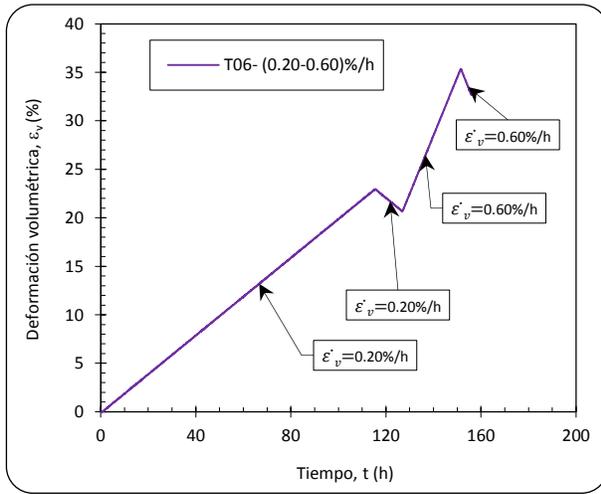


Figura B.26 Curva de velocidad, prueba T06

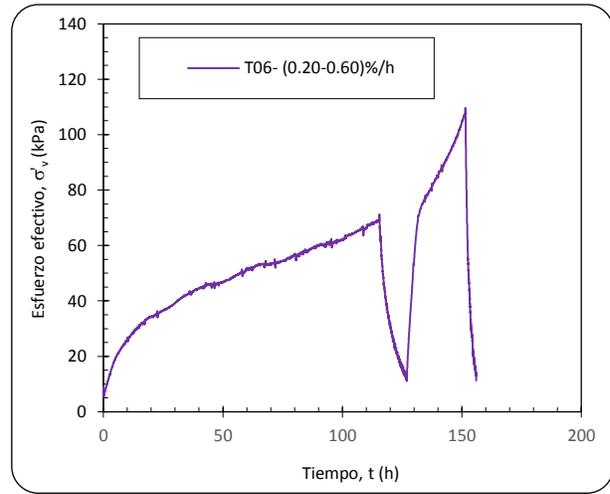


Figura B.27 Curva de esfuerzo axial, prueba T06

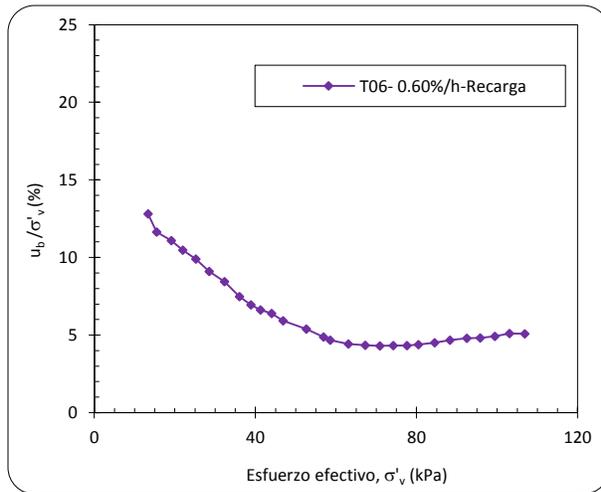


Figura B.28 Relación de esfuerzos, prueba T06

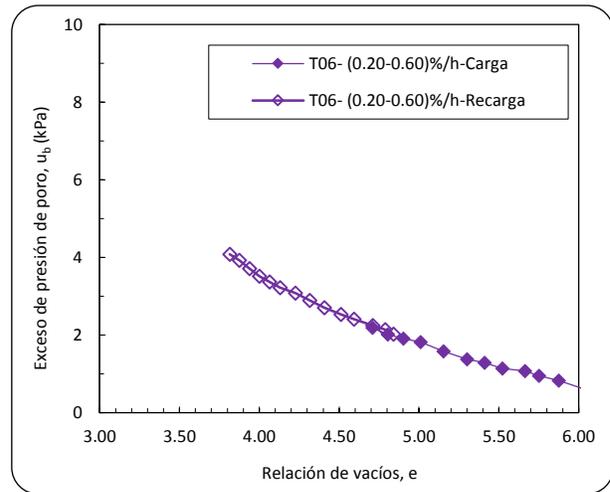


Figura B.29 Exceso de presión de poro, prueba T06

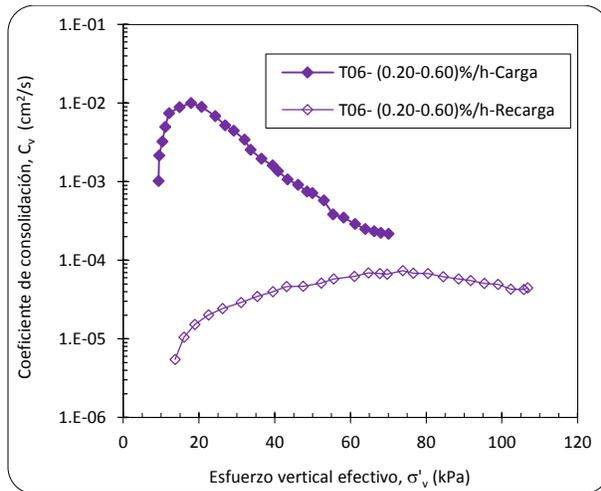


Figura B.30 Coeficiente de consolidación, prueba T06

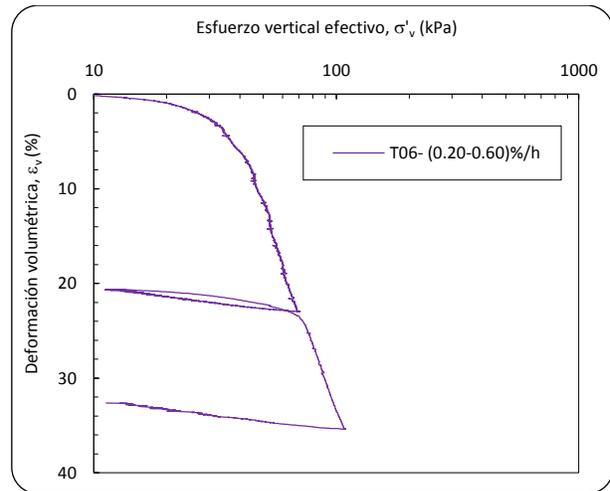


Figura B.31 Curva de compresibilidad, prueba T06

7. Prueba T-07 (CRS = 0.20-0.80%/h)

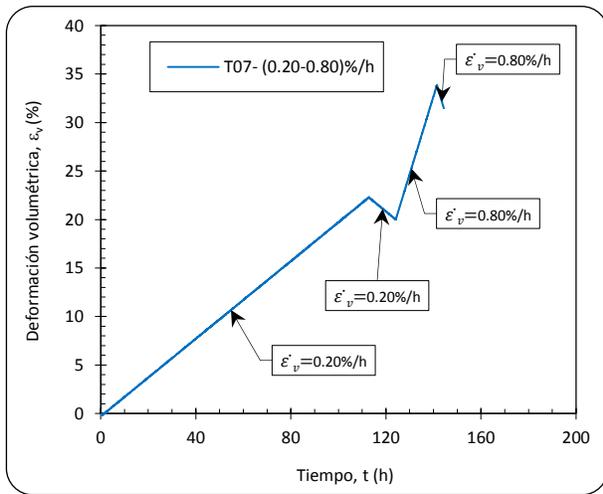


Figura B.32 Curva de velocidad, prueba T07

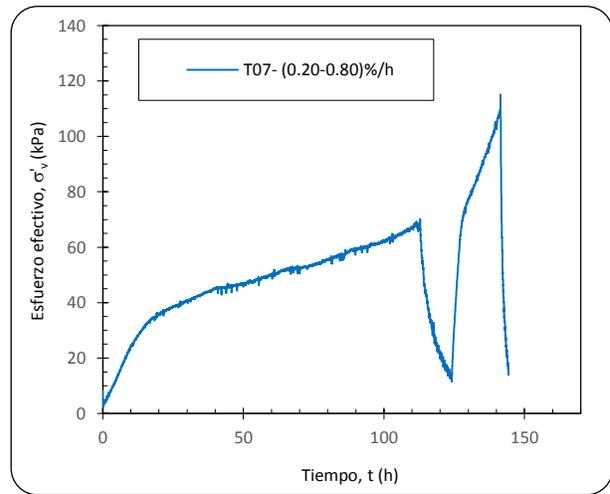


Figura B.33 Curva de esfuerzo axial, prueba T07

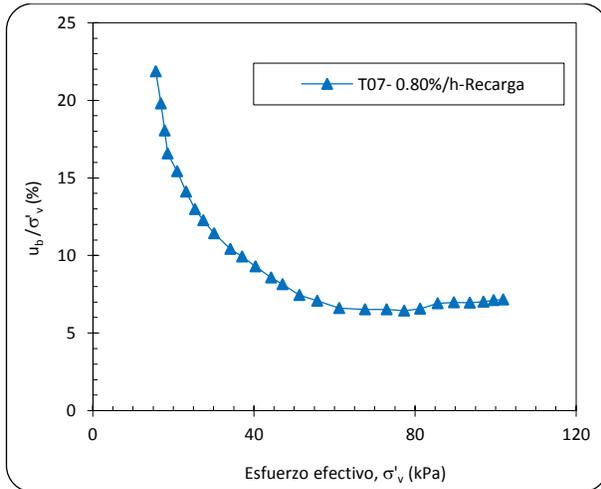


Figura B.34 Relación de esfuerzos, prueba T07

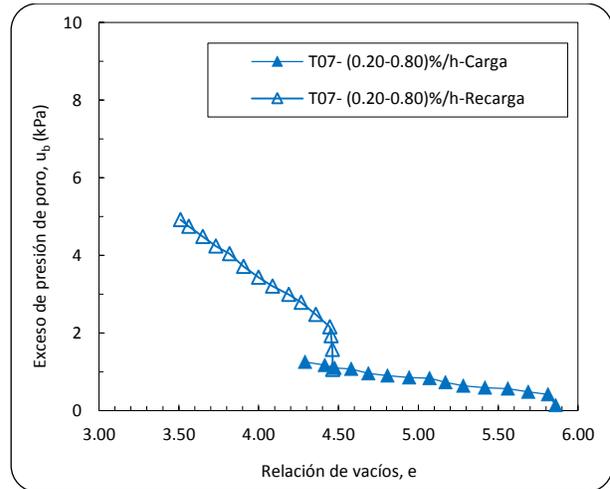


Figura B.35 Exceso de presión de poro, prueba T07

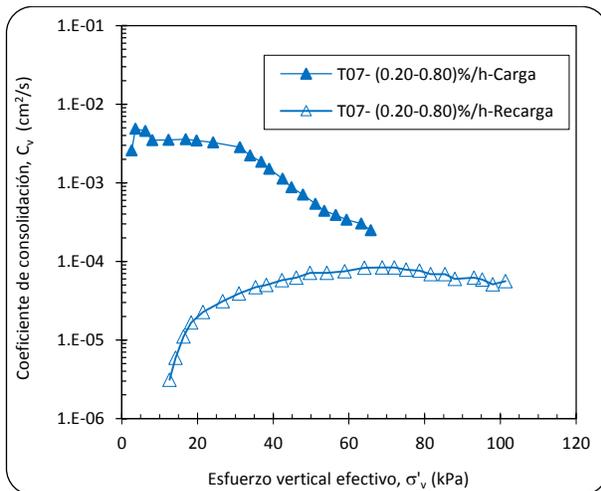


Figura B.36 Coeficiente de consolidación, prueba T07

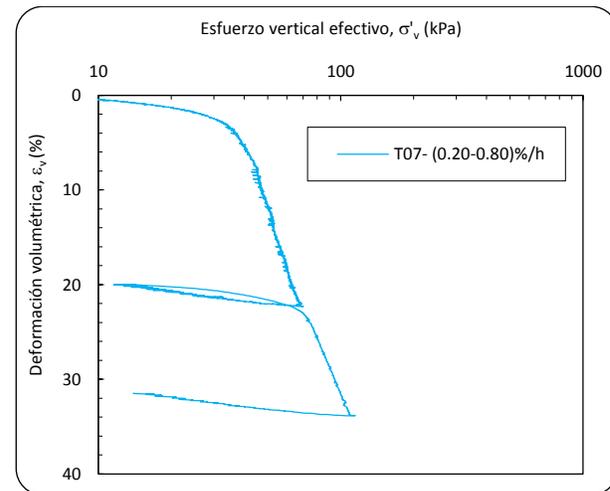


Figura B.37 Curva de compresibilidad, prueba T07

8. Prueba T-08 (CRS = 0.20-1.20 %/h)

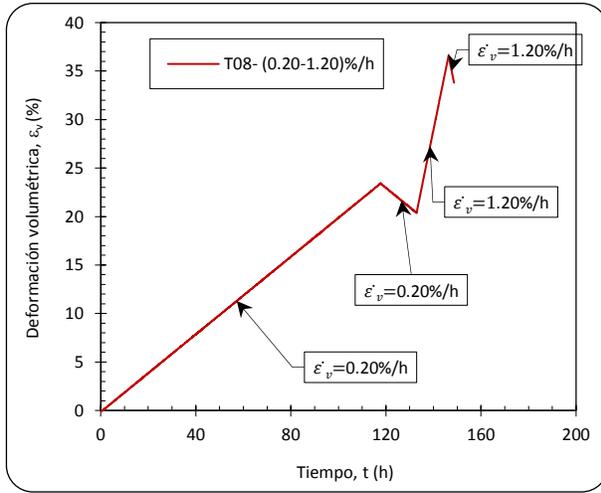


Figura B.38 Curva de velocidad, prueba T08

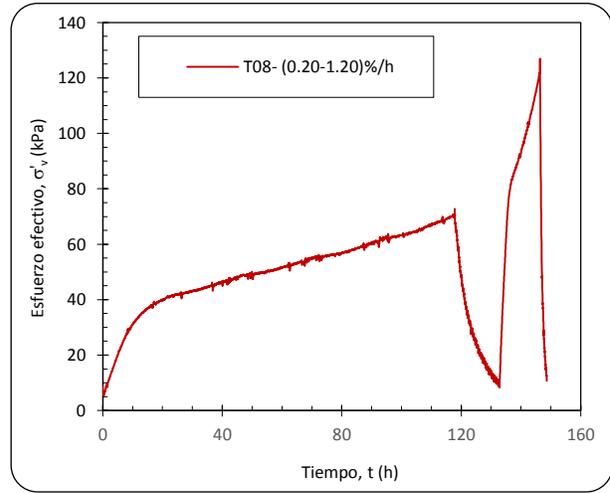


Figura B.39 Curva de esfuerzo axial, prueba T08

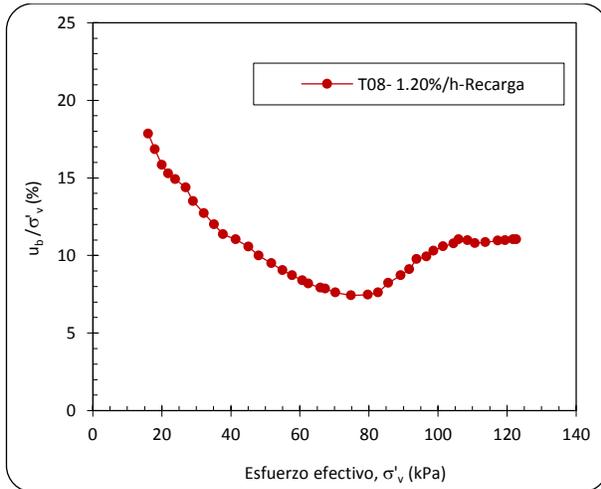


Figura B.40 Relación de esfuerzos, prueba T08

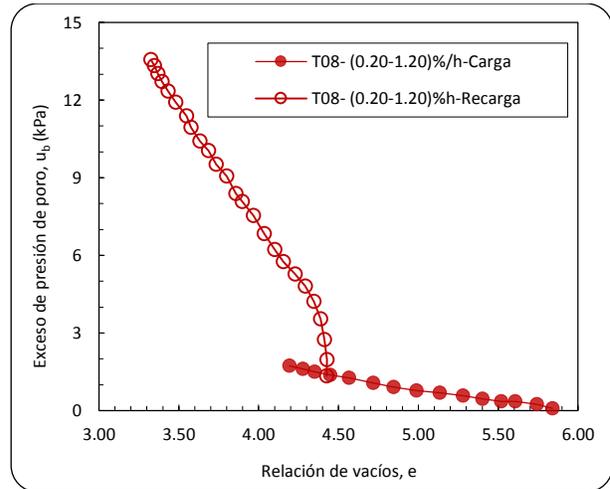


Figura B.41 Exceso de presión de poro, prueba T08

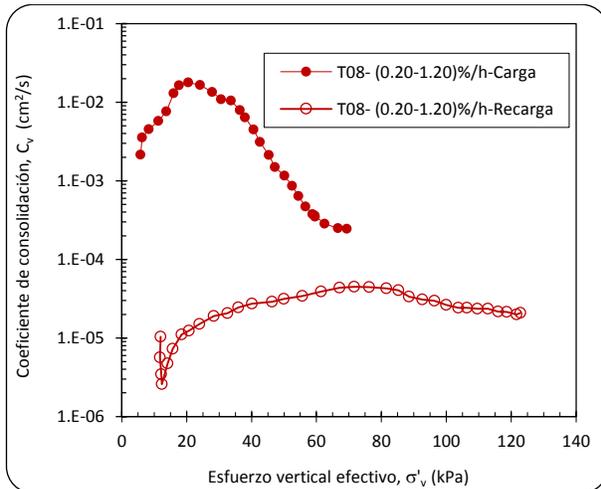


Figura B.42 Coeficiente de consolidación, prueba T08

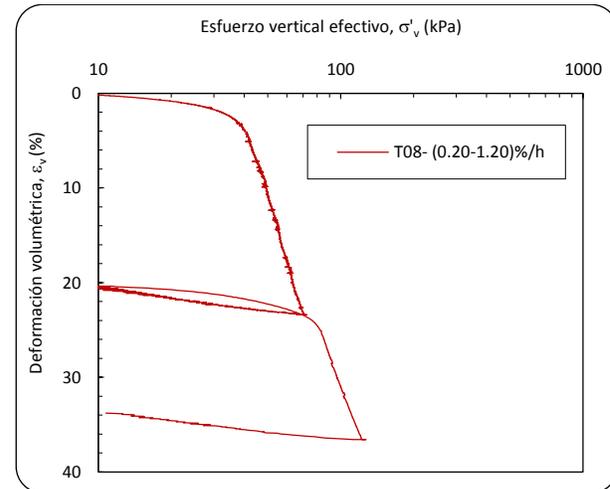


Figura B.43 Curva de compresibilidad, prueba T08

9. Prueba T-09 (Carga incremental)

Tabla B.2 Resumen de prueba T09

	PRESION	Le _{Csensor}	δ_{lineal} (ΔH)	δ_{vol} ($\Delta H/H$)	Δe	e	V _f	δ_{vol} ($\Delta H/H$)	δ_{lineal} (ΔH)	PRESION
	kg/cm ²	mm	mm	%			cm ³	Norm	Norm	kPa
Carga	0	0.2299	0.0000	0.0000	0.000	4.7838	80.440	100.0000		0.0000
	0.087	0.2299	0.0776	0.3055	0.018	4.7662	80.194	99.6945	0.000	8.6680
	0.195	0.0609	0.3956	1.5575	0.090	4.6938	79.187	98.4425	0.318	19.5260
	0.344	0.6609	0.8780	3.4569	0.200	4.5839	77.659	96.5431	0.800	34.4277
	0.508	1.2039	3.2786	12.9077	0.747	4.0373	70.057	87.0923	3.201	50.8274
	0.646	3.7949	5.6699	22.3225	1.291	3.4927	62.484	77.6775	5.592	64.5620
Descarga	0.460	6.1500	5.6203	22.1270	1.280	3.5041	62.641	77.8730	5.543	45.9905
	0.248	6.0801	5.3820	21.1889	1.2255	3.5583	63.3955	78.8111	5.3044	24.7576
	0.131	5.8308	5.0363	19.8279	1.1468	3.6370	64.4903	80.1721	4.9587	13.0745
Recarga	0.199	5.498	5.103	20.089	1.162	3.622	64.281	79.9113	5.0249	19.9484
	0.352	5.6001	5.3315	20.9903	1.214	3.5698	63.555	79.0097	5.254	35.2177
	0.554	5.8596	5.6637	22.2981	1.290	3.4942	62.503	77.7019	5.586	55.4122
	0.757	6.2350	6.7747	26.6720	1.543	3.2412	58.985	73.3280	6.697	75.7141
	0.992	7.4042	8.5214	33.5490	1.940	2.8434	53.453	66.4510	8.444	99.2247
Descarga	0.516	9.1203	8.3652	32.9337	1.905	2.8790	53.948	67.0663	8.288	51.5946
	0.286	8.7405	7.9530	31.3109	1.811	2.9729	55.253	68.6891	7.875	28.6143
	0.113	8.7405	7.5408	29.6880	1.717	3.0667	56.559	70.3120	7.463	11.3036

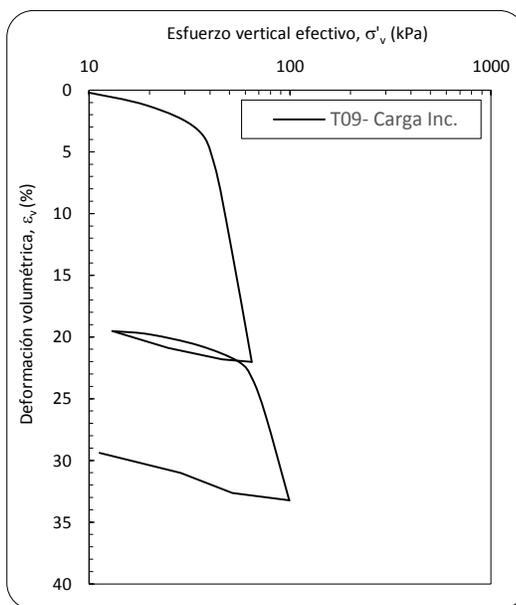


Figura B.44 Curva de compresibilidad, prueba T09