



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

“COMPRESIBILIDAD DE LOS SUELOS DE MÉXICO”

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. DANIELA MÁRQUEZ AVILÉS

DIRECTOR DE TESINA: M. en I. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Gabriela Avilés y Enrique Márquez, a mis hermanos Ana Karen y Ricardo y a familia, por el amor, apoyo todo el tiempo, por mi educación y por haber confianza. Por enseñarme a salir adelante, por siempre estar conmigo en los mejores y peores momentos.

A Daniel Sangrador por su amor, siempre estar en todo momento, apoyándome, ayudándome en los momentos difíciles para poder seguir adelante.

Al Dr. Osvaldo Flores Catrellón por la oportunidad de poder llevar a cabo este trabajo y haber confiado en el desarrollo de este trabajo.

Índice

1.1.-OBJETIVO	1
2.-ANTECEDENTES	2
2.1 CONSOLIDACIÓN	2
2.2 ARCILLAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS Y PRE-CONSOLIDADAS	3
2.4 PRUEBA DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL	4
3.-EQUIPO Y SOFTWARE	6
3.1 BASE	6
4.-CALIBRACIÓN	9
4.1 PRESIÓN AXIAL	11
4.2 CONTRAPRESIÓN	12
4.3 PRESIÓN DE PORO	13
4.4 DESPLAZAMIENTO	14
5.1.-PROCEDIMIENTO DE ENSAYES	16
5.1.1 SATURACIÓN	16
5.1.2 MEDICIÓN B DE SKEMPTON	17
5.1.3 CONSOLIDACIÓN	17
6.-RESULTADOS	18
CONCLUSIONES	42
REFERENCIAS	43
ANEXOS	44
ANEXO-A MONTAJE DE LA PRUEBA	44
ANEXO-B OPERACIÓN DEL PROGRAMA DE LA CELDA ROWE	47

1.-INTRODUCCIÓN

El proyecto consta del estudio de la compresibilidad del suelo lacustre de la Ciudad de México, ubicado en el predio del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Los ensayos se llevaron a cabo mediante la Celda Rowe, estableciendo criterios para definir la consolidación secundaria. Midiendo presión de poro y carga-deformación.

La Celda Rowe permite ejecutar ensayos de consolidación con carga incremental, aplicando presión axial y contrapresión de forma neumática y permite medir la deformación axial y la disipación de presión de poro.

Debido a que convencionalmente en los ensayos de consolidación con carga incremental el término de la consolidación primaria y el inicio de la secundaria se hacen a partir de las curvas de consolidación (formato de Casagrande y Taylor) donde la variable que se mide es la deformación volumétrica. Bajo este criterio, en algunas muestras la curva no muestra un quiebre que indique el término de la consolidación primaria y el inicio de la secundaria.

Debido a que la Celda Rowe permite registrar la disipación de la presión de poro en cada incremento de carga, se ha visto que aunque el termino de cambio de volumen de la curva no muestre un quiebre, la disipación de presión de poro si lo muestra, por tanto permite definir dicha frontera.

1.1.-OBJETIVO

Revisión de la consolidación unidimensional en los suelos cohesivos de la Ciudad de México.

Llevar a cabo el trabajo experimental con los complementos adecuados en la Celda Rowe

Las pruebas que se realizan, se hicieron bajo condiciones de carga incremental en la Celda Rowe

Mediante la lectura de disipación de poro, se demostró la consolidación secundaria.

2.-ANTECEDENTES

2.1 CONSOLIDACIÓN

Los materiales que se usan en la ingeniería sufren deformaciones, de acuerdo a una relación esfuerzo-deformación. Los suelos saturados sufren deformaciones cuando se les aplica un esfuerzo. La deformación que presentan los suelos no es inmediata al aplicarse un esfuerzo. Cuando un suelo saturado es sometido a incrementos de carga, al principio esta acción es transmitida al agua. Necesitan expulsar parte de los fluidos que contiene el suelo, y cuando un suelo es poco permeable y el agua constituye gran parte, la expulsión del agua requiere mucho tiempo. La relación del suelo entre esfuerzo y deformaciones es mucho más complicada en comparación a otros materiales. (**Figura 2.1**)

Es de suma importancia la predicción de la magnitud de los asentamientos y el tiempo en el que éstos se desarrollan. Para que se dé un cambio volumétrico, el tiempo que le lleve al suelo dependerá de la permeabilidad y las dimensiones de la masa del suelo. Cuando un suelo es permeable la deformación se presenta de inmediato cuando es colocada la carga; en cambio, cuando un suelo es poco permeable como lo son las arcillas, el tiempo de deformación es mayor, incluso puede llegar a ser de años, se le conoce como consolidación a la acción de reducir el volumen de los poros y la expulsión de agua en el tiempo.

La consolidación es muy distinta a la compactación, ya que la consolidación es un proceso mediante el cual se extrae agua del suelo, logrando así que las partículas del suelo estén más cerca unas de otras, mientras que la compactación es una redistribución mecánica la cual es efectuada con rapidez por medio de maquinaria.

Las pruebas de laboratorio son hechas con muestras pequeñas, en las cuales se produce la consolidación en tiempos bastante cortos, ya que el tiempo en el que un estrato de arcilla se consolida debido a la carga de una estructura es muy largo.

Los equipos de laboratorio que se utilizan para estudiar este fenómeno son los consolidómetros (generalmente para realizar en ensaye de carga incremental) y los más comunes son denominados como “de palanca”; sin embargo, existen

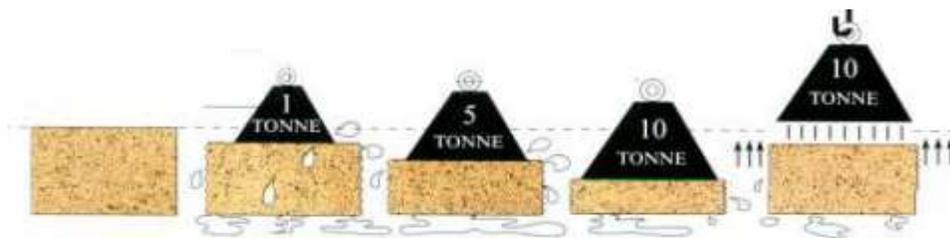


Figura 2.1
Esquema de consolidación en campo (Head, 1986)

Consolidómetros neumáticos que son la modificación del aparato tradicional (Consolidómetro de anillo flotante); con los cuales se aplican los esfuerzos axiales mediante membranas o diafragmas y se miden mediante manómetros. Algunos de estos tienen la ventaja respecto a los de palanca que pueden aplicar confinamientos axiales y contrapresión con agua presurizada, lo cual permite saturar la probeta antes de la consolidación, condición que no permite uno de palanca.

Para el estudio que aquí se presenta se utilizaron dos consolidómetros neumáticos (Celdas Rowe) que permiten aplicar presión axial y contrapresión a la probeta y registrar la disipación de presión de poro en la etapa de ensaye.

2.2 ARCILLAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS Y PRE-CONSOLIDADAS

Cuando un suelo se encuentra en campo, éste se ha sometido a presiones efectivas máximas. Esta presión pasada puede ser igual o incluso mayor que la presión de sobrecarga a la que se encuentra en el momento del muestreo. Existe cierta expansión debido a que es liberada la presión en campo.

Cuando una presión total aplicada en la muestra es mayor a la presión efectiva máxima del pasado, el cambio de relación de vacíos es mucho mayor, esta relación es verificada en laboratorio, cargando de una manera que exceda la presión de sobrecarga efectiva máxima y luego descargándola y recargándolo de nuevo.

Las arcillas pueden estar; *normalmente consolidadas*; la presión de sobrecarga efectiva actual es la presión del suelo en el pasado, y *pre-consolidada*; esto es lo contrario de la antes mencionada, esto quiere decir que la presión a la que estuvo sometida la arcilla es mayor que la presión que actualmente se presenta en dicho suelo.

2.3 COMPRESIBILIDAD DE LAS ARCILLAS DEL VALLE DE MÉXICO

Los depósitos del subsuelo con material arcilloso se caracterizan por ser extraordinariamente compresibles. El espesor de estas capas varía entre los 15 y 40 m, no es de sorprenderse que los asentamientos totales que se presentan en estas zonas vayan de decímetros, inclusive hasta metros, razón por la cual es importante determinar las propiedades de compresibilidad de los suelos, ya que nos permite predecir los asentamientos que se puedan presentar.

Las arcillas están normalmente consolidadas, pre-consolidación; esto quiere decir que las cargas de pre-consolidación resultan del mismo orden que las presiones efectivas, pero éstas no siempre coinciden con el esfuerzo producido por el peso del terreno.

El responsable de que se generen hundimientos en la Ciudad de México y aumento de las cargas de pre-consolidación es el bombeo de agua del subsuelo que ha provocado grandes pérdidas de presiones y esto provoca todo lo antes mencionado.

Debido a que este tipo de arcilla es muy compresible, cuando se ejecuta un ensaye de consolidación con carga incremental y los esfuerzos corresponden a la rama virgen, las deformaciones de la consolidación primaria pueden traslaparse con los de la secundaria y la curva no muestra el quiebre que divide la consolidación primaria de la secundaria, lo cual dificulta la interpretación de los resultados (Marsal, 1959).

2.4 PRUEBA DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL

Prueba originariamente desarrollada por el profesor K. Terzaghi, debido a la necesidad de establecer una relación de la presión aplicada, reducción de volumen, tiempo requerido para que se lleve a cabo y la deformación volumétrica que se presenta. Esta prueba consiste en aplicar carga únicamente vertical a una pastilla inalterada, confinada por un anillo y la única deformación que ésta presenta es en una sola dirección. Esquema de consolidómetro convencional como lo muestra la **Figura 2.2**

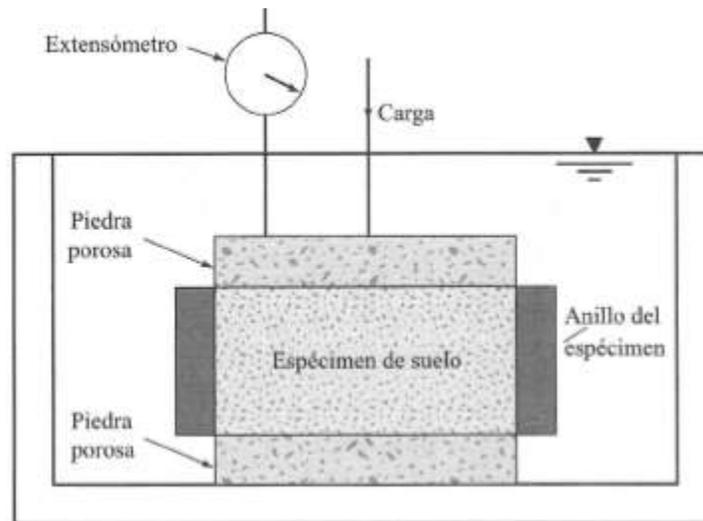


Figura 2.2

Consolidómetro (Consolidación unidimensional en laboratorio, Braja M. Das, 1985, fundamentos de la ingeniería geotécnica)

Durante la prueba se aplica una serie de incrementos crecientes de carga axial, y debido a que el agua debe salir del espécimen a través de las piedras porosas, el volumen es medido por un extensómetro montado en un puente fijo. En cada aumento de carga se debe medir los cambios volumétricos, con los datos que se registran podemos obtener las curvas de consolidación.

A las curvas de consolidación obtenidas en cada incremento se les da un tiempo arbitrario, donde la lectura del extensómetro, de más allá de la consolidación primaria, y la presión y lectura de extensómetro correspondientes proporcionen, también datos para el trazado de la curva de compresibilidad.

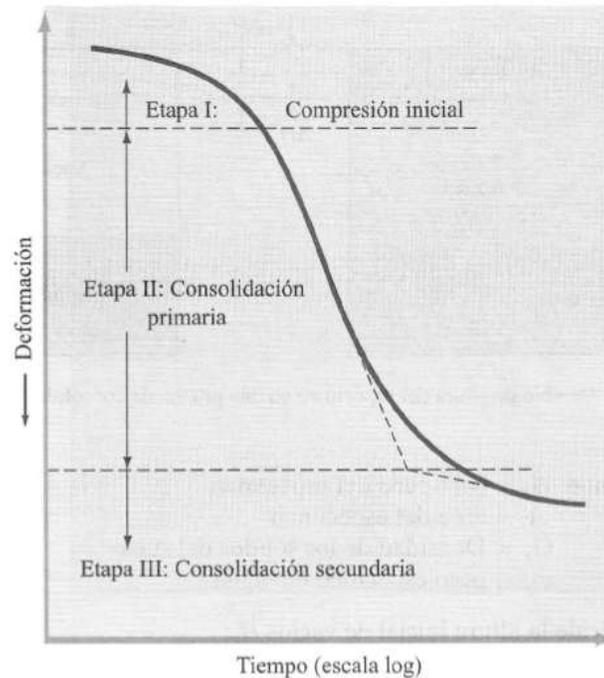


Figura 2.3

Gráfica tiempo-deformación durante la consolidación para un incremento dado de carga. (Braja M. Das, 1985, fundamentos de la ingeniería geotécnica)

2.5 CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

Se atribuye al desplazamiento progresivo en el tiempo, entre las partículas del material que se acomodan, lo cual tiende a estados mucho más compactos que se adaptan a una nueva condición de carga. Se considera que es posible que en esta etapa llegue a contribuir alguna clase de flujo plástico a las partículas del suelo arcillosos. Y al momento de las deformaciones o deslizamientos se comparan con la velocidad de expulsión de agua, se hace notable y esto se refleja en las curvas de consolidación.

3.-EQUIPO Y SOFTWARE

En la **Figura 3.1** tenemos el equipo de una Celda Rowe, la cual está conformada por los siguientes elementos:

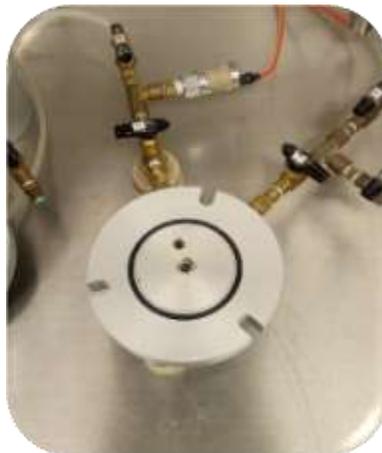
- Base
- Cuerpo de la celda
- Tapa



*Figura 3.1
Celda Rowe*

3.1 BASE

La base que podemos encontrar en la **Figura 3.2**, cuenta con dos conexiones, las cuales permiten introducir o expulsar agua, dependiendo la etapa en la que se encuentre la prueba. Esto es posible debido que al centro se aprecia una base circular y en ella encuentran dos orificios encargados de las funciones ya antes mencionadas. Esta base está conectada con el transductor de presión de poro.



*Figura 3.2
Base de la Celda Rowe con conexiones para presión de poro y
contrapresión.*

3.1 CUERPO DE LA CELDA

Pieza de aluminio que contiene a la muestra, este elemento contiene un recubrimiento de teflón (el cual reduce la fricción que se pueda generar entre el material y el cuerpo de aluminio), la principal función es permitir únicamente la deformación vertical, con esfuerzo aplicado axial, en la **Figura 3.3** se puede observar el cuerpo de la Celda



Figura 3.3

Cuerpo de la Celda, aquí se aloja la muestra para la prueba. Solo permite deformaciones verticales, no horizontales

3.2 TAPA

Elemento final de la celda, mediante el cual es aplicado el esfuerzo axial, distribuyéndola mediante un diafragma de poliuretano que se presenta en la **Figura 3.4**, conforme se va incrementando el esfuerzo, éste va ejerciendo presión en la muestra, este sistema cuenta con un transductor de esfuerzo axial. También cuenta con un transductor de desplazamiento (LVDT) el cual se puede apreciar en la **Figura 3.5**, al igual que la base permite el paso del agua.



Figura 3.4

Membrana por la cual es aplicado el esfuerzo axial



Figura 3.5

Tapa de la celda, en ella se encuentra el LVDT, conexiones para esfuerzo axial y contrapresión.

La Celda Rowe cuenta con conexiones y componentes, los cuales permiten el manejo adecuado de la celda;

- a) Reguladores, su función es regular la presión con la que se trabajara en toda la prueba (axial y contrapresión). Podemos observar cómo están constituidas en la **Figura 3.6**
- b) Bureta, mide la entrada y expulsión de agua, la cual entra o sale de la muestra, en las etapas correspondientes.
- c) Interfaz, encargado de alimentar el esfuerzo axial (agua).
- d) Tanque, encargado de alimentar las presiones. (**Figura 3.7**)
- e) Transductores en la **Figura 3.8** se presentan los diferentes transductores de presiones y desplazamientos que son vitales para la etapa de consolidación.

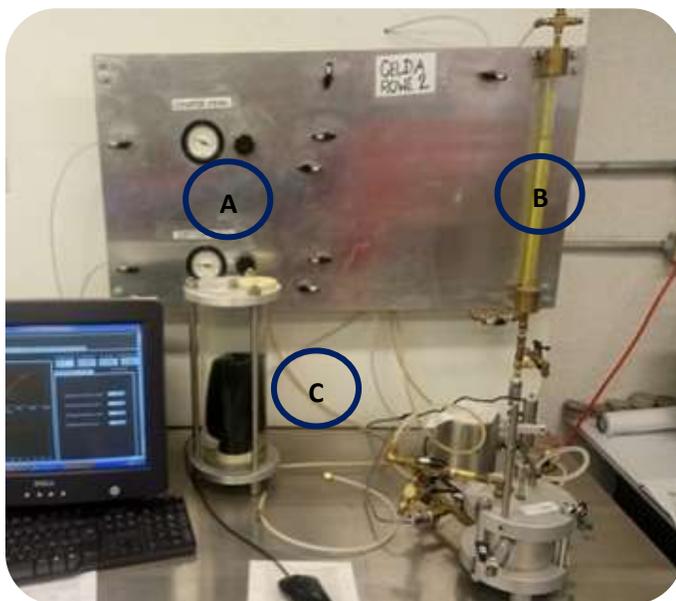


Figura 3.6

Celda Rowe y complementos (A) Reguladores, (B) Bureta, (C) Interfaz.



Figura 3.7

(D) Tanque, alimentador de las presiones

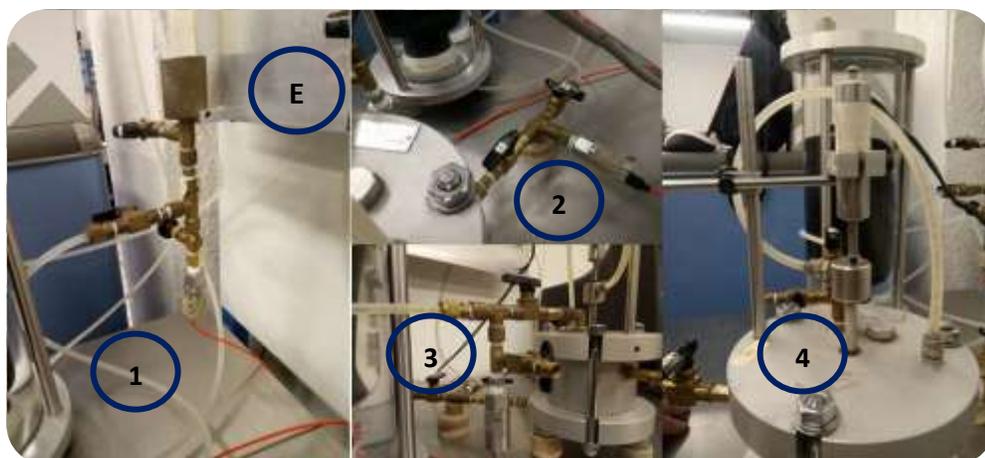


Figura 3.8

(E) Transductores de contrapresión (1), presión de poro (2), esfuerzo axial (3), desplazamiento (4)

4.-CALIBRACIÓN

El programa de la Celda Rowe cuenta con varias opciones;

1. Calibrar transductores
2. Cambiar constante de calibración de transductores

La **Figura 4.1** nos permite elegir la opción de calibración de transductores con los cuales se trabajará, el programa que se presenta en la **Figura 4.2** guarda los datos de la última calibración, la fecha de calibración, pendiente y ordenada, así como los parámetros del patrón (unidades, pendiente [en este caso se habla de la constante del mercurio debido a que se calibra junto con la línea de medición]).



Figura 4.1
Menú de calibración de la Celda Rowe



Figura 4.2
Menú de transductores a calibrar

La Celda Rowe cuenta con cuatro transductores, estos son de suma importancia para el buen funcionamiento de la celda en la etapa de consolidación, debido a que estos toman las lecturas de presiones (poro, axial y contrapresión) y desplazamientos. La **Figura 4.3** y la **Figura 4.4** muestran los transductores con los que cuenta la Celda Rowe.

Transductores	Características		
De presión	MARCA MEAS		
	Modelo : MSP-300-100-		
	P-2-N-1		
	Presión de operación:		
	0 psi a 100psi		
	Tensión de Voltaje: 0V		
a 100mV			
Voltaje suministro: 5V			
Rango de temperatura:			
-20C a +85C			
LVDT	MARCA SCHAEVITZ		
	SENSORS		
	Modelo: PCA-116-300		
	Rango de Frecuencia:		
	50Hz a 10kHz		
	Rango de medición:		
0.30"			
Voltaje de excitación:			
3Vrms			
Rango de temperatura:			
-55C a +95C			

Figura 4.3 Transductor de presiones

Figura 4.4 Transductor de desplazamiento

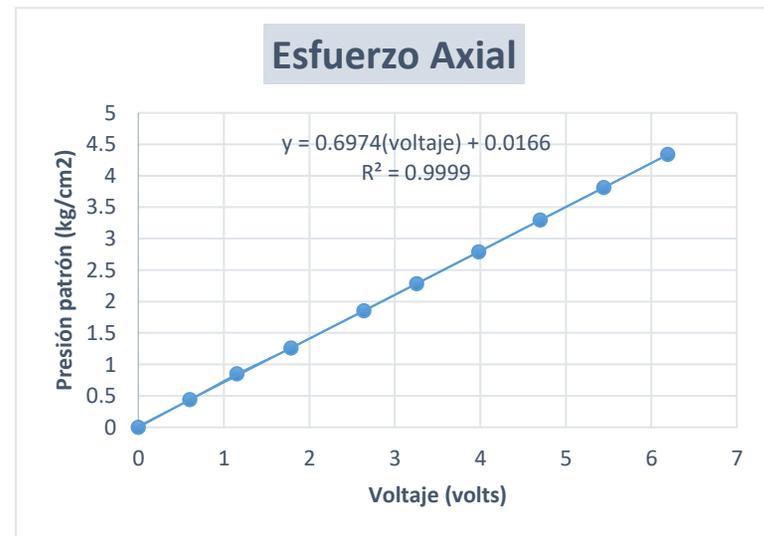
Para la calibración de los transductores de presión es necesario que se conecte el regulador correspondiente a cada calibración en la columna de mercurio, en el caso de los transductores de presión de poro y contrapresión, se tuvo que aislar el paso de línea para evitar que al momento de que se calibrara la contrapresión existiera la posibilidad de que al mismo tiempo se estuviera calibrando la presión de poro y no afectara el buen funcionamiento de ambos transductores, en las lecturas correspondientes.

Ya que se encuentra conectado el regulador con la línea de medición, la calibración se lleva a cabo tomando como patrón la columna de mercurio, registrando la altura de ésta, con el voltaje de salida que toma el programa. Los incrementos van de 0.5 kg/cm², y en cada incremento se van trazando puntos experimentales, así llegando a obtener la pendiente que corresponda a las constantes de cada sensor.

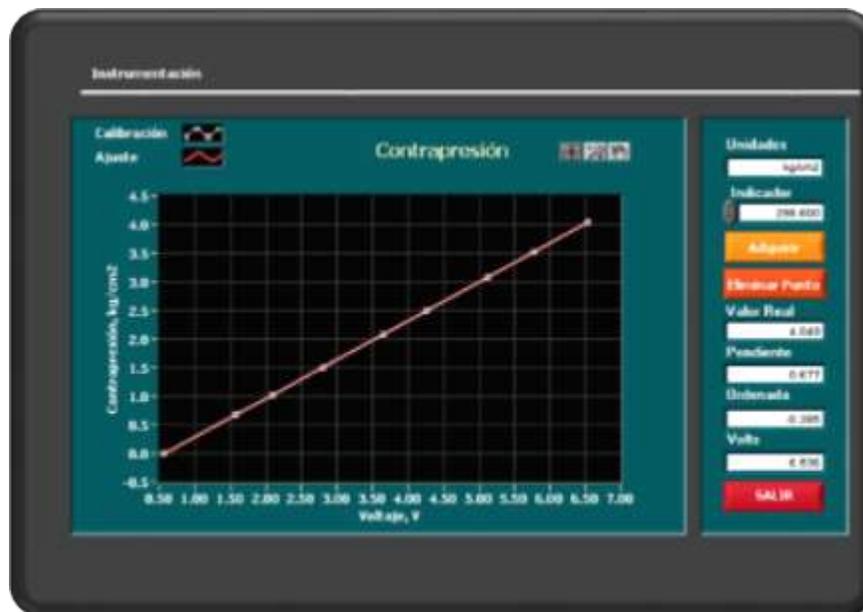
4.1 PRESIÓN AXIAL



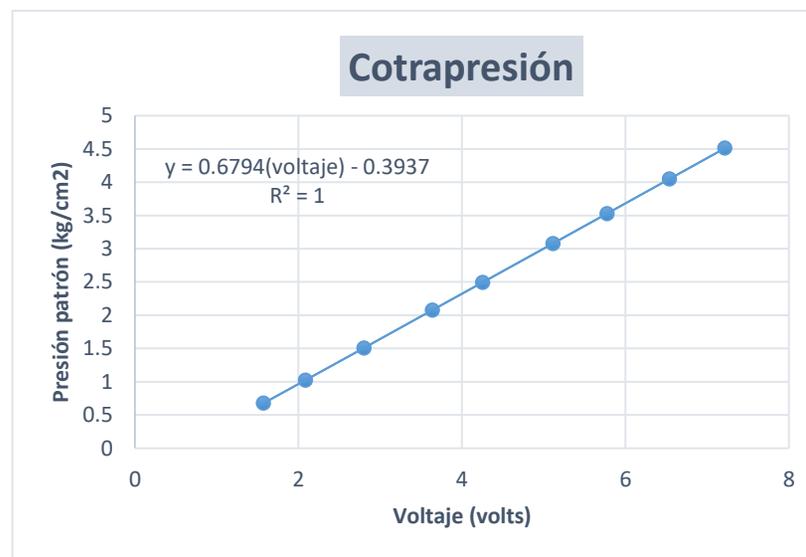
ESFUERZO AXIAL	
Sensor Volts	Sistema patrón
0	0
0.602	0.438
1.152	0.8475
1.786	1.2597
2.639	1.8537
3.255	2.2821
3.982	2.7906
4.699	3.2924
5.442	3.8131
6.192	4.3365



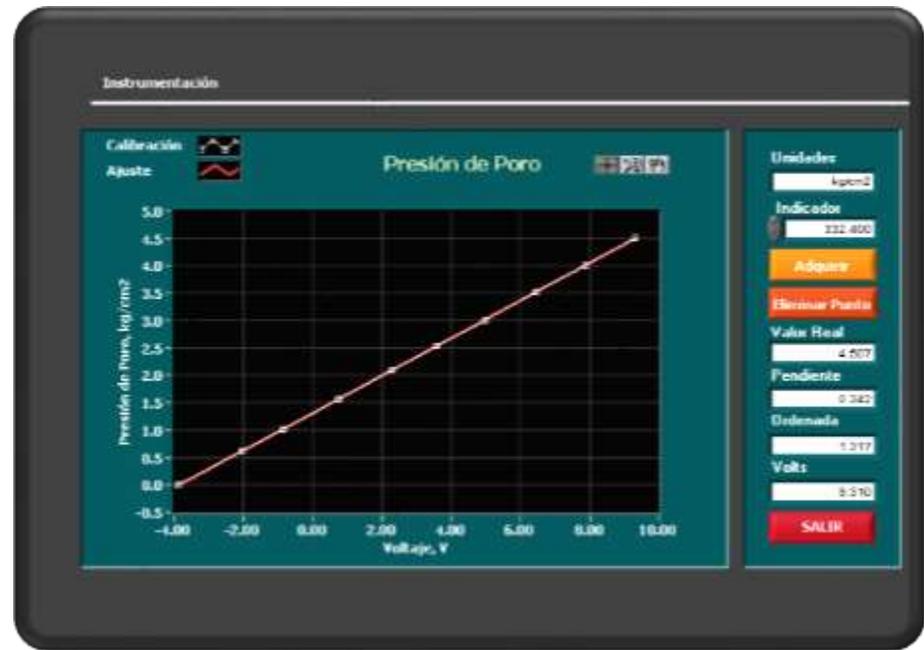
4.2 CONTRAPRESIÓN



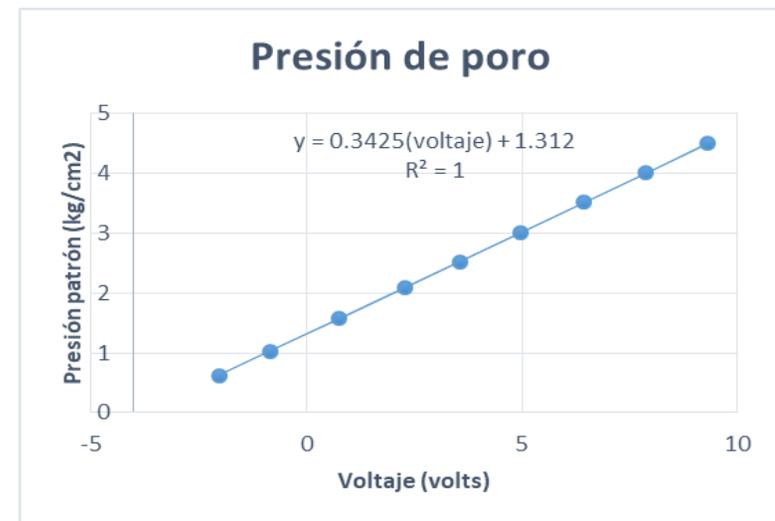
CONTRAPRESIÓN	
Sensor Volts	Sistema patrón
1.571	0.677
2.084	1.024
2.8	1.508
3.637	2.075
4.254	2.492
5.114	3.077
5.773	3.528
6.536	4.049
7.215	4.511



4.3 PRESIÓN DE PORO



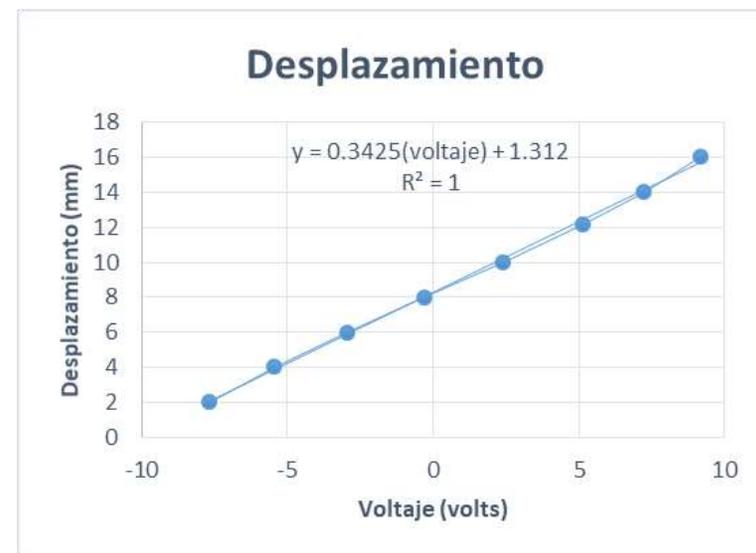
PRESIÓN DE PORO	
Sensor Volts	Sistema patrón
-2.029	0.624
-0.851	1.024
0.762	1.57
2.275	2.086
3.562	2.526
4.955	3.005
6.447	3.52
7.871	4.01
9.31	4.507



4.4 DESPLAZAMIENTO



DESPLAZAMIENTO	
Sensor Volts	Sistema patrón
-7.6711	2.006
-5.4492	4.003
-2.9357	6.008
-0.2869	8.007
2.3733	10.005
5.1197	12.154
7.2313	14.005
9.1552	16.019



5.-ENSAYES.

Para la realización de las pruebas de laboratorio se utilizó la Celda Rowe, pastillas inalteradas del sitio donde se lleva a cabo el análisis, también fue necesario el obtener las propiedades de los suelos, ya que son de suma importancia, su interpretación puede predecir el comportamiento futuro de los suelos.

Las muestras son obtenidas del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, ubicada en la Zona Federal del Ex-lago de Texcoco. **Figura 5.1 y Figura 5.2** muestra un espécimen a ensayar en la Celda Rowe.

Antecedentes

El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se encuentra situado al noroeste de la Cd. de México, en el antiguo Lago de Texcoco. La topografía de la región es prácticamente plana, la vegetación en el ex-vaso se caracteriza por pastizales halófitos inducidos y naturales. Existen zonas sin cobertura de vegetales, con inundaciones permanentes.

PRUEBAS	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
Menard SS-02 M 2/3	4.90 a 5.10 m	Arcilla limosa de color verde con presencia de materia orgánica de consistencia suave
Menard SS-02 M 14/4	26.9 a 27.10 m	Arcilla verde consistencia suave con materia orgánica y sales
NAICM TBH212 M44	21.0 a 21.60 m	Arcilla color verde con presencia de arena, consistencia suave.
NAICM SM-12 M-3	5.0 a 5.60 m	Arcilla café de consistencia suave con presencia de arenas
NAICM SM-12 M-6	15.50 a 16.10 m	Limo arenoso de color café de consistencia suave
NAICM SM-12 M-9	24.75 a 25.55 m	Arcilla verde de consistencia suave con presencia de ceniza volcánica
NAICM SM 30(SS) M1	3.50 a 4.10 m	Arcilla verde oscura consistencia firme con presencia de carbonatos y arenas
NAICM SM 30(SS) M5	19.60 a 20.20m	Arcilla verde de consistencia firme con arena y carbonatos



Figura 5.1

Muestra extraída de tubo para pruebas de consolidación.



Figura 5.2

Muestra una vez que sale de la prueba y se pone a secar al horno

5.1.-PROCEDIMIENTO DE ENSAYES.

La celda Rowe es un equipo para consolidación, dicho equipo permite el drenaje de manera vertical ascendente, con medición de poro. Las etapas que se llevan a cabo en la Celda son las siguientes:

- ✓ Saturación
- ✓ Medición de la B de Skempton
- ✓ Consolidación
- ✓ Resultados

Antes de montar la muestra se deben saturar las líneas, esto se hace para evitar que en la línea exista una posibilidad de que le entre aire a la muestra, se hace circular agua por la línea hasta estar seguro de que ésta se encuentre saturada.

5.1.1 SATURACIÓN

Una vez montada la muestra, debe estar aislada (se cierran las válvulas de contrapresión y axial, esto evitará que la muestra sufra alguna alteración al momento de fijar los esfuerzos.

- 1) Válvula axial (8) y válvulas contrapresión (11,12 y 13)
- 2) En el programa se ingresa a la saturación y se fija en reguladores los esfuerzos correspondientes.
- 3) Una vez fijado los esfuerzos y estabilizados, se abre la válvula de esfuerzo axial (8), ya estabilizada la axial se indica al programa que se aplicaran los esfuerzos.
- 4) Una vez que el contador del programa inicia, se abren las válvulas de contrapresión (11,12 y 13). Primero se abrirán las de contrapresión inferiores (11 y 13) después la superior (12).
- 5) Se debe observar la bureta, que se está saturando la muestra y verificar que los esfuerzos no sean elevados que provoquen expulsión de agua.
- 6) Enseguida se cierran las válvulas en el mismo orden, primero inferiores y después superior
- 7) Se toma las lecturas y datos correspondientes, lectura de bureta y se hace el mismo procedimiento hasta el esfuerzo requerido.

5.1.2 MEDICIÓN B DE SKEMPTON

Una vez que se termina la etapa de saturación, se inicia la medición de la B de Skempton, antes de hacer la medición se deben cerrar las válvulas para evitar que la muestra sufra alguna alteración.

- 1) En el programa se ingresa al apartado de B de Skempton
- 2) Se toman las lecturas iniciales, de esfuerzos axial y de poro pero con los esfuerzos establecidos en la última etapa de la saturación
- 3) Una vez tomados esos datos únicamente se deja abierta la válvula destinada la presión de poro (11) y se cierra la válvula de contrapresión.
- 4) Se da un ajuste al esfuerzo axial final, para tener una unidad arriba del inicial, se abre válvula de esfuerzo axila (8) y se deja que se estabilice.
- 5) Se capturan datos para obtener la B *

5.1.3 CONSOLIDACIÓN

Es la etapa en la cual se hará la lectura de carga axial, contrapresión, presión de poro y desplazamiento.

- 1) Una vez obtenida la B de Skempton en el programa se pasa a la viñeta de ensaye, en el cual se aísla la muestra, se disipara la presión excedente de la etapa anterior en el transductor de presión de poro, cerrando la válvula 11 y abriendo la 16. Esto permitirá que el transductor libere la presión acumulada en la etapa anterior y poder tener una lectura inicial de la muestra.
- 2) Una vez disipada, se vuelve a cerrar la válvula 16 y se abre la válvula 11 la cual se mantendrá abierta para que se puedan registrar las lecturas de presión de poro.
- 3) Se establece el esfuerzo efectivo, se fija la presión axial, (la configuración de las presiones que tendrá la prueba previamente han sido cargadas al programa, junto con un vector tiempo).
- 4) El nivel de la bureta es esencial, dependiendo la etapa de incremento o descarga, y debe tener carrera suficiente para la expulsión de agua.
- 5) Una vez fijada la presión, se abre la válvula 8 para aplicar el esfuerzo axial, y se observa la presión de poro máxima, una vez que ésta se estabilice se inicia la prueba.

* El valor mínimo de la B es 0.96 para considerar que está bien saturada la muestra, en dado caso que no se obtenga dicho datos, se debe continuar con la etapa de saturación.

6.-RESULTADOS.

Se realizaron pruebas de diversos sondeos, los cuales se obtuvieron los siguientes resultados

Lo más difícil de determinar es el 100% de la consolidación primaria y el inicio de la consolidación secundaria, en Consolidómetros convencionales en ocasiones es muy difícil lograr la interpretación de la presencia del cambio de consolidación primaria a secundaria, gracias a los complementos que conforma la Celda Rowe y la medición de disipación de poro, es posible ver el “quiebre” que presenta la curva de consolidación cuando se cumple el 100% de la primaria.

A continuación se muestran las curvas de compresibilidad con las respectivas curvas de consolidación de cada sondeo donde se aprecia la definición de tramos de consolidación primaria-secundaria.

Las pruebas se llevaron a cabo en la Celda Rowe mediante carga controlada, con vectores de carga y de tiempo ya establecidas, los vectores de cargas se asignaron dependiendo las propiedades de cada sondeo.

De cada prueba se obtuvieron datos y se procedió a graficar los resultados, se graficó la deformación a lo largo del tiempo en escala semi-logarítmica. Se utilizaron las curvas de Casagrande y Taylor para graficar deformación [δ (mm)] vs tiempo [t (s)].

Y en muestras que no se lograron definir las curvas de consolidación podría ser por las propiedades con las que están compuestas las muestras, en algunos casos se observó que estaba constituida por lentes de arena, sales, limos, entre otros.

La siguiente tabla nos muestra las pruebas las cuales se tuvieron algunos inconvenientes, debido a como se menciona anteriormente las curvas de consolidación no se lograban definir debido al tipo de materia que contenía la muestra, como se logra apreciar, son suelos con presencia de arenas, limos, materia orgánica y sales

PRUEBAS	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
Menard SS-02 M 2/3	4.90 a 5.10 m	Arcilla limosa de color verde con presencia de materia orgánica de consistencia suave
NAICM SM-12 M-6	15.50 a 16.10 m	Limo arenoso de color café de consistencia suave
NAICM SM-12 M-9	24.75 a 25.55 m	Arcilla verde de consistencia suave con presencia de ceniza volcánica
NAICM SM 30(SS) M1	3.50 a 4.10 m	Arcilla verde oscura consistencia firme con presencia de carbonatos y arenas

En los ensayos realizados, de los diversos sondeos en el valle de México (específicamente en la zona donde se ubica el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México), se obtuvieron los siguientes resultados:

No todas las muestras se definen en las curvas de consolidación, en este caso podemos observar la **Figura 6.1** donde muestra la curva de compresibilidad del sondeo Menard SS-02 M-14/4.

Menard SS-02 M-14/4

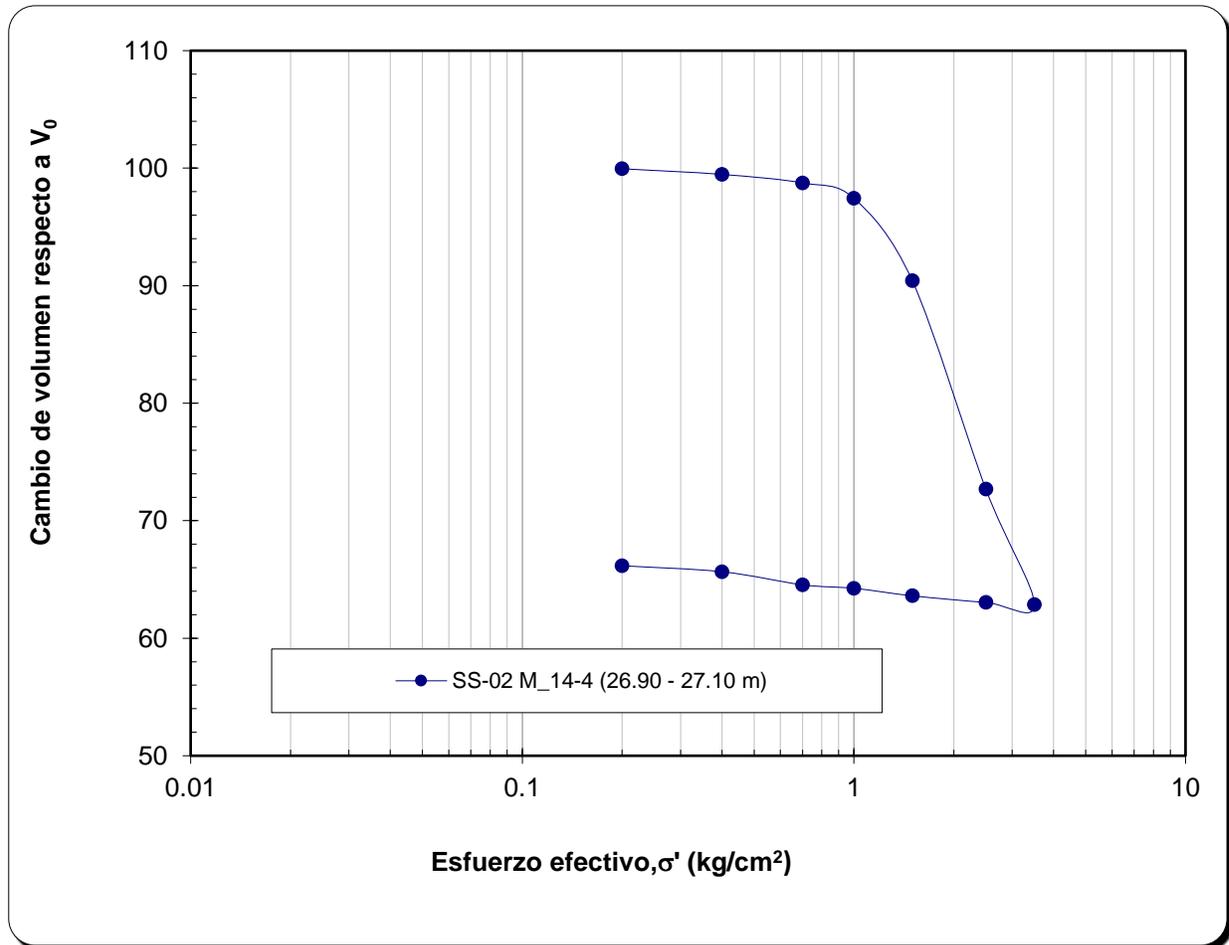


Figura 6.1
 Curva de compresibilidad "Sondeo Menard SS-02 M-14/4"
 Profundidad: 26.90 a 27.10m

Menard SS-02 M-14/4
Etapa 1 $\sigma' = 0.2 \text{ kg/cm}^2$

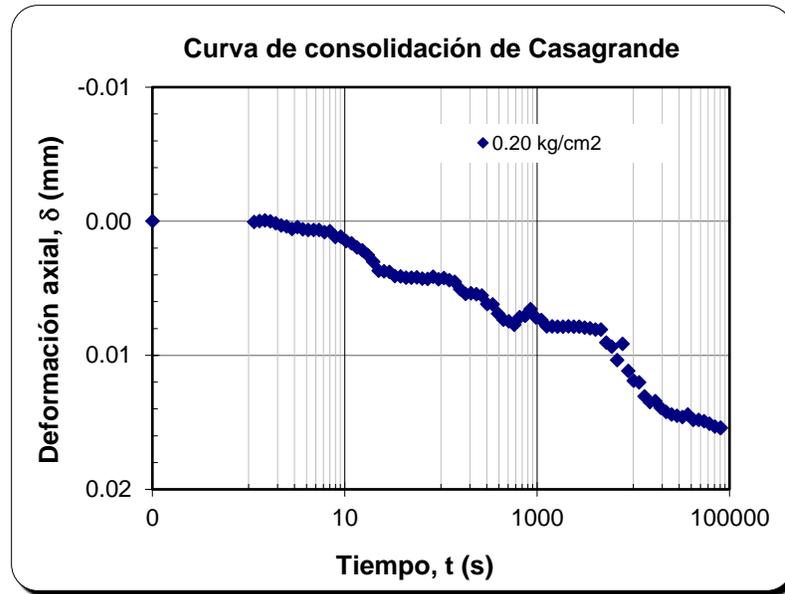


Figura 6.2

Etapa 1 (SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

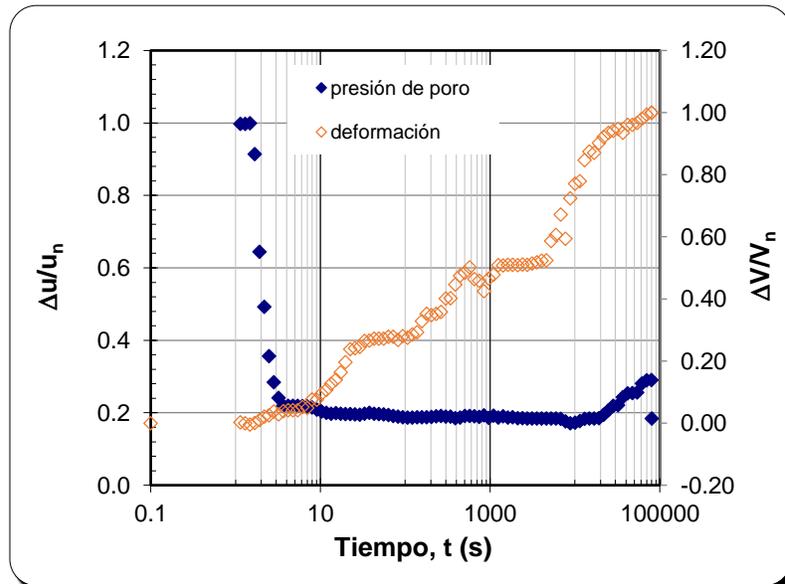


Figura 6.3

Etapa 1 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 0.2 kg/cm^2 . (Casagrande)

Menard SS-02 M-14/4
Etapla 2 $\sigma' = 0.4 \text{ kg/cm}^2$

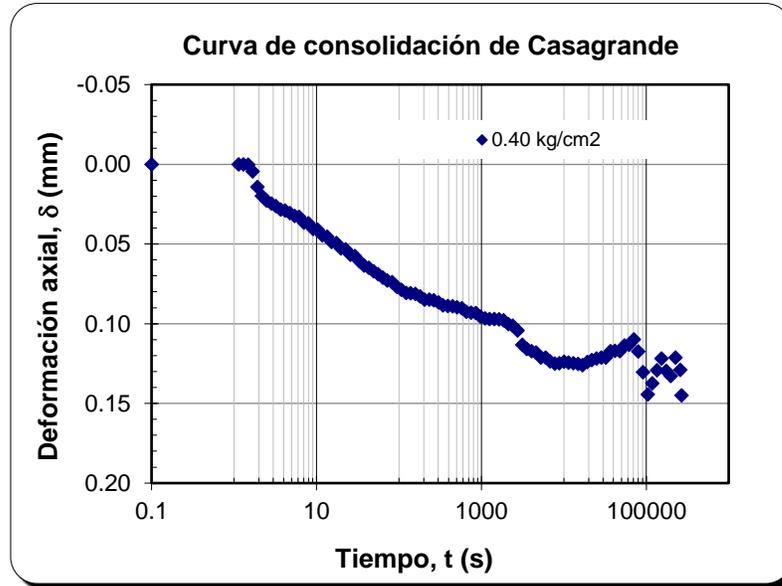


Figura 6.4

Etapla 2 (SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

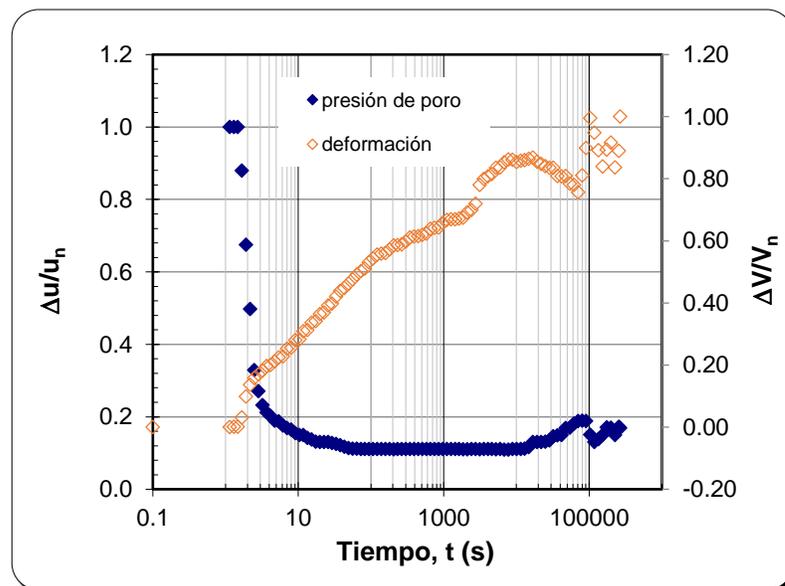


Figura 6.5

Etapla 2 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 0.4 kg/cm². (Casagrande)

Menard SS-02 M-14/4
Etapla 3 $\sigma' = 0.7 \text{ kg/cm}^2$

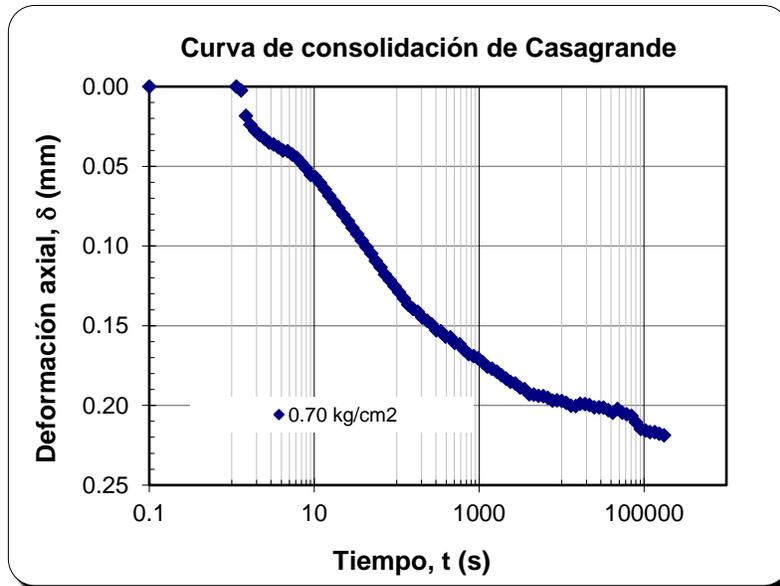


Figura 6.6

Etapla 3 (SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

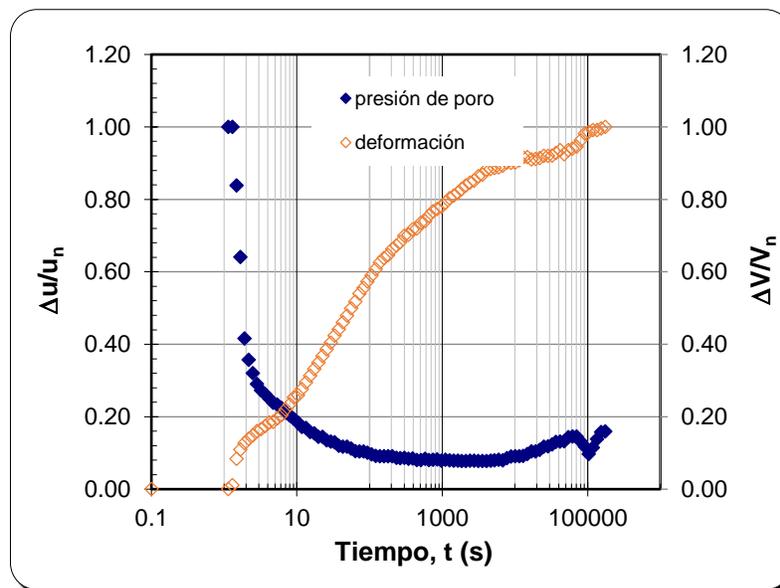


Figura 6.7

Etapla 3 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 0.7 kg/cm². (Casagrande)

Menard SS-02 M-14/4
Etapa 4 $\sigma' = 1.00 \text{ kg/cm}^2$

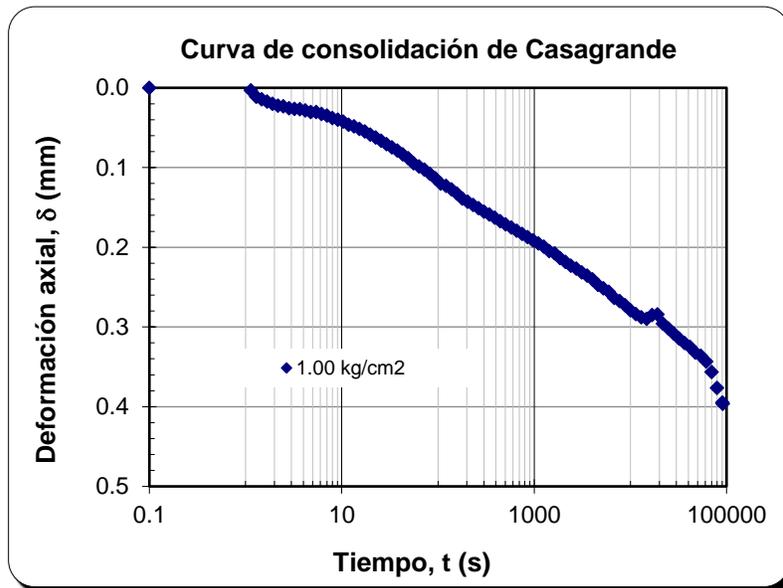


Figura 6.8

Etapa 4(SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

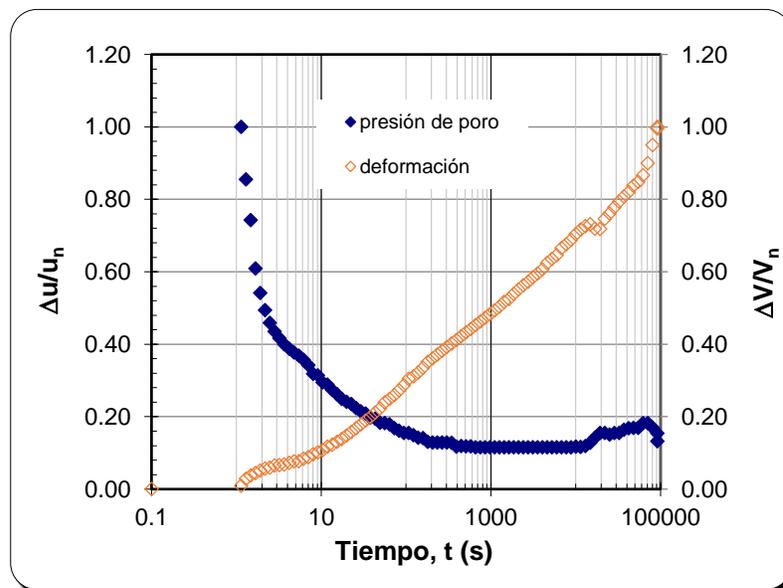


Figura 6.9

Etapa 4 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 1.0 kg/cm². (Casagrande)

Menard SS-02 M-14/4
Etapas 5 $\sigma' = 1.50 \text{ kg/cm}^2$

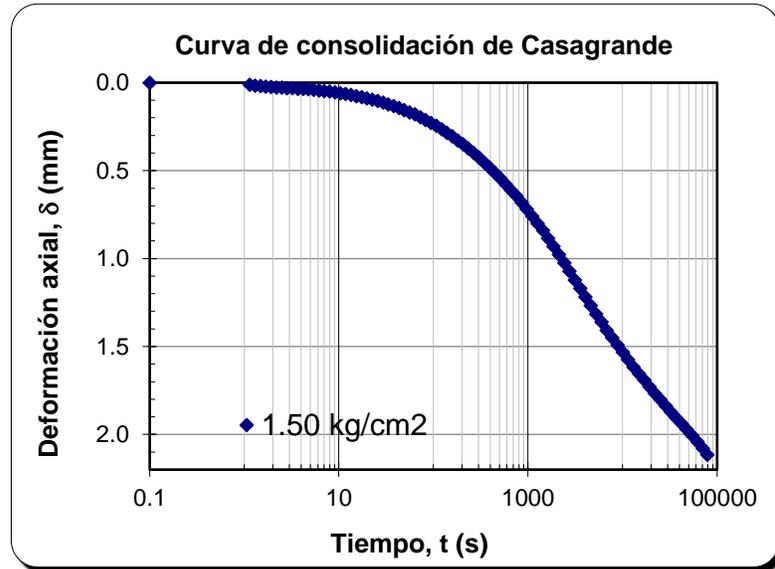


Figura 6.10

Etapas 4(SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

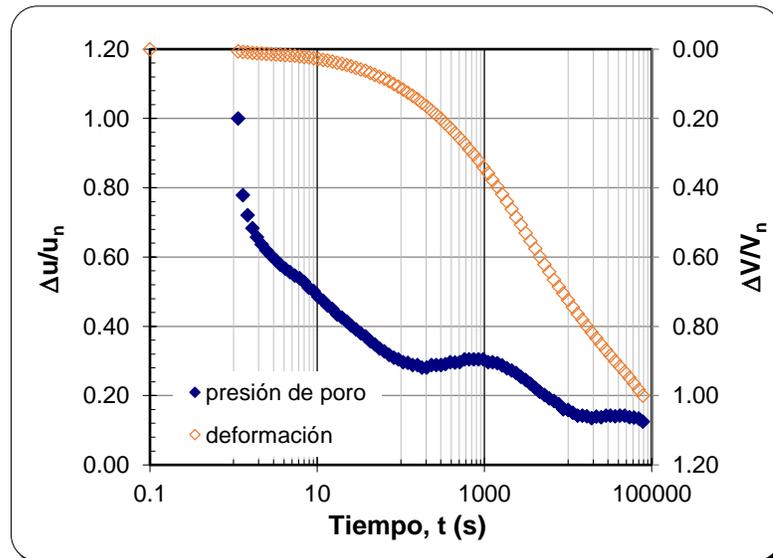


Figura 6.11

Etapas 4 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 1.0 kg/cm². (Casagrande)

Se observa que con esfuerzos mayores, las curvas de consolidación se definen mejor, que cuando se le aplica esfuerzos menores.

Menard SS-02 M-14/4
Etapa 6 $\sigma' = 2.50 \text{ kg/cm}^2$

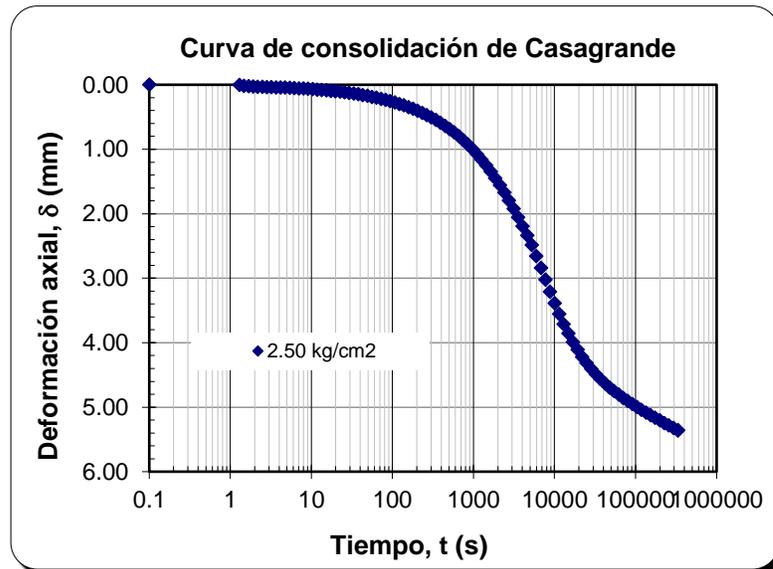


Figura 6.12

Etapa 5 (SS-02 M-14-/4) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

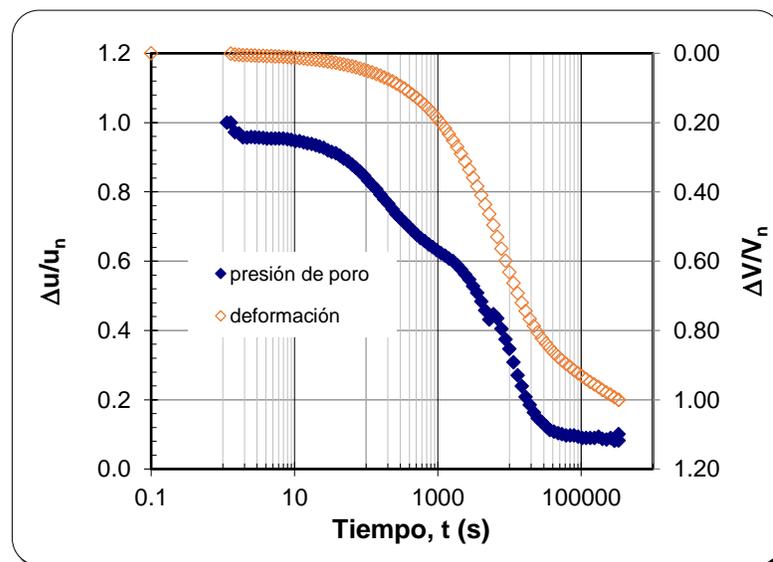


Figura 6.13

Etapa 4 (SS-02 M-14-/4) Esfuerzo Efectivo 1.0 kg/cm². (Casagrande)

NAICM TBH-212 M-44

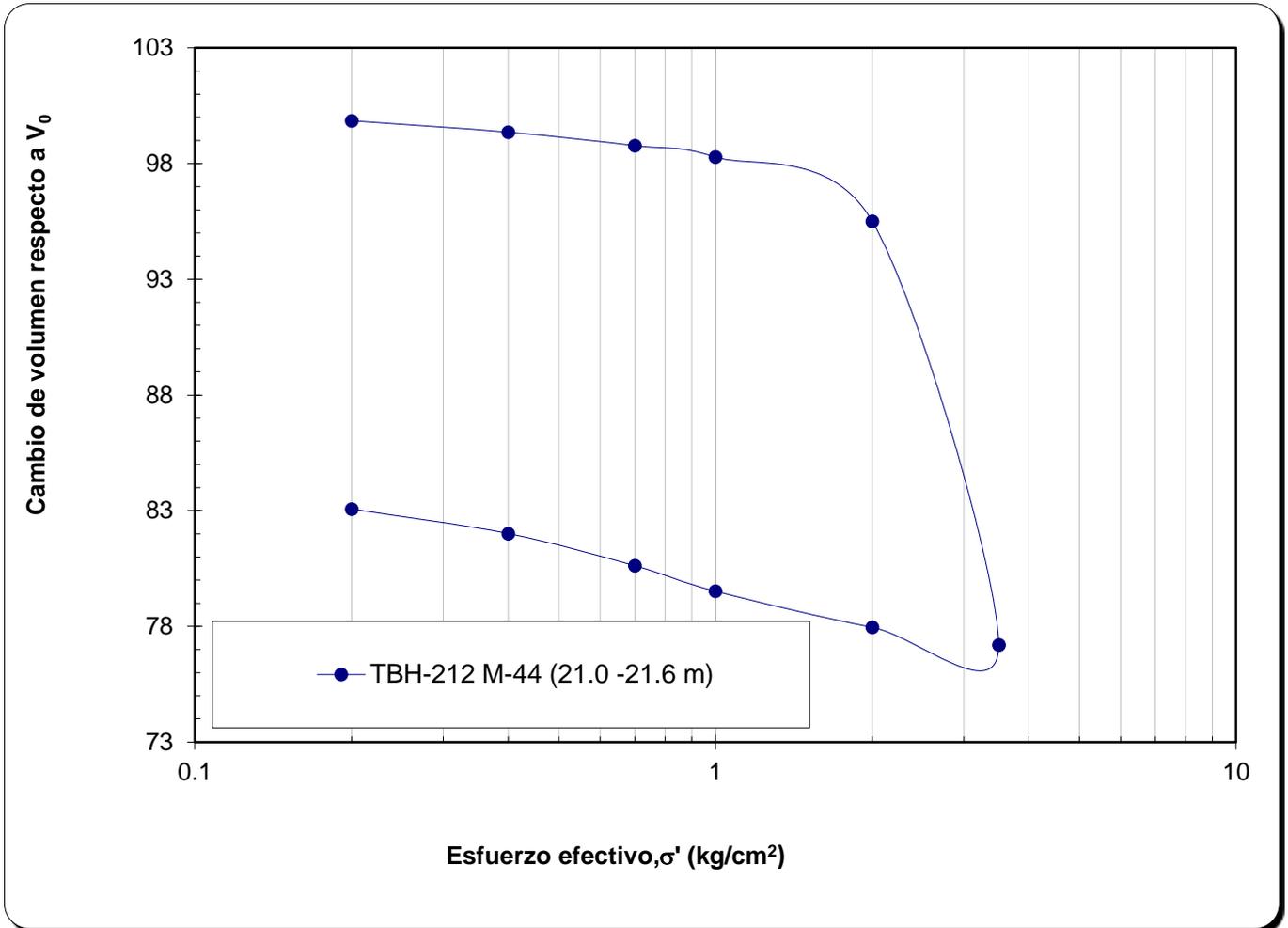


Figura 6.14
 Curva de compresibilidad "Sondeo NAICM TBH-212 M-44"
 Profundidad: 21.0 a 21.60 m

NAICM TBH-212 M-44	
Etapa 1	Etapa 2
$\sigma' = 0.2 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 0.4 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 0.045 \text{ mm}$	$\delta = 0.194 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
99.85%	99.36%
Etapa 3	Etapa 4
$\sigma' = 0.7 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 1.0 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 0.369 \text{ mm}$	$\delta = 0.520 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
98.78%	98.28%

Figura 6.15
 Primeras etapas del sondeo "NAICM TBH-212 M-44", con sus respectivos esfuerzos efectivos y deformaciones

NAICM TBH-212 M-44
Etapas 5 $\sigma' = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

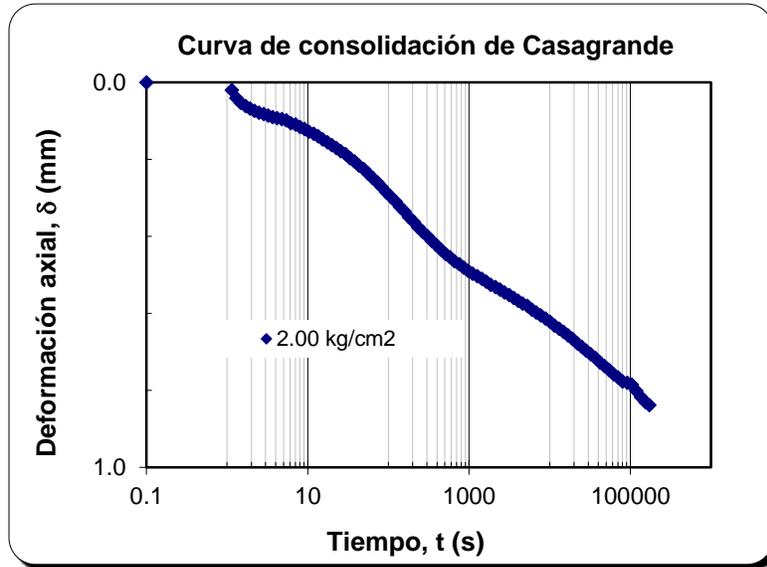


Figura 6.16

Etapas 5 (TBH-212 M-44) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

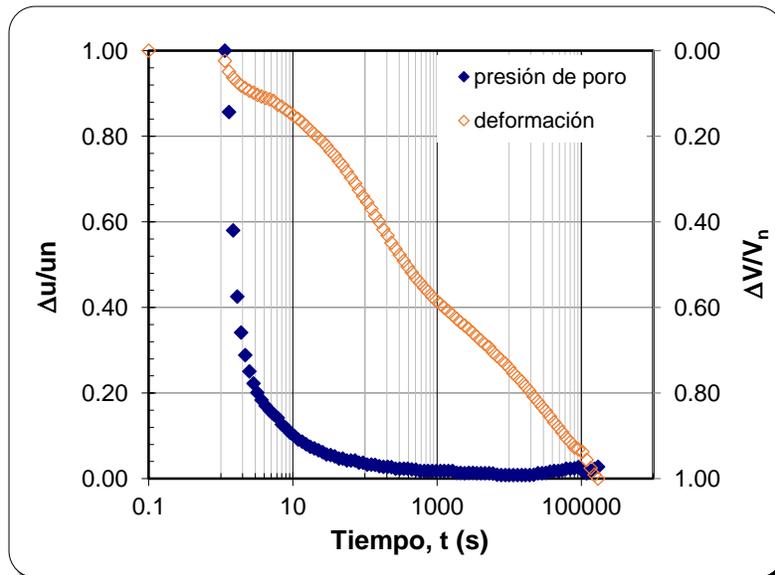


Figura 6.13

Etapas 5 (TBH-212 M-44) Esfuerzo Efectivo 1.0 kg/cm². (Casagrande)

NAICM TBH-212 M-44
Etapla 6 $\sigma' = 3.50 \text{ kg/cm}^2$

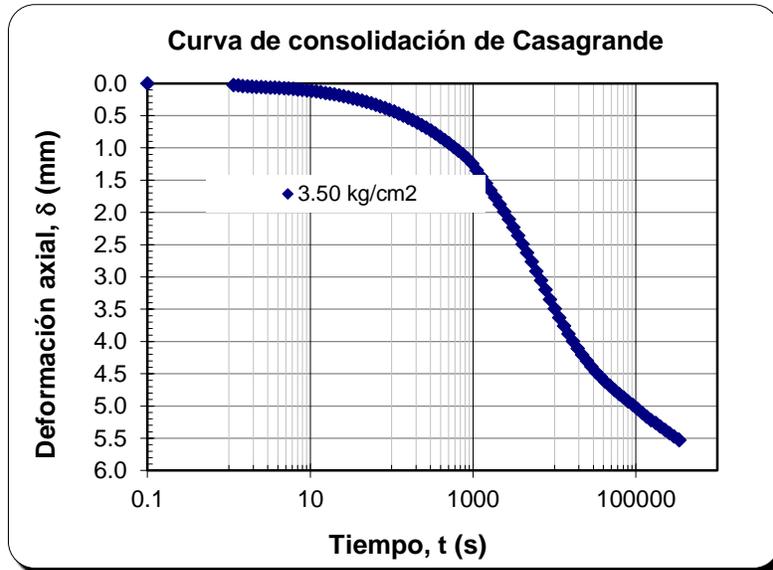


Figura 6.16

Etapla 6 (TBH-212 M-44) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

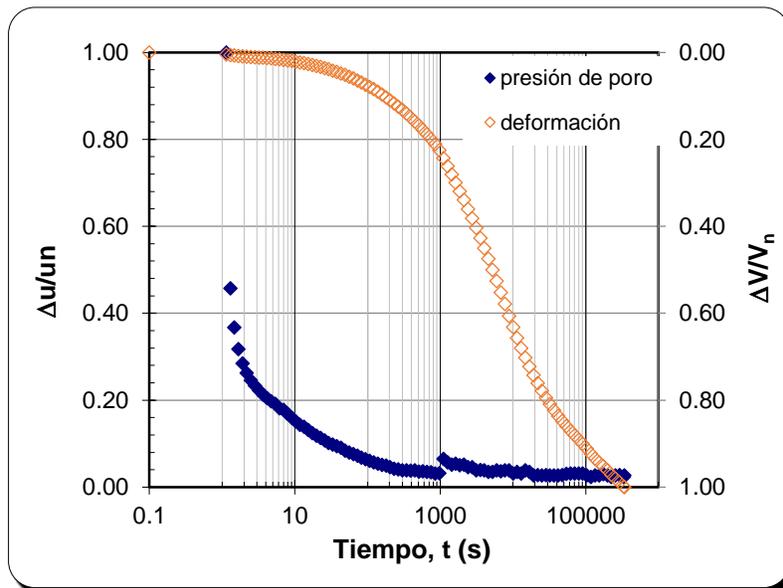


Figura 6.19

Etapla 6 (THB-212 M-44) Esfuerzo Efectivo 3.5 kg/cm². (Casagrande)

NAICM SM-12 M-3

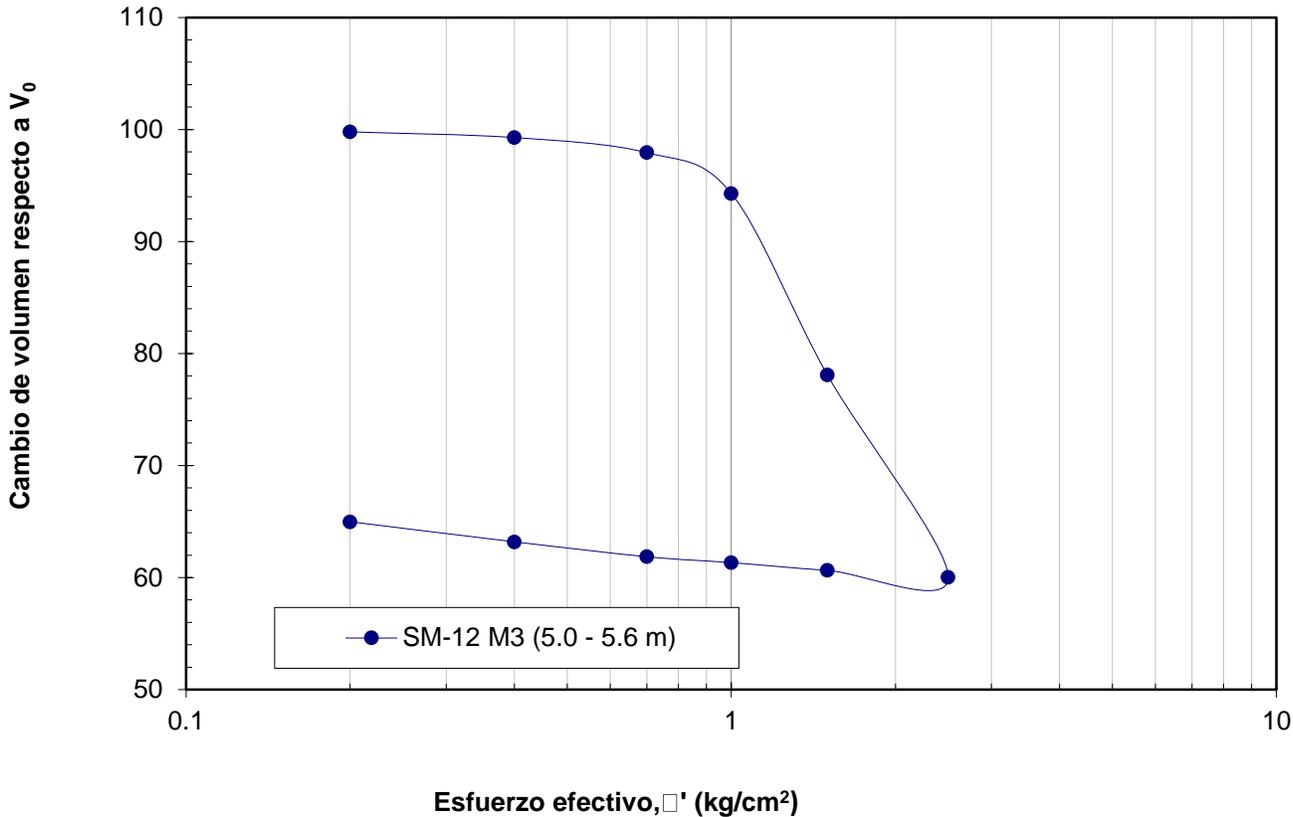


Figura 6.20
 Curva de compresibilidad "Sondeo NAICM SM-12 M-3"
 Profundidad: 5.0 a 5.60 m

NAICM SM-12 M-3		
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
$\sigma' = 0.2$ kg/cm ²	$\sigma' = 0.4$ kg/cm ²	$\sigma' = 0.7$ kg/cm ²
$\delta = 0.064$ mm	$\delta = 0.219$ mm	$\delta = 0.625$ mm
ΔV	ΔV	ΔV
99.79%	99.28%	97.93%

Figura 6.21
 Primeras etapas del sondeo "NAICM SM-12 M-3", con sus respectivos esfuerzos efectivos y deformaciones

NAICM SM-12 M-3
Etapa 4 $\sigma' = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

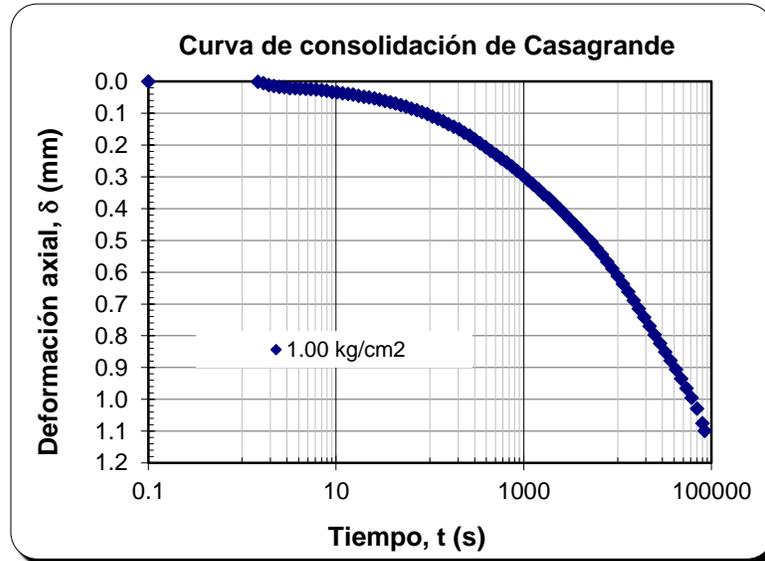


Figura 6.22

Etapa 4 (SM-12 M-3) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

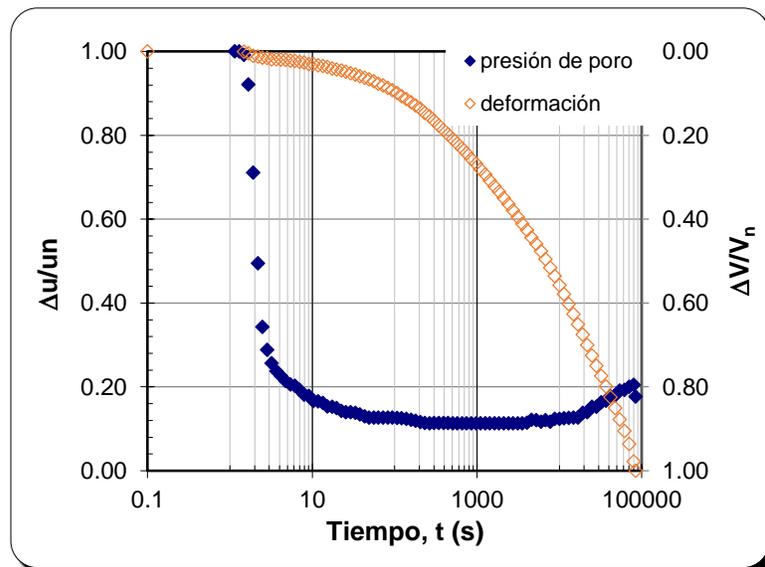


Figura 6.23

Etapa 4 (SM-12 M-3) Esfuerzo Efectivo 1.0 kg/cm². (Casagrande)

NAICM SM-12 M-3
Etapas 5 $\sigma' = 1.50 \text{ kg/cm}^2$

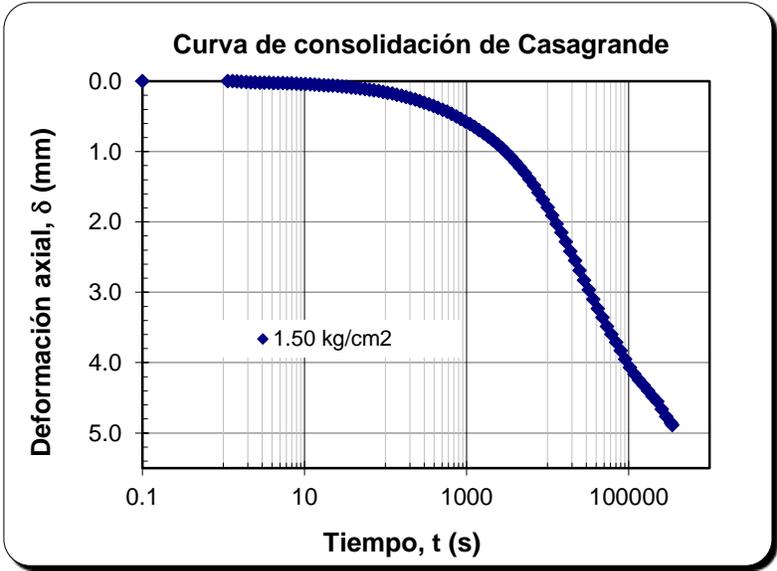


Figura 6.24

Etapas 5 (SM-12 M-3) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

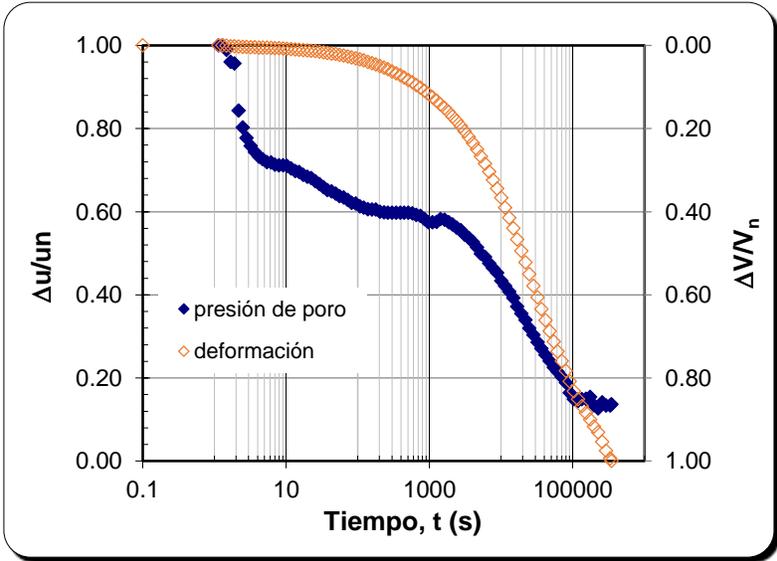


Figura 6.25

Etapas 4 (SM-12 M-3) Esfuerzo Efectivo 1.50 kg/cm^2 . (Casagrande)

Los siguientes sondeos que se presentan se definieron mejor que los sondeos anteriores:

NAICM SM-30 M-1

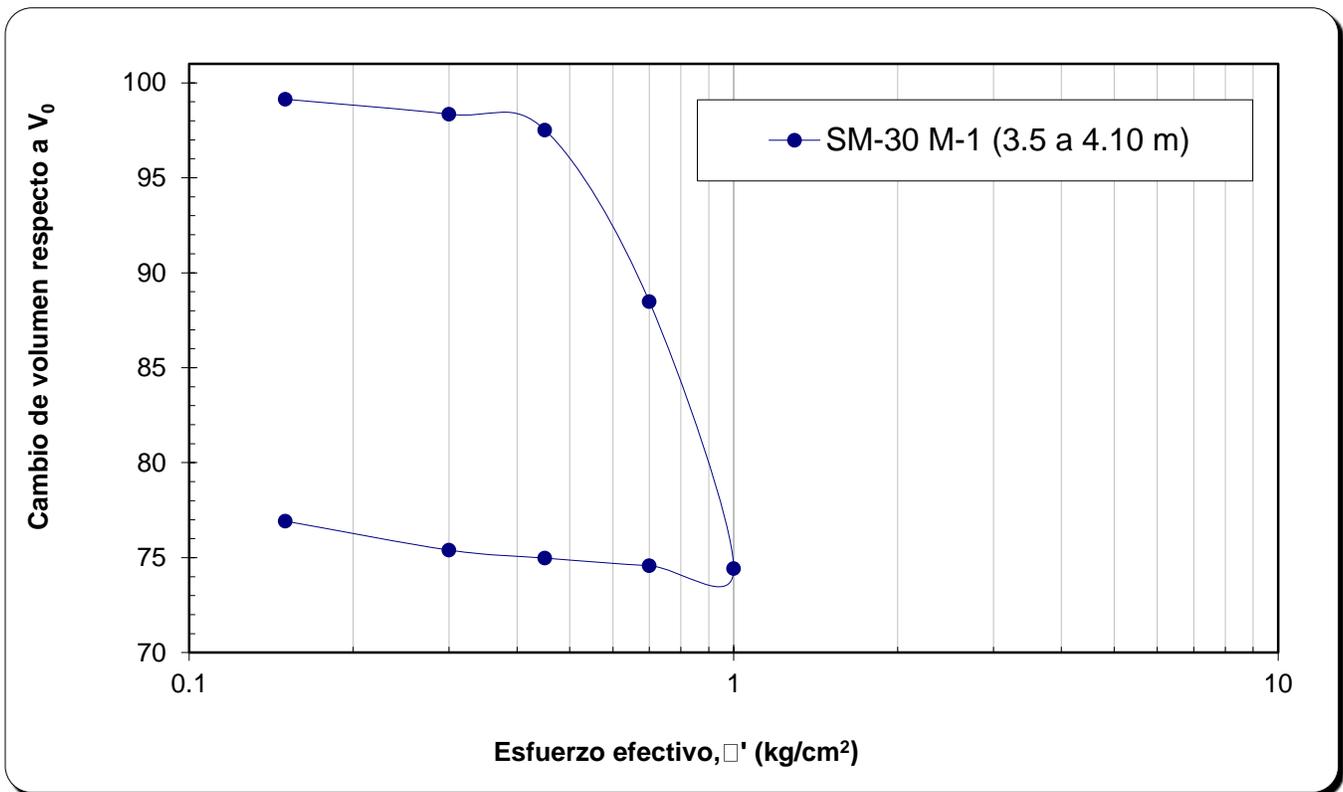


Figura 6.26
Curva de compresibilidad "Sondeo NAICM SM-30 M-1"
Profundidad: 3.50 a 4.10 m

Menard SM-30 M-1	
<u>Etapa 1</u>	<u>Etapa 2</u>
$\sigma' = 0.15 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 0.30 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 0.260 \text{ mm}$	$\delta = 0.499 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
99.14%	98.35%
<u>Etapa 3</u>	<u>Etapa 4</u>
$\sigma' = 0.45 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 0.70 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 0.748 \text{ mm}$	$\delta = 3.478 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
97.52%	88.48%

Figura 6.27
Primeras etapas del sondeo "NAICM SM-12 M-3", con sus respectivos esfuerzos efectivos y deformaciones

A continuación se muestran curvas de consolidación de Casagrande y de Taylor. Y sus respectivos métodos para el cálculo del tiempo de consolidación y el porcentaje de Consolidación Primaria y Consolidación Secundaria. (Figuras 6.28 a 6.41)

SM-30 M-1

Etapa 4 $\sigma' = 0.7 \text{ kg/cm}^2$

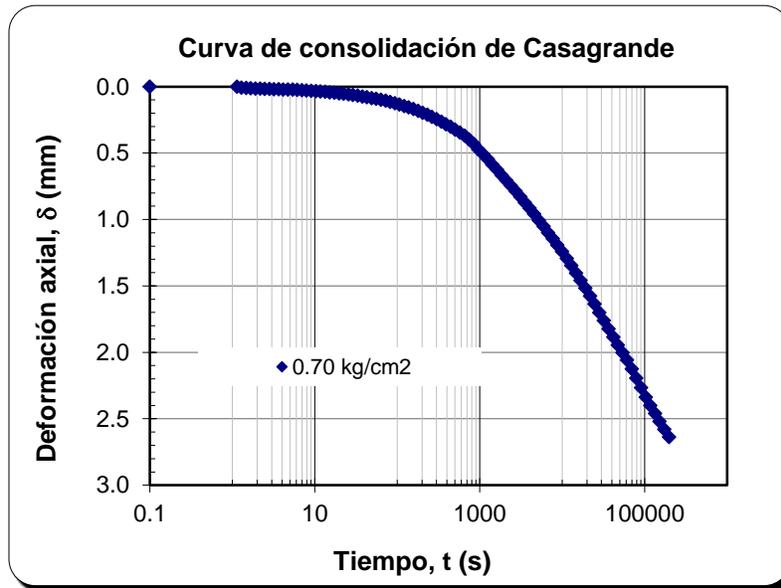


Figura 6.28

Etapa 4 (SM-30 M-1) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

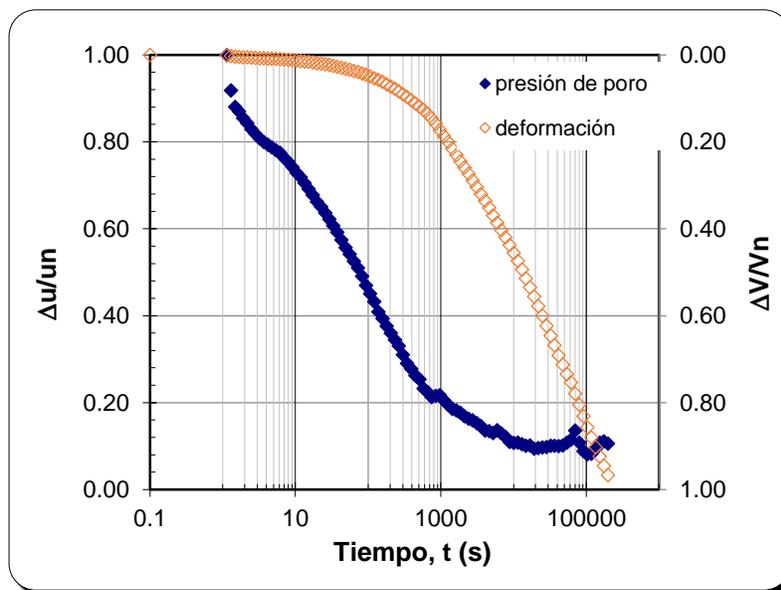
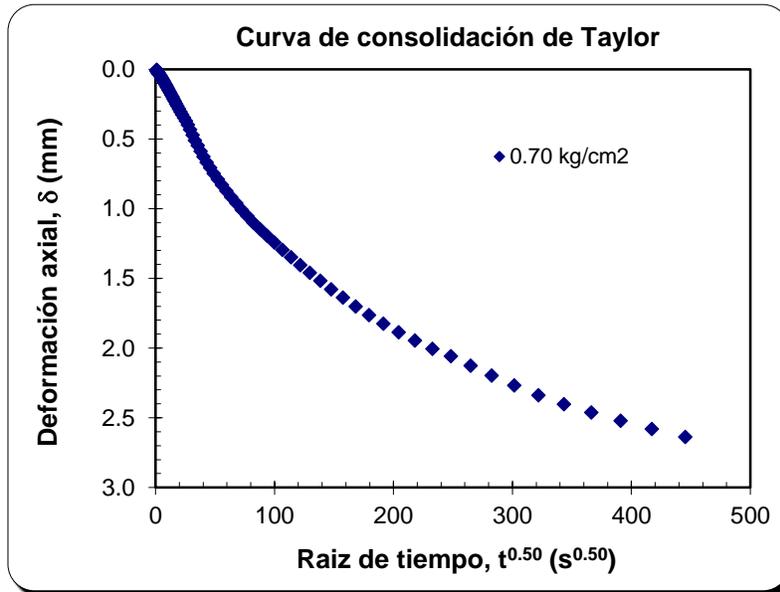


Figura 6.29

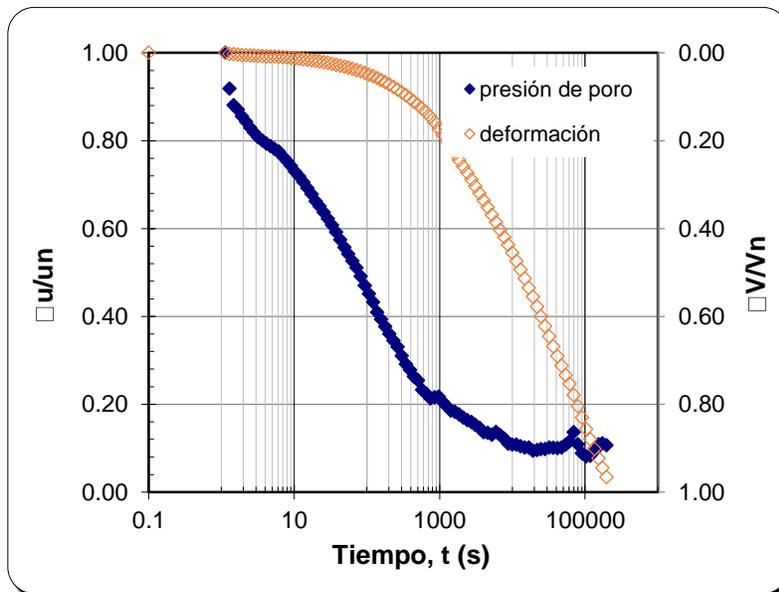
Etapa 4 (SM-30 M-1) Esfuerzo Efectivo 0.70 kg/cm². (Casagrande)

Etapa 4 $\sigma'=0.7 \text{ kg/cm}^2$



Gráfica 6.30

Etapa 4 (SM-30 M-1) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Taylor)



Gráfica 6.31

Etapa 4 (SM-30 M-1) Esfuerzo Efectivo 0.7 kg/cm². (Taylor)

MÉTODO DE CASAGRANDE

Curva de consolidación de Casagrande

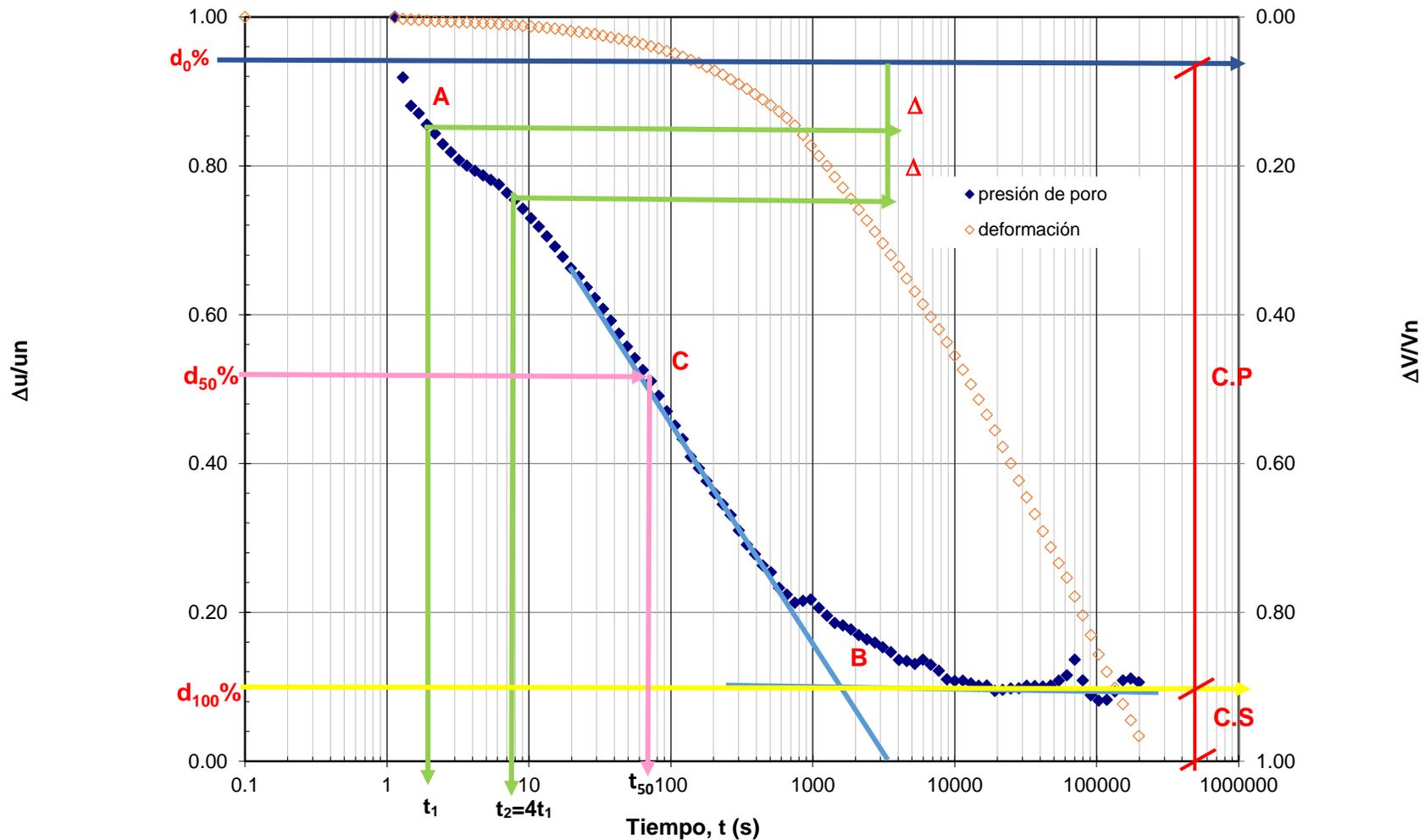


Figura 6.32

Método de Casagrande para cálculo de tiempos de consolidación

MÉTODO DE TAYLOR

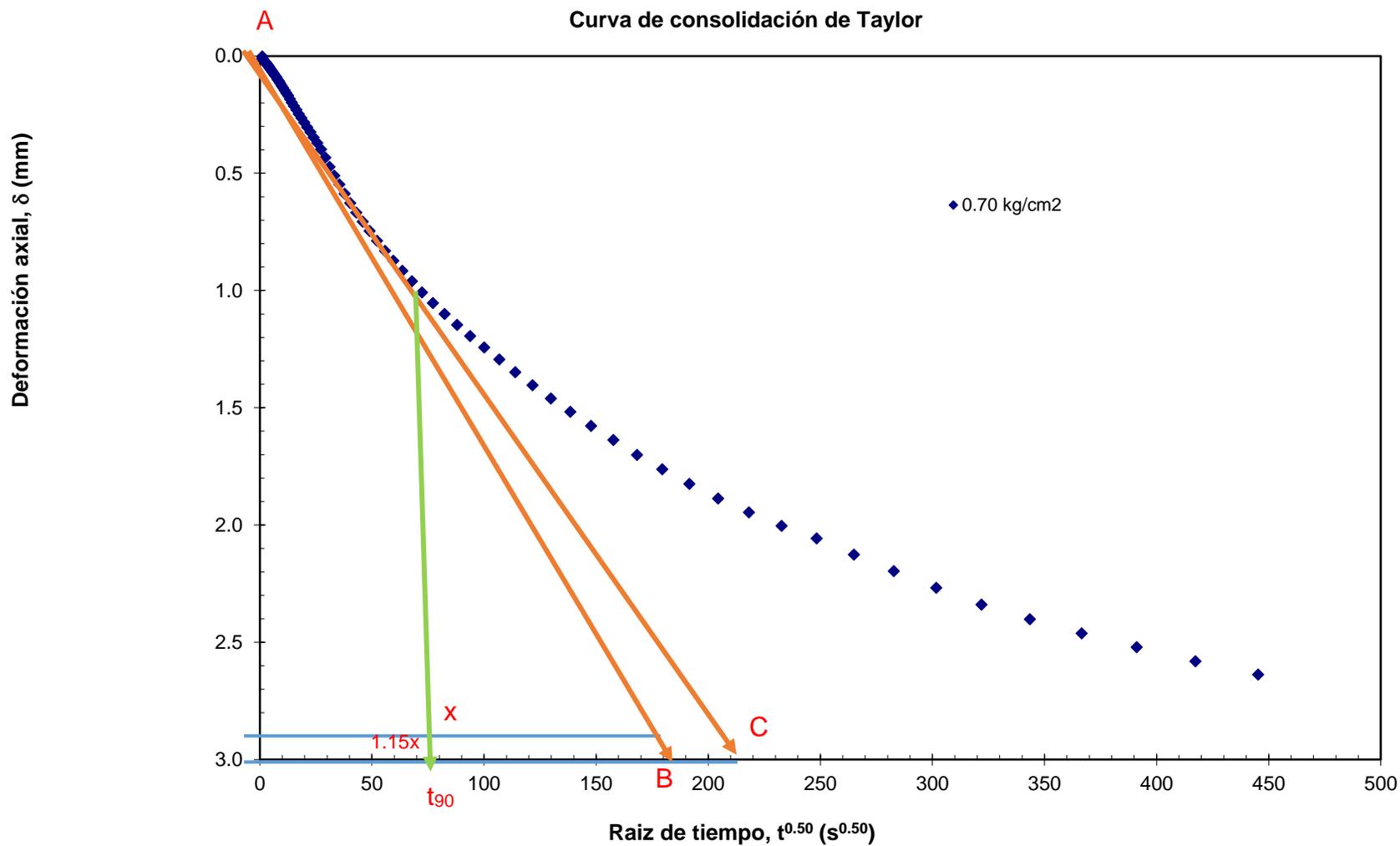


Figura 6.33
Método de Taylor para cálculo de tiempo de consolidación

SM-30 M-5

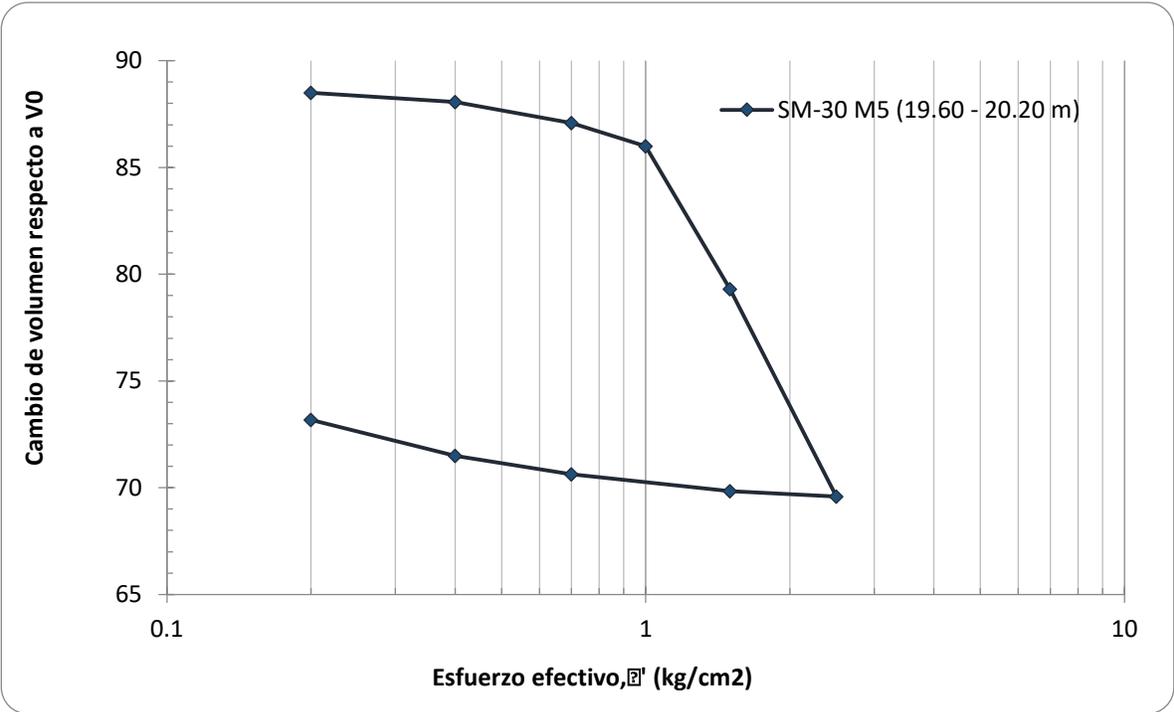


Figura 6.34
 Curva de compresibilidad " Sondeo NAICM SM-30 M-5"
 Profundidad: 19.60 a 20.20 m

Menard SM-30 M-5	
<u>Etapa 1</u>	<u>Etapa 2</u>
$\sigma' = 0.2 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 0.40 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 3.475 \text{ mm}$	$\delta = 3.602 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
88.49%	88.07%
<u>Etapa 3</u>	<u>Etapa 4</u>
$\sigma' = 0.70 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma' = 1.00 \text{ kg/cm}^2$
$\delta = 3.902 \text{ mm}$	$\delta = 4.232 \text{ mm}$
ΔV	ΔV
87.08%	85.99%

Figura 6.35
 Primeras etapas del sondeo "NAICM SM-30 M-5", con sus respectivos esfuerzos efectivos y deformaciones

SM-30 M-5
Etapa 5 $\sigma' = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

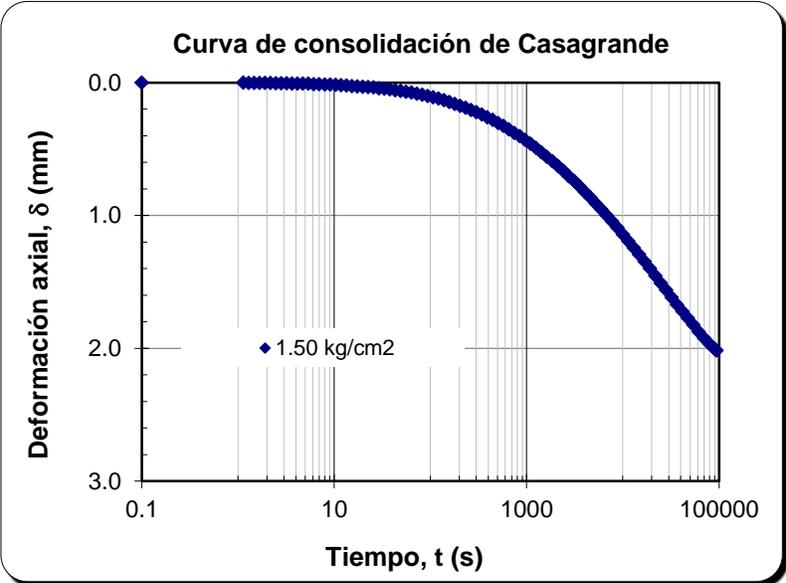


Figura 6.36

Etapa 5 (SM-30 M-5) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Casagrande)

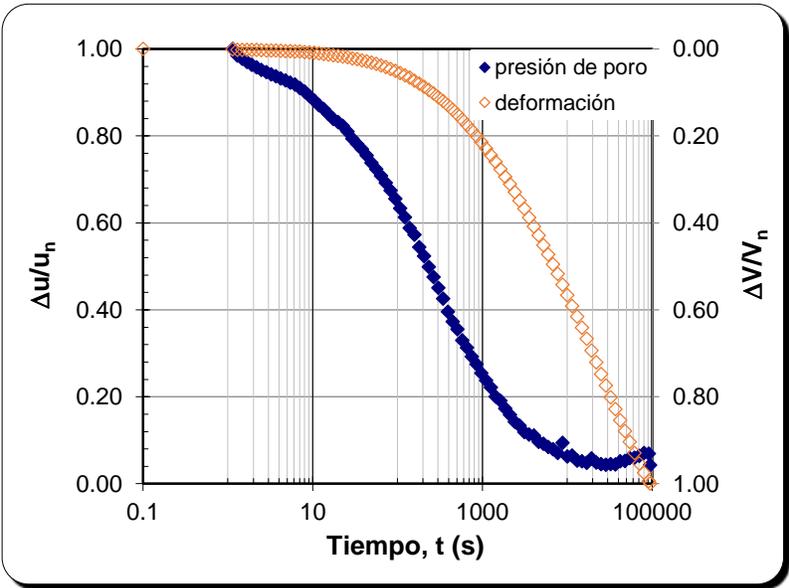
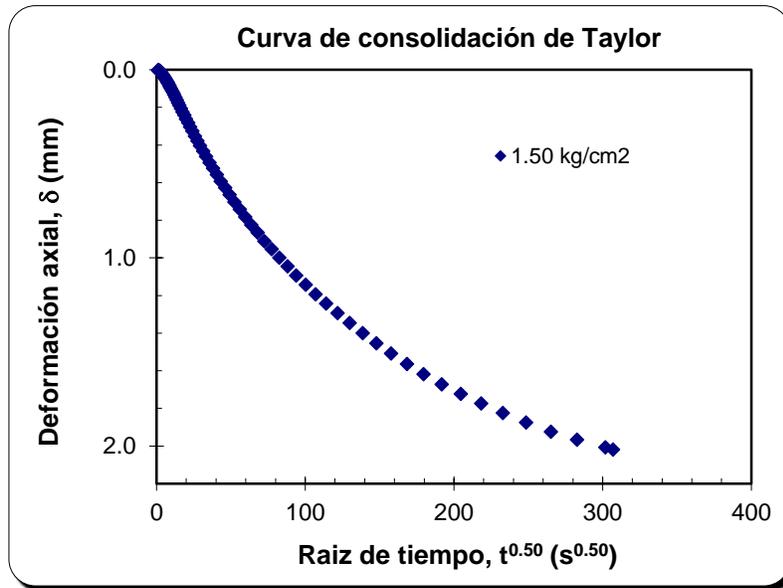


Figura 6.37

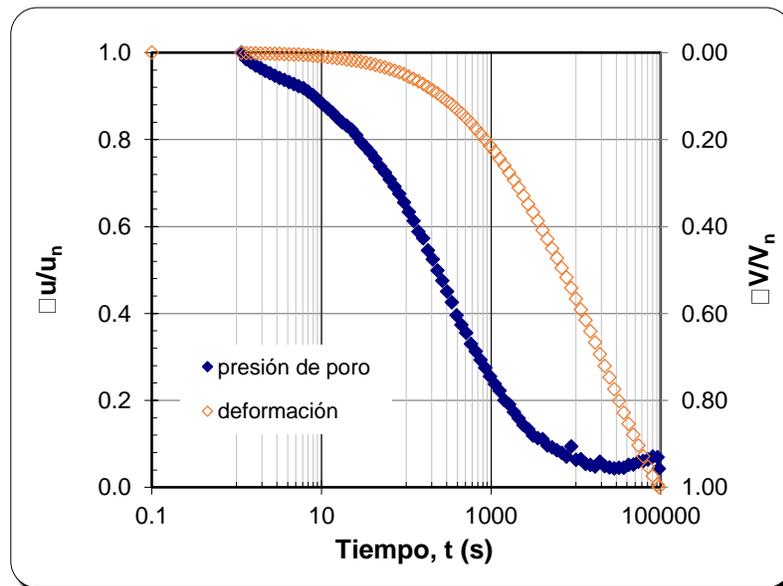
Etapa 5 (SM-30 M-5) Esfuerzo Efectivo 1.50 kg/cm². (Casagrande)

Etapa 5 $\sigma' = 1.5 \text{ kg/cm}^2$



Gráfica 6.38

Etapa 4 (SM-30 M-1) Gráfica Deformación [δ (mm)] vs Tiempo [t (s)]. (Curva de Taylor)



Gráfica 6.39

Etapa 4 (SM-30 M-1) Esfuerzo Efectivo 0.7 kg/cm². (Taylor)

MÉTODO DE CASAGRANDE

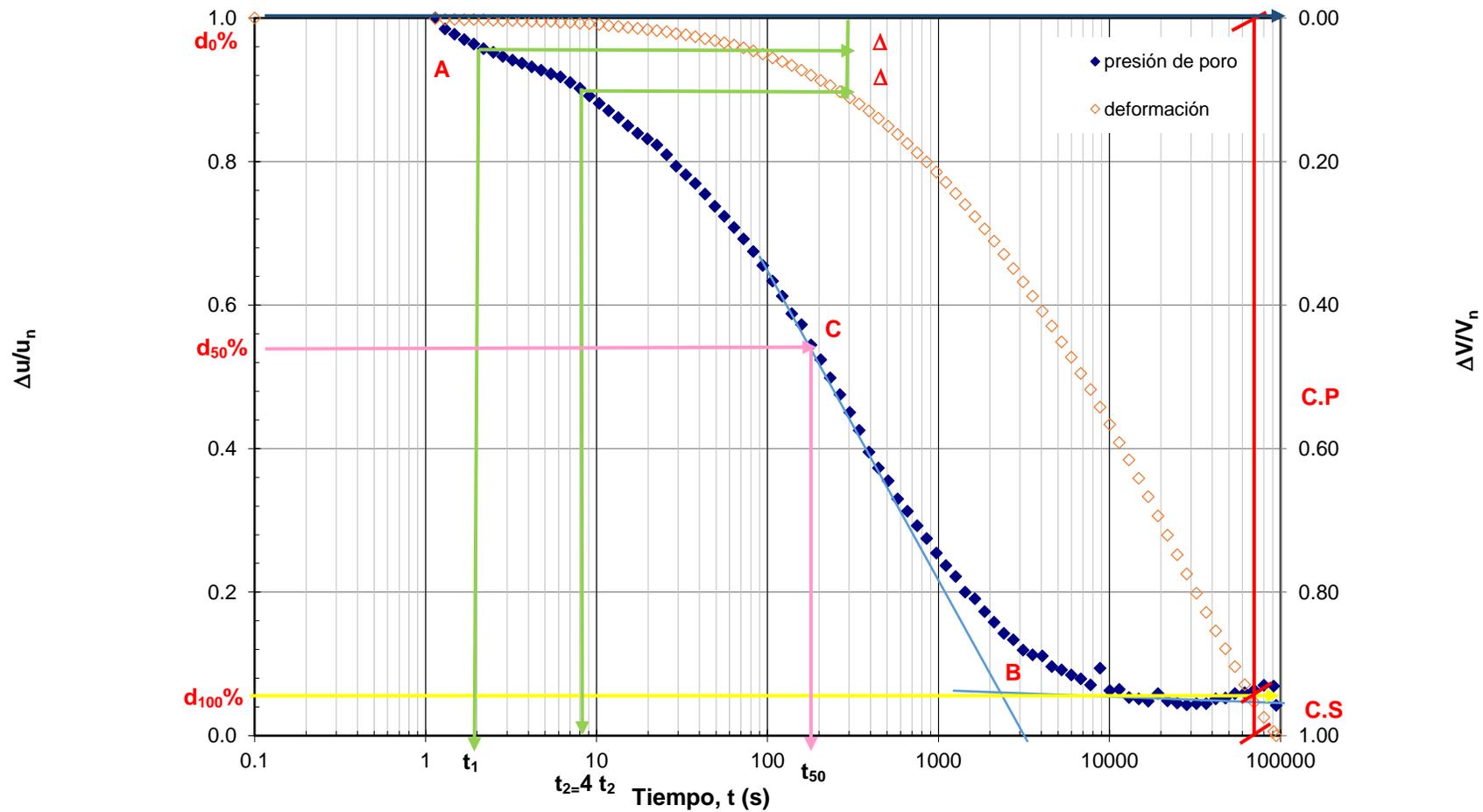


Figura 6.40
Método de Casagrande para calculo de tiempo de consolidación

MÉTODO DE TAYLOR

Curva de consolidación de Taylor

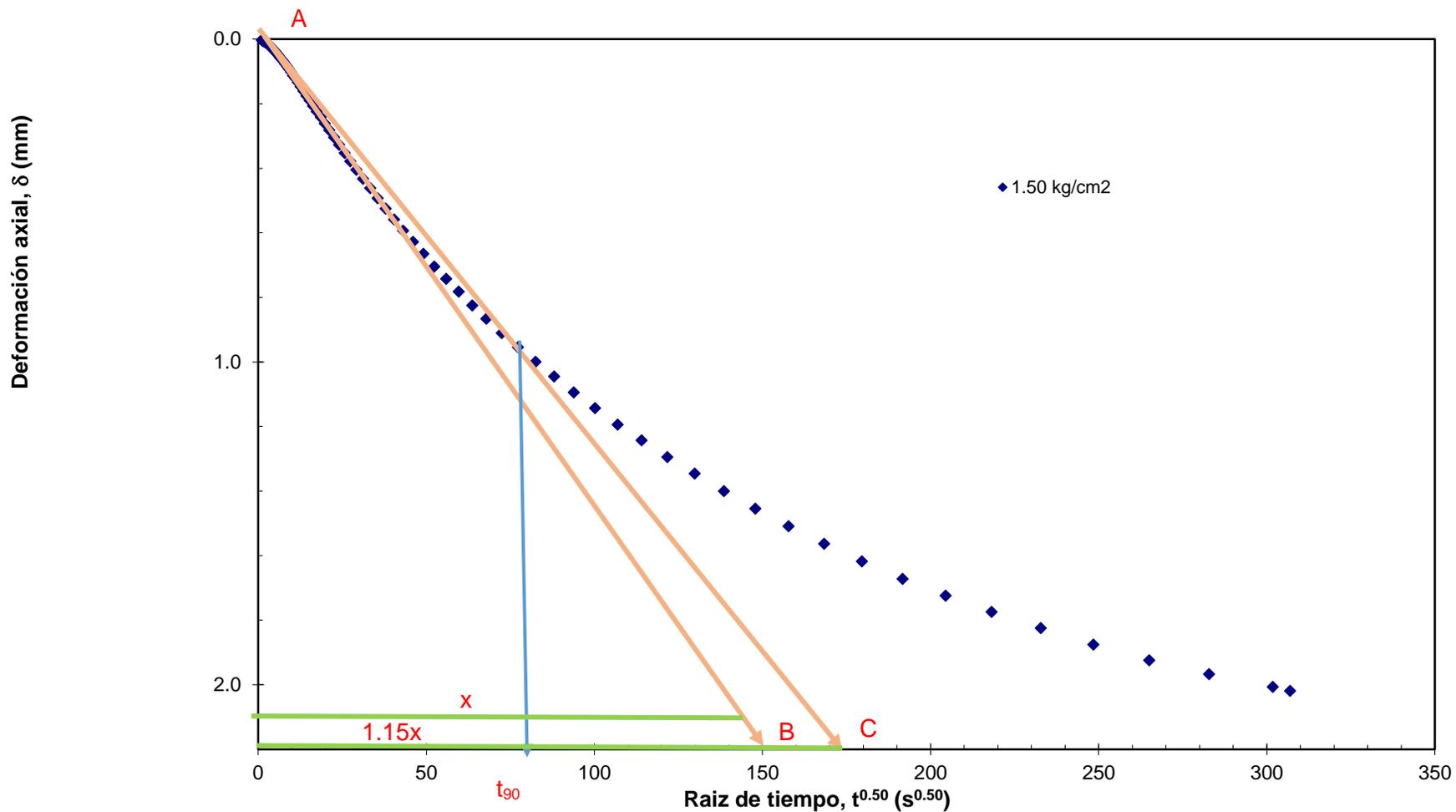


Figura 6.41
Método de Taylor para cálculo de tiempo de consolidación

CONCLUSIONES

1. Los ensayos realizados en la Celda Rowe nos permiten tener mayores conocimientos de lo que ocurre en las etapas de consolidación de una prueba, ya que esta nos muestra la disipación de poro al momento que se lleva la consolidación y el tiempo en el cual se estabiliza esa presión de poro dando paso de una consolidación primaria a una consolidación secundaria.
2. Debido a que las muestras son diferentes, se logró observar que no siempre se lograban definir las curvas de consolidación a pesar de que se tiene la herramienta de lecturas de presión de poro debido a los materiales con los cuales están conformados las muestras, claro ejemplo son las que contenían arenas, limos, materia orgánica y sales.
3. Esta consolidación secundaria se da cuando se observa una compresión y cambio volumétrico constante.
4. El estudio de los suelos de la Ciudad de México, sobre todo en las arcillas importante debido al hundimiento que se presenta en las zonas y más por el tipo de proyecto que se llevará a cabo en dicho suelo, por ello toma gran importancia el estudio de la compresibilidad.
5. Debido a que consolidómetros convencionales no cuentan con los implementos de la Celda Rowe, esto le crea desventajas en las mediciones, como lo son en la saturación ya que esta cuenta con una saturación de presión poro y contrapresión haciendo más efectiva la saturación, una medición de B de Skempton, la cual nos permite verificar que la saturación se llevó a cabo correctamente y las mediciones en consolidación principalmente la disipación de poro. Pero es recomendable en suelos que no contengan o sea muy bajo su contenido de arenas, limos y sales.

REFERENCIAS

1. El Subsuelo de la Ciudad de México, Raúl J Marsal y Marcos Mazarí, investigadores de la UNAM, Contribución del Instituto de Ingeniería al Primer Congreso Panamericano de Mecánica de suelos y cimentaciones, México, D.F, Septiembre 1959
2. Ingeniería de cimentaciones, Enrique Tamez González, TGC geotecnia, S.A. de C.V.
3. Tesis, Influencia de las propiedades índice en el índice de compresión en las arcillas del Valle De México, Ing. Karen Lizeth Ayala Cardona, Febrero 2013
4. Fundamentos de la ingeniería geotécnica, Braja M.Das
5. Mecánica de Suelos, tomo 1 fundamentos de la mecánica de suelos. Juárez Badillo, Rico Rodríguez.
6. Tesis, Revisión de algunos aspectos relevantes del fenómeno de consolidación secundaria, Juan Luis Umaña Romero, México D.F. 2008
7. Simposio sobre el subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), 10 de Marzo de 1978.
8. Mecánica de suelos, Instructivo para ensaye de suelos, Comisión Nacional del Agua,1990

ANEXOS

ANEXO-A MONTAJE DE LA PRUEBA



Figura A. 1
Extracción de muestra de tubo, para realizar pruebas

Del tubo del cual se extrae la muestra mostrada en **Figura A.1**, se corta lo necesario para montar en la Celda Rowe y para propiedades índice. Se extrae del tubo evitando que la muestra sufra algún daño previamente se quita la fricción que pueda existir entre el tubo y el suelo.



Figura A.2
Anillo para la muestra de la Celda Rowe

Ya teniendo la muestra se hace una pequeña marca con el anillo para el espécimen de la Celda Rowe, con ayuda de alambre y un careo, se va removiendo el exceso de material que pueda afectar al momento de introducir el anillo a la muestra, provocando que esta se pueda fracturar, debido a la resistencia del material. El proceso es como el que se muestra en la **Figura A.2**.

Una vez que se remueve el exceso de material se hinca el anillo con una pequeña presión ejercida con ambas manos, se deja un pequeño espacio en la parte superior y en la inferior para seguir labrando la muestra.



Figura A.3
Anillo de Celda Rowe con muestra.

El material debe quedar al nivel del anillo, se marca una “x” para identificar la parte superior de la muestra, se pesa el anillo con muestra antes de que se monte a la Celda. (**Figura A.3**)

Al interior de la celda se le agrega una capa de aceite de silicón, se coloca de forma invertida el cuerpo de la celda y en la parte inferior se coloca una adaptación para colocar el anillo con la muestra, una vez colocado se baja la muestra al cuerpo de la celda Rowe. En la **Figura A.4** se muestra el procedimiento para la colocación del espécimen.



Figura A.4
Cuerpo de Celda Rowe invertido con extensión para la colocación del anillo con la muestra



Figura A.5
Cuerpo de la celda junto con la muestra a ensayar

Una vez que se encuentra la muestra dentro del cuerpo (**Figura A.5**), se invierte y se coloca en la base de forma que la purga (1), y la llave de contrapresión (2) coincidan, se coloca la tapa de forma que no se llegue a apretar el acordeón y cuidando que el pistón no se baje para que el acordeón no se desprege de la parte interna de la tapa, y así no exista fuga del esfuerzo axial al cuerpo de la Celda. Mostrada en la **Figura A.6**

Se asegura la celda con grasa de silicón para evitar fugas, se nivela el transductor de desplazamiento, con carrera suficiente para todas las etapas (consolidación), y se fija de modo que no sea mueva fácilmente.

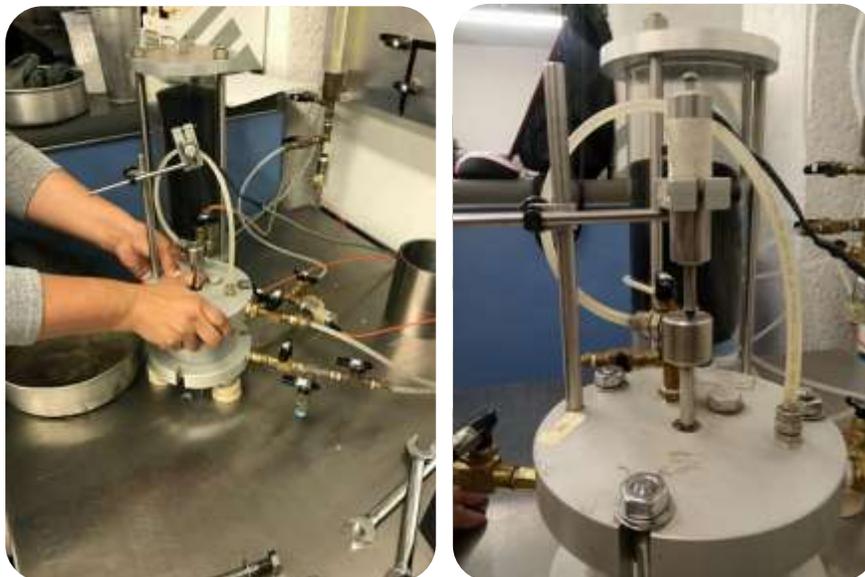


Figura A.6
Tapa Celda Rowe y Transductor de desplazamiento

ANEXO-B OPERACIÓN DEL PROGRAMA DE LA CELDA ROWE

NAICM SM-30(SS) MUESTRA M-6
 PROF: (28.5 - 29.10 m)

ETAPA DE SATURACIÓN

El programa contiene pestañas con cada una de las etapas que se llevaran a cabo durante la prueba, la **Figura B.1** muestra la etapa de saturación. En esta etapa se registran los resultados de saturación, guardando datos aplicados de la presión axial y contrapresión, hasta que se alcance la saturación (Que será comprobada en la siguiente etapa)

1. Control de inicio de Saturación
2. Tabla de datos
3. Reguladores de presión
4. Botón para siguientes incrementos
5. Indicadores



Figura B.1
 Ventana del programa en etapa de saturación

ETAPA MEDICIÓN B DE SKEMPTON

La medición del parámetro de la B de Skempton, la cual nos presenta **la Figura B.2**, nos permite verificar el grado de saturación de la muestra de suelo.

Para que una muestra se considera saturada debe tener un valor de $0.95 < \beta < 1.0$ (**ASTM D4767**). Para la obtención del valor de la B de Skempton, con la siguiente ecuación:

$$B = \frac{|u_{final} - u_{inicial}|}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$$



Figura B.2
Ventana de programa etapa de Saturación

1. Controladores de los reguladores
2. Indicadores de esfuerzo axial y presión de poro
3. Tabla de valores
4. Indicadores de presiones
5. Resumen de resultados
6. Botón para nuevo registro o terminar la etapa

ETAPA DE ENSAYE

Una vez que es comprobada que la muestra se encuentra saturada, damos inicio a la consolidación, esta etapa se muestra en la **Figura B.3**, donde nos muestra cómo se conforman las etapas de carga y descarga en la consolidación (**Figura B.4 a Figura B.23**)

1. Indicadores de presiones
2. Datos de la etapa
3. Tabla de resultados
4. Graficas generadas en la prueba
5. Sensores (indicadores de E.Axial, Contrapresión, Presión de Poro, Desplazamiento)
6. Botón de incremento
7. Botón de termino de etapa y/o prueba

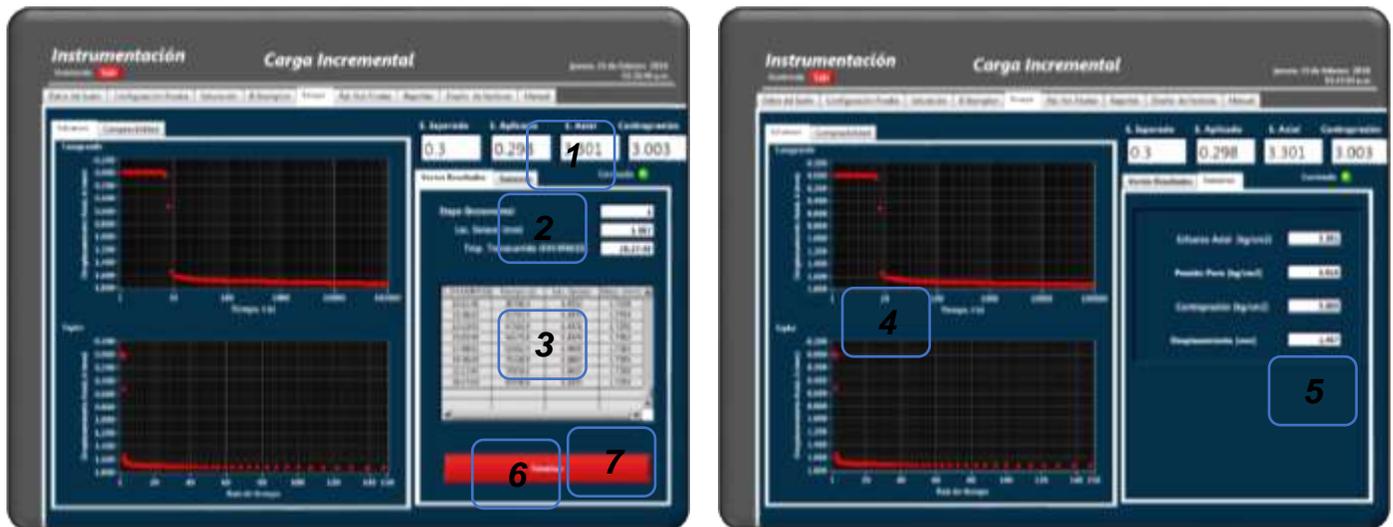


Figura B.3
Etapa 1 de consolidación Esfuerzo efectivo de 0.3kg/cm²



Figura B.4
Etapa 2 de consolidación esfuerzo efectivo de 0.6kg/cm²
Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.5
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.6
Etapa 3 de consolidación Esfuerzo efectivo de 1kg/cm²
Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.7
Curva de compresibilidad (En cada etapa se van registrando los desplazamientos y esfuerzos correspondientes a las etapas)



Figura B.8
Etapa 4 de consolidación Esfuerzo efectivo de 1.5 kg/cm²
Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.9
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.10
Etapa 5 de consolidación Esfuerzo efectivo de 2.5 kg/cm²
Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.11
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Ilustración B.12
Etapa 6 de consolidación Esfuerzo efectivo de 4 kg/cm²
Curva de consolidación de Casagrande y Taylor.



Ilustración B.13
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.14
Etapa 7 de consolidación (descarga) Esfuerzo efectivo de 2.5kg/cm². Curva de consolidación de Casagrande y Taylor.



Figura B.15
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.16

Etapa 8 de consolidación (descarga) Esfuerzo efectivo de 1.5 kg/cm². Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.17

Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.18

Etapa 9 de consolidación (descarga) Esfuerzo efectivo de 1.0 kg/cm². Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.19

Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.20
Etapa 10 de consolidación (descarga) Esfuerzo efectivo de 0.6 kg/cm². Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.



Figura B.21
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)



Figura B.22
Etapa 7 de consolidación (descarga) Esfuerzo efectivo de 0.3 kg/cm². Curva de consolidación de Casagrande y Tylor.

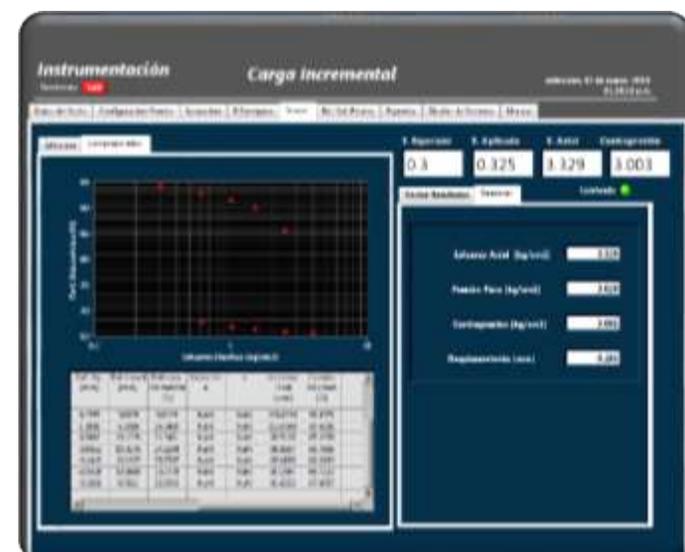


Figura B.23
Curva de compresibilidad (Cuando se da la siguiente etapa en la curva de compresibilidad ya se puede ver el registro de la etapa anterior)