



94 20  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESTUDIO DE LA CONSOLIDACION SECUNDARIA  
EN LA ARCILLA DE LA CIUDAD DE MEXICO.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
JOSE OTHON MARQUINA BARRERA

Director de Tesis:  
DR. EULALIO JUAREZ - BADILLO

MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1990



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 está 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.

**INDICE**

	Introducción.	1
I	Teoría sobre consolidación primaria.	4
	Analogía mecánica de Terzaghi.	4
	Ecuación diferencial de la consolidación unidimensional.	7
	Solución de la ecuación de la consolidación unidimensional.	10
	Ecuación general, diferencial y no lineal de consolidación unidimensional para arcillas.	14
II	Consolidación Secundaria.	24
	Ecuación general.	28
	Curva de compresibilidad límite.	42
III	Pruebas de laboratorio.	48
	3.1 Tipos y variantes de pruebas de consolidación.	48
	3.2 Metodología de las pruebas realizadas.	51
	Pruebas de consolidación hechas.	58
	Anillo de 3 cm.	59
	Anillo de 2 cm.	67
	Anillo de 1.5 cm.	126
	Anillo de 2.5 cm.	186
	Anillo de 2 cm. bis.	241
	Curvas de compresibilidad.	293
IV	Variación de los parámetros $\sigma$ y $t^*$ .	315
	Conclusiones.	336
	Apéndice 1.	338
	Apéndice 2.	340
	Apéndice 3.	343
	Apéndice 4.	347
	Bibliografía.	348

## I INTRODUCCION

Toda masa de suelo al someterla a un incremento de carga se comprime y deforma, dicha deformación puede ser instantánea o diferida o bien pueden ocurrir ambas.

La deformación instantánea, que se presenta inmediatamente después de aplicar la carga, es de tipo elástico; se le denomina deformación o asentamiento elástico inmediato. La deformación diferida es debida a la acción de cargas de larga duración que producen la consolidación del terreno de cimentación, distinguiéndose dos componentes: consolidación primaria y consolidación secundaria.

La consolidación primaria ocurre en suelos finos plásticos, de baja permeabilidad, en los que el tiempo que tarda para producirse es función del tiempo de expulsión del agua que los satura. Se estudia a partir de la teoría de Terzaghi.

La consolidación secundaria se presenta en suelos en los que ya se presentó la consolidación primaria y continúan deformándose en forma similar al comportamiento de un cuerpo viscoso (arcillas muy compresibles, suelos altamente orgánicos, micáceos, etc.). El proceso dura muchos años, prolongándose siglos.

La deformación de la mayoría de los suelos, aún bajo cargas pequeñas, es mucho mayor que la de los materiales estructurales; además que esa deformación no se presenta en forma simultánea a la aplicación de la carga (usualmente), sino que se desarrolla en el transcurso del tiempo.

El objeto de la prueba de consolidación unidimensional (Terzaghi) es determinar el decremento de volumen y la velocidad con que éste se produce, en un espécimen de suelo confinado lateralmente y sujeto a presión vertical; por cada incremento de presión aplicado, se miden los cambios volumétricos usando intervalos apropiados para realizar las mediciones. Los datos registrados conducen a la obtención de las curvas de consolidación, (lectura micrómetro-tiempo), las que proporcionan los datos de partida para el trazo de las curvas de compresibilidad, en que se dibuja la presión vertical ( $\sigma$ ) como abscisas y en escala logarítmica, y el cambio de volumen de vacíos ( $e$ ) como ordenadas en escala natural.

La compresibilidad y consolidación en Mecánica de Suelos reviste gran importancia para la solución de problemas relacionados con el asentamiento de estructuras. Las deformaciones que sufren están en función de las cargas aplicadas y del tiempo.

El proceso de deformación de las arcillas se completa en un largo lapso de tiempo posterior a la aplicación de la carga; como resultado, es posible que el agrietamiento de las estructuras, desplantadas sobre suelos arcillosos, ocurran años más tarde que su erección, sin que el ingeniero proyectista pueda preverlo, a menos que sepa el correcto comportamiento de los suelos. En los suelos la deformación y la variación de volumen son muy importantes; en algunos problemas, particularmente en el asentamiento de estructuras construidas sobre arcilla, la deformación debida al cambio volumétrico en los estratos de suelo subyacente es mucho más importante que la deformación debida al cambio de forma.

La compresión (o expansión) o deformación solo por cambios de volumen es el proceso por el cual un suelo cambia de volumen manteniendo su forma. La distancia entre los puntos cambia, pero su posición relativa se mantiene.

La distorsión o deformación desviadora es el proceso por el cual una masa de suelo cambia de forma (varía la posición relativa de sus puntos), pero mantiene su volumen constante.

Los procesos reales de deformación pueden siempre descomponerse en esas dos facetas; hay una componente volumétrica y otra desviadora de la deformación; el proceso real se considera que es la adición de ambas componentes.

La mayoría de las fallas se deben a asentamientos excesivos que son intolerables por la estructura que soportan.

El asentamiento puede tener importancia por tres razones, incluso aunque la falla no sea inminente: aspecto, condiciones de servicio y daños de la estructura.

Los asentamientos pueden alterar el aspecto de una estructura, provocando grietas en los muros exteriores, y en los revocos de las paredes interiores. También pueden dar lugar a que una estructura se incline lo suficiente para que pueda apreciarse a simple vista. El asentamiento puede interferir con el servicio de una estructura en diversas formas (en edificios con grúas, compresores, bombas, etc.).

El asentamiento puede producir el fallo estructural de un edificio y su colapso, incluso aunque el factor de seguridad contra la falla por corte de la cimentación sea elevado.

El comportamiento de los suelos, al cambiar de volumen, sometidos a condiciones de isotropía y confinamiento, siempre ha sido dividido en deformación instantánea y deformación retardada. En este trabajo se presenta la ecuación general para suelos que el Dr. Eulalio Juárez Badillo desarrolló, y en la cual se unifican las dos deformaciones. El comportamiento, de cambio de volumen con el tiempo, de los suelos se describe a través de dos parámetros:

el "coeficiente de viscosidad volumétrica  $\delta$ " y el "tiempo característico  $t^*$ ".

En el presente trabajo se tratan de investigar las variaciones que se presentan en dichos parámetros ( $\delta$  y  $t^*$ ), de la ecuación desarrollada por el Dr. Eulalio Juárez Badillo, y que fuera presentada en la Onceava Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, en San Francisco, California (Vol. 2 pag 519-530).

## TEORIA SOBRE CONSOLIDACION PRIMARIA

A un proceso de disminución de volumen, que se desarrolle en un lapso, provocado por un aumento de las cargas en el suelo, se le llama *proceso de consolidación*.

La consolidación primaria, como se mencionó anteriormente, ocurre en suelos finos plásticos, de baja permeabilidad, en los que el tiempo que tarda para producirse es función del tiempo de expulsión del agua que los satura. El primero que estudió la consolidación primaria para ciertas condiciones, fue el Dr. Karl Terzaghi, pero desde que él desarrolló su teoría, muchos esfuerzos se han hecho para suprimir las suposiciones en las cuales está basado. Más adelante, en el presente capítulo, se hablará de esto.

En el proceso de consolidación es muy frecuente que suceda que la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal, sea esencialmente igual; de esta forma el movimiento de las partículas sólo ocurre en la dirección vertical; a esta consolidación se le llama *unidimensional* o *unidireccional*. Un ejemplo, son los estratos depositados, ya que tienen gran extensión horizontal en comparación con su espesor. En la consolidación unidimensional, por lo tanto, el volumen de la masa de suelo disminuye, pero los desplazamientos horizontales de las partículas son nulos.

Para estudiar el fenómeno y las características de la consolidación unidimensional, se realiza una prueba llamada prueba de consolidación unidimensional sobre especímenes representativos de suelo, extraídos de la forma más inalterada posible. De esta forma se pueden calcular los asentamientos que pueden ocurrir y el tiempo en que se van a desarrollar éstos, debidos a las cargas que se aplicarán. Sin embargo, la consolidación de muestras pequeñas de suelos, en las pruebas de laboratorio, se produce en tiempos más cortos que en la realidad, es decir, sobre estratos grandes que soportan pesos de estructuras. En la aplicación de la teoría a la realidad, se supone que todas las constantes de consolidación son las mismas en ambos casos, en laboratorio y en la naturaleza; si esto es válido, aún no se sabe, y es posible que por esto se registren, generalmente, asentamientos menores a los calculados. (En un capítulo posterior se detallará la prueba de consolidación unidimensional).

### Analogía Mecánica de Terzaghi:

Terzaghi, para explicar el fenómeno de la consolidación, propuso un modelo mecánico, que consiste en un cilindro con un área de sección recta  $A$ , que está provisto de un resorte que soporta un pistón sin fricción, el cual presenta un pequeño orificio. El cilindro está lleno de un líquido incompresible, como se muestra en la Fig. 1.

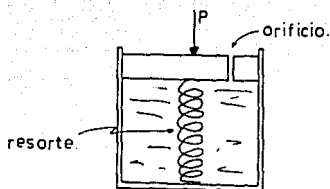


Fig.1

Es evidente, que si se aplica una carga  $P$  sobre el pistón y el orificio está cerrado, la carga la soportará exclusivamente el líquido, pero si está abierto, habrá una transferencia gradual de carga del líquido al resorte. Entre el interior y el exterior del cilindro se desarrolla una diferencia de presiones ( $P/A$ ) que provoca que el líquido salga por el orificio y se deforme el resorte tomando la carga gradualmente (de acuerdo a la ley de Hooke). La velocidad de transferencia de la carga depende de la viscosidad del líquido y del tamaño del orificio. Si al resorte se le permite una deformación suficientemente grande, la carga será totalmente soportada por él.

Ahora, si en lugar de considerar este mecanismo sencillo, consideramos una serie de cilindros comunicados, (Fig. 2), la distribución inicial de presiones del agua será lineal, estimando que el peso de los resortes y pistones es despreciable (línea a-b). Si se aplica una carga ( $P$ ) al primer pistón, al inicio la soportará totalmente el fluido, generándose una presión en exceso de la hidrostática, que se transmite con igual valor a cualquier profundidad (línea c-d). Al igual que en el primer ejemplo, en el primer orificio se desarrolla una diferencia de presiones ( $P/A$ ) que provoca un gradiente hidráulico necesario para provocar el flujo del líquido al exterior; en el instante en que se inicia el flujo, la presión del líquido disminuye, transfiriéndose, al mismo tiempo, carga al resorte. Esta reducción de presión en el fluido de la primera cámara provoca, por diferencia con la segunda, un desequilibrio de presiones en el segundo orificio, y a su vez el fluido tenderá a pasar de la segunda cámara a la primera. De la misma forma se va desarrollando el proceso con las cámaras inferiores, llegando al final cuando la presión en el fluido vuelva a la condición hidrostática y la carga ( $P$ ) sea soportada en la totalidad por los resortes.

En cualquier tiempo ( $t$ ) después de la aplicación de la carga ( $P$ ), la distribución de presiones es de acuerdo a una línea quebrada (línea e'-f Fig. 2), siendo la presión del fluido ( $u$ ), y ( $p$ ) la de los resortes. Debe notarse que la presión del fluido es lineal y las discontinuidades en la presión (tramos horizontales) se producen solamente en los orificios. Conforme pasa el tiempo, la línea quebrada (línea e'-f) se desplaza hacia la izquierda.



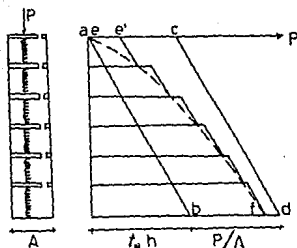


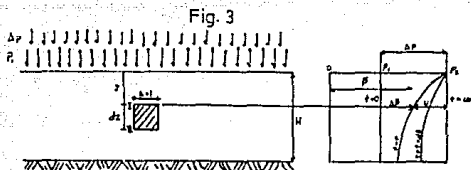
Fig. 2

Para hacerlo semejante al suelo, supongamos que el volumen de las cámaras es muy pequeño y el número de ellas es muy grande, así se acerca a la condición existente, o que prevalece, en los suelos. En el suelo, la estructuración de las partículas sólidas representa a los resortes, el agua intersticial libre por el fluido incompresible y los canículos capilares, por los orificios de los pistones. De esta forma, la línea quebrada representada en la figura, tenderá a hacerse continua y curva (línea e-f), a medida que el número de cámaras aumenta.

Considerando ahora un estrato de suelo de extensión infinita y un espesor (H), sujeto a una presión ( $p_1$ ) durante el tiempo necesario para consolidarse totalmente bajo la misma; y suponiendo que el estrato se encuentra confinado inferiormente por una capa impermeable, lo cual indica que el agua solo puede drenarse por la parte superior del estrato, se tiene que al aplicarse un incremento de presión ( $\Delta p$ ), la presión total sobre el estrato será:

$$p_z = p_1 + \Delta p$$

El fenómeno se desarrollará de la misma forma expuesta para los modelos anteriores, de tal forma que la distribución de la presión entre la estructura del suelo y el agua intersticial ( $p = p_1 + \Delta p$  y  $u$ , respectivamente) se expresa a través de la curva  $t = t$  (Fig. 3).



Es evidente que:

$$\Delta p = \Delta p' + u$$

La ecuación anterior es válida para cualquier tiempo  $t$  y a cualquier profundidad  $z$ . En un instante posterior,  $t = t + dt$ , la nueva distribución de presiones aparece en la misma Fig. 3.

También se puede observar, a través de la figura, que tanto la presión  $\Delta p$ , en la estructura de suelo, como  $u$ , en el agua intersticial son funciones de la profundidad  $z$ , y el tiempo  $t$ :

$$u = f(z, t)$$

$$\therefore \Delta p' = \Delta p - u = \Delta p - f(z, t)$$

Que es la ecuación que expresa el progreso de la consolidación unidimensional, con flujo vertical.

#### Ecuación diferencial de la consolidación unidimensional:

Supongamos el siguiente elemento diferencial, de un estrato de suelo, cuyas fronteras superior e inferior tienen un área unitaria:

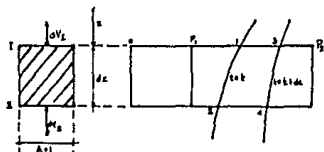


Fig. 4

(Nota: La obtención de la ecuación está presentada en forma breve, debido a que no es materia del presente trabajo, para ver el desarrollo completo, consúltese la referencia 1)

Siendo  $u$  la presión del agua en exceso de la hidrostática, tenemos para los puntos:

Punto 1 (tiempo  $t$  y profundidad  $z$ ):

$$u_1 = u$$

(1)

Punto 2 (tiempo  $t$  y profundidad  $z + dz$ ):

$$u_2 = u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \quad (2)$$

Punto 3 (tiempo  $t + dt$  y profundidad  $z$ ):

$$u_3 = u + \frac{\partial u}{\partial t} dt \quad (3)$$

Punto 4 (tiempo  $t + dt$  y profundidad  $z + dz$ ):

$$u_4 = u + \frac{\partial u}{\partial t} dt + \frac{\partial u}{\partial z} dz + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} dt dz \quad (4)$$

Tomando en cuenta que el problema de la consolidación es un problema de flujo de agua no establecido a través de una masa porosa, y tomando las siguientes hipótesis: [Ref. 1]

- Agua y partículas de suelo incompresibles.
- Suelo totalmente saturado

Se tiene que el agua que entra por la cara I menos la que sale por la cara II en un tiempo  $dt$ , debe ser igual al cambio de volúmen. Estas cantidades de agua dependen de los gradientes hidráulicos, por lo que [Ref.1]:

$$i_1 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left[ u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \right] \quad (6)$$

Aplicando la ley de Darcy y sacado  $\Delta dv$ :

$$\Delta dv = dv_1 - dv_2 = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} dz dt \quad (7)$$

Es muy sencillo demostrar que se llegaría al mismo resultado anterior, para  $\Delta dv$ , si se realizara con los puntos 3 y 4 ( $i_3$  e

i.) [Ref. 1].

Por otra parte se sabe que:

$$\Delta v = \frac{de}{1+e} dz \quad \text{y que} \quad de = av \bar{dp}$$

$$\therefore \Delta v = \frac{av}{1+e} \bar{dp} dz$$

En la cara superior del elemento (Fig. 4) hay una diferencia de presiones (de ecuaciones 1 y 3):

$$du = \frac{\partial u}{\partial t} dt \quad (8)$$

...y usando la diferencial de la ecuación fundamental de la distribución de presiones:

$$\bar{dp} = -du$$

Se llega a que:

$$\Delta v = - \frac{av}{1+e} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dt dz \quad (9)$$

Igualando las ecs. 7 y 9, además de definir:

$$mv = \frac{av}{1+e} \quad \text{y}$$

$$Cv = \frac{k}{mv\gamma}$$

Se llega, a través de algunas transformaciones a la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional de Terzaghi:

$$Cv \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

Donde:  $av$  es el Coeficiente de Compresibilidad y se supone constante

$mv$  es el Coeficiente de Variación volumétrica y también se supone constante.

$Cv$  es el Coeficiente de Consolidación y, como es evidente, también se supone constante.

**Solución de la ecuación de la consolidación unidimensional:**

Para resolver la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional con flujo vertical es necesario determinar las condiciones de frontera. Para ello, considérese un estrato arcilloso de espesor  $2H$  en el cual el agua pueda drenarse por sus caras superior e inferior.

Las condiciones de frontera que deben satisfacerse son [Ref.1]:

$$u = 0 \quad \text{para} \quad z = 0 \quad \text{y} \quad z = 2H \quad (\text{para todo tiempo } t)$$

Además debe satisfacerse la condición inicial:

$$u = \Delta p = p_z - p_i \quad \text{para} \quad t = 0 \quad \text{y} \quad 0 < z < 2H$$

La solución a la que se llega es de la forma:

$$\frac{u}{\Delta p} = f(z, t) \quad (10)$$

Expresada por medio de una serie de Fourier, convergente. Estando la misma, dada por (ecuación 11): [Ref.1]

$$u = \Delta p \sum_{n=0}^{n=\infty} \left\{ \frac{4}{(2n+1)\pi} \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right] e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 C_v t}{4H^2}} \right\}$$

Donde  $e$  es la base de los logaritmos neperianos normalmente simbolizada por  $e$ .

Esta solución, requiere el establecimiento de dos hipótesis, que son:

1 La variación en espesor del estrato es lo suficientemente pequeña para que un valor dado de la variable  $z$  pueda suponerse constante durante todo el proceso de consolidación.

2 El coeficiente de consolidación,  $C_v$ , es constante durante todo el proceso de consolidación, como ya se había mencionado.

De la ecuación 11, el factor  $z / H$  que aparece en el término seno así como el factor tiempo:

$$T = \frac{Cvt}{H}$$

que aparece en el exponente de  $x$ , son ambas cantidades adimensionales. Por lo tanto la solución (ec 10) puede expresarse como:

$$\frac{u}{\Delta p} = f\left(\frac{z}{H}, T\right)$$

Definiéndose ahora el grado o porcentaje medio de consolidación para un estrato completo considerado en el instante  $t$ , como la relación entre la consolidación que se ha llevado a cabo en el tiempo  $t$  y la total a producirse, se tiene que [Ref.1]:

$$U(\%) = 100 \left[ 1 - \frac{1}{\Delta p \cdot 2H} \int_0^{2H} u dz \right] \quad (12)$$

Integrando la ecuación 12 llegamos a obtener lo siguiente:

$$U(\%) = 100 \left[ 1 - \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{8}{(2n+1)\pi} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T}{4}} \right] \quad (13)$$

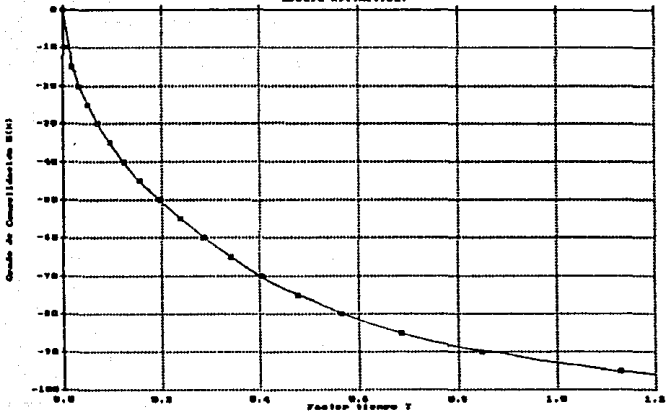
Se observa que el grado de consolidación es sólo función del factor tiempo ( $T$ ), que como se mencionó, es una cantidad adimensional. La relación a la que se llegó, (13), puede ser resuelta para diferentes valores de  $T$ , obteniendo, por consiguiente, los de  $U(\%)$ , (Tabla 1).

**Relación teórica U% - T**

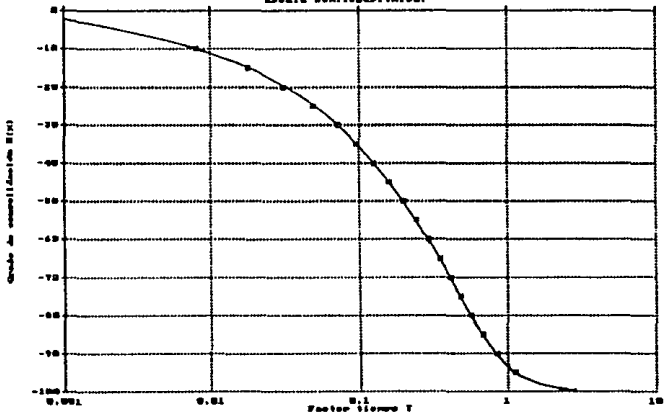
U (%)	T
0	0.000
10	0.008
15	0.018
20	0.031
25	0.049
30	0.071
35	0.096
40	0.126
45	0.159
50	0.197
55	0.238
60	0.287
65	0.342
70	0.405
75	0.477
80	0.565
85	0.664
90	0.848
95	1.127
100	$\infty$

En las siguientes gráficas aparecen las relaciones anteriores dibujadas en escala aritmética y semilogarítmica, usando la escala logarítmica para el factor tiempo. A estas curvas se les llaman *Curvas teóricas de Consolidación*.

Curva teorica de Consolidacion.  
Escala Aritmetica.



Curva teorica de Consolidacion.  
Escala semilogaritmica.





Quando se realizan pruebas de consolidación en laboratorio, se obtienen curvas de consolidación muy semejantes a las obtenidas teóricamente. En laboratorio, generalmente, se grafica tiempo-lectura de micrómetro o tiempo-altura, mientras que las teóricas son  $T - U\%$ ; claro está que el factor tiempo  $T$  y el tiempo  $t$  son directamente proporcionales, así que si se quieren comparar las gráficas, lo primero que se tiene que hacer es definirse en qué punto de la curva de consolidación se supondrá el 0% y el 100% de consolidación, para ajustar la escala  $U\%$  con la de lecturas micrométricas (Apéndice 1).

#### **Ecuación general, Diferencial y no lineal, de Consolidación Unidimensional para arcillas:**

Como se mencionó anteriormente, desde que el Dr. Terzaghi desarrolló su teoría de consolidación unidimensional, se han hecho esfuerzos para tratar de remover las suposiciones en las cuales él se basó.

A continuación se presenta una ecuación diferencial para la consolidación unidimensional, que fué desarrollada por el Dr. E. Juárez Badillo [Ref.2].

La característica principal de esta nueva ecuación diferencial es que toma en cuenta las variaciones de la compresibilidad, permeabilidad y del coeficiente de consolidación, haciendo uso de las ecuaciones generales correspondientes (No es considerada la consolidación secundaria).

Usando la ley de la conservación de la materia y la ley de Darcy para flujo a través de suelos, sin tomar en cuenta la compresibilidad del agua y de las partículas de suelo comparada con la compresibilidad de la estructura del suelo, tenemos que [Ref.2]:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{dt} = - \frac{1}{\gamma m v} \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (14)$$

donde:  $\sigma' = \sigma =$  presión efectiva vertical.

También se ha demostrado que para suelos plásticos:

$$\frac{dv}{v} = - \gamma \frac{d\sigma'}{\sigma'} \quad (15)$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente de compresibilidad (no es lineal). Se puede demostrar que:

$$m v = \frac{\gamma}{\sigma'} \quad (16)$$

El coeficiente  $\gamma$  de la ecuación anterior puede sustituirse por el coeficiente  $\gamma_p$  en las curvas de recompresión y expansión, de modo que:

$$\gamma_p = \rho\gamma \quad (17)$$

donde  $\rho$  es la relación de expansión-compresibilidad del suelo.

Se puede ver también que para un suelo [Ref.4]:

$$k = k_1 \left[ \frac{V}{V_1} \right]^k \quad (18)$$

donde  $k$  es el coeficiente de permeabilidad,  $k_1$  es el coeficiente de cambio de permeabilidad; y  $k = k_1$  para  $V = V_1$ .

Integrando (15) tenemos:

$$\frac{V}{V_1} = \left[ \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \right]^{-\gamma} \quad (19)$$

Introduciendo (19) en (18):

$$k = k_1 \left[ \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \right]^{-\gamma k} \quad (20)$$

Introduciendo la (16) y (20) en la (14):

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - \frac{k_1 \sigma'_1}{\gamma V \gamma} \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left[ \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \right]^{-\gamma k} \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (21)$$

Tomando el coeficiente de consolidación de Terzaghi y usando las ecuaciones (16) y (20) [Ref.2]:

$$C_v = C_{v1} \left[ \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \right]^\lambda \quad \text{donde } \lambda = 1 - \gamma k \text{ y } C_v = \text{cte. si } \lambda = 0 \quad (22)$$

e introduciendolo en la ecuación (21) tenemos:

$$\frac{1}{\sigma'} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - C_{v1} \frac{1}{\sigma'_1} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left[ \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \right]^{-\gamma k} \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (23)$$

Utilizando la diferencial de la ecuación fundamental de la distribución de presiones, y a través de algunas sustituciones y transformaciones, llegamos, finalmente, a las ecuaciones diferenciales a las que queríamos llegar, para dos casos [Ref.2]:

Caso I: Para  $C_v$  constante,  $\lambda = 0$ .

Caso II: Para  $C_v$  variable,  $\lambda \neq 0$ .

Caso I: para  $C_v$  constante,  $\lambda = 0$ :

Introduciendo la variable  $w$  definida por:

$$w = \ln \frac{\sigma'}{\sigma' z} \quad (24)$$

Llegamos a través de la ecuación (23) y sustituyendo (24):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = C_v \frac{\partial w}{\partial z} \quad (25)$$

que es la ecuación diferencial lineal con  $C_v$  constante pero  $k$  y  $m$  variables. Esta ecuación fue derivada y resuelta por Davis y Raymond [Ref.5].

Para resolver la ecuación (25) es necesario primeramente fijar las condiciones de frontera, las cuales son, considerando que  $2H_i$ ,  $2H$  y  $2H_f$  son los espesores inicial, corriente y final de un espécimen drenado por sus dos caras horizontales; y que además:

$$H_i \approx H_f \approx H \quad (25')$$

$$T = \frac{C_v z t}{H} \quad (25'')$$

$$z' = \frac{z}{H} \quad (25''')$$

que son variables ya conocidas; las siguientes de acuerdo a la ecuación (24) [Ref.2 y 5]:

$$z' = 0 \quad 0 \leq T \leq \infty \quad w = 0$$

$$z' = 2 \quad 0 \leq T \leq \infty \quad w = 0$$

y las condiciones inicial y final:

$$T = 0 \quad 0 < z' < 2 \quad w = \ln \frac{\sigma' t}{\sigma' z}$$

$$T = \infty \quad 0 \leq z' \leq 2 \quad w = 0$$

### Solución:

La solución fue obtenida por Davis y Raymond [Ref.5] en forma

similar a como Terzaghi resolvió su teoría lineal. Por lo tanto para el caso especial  $C_v$  constante tenemos que la solución es:

$$\frac{\sigma'}{\sigma'_1} = \left[ \frac{\sigma'_z}{\sigma'_1} \right]^{1-M} \quad (26)$$

donde:

$$M = (2N + 1) \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

$$B = \sum_{M=0}^{\infty} \frac{2}{M} (\text{sen } Mz') e^{-M^2 T} \quad (28)$$

Puede verificarse que los esfuerzos efectivos dados por la ecuación (26) son siempre menores a los predichos por la teoría de Terzaghi.

Para este mismo caso se puede obtener el grado de asentamiento, debido a la consolidación, el cual es [Ref.2]:

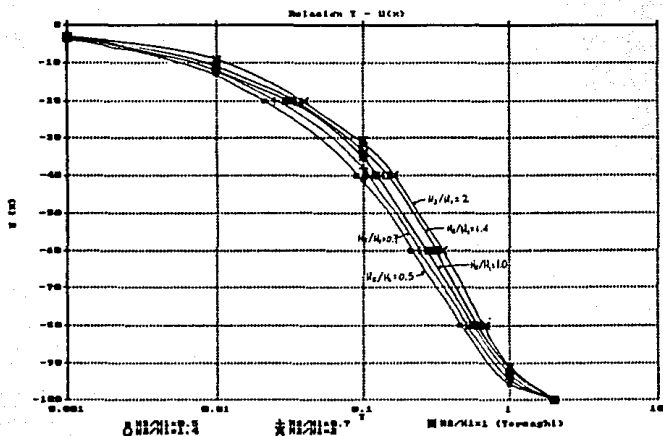
$$U = \frac{1 - \frac{H_z}{H_1} \int_0^1 \left[ \frac{H_1}{H_z} \right]^M dz'}{1 - \frac{H_z}{H_1}} \quad (29)$$

donde  $B$  está dado por (28).

Como se puede observar  $U$  es función de  $T$ , a través del parámetro  $B$  y de la relación entre el espesor final y el inicial del espécimen.

Ahora bien, las curvas de consolidación ( $U - T$ ) para este caso ( $C_v = \text{cte.}$ ,  $\lambda = 0$ ) para las relaciones  $H_z/H_1 = 0.5, 0.7, 1, 1.4$  y  $2.0$  fueron obtenidas por medio de métodos numéricos y se pueden ver en la figura 5. El caso  $H_z/H_1 < 1$  corresponde a los casos de compresión, mientras que para las expansiones le corresponde  $H_z/H_1 > 1$ , de la misma forma para  $H_z/H_1 = 1$ , es el caso de la solución lineal de Terzaghi.

Puede observarse que las curvas de consolidación se desplazan hacia la izquierda para los casos de compresión, y hacia la derecha para los casos de expansión. Sin embargo la cantidad del desplazamiento no es muy grande, especialmente para los valores normalmente usados en laboratorio para la relación  $H_z/H_1$ .



*Caso II  $C_v$  variable, ( $\lambda \neq 0$ ):*

En este caso también es una ecuación diferencial no lineal (ecuación 23), para consolidación unidimensional en suelos plásticos saturados (arcillas), tomando en cuenta, como para el primer caso, la variación del coeficiente de consolidación  $C_v$  y la permeabilidad [Ref.2 y 6].

Para este caso se obtendrán las curvas de consolidación a través de métodos numéricos. Esta solución fue obtenida por Benito Chen [Ref.6], y será mencionada en forma breve en el presente trabajo.

Utilizando la diferencial de la ecuación fundamental de la distribución de presiones en la masa de suelo, sustituyéndola en la ecuación (23) y a través de ciertas transformaciones, definiendo  $v$ , tenemos que [Ref.5 y 6]:

$$v = \left[ \frac{\sigma'}{\sigma' z} \right]^\lambda \quad (30)$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial t} = Cvz \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (31)$$

Que es la ecuación diferencial no lineal con Cv, k y mv variables, es decir para  $\lambda \neq 0$ .

De igual forma que para el caso I, se requieren obtener las condiciones de frontera para poder, posteriormente, proceder a la solución; las condiciones de frontera se obtienen de manera similar, pero de acuerdo a la ecuación (30), y son [Ref.2 y 6]:

$$\begin{aligned} z' = 0; \quad 0 \leq T \leq \infty; \quad v = 1 \\ z' = 1; \quad 0 \leq T \leq \infty; \quad \frac{\partial v}{\partial z'} = 0 \end{aligned}$$

Las condiciones inicial y final:

$$\begin{aligned} T = 0; \quad 0 < z' < 2; \quad v = \left[ \frac{\sigma' z}{\sigma' z} \right]^\lambda \\ T = \infty; \quad 0 \leq z' \leq 2; \quad v = 1 \end{aligned}$$

Ahora bien, utilizando la relación de espesores final entre inicial, la condición inicial se puede escribir como sigue [Ref.6]:

$$T = 0; \quad 0 < z' < 2 \quad v = \left[ \frac{H_2}{H_1} \right]^{\lambda/\gamma}$$

De acuerdo a la suposición (25') y a las variables (25'') y (25'''), y usando la ecuación (31) tenemos que:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{\partial^2 v}{\partial z'^2} \quad (32)$$

Esta ecuación junto con las condiciones de frontera, inicial y final, constituyen el problema a resolver.

La solución de esta ecuación con las condiciones de frontera, inicial y final fue encontrada a través de métodos numéricos, por Benito Chen [Ref.6], usando una aproximación de una diferencia finita, propuesta por Crank y Nicolson [Ref.7]. Este procedimiento es válido para ecuaciones parabólicas lineales y cuasilineales con dos incógnitas.

Por otro lado, tenemos que el grado de asentamiento,

sustituyendo (30) en (29), es:

$$U = \frac{1 - \frac{H_2}{H_1} \int_0^1 v^{-\gamma/\lambda} dz'}{1 - \frac{H_2}{H_1}} \quad (33)$$

Las curvas de consolidación,  $U$  contra  $T$ , para  $C_v$  variable, pueden ser obtenidas a partir de esta ecuación (33), en la cual  $v$  está dada por la solución de la ecuación (32) con sus condiciones de frontera, inicial y final; de acuerdo a como ya se estableció (para ver la solución completa consultar las referencias 6 y 7, ya que ésta no es tema del presente trabajo).

Las curvas de consolidación,  $U - T$ , son función de  $H_2/H_1$  y de  $\lambda/\gamma$ . Como para el primer caso, los valores de  $H_2/H_1 < 1$  corresponden a casos de compresión y los valores de  $H_2/H_1 > 1$  corresponden a los casos de expansión. De la ecuación (22):

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} - k \quad (34)$$

Teóricamente:

- ‡ el coeficiente de compresibilidad puede variar de 0 (incompresible) a 1 (gas en proceso isotérmico).
- ‡ la  $k$  es siempre más grande que 1, generalmente de 1 a 20.
- ‡  $\gamma$  comúnmente tiene valores de 0.01 a 0.5.
- ‡ los valores de  $\lambda/\gamma$  varían entre 100 y -20.

En términos generales se puede decir que los valores de  $\lambda/\gamma$  disminuyen cuando la compresibilidad aumenta. Y como el valor de  $\gamma_p$  para las expansiones y recompresiones es menor que el valor de  $\gamma$  para las curvas vírgenes, se ve que el valor de  $\lambda/\gamma$  es mayor para expansiones y recompresiones que para la compresión en la curva vírgen. Así mismo, de la ecuación (22) se deduce que para valores positivos de  $\lambda/\gamma$  el coeficiente de compresibilidad y la presión efectiva aumentan y, consiguientemente, para valores negativos de  $\lambda/\gamma$ , el coeficiente de compresibilidad y la presión efectiva disminuyen. También de la ecuación (34) se observa que el coeficiente de consolidación es constante cuando  $k$  iguala al inverso del coeficiente de compresibilidad.

A continuación se presentan algunas gráficas de curvas de consolidación para casos de compresión y expansión, con valores positivos y negativos de  $\lambda/\gamma$ .

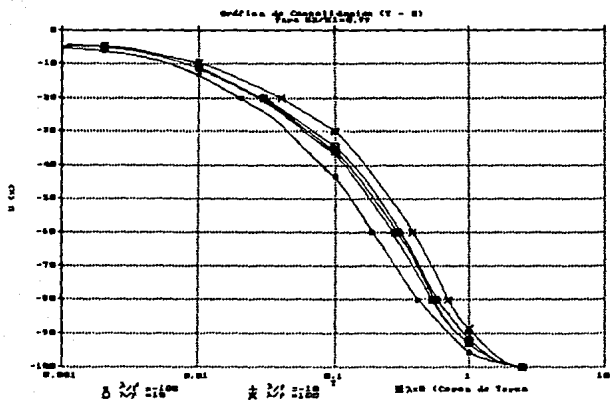


Fig. 6 T - U para el caso de compresión

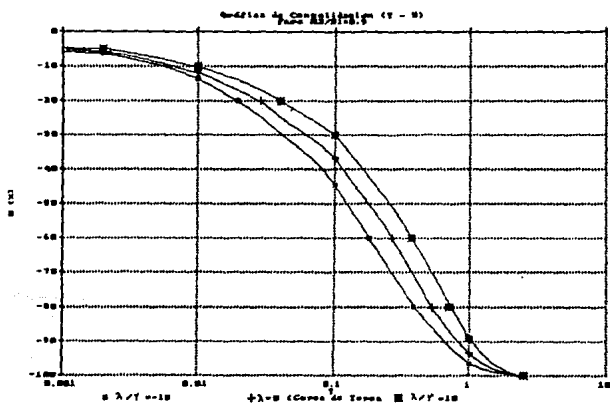


Fig. 7 T - U para el caso de compresión



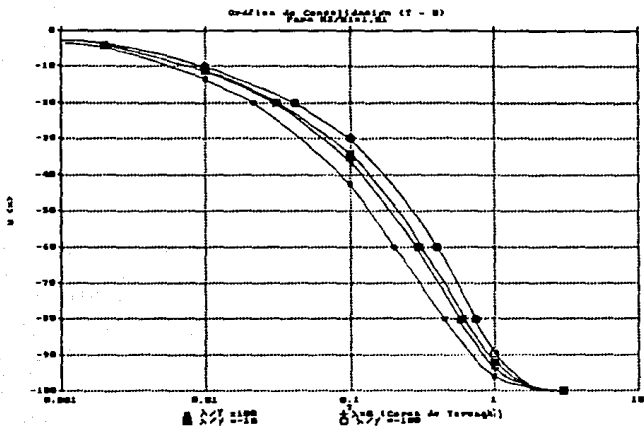


Fig. 8 T - U para el caso de expansión

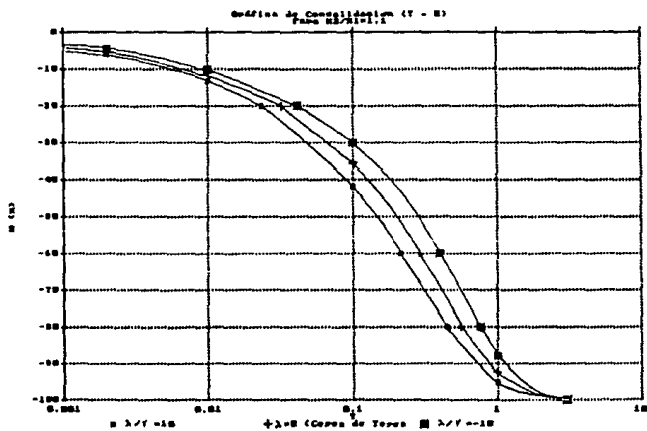


Fig. 9 T - U para el caso de expansión

Como se observa en las figuras 6 y 7, y como se esperaba, los valores positivos de  $\lambda/\gamma$  desplazan las curvas hacia la derecha, mientras que los valores negativos las desplazan hacia la izquierda; el desplazamiento es mayor, para valores mayores de  $\lambda/\gamma$ , así como también, para valores menores de  $H_z/H_u$ . De estas curvas también se puede observar que la solución lineal de Terzaghi, rigurosamente una solución exacta para  $H_z/H_u=1$ , es también buena solución para casos en que  $H_z/H_u \neq 1$ , pero para valores de  $\lambda/\gamma = 1$ . Obsérvese que la curva para  $\lambda = 0$ , aunque no es la solución de Terzaghi, si es muy cercana.

De las figuras 8 y 9 se ve que los valores positivos de  $\lambda/\gamma$  desplazan las curvas hacia la izquierda y los negativos las desplazan hacia la derecha; y al igual que para los casos de compresión, el desplazamiento es mayor para valores mayores de  $\lambda/\gamma$ , pero, contrariamente a la compresión, los desplazamientos son mayores para valores mayores de  $H_z/H_u$ . Obsérvese también, en estas dos gráficas, que la curva  $\lambda=0$  es una solución muy cercana a la de Terzaghi.

La aplicación en la práctica de estas curvas de consolidación unidimensional, en particular, para las pruebas de laboratorio en consolidómetro, requiere la determinación de los parámetros  $\gamma$  y  $k$  [Ref.6].

## CONSOLIDACION SECUNDARIA

Como ya se vió en los capítulos anteriores, al aplicar una carga a una masa de suelo, se presenta la consolidación, que puede dividirse convenientemente en dos fases:

† La consolidación que se presenta durante la disipación de las sobrepresiones intersticiales. Esta consolidación avanza con el tiempo, habiendo varias teorías que la explican como se vió en el capítulo dos del presente trabajo, y se le denomina *consolidación primaria*.

\* La consolidación que continúa lentamente después de que se han disipado prácticamente las sobrepresiones intersticiales se le denomina *consolidación secundaria*. Realmente deben de existir pequeñas sobrepresiones intersticiales durante la consolidación secundaria para que el agua escape del suelo. Sin embargo, la consolidación secundaria se produce muy lentamente y la velocidad del flujo es muy pequeña. De aquí que las sobrepresiones con ella asociadas son inapreciables.

La consolidación secundaria, por lo tanto, es un fenómeno de flujo viscoso. Actualmente el efecto se atribuye, por lo general, al deslizamiento progresivo diferido en el tiempo, entre las partículas de suelo que se reacomodan, tendiendo a estados más compactos, para adaptarse a la nueva condición de carga. Es posible que un flujo plástico de las partículas laminares constitutivas de los suelos arcillosos, contribuya también en la consolidación secundaria.

La intensidad del efecto secundario a lo largo del tramo virgen de la curva de compresibilidad, es decir, en los casos en los que se presentan presiones que nunca ha soportado el material, es relativamente grande para suelos inalterados. En contraste, en un proceso de descarga, el efecto secundario es despreciable generalmente. A lo largo del tramo de recompresión la intensidad del efecto secundario es del orden de un tercio de las intensidades observadas bajo las presiones correspondientes al tramo virgen [Ref. 1].

Debido a que la consolidación secundaria representa esencialmente un reacomodo adicional de la estructura interna del suelo después de que la mayor parte de la carga ha sido transferida del agua a la materia sólida, se espera que la velocidad de la consolidación secundaria dependa del esfuerzo efectivo que actúe, independientemente de la magnitud del

incremento de carga aplicado anteriormente para alcanzar ese esfuerzo efectivo y del espesor del estrato de suelo. Estas conclusiones tienen verificación experimental (no en el presente trabajo) [Ver Ref.1].

En la figura 10 se trazaron curvas de consolidación semejantes a la que realmente se obtienen, para un mismo suelo llevado a una misma carga final, pero a través de diferentes incrementos de presión. Ejemplificándolo, supongamos que la carga final para todos los casos es de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , en la curva marcada con el 10% se llegó a esa presión con un incremento final de  $90 \text{ g/cm}^2$ , teniendo previamente el suelo una presión, bajo la que se estaba consolidando, de  $910 \text{ g/cm}^2$  y en la curva marcada con 100% se aplicó al suelo  $500 \text{ g/cm}^2$ , teniendo previamente  $500 \text{ g/cm}^2$  como presión de consolidación.

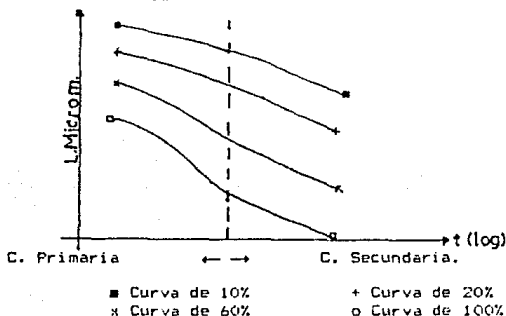


Figura 10

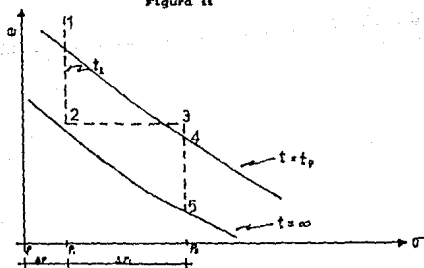
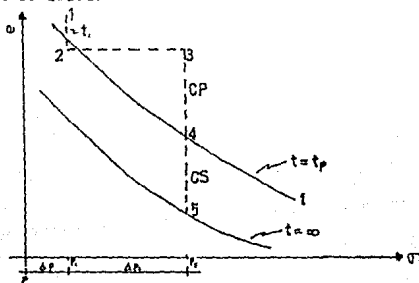
Puede observarse que cuanto más pequeña es la carga, en porcentaje de la carga aplicada anteriormente, menos clara resulta la transición entre los efectos primario y secundario. Para porcentajes decrecientes de incremento de presión, la concavidad es menor, desapareciendo en una curva de alrededor de 20%; para el incremento de 10% la curvatura se invierte, transformándose en convexa. En todos los casos, la consolidación secundaria está representada por líneas rectas paralelas aproximadamente.

Del párrafo anterior se deduce que para estudiar la consolidación secundaria es necesario hacer incrementos de presión pequeños, el criterio de diferentes autores varía, pero generalmente van del orden de  $\Delta\sigma/\sigma = 0.2$  a  $\Delta\sigma/\sigma = 0.4$  e incluso en ocasiones de 0.5.

Para tener un efecto secundario predominante en la curva de consolidación es necesario hacer un incremento de presión pequeño (en porcentaje a la presión aplicada previamente) pero también, este efecto predominante depende del tiempo que se haya dejado la presión anteriormente aplicada. Utilizando la curva de compresibilidad para explicar lo anterior, representando en ella

la curva para el final de la consolidación primaria,  $t=t_p$ , (línea exp. continua) y la curva para el final del fenómeno o final del efecto secundario,  $t = \infty$ , (línea continua), lo cual se explicará más adelante, se tiene para las figuras 11 y 12 lo siguiente:

En la Fig. 11 se tiene que para una cierta carga  $P_1 = P + \Delta P$ , la cual se deja un intervalo de tiempo  $t_1$  pequeño, se presenta una consolidación que va del punto 1, al que se había llegado con el incremento anterior, al punto 2, en donde se hace el siguiente incremento de carga  $\Delta P_1$ , para llegar a una presión total  $P_2$ . En dicha figura se observa que el incremento rebasa la curva  $t=t_p$ , por lo que el efecto primario se desarrolla del punto 3 al punto 4, que como ya se mencionó es la curva para el final de la consolidación primaria; y el efecto secundario se desarrolla del punto 4 al punto 5 (que es la curva de el fin de la consolidación para dicha carga  $P_2$ ); es evidente de esta figura que el efecto primario es el predominante, mientras que para la figura 12 con la misma carga actuante,  $P_1$ , e incremento,  $\Delta P_1$ , tenemos un efecto secundario predominante debido a que se dejó la carga  $P_1$  un intervalo de tiempo  $t_2$  mucho más grande, permitiendo se consolidara más el suelo.



Remitiendo los resultados de las anteriores figuras (11 y 12) a las curvas de consolidación, de las cuales se obtienen un punto para cada una de ellas, tenemos las figuras 14 y 15

La figura 14 nos muestra la curva para el caso en que predomina la consolidación primaria, y como se ve, es la curva que comunmente se conoce y se obtiene para el estudio de dicho efecto.

La figura 15 nos muestra la curva en la cual predomina el efecto secundario.

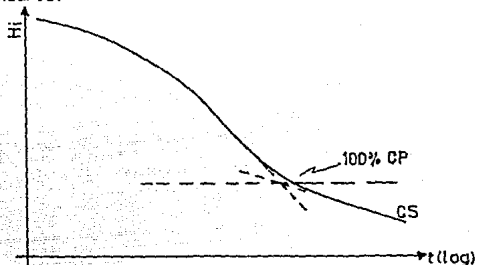


Figura 14

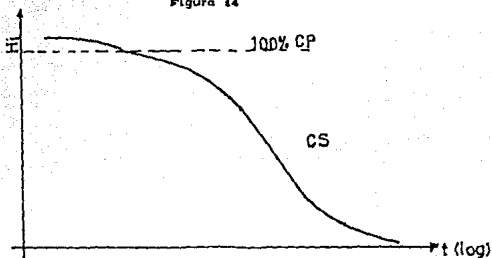


Figura 15

En el fenómeno de la consolidación, se siente lógico suponer que el efecto primario que se desarrolla al inicio de la aplicación de un incremento de carga, retrase el efecto secundario, por lo que en el estudio de dicho efecto debería tomarse en cuenta tal retraso, sin embargo, debido a que la consolidación secundaria se lleva en un intervalo grande de tiempo y que a tiempos avanzados dentro de la misma, el tiempo que representa la consolidación primaria es casi inapreciable, no se tomará en cuenta en la teoría que se verá en breve, la cual fue desarrollada por el Dr. Eulalio Juárez Badillo, como ya previamente se había mencionado.

El efecto de la consolidación secundaria también aumenta con el contenido de materia orgánica de un suelo, es por eso que cuando se realizan estudios en la curva de consolidación primaria para arcillas orgánicas de acuerdo a la teoría de Terzaghi, se desvía más de la curva teórica que la de las inorgánicas. Además de que en estas arcillas orgánicas  $C_v$  y  $e$  varían grandemente, aspecto no contemplado por Terzaghi.

También, para el estudio de la consolidación secundaria, debe tomarse en cuenta que cuanto más delgada es la muestra, más corto es el tiempo necesario para la disipación de las sobrepresiones intersticiales.

En cuanto a teorías de consolidación secundaria se refiere, Buisman (1936) y Gray (1936) fueron los primeros en citar diferencias respecto a los resultados previstos por la teoría de la consolidación de Terzaghi; y Taylor (1942) fue el primero en proponer una teoría racional para dicha consolidación. Esta teoría consideraba el esqueleto mineral como un material viscoelástico. Los recientes trabajos en este campo están dirigidos hacia el desarrollo de modelos analógicos y métodos numéricos para resolver los problemas de consolidación secundaria con complicados modelos reológicos.

El fenómeno de la consolidación secundaria complica el cálculo del desarrollo con el tiempo y la magnitud final del asentamiento. Bjerrum (1967) ha discutido este tema.

#### **Ecuación General para la Consolidación Secundaria.**

Reafirmando lo escrito ya en el capítulo primero del trabajo, el estudio de la consolidación secundaria para una arcilla típica del Valle de México, se hará a través de la teoría desarrollada por el Dr. E. Juárez Badillo y que fuera presentada con el nombre: "General time volume change equation for soils.", en la onceava conferencia internacional en Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.

Tradicionalmente, el comportamiento de la variación del volumen con el tiempo en suelos sujetos a condiciones de isotropía y confinamiento, había sido dividida en deformaciones instantáneas y diferidas. En esta ocasión se presenta una ecuación general que conjunta ambas deformaciones. Este comportamiento, del cambio de volumen con el tiempo de los suelos, es función de dos parámetros: el "coeficiente de viscosidad volumétrica  $\delta$ " y el "tiempo característico  $t^*$ "; y están basados en unos principios filosóficos previamente usados por el Dr. Juárez Badillo para la ecuación general de la compresibilidad en suelos [Ref.8] y para la ecuación general de la variación de la permeabilidad en suelos [Ref.4].

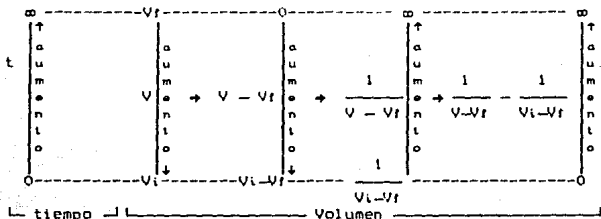
En el desarrollo de esta ecuación se incluyeron los cambios de volumen, instantáneos y diferidos en suelos gruesos secos (arenas y gravas), y los diferidos o consolidación secundaria de suelos finos saturados (limos y arcillas).

**Consideraciones básicas:**

Para el desarrollo de la ecuación, primero considerese una muestra de suelo seco grueso sujeto, por mucho tiempo, a un esfuerzo isotrópico  $\sigma_1$ . Supongase que este esfuerzo  $\sigma_1$  se incrementa instantáneamente a un esfuerzo  $\sigma_2$ . El problema es encontrar los cambios de volumen infinitesimales  $dV$ , que se llevan a cabo durante un intervalo infinitesimal de tiempo  $dt$ . Asignemos como  $V_i$  al volumen inicial para  $t = 0$  y  $V_f$  al volumen final para  $t = \infty$ . La relación entre  $dV$  y  $dt$  debe producir una ecuación que satisfaga el siguiente principio filosófico:

La relación entre  $dV$  y  $dt$  puede ser obtenida a través de los siguientes pasos:

1) El dominio real para  $t$  está completo, esto es, desde 0 hasta  $\infty$ , mientras que el dominio real para  $V$  está incompleto e invertido, es decir, de  $V_i$  a  $V_f$ . Se requiere encontrar una función  $f(V)$  con un dominio real completo y lineal, que sea  $f(V) = 0$  para  $t = 0$  y  $f(V) = \infty$  para  $t = \infty$ :



Por lo tanto resulta ser:

$$f(V) = \frac{1}{V - V_f} - \frac{1}{V_i - V_f} \quad (1)$$

2) Ahora  $f(V)$  y  $t$  están listos para ser relacionados. Por razones filosóficas, las cuales incluyen el principio filosófico enunciado anteriormente, la relación es:

$$\frac{df(V)}{f(V)} = \delta \frac{dt}{t} \quad (2)$$

donde  $\delta$  es un parámetro adimensional de proporcionalidad, llamado "Coeficiente de viscosidad volumétrica".

**Ecuación General:**

Supongamos que  $V_i$  es un volumen conocido para  $t = t_i$  ( $t_i \neq 0$ ). Integrando (2) entre los límites  $(t_i, V_i)$  y  $(t, V)$ , tenemos:



$$\ln f(V) \Big|_{V_i}^V = \delta \ln t \Big|_{t_i}^t$$

Por lo tanto:

$$\frac{f(V)}{f(V)_i} = \left( \frac{t}{t_i} \right)^\delta \quad (3)$$

Introduciendo (1) en (3) se tiene:

$$\frac{\frac{1}{V - V_f} - \frac{1}{V_i - V_f}}{\frac{1}{V_i - V_f} - \frac{1}{V_i - V_f}} = \left( \frac{t}{t_i} \right)^\delta \quad (4)$$

Multiplicando el numerador y denominador del primer término por  $V_i - V_f$ :

$$\frac{V_i - V_f}{V - V_f} = 1 + \left[ \frac{V_i - V_f}{V_i - V_f} - 1 \right] \left( \frac{t}{t_i} \right)^\delta \quad (5)$$

En la práctica, la ecuación anterior se escribe de una forma más sencilla a través de los siguientes símbolos:

$$V_i - V = \Delta V = x \quad \text{y} \quad V_i - V_f = (\Delta V)_T = x_T \quad (6)$$

donde  $\Delta V = x$  es el cambio de volumen al tiempo  $t$  y  $(\Delta V)_T = x_T$  es el cambio de volumen al tiempo  $t = \infty$ .  
Introduciendo (6) en (5):

$$\frac{x_T}{x_T - x} = 1 + \left[ \frac{x_T}{x_T - x_i} - 1 \right] \left( \frac{t}{t_i} \right)^\delta \quad (7)$$

$$\therefore \frac{x}{x_T - x} = \frac{x_i}{x_T - x_i} \left( \frac{t}{t_i} \right)^\delta$$

$$\therefore \frac{x_T - x}{x} = \frac{x_T - x_i}{x_i} \left( \frac{t_i}{t} \right)^\delta$$

y finalmente llegamos a la ecuación comúnmente usada:

$$\frac{x_T}{x} = 1 + \left[ \frac{x_T}{x_i} - 1 \right] \left( \frac{t_i}{t} \right)^\delta \quad (8)$$

Ahora si definimos el grado de compresión  $U$  como:

$$U = \frac{x}{x_T}$$

entonces la ecuación (8) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{1}{U} = 1 + \left[ \frac{1}{U_s} - 1 \right] \left[ \frac{t_s}{t} \right]^\delta \quad (9)$$

Escribiendo la ecuación anterior en otra forma más sencilla, definiendo el "tiempo característico  $t_s$ " como el tiempo para el cual  $U_s = 0.5$ . En este caso la ec. (9) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} = 1 + \left[ \frac{t_s}{t} \right]^\delta \quad (10)$$

Para poder comprender el progreso de la consolidación con el tiempo, la figura 17 muestra graficada la ecuación (9) para el caso especial en que  $t_s = t_{0.5}$  para  $U_s = 0.9$ . Se muestra para diferentes valores de  $\delta$  y, para fines comparativos, la solución lineal de consolidación unidimensional de Terzaghi también es mostrada. En la figura 18 se muestran las mismas curvas para el caso en que  $t_s = t_{0.5}$  para  $U_s = 0.1$  y la figura 19 muestran otras para el caso  $t_s = t_{0.5}$  para  $U_s = 0.5$ .

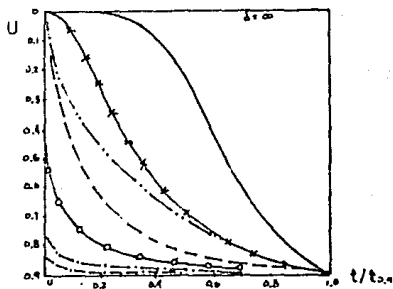


Fig. 17  
 ———  $\delta=5$     -x-x-  $\delta=2$     - - - -  $\delta=1$     -o-o-  $\delta=0.5$   
 -.-.-  $\delta=0.2$     - - - -  $\delta=0.1$     -.-.-.- Terzaghi.

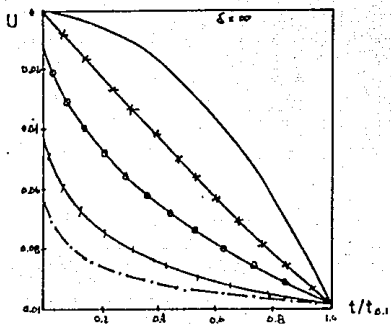


Fig. 18

—  $\delta=2$       -x-x-  $\delta=1$       -o-o-  $\delta=0.5$   
 -+-+  $\delta=0.2$       -·-·-  $\delta=0.1$

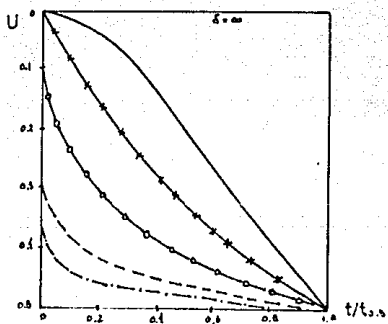


Fig. 19

—  $\delta=2$       -x-x-  $\delta=1$       -o-o-  $\delta=0.5$   
 -+-+  $\delta=0.2$       -·-·-  $\delta=0.1$

De las figuras 17, 18 y 19, parece obvio al observarlas, que no es conveniente usarlas para medir con ellas en la práctica.

La figura 20 (a y b) muestran las mismas curvas que la figura 17 pero en escala semilogarítmica, esto es, el tiempo en escala logarítmica.

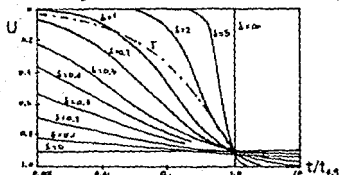


Figura 20a

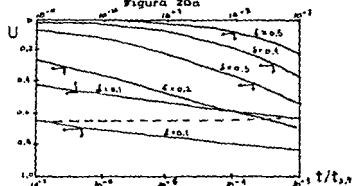


Figura 20b

Si ahora definimos un "factor tiempo  $\tau$ " como:

$$\tau = \left[ \frac{t}{t_{0.5}} \right]^\delta \quad (11)$$

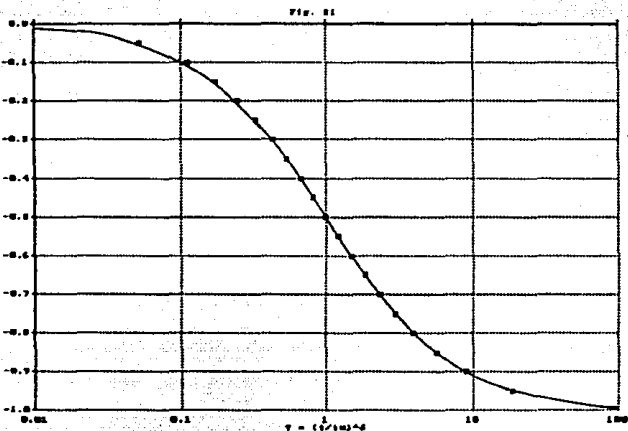
entonces la ecuación (10) se puede escribir como:

$$\frac{1}{U} = 1 + \frac{1}{\tau} \quad (12a)$$

o en la forma:

$$\frac{U}{1-U} = \tau \quad (12b)$$

En la figura 21 se muestra graficada la ecuación (12b), y los valores de  $\tau$  para los diferentes valores de  $U$ , se muestran a continuación:



Gáfica de  $U/(1-U) = \tau$

Fig. 21

Gráfica de los diferentes valores de  $\tau$   
para los diferentes valores de  $U$

Para facilitar la obtención de los parámetros  $\delta$  y  $t^*$ , algunas características de las gráficas semilogarítmicas se enlistan a continuación:

1) Las gráficas semilogarítmicas son antisimétricas, esto es, si para  $U_2 = 1 - U_1$ , entonces:

U	$\tau$	U	$\tau$	U	$\tau$	U	$\tau$
0	0	0.30	0.4286	0.60	1.5000	0.90	9.0000
0.05	0.0526	0.35	0.5385	0.65	1.8571	0.95	19.0000
0.10	0.1111	0.40	0.6667	0.70	2.3333	1.00	$\infty$
0.15	0.1765	0.45	0.8182	0.75	3.0000		
0.20	0.2500	0.50	1.0000	0.80	4.0000		
0.25	0.3333	0.55	1.2222	0.85	5.6667		

$$\frac{t_2}{t^*} = \frac{t^*}{t_1}$$

De la ecuación (12b) para  $U = U_1$  tenemos:

$$\tau_1 = \frac{U_1}{1 - U_1} \quad (13)$$

Para  $U_2 = 1 - U_1$  se tiene en forma similar:

$$\tau_2 = \frac{U_2}{1 - U_2} = \frac{1 - U_1}{U_1} = \frac{1}{\tau_1} \quad (14)$$

De la ecuación (11):

$$\left[ \frac{t_2}{t^*} \right]^\delta = \left[ \frac{t^*}{t_1} \right]^\delta \quad (15)$$

por lo tanto:

$$\frac{t_2}{t^*} = \frac{t^*}{t_1} \quad (16)$$

En las gráficas semilogarítmicas, para valores simétricos de  $U$  con respecto a  $U = 0.5$ , se tienen valores simétricos de  $t$  con respecto a  $t^*$  (Figs. 20 y 21).

2) El tercio medio de una gráfica semilogarítmica se acerca o asemeja mucho a una línea recta. La pendiente de la curva (Fig. 21) puede ser encontrada usando la ecuación (12):

$$\frac{dU}{d \log r} = 2.3r \frac{dU}{dr} = 2.3r \frac{U^2}{r} = 2.3r \frac{U}{r}$$

$$\therefore \frac{dU}{d \log r} = 2.3 U (1 - U) \quad (17)$$

La máxima pendiente ocurre cuando  $U = 0.5$  ( $t = t^*$ ) y su valor es:

$$\left( \frac{dU}{d \log t} \right)_{\max.} = \frac{2.3}{4} \quad (18)$$

En forma similar las pendientes de las curvas de la figura 20 son, de la ecuación (11), las siguientes:

$$\frac{dr}{r} = \delta \frac{dt}{t} \quad (19)$$

de esta forma podemos escribir, a través de las ecs. (19) y (17):

$$\begin{aligned} \frac{dU}{d \log t} &= 2.3t \frac{dU}{dt} = 2.36r \frac{dU}{dr} = 2.36 \frac{U^2}{r} \\ \therefore \frac{dU}{d \log t} &= 2.36 U (1 - U) \quad (20) \end{aligned}$$

De la misma forma, la máxima pendiente ocurre en  $U = 0.5$  ( $t = t_f$ ):

$$\left( \frac{dU}{d \log t} \right)_{\max.} = \frac{2.3}{4} \delta \quad (21)$$

La relación de la pendiente de cualquier punto entre la máxima pendiente está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{dU}{d \log t}}{\left( \frac{dU}{d \log t} \right)_{\max.}} &= 4 U (1 - U) \quad (22) \end{aligned}$$

Las relaciones para los distintos valores de  $U = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  y  $0.5$  son: relación =  $0, 0.36, 0.64, 0.84, 0.96$  y  $1.0$  respectivamente.

Ahora, la relación de la pendiente de la línea recta que pasa por los puntos extremos del tercio medio de la gráfica (pendiente secante), entre la máxima pendiente, usando la ecuación (12b), es como sigue:

$$\frac{\Delta U}{\Delta \log t} = \frac{2/3 - 1/3}{\log \frac{2/3}{1/3}} = \frac{1/3}{\log \frac{2}{1/2}} = \frac{1}{6 \log 2} \quad (23)$$

La relación es, de (23) y (18):

$$\frac{\frac{\Delta U}{\Delta \log r}}{\left( \frac{dU}{d \log r} \right)_{\max.}} = \frac{2}{3 \cdot 2.3 \log 2} = 0.96 \quad (24)$$

Lo anterior muestra que, en la práctica, el tercio medio de la gráfica puede ser considerado como una línea recta, sin cometer un error considerable.

La línea recta de la curva de consolidación, se extiende sobre cierto número de ciclos de la escala logarítmica del tiempo. El número de ciclos puede obtenerse como sigue:

Como ejemplo, para la figura 21 y usando la ecuación (12b), se tiene que  $U = 1/3$  cuando  $\tau = 0.5$  y para  $U = 2/3$ ,  $\tau = 2$ , entonces:

$$\text{Núm. ciclos dados por } \Delta \log r = \log \frac{\tau^{2/3}}{\tau^{1/3}} = \log 4 = 0.6 \quad (25)$$

Las características anteriores de las curvas de tiempo (consolidación) son muy útiles para la obtención, en la práctica, de los parámetros  $\delta$  y  $t^*$  de los datos experimentales.

Una vez que se han determinado los parámetros  $\delta$  y  $t^*$ , se puede encontrar el tiempo para un cierto valor del grado de consolidación usando las ecuaciones (11) y (12b):

$$\left( \frac{t}{t^*} \right)^\delta = \frac{U}{1-U} \quad (27)$$

Obsérvese que para  $(1-U)$  el tiempo es recíproco justamente.

Por otra parte, la razón a la cual el grado de consolidación progresa puede encontrarse a través de las ecuaciones (12a) y (12b):

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{U^2}{\tau} = (1-U)^2 \quad (29)$$

de la ecuación (11):

$$d\tau = \delta \left( \frac{t}{t^*} \right)^\delta \frac{dt}{t} \quad (30)$$

introduciendo (30) en (29):



$$\frac{dU}{dt} = (1 - U)^{\delta} \frac{\delta}{t} \left[ \frac{t}{t\#} \right]^{\delta} \quad (31)$$

para  $t = 0$  ( $U = 0$ ) se tiene:

$$\text{Si } \delta < 1 \quad \left[ \frac{dU}{dt} \right]_{t=0} = \infty \quad (32)$$

$$\text{Si } \delta = 1 \quad \left[ \frac{dU}{dt} \right]_{t=0} = \frac{1}{t\#}$$

$$\text{Si } \delta > 1 \quad \left[ \frac{dU}{dt} \right]_{t=0} = 0 \quad (32)$$

De las expresiones anteriores (32) se ve que solamente para el caso en que  $\delta < 1$  se espera que habrá una deformación instantánea o simultánea con el incremento instantáneo de esfuerzo. Sin embargo, la cantidad de esta deformación depende del valor de  $\delta$  y del tiempo que se tenga para registrarla. Para  $\delta = 1$  la velocidad de la deformación es finita y por lo tanto cualquier deformación necesita algún tiempo para llevarse a cabo. Para  $\delta > 1$  la velocidad de la deformación es cero.

La teoría anteriormente expuesta, desarrollada para suelos sujetos a esfuerzos isotrópicos está pensada para ser también válida para condiciones triaxiales si las direcciones principales de esfuerzo y de deformación no cambian y si la relación de los esfuerzos principales se mantienen constantes.

La determinación, en la práctica, de los parámetros  $\delta$  y  $t\#$  dependen del tipo de datos experimentales con que se cuente. Usando gráficas semilogarítmicas nos referiremos a los tres tercios como:

- (c1) curva inicial en el primer tercio.
- (s) línea recta del segundo tercio.
- (c2) curva del tercer tercio.
- (csc) datos con puntos en los tres tercios.
- (cs) y (sc2) datos con puntos en dos tercios únicamente.
- (c1), (s) y (c2) datos en un solo tercio.

Los mejores datos experimentales son los que tienen puntos en los tres tercios (csc) y los peores son los que tienen puntos sólo en el tercio medio y si es una pequeña línea recta (s).

Para obtener los parámetros  $\delta$  y  $t\#$  supongamos que se tienen datos del tipo (cs), generalmente los más comunes.

- Hagamos las siguientes asignaciones:
- $t_0$  y  $x_0$  → punto inicial.
- $t_1$  y  $x_1$  → punto intermedio.
- $t_2$  y  $x_2$  → punto final.

Los últimos dos puntos deben estar localizados en las zonas inicial y final de la línea recta. Debe tenerse en cuenta que los

valores de  $x$  pueden ser cantidades cualquiera proporcionales a los cambios de volumen.

**Procedimiento:**

1.- Trate de fijar un valor para  $x_T$  haciendo uso de las características de las gráficas semilogarítmicas, de la siguiente forma: encuentre el valor de  $x = a$  para el punto en donde la línea recta empieza. Entonces  $x_T = 3a$ .

2.- Calcule el valor de  $\delta$  usando los puntos 1 y 2 ( $(t_1, x_1)$  y  $(t_2, x_2)$ ), que son mejores puntos que el 3. Por lo tanto se tiene que:

$$\frac{1 - U_1}{U_1} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^\delta \quad (33)$$

$$\frac{1 - U_2}{U_2} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^\delta \quad (34)$$

Dividiendo (33) entre (34):

$$\frac{1 - U_1}{U_1} \frac{U_2}{1 - U_2} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^\delta \quad (35)$$

Despejando  $\delta$  y poniendo las  $U$ 's en términos de  $x$ 's, tenemos:

$$\delta = \frac{\log \left( \frac{x_2}{x_1} \frac{x_T - x_1}{x_T - x_2} \right)}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (36)$$

3.- Rectificar el valor de  $x_T$  usando el punto inicial 3:

$$\frac{x_T}{x_2} = 1 + \left( \frac{x_T}{x_1} - 1 \right) \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^\delta \quad (37)$$

4.- Repetir los pasos del 1 al 3 en el caso en que la ecuación (37) no se haya satisfecho, cambiando el valor de  $x_T$  en la dirección correcta:

a mayor  $x_T$  resulta calculada una  $x_2$  mayor.

5.- Calcule el valor de  $t_2$  usando el punto 2 preferiblemente:

$$\left( \frac{t_2}{t_1} \right)^\delta = \frac{x_T - x_2}{x_2} \quad (38)$$

6.- Introduzca  $x_T$ ,  $\delta$  y  $t_2$  en la ecuación (10). La ecuación

estará lista a usarse:

$$\frac{x\tau}{x} = 1 + \left[ \frac{t\ddagger}{t} \right]^\delta \quad (39)$$

La ecuación (39) se puede escribir en términos del volumen o la altura de la muestra (para consolidación unidimensional):

$$V = V_i - \Delta V = V_i - \frac{(\Delta V)\tau}{1 + \left[ \frac{t\ddagger}{t} \right]^\delta} \quad (40a)$$

$$H = H_i - \Delta H = H_i - \frac{(\Delta H)\tau}{1 + \left[ \frac{t\ddagger}{t} \right]^\delta} \quad (40b)$$

Para el caso (sc) use puntos de igual forma que para lo hecho en el caso anterior, sólo que el punto 3 localícese en la curva final cz. Para datos del tipo (csc) use los puntos extremos de la línea recta como los puntos 1 y 2, y verifique dos puntos 3 localizados en los extremos de la curva experimental.

Para los datos del tipo (s), los parámetros pueden determinarse si la línea recta está completa. Si no es así,  $x\tau$ ,  $\delta$  y  $t\ddagger$  pueden obtenerse de otra forma.

Para este caso (s) asignemos a  $x_1$  y  $x_2$  los valores de los puntos inicial y final de la recta, respectivamente. La línea recta está completa si  $x_2 = 2x_1$ . Si  $x_2 < 2x_1$  está incompleta. En este caso  $x\tau$  debe satisfacer la desigualdad:

$$1.5x_2 \leq x\tau \leq 3x_1 \quad (41)$$

Dando a  $x\tau$  los valores extremos de (41), los valores correspondientes a  $\delta$  y  $t\ddagger$  pueden ser obtenidos a través de las ecuaciones (36) y (38).

Si el valor de  $\delta$  es conocido,  $x\tau$  puede ser encontrado despejándolo de la ecuación (35):

$$\frac{x\tau}{x_2} = \frac{\left[ \frac{t_2}{t_1} \right]^\delta - 1}{\left[ \frac{t_2}{t_1} \right]^\delta - \frac{x_2}{x_1}} \quad (42)$$

El valor  $x\tau$  deberá satisfacer la desigualdad (41).

**Comentarios:**

Se cree que no hay rompimiento de partículas a esfuerzos menores de 2kg/cm<sup>2</sup>, debido a que el valor de  $\delta$  es pequeño (0.1) en experimentos hechos previamente por el Dr. Juárez Badillo [Ref.9]. Para suelos granulares,  $\delta$  es pequeño y constante ( $\delta=0.1$ ), antes del rompimiento de partículas y es grande y constante ( $0.5 \leq \delta \leq 1.0$ ) cuando el nivel de esfuerzos alcanza la rama virgen en donde hay un rompimiento generalizado de partículas [Ref.9].

Un "coeficiente de consolidación secundaria" que puede probar ser utilizable en la práctica, debido a su similitud con los ya expuestos ( $\delta$  y  $t^*$ ) es el siguiente [Ref.10]:

$$c_t^* = \left[ \frac{dH}{d \log t} \right]_{t=t^*} = \frac{2.3}{4} \delta \frac{(\Delta H) \tau}{H^*} \quad (43)$$

en donde  $H^*$  es  $H$  para  $t = t^*$ .

En términos de volúmenes tenemos que:

$$c_t^* = \frac{2.3}{4} \delta \frac{(\Delta V) \tau}{V^*} \quad (44)$$

Mesri ha publicado experimentos unidimensionales muy extensos usando arcillas orgánicas e inorgánicas [Ref.10]. Los resultados fueron expresados en términos de  $C_a$  y  $\epsilon_{ap}$  definidos por:

$$\epsilon_{ap} = \frac{C_a}{1 + e_p} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \frac{1}{1 + e_p} \quad (46)$$

donde  $e_p$  es la relación de vacíos al comienzo de la línea recta de la gráfica semilogarítmica.

Para poder compararla con  $c_t^*$  pongamos la ecuación (46) de la siguiente manera:

$$\epsilon_{ap} = \left[ \frac{dH}{d \log t} \right]_{t=t^*} \frac{1}{H_p} \quad (47)$$

donde  $H_p$  es el valor de  $H$  para  $e = e_p$ .

Comparando (43) con (47) tenemos:

$$c_t^* = \epsilon_{ap} \frac{H_p}{H^*} \quad (48)$$

A través de experimentación, se observa que prácticamente no hay diferencia entre  $c_t^*$  y  $\epsilon_{ap}$ . Obsérvese también que estos parámetros no pueden ser usados en la práctica sin el parámetro

t\* [Ref.9].

También debe recalcar que, en arcillas, la consolidación primaria hará necesario introducir una modificación en la escala de tiempo después de que se haya terminado de disipar la presión de poro en exceso, como se había mencionado al inicio del capítulo.

También se sugiere que la ecuación (10) también es aplicable a sólidos, líquidos y gases.

Es importante mencionar que mientras la curva de compresibilidad para el fin de la consolidación primaria es función de un cierto programa de cargas, la curva de compresibilidad para  $t = \infty$  es única para muestras de suelo dadas sujetos a incrementos de carga uniformes.

#### Curva de Compresibilidad Límite ( $t = \infty$ ):

Como ya se mencionó superficialmente, y se explicará a fondo en el capítulo siguiente, en una prueba de consolidación se hacen varios incrementos de carga, los cuales completan un programa de cargas. Una vez que el suelo alcanza su máxima deformación bajo un incremento de carga aplicado, su relación de vacíos llega a un valor menor, evidentemente que el inicial y que puede determinarse a partir de los datos iniciales de la muestra y las lecturas del extensómetro. Es obvio que la máxima deformación del suelo se llevará a cabo a un tiempo infinito, por lo tanto, lo que en la práctica normalmente se hace, es haber completado en la curva de consolidación, la consolidación primaria y de esta deformación se determina su relación de vacíos como ya se mencionó; sin embargo, para el tema que interesa al presente trabajo también interesa la deformación a un tiempo infinito, por lo que, a través de la teoría expuesta anteriormente, se obtiene dicha deformación y se le determina su relación de vacíos final, para un tiempo infinito. Así para cada incremento de carga aplicado se tiene finalmente dos valores de la relación de vacíos (uno para  $t = t_p$  -fin de la primaria- y otro para  $t = \infty$  -fin de la secundaria-) y uno de la presión correspondiente actuante sobre el espécimen. En suma, de toda la prueba, una vez aplicados todos los incrementos de carga; se tienen valores para constituir una gráfica en cuyas abscisas se ponen los valores de la presión actuante, en escala natural o logarítmica y en cuyas ordenadas se anotan los correspondientes de  $e_p$  (fin de la primaria) y  $e_{\infty}$  ( $t = \infty$ ) en escala natural. Estas curvas se llaman de compresibilidad y se obtiene una de cada prueba de consolidación completa.

La ecuación (10) del presente capítulo se puede también expresar en términos de la relación de vacíos:

$$\Delta e = \frac{(\Delta e)_{\tau}}{1 + \left[ \frac{t^*}{t} \right]^{\delta}} \quad (49)$$

donde  $\Delta e$  y  $(\Delta e)_t$  son los cambios en la relación de vacíos a los tiempos  $t$  y  $\infty$  respectivamente.

Ha sido demostrado que la ecuación de compresibilidad es como sigue [Ref.8]:

$$\frac{1 + e}{1 + e_t} = \left( \frac{\sigma'v}{\sigma'v_t} \right)^{-\gamma} \quad (50)$$

donde  $(\sigma'v_t, e_t)$  es un punto conocido.

De la ec.(50) se puede obtener el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$ , despejándolo de la misma:

$$\gamma = - \frac{\ln \frac{v}{v_0}}{\ln \frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad (51)$$

Pero como  $v \sim 1 + e$  y  $v_0 \sim 1 + e_0$  :

$$\gamma = - \frac{\ln \frac{1 + e}{1 + e_0}}{\ln \frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad (52)$$

donde  $(\sigma, e)$  y  $(\sigma_0, e_0)$  son puntos conocidos que previamente fueron graficados en la curva de compresibilidad.

El coeficiente de compresibilidad para la curva del fin de la primaria ( $t = t_p$ ) debe ser igual que para la curva  $t = \infty$ .

#### Procedimiento:

Para obtener las ecuaciones de las curvas de compresibilidad  $t = t_p$  y  $t = \infty$  es conveniente el siguiente procedimiento:

- 1.- De las graficas de consolidación obtener las alturas a las cuales la consolidación primaria haya llegado al 100%.
- 2.- Obtener la relación de vacíos de cada una de las alturas anteriores, a través de la siguiente expresión [Ref.1]:

$$e = \frac{H_m}{H_0} - 1 \quad (52a)$$

donde  $H_m$  es la altura de la muestra al inicio de cada carga.

$$H_m = \frac{w_s}{S_s \gamma_o A}$$

y donde  $w_s$  es el peso de sólidos

$S_s$  es la densidad de sólidos

$\gamma_o$  es el peso específico del agua ( $1 \text{ gr/cm}^3$ )

A es el área del anillo de la prueba.

(Nota:  $w_s$  y  $S_s$  se obtienen de sus correspondientes pruebas de laboratorio con el mismo suelo, estas pruebas se explicarán en un capítulo posterior.)

3.- Llevar estos puntos a la gráfica de compresibilidad.

4.- Aplicar la ecuación (52) para obtener el coeficiente de compresibilidad para la curva  $t = t_p$ .

5.- Sustituir en la ecuación (50) el punto conocido  $(\sigma'_{vs}, e_s)$  y el  $\gamma$  obtenido para tener la ecuación de la curva  $t = t_p$  de la forma:

$$e = (1 + e_s) \cdot \left[ \frac{\sigma'_{v'}}{\sigma'_{vs}} \right]^{-\gamma} - 1 \quad (53)$$

6.- De la teoría de consolidación secundaria, antes expuesta, obtener, para cada incremento todos los parámetros de la ecuación (10):  $\delta$ ,  $t^*$  y  $x_T$  (que debieron haber sido ya obtenidos después de haber graficado cada curva de consolidación, pero si no es así, hacerlo).

7.- De las alturas iniciales de cada uno de los incrementos, restarle la  $x_T$  obtenida para cada uno de los mismos; con el fin de obtener las alturas finales para el  $t = \infty$ :

$$H_{fj} = H_{ij} - x_{Tj}$$

$H_{fj}$  = altura final del incremento  $j$

$H_{ij}$  = altura inicial del incremento  $j$

$x_{Tj}$  =  $x_T$  del incremento  $j$ .

8.- Con la ecuación (52a) obtener las relaciones de vacíos para cada una de las alturas finales.

9.- Llevar estas relaciones de vacíos, con sus presiones respectivas, a la gráfica de compresibilidad.

10.- Con la ecuación (52) obtener el coeficiente de compresibilidad para la curva  $t = \infty$  y compararlo con el obtenido para la curva  $t = t_p$ , ya que debe ser el mismo, en caso contrario, deben calcularse de nuevo  $\delta$ ,  $t^*$  y  $x_T$  para los puntos que se requiera y según sea el caso de subirlos o bajarlos (acerca de esto se hablará posteriormente).

11.- Una vez que lo anterior se cumpla (que la  $\gamma$  sea la misma para ambas curvas) se procede de la misma forma que en el paso 5. De esta forma se obtiene la ecuación de la curva de compresibilidad límite.

#### Comentarios:

En la práctica primeramente se tiene una consolidación primaria. Esta consolidación primaria se lleva a cabo cuando  $U_p$  (grado de consolidación) es igual a  $U_p$ .  $U_p$  es pequeño en la rama de recompresión (del orden de  $U_p < 0.2$  para incrementos de presión normales) y, por lo tanto,  $C_\alpha$  (pendiente de la curva de consolidación) se incrementará antes de alcanzar su valor máximo.  $U_p$  es algo mayor a 0.5 en la rama virgen y, por lo tanto,  $C_\alpha$  será casi constante antes de empezar a decrecer. Además cuando los incrementos de presión usados son constantes ( $\Delta\sigma/\sigma = \text{cte.}$ ), la relación de  $(\Delta e)_p$  (cambio de la relación de vacíos al final de la consolidación primaria a un  $t = t_p$ ) entre  $(\Delta e)_\tau$  (cambio de la relación de vacíos total, a un tiempo  $t = \infty$ ) es constante, esto es,  $U_p$  es constante [Ref.11]. De esta forma, si se conoce previamente  $U_p$  para una  $\Delta\sigma/\sigma = \text{cte.}$  cualquiera, por experiencia a través de varias pruebas que se hayan realizado, es fácil obtener, por medio de la curva de compresibilidad para  $t = t_p$ , la ecuación de la curva de compresibilidad límite:

Conocida  $U_p$  y, por supuesto  $(\Delta e)_p$  para un cierto incremento (de la curva de consolidación correspondiente), de la siguiente expresión se despeja  $(\Delta e)_\tau$ :

$$U_p = \frac{(\Delta e)_p}{(\Delta e)_\tau} \quad (54)$$

Una vez que se tiene el  $(\Delta e)_\tau$  para el incremento dado, se resta éste de la relación de vacíos del final del incremento anterior o del inicio del incremento presente, para tener la relación de vacíos final al tiempo  $t = \infty$ . Esta relación de vacíos con la presión actuante correspondiente, vendría siendo el punto ( $\sigma'_{vi}$ ,  $e$ ) de la ecuación límite, y con la misma  $\gamma$  obtenida para la primaria, se sustituyen en la ecuación (53).

Supongamos que a una muestra se le sujeta a una sobrecarga permitiendo se desarrolle una pequeña cantidad de consolidación secundaria, después de la consolidación primaria; y al cabo de ello, se remueve la sobrecarga. La idea, es que, cuando la sobrecarga es removida hay primero que nada una expansión primaria gobernada principalmente por un efecto hidrodinámico, similar a la consolidación primaria. Esta expansión primaria puede o no ser seguida de una expansión secundaria. Al mismo tiempo que se lleva la expansión, se desarrolla una consolidación secundaria que tiende a consolidar la muestra de suelo a la curva límite. Tomando en cuenta lo anterior es demostrable que [Ref.11]:



Coefficiente de expansión:  $\gamma_p = \rho \cdot \gamma$

donde  $\rho$  - relación de expansibilidad-compresibilidad.

Y, por lo tanto, cualquier curva de expansión está descrita por la ecuación:

$$e = (1 + e) \left[ \frac{\sigma'v}{\sigma'v_i} \right]^{\gamma_p} - 1 \quad (55)$$

El comportamiento de la expansión secundaria y la compresión, aplicando la ecuación (49), está, por lo tanto, dada por la suma de dos componentes:

$$\Delta e = \frac{(\Delta e)_{\tau_s}}{1 + (t_s^*/t)} - \frac{(\Delta e)_{\tau_c}}{1 + (t_c^*/t)}$$

donde  $(\Delta e)_{\tau_s}$  = es la componente de la expansión total en el comportamiento de cambio de volumen.

$(\Delta e)_{\tau_c}$  = es la componente de la compresión total.

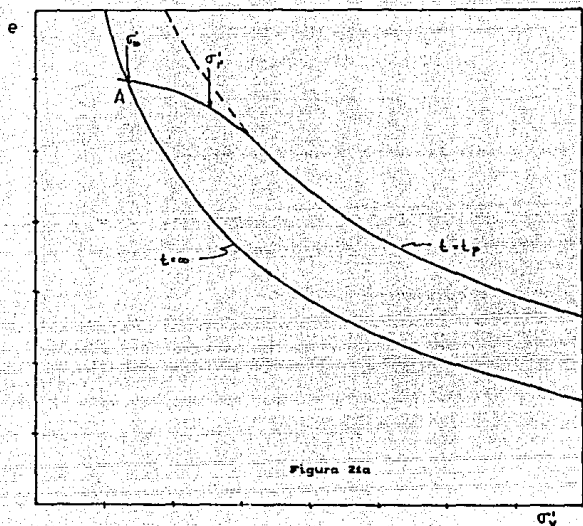
y donde los subíndices s y c indican expansión y compresión respectivamente (del inglés: swelling-expansión y compression-compresión).

además se tiene que [Ref.11]:  $\delta_s = \delta_c = \delta$ , entonces:

$$\therefore \Delta e = \frac{(\Delta e)_{\tau_s}}{1 + (t_s^*/t)} - \frac{(\Delta e)_{\tau_c}}{1 + (t_c^*/t)}$$

Por otro lado, observese también, que la curva de compresibilidad límite (Fig.21a), para  $t = \infty$ , divide la gráfica  $\sigma'v - e$  en dos zonas. Cualquier punto sobre la curva, tenderá a alcanzar dicha curva. Cualquier punto debajo de la curva será un verdadero punto preconsolidado. Debajo de esta curva, cualquier expansión o recompresión interseparará la curva  $t = \infty$ , indicando las verdaderas cargas preconsolidadas.

También debe observarse de la figura 21a que la carga de preconsolidación verdadera es  $\sigma'_{\omega}$ , mientras que la carga preconsolidada del fin de la primaria es  $\sigma'_p$ . En forma general siempre sucede que:  $\sigma'_{\omega} < \sigma'_p$  y su relación comunmente llega a ser de 0.5. Es interesante e importante comparar  $\sigma'_{\omega}$  con la presión efectiva vertical in situ, a la cual estaba sujeta la muestra, ya que ambas presiones deben ser iguales o, por lo menos, muy aproximadas para los casos en que ninguna carga haya sido removida, ya sea naturalmente (erosión u otra) o por medio de la mano del hombre, o bien si no se presenta un flujo vertical producto de una evaporación superficial, apareciendo en el agua de la parte superior esfuerzos de tensión que generan compresiones en la estructura de suelo, antes de tomar la muestra a probar. En caso contrario, la presión efectiva vertical in situ será seguramente diferente a la carga de preconsolidación verdadera.



## PRUEBAS DE LABORATORIO

### 4.1 Tipos y variantes de pruebas de consolidación.

Todas las pruebas de consolidación son muy semejantes y hachas bajo los mismos principios, sin embargo sí hay algunas diferencias y variantes en ellas. En el presente inciso se tratarán de explicar estas diferencias.

#### a) Prueba de consolidación estándar.

Una prueba de consolidación unidimensional estándar se realiza sobre una muestra labrada en forma de cilindro aplastado, es decir, de un diámetro considerablemente mayor a su altura. La muestra se coloca dentro de un anillo que le da un completo confinamiento, siendo éste, por lo regular, de bronce. Este anillo a su vez se coloca entre dos piedras porosas, de tal forma que quede una a cada lado, en las caras de la muestra; estas piedras porosas son de sección circular y de un diámetro ligeramente menor al del anillo. El conjunto se coloca en la cazuela de un consolidómetro. En la siguiente figura (22) se muestra un consolidómetro de anillo flotante, que es el comúnmente usado en la actualidad y así llamado porque se puede desplazar durante la consolidación del suelo.

Por medio de un marco de carga, se aplican cargas a la muestra, repartiéndolas uniformemente en toda el área por medio de un dispositivo formado por una esfera metálica y una placa colocada sobre la piedra porosa superior. Para llevar un registro de las deformaciones en el suelo, se coloca un extensómetro apoyado al marco de carga móvil y ligado a la cazuela fija.

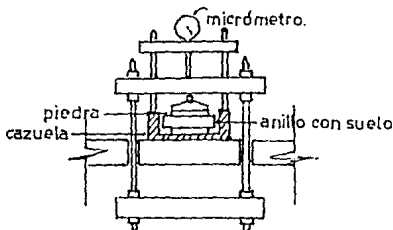


Figura 22

En cada incremento de carga se hacen lecturas en el extensómetro, con el fin de conocer la deformación correspondiente a diferentes tiempos. Los datos de estas lecturas se dibujan en una gráfica, constituyendo así la gráfica de consolidación, que se dibuja ya sea en escala natural o semilogarítmica (el tiempo en escala log.).

Para cada gráfica de consolidación se obtiene la máxima deformación (100% de consolidación primaria o fin del proceso de consolidación o ambas, según sea el caso que interese), para que a partir de los datos iniciales de la muestra se obtengan sus relaciones de vacíos. Una vez completada la prueba, con todos los incrementos de carga y la descarga, y con los datos de las relaciones de vacíos y las presiones actuantes, se genera otra gráfica llamada *gráfica de compresibilidad*, en cuyas abscisas se ponen los valores de la presión actuante, en escala natural o logarítmica y en cuyas ordenadas se anotan los correspondientes de  $e$  en escala natural. Esta gráfica se obtiene, una en cada prueba de consolidación completa.

En una curva de compresibilidad, generalmente se definen tres tramos (Fig.23):

Tramo A: tramo curvo que comienza en forma casi horizontal y cuya curvatura es progresiva, alcanzando su máximo en la proximidad de su unión con el tramo B. Se le llama "tramo de recompresión".

Tramo B: generalmente recto (muy aproximadamente) con el cual se llega al final de la etapa de carga de la muestra. Se le llama "tramo virgen".

Tramo C: con este tramo se inicia una segunda etapa, que es la de descarga. Hay una recuperación parcial en el espécimen. Se lleva a una carga final nula.

(NOTA: para el caso del presente trabajo, no se realizó la descarga del espécimen, debido a su carencia de utilidad para estudiar la consolidación secundaria.)

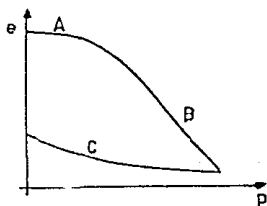


Figura 23

#### b) Prueba de consolidación en consolidómetro neumático:

El consolidómetro neumático "GEOTEC" es una modificación del consolidómetro tradicional, éste es del tipo de anillo flotante.

La aplicación de la carga se lleva a cabo mediante presión de aire, la cual se controla con un regulador de presión constante, midiéndose directamente la carga con un anillo calibrado.

- Este aparato presenta algunas ventajas sobre el tradicional:
- ‡ Ocupa menor espacio.
  - ‡ Su calibración es más sencilla y dura mucho más tiempo.
  - ‡ La medición de la presión de consolidación se hace directamente.
  - ‡ La sensibilidad en la medición de las cargas es alta y se puede modificar cambiando el anillo calibrado.
  - ‡ Mayor versatilidad.

Existen otros tipos de consolidómetros neumáticos en los cuales las presiones se aplican mediante membranas o diafragmas y se miden empleando manómetros. Estos consolidómetros presentan algunos inconvenientes, tales como la falta de precisión y algunos defectos.

*c) Pruebas en consolidómetro estándar del tipo anillo fijo:*

Contrariamente al consolidómetro del tipo de anillo flotante, este consolidómetro con anillo fijo, no permite ningún desplazamiento del mismo durante la consolidación del suelo.

En la figura 24 se muestra cómo un espécimen es colocado en el consolidómetro de anillo fijo. Este aparato es muy poco usado en la actualidad excepto para la realización de pruebas de permeabilidad hechas al mismo tiempo con la prueba de consolidación.

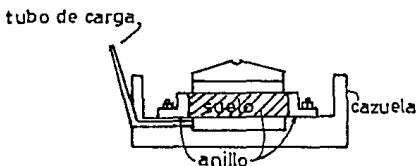


Figura 24

*d) Prueba en un consolidómetro especial que permite medir presiones laterales.*

La figura 25 muestra el consolidómetro que permite medir las presiones laterales. Las bandas extensométricas "strain gages" montadas sobre el anillo metálico detectan cualquier deformación lateral del mismo, ajustándose la presión lateral para anular esta

deformación. Mediante un dispositivo análogo es posible realizar una prueba de compresión unidimensional utilizando una forma triaxial de aparato; es decir un anillo delgado colocado en torno a la membrana detecta la deformación lateral, modificándose la presión en la cámara para anular esta deformación. De esta forma se elimina el problema de la fricción lateral.

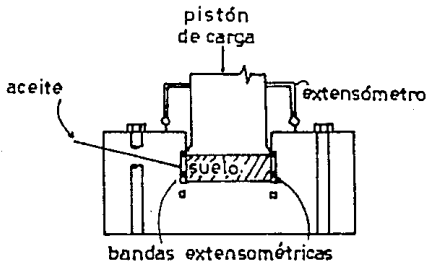


Figura 25

#### e) Pruebas de consolidación bajo otras consideraciones.

La máxima dificultad experimental en la prueba de consolidación es la fricción lateral: se desarrollan fuerzas tangenciales a lo largo de la superficie cilíndrica de la muestra al producirse las deformaciones verticales. Este efecto de fricción lateral perturba el estado unidimensional de deformación e impide que parte de la fuerza axial alcance la parte inferior de la muestra.

Se han realizado numerosos ensayos para reducir esta fricción mediante lubricantes y membranas plásticas, habiéndose demostrado que estas técnicas tienen un cierto valor.

#### 4.2 Metodología de las pruebas realizadas:

Las pruebas realizadas para la presente investigación fueron realizadas en un consolidómetro estándar del tipo anillo flotante. Las razones de que la pruebas fueran hechas en dicho aparato fueron, primordialmente, que es el aparato más comúnmente usado y por lo tanto es el que más frecuanetemente se encuentra. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería (UNAM), en donde sólo cuentan con aparatos de este tipo.

A continuación se presenta, detalladamente, cómo se lleva a cabo una prueba de consolidación unidimensional en un consolidómetro estándar del tipo anillo flotante.

### Equipo:

Consiste en lo siguiente:

- Consolidómetro
- Anillo para la ubicación de la muestra.
- Piedras porosas.
- Micrómetro
- Cortadores para labrar el espécimen.
- Cronómetro.
- Cápsulas.
- Horno.
- Balanzas.
- Termómetros.
- Algodón hidrófilo.

### Mecanismo de transmisión de carga:

La carga se aplica por medio de pesos colocados en una ménsula colocada al extremo de la viga de carga. Posteriormente la carga se transmite al marco de carga y por consiguiente a la muestra de suelo.

El peso de la viga y la ménsula de carga se balancean con un contrapeso. La posición del marco con respecto a la cazuela puede ajustarse haciendo uso de unas tuercas en las barras laterales del mismo.

Para poder usar el aparato es necesario hacer una calibración del mismo. Con ésta, se obtienen unas curvas llamadas curvas de calibración.

### Preparación de la muestra:

El procedimiento es como sigue:

1.- Determinar peso, altura y área del anillo; determinar peso de dos placas de vidrio de 15 x 15 cm. aproximadamente.

2.- Coloque una masa de material suficiente en un torno manual, para poder girarlo; colóquese el anillo en la parte superior de la masa. Retírese el material sobrante por medio de ligeros cortes de ajuste. Conforme el labrado de la muestra progresa, el anillo se va presionando uniformemente, con ayuda de una de las placas de vidrio, para que el material vaya entrando al anillo. El labrado de la muestra continúa hasta que cierta cantidad de material sobresalga por la cara superior del anillo.

3.- Retírese la porción de material sobresaliente por la cara superior del anillo, usando para ello una siqueta, posteriormente afínese cuidadosamente usando una regla metálica recta para lograr una superficie continua a nivel.

4.- Coloque el vidrio totalmente limpio en la cara superior del anillo. Inviértase el anillo para retirar el material de la

cara inferior, en la misma forma que para la cara superior, y colóquese el otro vidrio también totalmente limpio.

5.- Anótese una descripción de la muestra.

6.- Pese el conjunto: anillo, muestra y vidrios.

7.- Retírense las placas de vidrio y centrense las piedras porosas, ligeramente humedecidas, usando para ello el mismo torno manual. Una vez centradas presiónense ligeramente contra la muestra a fin de que se adhieran. Colóquese el conjunto en la cazuela del consolidómetro, evitando cualquier movimiento del anillo.

8.- Colóquese algodón húmedo en torno a la piedra porosa superior para evitar evaporación. Después del segundo incremento de presión, generalmente, se puede retirar el algodón y llenar la cazuela, hasta el borde superior del anillo, de agua.

#### Montaje de la prueba:

Se procede como sigue:

1.- Cuidando evitar movimientos dentro de la cazuela, colocar la misma en la plataforma del banco de consolidación, centrando cuidadosamente la piedra porosa superior bajo el marco de carga.

2.- Colóquese la placa de carga y la esfera metálica sobre la piedra porosa, ajústese la pieza transversal superior del marco hasta que quede en contacto con la esfera metálica (con un pequeño peso se hace estable el contacto). Debe comprobarse la horizontalidad de la pieza superior del marco de carga.

3.- Colóquese el micrómetro en contacto con el marco de carga.

#### Procedimiento de la prueba:

1.- Retirando el pequeño peso actuante sobre el marco de carga, colóquese en la ménsula el primer incremento de carga, evitando exista un impacto del marco sobre la muestra y usando los pesos apropiados. La magnitud de la presión a la que se sujetará primeramente la muestra depende de varias consideraciones. Esta carga debe escogerse bastante pequeña, tal que dé una presión que haga que la muestra no fluya a través del espacio libre entre el anillo y la piedra porosa. Para el caso del presente trabajo, y como ya se había expuesto, los sucesivos incrementos de carga deben ser pequeños para que la consolidación secundaria haga poco notorios los efectos primarios. Generalmente, para el estudio de la consolidación primaria, los incrementos de presión son de  $\Delta\sigma/\sigma=1$ , sin embargo, para el caso de la consolidación secundaria deben ser menores a la unidad. Los criterios para hacer los incrementos de presión son variados, y dependen de la experimentación que se esté haciendo; por ejemplo el Dr. G. Mesri y el Dr. Y. K. Choi, realizaron pruebas con incrementos de presión que fueron desde



$\Delta\sigma/\sigma = 0.2$  hasta  $\Delta\sigma/\sigma = 1.0$  [Ref.12]; también el Dr. E. Juárez Badillo realizó una prueba con una relación del incremento de presión de  $\Delta\sigma/\sigma = 0.3$  [Ref.9]. Los incrementos de presión realizados en las pruebas para la presente investigación, fueron de  $\Delta\sigma/\sigma = 0.4$  y  $\Delta\sigma/\sigma = 1.0$ , lo que sucedió en cada incremento se explicará más adelante.

2.- Anótense las lecturas del micrómetro en intervalos de tiempo adecuados, tales como: 0, 5 seg., 10 seg., 15 seg., 30 seg., 1 min., 1.5 min., 2 min., 3 min., 4 min., 8 min., 12 min., 15 min., 20 min., 25 min., 30 min., 45 min., 1 h., 1.5 h., 2 h., 4 h., 8 h., etc..

3.- Dibújese la curva de consolidación y al mismo tiempo, usando esta curva, obténgase la curva de consolidación secundaria teórica que más se apeque a la experimental. En la presente investigación, se realizaron en promedio 4 cálculos de la curva teórica para cada incremento de carga de cada una de las 4 muestras que fueron probadas. El siguiente incremento de presión debe darse cuando en la curva de consolidación secundaria experimental se haya definido la parte recta del tercio medio, de otra forma es complicado obtener la curva teórica.

4.- Conforme se obtienen las curvas experimentales y teóricas de consolidación, realizar los cálculos necesarios para llevar estos puntos a la curva de compresibilidad, y de esta forma poder saber aproximadamente de que magnitud puede darse el siguiente incremento. Deben graficarse en la curva de compresibilidad 4 puntos para cada incremento de presión:

- a) Relación de vacíos ( $e$ ) para un tiempo ( $t$ ) igual a 0.
- b)  $e$  para  $t=t_p$  (cuando se cumpla el 100% de la consolidación primaria).
- c)  $e$  para  $t=t_r$  (última lectura hecha del incremento corriente).
- d)  $e$  para  $t=\infty$  (fin del proceso).

5.- Una vez que se hayan aplicado todos los incrementos de presión, se debe de pasar a la etapa de descarga; esta etapa carece de importancia para el estudio de la consolidación secundaria, por lo tanto no se tomaron lecturas.

6.- Al terminar la prueba, quítese el micrómetro y desármese el consolidómetro. Séguese el agua del anillo y colóquense dos placas de vidrio taradas y pésese el conjunto: peso anillo, placas y suelo húmedo.

7.- Introduzca la muestra sola al horno para secarla. Una vez hecho esto obténgase el peso seco.

#### Datos de la prueba:

Constán de:

- a) Contenido de agua.
- b) Densidad de sólidos.

- c) Límites de consistencia (no son necesarios pero es conveniente obtenerlos).
- d) Curva de compresibilidad (para  $t=t_p$  y para  $t=\infty$ )
- e) Parámetros  $\delta$ ,  $t^*$  y  $x^*$ .
- f) Coeficiente de compresibilidad ( $\gamma$ ), que debe ser igual para ambas curvas de compresibilidad.
- g) Carga de preconsolidación.

Los primeros tres datos son obtenidos a través de otras pruebas de laboratorio que se explican brevemente a continuación:

**Contenido de agua:**

El contenido de agua ( $w$ ) se define como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos contenidos en una muestra de suelo. Se expresa regularmente en porcentaje.

El procedimiento consiste en secar la muestra previamente pesad: ( $W_m$ ) dentro de un horno controlado a temperatura constante de  $110 \pm 5$  grados C., durante 18 a 20 hrs.. Al finalizar este proceso se pesa la muestra seca ( $W_s$ ).

El valor del contenido de agua se obtiene aplicando:

$$w(\%) = \frac{W_m - W_s}{W_s} \times 100$$

**Densidad de sólidos:**

La densidad de sólidos ( $S_s$ ) se define como la relación entre el peso específico de la materia de las partículas de suelo y el peso específico del agua destilada a 4 grados C.. En la práctica las mediciones se efectúan a la temperatura ambiente y se hace la corrección necesaria.

El procedimiento que se sigue consiste en hacer con la muestra de suelo y agua destilada una pasta, colocarla con agua suficiente para tener un volumen de 150 cm<sup>3</sup> en el vaso del agitador mecánico y agitarla durante 15 min.. Vaciar la mezcla en el matraz previamente calibrado y sujetarla a vacío durante 30 min.. Llenar el matraz hasta la marca de calibración tomar la temperatura y pesar el matraz con su contenido ( $W_{bvs}$ ). Tomar la temperatura, vaciar el contenido en un recipiente y sujetarlo a secado a una temperatura de  $110 \pm 5$  grados C.. Pesar el suelo seco ( $W_s$ ). El valor de la densidad de sólidos será:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{bv} + W_s - W_{bvs}}$$

donde:  $W_s$  peso de sólidos.

$W_{bvs}$  peso del matraz + agua + suelo.

$W_{bv}$  peso del matraz + agua a la temperatura de la prueba.

### Limites de consistencia:

#### Limite liquido:

El limite liquido (LL) se define como el contenido de agua de un suelo, expresado en porcentaje, para el cual se cierra una ranura de dimensiones normalizadas en una muestra remoldeada, colocado en la copa de Casagrande, al someterla a 25 impactos.

La prueba debe realizarse dentro de un cuarto húmedo. Se mezcla sobre un vidrio plano la muestra hasta homogenizarla, se colocan de 50 a 75 gr. en la copa y se enrasa la superficie. Con el ranurador se labra la ranura, que debe tener una longitud de 4cm aproximadamente. Se actua la manija del aparato a razón de dos golpes por segundo hasta que la ranura se cierre en una longitud de 1.3 cm.. Mezcle nuevamente el suelo y repitase el procedimiento hasta que se obtengan dos determinaciones con diferencia máxima de un golpe. Obténgase el contenido de agua de 10 gr. de material que se tomen de la proximidad de la ranura.

Repitase el procedimiento agregando agua o secando el material hasta obtener cuatro determinaciones, cuyo número de golpes esté comprendido entre 10 y 35.

Con los contenidos de agua obtenidos, dibújese la gráfica No. de golpes-contenido de agua en papel semilogarítmico y encuéntrase el contenido de agua correspondiente a 25 golpes. La gráfica resultante será aproximadamente una línea recta llamada curva de fluidez cuya ecuación es:

$$w = -F_v \log N + C$$

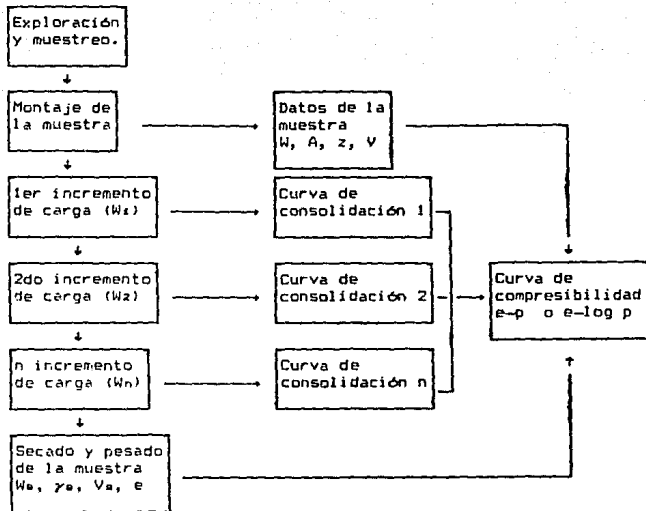
donde: w      contenido de agua  
F<sub>v</sub>      índice de fluidez que es igual a la variación de  
          w en un ciclo de la escala logarítmica.  
N      número de golpes.  
C      Constante igual a la ordenada correspondiente a  
          1 golpe.

#### Limite plástico:

El limite plástico (L.P) se define como el contenido de agua con el que se desmorona y agrieta, un rollo de 0.32 cm (1/8") de diámetro, formado con un suelo al rodarlo con la palma de la mano sobre una superficie plana.

El procedimiento consiste en rodar 10 gr. de la muestra sobre el vidrio despulido hasta que forme un rollo de 10 cm de longitud por 0.32cm de diámetro, utilizando la base del dedo pulgar. Se repite la operación hasta que el rollo se desmorone y agriete cuando alcance un diámetro de 0.32 cm. Obténgase el contenido de agua de la muestra ensayada. Repetir la operación con tres fracciones de la muestra para comprobación.

Finalmente, a continuación, se muestra la secuencia de la prueba completa de consolidación:



Datos de la muestra  
 $W$  = peso  
 $A$  = área transversal  
 $z$  = espesor  
 $V$  = volumen

Valores deducidos y cálculos  
 $W_s$  = peso de sólidos  
 $\gamma_s$  = peso volumétrico de s.  
 $V_s$  = volumen de s. =  $W_s/\gamma_s$   
 $p$  = presión =  $W_n/A$   
 $e$  = relación de vacíos =  $V/V_s - 1$

#### Pruebas de consolidación hechas:

Para el presente trabajo fueron hechas 5 pruebas de consolidación (para el estudio del efecto secundario), en cuatro consolidómetros diferentes y con los siguientes anillos:

Siguiendo la misma numeración del laboratorio de geotecnia, de la Facultad de Ingeniería (UNAM), para sus consolidómetros:

Consolidómetro 7: Anillo 2 cm.

Consolidómetro 8: Anillos 3 cm. y 1.5 cm.

Consolidómetro 1: Anillo 2.5 cm.

Consolidómetro 2: Anillo 2 cm.

A continuación serán presentados los programas de cargas, los datos de cada prueba y las comparaciones entre las curvas experimentales y teóricas obtenidas de cada uno de los anillos.

La obtención de las ecuaciones de las curvas teóricas de consolidación secundaria, según el procedimiento anteriormente expuesto, se muestra en los apéndices 2 y 3. En el apéndice 2 se presenta la obtención manual de una ecuación, y el apéndice 3 muestra un programa realizado en BASIC para la obtención de la misma; con este programa fueron obtenidas casi la totalidad de las curvas teóricas, siendo revisadas sólo algunas (al azar) manualmente.

Se observará que dentro de los datos que a continuación se mostrarán, aparecerán los puntos del 100% de consolidación primaria, tanto de Casagrande como de Taylor; en el apéndice 1 se explica como fueron obtenidos.

### Consolidómetro 8 con anillo de 3 cm.

El anillo de 3 cm solamente fue sometido a tres incrementos de carga, debido a que, como el mismo no pertenecía al laboratorio de la Facultad de Ingeniería, lo solicitaron poco tiempo después de haberlo prestado.

A pesar de esto se presentarán las escasas gráficas obtenidas de cada uno de los incrementos, aunque ninguna sirvió para el estudio del efecto secundario de la consolidación.

#### Datos de la muestra:

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 19/08/89  
Profundidad: 0.75 m.

#### Datos del anillo:

Diámetro:  $d = 8.035$  cm.  
Área:  $A = 50.71$  cm<sup>2</sup>.  
Espesor:  $z = 2.995$  cm.  
Volumen:  $V = 151.87$  cm<sup>3</sup>.

#### Peso volumétrico del suelo:

Peso de vidrios, anillo y muestra: 758.95 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 575.3 gr.  
Peso de la muestra: 183.65 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup>

#### Contenido de agua:

Peso de cápsula: 60.47 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 75.78 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 65.57 gr.  
 $\therefore w = 200.32$  %

#### Densidad de sólidos:

Peso del matraz con agua y suelo: 690.28 gr.  
Temperatura: 31.4 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 665.86 gr.  
Peso de refractario: 1030.85 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 1071.53 gr.  
 $W_s = 40.68$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.5$

#### Esfuerzo efectivo in situ ( $N:F=1.5$ m. y suelo 100% saturado):

$\gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup> =  $1.209$  T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.209 \times 0.75 = 0.90675$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.75$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 0.90675 + 0.75 = 1.657$  T/m<sup>2</sup>

#### Relaciones de vacíos:

Inicial:  $e_0 = wS_s = 5.008$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 183.612$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 61.138$  gr.  
 $H_s = W_s / (S_s \gamma_s A)$   
 $\therefore e = (H_m \times S_s \gamma_s A / W_s) - 1 = 2.0736 H_m - 1$   
 $H_m$  = altura de la muestra.

$H_m$  = altura de la muestra.

**Fechas de cada incremento de carga:**

Primero: 18/09/89

Segundo: 20/09/89

Tercero: 22/09/89

**Incrementos de Carga (todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:  $\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$   $\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$

Segundo:  $\Delta\sigma/\sigma = 1$   $\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$   $\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$

Tercero:  $\Delta\sigma/\sigma = 0.5$   $\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$   $\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$

**Desmontado:**

Al final del tercer incremento.

Fecha: 02/10/89

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:  $H_i = 29.95 \text{ mm}$ .

Segundo incremento:  $H_i = 29.659 \text{ mm}$ .

Tercer incremento:  $H_i = 29.294 \text{ mm}$ .

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = (min, mm.)

Primer incremento: C(t, H) = (45, 29.735)

T(t, H) = (17.9, 29.752)

Segundo incremento: C(t, H) = (13.4, 29.489)

T(t, H) = (16, 29.482)

Tercer incremento: C(t, H) = (5.6, 29.175)

T(t, H) = (33, 29.052)

**Notas:**

Para ninguno de los tres incrementos fue sacada la ecuación de la consolidación secundaria, ya que para los dos primeros dos incrementos, predominó el efecto primario y para el tercer incremento, ya carecía de importancia, debido a que se tenía que desmontar lo antes posible.

Primer Incremento de carga (p=0.1kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 3 cm.

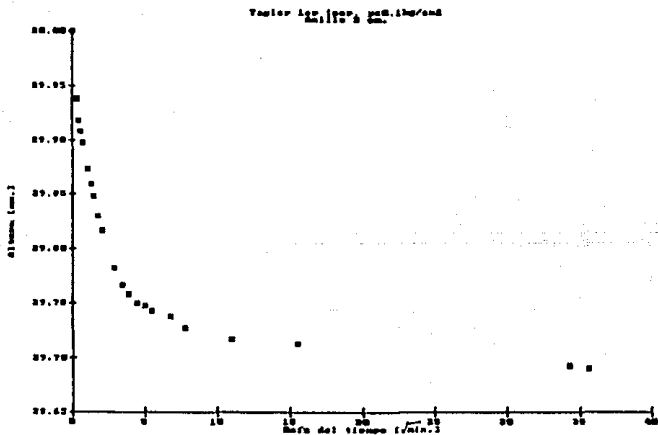
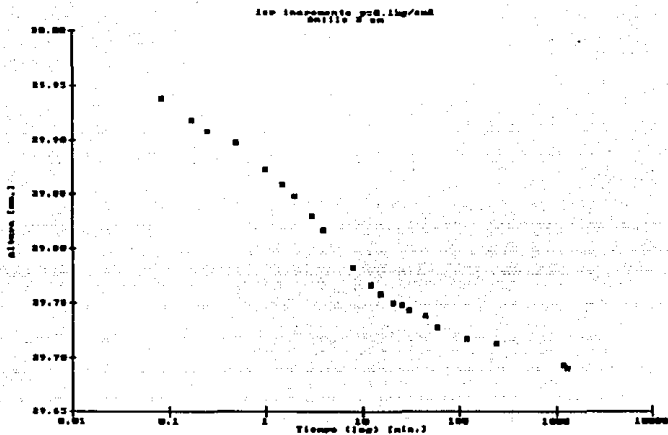
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	0.058	0	30
0.083	0.12	0.062	29.938
0.17	0.14	0.082	29.918
0.25	0.15	0.092	29.908
0.5	0.16	0.102	29.898
1	0.185	0.127	29.873
1.5	0.199	0.141	29.859
2	0.21	0.152	29.848
3	0.228	0.17	29.83
4	0.241	0.183	29.817
8	0.275	0.217	29.783
12	0.291	0.233	29.767
15	0.3	0.242	29.758
20	0.308	0.25	29.75
25	0.31	0.252	29.748
30	0.315	0.257	29.743
45	0.32	0.262	29.738
60	0.33	0.272	29.728
120	0.3405	0.2825	29.7175
240	0.345	0.287	29.713
1171	0.365	0.307	29.693
1269	0.368	0.31	29.69

NOTA: Las unidades de la presente tabla y subsecuentes son:

Tiempo (min.)

Deformación y alturas (mm.)

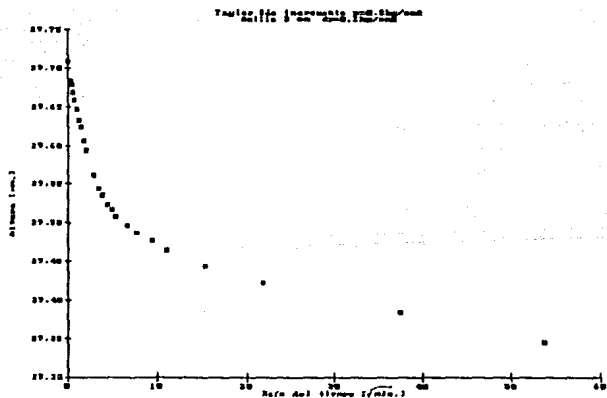
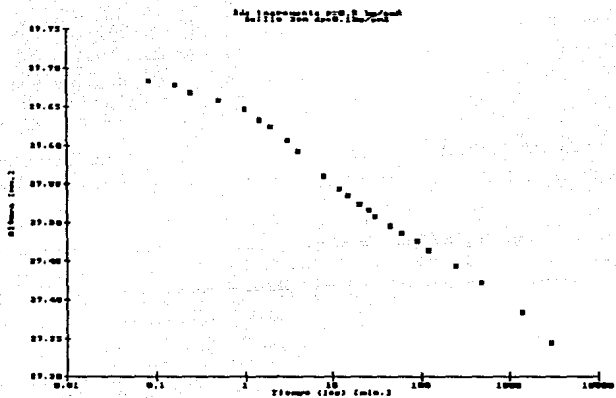




Segundo incremento de carga ( $p=0.2\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 3 cm.

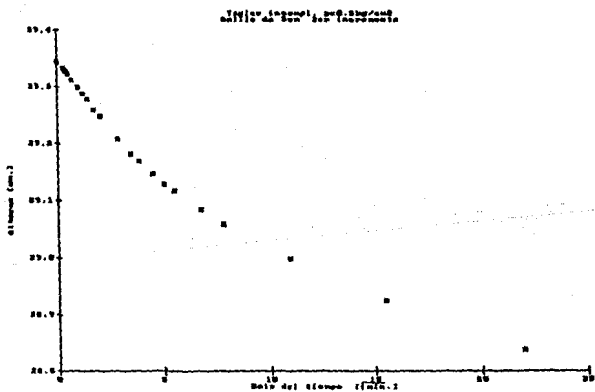
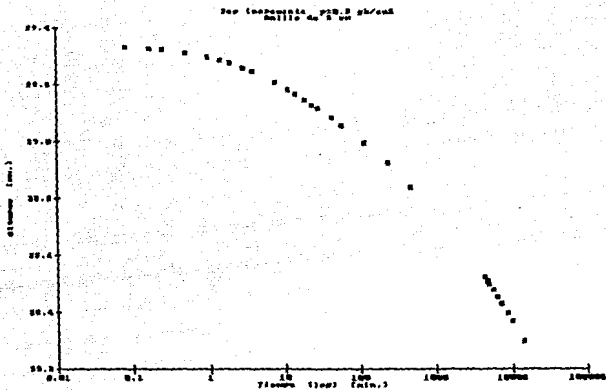
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	0.349	0	29.709
0.083	0.374	0.025	29.684
0.17	0.38	0.031	29.678
0.25	0.389	0.04	29.669
0.5	0.399	0.05	29.659
1	0.411	0.062	29.647
1.5	0.425	0.076	29.633
2	0.433	0.084	29.625
3	0.451	0.102	29.607
4	0.465	0.116	29.593
8	0.497	0.148	29.561
12	0.514	0.165	29.544
15	0.522	0.173	29.536
20	0.534	0.185	29.524
25	0.541	0.192	29.517
30	0.5495	0.2005	29.5085
45	0.561	0.212	29.497
60	0.571	0.222	29.487
90	0.581	0.232	29.477
120	0.594	0.245	29.464
240	0.614	0.265	29.444
480	0.636	0.287	29.422
1398	0.674	0.325	29.384
2884	0.714	0.365	29.344



Tercer incremento de carga ( $p=0.3\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 3 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	0.714	0	29.344
0.083	0.725	0.011	29.333
0.17	0.73	0.016	29.328
0.25	0.735	0.021	29.323
0.5	0.746	0.032	29.312
1	0.76	0.046	29.298
1.5	0.7705	0.0565	29.2875
2	0.78	0.066	29.278
3	0.799	0.085	29.259
4	0.81	0.096	29.248
8	0.85	0.136	29.208
12	0.876	0.162	29.182
15	0.89	0.176	29.168
20	0.911	0.197	29.147
25	0.929	0.215	29.129
30	0.9405	0.2265	29.1175
45	0.974	0.26	29.084
60	1.0005	0.2865	29.0575
120	1.061	0.347	28.997
240	1.133	0.419	28.925
480	1.22	0.506	28.838
4395	1.534	0.82	28.524
4673	1.549	0.835	28.509
4989	1.56	0.846	28.498
5729	1.581	0.867	28.477
6370	1.604	0.89	28.454
7193	1.628	0.914	28.43
8695	1.66	0.946	28.398
10116	1.69	0.976	28.368
14442	1.759	1.045	28.299



### Consolidómetro 7 con anillo de 2 cm.

Esta prueba se ensayó hasta 11 incrementos de carga, durante 6 meses; a continuación se enlistan sus características:

#### Datos de la muestra:

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 19/08/89  
Profundidad: 0.75 m.

#### Datos del anillo:

Diámetro:  $d = 7.979$  cm.  
Área:  $A = 50$  cm<sup>2</sup>  
Espesor:  $z = 2.0$  cm.  
Volumen:  $V = 100.0$  cm<sup>3</sup>

#### Peso volumétrico del suelo:

Peso de vidrios, anillo y muestra: 614.04 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 493.14 gr.  
Peso de la muestra: 120.9 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup>

#### Contenido de agua:

Peso de cápsula: 60.47 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 75.78 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 65.57 gr.  
 $\therefore w = 200.32$  %

#### Densidad de sólidos:

Peso del matraz con agua y suelo: 690.28 gr.  
Temperatura: 31.4 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 665.86 gr.  
Peso de refractario: 1030.85 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 1071.53 gr.  
 $W_s = 40.68$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.5$

#### Esfuerzo efectivo in situ (NAF=1.5m. y suelo 100% saturado):

$\gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup> =  $1.209$  T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.209 \times 0.75 = 0.90675$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.75$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 0.90675 + 0.75 = 1.657$  T/m<sup>2</sup>

#### Relaciones de vacíos:

Inicial:  $e_0 = wS_s = 5.008$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 120.9295$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 40.267$  gr.  
 $H_s = W_s / (S_s \gamma_0 A)$   
 $\therefore e = (H_m S_s \gamma_0 A / W_s) - 1 = 3.1043 H_m - 1$   
 $H_m =$  altura de la muestra.

#### Fechas de cada incremento de carga:

Primero: 18/09/89  
Segundo: 20/09/89  
Tercero: 22/09/89

Cuarto: 02/10/89  
 Quinto: 16/10/89  
 Sexto: 09/11/89  
 Séptimo: 28/11/89  
 Octavo: 03/01/90  
 Noveno: 15/01/90  
 Décimo: 23/01/90  
 Onceavo: 07/02/90

**Incrementos de Carga (Todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup>
Segundo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.2$ kg/cm <sup>2</sup>
Tercero:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.3$ kg/cm <sup>2</sup>
Cuarto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.3$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.4$ kg/cm <sup>2</sup>
Quinto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.25$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.5$ kg/cm <sup>2</sup>
Sexto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.2$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.7$ kg/cm <sup>2</sup>
Séptimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.3$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 1.0$ kg/cm <sup>2</sup>
Octavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1.2$	$\Delta\sigma = 1.2$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 2.2$ kg/cm <sup>2</sup>
Noveno:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.8$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 3.0$ kg/cm <sup>2</sup>
Décimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 1.25$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 4.25$ kg/cm <sup>2</sup>
Onceavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 1.8$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 6.05$ kg/cm <sup>2</sup>

**Desmontado:**

Al final del onceavo incremento.  
 Fecha: 02/03/90

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:  $H_i = 20$  mm.  
 Segundo incremento:  $H_i = 19,728$  mm.  
 Tercer incremento:  $H_i = 19,410$  mm.  
 Cuarto incremento:  $H_i = 18,648$  mm.  
 Quinto incremento:  $H_i = 17,618$  mm.  
 Sexto incremento:  $H_i = 16,695$  mm.  
 Séptimo incremento:  $H_i = 15,450$  mm.  
 Octavo incremento:  $H_i = 13,873$  mm.  
 Noveno incremento:  $H_i = 11,539$  mm.  
 Décimo incremento:  $H_i = 10,839$  mm.  
 Onceavo incremento:  $H_i = 9,611$  mm.

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = [min, mm.]

Primer incremento:	C(t, H) = (13.7, 19.773)
	T(t, H) = (6.7, 19.789)
Segundo incremento:	C(t, H) = (5.3, 19.584)
	T(t, H) = (16, 19.573)
Tercer incremento:	C(t, H) = (10, 19.274)
	T(t, H) = (12, 19.266)
Cuarto incremento:	C(t, H) = (7.2, 18.562)
	T(t, H) = (13.3, 18.544)
Quinto incremento:	C(t, H) = (6.6, 17.558)
	T(t, H) = (9, 17.556)
Sexto incremento:	C(t, H) = (15, 16.568)
	T(t, H) = (15.9, 16.565)
Séptimo incremento:	C(t, H) = (6.4, 15.36)
	T(t, H) = (16, 15.3152)
Octavo incremento:	C(t, H) = (1000, 11.938)

Cuarto: 02/10/89  
 Quinto: 16/10/89  
 Sexto: 09/11/89  
 Séptimo: 28/11/89  
 Octavo: 03/01/90  
 Noveno: 15/01/90  
 Décimo: 23/01/90  
 Onceavo: 07/02/90

**Incrementos de Carga (todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Segundo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Tercero:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Cuarto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.3$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Quinto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.25$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Sexto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$
Séptimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$
Octavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1.2$	$\Delta\sigma = 1.2 \text{ kg/cm}^2$
Noveno:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.8 \text{ kg/cm}^2$
Décimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 1.25 \text{ kg/cm}^2$
Onceavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 1.8 \text{ kg/cm}^2$

**Desmontado:**

Al final del onceavo incremento.  
 Fecha: 02/03/90

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:  $H_i = 20 \text{ mm.}$   
 Segundo incremento:  $H_i = 19.728 \text{ mm.}$   
 Tercer incremento:  $H_i = 19.410 \text{ mm.}$   
 Cuarto incremento:  $H_i = 18.648 \text{ mm.}$   
 Quinto incremento:  $H_i = 17.618 \text{ mm.}$   
 Sexto incremento:  $H_i = 16.695 \text{ mm.}$   
 Séptimo incremento:  $H_i = 15.450 \text{ mm.}$   
 Octavo incremento:  $H_i = 13.873 \text{ mm.}$   
 Noveno incremento:  $H_i = 11.539 \text{ mm.}$   
 Décimo incremento:  $H_i = 10.839 \text{ mm.}$   
 Onceavo incremento:  $H_i = 9.611 \text{ mm.}$

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = (min, mm.)

Primer incremento:	C(t, H) = (13.7, 19.773)
	T(t, H) = (6.7, 19.789)
Segundo incremento:	C(t, H) = (5.3, 19.584)
	T(t, H) = (16, 19.573)
Tercer incremento:	C(t, H) = (10, 19.274)
	T(t, H) = (12, 19.266)
Cuarto incremento:	C(t, H) = (7.2, 18.562)
	T(t, H) = (13.3, 18.544)
Quinto incremento:	C(t, H) = (6.6, 17.558)
	T(t, H) = (9, 17.556)
Sexto incremento:	C(t, H) = (15, 16.568)
	T(t, H) = (15.9, 16.565)
Séptimo incremento:	C(t, H) = (6.4, 15.76)
	T(t, H) = (16, 15.3152)
Octavo incremento:	C(t, H) = (1000, 11.938)



### Consolidómetro 7 con anillo de 2 cm.

Esta prueba se ensayó hasta 11 incrementos de carga, durante 6 meses; a continuación se enlistan sus características:

#### Datos de la muestra:

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 19/08/89  
Profundidad: 0.75 m.

#### Datos del anillo:

Diámetro:  $d = 7.979$  cm.  
Área:  $A = 50$  cm<sup>2</sup>  
Espesor:  $z = 2.0$  cm.  
Volumen:  $V = 100.0$  cm<sup>3</sup>

#### Peso volumétrico del suelo:

Peso de vidrios, anillo y muestra: 614.04 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 493.14 gr.  
Peso de la muestra: 120.9 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup>

#### Contenido de agua:

Peso de cápsula: 60.47 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 75.78 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 65.57 gr.  
 $\therefore w = 200.32$  %

#### Densidad de sólidos:

Peso del matraz con agua y suelo: 690.28 gr.  
Temperatura: 31.4 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 665.86 gr.  
Peso de refractario: 1030.85 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 1071.53 gr.  
 $W_s = 40.68$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.5$

#### Esfuerzo efectivo in situ (NAF=1.5m. y suelo 100% saturado):

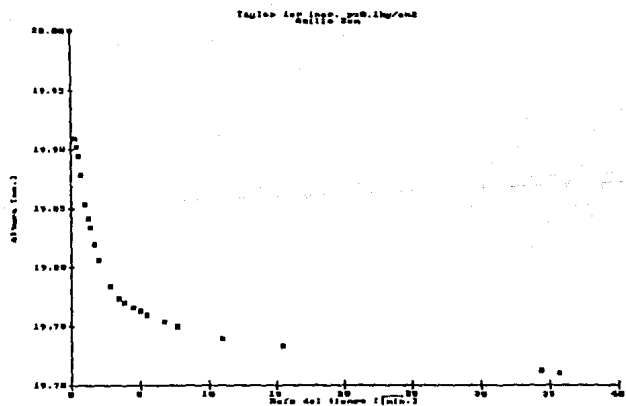
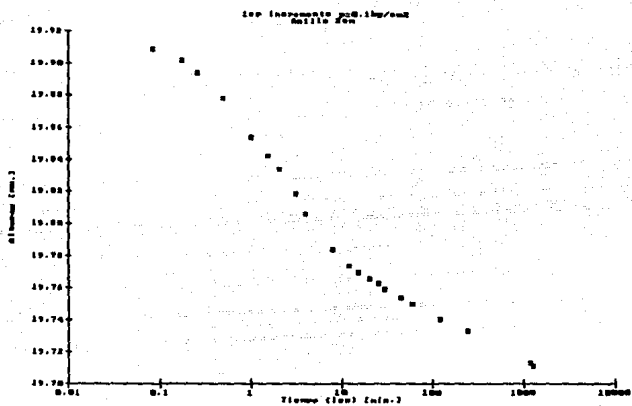
$\gamma_m = 1.209$  gr/cm<sup>3</sup> = 1.209 T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.209 \times 0.75 = 0.90675$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.75$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 0.90675 + 0.75 = 1.657$  T/m<sup>2</sup>

#### Relaciones de vacíos:

Inicial:  $e_0 = wS_s = 5.008$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 120.9295$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 40.267$  gr.  
 $H_s = W_s / (S_s \times \gamma_0 \times A)$   
 $\therefore e = (H_m \times S_s \times \gamma_0 \times A / W_s) - 1 = 3.1043 H_m - 1$   
 $H_m =$  altura de la muestra.

#### Fechas de cada incremento de carga:

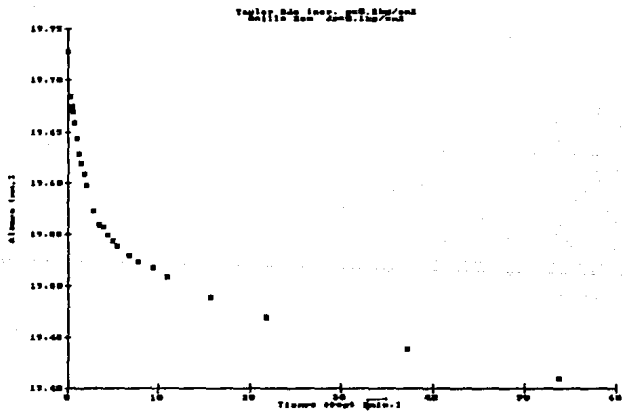
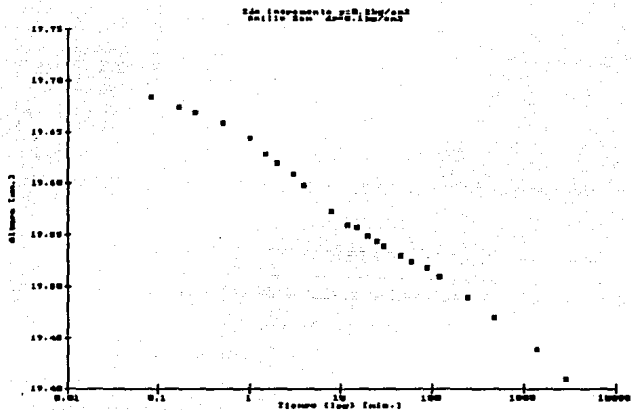
Primero: 18/09/89  
Segundo: 20/09/89  
Tercero: 22/09/89



Segundo incremento de carga ( $p=0.2\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm

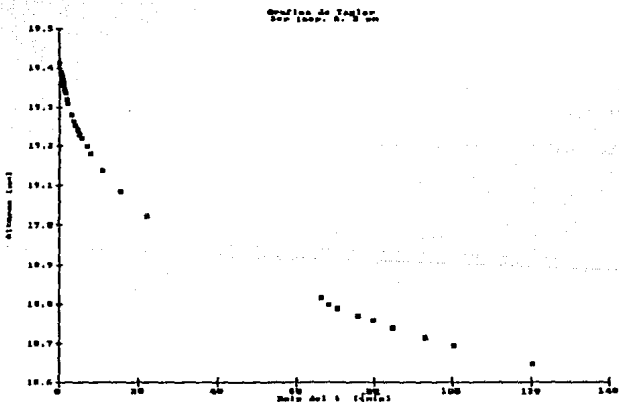
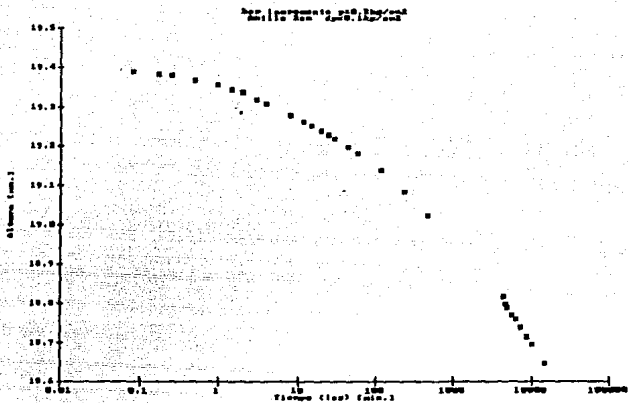
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	19.359	0	19.728
0.083	19.315	0.044	19.684
0.17	19.305	0.054	19.674
0.25	19.3	0.059	19.669
0.5	19.29	0.069	19.659
1	19.275	0.084	19.644
1.5	19.26	0.099	19.629
2	19.251	0.108	19.62
3	19.24	0.119	19.609
4	19.229	0.13	19.598
8	19.204	0.155	19.573
12	19.191	0.168	19.56
15	19.189	0.17	19.558
20	19.1805	0.1785	19.5495
25	19.175	0.184	19.544
30	19.17	0.189	19.539
45	19.161	0.198	19.53
60	19.155	0.204	19.524
90	19.149	0.21	19.518
120	19.14	0.219	19.509
240	19.12	0.239	19.489
480	19.1	0.259	19.469
1394	19.07	0.289	19.439
2885	19.041	0.318	19.41



Tercer incremento de carga ( $p=0.31\text{g/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm.

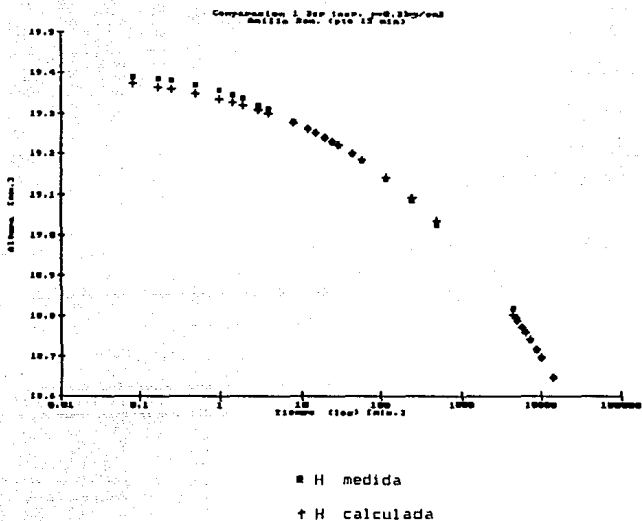
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	19.041	0	19.41
0.083	19.02	0.021	19.389
0.17	19.015	0.026	19.384
0.25	19.011	0.03	19.38
0.5	19	0.041	19.369
1	18.988	0.053	19.357
1.5	18.975	0.066	19.344
2	18.968	0.073	19.337
3	18.95	0.091	19.319
4	18.941	0.1	19.31
8	18.911	0.13	19.28
12	18.895	0.146	19.264
15	18.884	0.157	19.253
20	18.871	0.17	19.24
25	18.86	0.181	19.229
30	18.851	0.19	19.22
45	18.8305	0.2105	19.1995
60	18.812	0.229	19.181
120	18.77	0.271	19.139
240	18.715	0.326	19.084
480	18.655	0.386	19.024
4391	18.448	0.593	18.817
4668	18.429	0.612	18.798
4984	18.419	0.622	18.788
5724	18.401	0.64	18.77
6365	18.39	0.651	18.759
7188	18.37	0.671	18.739
8690	18.345	0.696	18.714
10111	18.325	0.716	18.694
14437	18.279	0.762	18.648



Tercer incremento de carga ( $p=0.3\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
19.3727626	19.3724882	19.3714393	19.3662319	19.4040188
19.3644403	19.3640926	19.3629072	19.3570461	19.4014988
19.3591744	19.3588437	19.3575814	19.3513533	19.3997328
19.3482732	19.3479048	19.3465001	19.3395933	19.3955983
19.3351239	19.3347172	19.3331675	19.3255717	19.3898289
19.3262239	19.3257949	19.3241611	19.3161662	19.3854572
19.3193048	19.3188603	19.317168	19.3088953	19.3818064
19.3086237	19.3081581	19.3063859	19.2977343	19.3757493
19.3003343	19.2998544	19.2980282	19.2891202	19.3707055
19.2776717	19.2771604	19.2752176	19.2657533	19.3554493
19.2624666	19.2619408	19.2599415	19.2502063	19.3440671
19.2534276	19.2528948	19.2508692	19.2410067	19.3368886
19.2410273	19.2404871	19.2386733	19.2284331	19.3265529
19.2306802	19.2302573	19.2281867	19.2181024	19.3176291
19.2220367	19.2214894	19.2194086	19.2092718	19.3097011
19.2011557	19.2006058	19.1985149	19.1883194	19.289835
19.1851216	19.1845729	19.1824865	19.1723027	19.2737058
19.1420307	19.141497	19.1394666	19.1295185	19.2270761
19.0921641	19.0916645	19.0897614	19.0803802	19.1683531
19.0350308	19.0345857	19.0328868	19.024435	19.0969764
18.801997	18.801837	18.8012177	18.797927	18.8065229
18.7945101	18.7943591	18.7937742	18.7906565	18.7979996
18.7864371	18.7862958	18.7857476	18.7828157	18.7888958
18.7691874	18.7690662	18.7685952	18.7660566	18.7697522
18.7557923	18.7556863	18.7552739	18.7530368	18.7551844
18.7402728	18.740184	18.7398378	18.7379449	18.7386407
18.7156965	18.7156338	18.7153882	18.7140275	18.7131941
18.6957841	18.6957414	18.6955731	18.6946501	18.6932655
18.6480009	18.648001	18.648001	18.6480009	18.648



**Resultados:**

$$\delta = 0.288$$

$$t\delta = 76898$$

$$xt = 1.996506$$

**Ecuación:**

$$H = 19.41 - 1.996506 / (1 + (76898/t)^{0.288})$$

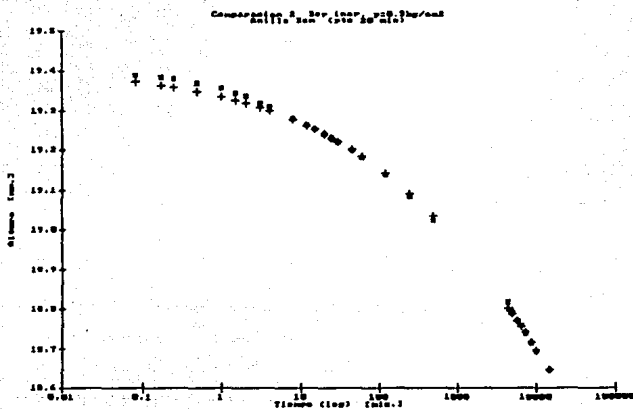
**Nota:** Las unidades de los resultados de la presente hoja y las subsiguientes similares son:

$$t^{\delta} \text{ [min]}$$

$$x_r \text{ [mm]}$$

$$H_s \text{ [mm]}$$





■ H medida

✦ H calculada

**Resultados:**

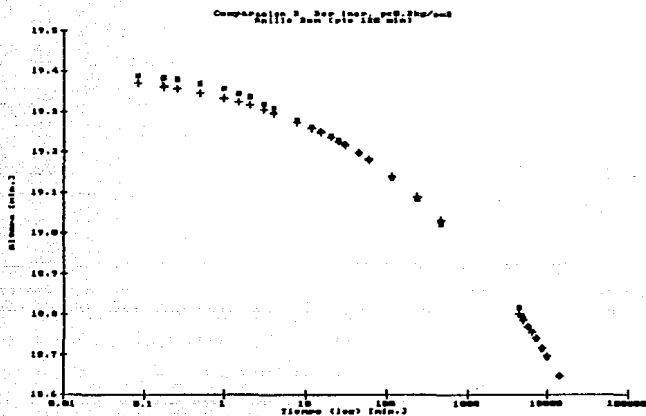
$$\delta = 0.288$$

$$t\delta = 78556$$

$$Xt = 2.002506$$

**Ecuación:**

$$H = 19.41 - 2.002506 / (1 + (78556/t)^{0.288})$$



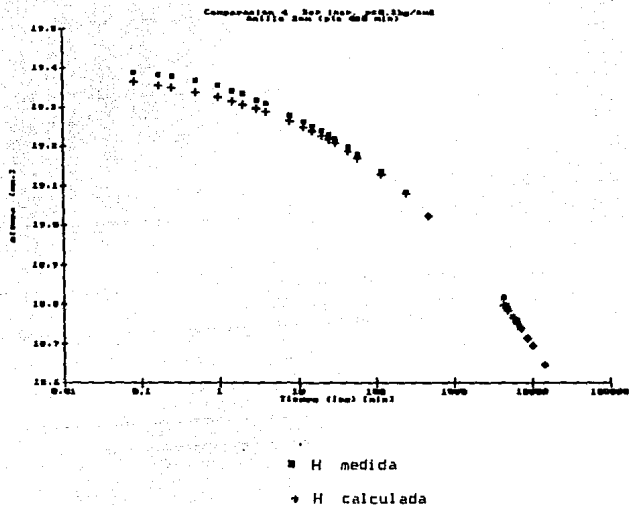
\* H medida  
+ H calculada

Resultados:

$\delta = 0.285$   
 $t\ddagger = 85117$   
 $Xt = 2.025007$

Ecuación:

$$H = 19.41 - 2.025007 / (1 + (85117/t)^{0.285})$$



Resultados:

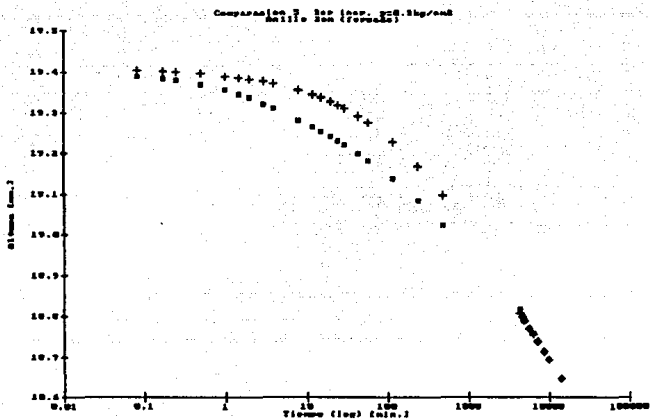
$$\delta = 0.272$$

$$t\delta = 121715$$

$$Xt = 2.122512$$

Ecuación:

$$H = 19.41 - 2.122512 / (1 + (121715/t)^{0.272})$$



\* H medida  
+ H calculada

Resultados:

$\delta = 0.4935$   
 $t\delta = 3395$   
 $Xt = 1.13503$

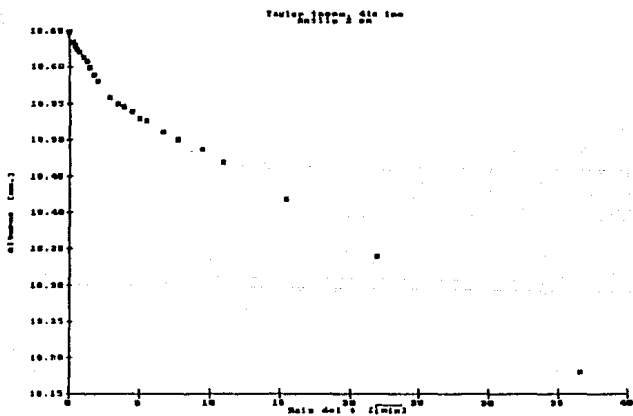
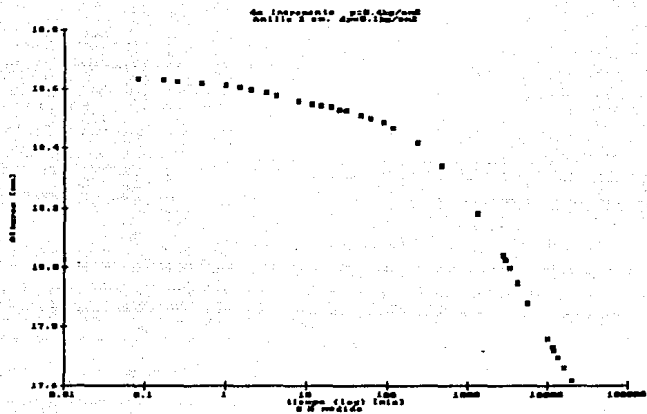
Ecuación:

$$H = 19.41 - 1.13503 / (1 + (3395/t)^{0.4935})$$

Cuarto incremento de carga ( $p=0.4\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm.

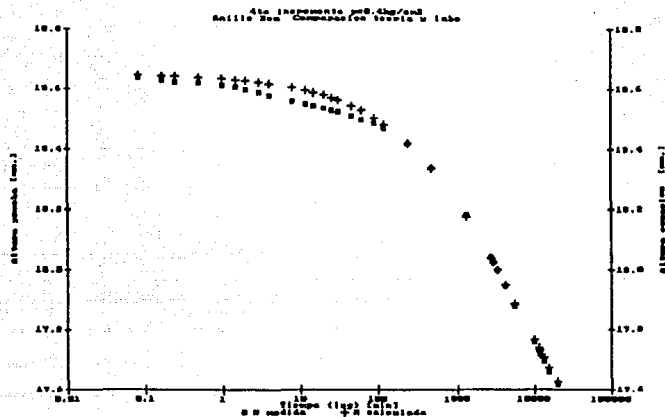
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	18.279	0	18.648
0.083	18.265	0.014	18.634
0.17	18.26	0.019	18.629
0.25	18.255	0.024	18.624
0.5	18.251	0.028	18.62
1	18.244	0.035	18.613
1.5	18.239	0.04	18.608
2	18.23	0.049	18.599
3	18.22	0.059	18.589
4	18.211	0.068	18.58
8	18.19	0.089	18.559
12	18.181	0.098	18.55
15	18.177	0.102	18.546
20	18.17	0.109	18.539
25	18.161	0.118	18.53
30	18.158	0.121	18.527
45	18.142	0.137	18.511
60	18.131	0.148	18.5
90	18.118	0.161	18.487
120	18.1	0.179	18.469
240	18.05	0.229	18.419
483	17.971	0.308	18.34
1338	17.811	0.468	18.18
2769	17.671	0.608	18.04
2964	17.655	0.624	18.024
3354	17.6295	0.6495	17.9985
4278	17.577	0.702	17.946
5739	17.509	0.77	17.878
10069	17.389	0.89	17.758
11490	17.3605	0.9185	17.7295
11911	17.351	0.928	17.72
13401	17.327	0.952	17.696
15749	17.293	0.986	17.662
20046	17.249	1.03	17.618



Cuarto incremento de carga ( $p=0.4\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3
ERR	ERR	ERR
18.644217103	18.64376722	18.642542
18.642586997	18.64187193	18.640235
18.641346287	18.64052375	18.638616
18.638365065	18.63731673	18.634817
18.634054139	18.63274598	18.629497
18.629697766	18.62922182	18.62545
18.62784327	18.62624393	18.62206
18.623015925	18.62124058	18.616417
18.6189717638	18.61701948	18.611698
18.606145516	18.60398272	18.597316
18.596293742	18.59401847	18.586479
18.589950971	18.58763545	18.579594
18.580663337	18.57872599	18.569622
18.572497759	18.57017188	18.560947
18.565136128	18.56284135	18.553191
18.54636889	18.54412631	18.533549
18.530538822	18.52857719	18.517381
18.504538082	18.50298249	18.491017
18.48306324	18.48189068	18.46949
18.419407544	18.41948878	18.406634
18.335743649	18.33736513	18.325323
18.176080804	18.17898692	18.171392
18.037529614	18.03865275	18.036829
18.023766571	18.02452765	18.023339
17.998500032	17.99850018	17.9985
17.947929073	17.94601405	17.948462
17.885887489	17.88085829	17.886395
17.766822803	17.75319051	17.764705
17.739253162	17.72308905	17.735958
17.73178551	17.71489829	17.728131
17.707491918	17.68813936	17.70254
17.674692346	17.65172929	17.667666
17.626916956	17.59808776	17.616155



Resultados:

$$\delta = 0.537$$

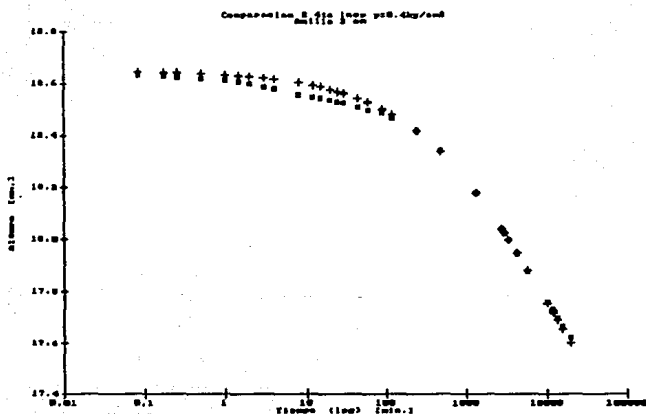
$$t\delta = 6583$$

$$Xt = 1.582504$$

Ecuación:

$$H = 18.648 - 1.582504 / (1 + (6583/t)^{0.537})$$





Resultados:

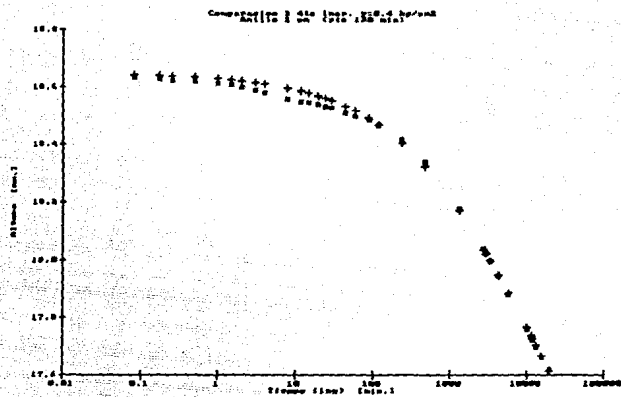
$$\delta = 0.518$$

$$t\ddagger = 9520$$

$$Xt = 1.764012$$

Ecuación:

$$H = 18.648 - 1.764012 / (1 + (9520/t)^{0.518})$$



Resultados:

$$\delta = 0.494$$

$$t_t = 10044$$

$$X_t = 1.765514$$

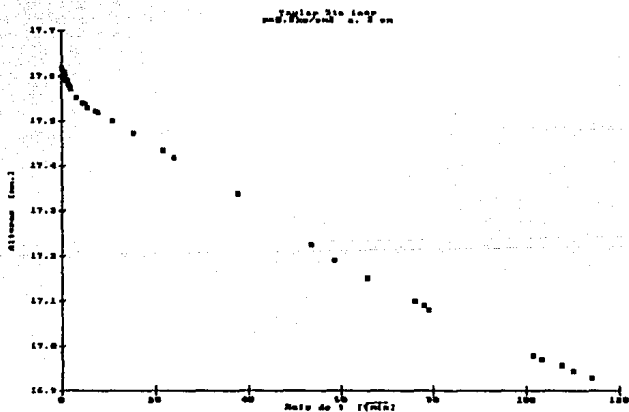
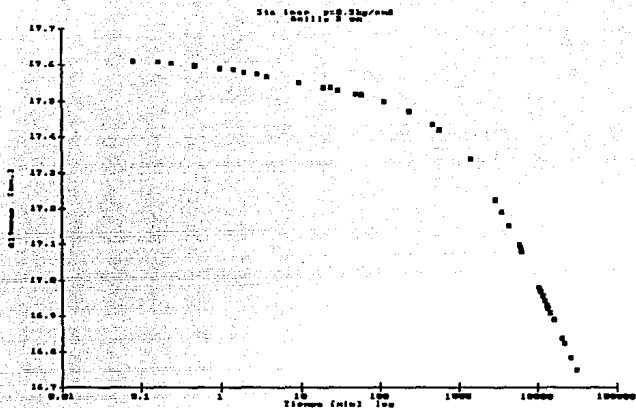
Ecuación:

$$H = 18.648 - 1.765514 / (1 + (10044/t)^{0.494})$$

Quinto incremento de carga ( $p=0.5\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	17.249	0	17.618
0.083	17.241	0.008	17.61
0.17	17.239	0.01	17.608
0.25	17.235	0.014	17.604
0.5	17.23	0.019	17.599
1	17.221	0.028	17.59
1.5	17.219	0.03	17.588
2	17.212	0.037	17.581
3	17.207	0.042	17.576
4	17.2	0.049	17.569
10	17.183	0.066	17.552
20	17.1705	0.0785	17.5395
25	17.169	0.08	17.538
30.5	17.161	0.088	17.53
32	17.152	0.097	17.521
61	17.15	0.099	17.519
120	17.13	0.119	17.499
240	17.103	0.146	17.472
480	17.065	0.184	17.434
590	17.05	0.199	17.419
1419	16.969	0.28	17.338
2865	16.856	0.393	17.225
3434	16.821	0.428	17.19
4313	16.782	0.467	17.151
5793	16.729	0.52	17.098
6077	16.72	0.529	17.089
6238	16.71	0.539	17.079
10314	16.61	0.639	16.979
10665	16.601	0.648	16.97
11540	16.588	0.661	16.957
12099	16.575	0.674	16.944
13008	16.561	0.688	16.93
13444	16.553	0.696	16.922
14425	16.54	0.709	16.909
15864	16.52	0.729	16.889
20196	16.47	0.779	16.839
21651	16.455	0.794	16.824
25956	16.415	0.834	16.784
30269	16.382	0.867	16.751
31727	16.371	0.878	16.74
33202	16.338	0.911	16.707
34581	16.326	0.923	16.695

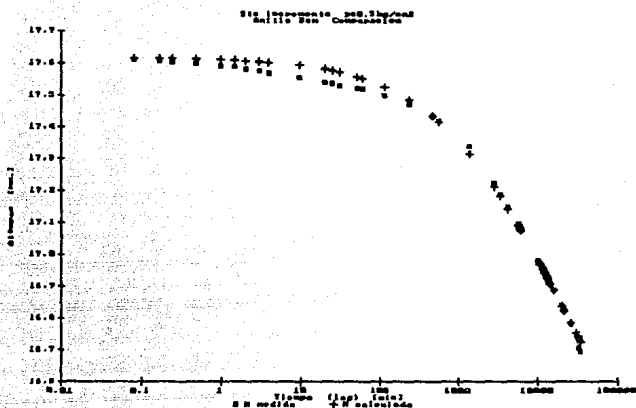


Quinto incremento de carga.

Anillo de 2 cm

Ecuación 1 Ecuación 2

ERR	ERR
17.616061449	17.614896
17.615147342	17.613581
17.614488843	17.612658
17.612901373	17.610488
17.610599599	17.607443
17.608800259	17.605121
17.607265892	17.603174
17.60466298	17.599923
17.60244553	17.597199
17.592658748	17.585528
17.581454184	17.572829
17.576678772	17.567601
17.572357496	17.56246
17.557720314	17.54642
17.552525913	17.540814
17.525790929	17.512081
17.485925808	17.472499
17.454490403	17.419921
17.41566996	17.401336
17.316889267	17.305056
17.214139769	17.206108
17.184241033	17.177359
17.14476159	17.139358
17.090798894	17.087263
17.081764945	17.078517
17.076798507	17.073706
16.977610285	16.976975
16.970800568	16.97028
16.95467573	16.954397
16.944953186	16.944798
16.930000425	16.93
16.92317257	16.923229
16.908544406	16.90869
16.88871967	16.888915
16.8721636	16.873081
16.823581782	16.823361
16.785857533	16.784597
16.753701151	16.751672
16.717973288	16.74159
16.734613723	16.731854
16.726255022	16.723139



**Resultados:**

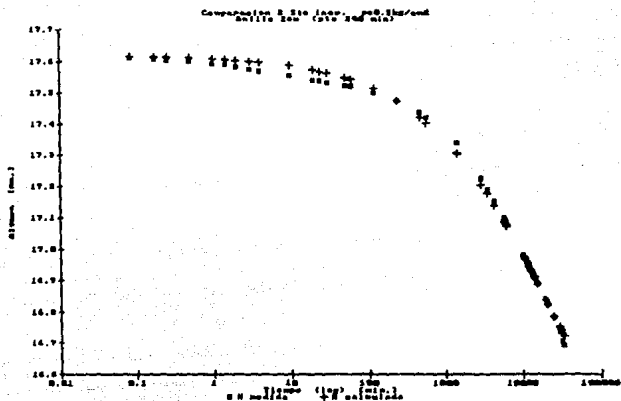
$$\delta = 0.54$$

$$t\delta = 19924$$

$$Xt = 1.553997$$

**Ecuación:**

$$H = 17.618 - 1.553997 / (1 + (19924/t)^{0.54})$$



Resultados:

$$\delta = 0.494$$

$$t\delta = 30578$$

$$Xt = 1.737006$$

Ecuación:

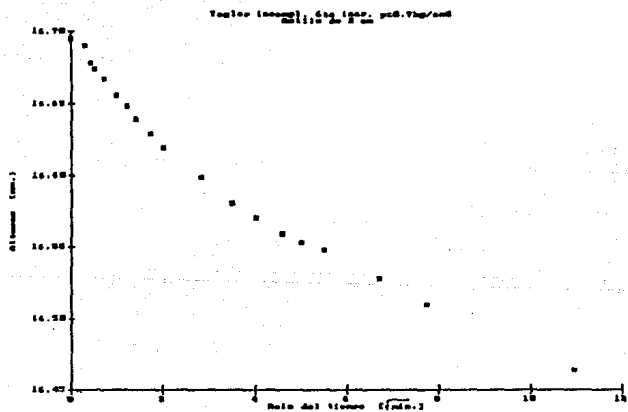
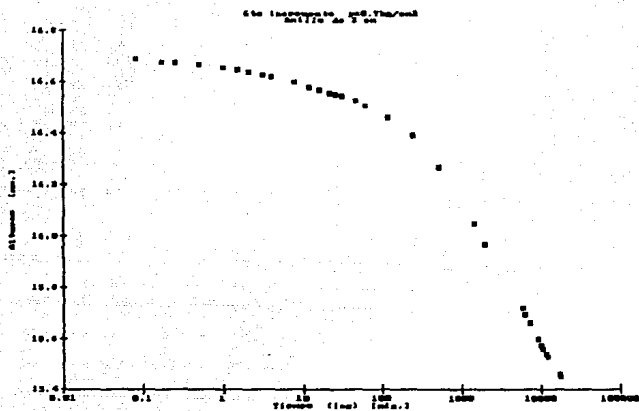
$$H = 17.618 - 1.737006 / (1 + (30578/t)^{0.494})$$

Sexto incremento de carga ( $p=0.71g/cm^2$ )

Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	16.326	0	16.695
0.083	16.321	0.005	16.69
0.17	16.309	0.017	16.678
0.25	16.305	0.021	16.674
0.5	16.298	0.028	16.667
1	16.287	0.039	16.656
1.5	16.279	0.047	16.648
2	16.27	0.056	16.639
3	16.2595	0.0665	16.6285
4	16.25	0.076	16.619
8	16.2295	0.0965	16.5985
12	16.211	0.115	16.58
16	16.201	0.125	16.57
21	16.19	0.136	16.559
25	16.184	0.142	16.553
30	16.179	0.147	16.548
45	16.159	0.167	16.528
60	16.141	0.185	16.51
120	16.095	0.231	16.464
240	16.021	0.305	16.39
521	15.9	0.426	16.269
1451	15.679	0.647	16.048
1949	15.602	0.724	15.971
5758	15.349	0.977	15.718
6258	15.326	1	15.695
7276	15.29	1.036	15.659
9079	15.231	1.095	15.6
10100	15.204	1.122	15.573
10606	15.191	1.135	15.56
11512	15.171	1.155	15.54
12008	15.16	1.166	15.529
17238	15.09	1.236	15.459
17714	15.081	1.245	15.45





Sexto incremento de carga ( $p=0.7\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm. Curvas teóricas.

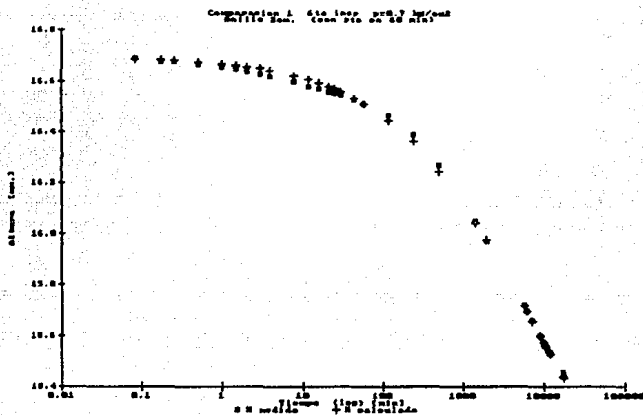
Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
ERR	ERR	ERR	ERR
16.606665766	16.6892532	16.6906356	16.687144
16.68322769	16.686637	16.6885061	16.6838507
16.630827997	16.6847694	16.6859602	16.6815439
16.675231777	16.6803114	16.6832054	16.6761444
16.667455039	16.6739222	16.6777138	16.6686061
16.661577632	16.6690003	16.6733954	16.6628884
16.656675572	16.6648265	16.6697009	16.6581085
16.648549872	16.6578046	16.663416	16.6501668
16.641786448	16.6518745	16.6580502	16.6435413
16.621720494	16.6335437	16.6411953	16.6234255
16.606022597	16.6195327	16.6280935	16.6083372
16.593775862	16.6077835	16.616989	16.5958342
16.579866551	16.5950912	16.60489	16.5824558
16.570332802	16.5860547	16.5962179	16.5730013
16.55957585	16.575787	16.5863118	16.5623221
16.552422255	16.5496584	16.5608631	16.5353863
16.510256582	16.5279631	16.539592	16.513327
16.445510831	16.4635019	16.4753734	16.4485514
16.361922087	16.3786025	16.3895009	16.3647388
16.243061282	16.2559932	16.2640114	16.2452916
16.043403246	16.0485518	16.0506949	16.0444056
15.97768524	15.9805267	15.9810109	15.9783153
15.714965716	15.7130662	15.7108704	15.7147526
15.69795487	15.6921038	15.6900507	15.6937377
15.656845015	15.6542797	15.6526428	15.6556505
15.599866282	15.5992107	15.5985671	15.5997802
15.573000314	15.5730003	15.5730003	15.5730001
15.560708507	15.5610576	15.5613893	15.5607554
15.540154735	15.5411588	15.5420969	15.5402913
15.529609575	15.5309846	15.5322597	15.5297977
15.440453741	15.4459583	15.4507929	15.441236
15.433845836	15.4397299	15.4448797	15.434684

Sexto incremento de carga ( $p=0.7k_g/cm^2$ )

Anillo de 2 cm Curvas teóricas.

Ecuación 5 Ecuación 6 Ecuación 7

ERR	ERR	ERR
16.6873559	16.6874261	16.6875888
16.6841277	16.6842196	16.6844329
16.6318227	16.6219686	16.6222145
16.6765521	16.6766876	16.6770029
16.669122	16.6692937	16.6696936
16.6624769	16.663673	16.6641299
16.6587528	16.6589675	16.6594681
16.6508951	16.651138	16.6517047
16.6443328	16.6445969	16.6452133
16.6243776	16.6246957	16.625439
16.6093853	16.6097357	16.6105549
16.596949	16.5973219	16.5981941
16.583631	16.5840243	16.5849444
16.5742132	16.5746188	16.575568
16.56357	16.5639877	16.5649655
16.55367025	16.55371434	16.55381757
16.5146789	16.5151318	16.5161925
16.449927	16.450388	16.4514677
16.3660199	16.366449	16.3674536
16.2463004	16.2466374	16.2474249
16.0448452	16.0449902	16.0453247
15.9785834	15.9786705	15.9788693
15.7146424	15.7146035	15.7145089
15.6936271	15.6935884	15.6934944
15.6555534	15.6555196	15.6554383
15.5997381	15.5997235	15.5996888
15.5730002	15.5730002	15.5730005
15.5607784	15.5607862	15.5608055
15.5403577	15.5403805	15.5404355
15.529889	15.5299203	15.5299956
15.4416109	15.441739	15.4420449
15.4356853	15.4352224	15.4355497



Resultados:

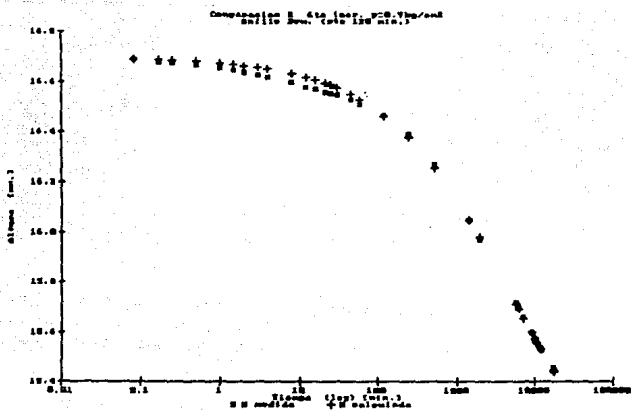
$$\delta = 0.484$$

$$t^* = 7461$$

$$x_t = 2.091005$$

Ecuación:

$$H = 16.695 - 2.091005 / (1 + (7461/t)^{0.484})$$



Resultados:

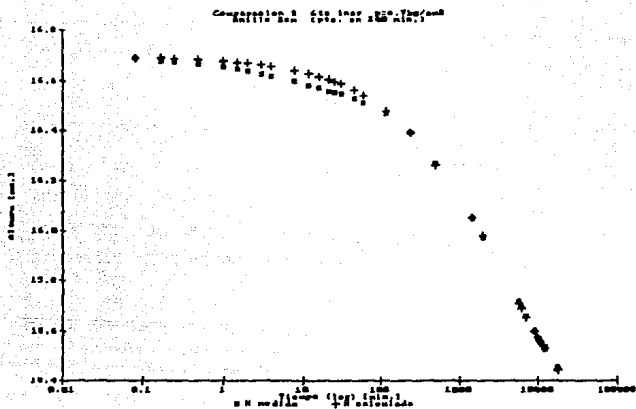
$$\delta = 0.525$$

$$t^* = 5274$$

$$Xt = 1.919639$$

Ecuación:

$$H = 16.695 - 1.919639 / (1 + (5274/t)^{0.525})$$



Resultados:

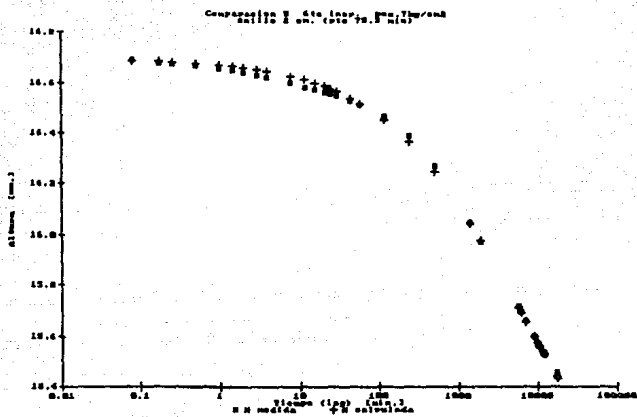
$$\delta = 0.556$$

$$t_f = 4253$$

$$X_t = 1.815698$$

Ecuación:

$$H = 16.695 - 1.815698 / (1 + (4253/t)^{0.556})$$



**Resultados:**

$$\delta = 0.494$$

$$t\delta = 6838$$

$$Xt = 2.047503$$

**Ecuación:**

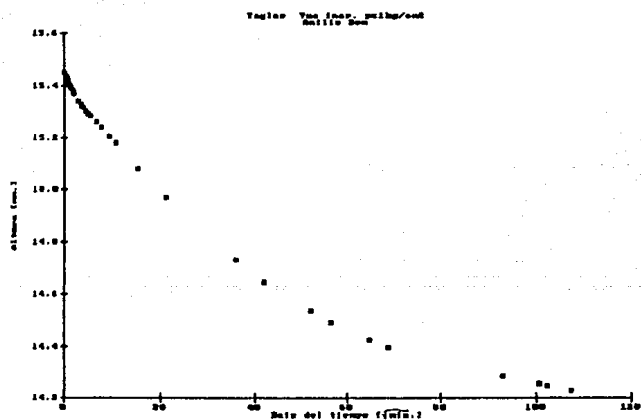
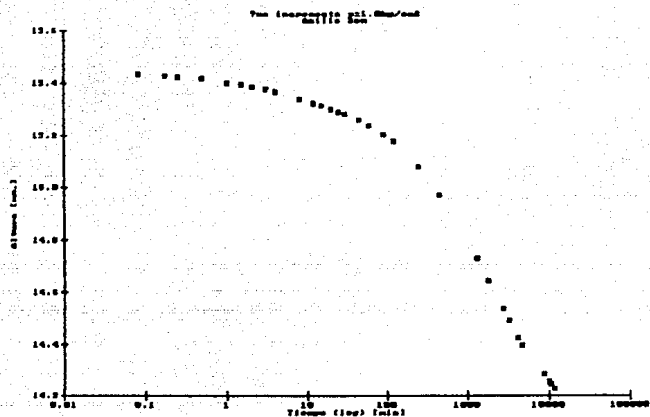
$$H = 16.695 - 2.047503 / (1 + (6838/t)^{0.494})$$

Septimo incremento (p=1.0kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	15	0	15.45
0.083	14.985	0.015	15.435
0.17	14.98	0.02	15.43
0.25	14.975	0.025	15.425
0.5	14.969	0.031	15.419
1	14.951	0.049	15.401
1.5	14.948	0.052	15.398
2	14.939	0.061	15.389
3	14.929	0.071	15.379
4	14.919	0.081	15.369
8	14.891	0.109	15.341
12	14.875	0.125	15.325
15	14.867	0.133	15.317
20	14.852	0.148	15.302
25	14.842	0.158	15.292
30	14.832	0.168	15.282
45	14.809	0.191	15.259
60	14.789	0.211	15.239
90	14.755	0.245	15.205
120	14.729	0.271	15.179
243	14.632	0.368	15.082
453	14.519	0.481	14.969
1294	14.28	0.72	14.73
1763	14.195	0.805	14.645
2714	14.085	0.915	14.535
3192	14.04	0.96	14.49
4198	13.975	1.025	14.425
4716	13.945	1.055	14.395
8625	13.834	1.166	14.284
10135	13.804	1.196	14.254
10433	13.795	1.205	14.245
11519	13.78	1.22	14.23
12985	13.76	1.24	14.21
14425	13.595	1.405	14.045
18577	13.559	1.441	14.009
21608	13.538	1.462	13.988
23068	13.525	1.475	13.975
51821	13.423	1.577	13.873



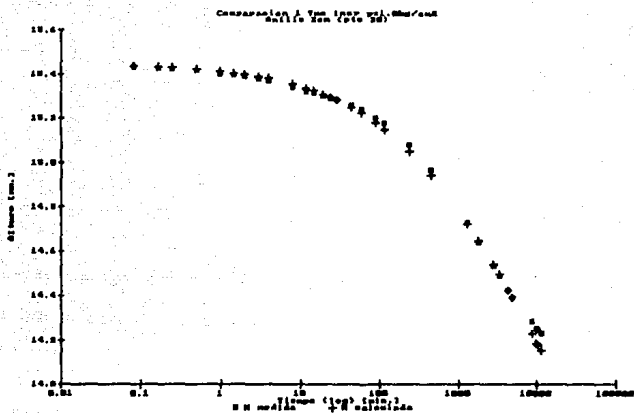


## Séptimo incremento (p=1.0kg/cm2)

Anillo de 2 cm

Ecuación 1 Ecuación 2 Ecuación 3 Ecuación 4 Ecuación 5

ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
15.4386451	15.440326	15.4408846	15.4432885	15.4447161
15.4341391	15.4363083	15.4370355	15.4402262	15.4421365
15.4310211	15.4335003	15.4343354	15.4380391	15.440264
15.4238149	15.4269438	15.4280066	15.4328166	15.4357164
15.4139155	15.4178199	15.4191571	15.4253408	15.4290679
15.4065016	15.4109181	15.4124379	15.4195603	15.4238428
15.4003545	15.405159	15.4068178	15.4146684	15.4193746
15.3902273	15.3956093	15.397476	15.4064391	15.4117785
15.3818492	15.3876588	15.3896801	15.3994905	15.4052982
15.3567293	15.3635998	15.3660074	15.3780218	15.3849743
15.3381413	15.3456237	15.3482559	15.3616258	15.3692105
15.3254606	15.3342656	15.3370167	15.3511355	15.3590367
15.3096993	15.3178948	15.3207904	15.3358593	15.3441174
15.2952567	15.3037278	15.3067257	15.3225062	15.3309881
15.2824437	15.2911171	15.2941904	15.310526	15.3191476
15.2503378	15.2594068	15.262813	15.2800558	15.2888125
15.2243543	15.2335355	15.2367994	15.2548782	15.2635495
15.1825529	15.1917716	15.1950507	15.2137308	15.2219679
15.1489423	15.1580393	15.1612739	15.180115	15.1877903
15.0511827	15.0593726	15.0622699	15.0803088	15.0856458
14.9453414	14.9519819	14.9543018	14.9699795	14.9722882
14.7247603	14.7277222	14.7286915	14.7372431	14.734565
14.6505732	14.6524613	14.6530483	14.6591359	14.6557939
14.5415179	14.5421924	14.5423664	14.5452073	14.5422044
14.4991402	14.499493	14.4995668	14.5013316	14.4989301
14.4263637	14.4263392	14.4263338	14.4265665	14.4258589
14.3950004	14.3950005	14.3950007	14.3947154	14.3950005
14.2311277	14.2320922	14.2325657	14.2312239	14.2393929
14.1874608	14.1890471	14.1897856	14.1886932	14.1977334
14.1796442	14.1813596	14.1821522	14.1811303	14.1927187
14.1530148	14.1552114	14.1562039	14.1554827	14.1690162
14.1209957	14.1238586	14.125124	14.1248913	14.1409218
14.0930998	14.0966235	14.0981564	14.0984655	14.1168113
14.0270099	14.0324119	14.0346931	14.0367344	14.0610777
13.982333	13.9950478	13.9978443	14.0012027	14.0293841
13.9718155	13.9791409	13.9821756	13.9861669	14.0160598
13.7804347	13.7972089	13.8038382	13.8184078	13.8711354



Resultados:

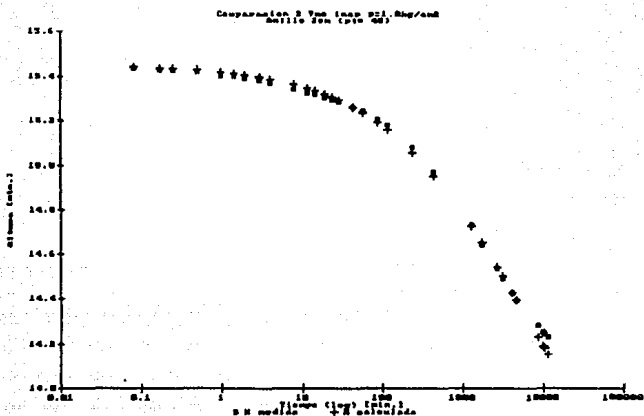
$$\delta = 0.469$$

$$t^* = 6952$$

$$Xt = 2.320535$$

Ecuación:

$$H = 15.45 - 2.320535 / (1 + (6952/t)^{0.469})$$



Resultados:

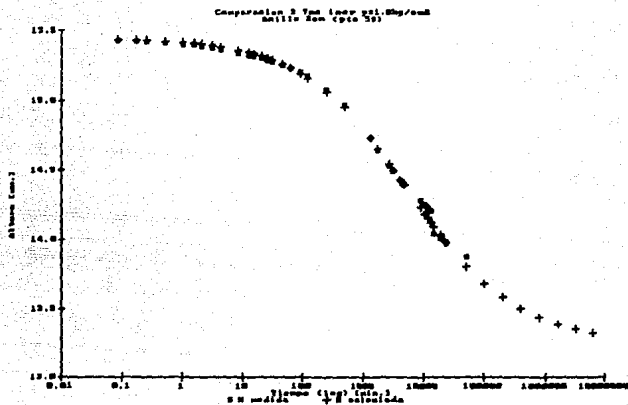
$$\delta = 0.487$$

$$t_f = 5797$$

$$X_t = 2.22153$$

Ecuación:

$$H = 15.45 - 2.22153 / (1 + (5797/t)^{0.487})$$



Resultados:

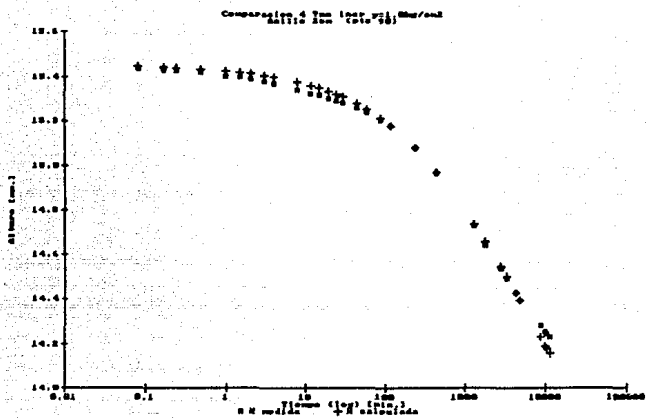
$$\delta = 0.494$$

$$t_f = 5439$$

$$X_t = 2.187028$$

Ecuación:

$$H = 15.45 - 2.187028 / (1 + (5439/t)^{0.494})$$



Resultados:

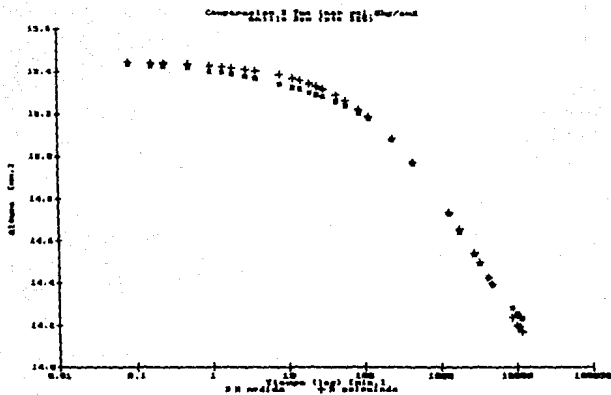
$$\delta = 0.516$$

$$t\delta = 4464$$

$$x_t = 2.080523$$

Ecuación:

$$H = 15.45 - 2.080523 / (1 + (4464/t)^{0.516})$$



Resultados:

$$\delta = 0.556$$

$$t_s = 3301$$

$$Xt = 1.920016$$

Ecuación:

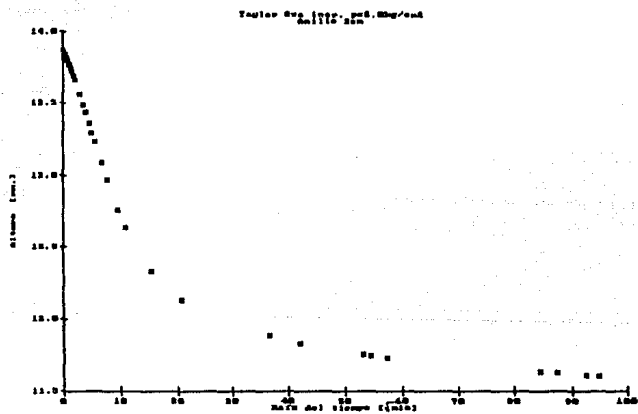
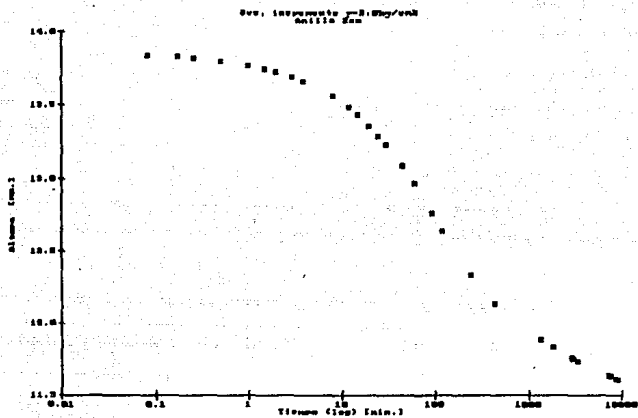
$$H = 15.45 - 1.920016 / (1 + (3301/t)^{0.556})$$

Octavo incremento ( $p=1.01g/cm^2$ )

Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas H <sub>i</sub>
0	13.423	0	13.875
0.083	13.389	0.034	13.839
0.17	13.379	0.044	13.829
0.25	13.37	0.053	13.82
0.5	13.351	0.072	13.801
1	13.321	0.102	13.771
1.5	13.299	0.124	13.749
2	13.279	0.144	13.729
3	13.242	0.181	13.692
4	13.2105	0.2125	13.6605
8.1	13.112	0.311	13.562
12	13.04	0.383	13.49
15	12.9895	0.4335	13.4395
20	12.91	0.513	13.36
25	12.843	0.58	13.293
30	12.783	0.64	13.233
45	12.641	0.782	13.091
60	12.52	0.903	12.97
93	12.309	1.114	12.759
120	12.189	1.234	12.639
240	11.884	1.539	12.334
430	11.685	1.738	12.135
1341	11.435	1.988	11.885
1772	11.381	2.042	11.831
2826	11.306	2.117	11.756
2975	11.297	2.126	11.747
3281	11.28	2.143	11.73
7123	11.185	2.238	11.635
7605	11.179	2.244	11.629
8552	11.162	2.261	11.612
8995	11.156	2.267	11.606
9996	11.145	2.278	11.595
11412	11.13	2.293	11.58
11907	11.111	2.312	11.561
15749	11.089	2.334	11.539



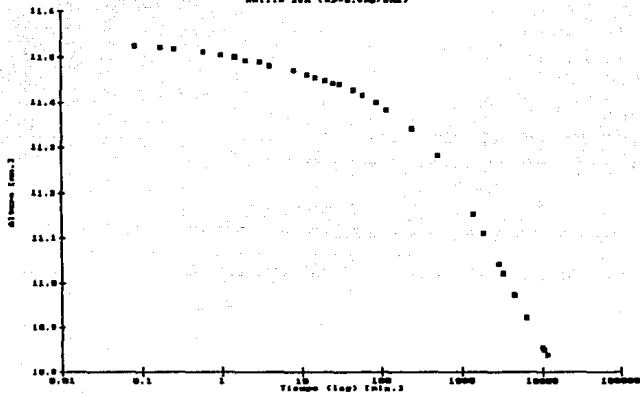


Noveno incremento ( $p=3.0\text{kg/cm}^2$ )

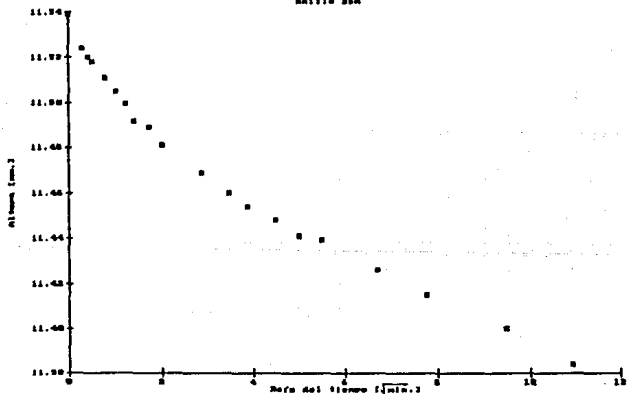
Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_1$
0	11.027	0	11.539
0.085	11.074	0.015	11.524
0.17	11.07	0.019	11.52
0.25	11.068	0.021	11.518
0.585	11.061	0.028	11.511
1	11.055	0.034	11.505
1.5	11.0495	0.0395	11.4995
2	11.042	0.047	11.492
3	11.039	0.05	11.489
4	11.031	0.058	11.481
8.25	11.019	0.07	11.469
12	11.01	0.079	11.46
15	11.004	0.085	11.454
20	10.998	0.091	11.448
25	10.991	0.098	11.441
30	10.989	0.1	11.439
45	10.976	0.113	11.426
60	10.965	0.124	11.415
90	10.95	0.139	11.4
120	10.924	0.155	11.384
240	10.89	0.199	11.34
509	10.832	0.257	11.282
1408	10.791	0.388	11.151
1863	10.658	0.431	11.108
2904	10.589	0.5	11.039
3328	10.569	0.52	11.019
4478	10.5205	0.5685	10.9705
6179	10.47	0.619	10.92
10064	10.405	0.684	10.855
10559	10.4	0.689	10.85
11544	10.389	0.7	10.839

Pa. 100mm/seg. 20.0kg/cm<sup>2</sup>  
 Anillo 500 (2000.0kg/cm<sup>2</sup>)



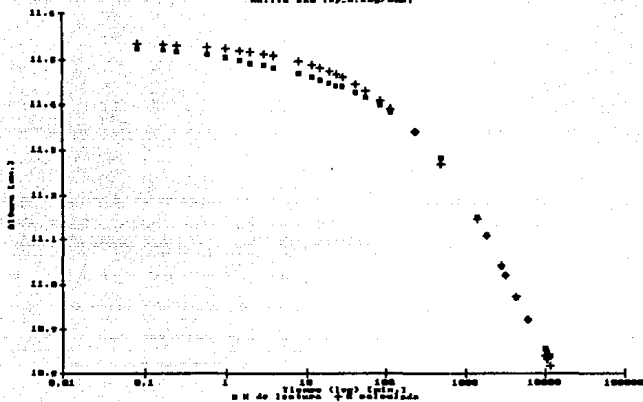
Yagler 50 mm. 20.0kg/cm<sup>2</sup>  
 Anillo 500



Noveno incremento ( $\rho=3,0\text{Kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3
ERR	ERR	ERR
11.534397632	11.536414635	11.53565878
11.532460117	11.535152407	11.534129042
11.531101476	11.534235909	11.53303542
11.527055309	11.531389928	11.529702273
11.523465148	11.528750656	11.526671501
11.520083288	11.526187178	11.523767748
11.517253352	11.523597222	11.521307431
11.512546295	11.520259222	11.517162898
11.50861483	11.51706961	11.513657993
11.496030006	11.50650465	11.502225217
11.487663894	11.499225036	11.494478986
11.481960058	11.494184557	11.489142674
11.473709511	11.486760064	11.481354773
11.466542649	11.480208241	11.474530827
11.460142704	11.474284886	11.468395615
11.443967577	11.4590454	11.452737215
11.430686823	11.44628303	11.439740335
11.409093833	11.425134396	11.418387134
11.391518451	11.407616991	11.400839217
11.340475454	11.355594324	11.349247323
11.269521911	11.281517494	11.276569094
11.145907945	11.151075437	11.149154999
11.106621571	11.109874384	11.108778802
11.040441091	11.041241436	11.041154496
11.019306706	11.019586243	11.019694418
10.972237999	10.971907655	10.972188482
10.920000667	10.920000315	10.920000396
10.839907918	10.842783677	10.841266946
10.832035081	10.835362538	10.833620731
10.817441272	10.82169048	10.819494051



Resultados:

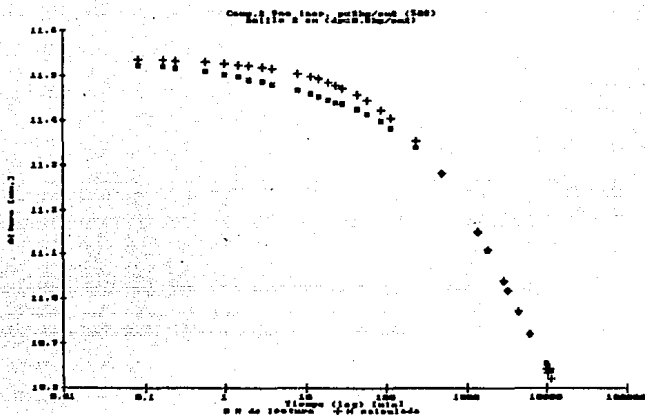
$$\delta = 0.492$$

$$t^* = 8341$$

$$Xt = 1.336496$$

Ecuación:

$$H = 11.539 - 1.336496 / (1 + (8341/t)^{0.492})$$



Resultados:

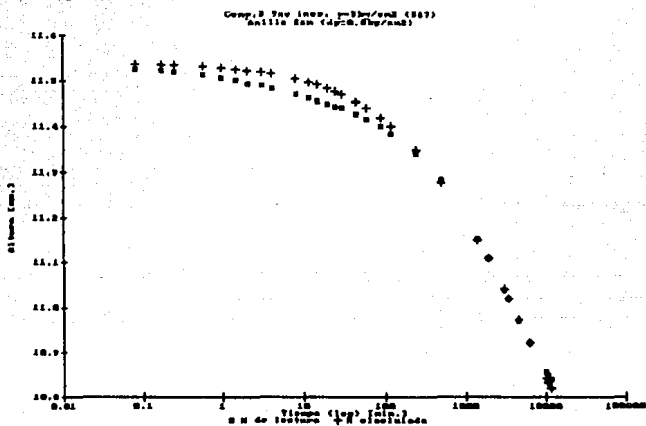
$$\delta = 0.556$$

$$t\ddagger = 4866$$

$$Xt = 1.160999$$

Ecuación:

$$H = 11.539 - 1.160999 / (1 + (4866/t)^{0.556})$$



**Resultados:**

$$\delta = 0.528$$

$$t_0 = 6057$$

$$Xt = 1.231498$$

**Ecuación:**

$$H = 11.539 - 1.231498 / (1 + (6057/t)^{0.528})$$

Décimo incremento ( $p=4.25\text{kg/cm}^2$ )

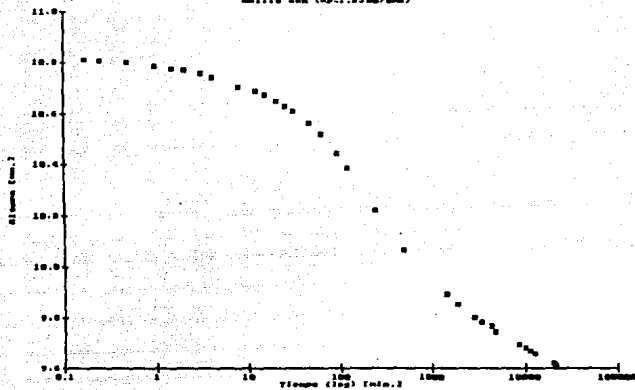
Anillo de 2 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	10.389	0	10.259
0.17	10.36	0.029	10.81
0.25	10.355	0.034	10.805
0.5	10.349	0.04	10.799
1	10.335	0.054	10.785
1.5	10.325	0.064	10.775
2	10.319	0.07	10.769
3	10.304	0.085	10.754
4	10.291	0.098	10.741
8	10.254	0.135	10.704
12	10.2395	0.1495	10.6895
15	10.2205	0.1685	10.6705
20	10.1995	0.1895	10.6495
25	10.18	0.209	10.63
30	10.16	0.229	10.61
45	10.11	0.279	10.56
60	10.068	0.321	10.518
90	9.994	0.395	10.444
120	9.936	0.453	10.386
240	9.77	0.619	10.22
481	9.614	0.775	10.064
1470	9.442	0.947	9.892
1852	9.402	0.987	9.852
2828	9.349	1.04	9.799
3276	9.33	1.059	9.78
4275	9.315	1.074	9.765
4792	9.293	1.096	9.743
8606	9.242	1.147	9.692
10040	9.23	1.159	9.68
11451	9.219	1.17	9.669
12860	9.208	1.181	9.658
20119	9.17	1.219	9.62
21515	9.161	1.228	9.611



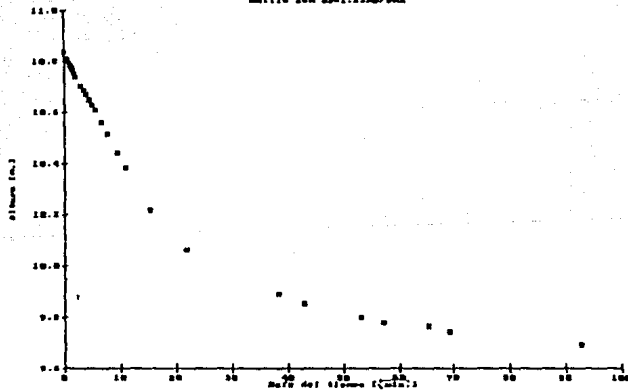
10m (magnum) 40.5.2346/nd

Mitt. Son. 40.1.2346/nd



10m (magnum) 40.5.2346/nd

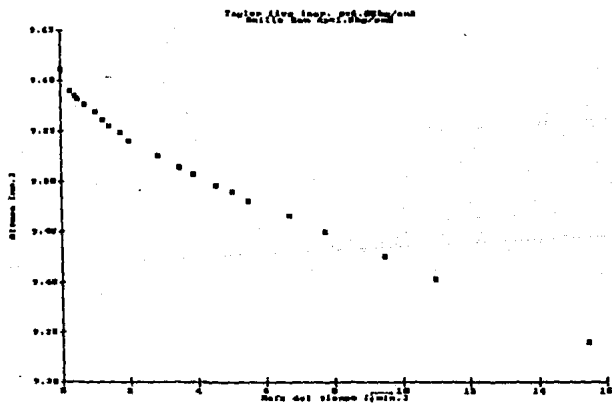
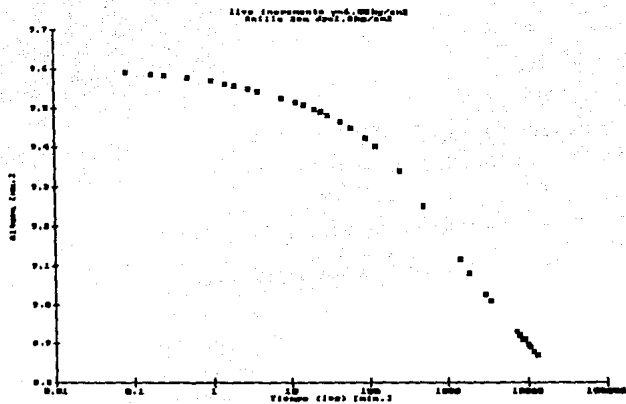
Mitt. Son. 40.1.2346/nd



Onceavo incremento ( $\rho=6.05\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm

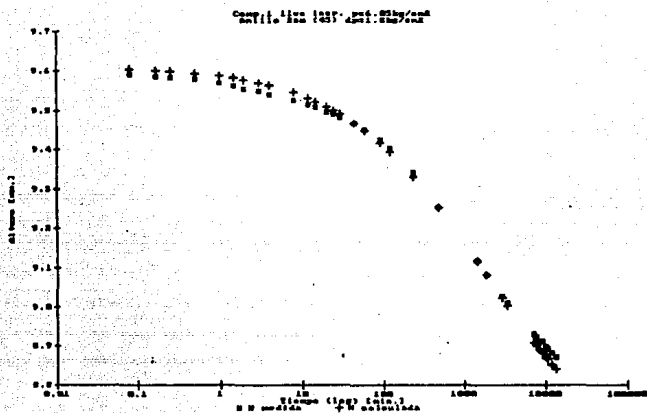
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas H:
0	9.161	0	9.611
0.083	9.14	0.021	9.59
0.17	9.135	0.026	9.585
0.25	9.132	0.029	9.582
0.5	9.127	0.034	9.577
1	9.119	0.042	9.569
1.5	9.111	0.05	9.561
2	9.105	0.056	9.555
3	9.098	0.063	9.548
4	9.09	0.071	9.54
5	9.075	0.086	9.525
12	9.064	0.097	9.514
15	9.058	0.103	9.508
20.5	9.046	0.115	9.496
25	9.04	0.121	9.49
30	9.031	0.13	9.481
45	9.016	0.145	9.466
60	9	0.161	9.45
90	8.975	0.186	9.425
120	8.953	0.208	9.403
240	8.89	0.271	9.34
485	8.801	0.36	9.251
1436	8.664	0.497	9.114
1875	8.63	0.531	9.08
2947	8.575	0.586	9.025
3424	8.558	0.601	9.008
7375	8.479	0.682	8.929
7750	8.471	0.69	8.921
8654	8.4605	0.7005	8.9105
9134	8.455	0.702	8.909
10112	8.448	0.713	8.898
10575	8.441	0.72	8.891
11227	8.43	0.731	8.88
13351	8.42	0.741	8.87



Orbeavo incremento (p=6.05kg/cm2)

Anillo de 2 cm Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
ERR	ERR	ERR	ERR
9.6036491797	9.604340191	9.6056255014	9.6062187775
9.6005456559	9.6014397285	9.603126155	9.6039166617
9.5983710419	9.5993930265	9.6013351058	9.6022529576
9.5932235733	9.5945697279	9.5970463879	9.5982340743
9.5861951059	9.5877876944	9.5908942851	9.5924053629
9.5808341226	9.5826222225	9.5861357817	9.5878586106
9.5763645585	9.5782963449	9.5821114024	9.5839924577
9.5689656445	9.5711022828	9.5753519409	9.5774630559
9.5623190011	9.5651006307	9.5695682168	9.5719337528
9.5443197508	9.5469219487	9.5521710882	9.5548204098
9.530609863	9.5333624374	9.5389464988	9.5417701864
9.5220014582	9.5248181388	9.5305378376	9.5334459343
9.5085441776	9.5114217753	9.5172776156	9.5202618963
9.4990759429	9.5019714935	9.5078686534	9.5108766368
9.4897052103	9.4926009474	9.4985002894	9.5015103061
9.4663976505	9.46923024	9.4749939867	9.4779304468
9.4476566157	9.4503852815	9.4559215616	9.4587324606
9.4179274961	9.4204199325	9.425436047	9.4279582052
9.394387805	9.3966490303	9.4011553218	9.4033941425
9.3291947587	9.3307172325	9.3336036843	9.3349477415
9.2514770497	9.2521439379	9.2532025697	9.2535651373
9.1150308083	9.1149602602	9.1146913859	9.1144824412
9.079999536	9.0799998218	9.0799998498	9.0799998734
9.0207770073	9.021217168	9.0223912574	9.0231458659
9.0013811105	9.002062909	9.0038357277	9.0049539264
8.9071297111	8.9097810777	8.9161408483	8.9198982544
8.9006876843	8.9035266679	8.9103084502	8.9143007977
8.8879527717	8.8911844122	8.8988437151	8.9033215347
8.8817870982	8.8852194379	8.8933245025	8.8980474425
8.8704072313	8.8742285781	8.8831927301	8.8883854311
8.8654583931	8.8694565632	8.8788091875	8.8842132204
8.8523795491	8.8568678819	8.8672911956	8.8732743754
8.8404181181	8.8453844663	8.8568437532	8.8633829182



Resultados:

$$\delta = 0.495$$

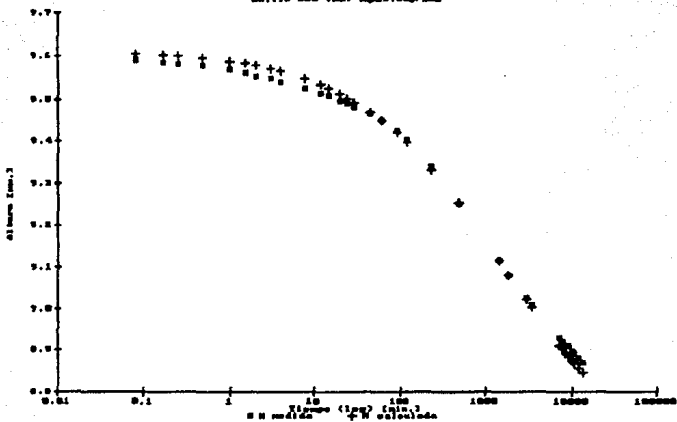
$$t^* = 1875$$

$$X_t = 1.061997$$

Ecuación:

$$H = 9.611 - 1.061997 / (1 + (1875/t)^{0.495})$$

Comp: 8 live loop, mod. 0.000/0.000  
 Salto: 800 (20) A(21.000/0.000)



Resultados:

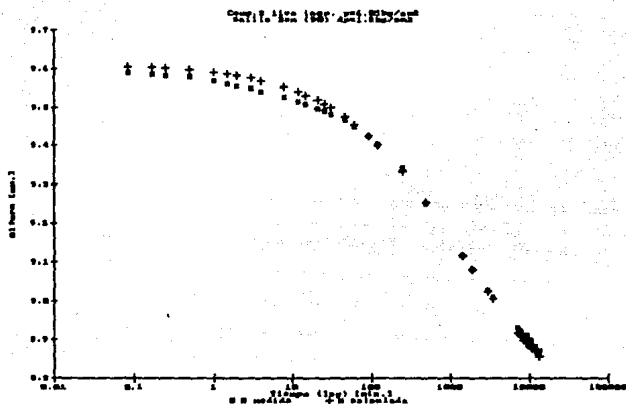
$$\delta = 0.508$$

$$t\delta = 1672$$

$$Xt = 1.031907$$

Ecuación:

$$H = 9.611 - 1.031907 / (1 + (1672/t)^{0.508})$$



**Resultados:**

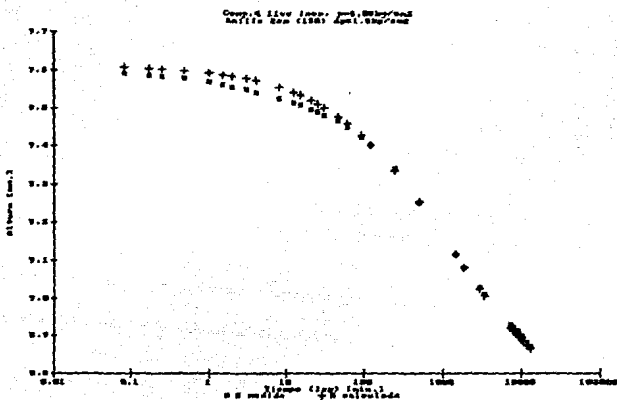
$$\delta = 0.536$$

$$t^* = 1335$$

$$x_t = 0.9734976$$

**Ecuación:**

$$H = 9.611 - 0.9734976 / (1 + (1335/t)^{0.536})$$



Resultados:

$$\delta = 0.552$$

$$t_4 = 1194$$

$$x_t = 0.944998$$

Ecuación:

$$H = 9.611 - 0.944998 / (1 + (1194/t)^{0.552})$$



### Consolidómetro 8 con anillo de 1.5 cm.

El anillo de 1.5 cm. fue sometido a 10 incrementos de carga en el lapso de 5 meses. Los primeros tres incrementos no fueron utilizados para la investigación, ya que el consolidómetro fue movido o cargado, haciendo que parte del material saliera por el espacio comprendido entre el anillo y la piedra porosa. Esto provocó, por supuesto, que la altura de la muestra bajara mucho y, por lo tanto, que la relación de vacíos también disminuyera. Sin embargo, como el micrómetro no fue movido, se sabía perfectamente cuanto disminuyó todo lo anterior, y es por esto que se pudo seguir cargando. Con lo anterior y a pesar de todo, esta prueba arrojó buenos resultados, como se verá más adelante.

#### Datos de la muestra:

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 28/06/89  
Profundidad: 1.3 m.

#### Datos del anillo:

Diámetro:  $d = 7.665$  cm.  
Área:  $A = 46.144$  cm<sup>2</sup>  
Espesor:  $z = 1.495$  cm.  
Volumen:  $V = 68.985$  cm<sup>3</sup>.

#### Peso volumétrico del suelo:

Peso de vidrios, anillo y muestra: 549.75 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 463.95 gr.  
Peso de la muestra: 85.8 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.244$  gr/cm<sup>3</sup>

#### Contenido de agua:

Peso de cápsula: 113.24 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 122.48 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 116.24 gr.  
 $\therefore w = 208$  %

#### Densidad de sólidos:

Peso del matraz con agua y suelo: 690.28 gr.  
Temperatura: 31.4 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 665.86 gr.  
Peso de refractario: 1030.85 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 1071.53 gr.  
 $W_s = 40.68$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.5$

#### Esfuerzo efectivo in situ (NAF=1.5m, y suelo 100% saturado):

$\gamma_m = 1.244$  gr/cm<sup>3</sup> =  $1.244$  T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.244 \times 1.3 = 1.6172$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.2$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 1.6172 + 0.2 = 1.817$  T/m<sup>2</sup>

#### Relaciones de vacíos:

Inicial:  $e_0 = wS_s = 5.2$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 85.8$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 27.857$  gr.

$$H_0 = W_0 / (S_0 \gamma_0 A)$$

$$\therefore e = (H_m / S_0 \gamma_0 A / W_0) - 1 = 4.141 H_m - 1$$

$H_m$  = altura de la muestra.

**Fechas de cada incremento de carga:**

Primero: 02/10/89  
 Segundo: 05/10/89  
 Tercero: 10/10/89  
 Cuarto: 23/10/89  
 Quinto: 08/11/89  
 Sexto: 28/11/89  
 Séptimo: 03/01/90  
 Octavo: 14/01/90  
 Noveno: 23/01/90  
 Décimo: 07/02/90

**Incrementos de Carga (todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup>
Segundo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.2$ kg/cm <sup>2</sup>
Tercero:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.3$ kg/cm <sup>2</sup>
Cuarto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.3$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.4$ kg/cm <sup>2</sup>
Quinto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.25$	$\Delta\sigma = 0.1$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.5$ kg/cm <sup>2</sup>
Sexto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.2$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 0.7$ kg/cm <sup>2</sup>
Séptimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.3$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 1.0$ kg/cm <sup>2</sup>
Octavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.4$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 1.4$ kg/cm <sup>2</sup>
Noveno:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.6$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 2.0$ kg/cm <sup>2</sup>
Décimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.8$ kg/cm <sup>2</sup> $\sigma = 2.8$ kg/cm <sup>2</sup>

**Desmontado:**

Al final del décimo incremento.  
 Fecha: 02/03/90

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:  $H_i = 14.95$  mm.  
 Segundo incremento:  $H_i = 14.836$  mm.  
 Tercer incremento:  $H_i = 14.693$  mm.  
 Cuarto incremento:  $H_i = 12.769$  mm.  
 Quinto incremento:  $H_i = 12.397$  mm.  
 Sexto incremento:  $H_i = 12.011$  mm.  
 Séptimo incremento:  $H_i = 11.003$  mm.  
 Octavo incremento:  $H_i = 10.443$  mm.  
 Noveno incremento:  $H_i = 9.584$  mm.  
 Décimo incremento:  $H_i = 8.456$  mm.

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = (min, mm.)

Primero incremento:	C(t, H) = (57, 14.8494)
	T(t, H) = (2.6, 14.886)
Segundo incremento:	C(t, H) = (3.8, 14.7835)
	T(t, H) = (2.85, 14.788)
Tercer incremento:	C(t, H) = (3.9, 14.65)
	T(t, H) = (5.3, 14.647)
Cuarto incremento:	C(t, H) = (6.8, 12.7235)
	T(t, H) = (9, 12.722)
Quinto incremento:	C(t, H) = (7.25, 12.358)
	T(t, H) = (11.7, 12.353)

Sexto incremento: C(t,H) = (5.9,11.945)  
 T(t,H) = (8,11.943)

Séptimo incremento: C(t,H) = (4.8,10.9421)  
 T(t,H) = (4.8,10.9421)

Octavo incremento: C(t,H) = (9.25,10.364)  
 T(t,H) = (8,10.3676)

Noveno incremento: C(t,H) = (2500,8.655)  
 T(t,H) = (930,8.795)

Décimo incremento: C(t,H) = (1.97,8.41)  
 T(t,H) = (4.15,8.4013)

**Notas:**

a) En este caso el fin de la consolidación primaria también se presentó dentro de los primeros 10 minutos exceptuando los casos en los que dicha consolidación predominó.

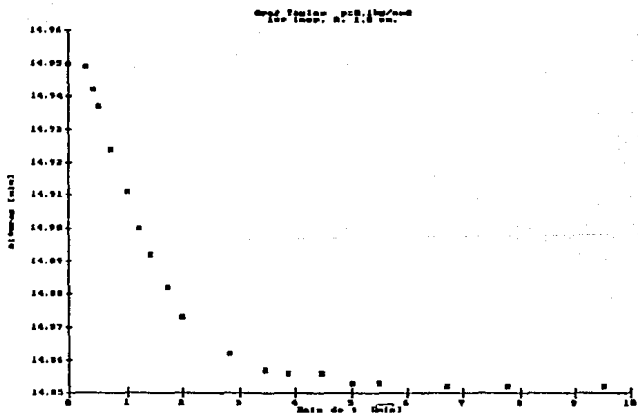
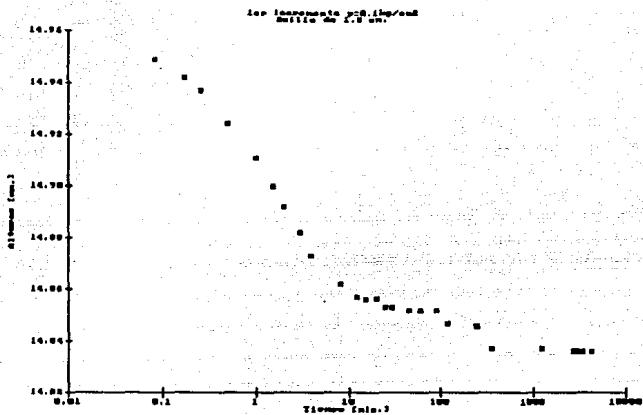
b) Esta prueba fue muy problemática debido, como ya mencioné, a que movieron el consolidómetro. Por esto mismo los primeros tres incrementos no fueron utilizados.

c) En el noveno incremento la consolidación secundaria no fue la predominante a pesar del bajo incremento de  $\Delta\sigma/\sigma = 0.4$ , esto se debió a que el tiempo que fue dejado el incremento ocho fue poco (9 días).

Primer incremento de carga ( $p=0.1\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	9.552	0	14.95
0.083	9.553	0.001	14.949
0.17	9.56	0.008	14.942
0.25	9.565	0.013	14.937
0.5	9.578	0.026	14.924
1	9.591	0.039	14.911
1.5	9.602	0.05	14.9
2	9.61	0.058	14.892
3	9.62	0.068	14.882
4	9.629	0.077	14.873
8	9.64	0.088	14.862
12	9.645	0.093	14.857
15	9.646	0.094	14.856
20	9.646	0.094	14.856
25	9.649	0.097	14.853
30	9.649	0.097	14.853
45	9.65	0.098	14.852
60	9.65	0.098	14.852
90	9.65	0.098	14.852
120	9.655	0.103	14.847
240	9.656	0.104	14.846
335	9.665	0.113	14.837
1250	9.665	0.113	14.837
2681	9.666	0.114	14.836
2876	9.666	0.114	14.836
3266	9.666	0.114	14.836
4158	9.666	0.114	14.836



Segundo incremento de carga ( $p=0.2\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	9.666	0	14.836
0.083	9.666	0	14.836
0.17	9.671	0.005	14.831
0.25	9.675	0.009	14.827
0.5	9.684	0.018	14.818
1	9.694	0.028	14.808
1.5	9.7	0.034	14.802
2	9.706	0.04	14.796
3	9.711	0.045	14.791
4	9.719	0.053	14.783
8	9.725	0.059	14.777
12	9.73	0.064	14.772
15	9.73	0.064	14.772
25	9.734	0.068	14.768
30	9.737	0.071	14.765
48	9.741	0.075	14.761
60	9.743	0.077	14.759
97	9.749	0.083	14.753
137	9.75	0.084	14.752
240	9.7595	0.0935	14.7425
1493	9.789	0.123	14.713
5821	9.808	0.142	14.694
6520	9.809	0.143	14.693

Tabla Inicial. Sin instrumenta  
 Malla de 1.0 en  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$

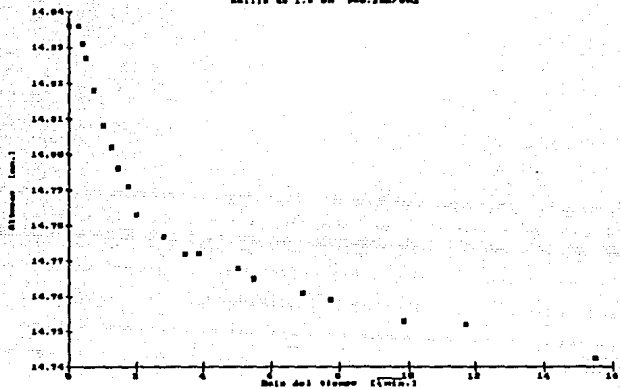
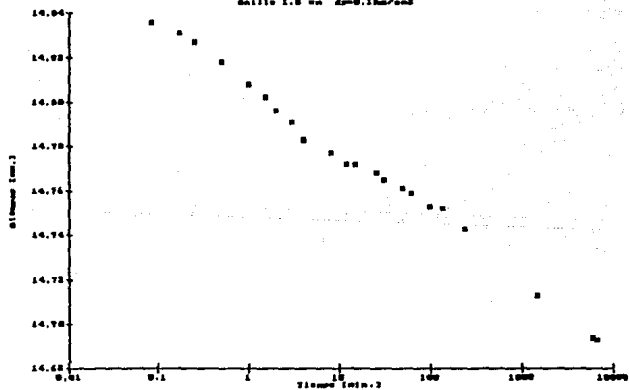


Tabla Instrumenta con 2.0  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$   
 Malla 1.0 en  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$

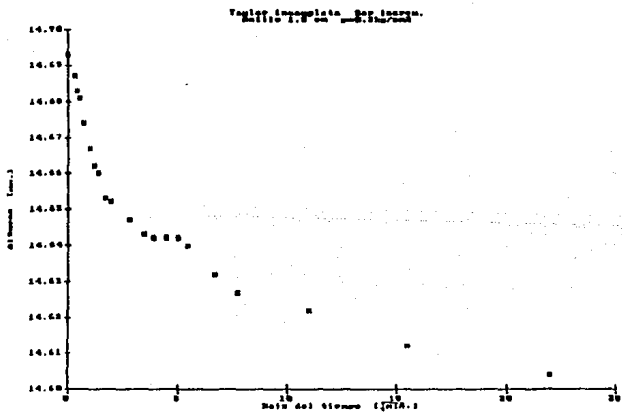
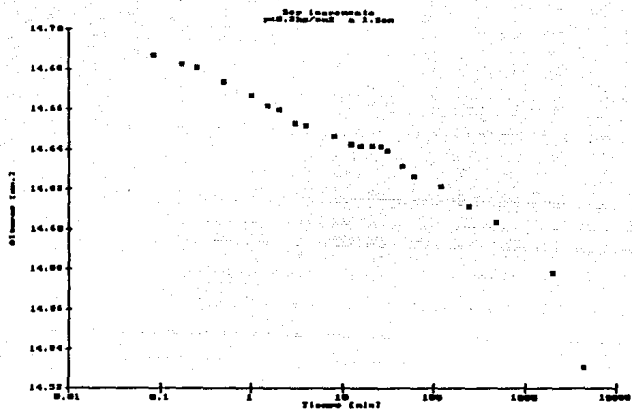


Tercer incremento de carga ( $p=0.3\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	9.809	0	14.693
0.083	9.815	0.006	14.687
0.17	9.819	0.01	14.683
0.25	9.821	0.012	14.681
0.5	9.828	0.019	14.674
1	9.835	0.026	14.667
1.5	9.84	0.031	14.662
2	9.842	0.033	14.66
3	9.849	0.04	14.653
4	9.85	0.041	14.652
8	9.855	0.046	14.647
12	9.859	0.05	14.643
15	9.86	0.051	14.642
20	9.86	0.051	14.642
25	9.86	0.051	14.642
30	9.862	0.053	14.64
45	9.87	0.061	14.632
60	9.875	0.066	14.627
120	9.88	0.071	14.622
240	9.89	0.081	14.612
480	9.898	0.089	14.604
1970	9.924	0.115	14.578
4318	9.971	0.162	14.531
9109	11.61	1.801	12.892
10050	11.645	1.836	12.857
11495	11.675	1.866	12.827
12063	11.691	1.882	12.811
12944	11.697	1.888	12.805
14422	11.71	1.901	12.792
14706	11.714	1.905	12.788
14868	11.72	1.911	12.782
17263	11.733	1.924	12.769

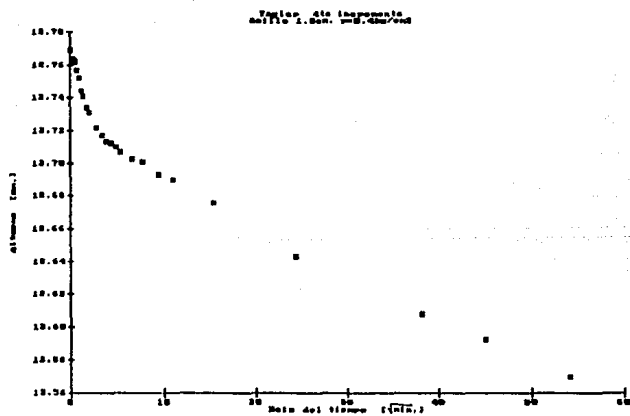
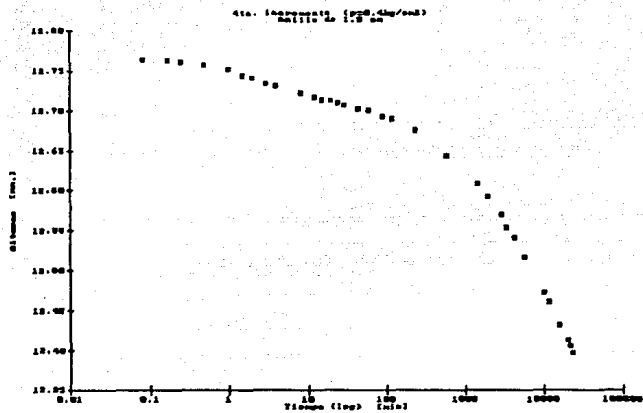




Cuarto incremento de carga ( $p=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

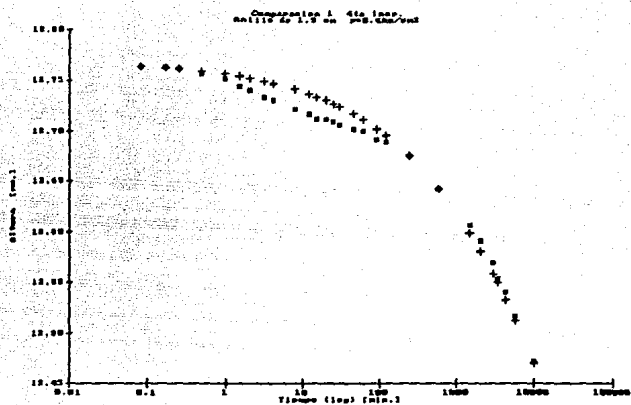
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	11.733	0	12.769
0.083	11.738	0.005	12.764
0.17	11.739	0.006	12.763
0.25	11.74	0.007	12.762
0.5	11.745	0.012	12.757
1	11.75	0.017	12.752
1.5	11.758	0.025	12.744
2	11.761	0.028	12.741
3	11.768	0.035	12.734
4	11.771	0.038	12.731
8	11.78	0.047	12.722
12	11.785	0.052	12.717
15	11.789	0.056	12.713
20	11.79	0.057	12.712
25	11.792	0.059	12.71
30	11.795	0.062	12.707
45	11.7995	0.0665	12.7025
60	11.801	0.068	12.701
90	11.809	0.076	12.693
120	11.812	0.079	12.69
240	11.826	0.093	12.676
591	11.859	0.126	12.643
1460	11.894	0.161	12.608
2025	11.91	0.177	12.592
2935	11.932	0.199	12.57
3369	11.948	0.215	12.554
4351	11.961	0.228	12.541
5790	11.985	0.252	12.517
10122	12.03	0.297	12.472
11577	12.041	0.308	12.461
15882	12.07	0.337	12.432
20194	12.089	0.356	12.413
21655	12.096	0.363	12.406
23087	12.105	0.372	12.397



Cuarto incremento de carga ( $p=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
12.7641773	12.7643103	12.7644199	12.7663877	12.7669031
12.7626656	12.7628232	12.7629572	12.7654126	12.7660747
12.7616663	12.7618381	12.7619871	12.7647459	12.7655016
12.7594616	12.7596603	12.7598394	12.7632234	12.7641766
12.7566025	12.7568287	12.7570424	12.7611616	12.7623544
12.7545533	12.7547952	12.7550312	12.7596332	12.7609874
12.7529005	12.753153	12.7534056	12.7583737	12.7598522
12.7502511	12.7505175	12.7507946	12.7563105	12.7579781
12.7481166	12.7483916	12.7486867	12.7546124	12.7564238
12.7419507	12.7422404	12.7425806	12.7495529	12.7517406
12.7375577	12.7378503	12.7382172	12.7458279	12.7482514
12.7348533	12.7351451	12.7355265	12.7434915	12.746048
12.7310343	12.7313222	12.731722	12.7401415	12.742871
12.727793	12.7280753	12.7284888	12.7372554	12.7401188
12.7249497	12.7252255	12.7256499	12.7346938	12.7376656
12.7179423	12.7181969	12.7186435	12.7282727	12.7314772
12.7123443	12.7125776	12.7130379	12.7230439	12.7264019
12.7034708	12.7036664	12.7041398	12.7145987	12.7181469
12.696409	12.6965662	12.6970496	12.7077574	12.7114148
12.6764368	12.6764793	12.6769662	12.6879388	12.6917326
12.6431941	12.6430334	12.6434844	12.6538417	12.6574337
12.6000899	12.5996985	12.6000595	12.6084555	12.6113015
12.5818403	12.5813749	12.5816907	12.5890537	12.5915017
12.5593502	12.5588195	12.5590779	12.5651084	12.5670465
12.5505055	12.5499578	12.5501937	12.555698	12.5574369
12.5334021	12.5328371	12.5330305	12.5375352	12.538901
12.5132362	12.5126786	12.5128245	12.5162125	12.5171729
12.4707039	12.4702709	12.4703328	12.4717484	12.4720484
12.4598975	12.4595215	12.4595666	12.460592	12.460778
12.4336462	12.4334541	12.4334681	12.4337761	12.4337929
12.413	12.413	12.4130001	12.4130001	12.4130001
12.4068922	12.4069573	12.4069552	12.406911	12.4069268
12.4012546	12.4013832	12.4013799	12.4013147	12.4013538



Resultados:

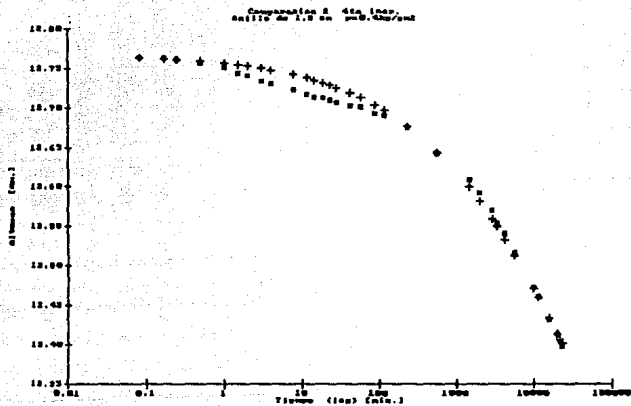
$$\delta = 0.383$$

$$t_0 = 90755$$

$$Xt = 0.9884966$$

Ecuación:

$$H = 12.769 - 0.9884966 / (1 + (90755/t)^{0.383})$$



Resultados:

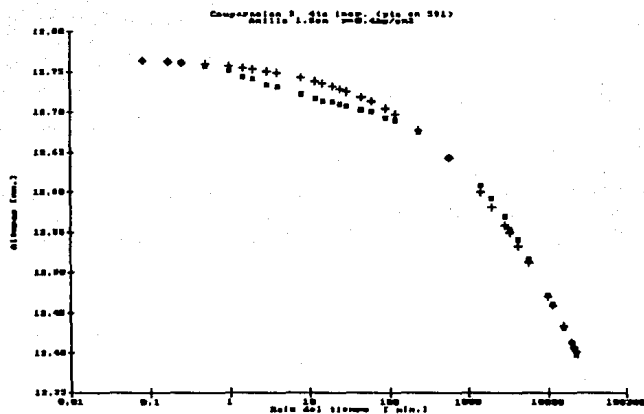
$$\delta = 0.386$$

$$t\delta = 77307$$

$$Xt = 0.953997$$

Ecuación:

$$H = 12.769 - 0.953997 / (1 + (77307/t)^{0.386})$$



**Resultados:**

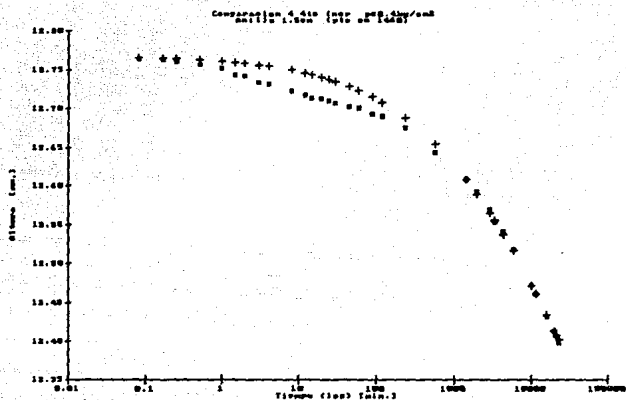
$$\delta = 0.389$$

$$t^* = 73743$$

$$Xt = 0.9449971$$

**Ecuación:**

$$H = 12.769 - 0.9449971 / (1 + (73743/t)^{0.389})$$



Resultados:

$$\delta = 0.444$$

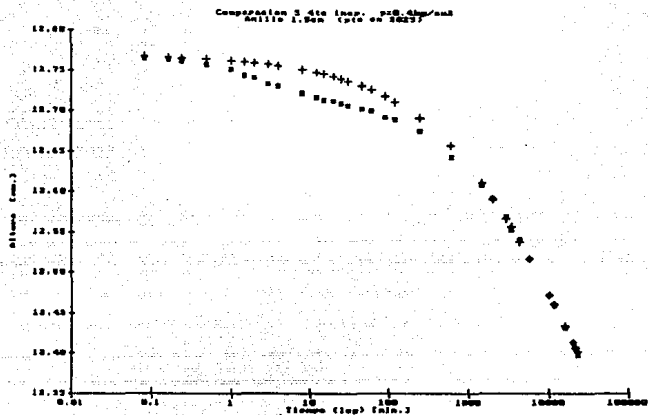
$$t_0 = 31874$$

$$Xt = 0.7919991$$

Ecuación:

$$H = 12.769 - 0.7919991 / (1 + (31874/t)^{0.444})$$





Resultados:

$$\beta = 0.466$$

$$t_0 = 24785$$

$$X_0 = 0.7476517$$

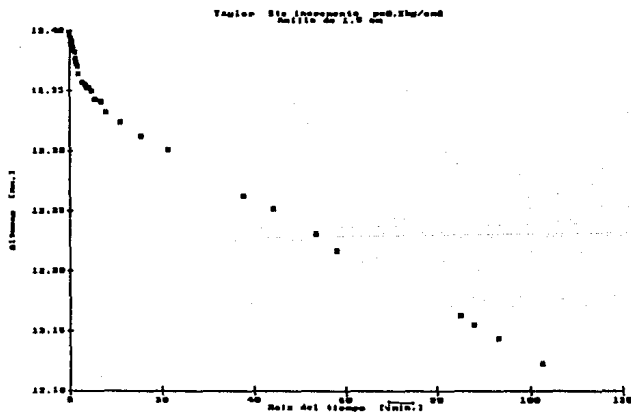
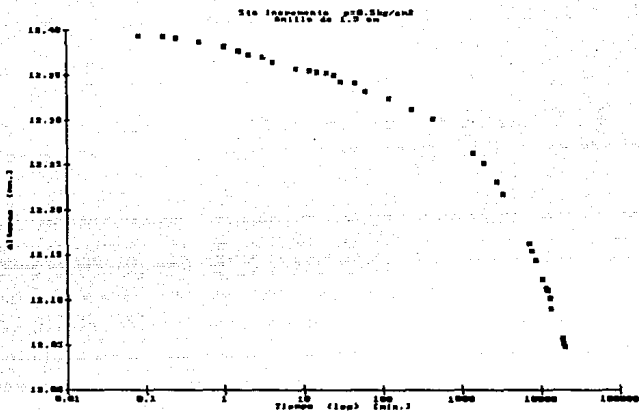
Equación:

$$Y = 12.769 - 0.7476517 / (1 + (24785 / t)^{0.466})$$

Quinto incremento de carga ( $p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	12.105	0	12.397
0.083	12.108	0.003	12.394
0.17	12.109	0.004	12.393
0.25	12.111	0.006	12.391
0.5	12.115	0.01	12.387
1	12.12	0.015	12.382
1.5	12.125	0.02	12.377
2	12.129	0.024	12.373
3	12.132	0.027	12.37
4	12.138	0.033	12.364
8	12.145	0.04	12.357
12	12.147	0.042	12.355
15	12.149	0.044	12.353
20	12.15	0.045	12.352
25	12.152	0.047	12.35
30	12.159	0.054	12.343
45	12.161	0.056	12.341
60	12.17	0.065	12.332
122	12.178	0.073	12.324
240	12.19	0.085	12.312
454	12.201	0.096	12.301
1412	12.239	0.134	12.263
1945	12.25	0.145	12.252
2873	12.271	0.166	12.231
3372	12.285	0.18	12.217
7180	12.339	0.234	12.163
7681	12.347	0.242	12.155
8699	12.358	0.253	12.144
10502	12.379	0.274	12.123
11523	12.389	0.284	12.113
12029	12.391	0.286	12.111
12936	12.4	0.295	12.102
13436	12.411	0.306	12.091
15641	12.444	0.339	12.058
19136	12.45	0.345	12.052
20286	12.454	0.349	12.048
21704	12.469	0.364	12.033
23172	12.461	0.356	12.041
27402	12.484	0.379	12.018
28858	12.491	0.386	12.011



Quinto incremento de carga ( $p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas

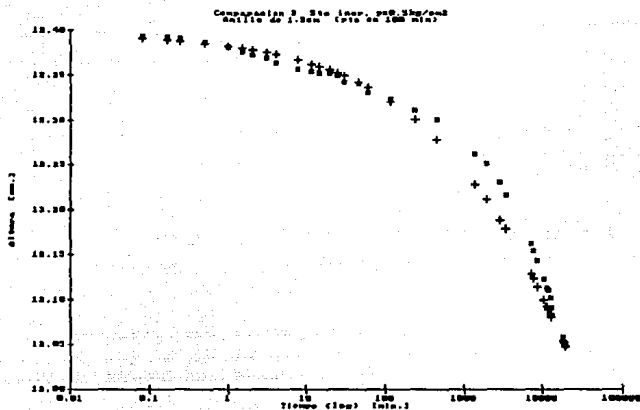
Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR
12.3912476	12.3918496	12.3929671
12.3895448	12.3902808	12.3916617
12.3884305	12.3892249	12.3907935
12.3859975	12.3869844	12.388866
12.3828831	12.3840664	12.386346
12.3806735	12.3819854	12.3845283
12.3789028	12.3803121	12.383056
12.376083	12.3776385	12.3806859
12.3738257	12.3754911	12.3787681
12.3673659	12.3693152	12.3731924
12.3628091	12.3649354	12.3691915
12.3600197	12.362246	12.3667181
12.356099	12.3584562	12.3632129
12.3537863	12.3552461	12.3602271
12.3498999	12.3524346	12.3576004
12.3427921	12.3455209	12.3510985
12.3371546	12.3400114	12.3458775
12.3308159	12.3339622	12.3304956
12.3015069	12.3048645	12.3119112
12.2794064	12.2828659	12.2901979
12.2290479	12.2323166	12.2393582
12.2120006	12.2151003	12.2218059
12.1894452	12.1922566	12.1983679
12.1796077	12.1822729	12.1880773
12.1286453	12.1303905	12.1342208
12.123739	12.1253836	12.128995
12.1145368	12.1159876	12.1191768
12.1002483	12.1013866	12.1038927
12.0970537	12.0940299	12.0961804
12.0896869	12.0905861	12.0925678
12.0839433	12.0847099	12.0864
12.080925	12.0816191	12.0831542
12.0540992	12.0541508	12.0542651
12.0519998	12.0519997	12.0519998
12.0471009	12.0469795	12.0467117
12.0413871	12.0411233	12.0405406
12.0358103	12.0354067	12.0345144
12.0213213	12.0205531	12.0186471
12.0168266	12.01594	12.0139791

Quinto incremento de carga ( $p=0.6 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

Ecuación 6 Ecuación 7 Ecuación 8

ERR	ERR	ERR
12.3942367	12.3958108	12.395237
12.3932595	12.3953081	12.39455
12.3925984	12.3949548	12.394075
12.3911046	12.3941249	12.392981
12.3891077	12.3929597	12.391478
12.387642	12.3920709	12.390353
12.3864415	12.3913247	12.389419
12.3844866	12.3900788	12.387877
12.3828868	12.3890334	12.386598
12.3781576	12.3858272	12.382744
12.3747025	12.3833904	12.379868
12.3725441	12.3818328	12.378049
12.3694588	12.3795635	12.375422
12.366808	12.3775764	12.373142
12.3644599	12.3757894	12.371106
12.3585804	12.3712194	12.365954
12.3558179	12.3674088	12.361709
12.3395155	12.3555307	12.348716
12.321823	12.340045	12.332186
12.30069	12.3206103	12.311913
12.2497296	12.2705106	12.261257
12.2317565	12.2519716	12.242927
12.2075144	12.2263882	12.217899
12.196793	12.2148855	12.206732
12.1400512	12.1524435	12.146819
12.1344978	12.1462135	12.140894
12.1240451	12.1344403	12.129717
12.1077278	12.1159491	12.11221
12.0994751	12.1065498	12.103331
12.0956054	12.1021326	12.099163
12.0889928	12.0945708	12.092033
12.0855103	12.0905816	12.088274
12.0544408	12.0548207	12.054648
12.0519997	12.0519998	12.052
12.0462989	12.0454071	12.045813
12.0396423	12.0377006	12.038584
12.0331382	12.030163	12.031516
12.0162142	12.0105213	12.013108
12.0109521	12.0044078	12.007381



Resultados:

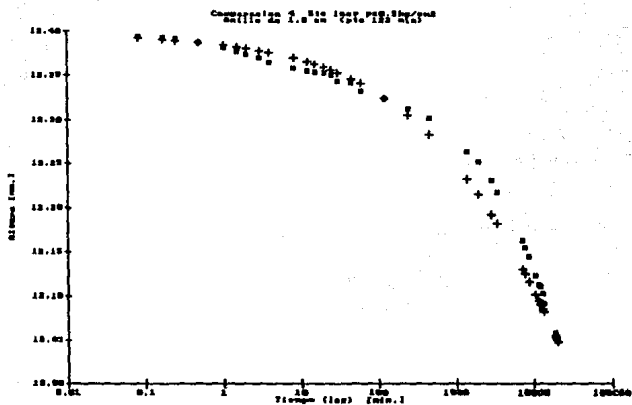
$$\delta = 0.364$$

$$t^* = 127650$$

$$Xt = 1.033347$$

Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.033347 / (1 + (127650/t)^{0.364})$$



Resultados:

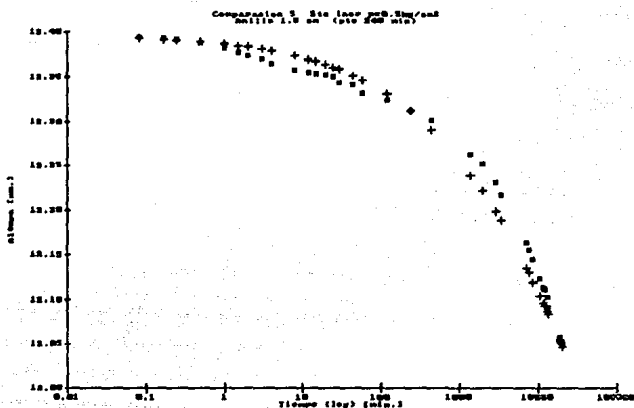
$$\delta = 0.373$$

$$t\delta = 121862$$

$$Xt = 1.033197$$

Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.033197 / (1 + (121862/t)^{0.373})$$



Resultados:

$$\delta = 0.393$$

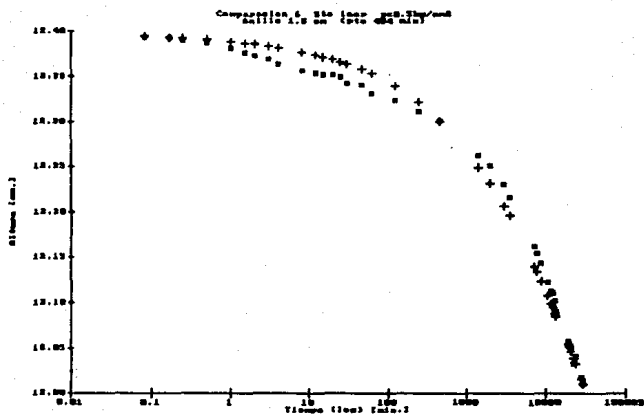
$$t\delta = 110776$$

$$Xt = 1.032776$$

Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.032776 / (1 + (110776/t)^{0.393})$$





Resultados:

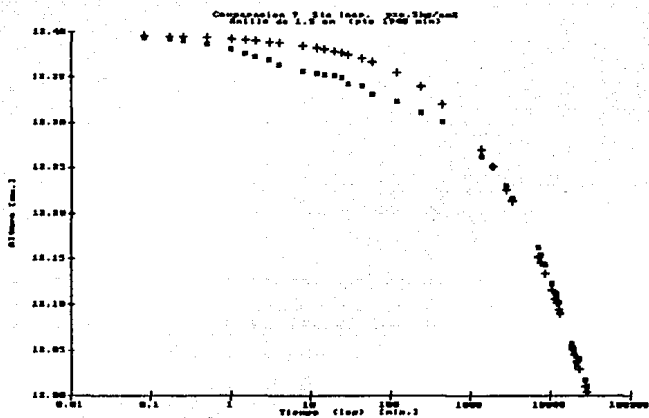
$$\delta = 0.424$$

$$t_0 = 97177$$

$$X_0 = 1.031757$$

Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.031757 / (1 + (97177/t)^{0.424})$$



Resultados:

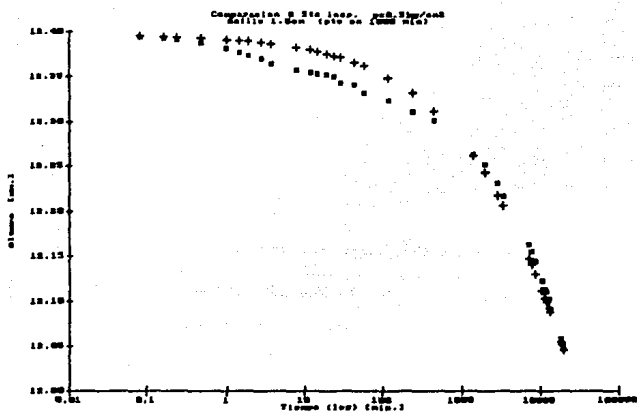
$$\delta = 0.493$$

$$t\delta = 74756$$

$$Xt = 1.019997$$

Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.019997 / (1 + (74756/t)^{0.493})$$



Resultados:

$$\delta = 0.46$$

$$t^* = 84654$$

$$Xt = 1.028997$$

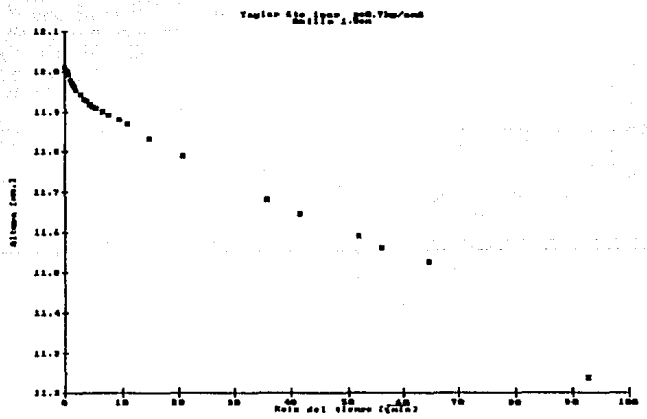
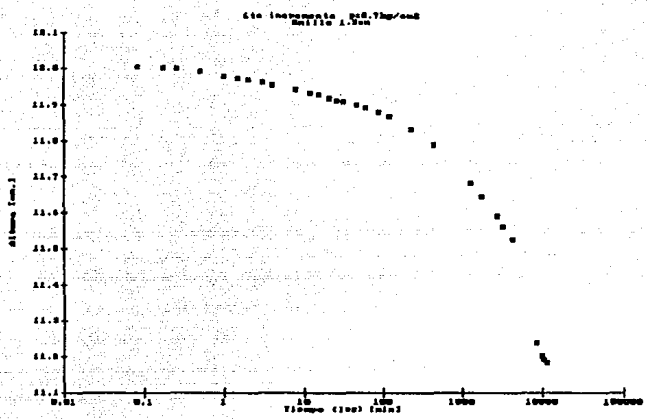
Ecuación:

$$H = 12.397 - 1.028997 / (1 + (84654/t)^{0.46})$$

Sexto incremento de carga ( $p=0.7 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

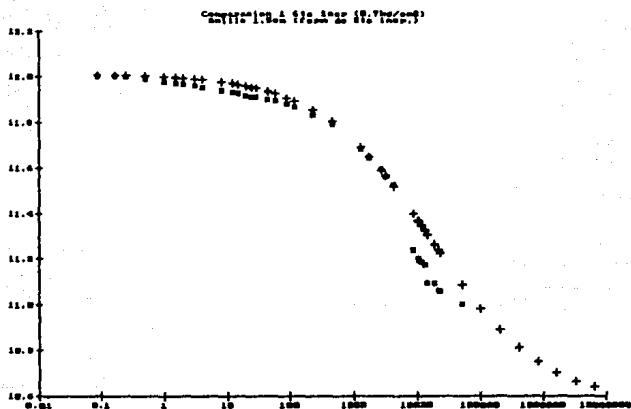
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	12.491	0	12.011
0.083	12.498	0.007	12.004
0.17	12.5	0.009	12.002
0.25	12.502	0.011	12
0.5	12.51	0.019	11.992
1	12.523	0.032	11.979
1.5	12.53	0.039	11.972
2	12.534	0.043	11.968
3	12.54	0.049	11.962
4	12.548	0.057	11.954
8	12.56	0.069	11.942
12	12.57	0.079	11.932
15	12.573	0.082	11.929
20	12.582	0.091	11.92
25	12.589	0.098	11.913
30	12.591	0.1	11.911
45	12.601	0.11	11.901
60	12.609	0.118	11.893
90	12.621	0.13	11.881
120	12.632	0.141	11.87
221	12.668	0.177	11.834
429	12.711	0.22	11.791
1272	12.819	0.328	11.683
1741	12.856	0.365	11.646
2691	12.91	0.419	11.592
3169	12.94	0.449	11.562
4175	12.975	0.484	11.527
8602	13.264	0.773	11.238
10111	13.3	0.809	11.202
10409	13.31	0.819	11.192
11496	13.317	0.826	11.185
12962	13.329	0.838	11.173
14402	13.404	0.913	11.098
18554	13.408	0.917	11.094
21585	13.439	0.948	11.063
23044	13.442	0.951	11.06
51804	13.499	1.008	11.003



Serie: Incremento de carga ( $p=0.7 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3
ERR	ERR	ERR
12.007424265	12.007355143	12.007481887
12.005915223	12.005818708	12.005975775
12.00485605	12.004739733	12.004954261
12.002370915	12.002208545	12.002507768
11.998889054	11.998667124	11.999078997
11.996239373	11.995965827	11.996468895
11.994018885	11.993705937	11.994281028
11.990519089	11.987941505	11.990634477
11.98722282	11.986792116	11.987581703
11.97777626	11.97718288	11.978255914
11.970630481	11.969930235	11.971205873
11.966485566	11.965316942	11.966716381
11.959493675	11.958626777	11.960198716
11.953747389	11.952798978	11.954514587
11.948600782	11.947581948	11.949420417
11.945527175	11.944342267	11.946470318
11.926727479	11.923413849	11.925755935
11.907031369	11.905532992	11.908176994
11.89250443	11.890875827	11.893722234
11.88564664	11.883532897	11.886710193
11.88091567	11.880190893	11.8805102202
11.689920988	11.688468226	11.689861057
11.649682036	11.648702867	11.648855324
11.588553252	11.588565918	11.586229081
11.561097842	11.564599054	11.561061772
11.521152975	11.522648811	11.516720899
11.400728077	11.405441587	11.390845738
11.372129386	11.378269946	11.361238561
11.367951847	11.373365308	11.35587695
11.349544189	11.356556227	11.337461298
11.328319813	11.336190322	11.315064625
11.309634055	11.318291948	11.295304897
11.264638714	11.27531357	11.24756176
11.237831642	11.24978907	11.219008487
11.226383639	11.238812546	11.206683273
11.087710007	11.107755695	11.057584054



Resultados:

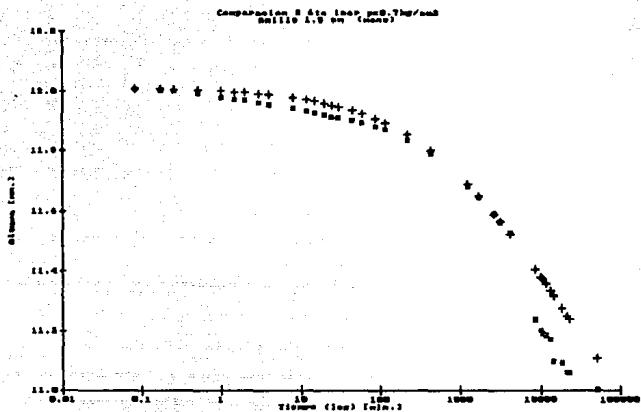
$$\delta = 0.493$$

$$t^* = 16130$$

$$X_t = 1.443$$

Ecuación:

$$H = 12.011 - 1.443 / (1 + (16130/t)^{0.493})$$



Resultados:

$$\delta = 0.493$$

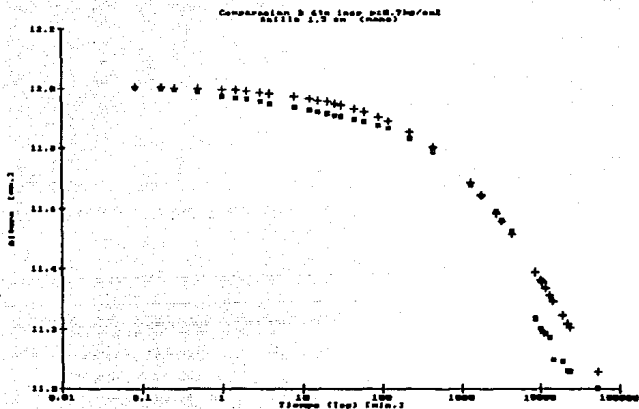
$$t^* = 14174$$

$$Xt = 1.38$$

Ecuación:

$$H = 12.011 - 1.38 / (1 + (14174/t)^{0.493})$$





Resultados:

$$s = 0.497$$

$$t^* = 18857$$

$$xt = 1.533$$

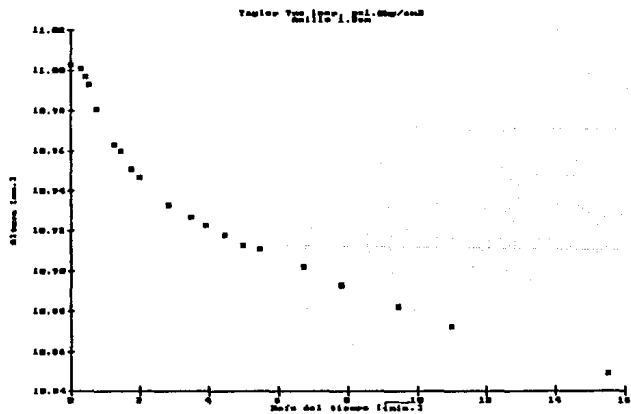
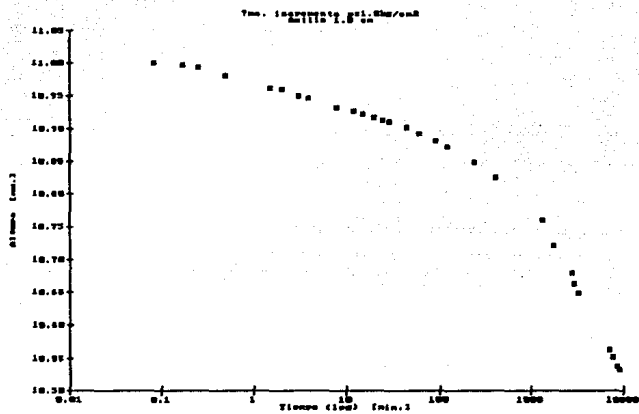
Ecuación:

$$H = 12.011 - 1.533 / (1 + (18857/t)^{0.493})$$

Óptimo incremento de carga ( $p=1.0 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	13.499	0	11.003
0.083	13.501	0.002	11.001
0.17	13.505	0.005	10.997
0.25	13.509	0.01	10.993
0.5	13.521	0.022	10.981
1.5	13.539	0.04	10.963
2	13.542	0.043	10.96
3	13.551	0.052	10.951
4	13.555	0.056	10.947
8	13.569	0.07	10.933
12	13.575	0.076	10.927
15.2	13.579	0.08	10.923
20.05	13.584	0.085	10.918
25	13.589	0.09	10.913
30	13.591	0.092	10.911
45.383	13.6	0.101	10.902
61	13.609	0.11	10.893
90	13.62	0.121	10.882
120	13.6295	0.1305	10.8725
240	13.653	0.154	10.849
423	13.676	0.177	10.826
1351	13.741	0.242	10.761
1765	13.78	0.281	10.722
2820	13.822	0.323	10.68
2968	13.838	0.339	10.664
3275	13.853	0.354	10.649
7117	13.939	0.44	10.563
7599	13.95	0.451	10.552
8546	13.964	0.465	10.538
8985	13.97	0.471	10.532
9990	13.975	0.476	10.527
11406	14.004	0.505	10.498
13341	14.028	0.529	10.474
17189	14.059	0.56	10.443



Séptimo incremento de carga ( $p=1.0 \text{ kg/cm}^2$ )

## Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas

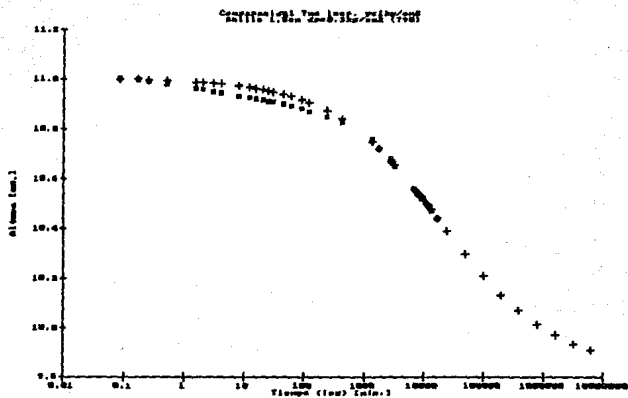
Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3
ERR	ERR	ERR
10.9995786	10.997908	11.0002358
10.9982137	10.9960616	10.9990741
10.9972675	10.994807	10.9982595
10.9950757	10.9919603	10.9963499
10.9897825	10.9853216	10.9916458
10.9878943	10.9830118	10.9899442
10.9847737	10.9792455	10.9871106
10.9821829	10.97616	10.9847405
10.9743658	10.9670318	10.9775112
10.9695341	10.9603643	10.9720554
10.9646186	10.9559433	10.9683675
10.9594841	10.9502046	10.963505
10.9549267	10.9451606	10.9591663
10.9508194	10.9406509	10.9552399
10.94022	10.9291514	10.9450425
10.9314259	10.9197528	10.9365331
10.9181316	10.9057085	10.9235557
10.9068618	10.8939657	10.9124923
10.8739492	10.8603183	10.8798926
10.8400791	10.8264677	10.8460098
10.7477457	10.7367833	10.7526795
10.7218274	10.7120725	10.7263553
10.6722312	10.6651534	10.6759514
10.6665082	10.659764	10.6701366
10.6553319	10.6492512	10.6587836
10.5604318	10.5604136	10.5626609
10.5519488	10.5524926	10.5541041
10.5365992	10.5381613	10.5386402
10.5299994	10.5319993	10.5319994
10.5159355	10.5188665	10.5178651
10.4981924	10.5022919	10.5000687
10.4770282	10.482506	10.4788963
10.4425027	10.4501729	10.4444992

Séptimo incremento de carga ( $p=1.0 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 4 Ecuación 5 Ecuación 6

ERR	ERR	ERR
11.0000954	10.9972457	11.0014432
10.9988707	10.9952505	11.0006924
10.9980115	10.9939065	11.0001487
10.9959963	10.990884	10.998831
10.9910296	10.9839379	10.9953921
10.9892328	10.9815456	10.9941067
10.9862408	10.9776656	10.9919101
10.9837389	10.9745032	10.9909342
10.9761115	10.9652159	10.9841335
10.9702608	10.958483	10.9795308
10.9664767	10.9540375	10.9763649
10.9613595	10.9482858	10.972122
10.9567979	10.9432456	10.9682803
10.9526772	10.9387499	10.9647624
10.9419725	10.9273241	10.9554649
10.9330713	10.9180188	10.9475485
10.9195231	10.9041559	10.9352459
10.908007	10.892594	10.9245699
10.8742593	10.8595529	10.8923254
10.8394845	10.8263609	10.8579039
10.7453119	10.7381485	10.760625
10.7191795	10.71369	10.7329346
10.6696671	10.6669866	10.68
10.6639993	10.6615972	10.6739133
10.6529594	10.6510485	10.662047
10.560864	10.5611558	10.5629341
10.5527839	10.5530489	10.5542622
10.5382307	10.5387402	10.538666
10.5319973	10.5319994	10.5319993
10.5187759	10.5184514	10.5178746
10.5021977	10.5017849	10.5002204
10.4825856	10.4806897	10.4794163
10.4509647	10.4467826	10.4461081



Resultados:

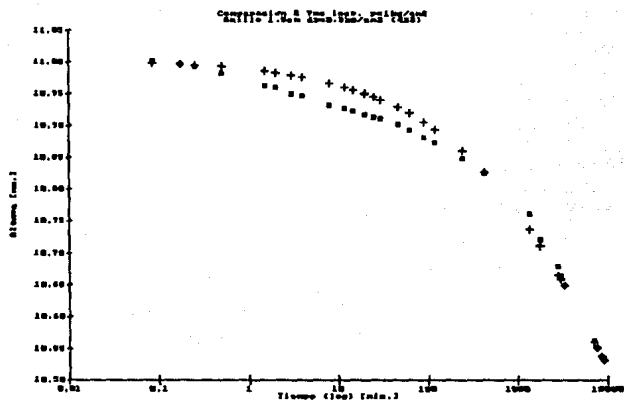
$$\delta = 0.47$$

$$t_k = 20224$$

$$X_t = 1.165497$$

Ecuación:

$$H = 11.005 - 1.165497 / (1 + (20224/t)^{0.47})$$



Resultados:

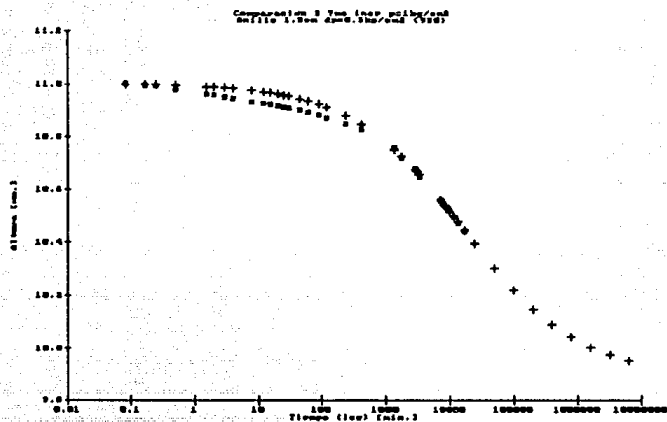
$$\delta = 0.434$$

$$t^* = 23675$$

$$x_t = 1.188$$

Ecuación:

$$H = 11.003 - 1.188 / (1 + (23675/t)^{0.434})$$



Resultados:

$$\delta = 0.491$$

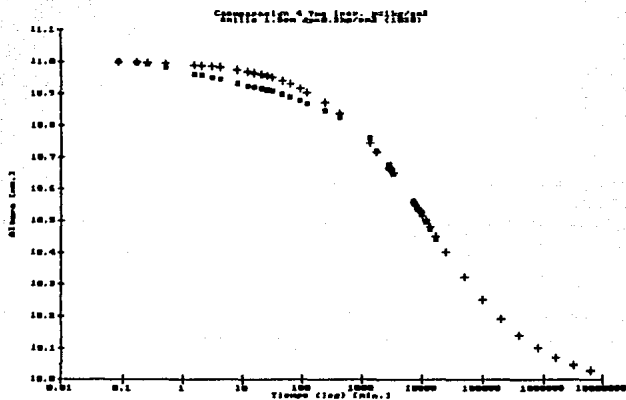
$$t\delta = 16568$$

$$Xt = 1.106998$$

Ecuación:

$$H = 11.003 - 1.106998 / (1 + (16568/t)^{0.491})$$





Resultados:

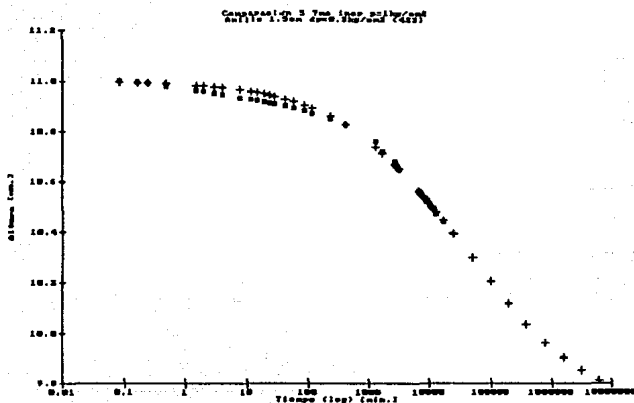
$$\delta = 0.492$$

$$t_k = 12130$$

$$X_t = 1.017002$$

Ecuación:

$$H = 11.003 - 1.017002 / (1 + (12130/t)^{0.492})$$



Resultados:

$$\delta = 0.417$$

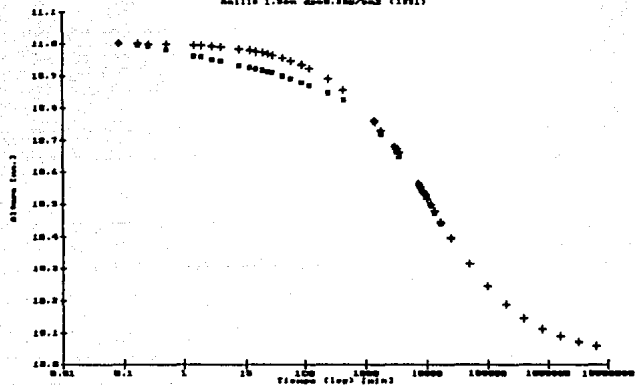
$$t^* = 37937$$

$$X_t = 1.330495$$

Ecuación:

$$H = 11.003 - 1.330495 / (1 + (37937/t)^{0.417})$$

Estimación de los parámetros de la ley



Resultados:

$$\delta = 0.55$$

$$t_k = 9943$$

$$X_t = 0.9689999$$

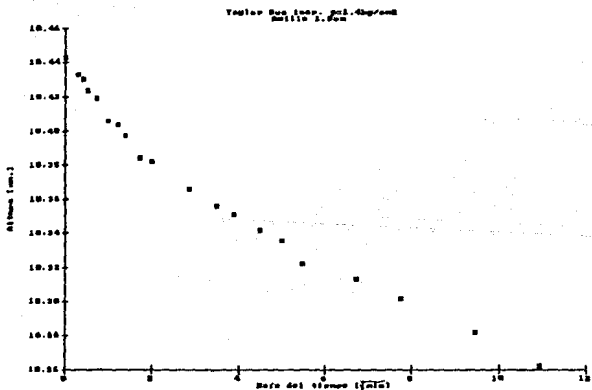
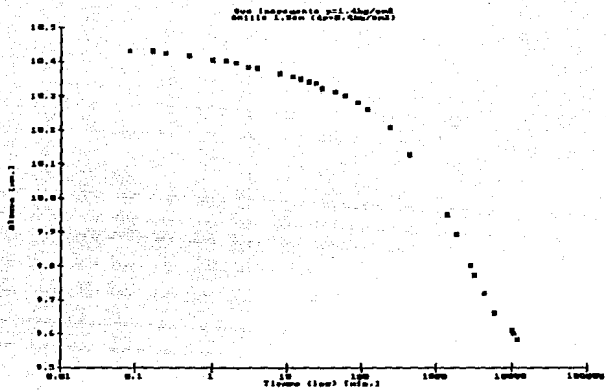
Ecuación:

$$H = 11.003 - 0.9689999 / (1 + (9943/t)^{0.55})$$

Octavo incremento de carga ( $p=1.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

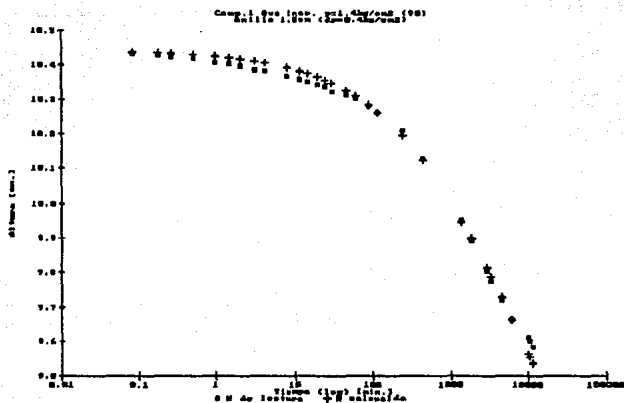
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	14.059	0	10.443
0.083	14.069	0.01	10.433
0.17	14.072	0.013	10.43
0.25	14.078	0.019	10.424
0.5	14.083	0.024	10.419
1	14.096	0.037	10.406
1.5	14.098	0.039	10.404
2	14.105	0.046	10.397
3	14.118	0.059	10.384
4	14.12	0.061	10.382
8	14.136	0.077	10.366
12	14.146	0.087	10.356
15	14.151	0.092	10.351
20	14.16	0.101	10.342
25	14.166	0.107	10.336
30	14.1795	0.1205	10.3225
45	14.189	0.13	10.313
60	14.2005	0.1415	10.3015
90	14.22	0.161	10.282
120	14.24	0.181	10.262
240	14.294	0.235	10.208
442	14.374	0.315	10.128
1402	14.55	0.491	9.952
1855	14.61	0.551	9.892
2895	14.7	0.641	9.802
3320	14.728	0.669	9.774
4470	14.782	0.723	9.72
6171	14.839	0.78	9.663
10056	14.891	0.832	9.611
10551	14.901	0.842	9.601
11541	14.918	0.859	9.584



Octavo incremento de carga ( $p=1.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
ERR	ERR	ERR	ERR
10.4378617	10.4321738	10.4394406	10.4387089
10.4356182	10.4360322	10.4377354	10.4367467
10.4340319	10.4345124	10.4365033	10.4353448
10.430283	10.4309065	10.4335239	10.4319938
10.4249845	10.4257855	10.427191	10.4271911
10.4209272	10.4218491	10.4257985	10.4234721
10.4175143	10.41853	10.4229041	10.4202259
10.4115077	10.4129665	10.4179936	10.4150207
10.407017	10.4082947	10.4139121	10.4105375
10.3927354	10.3938859	10.4007267	10.3966572
10.3812126	10.3827365	10.3905921	10.3860279
10.3741265	10.375946	10.384054	10.3792144
10.3638613	10.3657819	10.3744659	10.369275
10.3540777	10.3567084	10.3660251	10.3605699
10.3448577	10.3487538	10.3584083	10.3527466
10.3364977	10.3428784	10.35388678	10.347924
10.3297199	10.33820405	10.3225558	10.3162434
10.2823456	10.2847393	10.2956122	10.2890797
10.2599965	10.2624073	10.2733641	10.2667797
10.1948693	10.1971688	10.2075786	10.2013312
10.1228779	10.1248304	10.1337317	10.1284145
9.94714946	9.94810694	9.95199961	9.94975497
9.89734575	9.89802271	9.90060742	9.89915547
9.81362667	9.81391306	9.81476499	9.81434544
9.78695289	9.78714409	9.78760617	9.78741197
9.72797576	9.72801919	9.72796206	9.7280489
9.6630001	9.66300003	9.66300003	9.66300012
9.56443761	9.56445584	9.56622766	9.56517046
9.55482277	9.55508616	9.55691461	9.55568847
9.53694977	9.53730374	9.53966713	9.53809398



Resultados:

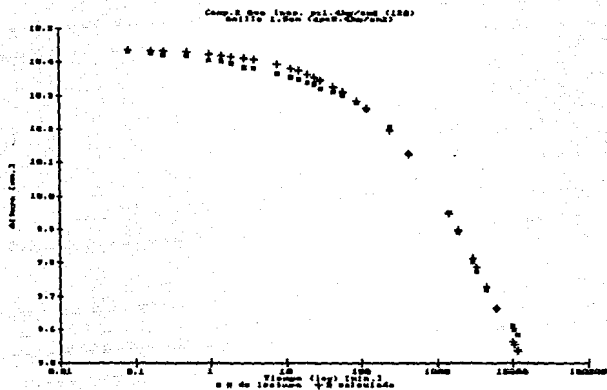
$$\delta = 0.507$$

$$t\delta = 6745$$

$$Xt = 1.596005$$

Ecuación:

$$H = 10.443 - 1.596005 / (1 + (6745/t)^{0.507})$$



Resultados:

$$\delta = 0.514$$

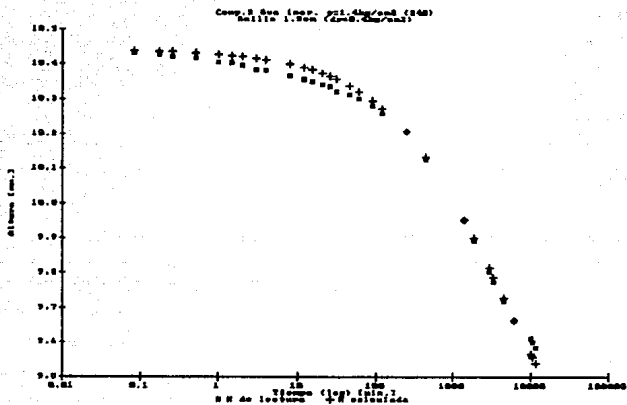
$$t_f = 6381$$

$$Xt = 1.573504$$

Ecuación:

$$H = 10.443 - 1.573504 / (1 + (6381/t)^{0.514})$$





Resultados:

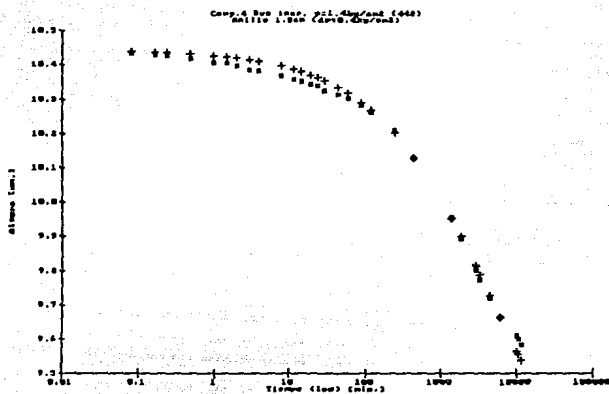
$$\delta = 0.548$$

$$t^* = 4972$$

$$X_t = 1.473001$$

Ecuación:

$$H = 10.443 - 1.473001 / (1 + (4972/t)^{0.548})$$



Resultados:

$$\delta = 0.527$$

$$t^* = 5772$$

$$Xt = 1.533002$$

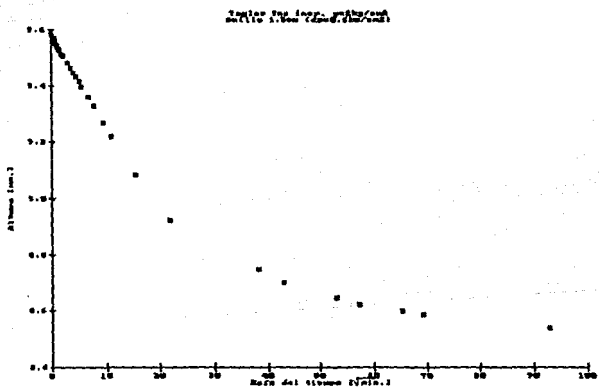
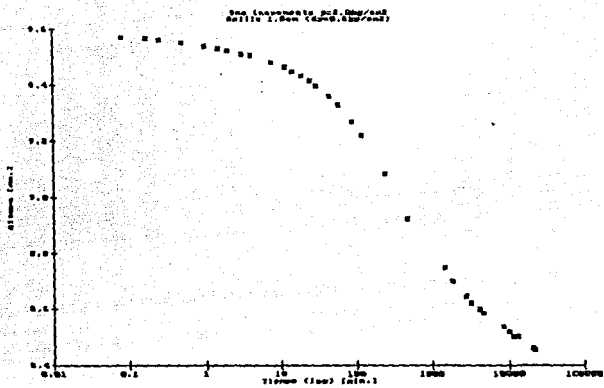
Ecuación:

$$H = 10.443 - 1.533002 / (1 + (5772/t)^{0.527})$$

Noveno incremento de carga ( $p=2.0 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

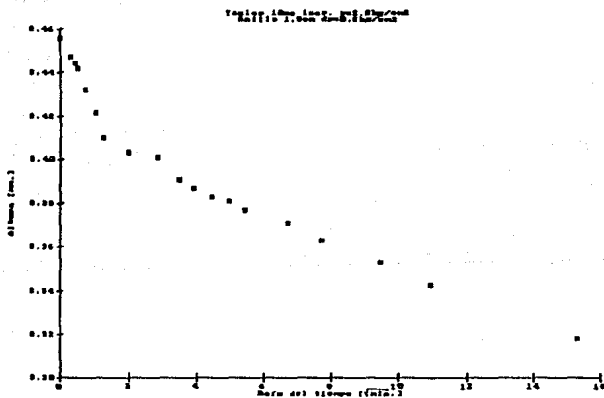
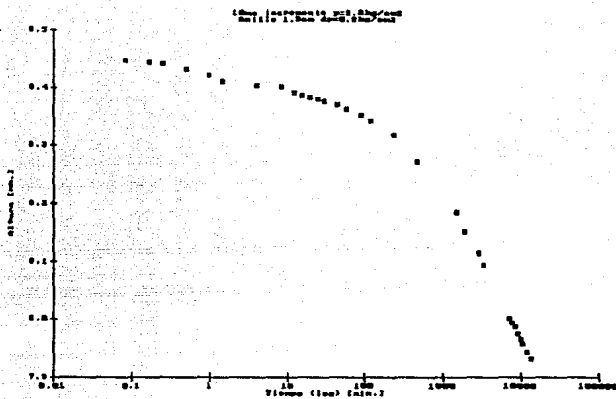
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	14.918	0	9.584
0.083	14.93	0.012	9.572
0.17	14.934	0.016	9.565
0.25	14.939	0.021	9.563
0.5	14.949	0.031	9.553
1	14.961	0.043	9.541
1.5	14.971	0.053	9.531
2	14.979	0.061	9.523
3	14.989	0.071	9.513
4	14.995	0.077	9.507
8	15.021	0.103	9.481
12	15.039	0.121	9.463
15	15.055	0.137	9.447
20	15.07	0.152	9.432
25	15.086	0.168	9.416
30	15.106	0.188	9.396
45	15.141	0.223	9.361
60	15.173	0.255	9.329
90	15.232	0.314	9.27
120	15.281	0.363	9.221
240	15.419	0.501	9.083
477	15.577	0.659	8.925
1465	15.753	0.835	8.749
1847	15.8	0.882	8.702
2822	15.856	0.938	8.646
3271	15.88	0.962	8.622
4274	15.904	0.986	8.598
4787	15.916	0.998	8.586
8601	15.962	1.044	8.54
10035	15.983	1.065	8.519
11444	15.998	1.08	8.504
12855	15.999	1.081	8.503
20114	16.04	1.122	8.462
21515	16.046	1.128	8.456



Definido incremento de carga ( $p=2.8 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm.

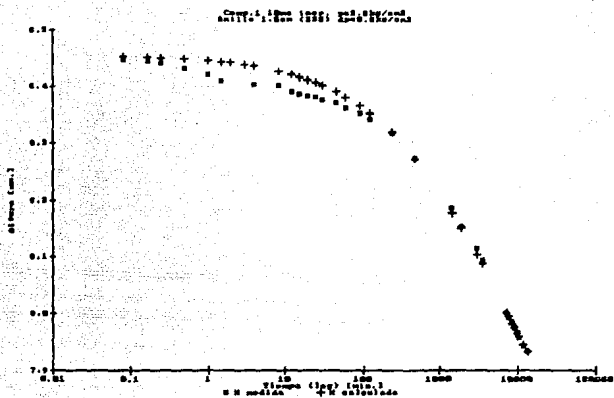
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	6.046	0	8.456
0.083	6.055	0.009	8.447
0.17	6.058	0.012	8.444
0.25	6.06	0.014	8.442
0.5	6.07	0.024	8.432
1	6.0805	0.0345	8.4215
1.5	6.072	0.046	8.41
2			
3			
4	6.099	0.053	8.403
8.25	6.101	0.055	8.401
12.25	6.111	0.065	8.391
15.5	6.115	0.067	8.387
20	6.119	0.073	8.383
25	6.121	0.075	8.381
30	6.125	0.079	8.377
45	6.131	0.085	8.371
60	6.139	0.093	8.363
90	6.149	0.103	8.353
120	6.1595	0.1135	8.3425
235	6.184	0.138	8.318
480	6.23	0.184	8.272
1471	6.316	0.27	8.186
1870	6.35	0.304	8.152
2942	6.368	0.342	8.114
3419	6.408	0.362	8.094
7330	6.501	0.455	8.001
7745	6.509	0.463	7.993
8649	6.515	0.469	7.987
9131	6.526	0.48	7.976
10107	6.536	0.49	7.966
10570	6.544	0.498	7.958
11322	6.559	0.513	7.943
13346	6.569	0.523	7.933



Último incremento de carga ( $p=2.8 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 1.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
8.45296313	8.45207071	8.45339784	8.45378819	8.45295974
8.45166076	8.45180563	8.45223749	8.45276077	8.451665732
8.45074737	8.45096966	8.45141707	8.452003371	8.45074043
8.44858538	8.4488014	8.44945464	8.4502552	8.44858303
8.44555097	8.44582974	8.44666886	8.44770774	8.4455508
8.4427766	8.44355869	8.44462472	8.44572781	8.4427766
8.44129493	8.44165081	8.44271525	8.44404643	8.44129891
8.43805647	8.43846474	8.4396795	8.44120747	8.43806441
8.43534458	8.43579324	8.43712245	8.43880116	8.43535617
8.42662985	8.42719115	8.42883181	8.43092438	8.42665457
8.4204625	8.4210919	8.42291128	8.42524365	8.42049851
8.41622133	8.41689092	8.41681691	8.42129312	8.41626376
8.41108232	8.41179701	8.41383642	8.41646679	8.41113393
8.40607189	8.40682628	8.40896206	8.4117231	8.40613288
8.40159177	8.4023782	8.404589	8.4074525	8.40166119
8.39702474	8.39110253	8.39346288	8.39653169	8.39033859
8.38091386	8.38181387	8.38425987	8.3874471	8.38102315
8.3657096	8.36666395	8.3691901	8.37248898	8.36584829
8.35331336	8.35429739	8.35684357	8.36017099	8.35247559
8.31847403	8.31948736	8.32192609	8.32510546	8.31869925
8.2713704	8.27232913	8.27436995	8.27699425	8.27166489
8.17997204	8.17865451	8.17957546	8.18064228	8.17833949
8.15141462	8.15200011	8.15260657	8.15324186	8.1517839
8.10375518	8.10416577	8.10428271	8.10425913	8.10410431
8.08733568	8.08748763	8.08766849	8.08746593	8.08767056
8.00117963	8.00127744	8.00092947	8.00035557	8.00137397
7.97487354	7.99495784	7.97461665	7.99408005	7.99505328
7.98223855	7.98229797	7.98198503	7.98148393	7.98238673
7.97603913	7.97608766	7.97579597	7.97533255	7.97617088
7.96445335	7.96448402	7.96424566	7.96387158	7.96455269
7.95923595	7.95927982	7.95917051	7.95884392	7.95944032
7.94570082	7.94571786	7.94560443	7.94542958	7.94575094
7.93267777	7.93299974	7.93299976	7.93299975	7.93299978



Resultados:

$$\delta = 0.5$$

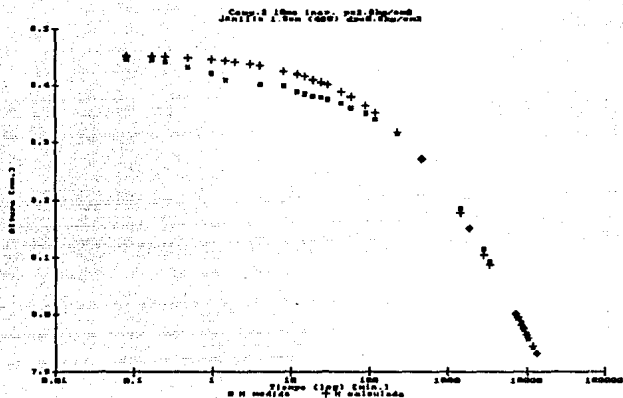
$$t\delta = 7553$$

$$Xt = 0.9164976$$

Ecuación:

$$H = 8.456 - 0.9164976 / (1 + (7553/t)^{0.5})$$





Resultados:

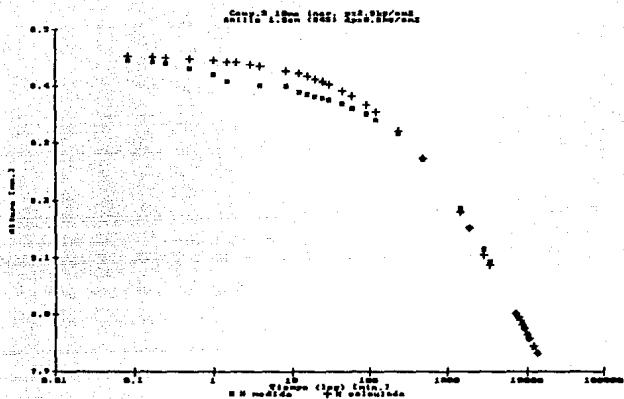
$$\delta = 0.503$$

$$t\# = 7412$$

$$Xt = 0.9119977$$

Ecuación:

$$H = 3.456 - 0.9119977 / (1 + (7412/t)^{0.503})$$



**Resultados**

$$\delta = 0.516$$

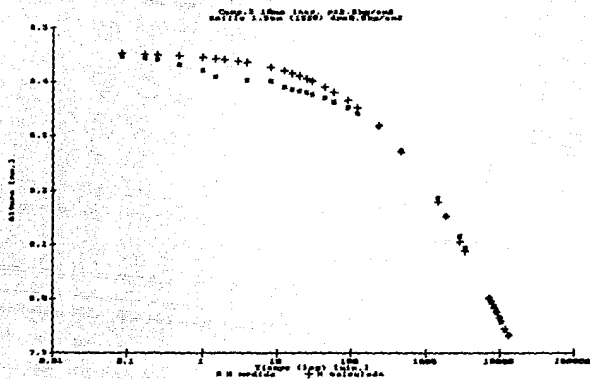
$$t_0 = 6691$$

$$X_t = 0.8891993$$

**Ecuación:**

$$f = 8.456 - 0.8891993 / (1 + (6691/t)^{0.516})$$





Resultados:

$$\delta = 0.499$$

$$t\delta = 7665$$

$$Xt = 0.9174996$$

Ecuación:

$$H = 8.456 - 0.9174996 / (1 + (7665/t)^{0.499})$$

**Consolidómetro 1 con anillo de 2.5 cm.**

Esta muestra fue sometida a 8 incrementos de carga. La prueba duró casi 5 meses. Sus características son:

**Datos de la muestra:**

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 29/07/89  
Profundidad: 0.9 m.

**Datos del anillo:**

Diámetro:  $d = 7.995$  cm.  
Área:  $A = 50.203$  cm<sup>2</sup>.  
Espesor:  $z = 2.475$  cm.  
Volumen:  $V = 125.256$  cm<sup>3</sup>.

**Peso volumétrico del suelo:**

Peso de vidrios, anillo y muestra: 739.95 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 587.44 gr.  
Peso de la muestra: 152.51 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.218$  gr/cm<sup>3</sup>

**Contenido de agua:**

Peso de cápsula: 60.47 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 75.78 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 65.57 gr.  
 $\therefore w = 200.32$  %

**Densidad de sólidos:**

Peso del matraz con agua y suelo: 698.05 gr.  
Temperatura: 33.5 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 666.063 gr.  
Peso de refractario: 515.42 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 567.94 gr.  
 $W_s = 54.52$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.42$

**Esfuerzo efectivo in situ (NAF=1.5m. y suelo 100% saturado):**

$\gamma_m = 1.218$  gr/cm<sup>3</sup> =  $1.218$  T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.218 \times 0.9 = 1.0962$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.6$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 1.0962 + 0.6 = 1.7$  T/m<sup>2</sup>

**Relaciones de vacíos:**

Inicial:  $e_0 = wS_s = 4.85$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 152.56$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 50.8$  gr.  
 $H_s = W_s / (S_s \gamma_0 A)$   
 $\therefore e = (H_m \gamma_0 S_s \gamma_0 A / W_s) - 1 = 2.392 H_m - 1$   
 $H_m =$  altura de la muestra.

**Fechas de cada incremento de carga:**

Primero: 16/10/89  
Segundo: 23/10/89

Tercero: 08/11/89  
 Cuarto: 28/11/89  
 Quinto: 03/01/90  
 Sexto: 15/01/90  
 Séptimo: 23/01/90  
 Octavo: 07/02/90

**Incrementos de Carga (todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Segundo:	$\Delta\sigma/\sigma = 1$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$
Tercero:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$
Cuarto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.3$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.4 \text{ kg/cm}^2$
Quinto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.25$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$
Sexto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.7 \text{ kg/cm}^2$
Séptimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 0.95 \text{ kg/cm}^2$
Octavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.375 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma = 1.325 \text{ kg/cm}^2$

**Desmontado:**

Al final del octavo incremento.  
 Fecha: 02/03/90

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:  $H_i = 24.95 \text{ mm.}$   
 Segundo incremento:  $H_i = 24.528 \text{ mm.}$   
 Tercer incremento:  $H_i = 23.992 \text{ mm.}$   
 Cuarto incremento:  $H_i = 23.267 \text{ mm.}$   
 Quinto incremento:  $H_i = 22.178 \text{ mm.}$   
 Sexto incremento:  $H_i = 21.49 \text{ mm.}$   
 Séptimo incremento:  $H_i = 19.697 \text{ mm.}$   
 Octavo incremento:  $H_i = 17.98 \text{ mm.}$

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = [min, mm.]

Primer incremento:	C(t, H) = No pudo ser sacado.
	T(t, H) = (9.4, 24.662)
Segundo incremento:	C(t, H) = (10.5, 24.35)
	T(t, H) = No pudo ser sacado.
Tercer incremento:	C(t, H) = (7.2, 23.892)
	T(t, H) = (6.75, 23.894)
Cuarto incremento:	C(t, H) = (5.3, 23.194)
	T(t, H) = (9.4, 23.1767)
Quinto incremento:	C(t, H) = (19.4, 22.1021)
	T(t, H) = (14, 22.1061)
Sexto incremento:	C(t, H) = No pudo ser sacado.
	T(t, H) = (15, 21.3139)
Séptimo incremento:	C(t, H) = (8.35, 19.58)
	T(t, H) = (33.8, 19.491)
Octavo incremento:	C(t, H) = (11.4, 17.855)
	T(t, H) = (12.8, 17.8516)

**Notas:**

a) El 100% de la consolidación primaria también se da alrededor de los 10 min., y en general los dos métodos, Casagrande y Taylor, concuerdan.

b) Los puntos de el fin de la consolidación primaria en los primeros incrementos no pudieron sacarse debido a la forma de

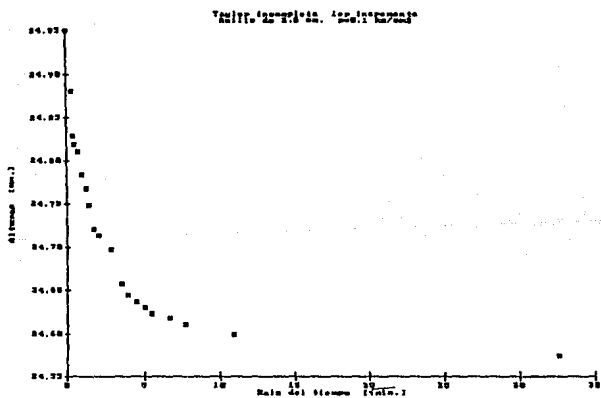
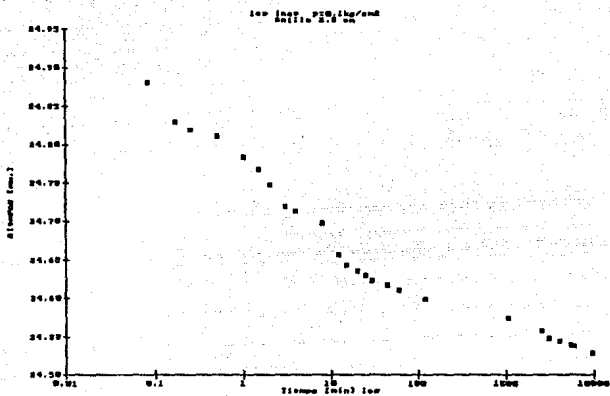
la curva. En el sexto incremento, por el método de Casagrande no fue posible obtener el punto del 100%, debido a que en la curva de consolidación no se notó el efecto primario.

Primer incremento de carga ( $p=0.1\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	24.871	0	24.95
0.083	24.802	0.069	24.881
0.17	24.75	0.121	24.829
0.25	24.74	0.131	24.819
0.5	24.732	0.139	24.811
1	24.705	0.166	24.784
1.5	24.689	0.182	24.768
2	24.67	0.201	24.749
3	24.641	0.23	24.72
4	24.635	0.236	24.714
8	24.619	0.252	24.698
12	24.578	0.293	24.657
15	24.565	0.306	24.644
20	24.557	0.314	24.636
25	24.551	0.32	24.63
30	24.544	0.327	24.623
45	24.539	0.332	24.618
60	24.532	0.339	24.611
120	24.52	0.351	24.599
1059	24.495	0.376	24.574
2501	24.479	0.392	24.558
3069	24.469	0.402	24.548
3948	24.465	0.406	24.544
5428	24.46	0.411	24.539
5712	24.459	0.412	24.538
5876	24.459	0.412	24.538
9698	24.449	0.422	24.528

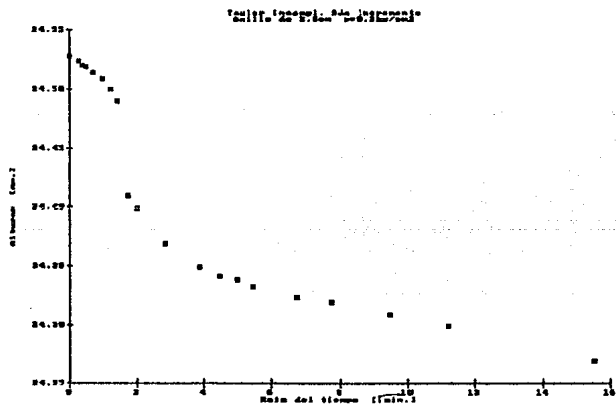
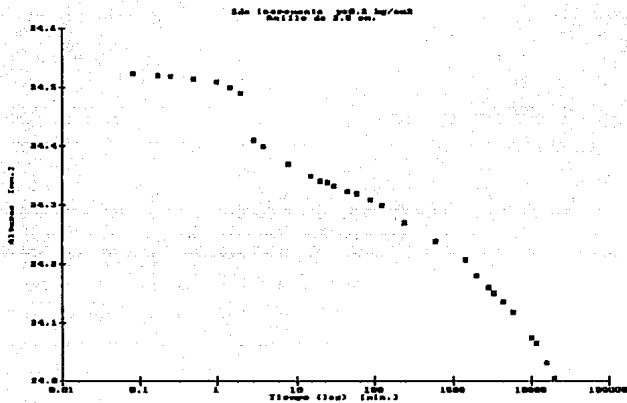




Segundo incremento (p=0.2 kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2.5 cm.

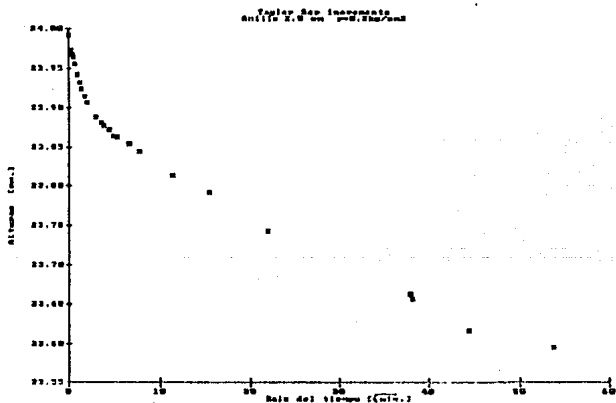
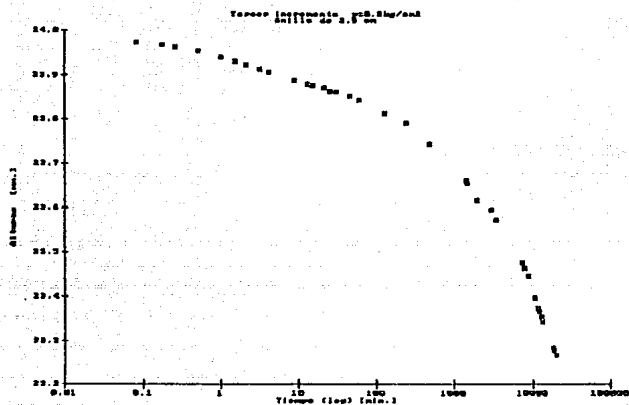
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	24.449	0	24.528
0.083	24.445	0.004	24.524
0.17	24.441	0.008	24.52
0.25	24.44	0.009	24.519
0.5	24.435	0.014	24.514
1	24.43	0.019	24.509
1.5	24.421	0.028	24.5
2	24.411	0.038	24.49
3	24.331	0.118	24.41
4	24.32	0.129	24.399
8	24.29	0.159	24.369
15	24.27	0.179	24.349
20	24.262	0.187	24.341
25	24.259	0.19	24.338
30	24.253	0.196	24.332
45	24.244	0.205	24.323
60	24.24	0.209	24.319
90	24.23	0.219	24.309
125	24.22	0.229	24.299
241	24.1905	0.2585	24.2695
600	24.1595	0.2895	24.2385
1472	24.128	0.321	24.207
2033	24.101	0.348	24.18
2928	24.08	0.369	24.159
3777	24.071	0.378	24.15
4359	24.056	0.393	24.135
5797	24.039	0.41	24.118
10120	23.996	0.453	24.075
11586	5.422	0.463	24.065
15891	5.388	0.497	24.031
20203	5.361	0.524	24.004
21662	5.354	0.531	23.997
23076	5.349	0.536	23.992



Tercer incremento (p=0.3 Kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	5.349	0	23.992
0.083	5.33	0.019	23.973
0.17	5.325	0.024	23.968
0.25	5.321	0.028	23.964
0.5	5.312	0.037	23.955
1	5.299	0.05	23.942
1.5	5.289	0.06	23.932
2	5.281	0.068	23.924
3	5.271	0.078	23.914
4	5.264	0.085	23.907
9	5.245	0.104	23.888
13	5.238	0.111	23.881
15	5.234	0.115	23.877
21	5.229	0.12	23.872
25	5.221	0.128	23.864
30	5.22	0.129	23.863
45	5.211	0.138	23.854
60	5.201	0.148	23.844
129	5.171	0.178	23.814
240	5.149	0.2	23.792
480	5.1	0.249	23.743
1439	5.019	0.33	23.662
1458	5.013	0.336	23.656
1974	4.974	0.375	23.617
2902	4.952	0.397	23.595
3401	4.931	0.418	23.574
7207	4.833	0.516	23.476
7709	4.82	0.529	23.463
8729	4.803	0.546	23.446
10531	4.754	0.595	23.397
11552	4.73	0.619	23.373
12059	4.724	0.625	23.367
12965	4.71	0.639	23.353
13460	4.7	0.649	23.343
18690	4.641	0.708	23.284
19165	4.635	0.714	23.278
20315	4.624	0.725	23.267



Tercer Puntamento (p=0,3 kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2,5 cm. Curvas teóricas

Ecuación 1 Ecuación 2 Ecuación 3

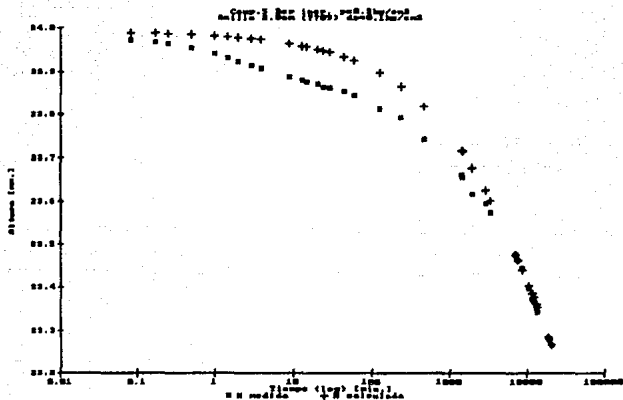
ERR	ERR	ERR
23.9892085	23.9905452	23.989353
23.9880842	23.9898465	23.988236
23.9872753	23.9893409	23.987451
23.9853802	23.9881162	23.98561
23.9827288	23.9862294	23.983025
23.9807127	23.9849257	23.981056
23.9790227	23.9837247	23.979404
23.9762071	23.9816802	23.976646
23.9738496	23.9799323	23.974334
23.9651634	23.973267	23.965796
23.959978	23.9691414	23.960688
23.957704	23.9673062	23.958445
23.9517148	23.9624002	23.952532
23.9482202	23.9594936	23.94908
23.9442496	23.9561552	23.945154
23.9412228	23.9474856	23.935129
23.9257064	23.9401207	23.926786
23.8971944	23.9144007	23.898463
23.8658925	23.8850315	23.86729
23.8193002	23.8277526	23.820783
23.7156246	23.7247513	23.717017
23.7141117	23.7231898	23.715501
23.6772326	23.6949492	23.678531
23.6248116	23.640152	23.625951
23.6013835	23.6155526	23.602445
23.4758789	23.4835005	23.476488
23.4634773	23.4704812	23.464042
23.4421223	23.4459987	23.440605
23.4027314	23.4079713	23.404092
23.3353147	23.3887929	23.385617
23.3766641	23.379802	23.37694
23.3219324	23.364518	23.362164
23.3542444	23.3565563	23.354454
23.28505	23.2853981	23.285086
23.2796749	23.2798709	23.27966
23.2563995	23.2569998	23.267

Tercer incremento. (p=0.2 g/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2.5 cm. Curvas teóricas

Ecuación 4 Ecuación 5 Ecuación 6

ERR	SFR	ERR
23.9800992	23.9798179	23.9832434
23.9765478	23.9762373	23.9804453
23.9742221	23.9738973	23.9785889
23.9691379	23.968794	23.9744772
23.962622	23.962272	23.9691183
23.9579951	23.9576504	23.9652621
23.9542854	23.9539495	23.9621435
23.9483755	23.9480607	23.957131
23.9436428	23.9433502	23.9530813
23.9274532	23.9272617	23.9390194
23.9184881	23.9183648	23.931111
23.9146853	23.9145927	23.927733
23.9049873	23.9049767	23.9190597
23.899514	23.8995334	23.9141312
23.8934489	23.8935376	23.9086352
23.8785697	23.8787968	23.8950484
23.8667633	23.8670981	23.8841544
23.8295731	23.830229	23.8492654
23.7923156	23.7932369	23.8135427
23.7414647	23.742611	23.7637075
23.6404376	23.6414054	23.6615453
23.6390503	23.640009	23.6601162
23.6058148	23.6064962	23.6256832
23.5602234	23.5603325	23.5778628
23.5403667	23.540154	23.5568335
23.437995	23.4353778	23.4465206
23.428167	23.4252461	23.4358861
23.4097508	23.4062392	23.4157175
23.3813031	23.3767849	23.3843896
23.3670027	23.3619376	23.3685671
23.3603053	23.3549745	23.36114
23.3489261	23.343313	23.348497
23.342	23.3369544	23.3419008
23.2899655	23.2814693	23.2825166
23.2698329	23.277129	23.279633
23.261774	23.2669976	23.2669996



Resultados:

$$\delta = 0.488$$

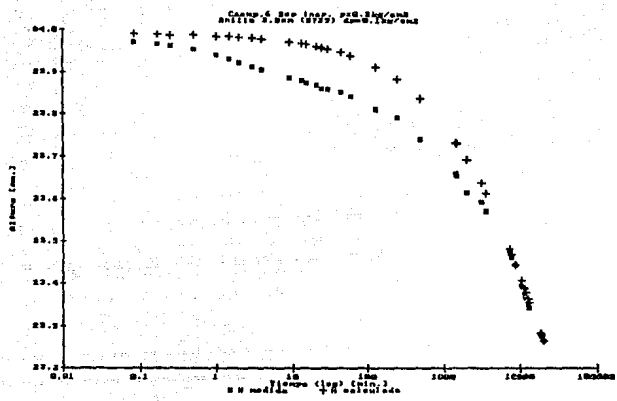
$$t_0 = 52988$$

$$Xt = 1.882516$$

Ecuación:

$$H = 23.992 - 1.883 / (1 + (52988/t)^{0.488})$$





Resultados:

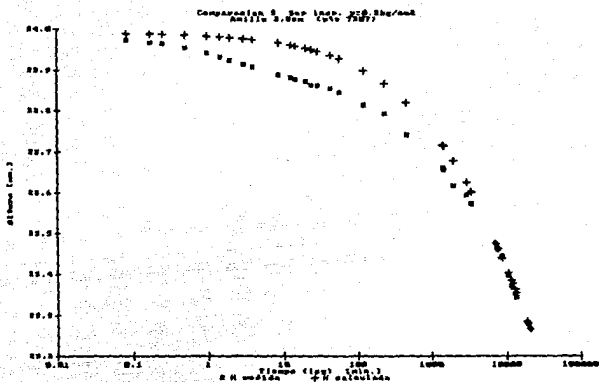
$$\delta = 0.548$$

$$t^* = 30951$$

$$X_t = 1.638004$$

Ecuación:

$$H = 23.92 - 1.638004 / (1 + (30951/t)^{0.548})$$



Resultados:

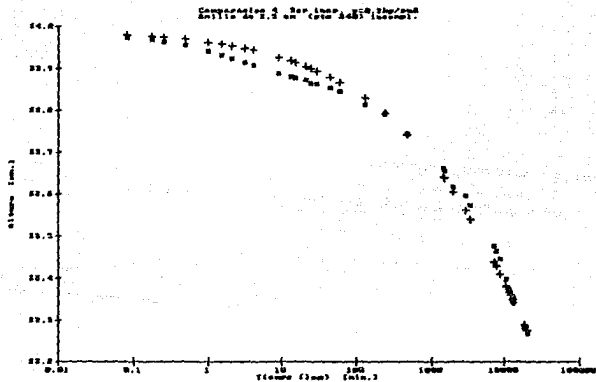
$$\delta = 0.492$$

$$t_t = 50937$$

$$X_t = 1.864515$$

Ecuación:

$$ij = 23.972 - 1.864515 / (1 + (50937/t)^{0.492})$$



Resultados:

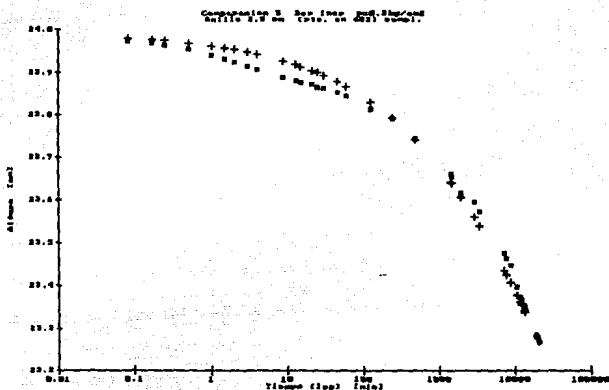
$$\delta = 0.367$$

$$t\ddagger = 88540$$

$$Xt = 1.943868$$

Ecuación:

$$H = 23.992 - 1.943868 / (1 + (88540/t)^{0.367})$$



Resultados:

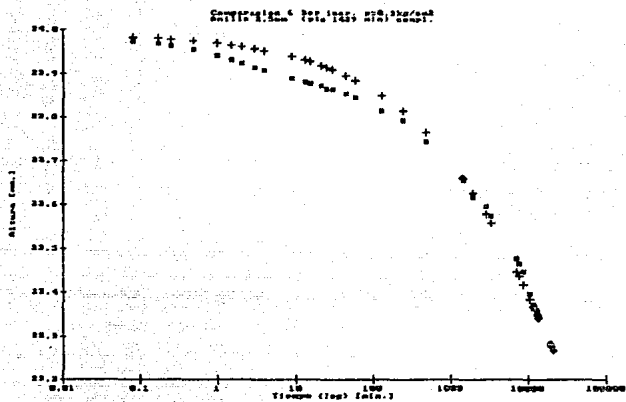
$$\delta = 0.362$$

$$t_f = 135462$$

$$Xt = 2.165128$$

Ecuación:

$$H = 23.992 - 2.165128 / (1 + (135462/t)^{0.362})$$



Resultados:

$$\delta = 0.389$$

$$t^* = 117588$$

$$X_t = 2.159308$$

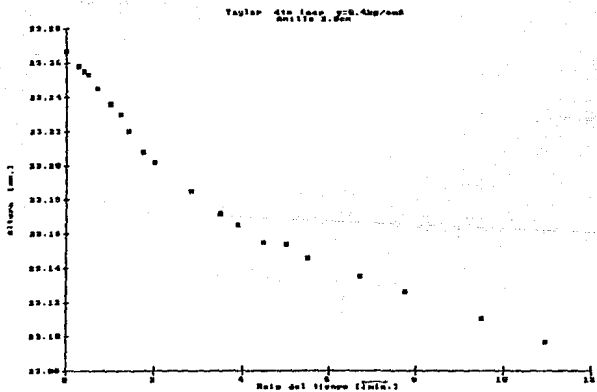
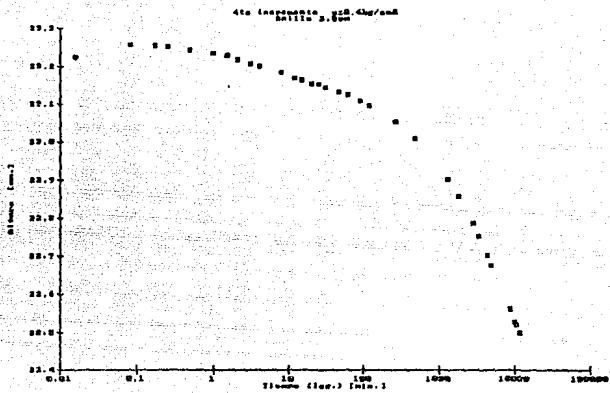
Ecuación:

$$H = 27.992 - 2.159308 / (1 + (117588/t)^{0.389})$$

Cuarto incremento ( $\rho=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	4.552	0	23.267
0.083	4.543	0.009	23.258
0.17	4.54	0.012	23.255
0.25	4.538	0.014	23.253
0.5	4.53	0.022	23.245
1	4.521	0.031	23.236
1.5	4.515	0.037	23.23
2	4.505	0.047	23.22
3	4.493	0.059	23.208
4	4.487	0.065	23.202
8	4.47	0.082	23.185
12	4.457	0.095	23.172
15	4.45	0.102	23.165
20	4.44	0.112	23.155
25	4.439	0.113	23.154
30	4.431	0.121	23.146
45	4.42	0.132	23.135
60	4.411	0.141	23.126
90	4.396	0.156	23.111
120	4.382	0.17	23.097
259	4.341	0.211	23.056
469	4.296	0.256	23.011
1311	4.19	0.362	22.905
1780	4.145	0.407	22.86
2729	4.074	0.478	22.789
3209	4.04	0.512	22.755
4214	3.989	0.563	22.704
4731	3.961	0.591	22.676
8639	3.849	0.703	22.564
10150	3.813	0.739	22.528
10449	3.806	0.746	22.521
11535	3.784	0.768	22.499
13002	3.753	0.799	22.468
14442	3.729	0.823	22.444
18591	3.679	0.873	22.394
21622	3.648	0.904	22.363
23082	3.63	0.922	22.345
51784	3.463	1.089	22.178

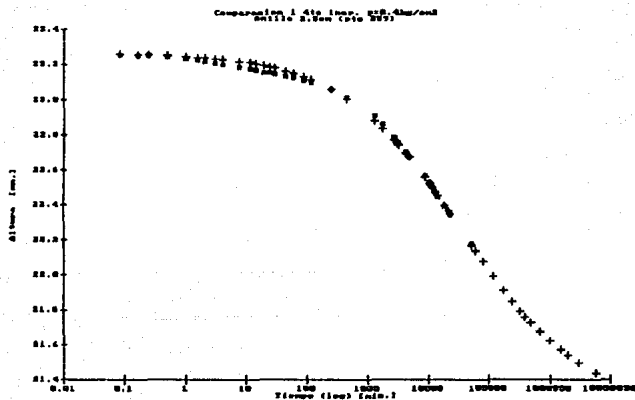


Cuanto incremento ( $\rho=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
23.2600822	23.2616122	23.2625487	23.2643367	23.2647205
23.2575439	23.2594973	23.2607161	23.2630951	23.2636189
23.2558145	23.2580361	23.2594368	23.2622032	23.2628208
23.2518793	23.2546627	23.2564519	23.2600598	23.2608855
23.2465736	23.2500715	23.2522988	23.2569649	23.2580592
23.2426544	23.2465521	23.2491555	23.2545539	23.2558381
23.2394317	23.2426277	23.2465294	23.2525027	23.2539379
23.2341647	23.2389761	23.2421692	23.2490318	23.2507039
23.2298392	23.2350023	23.2385322	23.2460828	23.2479407
23.2159924	23.2251657	23.2274808	23.2368749	23.2392408
23.2075659	23.21436	23.2191735	23.2297522	23.2324517
23.2016646	23.2088029	23.2139006	23.2251562	23.2280488
23.1932164	23.2007988	23.2062662	23.2184111	23.2215603
23.1859491	23.1938691	23.1996255	23.2124656	23.2158173
23.1795067	23.1876957	23.1936869	23.2070926	23.2106106
23.165395	23.1721761	23.1786361	23.1932652	23.1971476
23.1502821	23.1593879	23.166227	23.1816664	23.1857941
23.1291588	23.1386738	23.1459381	23.1623768	23.1668123
23.1120771	23.1217981	23.1293104	23.1463109	23.1509234
23.0564989	23.0662961	23.0741414	23.0917284	23.096542
23.0021956	23.0114398	23.0190821	23.0295823	23.0404312
22.8804658	22.8872687	22.8953251	22.9054395	22.9086047
22.8368678	22.8426185	22.8478994	22.8579218	22.8604548
22.7701199	22.7742561	22.7782786	22.7851071	22.7866938
22.7430563	22.7465653	22.7500762	22.7556855	22.7569207
22.6954275	22.6979176	22.7005552	22.7042152	22.7049069
22.6744758	22.6765012	22.6787716	22.6816728	22.6821622
22.5583182	22.5586897	22.5592618	22.5594599	22.5593586
22.5254951	22.5256138	22.5258402	22.525819	22.5257372
22.5195149	22.5195999	22.5197709	22.5197387	22.5196702
22.4990004	22.4990005	22.4990005	22.4990005	22.4990003
22.4738765	22.4738392	22.4736715	22.4738625	22.4739952
22.4515968	22.4515906	22.4513145	22.4518185	22.4521153
22.3972545	22.3975942	22.3972244	22.3990778	22.3999587
22.3643283	22.3650754	22.3647742	22.3678615	22.369224
22.3500063	22.3509796	22.3507394	22.3544634	22.3560654
22.1715494	22.1760276	22.1803388	22.1971829	22.2032361





Resultados:

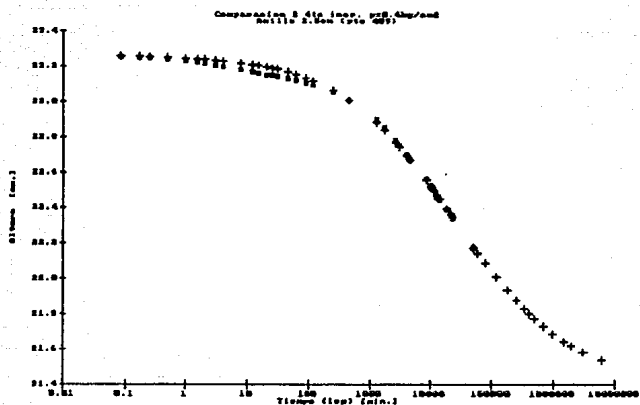
$$\delta = 0.438$$

$$t_f = 35456$$

$$X_t = 2.023526$$

Ecuación:

$$H = 23.267 - 2.023526 / (1 + (35456/t)^{0.438})$$



Resultados:

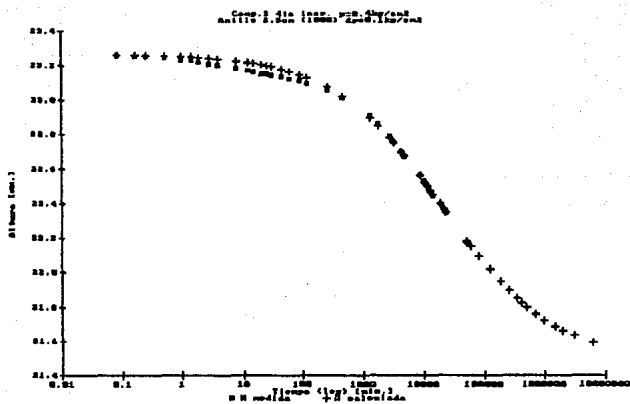
$$\delta = 0.463$$

$$t\# = 24799$$

$$Xt = 1.863018$$

Ecuación:

$$H = 23.267 - 1.863018 / (1 + (24799/t)^{0.463})$$



Resultados:

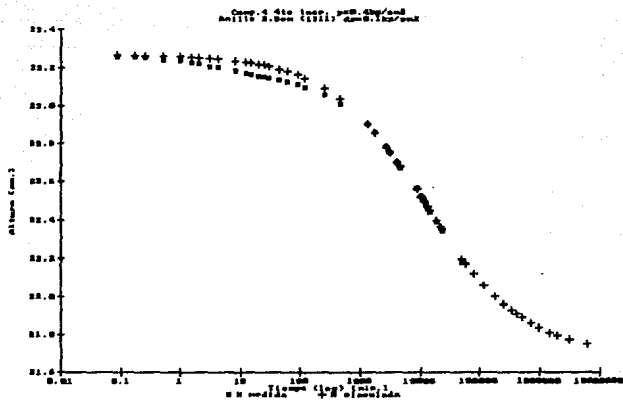
$$\delta = 0.482$$

$$t_f = 20522$$

$$X_t = 1.782014$$

Ecuación:

$$H = 23.267 - 1.782014 / (1 + (20522/t)^{0.482})$$

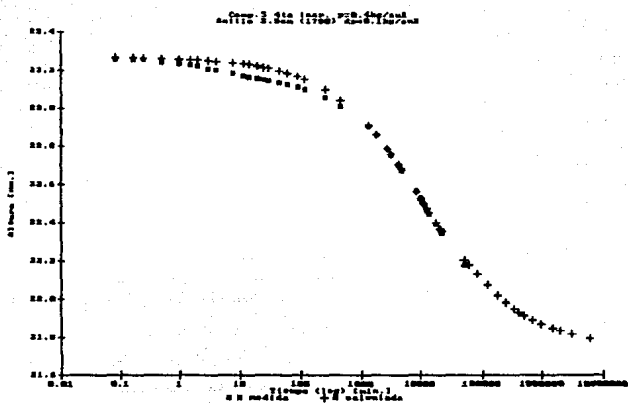


**Resultados:**

$\delta = 0.535$   
 $t_f = 12523$   
 $X_t = 1.570504$

**Ecuación:**

$$H = 23.267 - 1.570504 / (1 + (12523/t)^{0.535})$$



**Resultados:**

$$\delta = 0.551$$

$$t^* = 11049$$

$$X_t = 1.518002$$

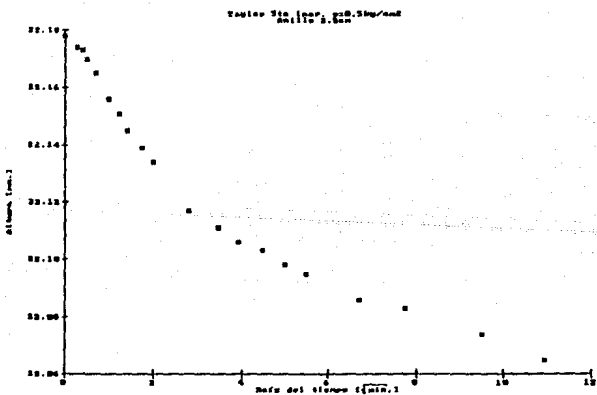
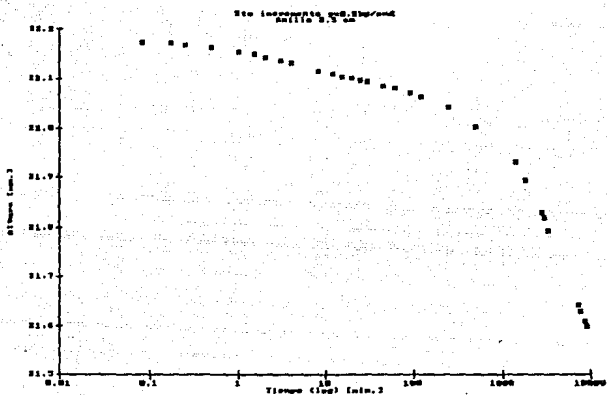
**Ecuación:**

$$H = 23.267 - 1.518002 / (1 + (11049/t)^{0.551})$$

Quinto incremento ( $p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	3.463	0	22.178
0.083	3.459	0.004	22.174
0.17	3.458	0.005	22.173
0.25	3.455	0.008	22.17
0.5	3.45	0.013	22.165
1	3.441	0.022	22.156
1.5	3.436	0.027	22.151
2	3.43	0.033	22.145
3	3.424	0.039	22.139
4	3.419	0.044	22.134
8	3.402	0.061	22.117
12	3.396	0.067	22.111
15.2833	3.391	0.072	22.106
20	3.388	0.075	22.103
25	3.383	0.08	22.098
30	3.38	0.083	22.095
45	3.371	0.092	22.086
60	3.368	0.095	22.083
90.2	3.359	0.104	22.074
120	3.35	0.113	22.065
240	3.329	0.134	22.044
482	3.29	0.173	22.005
1391	3.219	0.244	21.934
1824	3.18	0.283	21.895
2869	3.116	0.347	21.831
3023	3.104	0.359	21.819
3333	3.08	0.383	21.795
7173	2.929	0.534	21.644
7658	2.915	0.548	21.63
8604	2.894	0.569	21.609
9044	2.884	0.579	21.599
10046	2.865	0.598	21.58
11461	2.842	0.621	21.557
12678	2.81	0.653	21.525
16479	2.775	0.688	21.49

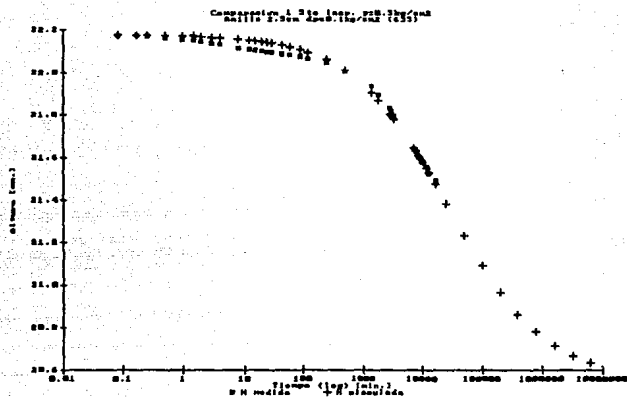


Quinto incremento ( $p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
22.1762312	22.1766858	22.1751942	22.177598	22.175898
22.1754018	22.1760299	22.1740008	22.177345	22.174947
22.1748049	22.1755508	22.1731614	22.1771484	22.174269
22.1733679	22.1743788	22.1711873	22.1766353	22.172651
22.1712873	22.1726479	22.1684124	22.1758134	22.170334
22.1696624	22.1712752	22.1662947	22.1751177	22.168541
22.1682776	22.1700938	22.1645164	22.1744981	22.167021
22.1659296	22.1680704	22.1615464	22.1733886	22.164459
22.1639302	22.1663303	22.1590548	22.1723395	22.162289
22.1576624	22.1607952	22.1514159	22.1690382	22.155545
22.1527921	22.1564254	22.1456159	22.1662152	22.150349
22.149357	22.1533153	22.141587	22.1641288	22.146704
22.1449956	22.1493371	22.1365202	22.1613777	22.142097
22.1408891	22.1455647	22.1318046	22.1566821	22.137776
22.137167	22.1421254	22.1275684	22.1561847	22.133673
22.1275407	22.1331328	22.1167561	22.1494063	22.123828
22.1194124	22.1255024	22.107765	22.1433902	22.115395
22.105708	22.1124736	22.0928373	22.1327182	22.101258
22.094345	22.1015666	22.0806447	22.1234279	22.089602
22.0593633	22.0675245	22.043915	22.0927656	22.054007
22.0107882	22.0194169	21.9745764	22.0484478	22.00501
21.9641507	21.9174228	21.8874648	21.9544931	21.859314
21.9297087	21.8765777	21.8558775	21.8963234	21.864992
21.8042382	21.8095762	21.7902726	21.8235594	21.800565
21.7761521	21.8012174	21.7854613	21.8144674	21.792554
21.7306154	21.7852699	21.7766793	21.7971317	21.777282
21.6445598	21.6456236	21.6419741	21.6474747	21.643723
21.6318072	21.6326394	21.6300166	21.6338793	21.631281
21.6083545	21.6091764	21.6083899	21.6094969	21.608774
21.5990016	21.5990013	21.5990014	21.5990014	21.599001
21.5777839	21.5773325	21.5787821	21.5768168	21.578163
21.5507283	21.5497527	21.5534411	21.5489268	21.551578
21.5297009	21.5283645	21.5335778	21.5275817	21.530909
21.4740790	21.4719587	21.4838895	21.472559	21.476132





Resultados:

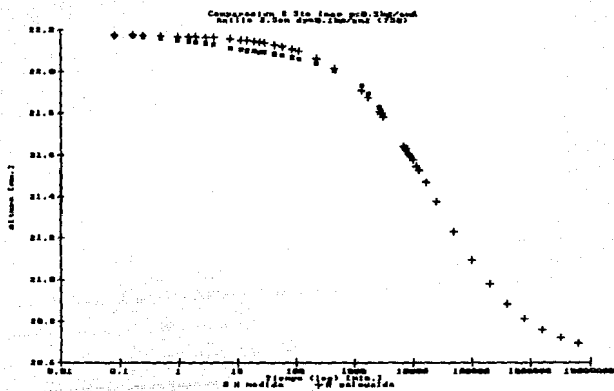
$$\delta = 0.537$$

$$t\delta = 27322$$

$$\lambda t = 1.6275$$

Ecuación:

$$H = 22.179 - 1.6275 / (1 + (27322/t)^{0.537})$$



Resultados:

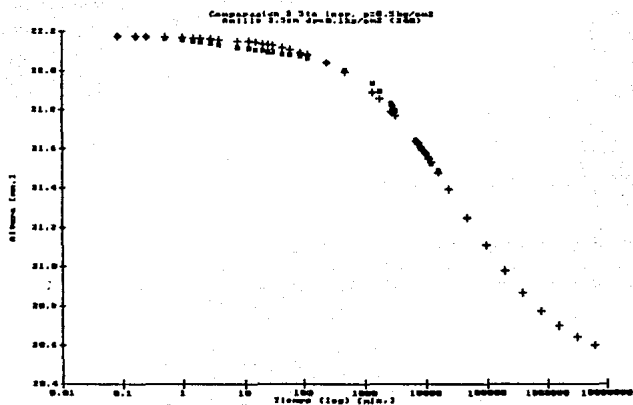
$$S = 0.565$$

$$t_1 = 22470$$

$$X_t = 1.5465$$

Ecuación:

$$H = 72.178 - 1.5465 / (1 + (22430/t)^{0.565})$$



Resultados:

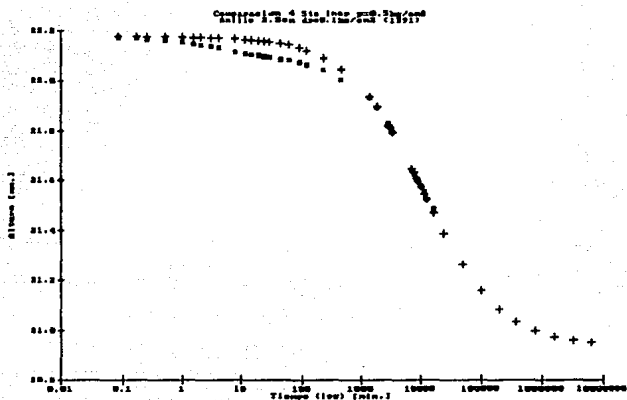
$$\delta = 0.495$$

$$t^* = 34205$$

$$X_t = 1.6980$$

Ecuación:

$$H = 22.178 - 1.698 / (1 + (34205/t)^{0.495})$$



Resultados:

$$\delta = 0.681$$

$$t^* = 11071$$

$$Xt = 1.2435$$

Ecuación:

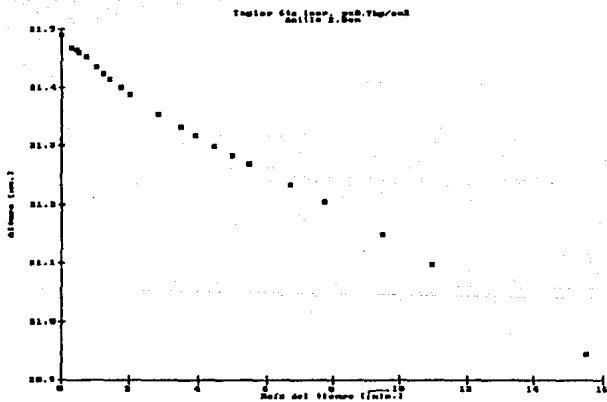
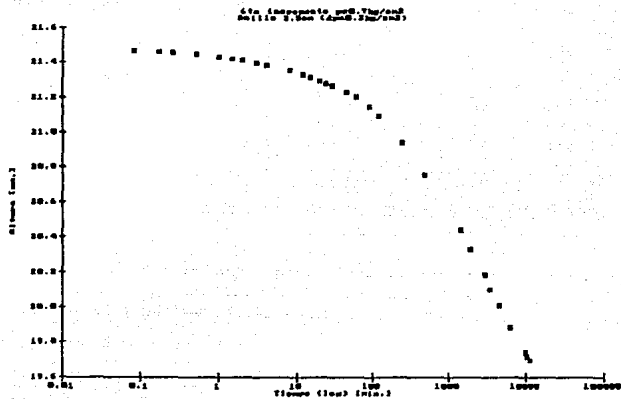
$$H = 22.178 - 1.2435 / (1 + (11071/t)^{0.681})$$



Estado incremento ( $p=0.7 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas H <sub>i</sub>
0	12.775	0	21.47
0.083	12.754	0.021	21.469
0.17	12.75	0.025	21.465
0.35	12.746	0.029	21.461
0.5	12.738	0.037	21.453
1	12.721	0.054	21.436
1.5	12.71	0.065	21.425
2	12.7005	0.0745	21.4155
3	12.686	0.089	21.401
4	12.674	0.101	21.389
8	12.641	0.134	21.356
12	12.6195	0.1555	21.3345
15	12.604	0.171	21.319
20	12.584	0.191	21.299
25	12.569	0.206	21.284
30	12.554	0.221	21.269
45	12.52	0.255	21.235
60	12.49	0.285	21.205
90	12.434	0.341	21.149
120	12.382	0.393	21.097
240	12.23	0.545	20.945
487	12.04	0.735	20.755
1444	11.726	1.049	20.441
1898	11.614	1.161	20.329
2941	11.47	1.305	20.185
3361	11.3895	1.3855	20.1045
4511	11.296	1.479	20.011
6214	11.169	1.606	19.884
10099	11.025	1.75	19.74
10593	11.002	1.773	19.717
11540	10.982	1.793	19.697

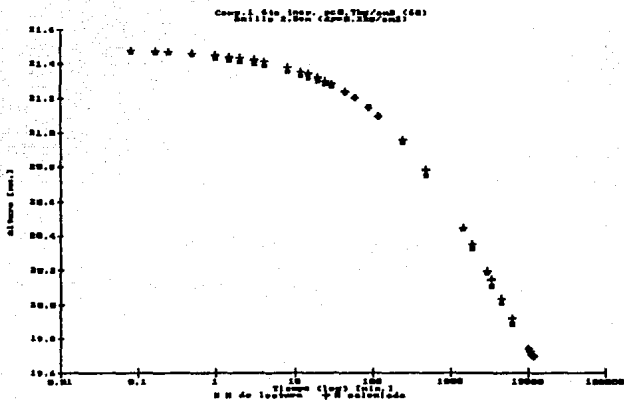


Santo incremento ( $\rho=0.7$  kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
FRR	ERR	ERR	ERR	ERR
21.4774616	21.4759397	21.4782511	21.4764945	21.476821
21.4747634	21.4752659	21.4731977	21.4708663	21.4712915
21.4714266	21.4720101	21.4696378	21.466693	21.4674184
21.4675048	21.4642622	21.4612575	21.4577326	21.4583545
21.4522491	21.4532209	21.4494752	21.4449236	21.4457064
21.4475946	21.4447138	21.440491	21.4352289	21.436119
21.4363027	21.4375313	21.4329559	21.4271369	21.4281086
21.4240799	21.4254785	21.4203958	21.4137149	21.4148089
21.4138005	21.4153267	21.4098853	21.4025381	21.403723
21.3822314	21.3840819	21.3778407	21.3687085	21.3701209
21.358279	21.3603217	21.3537084	21.3434299	21.3449747
21.3430137	21.3451593	21.3383919	21.3274585	21.3290735
21.3208573	21.3231292	21.3162344	21.3044406	21.3061409
21.3015543	21.3039164	21.296991	21.2845245	21.2862853
21.2842823	21.2867115	21.2798176	21.2657993	21.2686048
21.2405307	21.2430794	21.2364455	21.2222439	21.224129
21.2045496	21.207151	21.2009039	21.1859122	21.1878303
21.1460353	21.1486514	21.1432819	21.1273043	21.1292312
21.0984664	21.101042	21.0965564	21.0800096	21.0819095
20.9610478	20.9633176	20.9618985	20.9446326	20.9463337
20.7851083	20.7867476	20.7896097	20.7729122	20.7742038
20.4475026	20.4477692	20.4572157	20.444499	20.444891
20.3522167	20.3521586	20.3626256	20.3514481	20.3516171
20.1941084	20.1936447	20.2046468	20.1962249	20.196099
20.1450527	20.1445054	20.1553386	20.1477991	20.1476062
20.0363473	20.0357005	20.0455225	20.0399442	20.0396535
19.9183636	19.9177617	19.9253955	19.921898	19.9215942
19.743567	19.7433778	19.7454006	19.7447295	19.7446249
19.7268075	19.7266823	19.7280042	19.7275795	19.7275098
19.6970035	19.6970004	19.6970006	19.6970005	19.6970006





Resultados:

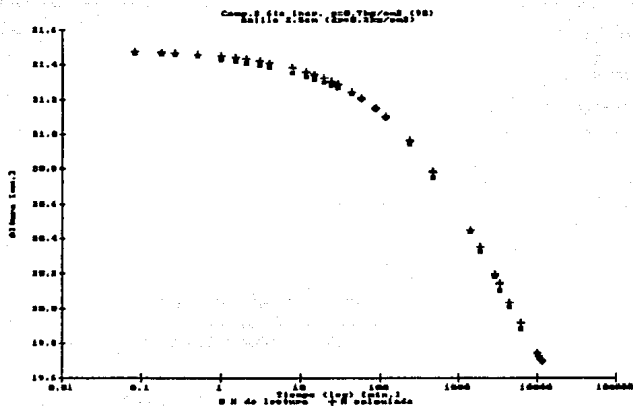
$$\delta = 0.517$$

$$t^* = 4252$$

$$Xt = 2.8635$$

Ecuación:

$$H = 21.49 - 2.8635 / (1 + (4252/t)^{0.517})$$



Resultados:

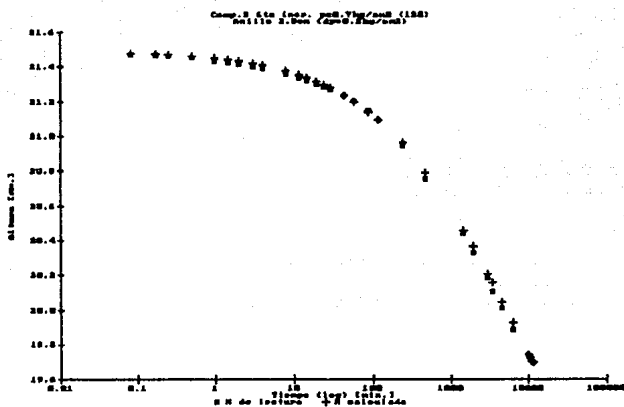
$$\delta = 0.521$$

$$t^* = 4126$$

$$Xt = 2.8425$$

Ecuación:

$$H = 21.49 - 2.8425 / (1 + (4126/t)^{0.521})$$



Resultados:

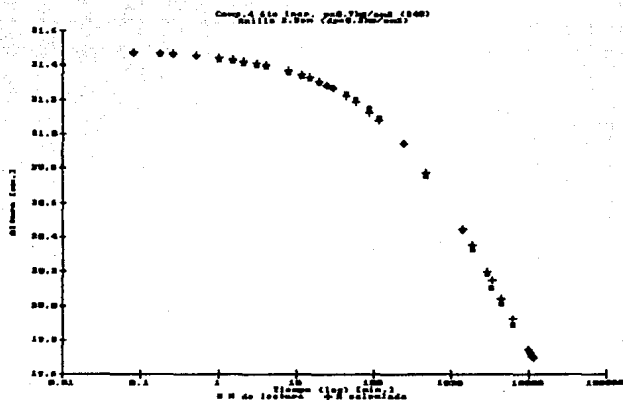
$$\delta = 0.501$$

$$t\delta = 5189$$

$$x_t = 2.994$$

Ecuación:

$$H = 21.49 - 2.994 / (1 + (5189/t)^{0.501})$$



Resultados:

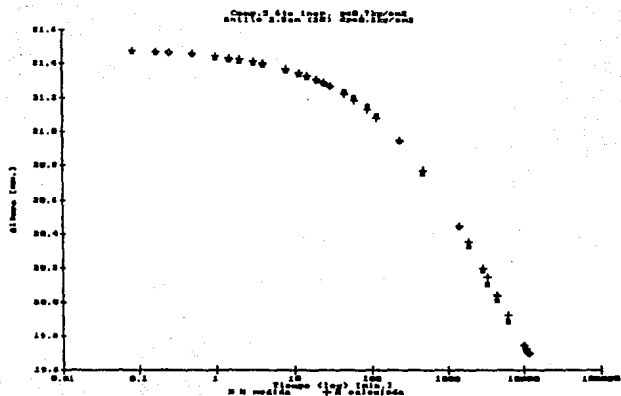
$$\delta = 0.488$$

$$t^* = 5304$$

$$X_t = 3.0195$$

Ecuación:

$$H = 21.49 - 3.0195 / (1 + (5304/t)^{0.488})$$



**Resultados:**

$$\delta = 0.491$$

$$t\delta = 5182$$

$$Xt = 3.003$$

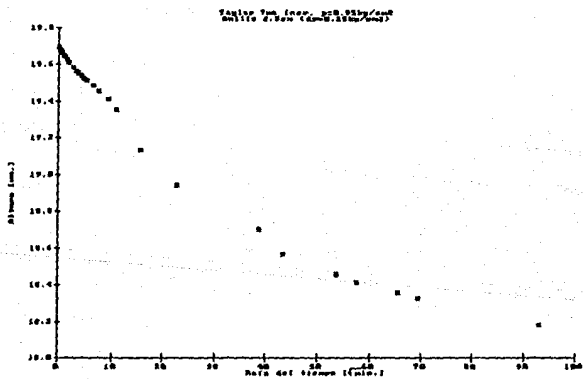
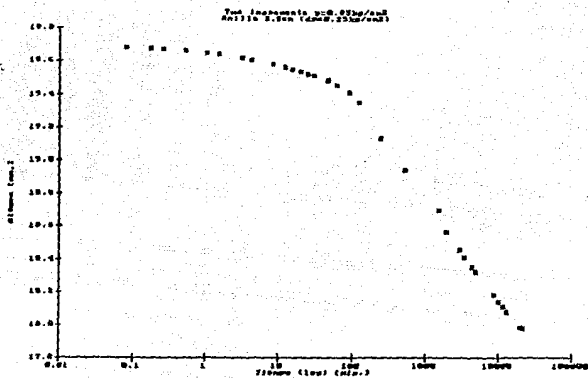
**Ecuación:**

$$H = 21.49 - 3.003 / (1 + (5182/t)^{0.491})$$

Séptimo incremento ( $\rho=0.95 \text{ kg/cm}^3$ )

Anillo de 2.5 cm.

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	10.982	0	19.697
0.083	10.966	0.016	19.681
0.17	10.961	0.021	19.676
0.25	10.959	0.023	19.674
0.5	10.949	0.033	19.664
1	10.936	0.046	19.651
1.5	10.929	0.053	19.644
3	10.908	0.074	19.623
4	10.896	0.086	19.611
8	10.869	0.113	19.584
12	10.85	0.132	19.565
15	10.8395	0.1425	19.5545
20	10.824	0.158	19.539
25	10.81	0.172	19.525
30	10.799	0.183	19.514
45.783	10.769	0.213	19.484
60	10.742	0.24	19.457
90	10.699	0.283	19.414
121	10.641	0.341	19.356
240	10.419	0.563	19.134
518	10.23	0.752	18.945
1507	9.987	0.995	18.702
1889	9.852	1.13	18.567
2870	9.743	1.239	18.458
3313	9.6995	1.2825	18.4145
4312	9.641	1.341	18.356
4829	9.609	1.373	18.324
8642	9.467	1.515	18.182
10077	9.425	1.557	18.14
11491	9.399	1.585	18.114
12898	9.362	1.62	18.077
20157	9.271	1.711	17.986
21514	9.265	1.717	17.98



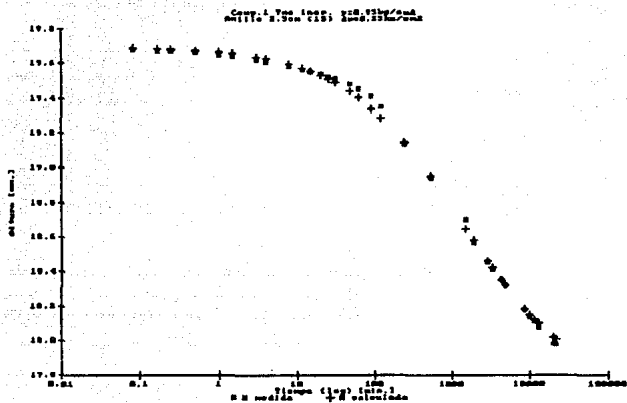
Séptimo incremento (p=0.75 logca<sup>4</sup>)

Anillo de 0.5 cm. Curvas teóricas

Ecuación 1 Ecuación 2 Ecuación 3

ERR	ERR	ERR
19.6694073	19.6883766	19.6670635
19.6855489	19.6841417	19.682374
19.6827196	19.6810657	19.6790004
19.6757831	19.6735918	19.6708678
19.6659297	19.6626719	19.659184
19.6574036	19.6541002	19.6500281
19.6500354	19.6473676	19.6297578
19.6283518	19.6277982	19.6183595
19.5963249	19.590847	19.584366
19.5714434	19.5654947	19.5584596
19.5554476	19.5472312	19.5419298
19.522002	19.5255268	19.5179392
19.5114334	19.5048466	19.4970576
19.4929449	19.4863395	19.4784012
19.4436911	19.4769762	19.4291368
19.4070787	19.4005133	19.3928334
19.3440473	19.3379701	19.3308281
19.2915194	19.2860234	19.2795105
19.1483533	19.1446773	19.1405603
18.9542673	18.9537347	18.9526633
18.8467096	18.8511335	18.8534388
18.5829163	18.5854309	18.5878997
18.4636802	18.465668	18.4676931
18.4239944	18.4255813	18.4272131
18.3533484	18.3529041	18.354485
18.3240007	18.3239988	18.3239987
18.184388	18.1805512	18.1764333
18.1503621	18.1458816	18.1403981
18.1235872	18.1173829	18.1106559
18.1004272	18.0931943	18.0853216
18.0190171	18.0075493	17.9948942
18.0082024	17.9960935	17.9827057





Resultados:

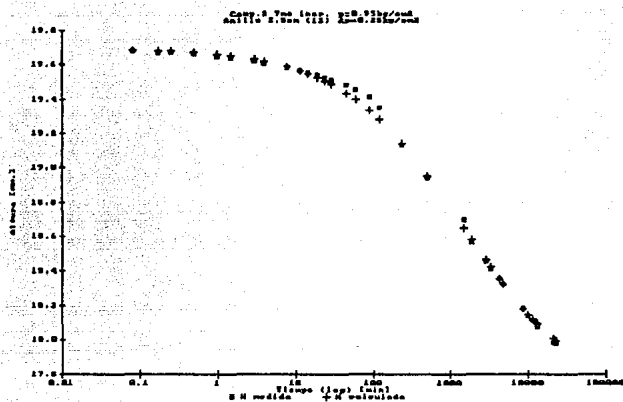
$$\delta = 0.576$$

$$t^* = 1347$$

$$Xt = 2.031$$

Ecuación:

$$H = 19.697 - 2.031 / (1 + (1347/t)^{0.567})$$



Resultados:

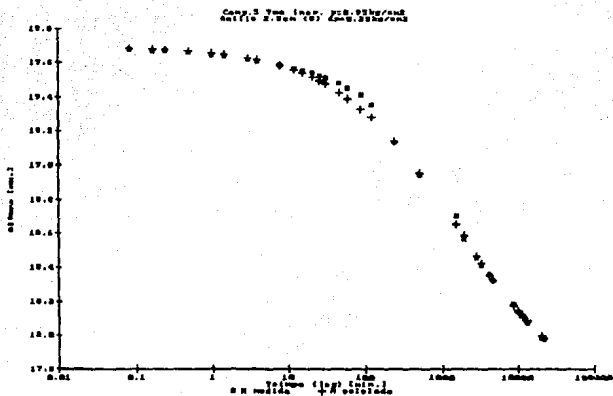
$$\delta = 0.56$$

$$t_f = 1478$$

$$X_t = 2.0805$$

Ecuación:

$$H = 19.697 - 2.0805 / (1 + (1478/t)^{0.56})$$



Resultados:

$$\delta = 0.542$$

$$t\delta = 1652$$

$$Xt = 2.1405$$

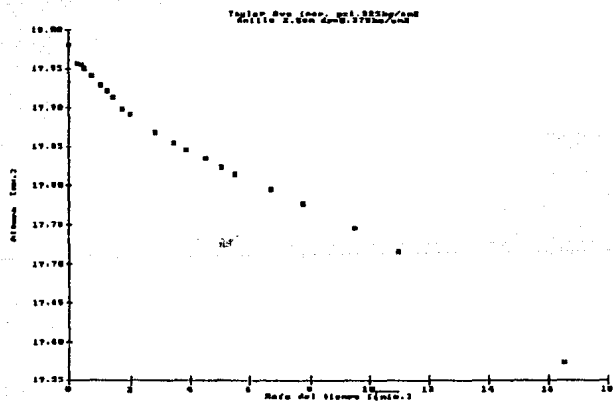
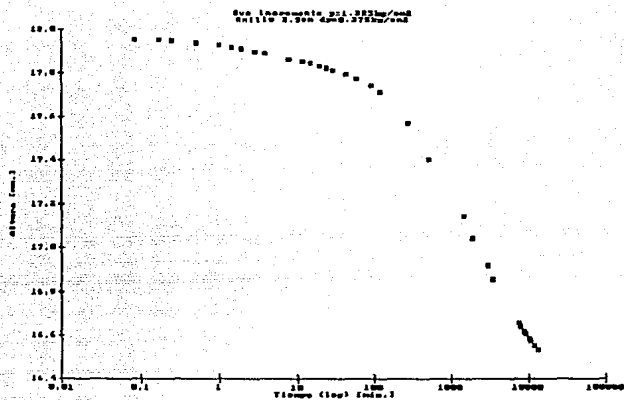
Ecuación:

$$H = 17.697 - 2.1405 / (1 + (1652/t)^{0.542})$$

Octavo incremento ( $\rho=1.325 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2.5 cm.

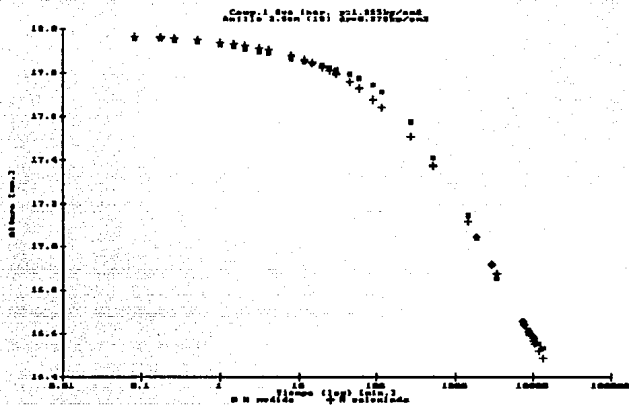
Timepo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	9.265	0	17.98
0.083	9.242	0.023	17.957
0.17	9.24	0.025	17.955
0.25	9.236	0.029	17.951
0.5	9.226	0.039	17.941
1	9.214	0.051	17.929
1.5	9.207	0.058	17.922
2	9.199	0.066	17.914
3	9.184	0.081	17.899
4	9.178	0.087	17.893
8	9.153	0.112	17.868
12	9.14	0.125	17.855
15	9.131	0.134	17.846
20	9.12	0.145	17.835
25	9.109	0.156	17.824
30	9.1	0.165	17.815
45	9.08	0.185	17.795
60	9.062	0.203	17.777
91	9.031	0.234	17.746
120	9.001	0.264	17.716
274	8.859	0.406	17.574
523	8.694	0.571	17.409
1474	8.432	0.833	17.147
1913	8.328	0.937	17.043
2985	8.206	1.059	16.921
3460	8.141	1.124	16.856
7373	7.942	1.323	16.657
7787	7.926	1.339	16.641
8692	7.901	1.364	16.616
9174	7.89	1.375	16.605
10149	7.872	1.393	16.587
10613	7.861	1.404	16.576
11964	7.839	1.426	16.554
15389	7.819	1.446	16.534



Doble incremento ( $\rho=1.325 \text{ kg/cm}^3$ )

Cailla de 2.5 cm. Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERP	ERR	ERR	EPF	ERR
17.9690935	17.9709514	17.9714548	17.9722837	17.9742756
17.9645077	17.9664572	17.9676252	17.9687242	17.9715547
17.9612944	17.9635403	17.9648938	17.9661715	17.9694934
17.9577719	17.9566461	17.9583949	17.9600586	17.9644453
17.9432714	17.9459364	17.9491308	17.9512799	17.9570215
17.9357104	17.9394551	17.9420111	17.9444741	17.9511434
17.928159	17.9331804	17.9359958	17.9387071	17.9460966
17.9176156	17.9272237	17.9253066	17.9289939	17.937482
17.9084113	17.9179501	17.9174136	17.9207832	17.9301045
17.8895204	17.8871277	17.8813009	17.8853841	17.9262403
17.8596571	17.8642936	17.8714659	17.8759711	17.8887002
17.8464771	17.8540103	17.8588266	17.8675504	17.8769594
17.8274652	17.8354142	17.8404725	17.8454635	17.8577052
17.8110167	17.819237	17.8244811	17.8296634	17.8444919
17.7963765	17.8049773	17.8101729	17.8154931	17.830757
17.7595806	17.7681256	17.7739377	17.7794923	17.7954941
17.7295864	17.7384665	17.7441541	17.7497986	17.7660867
17.6798095	17.6886622	17.6943324	17.6999599	17.7162009
17.64225	17.6509264	17.6564741	17.6619765	17.6778232
17.506669	17.513977	17.518522	17.523022	17.5356649
17.7745674	17.7738267	17.7804195	17.786125	17.7942135
17.1190471	17.1193466	17.1199172	17.1207611	17.1188508
17.0464576	17.0466926	17.046906	17.0469728	17.0466561
16.9199773	16.9193782	16.9187566	16.9179399	16.9143443
16.8771958	16.8764149	16.8756994	16.8748091	16.8711127
16.6570002	16.6569997	16.6570003	16.6570001	16.6570001
16.6412827	16.6414675	16.6416016	16.6417558	16.6423038
16.605919	16.6104201	16.610877	16.6117775	16.6137100
16.5944679	16.5953002	16.5959258	16.5966167	16.5990367
16.5659264	16.5672441	16.5682214	16.5692977	16.5730373
16.5577783	16.5549297	16.5560765	16.557337	16.5616997
16.5296275	16.5222648	16.5239052	16.5256984	16.5318465
16.4891151	16.4920745	16.4942294	16.4965741	16.5045461



**Resultados:**

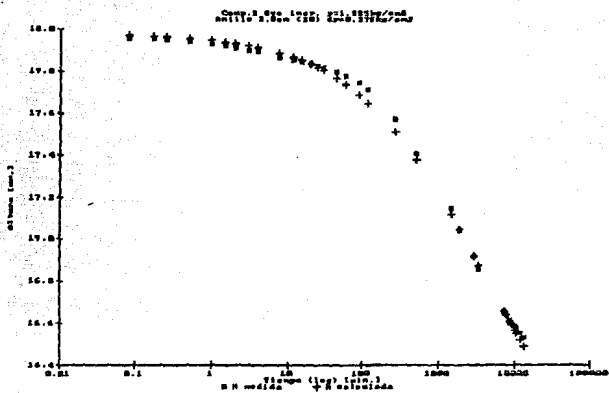
$$\delta = 0.492$$

$$t\delta = 4611$$

$$Xt = 2.373$$

**Ecuación:**

$$H = 17.98 - 2.373 / (1 + (4611/t)^{0.492})$$



Resultados:

$$\delta = 0.509$$

$$t_{\delta} = 4012$$

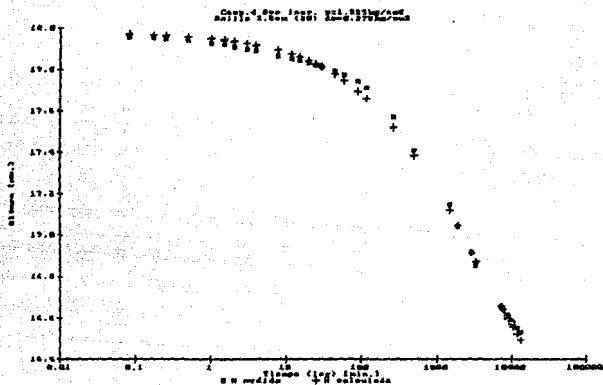
$$X_t = 2.2935$$

Ecuación:

$$H = 17.98 - 2.2935 / (1 + (4012/t)^{0.509})$$







Resultados:

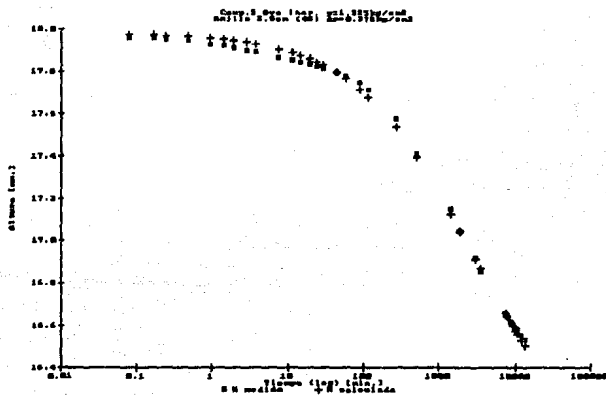
$$\delta = 0.532$$

$$t^* = 3376$$

$$x_t = 2.196$$

Ecuación:

$$H = 17.98 - \frac{2.196}{(1 + (3376/t)^{0.532})}$$



Resultados:

$$\delta = 0.569$$

$$t\ddagger = 2662$$

$$x_t = 2.064$$

Ecuación:

$$H = 17.98 - 2.064 / (1 + (2662/t)^{0.569})$$

**Consolidómetro 2 con anillo de 2 cm.**

Este espécimen fue también sometido a ocho incrementos de carga, bajo las mismas características que el anterior anillo de 2.5 cm., como se verá a continuación:

**Datos de la muestra:**

Obtención: Lago de Texcoco  
Fecha: 29/07/89  
Profundidad: 0.9 m.

**Datos del anillo:**

Diámetro:  $d = 7.99$  cm.  
Área:  $A = 50.14$  cm<sup>2</sup>.  
Espesor:  $z = 2.0$  cm.  
Volumen:  $V = 100.28$  cm<sup>3</sup>.

**Peso volumétrico del suelo:**

Peso de vidrios, anillo y muestra: 639.30 gr.  
Peso de vidrios y anillo: 517.26 gr.  
Peso de la muestra: 122.04 gr.  
 $\therefore \gamma_m = 1.218$  gr/cm<sup>3</sup>

**Contenido de agua:**

Peso de cápsula: 60.47 gr.  
Peso de cápsula y muestra: 75.78 gr.  
Peso de cápsula y suelo seco: 65.57 gr.  
 $\therefore w = 200.32$  %

**Densidad de sólidos:**

Peso del matraz con agua y suelo: 698.05 gr.  
Temperatura: 33.5 grados C.  
Peso matraz con agua a dicha temperatura: 666.063 gr.  
Peso de refractario: 515.42 gr.  
Peso de refractario y suelo seco: 569.94 gr.  
 $W_s = 54.52$  gr.  
 $\therefore S_s = 2.42$

**Esfuerzo efectivo in situ (NAF=1.5m. suelo 100% sat.):**

$\gamma_m = 1.218$  gr/cm<sup>3</sup> =  $1.218$  T/m<sup>3</sup>  
Esfuerzo total:  $\sigma = 1.218 \times 0.9 = 1.0962$  T/m<sup>2</sup>  
Presión de poro:  $u = -0.6$  T/m<sup>2</sup>  
Esfuerzo efectivo:  $\sigma' = 1.0962 + 0.6 = 1.7$  T/m<sup>2</sup>

**Relaciones de vacíos:**

Inicial:  $e_0 = wS_s = 4.85$   
 $W_m = \gamma_m \times V_m = 122.141$  gr.  
 $W_s = W_m / (w + 1) = 40.67$  gr.  
 $H_s = W_s / (S_s \gamma_o \times A)$   
 $\therefore e = (H_m \times S_s \gamma_o \times A / W_s) - 1 = 2.983H_m - 1$   
 $H_m =$  altura de la muestra.

**Fechas de cada incremento de carga:**

Primero: 16/10/89  
Segundo: 23/10/89

Tercero: 08/11/89  
 Cuarto: 28/11/89  
 Quinto: 03/01/90  
 Sexto: 15/01/90  
 Séptimo: 23/01/90  
 Octavo: 07/02/90

**Incrementos de Carga (todos son esfuerzos efectivos):**

Primero:	$\Delta\sigma/\sigma = 1$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$
Segundo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$
Tercero:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.5$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$
Cuarto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.3$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.4 \text{ kg/cm}^2$
Quinto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.25$	$\Delta\sigma = 0.1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$
Sexto:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.2 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.7 \text{ kg/cm}^2$
Séptimo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.25 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 0.95 \text{ kg/cm}^2$
Octavo:	$\Delta\sigma/\sigma = 0.4$	$\Delta\sigma = 0.375 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma = 1.325 \text{ kg/cm}^2$

**Desmontado:**

Al final del octavo incremento.  
 Fecha: 02/03/90

**Alturas iniciales antes de aplicar el incremento señalado:**

Primer incremento:	$H_i = 20 \text{ mm.}$
Segundo incremento:	$H_i = 19.426 \text{ mm.}$
Tercer incremento:	$H_i = 18.96 \text{ mm.}$
Cuarto incremento:	$H_i = 18.098 \text{ mm.}$
Quinto incremento:	$H_i = 17.099 \text{ mm.}$
Sexto incremento:	$H_i = 16.533 \text{ mm.}$
Séptimo incremento:	$H_i = 14.987 \text{ mm.}$
Octavo incremento:	$H_i = 13.468 \text{ mm.}$

**Consolidación primaria (100 %) por Casagrande y Taylor:**

Unidades (t, H) = (min, mm.)

Primer incremento:	C(t, H) = (20, 19.606)
	T(t, H) = (8, 19.634)
Segundo incremento:	C(t, H) = (7.7, 19.279)
	T(t, H) = (6.5, 19.283)
Tercer incremento:	C(t, H) = (5.7, 18.866)
	T(t, H) = (6.95, 18.862)
Cuarto incremento:	C(t, H) = (7.3, 18.012)
	T(t, H) = (7.3, 18.012)
Quinto incremento:	C(t, H) = (3.8, 17.052)
	T(t, H) = (6.4, 17.0457)
Sexto incremento:	C(t, H) = (7.8, 16.404)
	T(t, H) = (16.9, 16.3686)
Séptimo incremento:	C(t, H) = (6.6, 14.882)
	T(t, H) = (16.8, 14.836)
Octavo incremento:	C(t, H) = (10.8, 13.36)
	T(t, H) = (16.4, 13.3497)

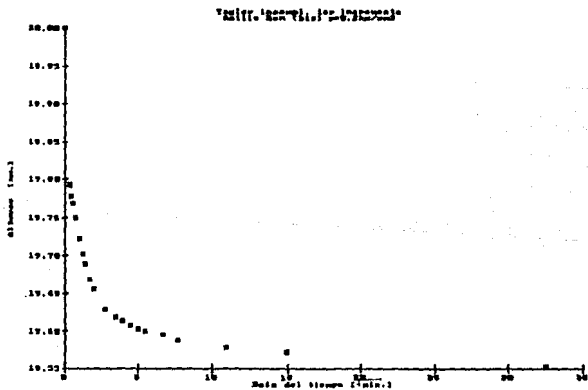
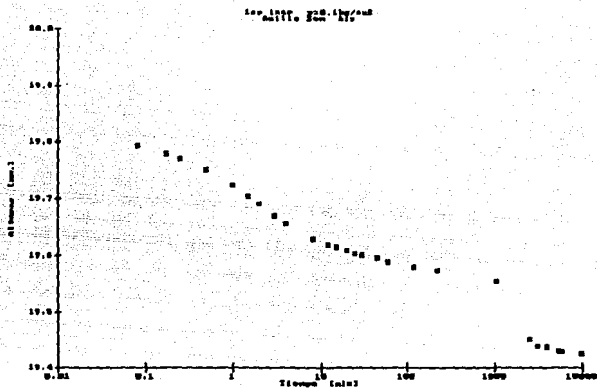
**Notas:**

a) El 100% de la consolidación primaria se encuentra alrededor de los 10 min.. Y como en los casos anteriores, tanto Casagrande como Taylor concuerdan.

Primer incremento de carga ( $p=0.1\text{kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	24.052	0	20
0.083	23.845	0.207	19.793
0.17	23.831	0.221	19.779
0.25	23.821	0.231	19.769
0.5	23.802	0.25	19.75
1	23.775	0.277	19.723
1.5	23.755	0.297	19.703
2	23.741	0.311	19.689
3	23.721	0.331	19.669
4	23.708	0.344	19.656
8	23.681	0.371	19.629
12	23.671	0.381	19.619
15	23.666	0.386	19.614
20	23.66	0.392	19.608
25	23.655	0.397	19.603
30	23.652	0.4	19.6
45	23.647	0.405	19.595
60	23.64	0.412	19.588
120	23.631	0.421	19.579
222	23.625	0.427	19.573
1055	23.605	0.447	19.553
2496	23.503	0.549	19.451
3064	23.491	0.561	19.439
3944	23.489	0.563	19.437
5422	23.484	0.568	19.432
5708	23.481	0.571	19.429
5930	23.481	0.571	19.429
9753	23.478	0.574	19.426

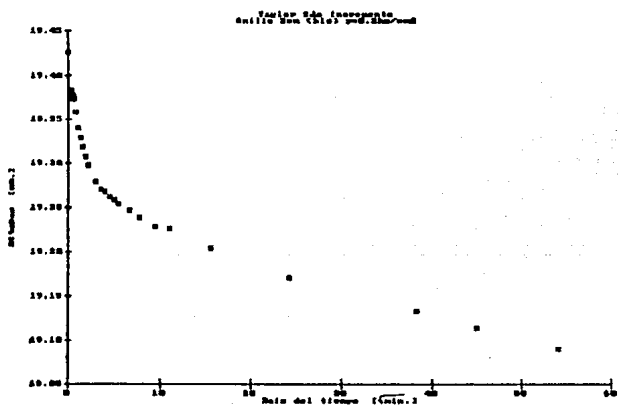
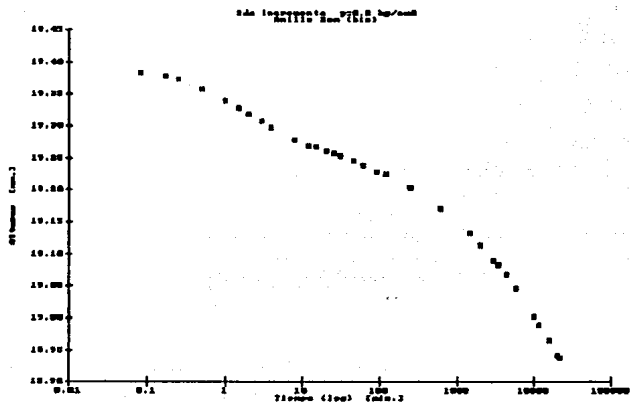


Segundo incremento de carga ( $p=0.2 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	23.478	0	19.426
0.083	23.455	0.043	19.383
0.17	23.43	0.048	19.378
0.25	23.425	0.053	19.373
0.5	23.41	0.068	19.358
1	23.392	0.086	19.34
1.5	23.381	0.097	19.329
2	23.371	0.107	19.319
3	23.3595	0.1185	19.3075
4	23.35	0.128	19.298
8	23.331	0.147	19.279
12	23.322	0.156	19.27
15	23.32	0.158	19.268
20	23.314	0.164	19.262
25	23.31	0.168	19.258
30	23.306	0.172	19.254
45	23.299	0.179	19.247
60	23.291	0.187	19.239
90	23.281	0.197	19.229
120	23.278	0.2	19.226
240	23.256	0.222	19.204
596	23.223	0.255	19.171
1470	23.185	0.293	19.133
2030	23.166	0.312	19.114
2926	23.142	0.336	19.09
3375	23.135	0.343	19.083
4356	23.12	0.358	19.068
5795	23.098	0.38	19.046
10119	23.054	0.424	19.002
11582	23.041	0.437	18.989
15886	23.017	0.461	18.965
20200	22.993	0.485	18.941
21658	22.99	0.488	18.938
23077	23.012	0.466	18.96

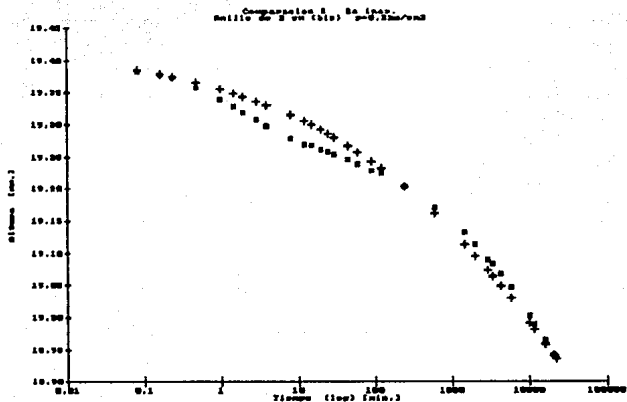




Segundo incremento de carga ( $p=0.2 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR
19.3855514	19.3853545	19.3909267	19.3979601
19.3785112	19.3782946	19.384454	19.3923197
19.3742483	19.3740207	19.3805067	19.3888418
19.365644	19.3653965	19.3724826	19.3816928
19.355681	19.3554134	19.3631065	19.3732198
19.3491483	19.3488692	19.3569146	19.3675615
19.3441701	19.343883	19.3521745	19.3631991
19.3366371	19.3363391	19.3449691	19.3565201
19.3309045	19.330599	19.3394607	19.3513778
19.3156615	19.3153396	19.3247185	19.3374737
19.3057345	19.3054043	19.3150491	19.3282521
19.2999306	19.2995964	19.309373	19.3228042
19.2920746	19.2917357	19.3016644	19.3153671
19.2856809	19.285339	19.2953702	19.3092632
19.2802557	19.2799119	19.2900158	19.3040496
19.2675196	19.2671723	19.2775981	19.2916908
19.2578998	19.2575515	19.2678266	19.2822514
19.2434827	19.2431349	19.2534201	19.2679472
19.232622	19.232276	19.2425217	19.2570541
19.2041974	19.2038641	19.2138327	19.2281111
19.1618151	19.1615088	19.1706601	19.1839242
19.113775	19.1135167	19.1212646	19.1326104
19.0951297	19.0948937	19.1019835	19.1123995
19.0730792	19.0728716	19.0791132	19.0883139
19.0642027	19.0640072	19.0698878	19.0785669
19.0479697	19.0477972	19.0529909	19.0606716
19.0292599	19.0291151	19.0334777	19.0399425
18.9911025	18.9910178	18.9935726	18.9973707
18.9815485	18.9814795	18.9835611	18.9866578
18.9587428	18.958712	18.9596363	18.961013
18.9409995	18.9409993	18.9409994	18.9409994
18.9357899	18.9357988	18.9355241	18.9351144
18.9310223	18.9310395	18.930512	18.9297255



Resultados:

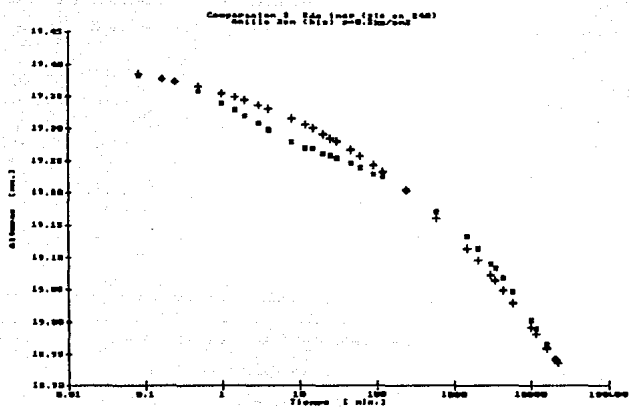
$$\delta = 0.231$$

$$t\delta = 402584$$

$$Xt = 1.4525$$

Ecuación:

$$H = 19.426 - 1.4525 / (1 + (402584/t)^{0.231})$$



Resultados:

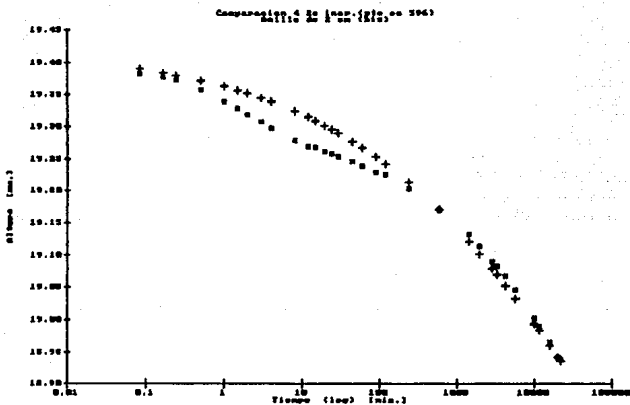
$$\delta = 0.23$$

$$t_f = 404747$$

$$X_t = 1.4525$$

Ecuación:

$$H = 19.426 - 1.4525 / (1 + (404747/t)^{0.23})$$



**Resultados:**

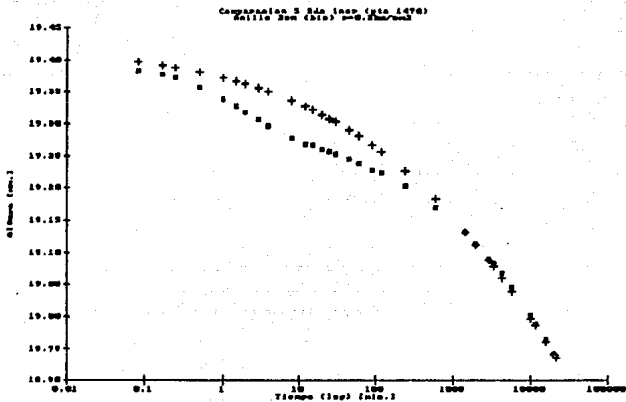
$$\delta = 0.243$$

$$t\delta = 346269$$

$$Xt = 1.4514$$

**Ecuación:**

$$H = 19.426 - 1.4514 / (1 + (346269/t)^{0.243})$$



Resultados:

$$\delta = 0.261$$

$$t_k = 276900$$

$$X_t = 1.446$$

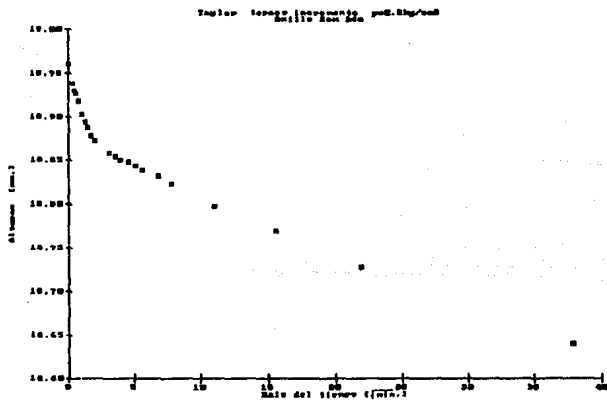
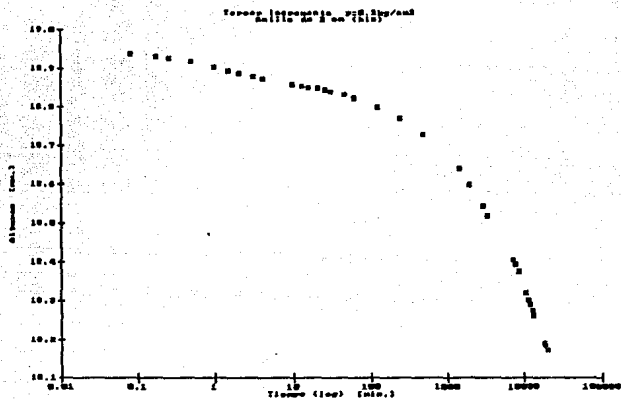
Ecuación:

$$H = 19.426 - 1.446 / (1 + (276900/t)^{0.261})$$

Tercer incremento de carga ( $p=0.3 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	23.012	0	18.96
0.083	22.99	0.022	18.938
0.17	22.982	0.03	18.93
0.25	22.979	0.033	18.927
0.5	22.97	0.042	18.918
1	22.955	0.057	18.903
1.5	22.946	0.066	18.894
2	22.94	0.072	18.888
3	22.93	0.082	18.878
4	22.925	0.087	18.873
10	22.91	0.102	18.858
13	22.906	0.106	18.854
16	22.902	0.11	18.85
21	22.9	0.112	18.848
26	22.896	0.116	18.844
31	22.891	0.121	18.839
46	22.884	0.128	18.832
61	22.875	0.137	18.823
121	22.85	0.162	18.798
243	22.821	0.191	18.769
479	22.78	0.232	18.728
1434	22.692	0.32	18.64
1969	22.649	0.363	18.597
2898	22.595	0.417	18.543
3396	22.571	0.441	18.519
7202	22.458	0.554	18.406
7704	22.444	0.568	18.392
8724	22.427	0.585	18.375
10526	22.371	0.641	18.319
11547	22.351	0.661	18.299
12058	22.34	0.672	18.288
12959	22.324	0.688	18.272
13455	22.313	0.699	18.261
18685	22.2405	0.7715	18.1885
19161	22.236	0.776	18.184
20310	22.224	0.788	18.172
21729	22.209	0.803	18.157
23195	22.194	0.818	18.142
27501	22.16	0.852	18.108
28921	22.15	0.862	18.098



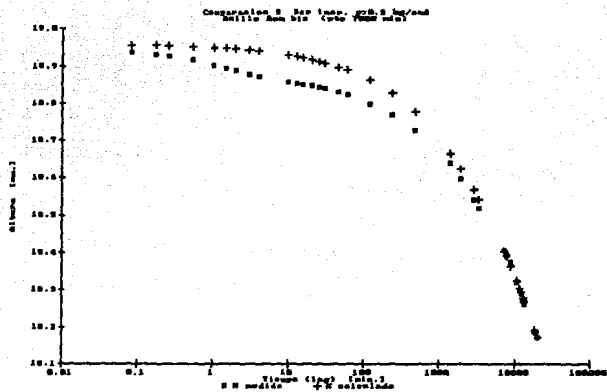


Tercer incremento de carga ( $p=0.3 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 3 Ecuación 4 Ecuación 5 Ecuación 6

ERR	ERR	ERR	ERR
18.9571788	18.9511435	18.9526004	18.955106
18.9559894	18.9482614	18.950087	18.953279
18.9551543	18.9463428	18.9484001	18.952029
18.953194	18.9420786	18.9446193	18.949174
18.9504441	18.9364964	18.939617	18.945302
18.9483485	18.9324657	18.9359748	18.942428
18.9465902	18.9291988	18.9330069	18.940058
18.9436561	18.9239361	18.9281999	18.936169
18.941196	18.9196748	18.9242865	18.932964
18.9386486	18.9025388	18.9083929	18.919647
18.9366728	18.8964407	18.9026859	18.914765
18.9231547	18.8911728	18.8977373	18.910496
18.9179911	18.8836303	18.8906246	18.904305
18.9124444	18.8771525	18.8844921	18.898919
18.9093417	18.8714231	18.8790511	18.894106
18.8988127	18.8571524	18.8654352	18.881931
18.8900104	18.8456282	18.85438	18.871922
18.8632835	18.8123768	18.8222251	18.842269
18.8262564	18.7694342	18.7802343	18.802546
18.7778753	18.7170044	18.7284071	18.752283
18.6659231	18.605431	18.6165988	18.640414
18.6242219	18.5661518	18.5768581	18.599784
18.5670499	18.5136761	18.523524	18.544698
18.5415111	18.4906534	18.500048	18.520274
18.4037292	18.3695949	18.3759863	18.38979
18.3900054	18.3577938	18.3638461	18.376918
18.3642697	18.3356175	18.3410143	18.352668
18.3240203	18.3011624	18.3054976	18.314854
18.3036164	18.2837572	18.2875382	18.295694
18.2939502	18.2755233	18.2790382	18.286618
18.2776958	18.2616919	18.2647548	18.271357
18.2691421	18.2544197	18.2572423	18.263325
18.1921383	18.1890755	18.1896733	18.190957
18.1860864	18.1839441	18.184363	18.185262
18.1719998	18.1719999	18.1719999	18.172
18.1555359	18.158037	18.1575441	18.156488
18.1394951	18.1444275	18.1434511	18.14136
18.0971339	18.1084427	18.1061755	18.101335
18.0844785	18.0976749	18.0950187	18.089354



Resultados:

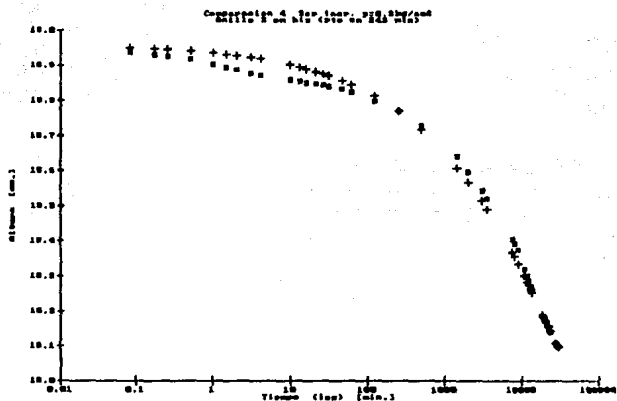
$$\delta = 0.491$$

$$t^* = 58381$$

$$Xt = 2.112$$

Ecuación:

$$H = 18.96 - 2.112 / (1 + (58381/t)^{0.491})$$



Resultados:

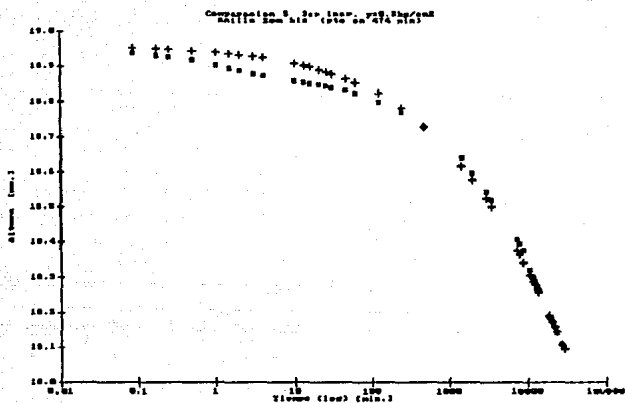
$$\delta = 0.395$$

$$t\delta = 111471$$

$$Xt = 2.331$$

Ecuación:

$$H = 18.96 - 2.331 / (1 + (111471/t)^{0.395})$$



Resultados:

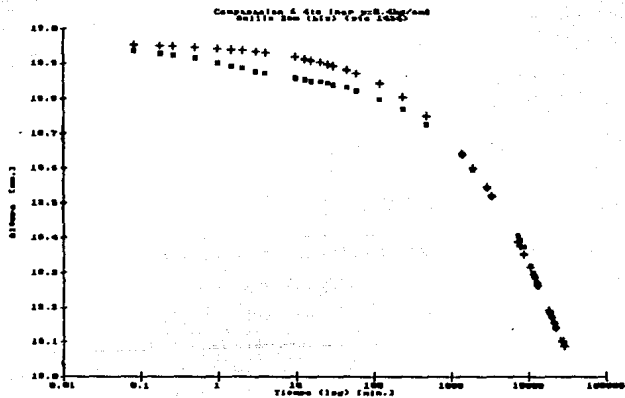
$$\delta = 0.409$$

$$t\delta = 103374$$

$$Xt = 2.322$$

Ecuación:

$$H = 18.96 - 2.322 / (1 + (103374/t)^{0.409})$$



Resultados:

$$\delta = 0.444$$

$$t_s = 85460$$

$$X_t = 2.2785$$

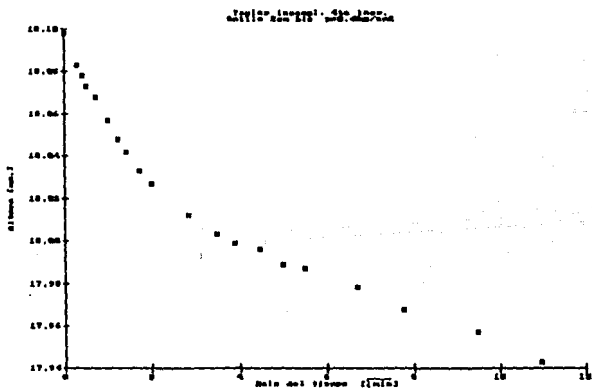
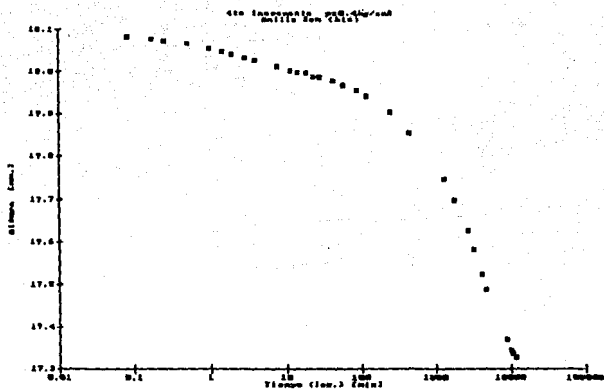
Ecuación:

$$H = 18.96 - 2.2785 / (1 + (85460/t)^{0.444})$$

Cuarto incremento de carga ( $p=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	22.15	0	18.098
0.083	22.135	0.015	18.083
0.17	22.13	0.02	18.078
0.25	22.125	0.025	18.073
0.5	22.12	0.03	18.068
1	22.109	0.041	18.057
1.5	22.1	0.05	18.048
2	22.094	0.056	18.042
3	22.085	0.065	18.033
4	22.079	0.071	18.027
8	22.064	0.086	18.012
12	22.055	0.095	18.003
15	22.051	0.099	17.999
20	22.048	0.102	17.996
25	22.041	0.109	17.989
30	22.039	0.111	17.987
45	22.0305	0.1195	17.9785
60	22.02	0.13	17.968
90	22.009	0.141	17.957
120	21.995	0.155	17.943
255	21.956	0.194	17.904
463	21.909	0.241	17.857
1306	21.799	0.351	17.747
1775	21.749	0.401	17.697
2724	21.679	0.471	17.627
3204	21.635	0.515	17.583
4209	21.575	0.575	17.523
4726	21.539	0.611	17.487
8634	21.421	0.729	17.369
10145	21.396	0.754	17.344
10444	21.39	0.76	17.338
11530	21.379	0.771	17.327
12996	21.346	0.804	17.294
14437	21.329	0.821	17.277
18586	21.29	0.86	17.238
21617	21.275	0.875	17.223
25077	21.27	0.88	17.218
51779	21.151	0.999	17.099



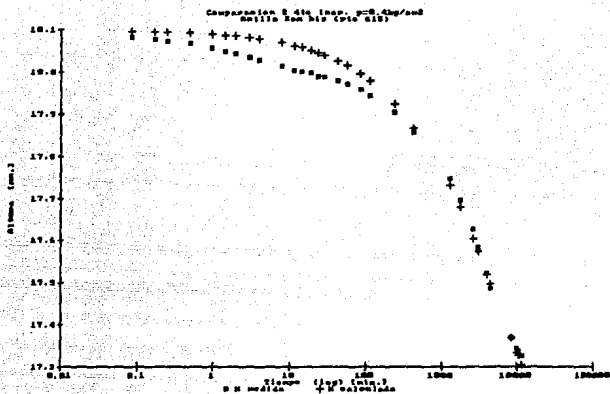
Cuarto incremento de carga ( $p=0.4 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5
ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
18.0951188	18.0955535	18.0916206	18.0937566	18.0947892
18.0937859	18.0943847	18.0892118	18.0919787	18.0933497
18.0928303	18.0935403	18.0875609	18.0907328	18.0923252
18.0905386	18.0914983	18.0837816	18.0878139	18.0898864
18.0872387	18.088527	18.0786472	18.0837319	18.0864068
18.0846727	18.0861983	18.0748319	18.0806296	18.0837209
18.0824937	18.0842096	18.0716828	18.078032	18.0814495
18.0788111	18.080831	18.0665161	18.0737071	18.077629
18.0756874	18.0779492	18.0622569	18.0700902	18.0744019
18.0659586	18.0688991	18.0495366	18.059058	18.0644132
18.0584543	18.0618552	18.0401477	18.0507312	18.0567563
18.0536209	18.0572938	18.03425	18.0454334	18.0518412
18.0465386	18.0505797	18.0257836	18.0377479	18.0446585
18.0407061	18.0446439	18.0184808	18.0310498	18.0387535
18.0346817	18.0392674	18.0119929	18.0250506	18.0326744
18.0202391	18.0253827	17.9957064	18.0098114	18.0181281
18.0081574	18.01369	17.9824224	17.9972141	18.0059909
17.988126	17.9941664	17.9609316	17.9765631	17.9859098
17.9714972	17.9778429	17.9434941	17.9595951	17.9692651
17.9166647	17.9233803	17.8877925	17.9043955	17.9144262
17.8597245	17.8659515	17.8317868	17.8477647	17.8573826
17.7276315	17.7300011	17.7047257	17.7168766	17.7239209
17.6802367	17.6804413	17.6592603	17.6696233	17.6754889
17.6081979	17.6044357	17.5896392	17.5971498	17.6011908
17.5792804	17.573715	17.5614129	17.5677783	17.5711126
17.5289444	17.5199745	17.5117622	17.5161926	17.51838
17.5069947	17.4964429	17.4898728	17.493498	17.4952307
17.3890001	17.3689999	17.3689999	17.3689997	17.3689998
17.3568023	17.3339795	17.3348954	17.3341972	17.3339982
17.3509954	17.3276536	17.3286853	17.3278784	17.3276587
17.3312185	17.3060865	17.3073915	17.3062567	17.3060043
17.3073196	17.2799807	17.28133501	17.2799138	17.2797039
17.2863857	17.2570761	17.2582448	17.2566373	17.2565438
17.236532	17.2023998	17.2020153	17.2003974	17.2009115
17.2071508	17.1700991	17.1680094	17.1666842	17.167798
17.1945687	17.1562509	17.1522341	17.1521101	17.1535408
17.0480846	16.9944988	16.9700709	16.9755829	16.9839122







Resultados:

$$\delta = 0.546$$

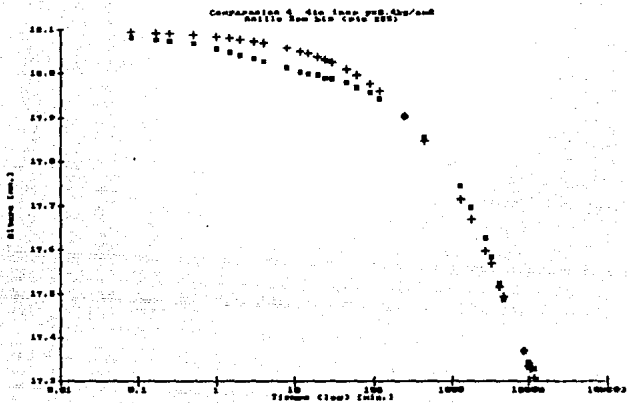
$$t^* = 11398$$

$$Xt = 1.599$$

Ecuación:

$$H = 18.098 - 1.599 / (1 + (11398/t)^{0.546})$$





Resultados:

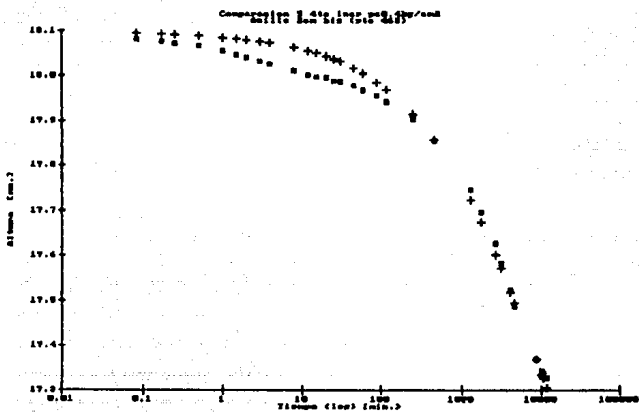
$$\delta = 0.489$$

$$t\delta = 19825$$

$$Xt = 1.824$$

Ecuación:

$$H = 18.098 - 1.824 / (1 + (19825/t)^{0.489})$$



**Resultados:**

$$\delta = 0.518$$

$$t^* = 15093$$

$$Xt = 1.7025$$

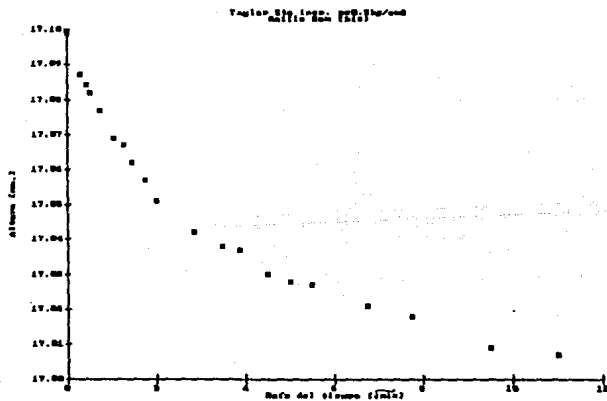
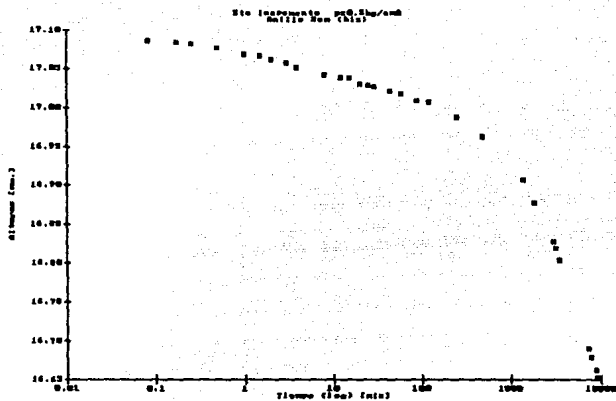
**Ecuación:**

$$H = 18.098 - 1.7025 / (1 + (15093/t)^{0.518})$$

Quinto incremento de carga ( $p=0,5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	21.151	0	17.099
0.083	21.139	0.012	17.087
0.17	21.136	0.015	17.084
0.25	21.134	0.017	17.082
0.5	21.129	0.022	17.077
1	21.121	0.03	17.069
1.5	21.119	0.032	17.067
2	21.114	0.037	17.062
3	21.109	0.042	17.057
4	21.103	0.048	17.051
8	21.094	0.057	17.042
12	21.09	0.061	17.038
15	21.089	0.062	17.037
20	21.082	0.069	17.03
25	21.08	0.071	17.028
30	21.079	0.072	17.027
45	21.073	0.078	17.021
60	21.07	0.081	17.018
90	21.061	0.09	17.009
121	21.059	0.092	17.007
240	21.04	0.111	16.988
477	21.015	0.136	16.963
1367	20.959	0.192	16.907
1819	20.93	0.221	16.878
2870	20.88	0.271	16.828
3018	20.871	0.28	16.819
3328	20.856	0.295	16.804
7168	20.742	0.409	16.69
7653	20.731	0.42	16.679
8598	20.715	0.436	16.663
9039	20.705	0.446	16.653
10041	20.685	0.466	16.633
11457	20.658	0.493	16.606
13393	20.628	0.523	16.576
17202	20.585	0.566	16.533



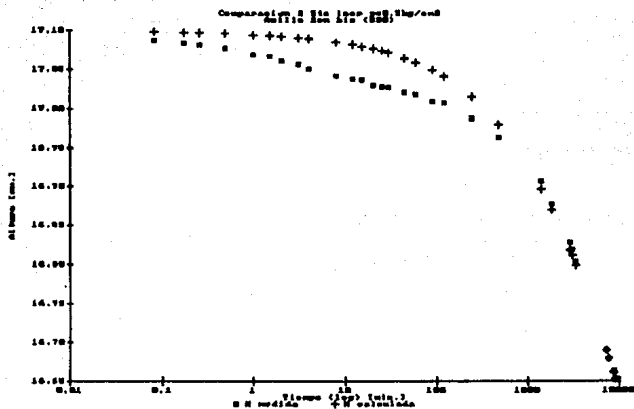
Quinto incremento de carga ( $p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 2 Ecuación 3

ERR	ERR
17.0979765	17.097955
17.0974701	17.0974404
17.097101	17.0970657
17.0962	17.0961522
17.0948728	17.0948087
17.0938224	17.0937467
17.0929195	17.0928345
17.0913751	17.0912753
17.0900484	17.089937
17.0858758	17.085692
17.0825156	17.0823502
17.0803486	17.0801705
17.0771368	17.0769417
17.0742767	17.074068
17.0716703	17.0714503
17.0648744	17.0646293
17.0590829	17.0588204
17.0492823	17.0489972
17.0407105	17.0404113
17.0151956	17.0148774
16.9794902	16.9791832
16.8970479	16.8968433
16.869848	16.8696851
16.8178201	16.8177328
16.8115948	16.8115157
16.7992123	16.7991488
16.6898834	16.689893
16.6796312	16.6796402
16.6610846	16.6610884
16.6529988	16.6529988
16.6357867	16.6357749
16.6137993	16.6137653
16.5872825	16.5872103
16.5478671	16.5437035





Resultados:

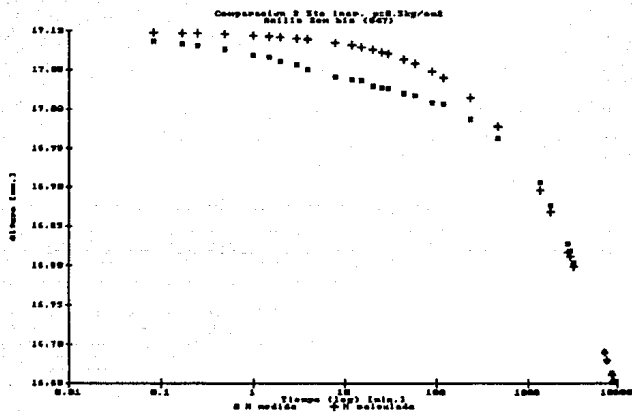
$$\delta = 0.561$$

$$t\# = 26927$$

$$Xt = 1.269$$

Ecuación:

$$H = 17.099 - 1.269 / (1 + (26927/t)^{0.561})$$



Resultados:

$$\delta = 0.559$$

$$t^* = 27662$$

$$Xt = 1.2795$$

Ecuación:

$$H = 17.099 - 1.2795 / (1 + (27662/t)^{0.559})$$

Sexto incremento de carga ( $p=0.7 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

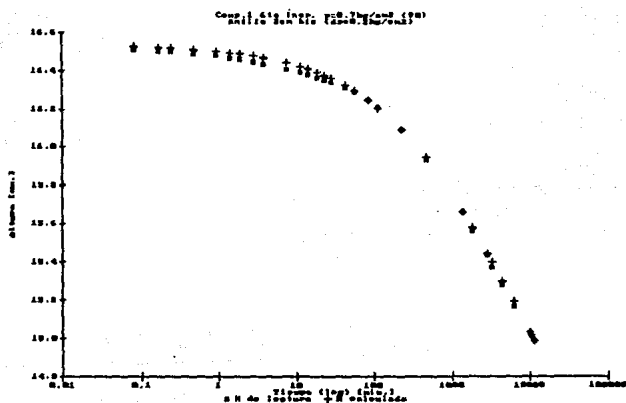
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas $H_i$
0	20.585	0	16.533
0.083	20.56	0.025	16.508
0.17	20.555	0.03	16.503
0.25	20.55	0.035	16.498
0.5	20.541	0.044	16.489
1.	20.53	0.055	16.478
1.5	20.519	0.066	16.467
2	20.51	0.075	16.458
3	20.495	0.09	16.443
4.05	20.485	0.1	16.433
8	20.457	0.128	16.405
12	20.439	0.146	16.387
15	20.4295	0.1555	16.3775
20	20.412	0.173	16.36
25	20.4	0.185	16.348
30	20.3895	0.1955	16.3375
45	20.361	0.224	16.309
60	20.337	0.248	16.285
90	20.295	0.29	16.243
120	20.26	0.325	16.208
240	20.14	0.445	16.088
484	19.982	0.603	15.93
1440	19.712	0.873	15.66
1894	19.613	0.972	15.561
2937	19.484	1.101	15.432
3357	19.4195	1.1655	15.3675
4507	19.332	1.253	15.28
6210	19.219	1.366	15.167
10095	19.0805	1.5045	15.0285
10589	19.06	1.525	15.008
11541	19.039	1.546	14.987



Sexto incremento de carga ( $p=0.7$  kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
ERR	ERR	ERR	ERR
16.5232174	16.5238346	16.5228903	16.5200449
16.5190147	16.5198284	16.518595	16.5148895
16.5160546	16.5169956	16.5155588	16.5113195
16.509087	16.5103001	16.50845	16.5030624
16.4992908	16.5009381	16.4984814	16.4917064
16.4918204	16.4935936	16.4908946	16.4831934
16.4855539	16.4875011	16.4845388	16.4761302
16.4751062	16.477317	16.4739561	16.4644846
16.4659557	16.4683741	16.4646994	16.4543978
16.4596816	16.4425999	16.4381705	16.4258932
16.4195715	16.4227954	16.4179051	16.4044357
16.4067991	16.4101889	16.4050486	16.3909371
16.3883095	16.3919058	16.3864544	16.3715478
16.3722392	16.3759866	16.3703077	16.3548231
16.3576042	16.3617467	16.3558946	16.339972
16.3215989	16.3256797	16.3194992	16.3027516
16.2918151	16.2960088	16.2896587	16.2724889
16.2434354	16.2477087	16.2412392	16.2237766
16.2041188	16.2083791	16.2019293	16.1845201
16.0903719	16.0943073	16.0883456	16.0721543
15.9452728	15.9484049	15.9436495	15.9304452
15.6587571	15.6599114	15.6581285	15.6523539
15.5764224	15.577056	15.5760574	15.5722904
15.4381702	15.4380877	15.438171	15.4372583
15.394822	15.3945685	15.3949113	15.3947138
15.2979325	15.2974116	15.2981633	15.2991732
15.1913848	15.1907816	15.1916663	15.1932659
15.0306086	15.030386	15.0307157	15.031401
15.0149965	15.0148474	15.0150685	15.0155318
14.9870001	14.9870003	14.9870002	14.9870004



**Resultados:**

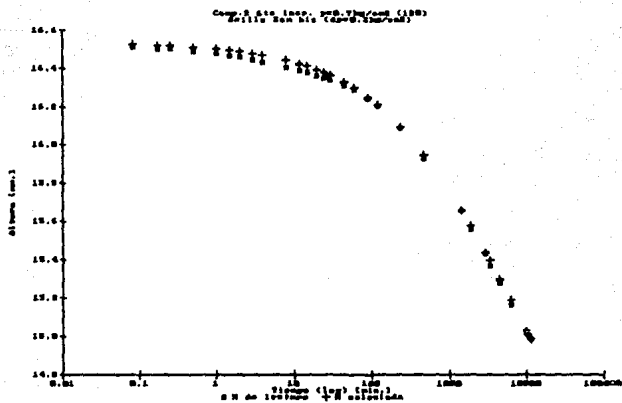
$$\delta = 0.501$$

$$t_1 = 5993$$

$$X_t = 2.6595$$

**Ecuación:**

$$H = 16.533 - 2.6595 / (1 + (5993/t)^{0.501})$$



Resultados:

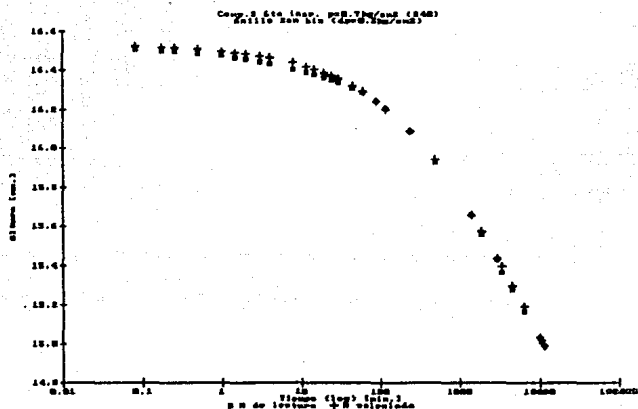
$$\delta = 0.508$$

$$t\delta = 5654$$

$$xt = 2.622$$

Ecuación:

$$H = 16.533 - 2.622 / (1 + (5654/t)^{0.508})$$



Resultados:

$$\delta = 0.497$$

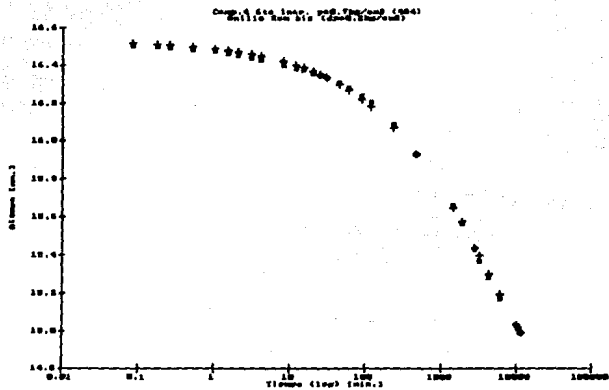
$$t\delta = 6176$$

$$Xt = 2.679$$

Ecuación:

$$H = 16.533 - 2.679 / (1 + (6176/t)^{0.497})$$





Resultados:

$$\delta = 0.47$$

$$t\delta = 7896$$

$$x_t = 2.8395$$

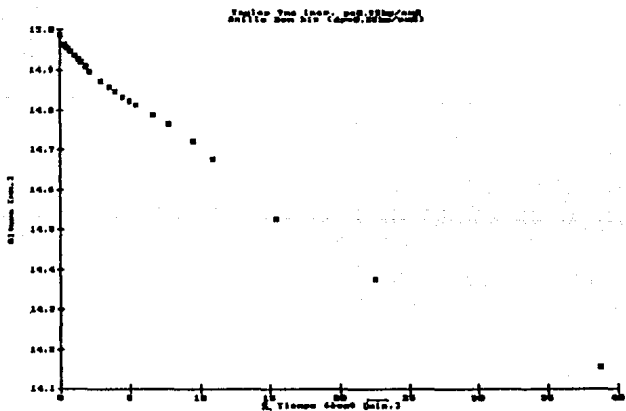
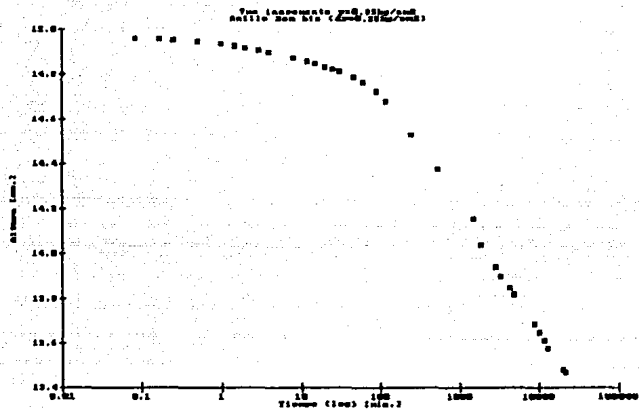
Ecuación:

$$H = 16.533 - 2.8395 / (1 + (7896/t)^{0.47})$$

Éptimo incremento de carga ( $p=0.95 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis)

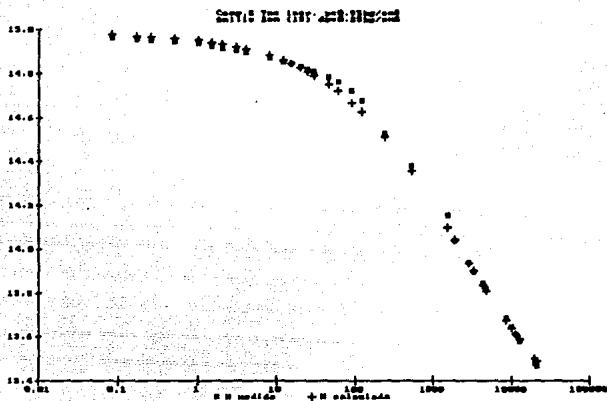
Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	19.039	0	14.987
0.083	19.015	0.024	14.963
0.17	19.01	0.029	14.958
0.25	19.006	0.033	14.954
0.5	18.999	0.04	14.947
1	18.988	0.051	14.936
1.5	18.979	0.06	14.927
2	18.971	0.068	14.919
3	18.96	0.079	14.908
4	18.95	0.089	14.898
8	18.925	0.114	14.873
12	18.91	0.129	14.858
15	18.9	0.139	14.848
20	18.885	0.154	14.833
25	18.874	0.165	14.822
30	18.865	0.174	14.813
45	18.84	0.199	14.788
60	18.818	0.221	14.766
90	18.775	0.264	14.723
120	18.7295	0.3095	14.6775
240	18.5795	0.4595	14.5275
514	18.4295	0.6095	14.3775
1503	18.209	0.83	14.157
1825	18.091	0.948	14.039
2866	17.9905	1.0485	13.9385
3309	17.951	1.088	13.899
4308	17.899	1.14	13.847
4825	17.8695	1.1695	13.8175
8638	17.738	1.301	13.686
10073	17.698	1.341	13.646
11487	17.664	1.375	13.612
12894	17.63	1.409	13.578
20153	17.532	1.507	13.48
21515	17.52	1.519	13.468



Séptimo incremento de carga ( $p=0.95$  kg/cm<sup>2</sup>)

Anillo de 2 cm (bis)

Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 5	Ecuación 6
ERR	ERR	ERR	ERR
14.9770106	14.9780556	14.9761275	14.974962
14.9725374	14.9739211	14.9713771	14.969859
14.9693592	14.9709614	14.9680213	14.966278
14.9618141	14.9638799	14.9601018	14.957888
14.951102	14.9537268	14.9489419	14.94617
14.9428786	14.9458729	14.9404242	14.937288
14.9359552	14.9392281	14.9332795	14.929871
14.9243758	14.9280596	14.9213751	14.917569
14.9146594	14.9186424	14.9114228	14.907329
14.8849582	14.889651	14.8811632	14.876394
14.8625707	14.8676369	14.8584823	14.85336
14.8483718	14.8536167	14.8441425	14.838852
14.8278606	14.8332957	14.8234802	14.818011
14.8100859	14.8156289	14.8056184	14.800046
14.7942571	14.799257	14.789742	14.784114
14.7544823	14.7600862	14.7499533	14.744312
14.7221175	14.7276022	14.7176701	14.712127
14.6701493	14.6752626	14.6659684	14.660744
14.6285048	14.6331957	14.6246314	14.619772
14.5111832	14.5143001	14.5084672	14.504976
14.3553373	14.3560106	14.3544391	14.353099
14.0993198	14.0966608	14.1009738	14.102698
14.0423628	14.0392607	14.044377	14.046548
13.9367818	13.9332831	13.9391595	13.94181
13.9008625	13.897373	13.9032593	13.905952
13.8358125	13.8325507	13.8380891	13.840677
13.8083341	13.8052563	13.810495	13.812961
13.673352	13.6720302	13.6743025	13.675407
13.6398398	13.6391961	13.6403051	13.640848
13.6120001	13.6120002	13.6119999	13.612
13.588152	13.5887642	13.5877058	13.587182
13.5019417	13.5052664	13.4994882	13.49658
13.4901406	13.4939014	13.4873605	13.484061



Resultados:

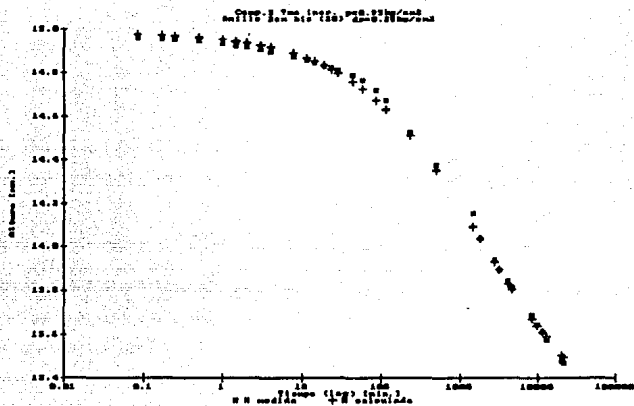
$$\delta = 0.519$$

$$t_f = 2101$$

$$x_t = 1.944$$

Ecuación:

$$H = 14.987 - 1.944 / (1 + (2101/t)^{0.519})$$



Resultados:

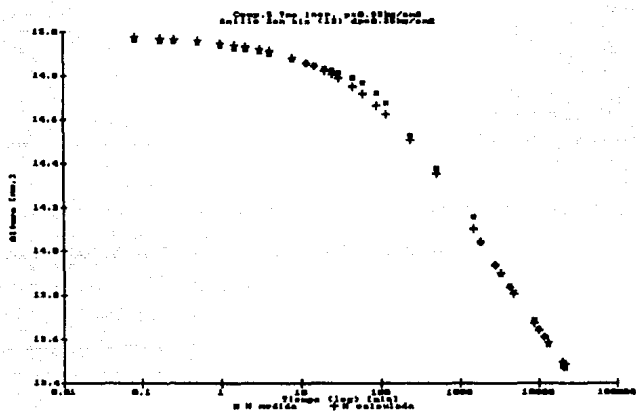
$$\delta = 0.533$$

$$t^* = 1921$$

$$X_t = 1.905$$

Ecuación:

$$H = 14.987 - 1.905 / (1 + (1921/t)^{0.533})$$



**Resultados:**

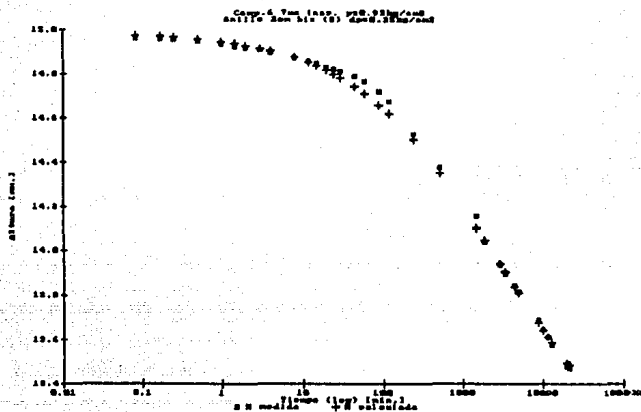
$$\delta = 0.509$$

$$t\delta = 2256$$

$$x_t = 1.9755$$

**Ecuación:**

$$H = 14.987 - 1.9755 / (1 + (2256/t)^{0.509})$$



Resultados:

$$\delta = 0.497$$

$$t^* = 2470$$

$$X_t = 2.016$$

Ecuación:

$$H = 14.987 - 2.016 / (1 + (2470/t)^{0.497})$$

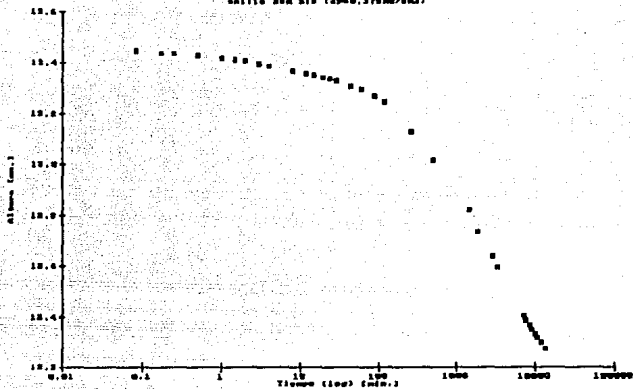


Octavo incremento de carga ( $p=1.375 \text{ kg/cm}^2$ )

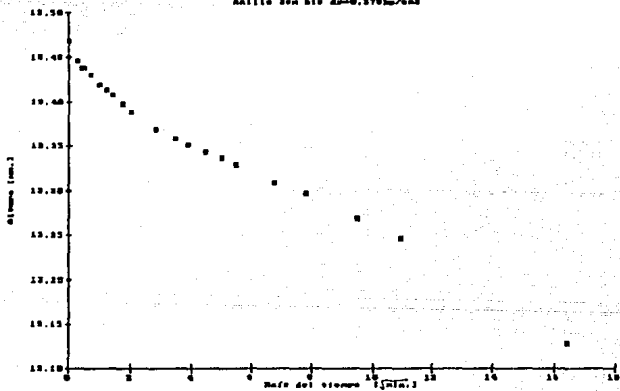
Anillo de 2 cm (bis)

Tiempo	Micrómetro	Deformación	Alturas Hi
0	17.52	0	13.468
0.083	17.498	0.022	13.446
0.17	17.491	0.029	13.439
0.25	17.49	0.03	13.438
0.5	17.482	0.038	13.43
1	17.471	0.049	13.419
1.5	17.465	0.055	13.413
2	17.4595	0.0605	13.4075
3	17.4495	0.0705	13.3975
4	17.441	0.079	13.389
8	17.421	0.099	13.369
12	17.41	0.11	13.358
15	17.404	0.116	13.352
20	17.395	0.125	13.343
25	17.389	0.131	13.337
30	17.381	0.139	13.329
45	17.361	0.159	13.309
61	17.349	0.171	13.297
90	17.32	0.2	13.268
120	17.298	0.222	13.246
270	17.18	0.34	13.128
518	17.069	0.451	13.017
1469	16.878	0.642	12.826
1908	16.788	0.732	12.736
2980	16.691	0.829	12.639
3455	16.648	0.872	12.596
7368	16.46	1.06	12.408
7782	16.4395	1.0805	12.3875
8687	16.419	1.101	12.367
9169	16.404	1.116	12.352
10144	16.385	1.135	12.333
10608	16.371	1.149	12.319
11959	16.35	1.17	12.298
13384	16.325	1.195	12.273

con incremento di 0.1 kg/cm<sup>2</sup>  
 sulla base di 0.570 kg/cm<sup>2</sup>



Taylor 8va inv. di 0.1 kg/cm<sup>2</sup>  
 sulla base di 0.570 kg/cm<sup>2</sup>

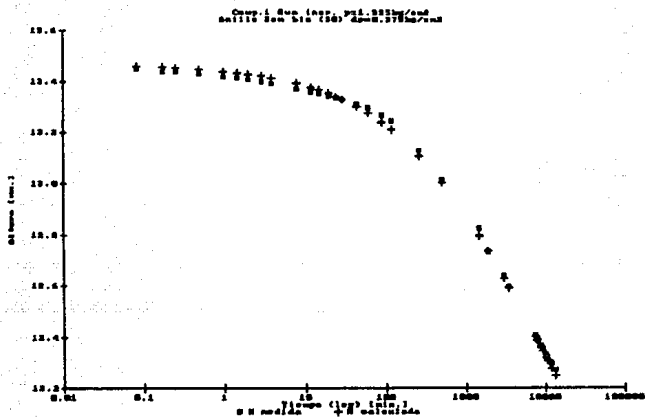


Octavo incremento de carga ( $p=1.375 \text{ kg/cm}^2$ )

Anillo de 2 cm (bis) Curvas teóricas.

Ecuación 1 Ecuación 2 Ecuación 3 Ecuación 4

ERR	ERR	ERR	ERR
13.459419	13.4607294	13.4624136	13.4631589
13.4558779	13.4575897	13.4598272	13.4608339
13.4534062	13.4553757	13.4579735	13.4591527
13.4476417	13.4501576	13.4535303	13.4550859
13.439631	13.4428096	13.44714	13.4491689
13.4335768	13.437199	13.44218	13.4445352
13.4285274	13.4324889	13.4379721	13.4405814
13.4201577	13.4246293	13.4308752	13.4338739
13.4131916	13.418045	13.4248671	13.4281629
13.3921148	13.3979323	13.4062309	13.4102978
13.3763641	13.3827511	13.3919359	13.3964728
13.3664089	13.3731013	13.3827659	13.3875595
13.3520542	13.3591225	13.3693826	13.3744971
13.3396251	13.3469645	13.3576574	13.363007
13.3285554	13.3360981	13.3471183	13.3526467
13.3006913	13.3086083	13.320238	13.326103
13.276535	13.2846404	13.296584	13.3026252
13.2411014	13.2492975	13.2614032	13.2675398
13.211291	13.2194228	13.2314369	13.2375274
13.1087408	13.1159612	13.1265227	13.1318166
13.0045884	13.0102375	13.0182578	13.022143
12.7966235	12.7987388	12.8011266	12.8019364
12.7372193	12.7384678	12.7395264	12.7396388
12.6306262	12.6306871	12.6300272	12.6292929
12.5940669	12.5938575	12.5928512	12.5919713
12.4015369	12.4014157	12.4011686	12.4010085
12.3874992	12.3874996	12.3874995	12.3874995
12.3592752	12.3595733	12.3601566	12.3605256
12.3454437	12.3459145	12.3468266	12.3473999
12.3196204	12.3204619	12.3220655	12.3230618
12.3082226	12.3092482	12.3111897	12.31239
12.2777944	12.2793752	12.2823181	12.2841162
12.2474138	12.2515978	12.2556081	12.2580338



Resultados:

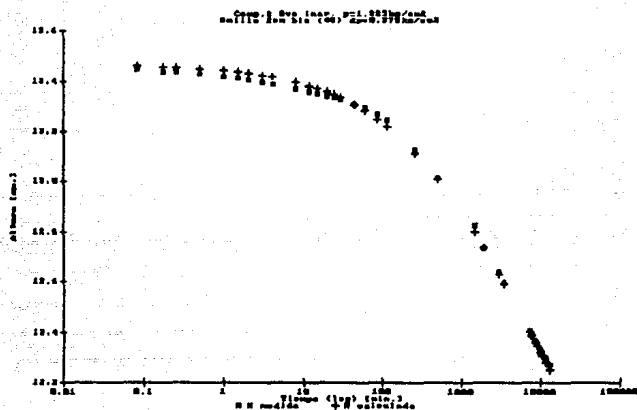
$$\delta = 0.484$$

$$t\delta = 7207$$

$$Xt = 2.1216$$

Ecuación:

$$H = 13.468 - 2.1216 / (1 + (7207/t)^{0.484})$$



Resultados:

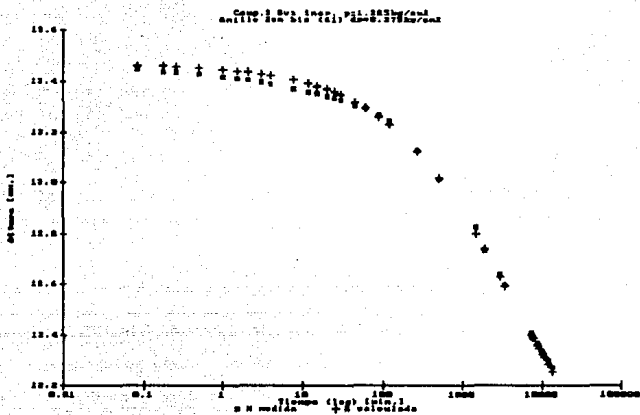
$$\delta = 0.503$$

$$t_f = 6038$$

$$X_t = 2.0316$$

Ecuación:

$$H = 13.468 - 2.0316 / (1 + (6038/t)^{0.503})$$



**Resultados:**

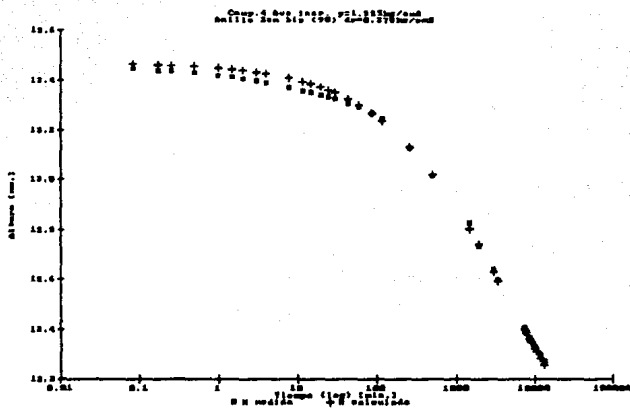
$$\delta = 0.533$$

$$t\delta = 4716$$

$$x_t = 1.908$$

**Ecuación:**

$$H = 13.468 - 1.908 / (1 + (4716/t)^{0.533})$$



Resultados:

$$\delta = 0.549$$

$$t\delta = 4185$$

$$Xt = 1.8492$$

Ecuación:

$$H = 13.468 - 1.8492 / (1 + (4185/t)^{0.549})$$

### Curvas de compresibilidad:

Como ya se ha explicado, con cada incremento de presión se obtienen dos puntos, principalmente, para la curva de compresibilidad.

Para el caso del punto ( $\sigma', \epsilon$ ) para el 100% de la consolidación primaria, no hay problema, puesto que ya fueron obtenidos por dos métodos (Casagrande y Taylor) y para ambos, los puntos son casi los mismos. Debido a esto, se promediaron y se graficaron así.

Para los puntos ( $\sigma', \epsilon$ ) para un tiempo  $t = \infty$  (fin del proceso de consolidación), resulta problemático y un poco elaborado obtenerlos, debido a que de cada incremento, como ya se observó, se obtuvieron en promedio 4 ecuaciones de la consolidación secundaria, y por lo tanto, 4 puntos finales en promedio.

Consecuentemente, se tuvo que seguir el siguiente proceso:

- Seleccionar de cada incremento y anillo dos curvas teóricas de consolidación que se aproximan más a la experimental.
- De estas curvas seleccionadas, agruparlas de acuerdo a los parámetros obtenidos en cada una de ellas, de forma que estos parámetros fueran lo más aproximados posibles (Realmente el que se usó con este fin fue solamente el parámetro  $\delta$ ); y obtener las  $\epsilon$  (para  $t=t_p$  y  $t=\infty$ ).
- Una vez hecho esto, se debe verificar si el coeficiente de compresibilidad ( $\gamma$ ) es el mismo para las curvas  $t=t_p$  y  $t=\infty$ . Para este fin, usese la ecuación (51) probandola con varios puntos, y si son cercanos sus valores sacáries su promedio.
- Si efectivamente resulta igual el coeficiente de compresibilidad, serán ya las curvas definitivas, en caso contrario, y como sucedió en el presente trabajo, se deben probar otros puntos de otras curvas teóricas, dependiendo si se requieren subir o bajar los puntos en la curva de compresibilidad. Para subir el punto se necesita escoger la curva con un  $\delta$  mayor al escogido, debido a que se observó que para una  $\delta$  mayor resultante se obtiene una  $x$  menor, y viceversa. Los puntos a mover fueron escogidos según criterio del autor, observando que algunos puntos se salían totalmente de la curva suavizada y otros eran correctos o casi correctos. Las curvas de consolidación que finalmente fueron seleccionadas para formar la curva de compresibilidad, fueron marcadas con un círculo encerrando el número de la página para la primera opción, y con doble círculo para la segunda opción (sólo el anillo de 2 cm.). Algunas curvas de consolidación de las escogidas no aparecan debido a posteriores cálculos descritos arriba que arrojaron cambios mínimos en los parámetros, por lo tanto las curvas cuyos números de página están encerrados en un rectángulo son las que más se aproximan a las escogidas, realmente son tan próximas que casi no hay diferencia.

Como posteriormente se mencionará, es preciso escoger una de



las dos opciones que se presentaron para el anillo de 2 cm.. La forma en como fue hecha elección se presenta en el siguiente capítulo; es por ello que a continuación, y en adelante, se presenta solamente la opción elegida.

*Nota:* Los puntos que forman la curva de compresibilidad para  $t=t_p$ , fueron obtenidos de las curvas de consolidación al 100% de C.P. pero no necesariamente son los puntos de la curva virgen, debido a que con los incrementos pequeños dados, no se sobrepasó la curva virgen que en teoría (según Mesri) es única (aunque parece no ser así). Solamente con incrementos grandes se asegura que se sobrepasa la curva virgen para  $t=t_p$ . Para los anillos de 2 y 1.5 cm. sí son de la curva virgen, porque con los incrementos que sobrepasan con seguridad a ésta (incrementos 8 y 10 para el de 2 cm., y el incremento 9 para el de 1.5 cm.), se adecuó la  $\gamma_w$  calculada. Mientras que para los anillos de 2.5 y 2 cm. bis, no hubieron incrementos que con seguridad sobrepasaran la curva virgen, por lo tanto no se sabe si los puntos son o no los de la curva virgen, ya que pudieron pasar por muy poco ésta al hacer el incremento y realmente ser puntos sobre la misma, o no sobrepasarla, siendo puntos bajo ésta.

A continuación se muestran:

Las tablas de los puntos definitivos de las curvas de compresibilidad.

Las gráficas mismas en tres formas:

- 1o. Escala aritmética, con los cuatro puntos mencionados anteriormente (inicial,  $t=t_p$ , último leído y  $t=\infty$ ), con las curvas teóricas obtenidas.
- 2o. Escala semilogarítmica con los 4 puntos y las curvas teóricas.
- 3o. Escala logarítmica con las 2 curvas teóricas y los 4 puntos mencionados de la siguiente forma:  $\sigma$  en las abscisas y  $l+e$  en las ordenadas.

Los valores finales obtenidos del coeficiente de compresibilidad ( $\gamma$ ).

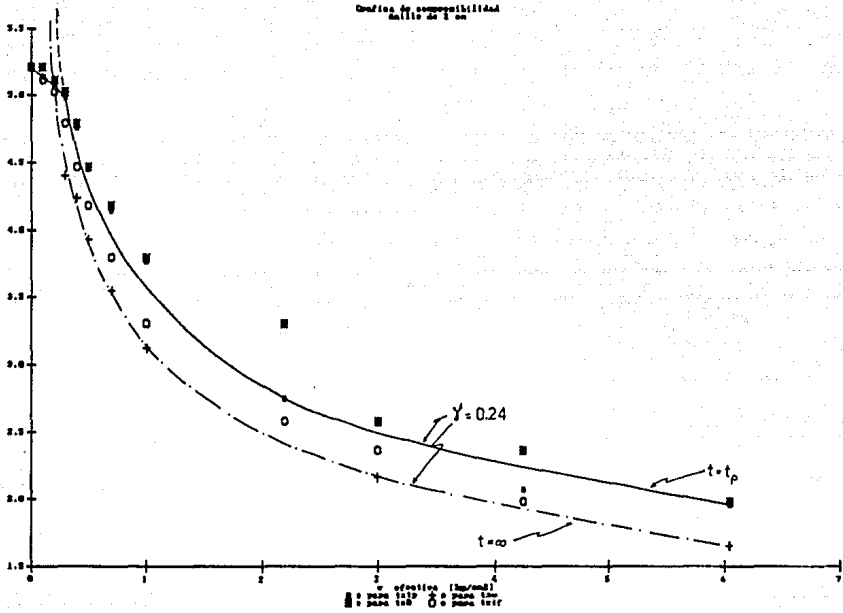
Tablas de obtención para graficas e-v

Anillo de 2 cm

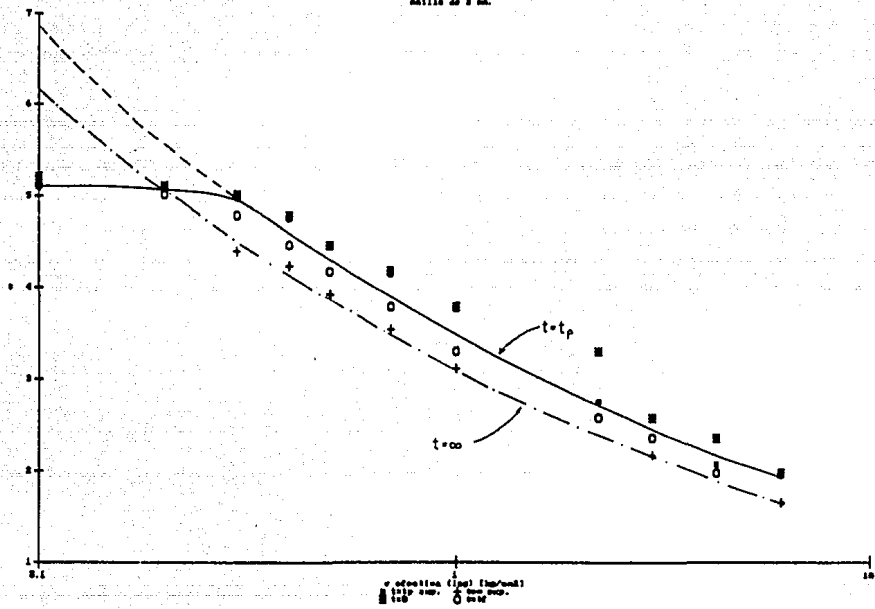
Incremento (kg/cm2)	Carga tot (kg/cm2)	100% c.p. C.	100% c.p. T.	Promedio c.p.	e t=tp
0	0			20	5.2085579
0.1	0.1	19.773	19.789	19.781	5.1405742
0.1	0.2	19.584	19.573	19.5785	5.0777125
0.1	0.3	19.274	19.266	19.27	4.9819455
0.1	0.4	18.562	18.544	18.553	4.7593687
0.1	0.5	17.558	17.556	17.557	4.4501825
0.2	0.7	16.568	16.565	16.5665	4.1427037
0.3	1	15.36	15.3152	15.3376	3.7612189
1.2	2.2	11.938	12.208	12.073	2.747796
0.8	3	11.46	11.4665	11.46325	2.5585126
1.25	4.25	9.852	9.953	9.9025	2.0740122
1.8	6.05	9.515	9.5185	9.51675	1.9542647

H final t=∞	e t=infin.	H <sub>i</sub> t=0	e t=0	H lect. f. t=tf	e t=tf
		20	5.2085579	20	5.2085579
		20	5.2085579	19.711	5.1188442
		19.711	5.1188442	19.41	5.0254054
17.4135	4.4056361	19.41	5.0254054	18.648	4.7888594
16.8825	4.2407989	18.648	4.7888594	17.618	4.4691186
15.881	3.9299054	17.618	4.4691186	16.695	4.1825937
14.6475	3.5469926	16.695	4.1825937	15.45	3.796111
13.263	3.1172052	15.45	3.796111	13.873	3.3065662
		13.873	3.3065662	11.539	2.5820275
10.203	2.1672958	11.539	2.5820275	10.839	2.3647279
		10.839	2.3647279	9.611	1.9835225
9.519	1.6538481	9.611	1.9835225		

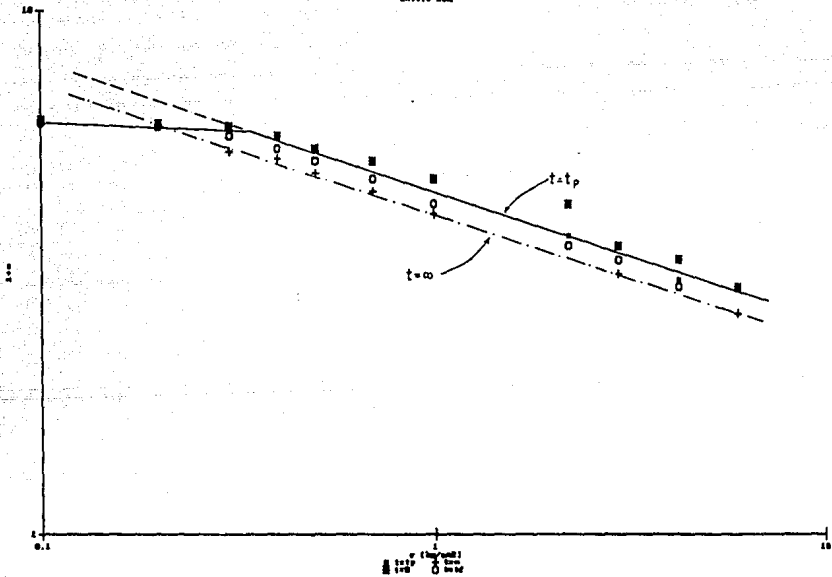
Gráfico de compatibilidad  
 Salto de 1 cm



Coeficiente de compresibilidad  
 Anillo de 3 mm.



Compressibility  
 Modulus



Variación de  $U_p$

Incremento (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga tot (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta e$ prim	$\Delta e$ tot.	$U_p$
0	0	ERR	ERR	ERR
0.1	0.1	-1.6615562	-0.9554683	-1.73899663
0.1	0.2	-0.545138	0.05273863	-10.336598
0.1	0.3	-0.0206472	0.52179019	-0.03957
0.1	0.4	0.1461637	0.65241289	0.22403557
0.1	0.5	0.12066513	0.60051562	0.20093587
0.2	0.7	0.24906684	0.6916911	0.36008391
0.3	1	0.26733303	0.67364418	0.39684604
1.2	2.2	0.55856617	0.89482779	0.62421639
0.8	3	0.10288731	0.41502747	0.24790482
1.25	4.25	0.16459749	0.45170556	0.36439111
1.8	6.05	0.04343851	0.30721583	0.14139411

donde:  $U_p = \Delta e_r / \Delta e_m$

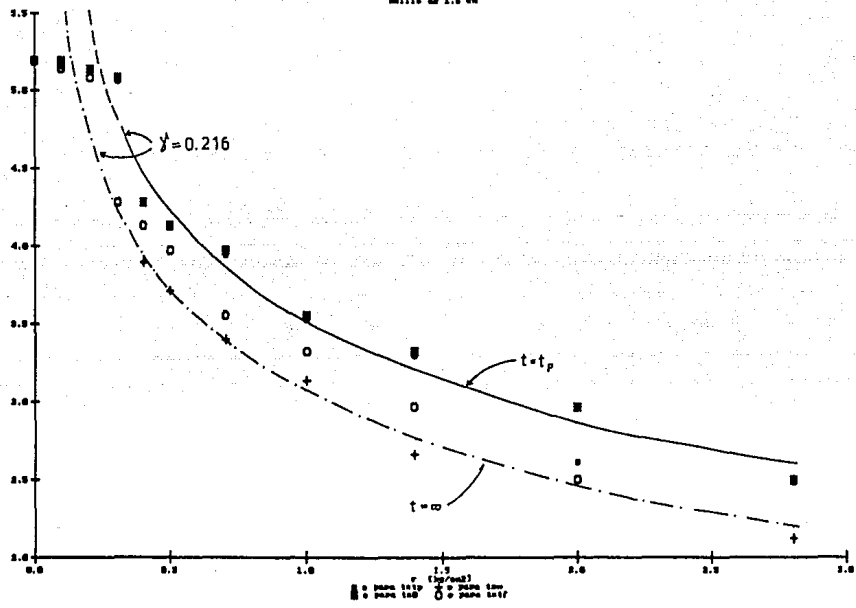
Tablas de obtención para graficas e-r

Anillo de 1.5 cm

Incremento (kg/cm2)	Carga tot (kg/cm2)	100% c.p. C.	100% c.p. T.	Promedio c.p.	e t=tp
0	0			14.95	5.1910184
0.1	0.1	14.8494	14.886	14.8677	5.1569368
0.1	0.2	14.7835	14.788	14.78575	5.123
0.1	0.3	14.65	14.647	14.6485	5.0661628
0.1	0.4	12.769	12.722	12.7455	4.278102
0.1	0.5	12.358	12.353	12.3555	4.1165972
0.2	0.7	11.945	11.943	11.944	3.9461889
0.3	1	10.9421	10.9421	10.9421	3.5312871
0.4	1.4	10.364	10.3676	10.3658	3.2926327
0.6	2	8.655	8.795	8.725	2.6131529
0.8	2.8	8.41	8.4013	8.40565	2.4809053

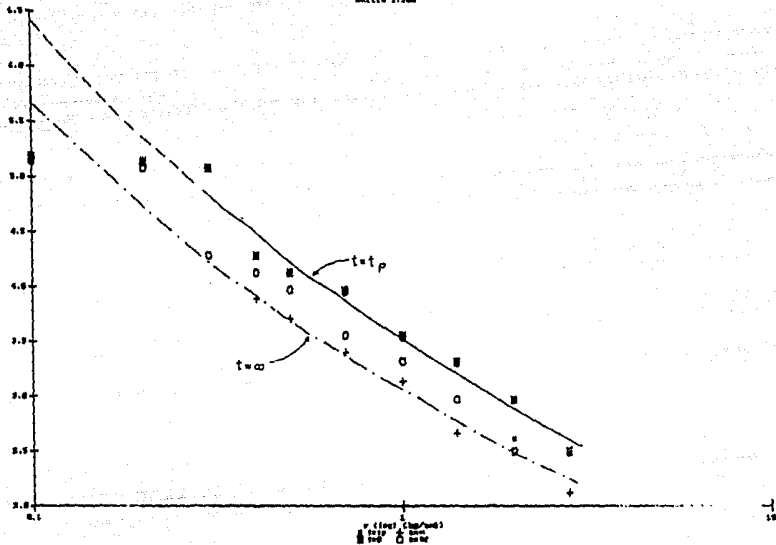
H final t=e	e t=e	H inicial t=0	e t=0	H final t=tf	e t=tf	
			14.95	5.1910184	14.95	5.1910184
			14.95	5.1910184	14.836	5.1438093
			14.836	5.1438093	14.693	5.0845909
			14.693	5.0845909	12.769	4.2878337
11.824	3.8964951		12.769	4.2878337	12.397	4.133783
11.377	3.7113857		12.397	4.133783	12.011	3.9739346
10.631	3.402456		12.011	3.9739346	11.003	3.5565067
9.986	3.1353518		11.003	3.5565067	10.443	3.3246024
8.847	2.6636749		10.443	3.3246024	9.584	2.9688776
			9.584	2.9688776	8.456	2.501756
7.54	2.1224267		8.456	2.501756		

Compressibilidad  
 Muelle de 1.5 cm

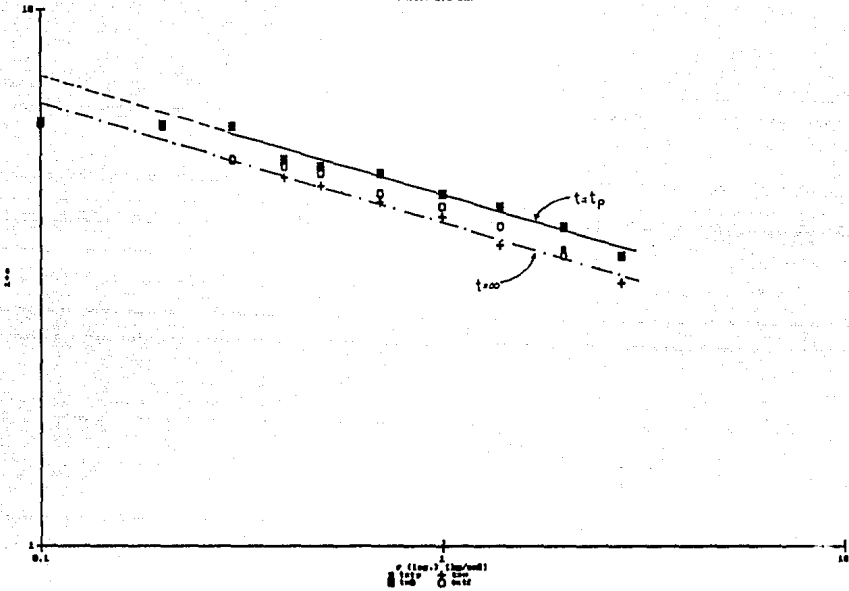




G. compressibility  
 mille 1.200



C. *complanata*  
 Anillo 1.0 mm.

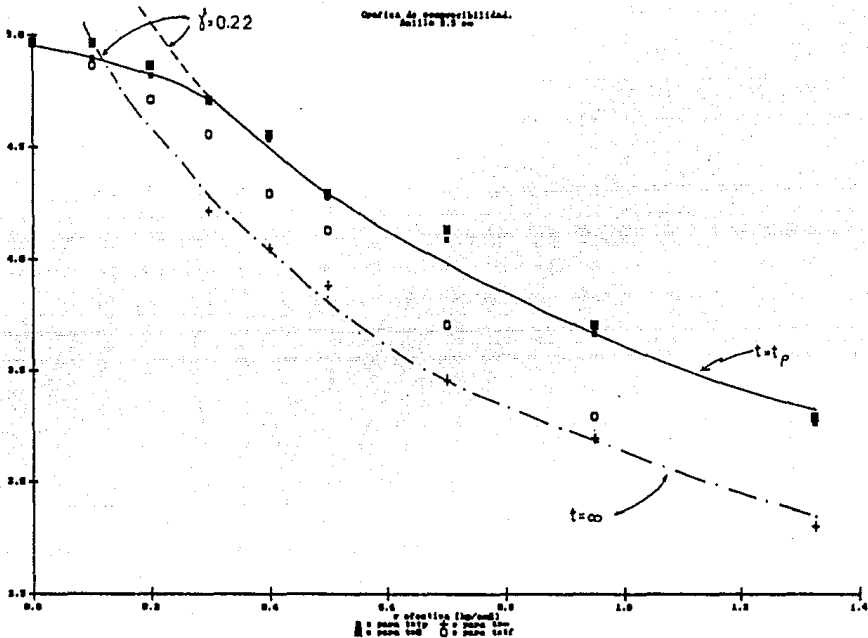


Variación de Up.

Anillo de 1.5 cm

$\Delta a$	$p$	$\Delta a$	$t$	Up	IncrementoCarga (kg/cm2)	Carga tot (kg/cm2)
		ERR	ERR		0	0
-1.041574		-0.467715			0.1	0.1
-0.087403		0.4070028			0.1	0.2
0.3735812		0.8267119	0.451888		0.1	0.3
-0.080643		0.3453101			0.1	0.4
0.016783		0.422783	0.0396964		0.1	0.5
0.2140339		0.5917005	0.3617268		0.2	0.7
0.147975		0.4977628	0.2972802		0.3	1
0.2237282		0.5491054	0.4074413		0.4	1.4
0.1707241		0.4720824	0.3616404		0.6	2
-0.031336		0.248991			0.8	2.8

Gráfica de compresibilidad.  
Anillo 8.3 cm



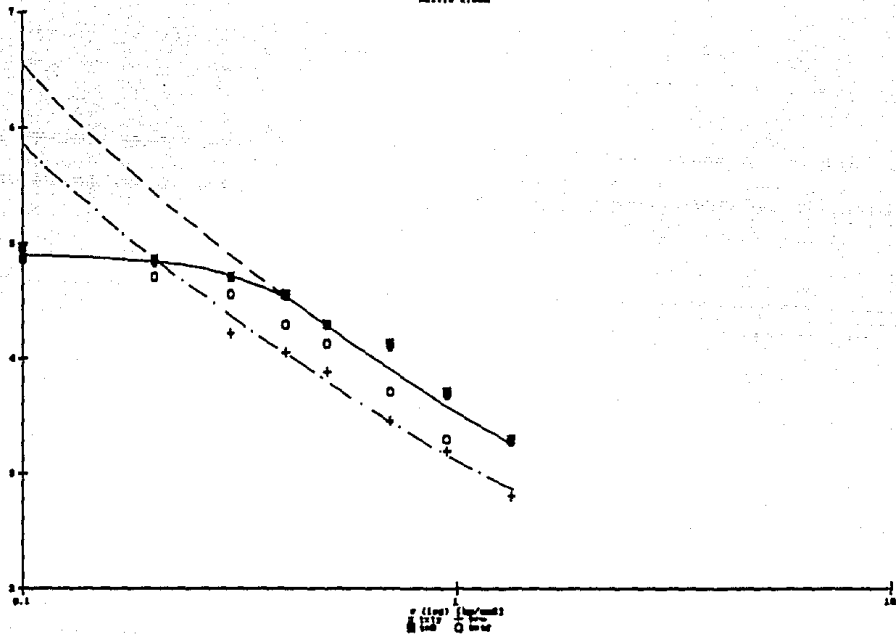
Tablas de obtención para graficas e-r

Anillo de 2.5 cm

Incremento (kg/cm2)	Carga tot (kg/cm2)	100% c.p. C.	100% c.p. T.	Promedio c.p.	e t=tf
0	0			24.95	4.9669428
0.1	0.1	24.662	24.662	24.662	4.8980659
0.1	0.2	24.35	24.35	24.35	4.8234492
0.1	0.3	23.892	23.894	23.893	4.7141549
0.1	0.4	23.194	23.1767	23.18535	4.5449161
0.1	0.5	22.1021	22.1061	22.1041	4.2863287
0.2	0.7	21.3139	21.3139	21.3139	4.0973476
0.25	0.95	19.58	19.491	19.5355	3.6720325
0.375	1.325	17.855	17.8516	17.8533	3.2697242

H final t=	e t=	H inicial t=0	e t=0	H lect f t=tf	e t=tf
		24.95	4.9669428	24.95	4.9669428
		24.95	4.9669428	24.528	4.8660189
		24.528	4.8660189	23.894	4.714394
21.85	4.2255591	23.894	4.714394	23.267	4.5644432
21.146	4.0571933	23.267	4.5644432	22.178	4.3040023
20.454	3.8916973	22.178	4.3040023	21.49	4.1394629
18.647	3.4595424	21.49	4.1394629	19.697	3.7106562
17.556	3.1986232	19.697	3.7106562	17.98	3.3000253
15.916	2.8064073	17.98	3.3000253		

C. de Composición  
 Radio E. 1.0m





Variación de Up

Anillo 2.5 cm.

$\Delta e$	p	$\Delta e$	t	Up
				0.0638663
				0.3858325
0.0248451		0.5482662		0.0453157
0.0180023		0.5174617		0.0347896
0.214077		0.6794629		0.3150679
0.0912207		0.5276983		0.1728653
-0.007675		0.3993472		



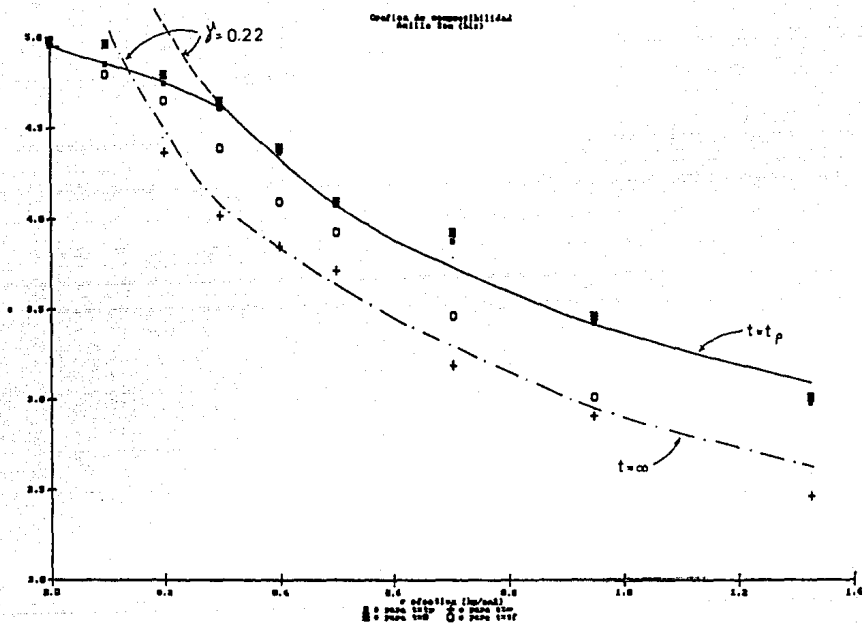
Tablas de obtención para graficas e-r

Anillo de 2 cm (bis)

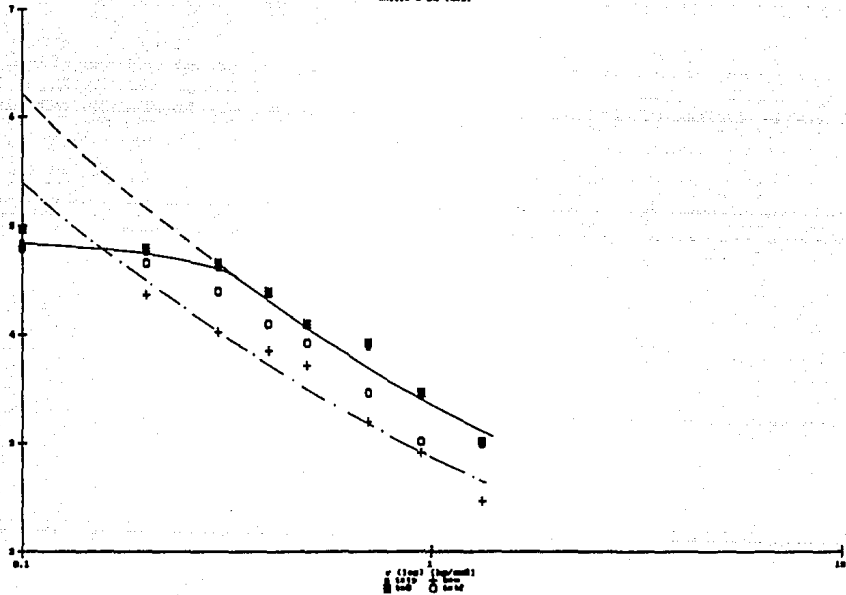
Incremento (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga tot (kg/cm <sup>2</sup> )	100% c.p. C.	100% c.p. T.	Promedio c.p.	e t=tp
0	0			20	4.9669929
0.1	0.1	19.606	19.634	19.62	4.85362
0.1	0.2	19.279	19.283	19.281	4.7524795
0.1	0.3	18.822	18.818	18.82	4.6149403
0.1	0.4	18.012	18.012	18.012	4.3738738
0.1	0.5	17.052	17.0457	17.04885	4.0865183
0.2	0.7	16.404	16.3686	16.3863	3.8888468
0.25	0.95	14.882	14.836	14.859	3.4331774
0.375	1.325	13.36	13.3497	13.35485	2.9844147

H final t=ø	e t=ø	H inicial t=0	e t=0	H lect f. t=tf	e t=tf
		20	4.9669929	20	4.9669929
		20	4.9669929	19.426	4.7957402
17.998	4.3696769	19.426	4.7957402	18.96	4.6567092
16.848	4.0265948	18.96	4.6567092	18.098	4.3995318
16.274	3.8553421	18.098	4.3995318	17.099	4.1014806
15.819	3.719593	17.099	4.1014806	16.533	3.9326147
14.066	3.1965861	16.533	3.9326147	14.987	3.4713661
13.125	2.9158391	14.987	3.4713661	13.468	3.018173
11.619	2.4665245	13.468	3.018173		

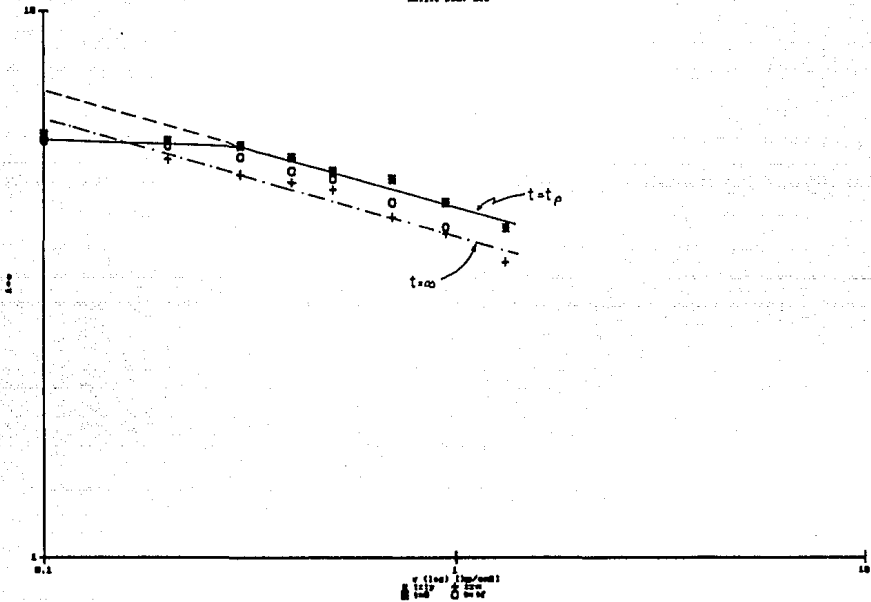
Condición de compatibilidad  
Anillo Son (las)



G<sub>2</sub> Compression Ratio  
Ratio 1 on (1.6)



C. compatibility  
Mills Soc. Inc



Variación de  $U_p$

Anillo 2cm bis.

$\Delta \rho$	$\Delta t$	$U_p$	Incremento (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga tot (kg/cm <sup>2</sup> )
			0	0
			0.1	0.1
			0.1	0.2
			0.1	0.3
0.0482194	0.6340204	0.0760522	0.1	0.4
0.0144806	0.5713571	0.0253441	0.1	0.5
0.2196881	0.7356147	0.2986456	0.2	0.7
0.0740805	0.5554537	0.1333694	0.25	0.95
	0.3871147		0.375	1.325

### Valores del coeficiente de Compresibilidad:

Usando la ecuación (52), los puntos mencionados , dando prioridad a los puntos más alejados entre sí, se tiene:

Anillo de 2 cm:

Primera opción:

C.P.: usando los puntos para las cargas:

$\sigma' = 0.4, 0.5$  y  $2.2$  kg/cm:

$\gamma = 0.242$

$t=\infty$ : usando los puntos para las cargas:

$\sigma' = 0.3, 0.5, 0.7, 1$  y  $3$  kg/cm :

$\gamma = 0.241$

Segunda opción:

$t=\infty$ : usando los puntos para las cargas:

$\sigma' = 0.3, 0.5, 0.7, 1$  y  $3$  kg/cm :

$\gamma = 0.241$

Anillo de 1.5 cm:

C.P.: Usando:  $\sigma' = 0.4, 0.5$  y  $1$  kg/cm :

$\gamma = 0.216$

$t=\infty$ : usando:  $\sigma' = 0.4, 0.5$  y  $0.7$  kg/cm :

$\gamma = 0.216$

Anillo 2.5 cm:

C.P.: usando:  $\sigma' = 0.4, 0.5$  y  $0.95$  kg/cm :

$\gamma = 0.22$

$t=\infty$ : usando:  $\sigma' = 0.3$  y  $0.7$  kg/cm :

$\gamma = 0.22$

Anillo 2 cm (bis):

C.P.: usando:  $\sigma' = 0.4$  y  $0.5$  kg/cm :

$\gamma = 0.22$

$t=\infty$ : usando:  $\sigma' = 0.2, 0.3$  y  $0.7$  kg/cm :

$\gamma = 0.22$

Finalmente, a manera de resumen, se presentan las ecuaciones de las curvas de compresibilidad tanto para  $t=t_p$  como para  $t=\infty$  que resultaron.

Anillo de 2 cm.:

$$t=t_p: \quad e = 3.748 \left( \frac{\sigma' v}{2.2} \right)^{-0.24} - 1$$

$$t=\infty: \quad e = 3.167 \left( \frac{\sigma' v}{3} \right)^{-0.24} - 1$$

Anillo de 1.5 cm.:

$$t=t_p : e = 4.531 \left[ \frac{\sigma'v}{1.0} \right]^{-0.216} - 1$$

$$t=\infty : e = 4.711 \left[ \frac{\sigma'v}{0.5} \right]^{-0.216} - 1$$

Anillo de 2.5 cm.:

$$t=t_p : e = 5.286 \left[ \frac{\sigma'v}{0.5} \right]^{-0.22} - 1$$

$$t=\infty : e = 4.46 \left[ \frac{\sigma'v}{0.7} \right]^{-0.22} - 1$$

Anillo 2 cm (bis):

$$t=t_p : e = 5.087 \left[ \frac{\sigma'v}{0.5} \right]^{-0.22} - 1$$

$$t=\infty : e = 4.197 \left[ \frac{\sigma'v}{0.7} \right]^{-0.22} - 1$$

Debe de obtenerse la carga de preconsolidación por el método de Casagrande y compararlo con el real, que es en el punto (A) donde se cruzan las curvas  $t=t_p$  y  $t=\infty$  ( ver figura 21a del anterior capítulo); como previamente se explicó. La carga de preconsolidación real puede ser igual o muy aproximada a la presión del suelo *in situ*.

A continuación se hace dicha comparación (los esfuerzos efectivos se calcularon tomando en cuenta el NAF a 1.5 m. y el suelo superior a éste, totalmente saturado.):

Anillo 2 cm.:

$$\sigma'_p = 0.341 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{\infty} = 0.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{\infty}/\sigma'_p = 0.59$$

$$\sigma'_{vo} = 0.166 \text{ kg/cm}^2$$

Anillo 1.5 cm.:

$$\sigma'_p = 0.24 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega = \text{no se pudo obtener} \quad \sigma'_{vo} = 0.182 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega/\sigma'_p = \text{no se pudo obtener}$$

Anillo 2.5 cm.:

$$\sigma'_p = 0.34 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega = 0.196 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma'_{vo} = 0.17 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega/\sigma'_p = 0.576$$

Anillo 2 cm. (bis):

$$\sigma'_p = 0.34 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega = 0.17 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma'_{vo} = 0.17 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_\omega/\sigma'_p = 0.5$$

Se observa que los valores de  $\sigma'_{vo}$  son muy parecidos o iguales a los de  $\sigma'_\omega$ . En el caso en que no hubieran sido parecidos o iguales (es decir que  $\sigma'_{vo} < \sigma'_\omega$  o que  $\sigma'_{vo} > \sigma'_\omega$ ) y como está comprobado que en el Valle de México el terreno no ha sufrido erosión, la diferencia podría deberse a un flujo vertical, resultado de una fuerte y prolongada evaporación superficial, apareciendo en el agua de la parte superior del estrato arcilloso esfuerzos de tensión que, consecuentemente, generan compresiones en la estructura sólida del suelo. Es decir que en los casos en que no se presente esta evaporación superficial, ambos esfuerzos deben ser iguales o muy aproximados, ya que presentándose ésta, los valores de  $\sigma'_{vo}$  en teoría deberían ser mucho menores a  $\sigma'_\omega$  según lo expuesto por el Dr. E. Juárez Badillo, debido a que el suelo está preconolidado. [Ref. 19].



VARIACION DE LOS PARAMETROS  $\delta$  y  $t^*$

Una vez terminado todo el proceso de obtención de ecuaciones, tanto de las curvas de consolidación como de compresibilidad, usando para éstas últimas las primeras, pasamos a estudiar como varían los parámetros de la consolidación secundaria, que finalmente resultaron después de algunos ajustes para que el coeficiente de compresibilidad resultara el mismo en las dos curvas  $t=t_p$  y  $t=\infty$  de cada anillo.

Antes de empezar es preciso escoger una de las dos opciones que se presentaron para el anillo de 2cm.; lo que se hizo para la selección fue observar con mayor detenimiento cada una de las curvas de consolidación de cada opción, para rectificar cuales curvas teóricas se aproximaban más a la curva experimental. Así fue como se optó por la primera opción.

El parámetro  $\delta$  (coeficiente de viscosidad volumétrica) tiene que ver con la forma de la curva de consolidación mientras que el parámetro  $t^*$  (tiempo característico) con la rapidez del fenómeno.

La ecuación general de la consolidación secundaria, es idéntica a la ecuación general de compresibilidad, como ya se había mencionado, debido a que están soportadas por los mismos principios filosóficos. Comparando las ecuaciones, el coeficiente  $\delta$  en la curva de consolidación tiene, matemáticamente, un significado similar al coeficiente  $\gamma$  en la curva de compresibilidad. De igual forma,  $t^*$  tiene un significado similar que la presión característica  $\sigma^*$ , en la curva de compresibilidad [Ref.8].

A continuación se presentan las tablas de los parámetros obtenidos para cada anillo (las unidades de  $t^*$ , para todos los casos, están en [min.] ):

Anillo 2 cm. :

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ obtenido	$t^*$ obtenido
1	0.1		
2	0.2		
3	0.3	0.288	76898
4	0.4	0.494	10044
5	0.5	0.494	30577
6	0.7	0.494	6838
7	1.0	0.494	5439
8	2.2		
9	3.0	0.492	8341
10	4.25		
11	6.05	0.495	1875

Anillo 1.5 cm.:

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ obtenido	t $\delta$ obtenido
1	0.1		
2	0.2		
3	0.3		
4	0.4	0.389	73743
5	0.5	0.493	74756
6	0.7	0.493	16130
7	1.0	0.492	12128
8	1.4	0.507	6745
9	2.0		
10	2.8	0.499	7665

Anillo 2.5 cm.:

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ obtenido	t $\delta$ obtenido
1	0.1		
2	0.2		
3	0.3	0.418	101082
4	0.4	0.430	43140
5	0.5	0.430	44168
6	0.7	0.521	4125
7	0.95	0.542	1652
8	1.325	0.569	2662

Anillo 2 cm. (bis):

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ obtenido	t $\delta$ obtenido
1	0.1		
2	0.2	0.273	231280
3	0.3	0.492	58381
4	0.4	0.489	19825
5	0.5	0.559	27662
6	0.7	0.541	4430
7	0.95	0.550	1737
8	1.325	0.549	4185

Una vez que se han obtenido las ecuaciones y curvas teóricas de las curvas de compresibilidad, es posible obtener, de ellas, los valores de  $x_T$  que no pudieron ser obtenidos en los siguientes incrementos:

Anillo 2 cm.:

Incrementos: 1, 2, 8 y 10.

Anillo 1.5 cm.:

Incrementos: 1, 2, 3 y 9.

Anillo 2.5 cm.:

Incrementos: 1 y 2.

Anillo 2 cm. bis:

Incremento: 1.

El procedimiento para la obtención de los parámetros  $\delta$  y t $\delta$ , de dichos incrementos, usando la  $x_T$  obtenida de las curvas teóricas de compresibilidad es el siguiente:

1.- Obtener la  $e_0$  y la  $e_{00}$  de las curvas teóricas, para cada incremento, transformarlas a alturas y hacer su diferencia para obtener la  $x_T = H_i - H_{00}$ .

2.- Sustituir el valor de  $x_T$  en la ecuación (36), junto con dos puntos de la zona recta de la curva de consolidación, para obtener el parámetro  $\delta$ .

3.- Sustituyendo la  $x_T$ ,  $\delta$ , y el segundo punto escogido de la curva de consolidación en la ecuación (38), se obtiene el parámetro  $t^*$ .

Los resultados obtenidos fueron:

Anillo 2 cm.:

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ calculado (no se pudo)	$t^*$ calculado (no se pudo)
1	0.1		
2	0.2	2.197	4.109
8	2.2	0.248	45.94
10	4.25	0.381	256.1

Anillo 1.5 cm.:

Incremento	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\delta$ calculado (no se pudo)	$t^*$ calculado (no se pudo)
1	0.1		
2	0.2	"	"
3	0.3	"	"
9	2.0	2.391	3327

Anillos 2.5 y 2 cm. bis:

No pudieron sacarse los valores de ninguno de los incrementos, debido a que en el anillo de 2.5 cm. las curvas de consolidación de los incrementos 1 y 2 no son buenas, debido a la fricción existente entre el suelo y el anillo; para el anillo de 2 cm. bis, sucedió lo mismo.

Para el anillo de 2 cm., los parámetros del primer incremento no pudieron ser obtenidos de esta forma, por la misma razón que la de los primeros incrementos de los anillos de 2.5 y 2 cm. bis. El valor tan alto de  $\delta$  obtenido en el incremento 2 puede ser falso, esto debido a que el valor de la altura inicial ( $H_i$ ) es menor al valor teórico de la altura en la consolidación primaria ( $H_p$ ), y este último es diferente totalmente a el valor obtenido en la práctica, consecuentemente se obtiene un valor no confiable.

Para el caso del anillo de 1.5 cm. no se obtuvieron los parámetros de los 3 primeros incrementos, debido a que la pesa fue movida, como ya se había mencionado. El valor de  $\delta$  obtenido del incremento 9 también es dudoso, debido a que los valores de la consolidación para la curva  $t=t_p$  experimentales, difieren mucho de los teóricos, que fueron adecuados con otros puntos experimentales más confiables (ver curvas de compresibilidad).

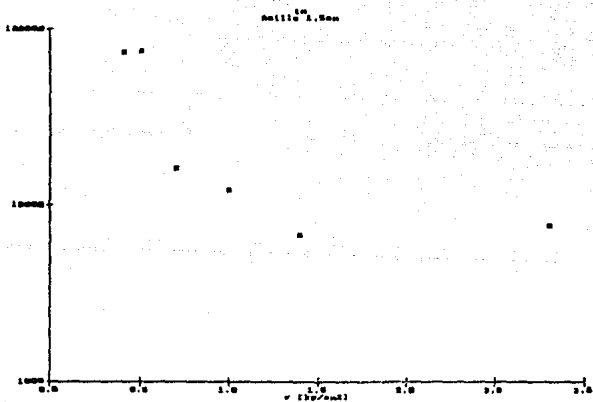
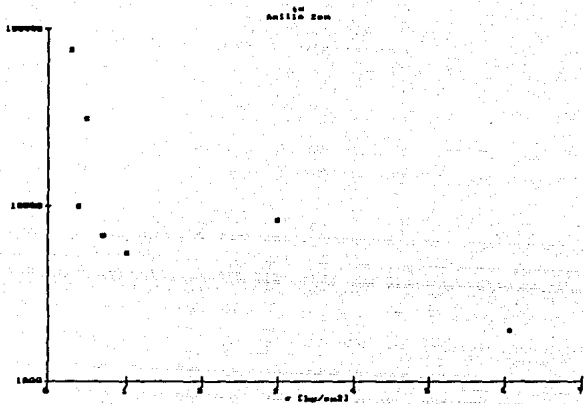
Obsérvese que el parámetro  $\delta$  en el anillo de 2 cm y de 1.5 cm para la rama de recompresión, permanece constante en aproximadamente un valor de 0.5, sin embargo, cuando se da un

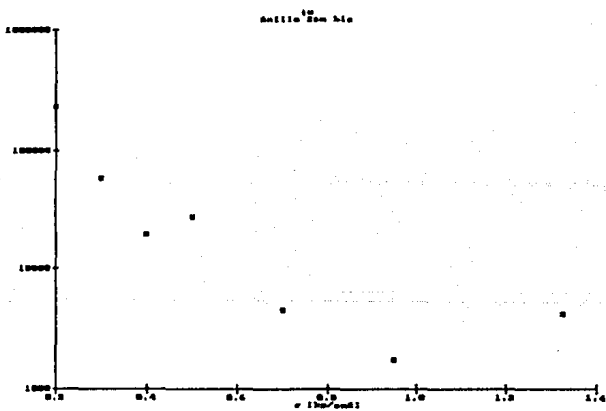
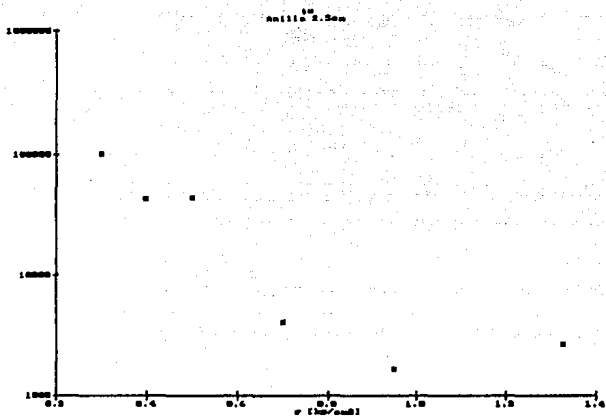
incremento que sobrepasa la carga de preconsolidación (rama virgen o normalmente consolidada), el valor de éste disminuye y parece no ser constante (ver los valores de  $\delta$  de los incrementos 8 y 10 del anillo de 2cm.); la variación de la viscosidad volumétrica en la rama virgen, no se puede aclarar a través del presente trabajo; deben realizarse pruebas adecuadas, con incrementos que sobrepasen la carga de preconsolidación para cada incremento, y obtener dicho parámetro, para ver como varía o si permanece constante, tal como lo menciona el Dr. E. Juárez-Badillo [Ref.9].

#### Variación del tiempo característico ( $t_c$ ).

Como un primer intento para averiguar la forma en como varía el tiempo característico, se aprecia, que el mismo, va disminuyendo conforme se aumenta la presión efectiva.

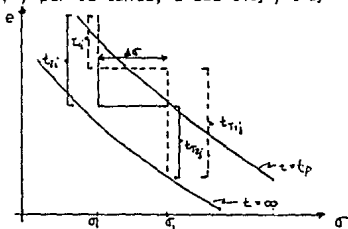
En las siguientes dos hojas se muestran graficados los valores de  $t_c$  (en escala logarítmica -para mejor apreciación-) contra los valores de la presión efectiva a la cual se sometieron las pruebas (en escala aritmética). En estas gráficas se aprecia mejor cómo el valor de  $t_c$  tiende a disminuir con el aumento del esfuerzo efectivo.



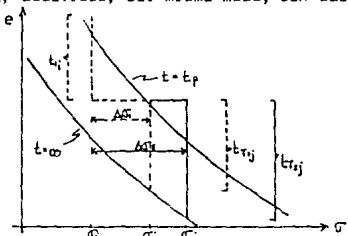


Sin embargo, es muy probable que el valor de  $t^*$  no dependa tanto del valor de la presión efectiva actuante, sino más bien del porcentaje del incremento aplicado ( $\Delta\sigma/\sigma$ ) y del tiempo que fue dejado el incremento anterior. Explicado gráficamente, es posible que quede más claro:

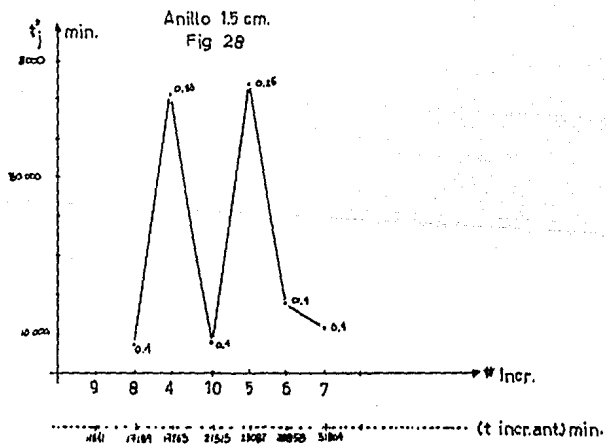
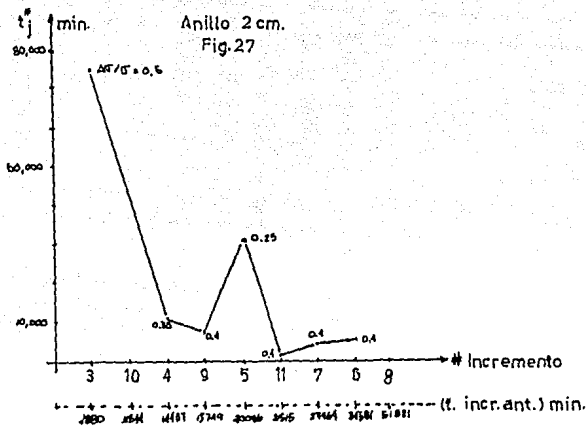
Supongamos un incremento  $\Delta\sigma$  dado a una previa presión  $\sigma_1$  para alcanzar una presión  $\sigma_2$ . Para este incremento  $\Delta\sigma = cte.$ , si se tiene un tiempo  $t_{1i}$  que fue dejada la presión  $\sigma_1$ , se tendrá, después de dar el incremento, una  $x_{2j}$  menor a una  $x_{2j}$  que se hubiera obtenido al dejarla un tiempo  $t_{2i} > t_{1i}$ ; es obvio que la  $x_{2j}$  y la  $x_{2j}$  están asociadas a sus tiempos  $t_{2ij}$  y  $t_{2j}$  respectivamente, y por lo tanto, a sus  $t_{2ij}$  y  $t_{2j}^*$ :



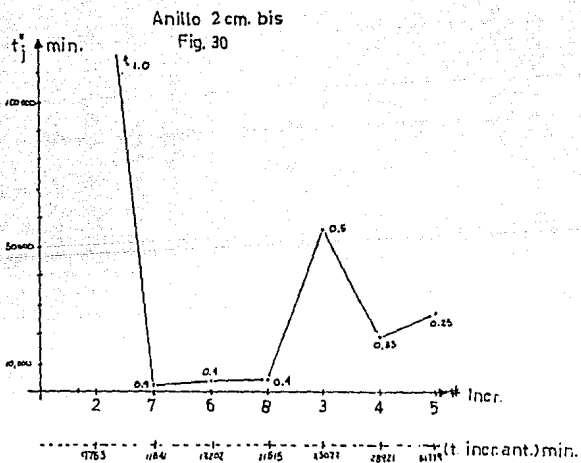
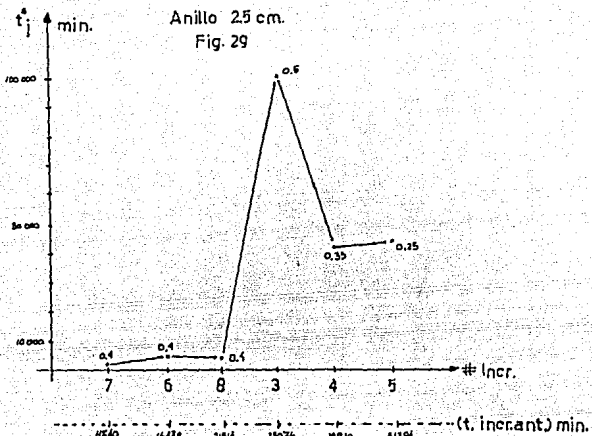
De la misma forma, si ahora se deja constante el tiempo  $t_{1i}$  y se hace variar el valor del incremento  $\Delta\sigma$ , se tiene que al hacerse un incremento  $\Delta\sigma_2$  mayor a un incremento  $\Delta\sigma_1$ , se tendrá una  $x_{2j}$  mayor a una  $x_{1j}$ , asociados, del mismo modo, con sus  $t_{2j}^*$ :



En las siguientes hojas se grafica el  $t^*$  en el eje de las ordenadas, contra el tiempo que fue dejado el incremento anterior al indicado, en forma ascendente, en el eje de las abscisas (Figs. 27, 28, 29 y 30). Por ejemplo: para el anillo de 2 cm. se observa que se colocan de la siguiente forma los incrementos en el eje de las  $x$ 's: 3, 10, 4, 9, 5, 11, 7, 6 y 8; el incremento 3 fue colocado primeramente ya que el incremento 2 (es decir el anterior) fue el que permaneció menos tiempo (2885 min.), y el incremento 8 fue colocado al último debido a que el incremento anterior (7) fue el que permaneció más tiempo (51821 min.).







De estas gráficas deben hacerse las siguientes aclaraciones:

a) Es difícil ver que tanto varía el  $t^*$  con el tiempo que fue dejado el incremento anterior, ya que también interviene el  $\Delta\sigma/\sigma$  aplicado, que quizá sea el que mayormente interviene debido a que:

b) En forma general se tiene que:

1. Para  $\Delta\sigma/\sigma = 1$  el  $t^*(1)$  es muy grande.
2. Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.5$  el  $t^*(0.5)$  es menor al  $t^*(1)$  pero mayor a los que siguen.
3. Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.4$  el  $t^*(0.4)$  es pequeño y menor a los  $t^*(0.3)$  y  $t^*(0.2)$ , contrario a lo que se esperaba, que fuera mayor a éstos.
4. De igual forma  $t^*(0.2)$  siempre es mayor a  $t^*(0.3)$ , lo cual concordaría con el punto 3, pero no con los puntos 1 y 2 en todo caso.

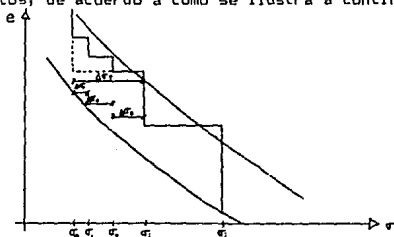
c) Es probable que no haya resultado:

$$t^*(1) > t^*(0.5) > t^*(0.4) > t^*(0.3) > t^*(0.2)$$

debido a que pueda intervenir algún otro factor en la variación de  $t^*$ .

De lo anterior, se puede deducir, que el  $t^*$  de un incremento cualquiera, no solamente depende del tiempo que fue dejado el incremento anterior y del porcentaje del incremento dado, sino que también depende de otras variables u otros factores.

Es muy probable que el  $t^*$  de un incremento  $j$  a una presión  $\sigma_j$ , dependa también de como se haya llegado al incremento previo  $i$  bajo una presión  $\sigma_i$ ; es decir, que el  $t^*_j$  puede variar, aún dando el mismo  $\Delta\sigma$  para llegar del incremento  $i$  al  $j$ , si la forma de llegar a la presión  $\sigma_i$  fue diferente, por medio de varios incrementos de presión pequeños o bien dando uno o dos incrementos de presión altos; de acuerdo a como se ilustra a continuación:



A través de las pruebas realizadas para el presente trabajo, lo anterior no puede ser estudiado ni aclarado, debido a la naturaleza de las mismas. El enfoque que se le dió a las pruebas hechas, fue el de analizar cómo influya, para los parámetros que se obtuvieran, el tiempo dejado el incremento anterior, el incremento dado y el espesor de la muestra.

De los dos primeros aspectos ya se ha hablado, sin embargo del último no se ha dicho nada. Parece ser que el espesor de la muestra, no influye ni en  $\delta$  ni en el  $t_1$ , debido a que como se puede observar, los valores obtenidos para el anillo de 2 cm. y de 1.5 cm. (material de ambos anillos tomado de la misma muestra inalterada) son casi iguales, así como también los resultados de los anillos de 2.5 cm. y 2 cm. bis, que son de una misma muestra, pero de una diferente de la de los primeros dos anillos. Es probable también, que si llegara a influir, de las presentes pruebas no se alcanza a ver, por el hecho de que la diferencia de espesores de los anillos en realidad es pequeña; por lo menos el espesor de uno debería ser del doble del otro.

Cabe hacer una aclaración muy importante acerca de las curvas de consolidación obtenidas teóricamente: de acuerdo a lo que lógicamente se esperaría, debido a que la consolidación primaria retrasa la consolidación secundaria, los puntos de la curva teórica deberían resultar por debajo de los puntos de la curva experimental, sin embargo, y como se observa en dichas gráficas, fue justamente lo contrario, salvo muy contadas ocasiones.

Originalmente se pensó que estos resultados fueron así debido a que cuando se obtuvieron las curvas teóricas, se utilizó la altura inicial de cada incremento (o bien, la altura final del incremento anterior); es por eso que se procedió a obtener los 0% de consolidación por medio de los dos métodos, Casagrande y Taylor, para sustituir éstos en vez de las  $H_i$ , ya que este 0% debe ser menor a dicha altura y provocaría que la curva teórica obtenida, resultara más baja.

Los resultados obtenidos del 0% fueron los siguientes para el anillo de 2cm.:

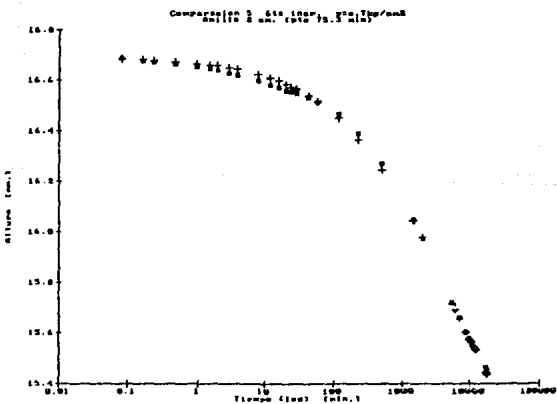
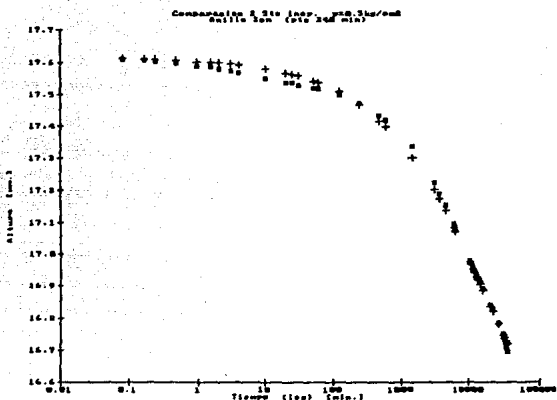
Incremento	0% Casagrande	0% Taylor	$H_i$
3	19.3985	19.405	19.41
4	18.637	18.641	18.648
5	17.615	17.615	17.618
6	16.694	16.694	16.695
7	15.447	15.447	15.45
9	11.53	11.532	11.539
11	9.595	9.598	9.611

*Nota: el 0% de Casagrande y Taylor, son alturas y al igual que la  $H_i$ , están en [mm.].*

Una vez obtenido el 0% de C.P., se procede a sustituirse de dos formas: una directamente sobre la ecuación obtenida y la otra, haciendo todo el proceso de obtención de la ecuación. Al realizarse esto, se observó que los cambios entre una y otra son prácticamente despreciables, es decir que, volviendo a obtener la ecuación con el 0% en vez de la  $H_i$ , arroja, prácticamente, los mismos resultados que con la  $H_i$ .

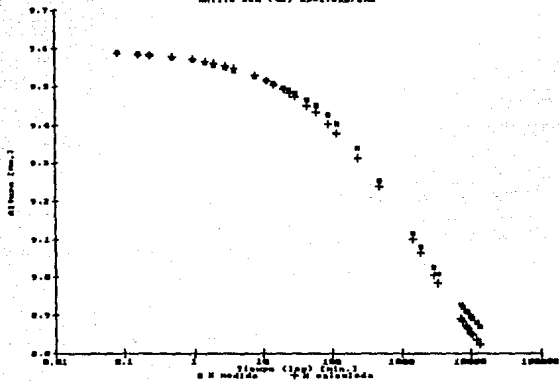
Una vez hecho esto, se procedió a realizar las nuevas gráficas, que a continuación se muestrán:







CONT. 1950 1237 251:825/252



De las gráficas anteriores puede observarse claramente que la curva teórica sigue saliendo por arriba de la experimental. Realmente estos resultados son desconcertantes, y quizás la clave esté en mover la escala de tiempos, de forma que a cierta consolidación que se lleva a cabo en un cierto tiempo  $t_1$  dentro de la rama secundaria, habiendo consolidación primaria, se lleve a cabo en un tiempo menor  $t_2$  no habiendo consolidación primaria; sin embargo la forma en como mover dichos tiempos, aún no se ha encontrado.

En el onceavo incremento del anillo de 2 cm. se volvió a realizar manualmente el procedimiento de obtención de la curva teórica, pero ahora tomando el punto  $x_1$  en la parte baja, aprovechando que fue la única curva experimental de la forma csc, que se obtuvo. Dicho procedimiento se realizó debido a que los puntos a tiempos muy grandes son más confiables a los puntos con tiempos pequeños, y esto podría significar también alguna corrección para bajar un poco más la curva experimental:



Tomando el 0% en vez de la  $H_i$  se tiene que:

$$\begin{aligned} H &= 9.6 \\ H_1 &= 9.417 & t_1 &= 100 \\ H_2 &= 9.16 & t_2 &= 1000 \\ H_3 &= 8.9 & t_3 &= 10000 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} a &= 0.3 \\ x_T &= 0.9 \\ x_1 &= 0.183 \\ x_2 &= 0.44 \\ x_3 &= 0.70 \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{\log \frac{0.44 \quad 0.717}{0.183 \quad 0.46}}{1} = 0.5738$$

Comprobando con el punto  $x_3$ :

$$x_3 = \frac{0.9}{1 + \left( \frac{0.9}{0.183} - 1 \right) \left( \frac{100}{10000} \right)^{0.57}} = 0.701$$

Como se observa  $0.70 = 0.701$  .

$$t_1 = 1000 \left( \frac{0.46}{0.44} \right)^{0.57} = 1081$$

La ecuación será entonces:

$$H = 9.6 - \frac{0.9}{1 + \left( \frac{1080}{t} \right)^{0.57}}$$

Probando se tiene que:

H	t
9.595	0.1
9.58	1.0
9.54	10
9.42	100
9.16	1000
8.90	10000

Observese que estos puntos teóricos obtenidos son todavía mayores a los puntos experimentales. Es necesario hacer

investigaciones acerca de este punto en especial, ya que es muy importante dejar en claro el porqué los puntos teóricos salen arriba y no abajo de los experimentales, como debería de ser.

Otro de los objetivos principales del presente trabajo debe ser la motivación a la investigación en esta misma línea, porque por medio de un trabajo como el presente es casi imposible concluir algo totalmente definitivo. Conforme avanza la investigación y se realizan pruebas, se ve la necesidad de hacer algunas otras bajo condiciones diferentes, para aclarar ciertas dudas o bien para analizar el comportamiento del fenómeno bajo estas nuevas condiciones.

Por esta razón a continuación se sugieren algunas formas de hacer futuras investigaciones para la consolidación secundaria:

A) Para aclarar la influencia que tiene el espesor de la muestra, deben hacerse pruebas con anillos de espesores sustancialmente diferentes (mínimo uno del doble del otro). Las pruebas deben hacerse bajo un mismo programa de cargas, preferiblemente manteniendo el  $\Delta\sigma/\sigma$  constante, y con un tiempo suficiente para poder obtener los parámetros  $\delta$  y  $t\ddagger$ .

B) Es necesario también hacer ciertas pruebas en las que se varíe  $\Delta\sigma/\sigma$ : pueden realizarse con dos anillos del mismo espesor, hacer los primeros incrementos iguales para ambos, y a partir de un cuarto o quinto incremento, hacer un incremento de presión diferente en ambos anillos, para observar los cambios ocurridos en el  $t\ddagger$  (en  $\delta$ , no, ya que como se vio, permanece constante en la rama de recompresión); posteriormente pueden volverse a emparejar sus presiones, para volver a dar incrementos diferentes y así analizar cómo hace variar el porcentaje del incremento de presión al tiempo característico. Los incrementos de presión deben de hacerse siempre dentro de la rama de recompresión.

C) Deben realizarse pruebas semejantes a las anteriores, pero ahora con incrementos de presión que rebasen la carga de preconsolidación para cada incremento, de tal forma que se asegure el trabajar en la rama normalmente consolidada, y analizar el comportamiento de los parámetros  $\delta$  y  $t\ddagger$  en ella, ya que del presente trabajo, muy poco se aclaró.

D) Otras pruebas que son importantes hacer, son, como ya se había comentado, con anillos de un mismo espesor, dando incrementos de presión diferentes en ambos anillos para llegar a una presión igual en ambos, a partir de esta presión actuante, dar un mismo incremento de presión a ambos anillos, para que, a través de la obtención de los parámetros, se observe si hay alguna variación en ellos, principalmente en el  $t\ddagger$ , ya que la  $\delta$  es constante en la rama de recompresión.

E) También es necesario investigar el porqué los puntos teóricos obtenidos siempre dan más altos que los experimentales. Se debe analizar como corregir la escala de tiempo (si es que esto es lo correcto), para obtener los resultados que normalmente se esperarían.

Nota: Es importante que de las pruebas hechas, se verifiquen los valores de la carga de preconsolidación de Casagrande ( $\sigma'_p$ ), de la carga de preconsolidación real al  $t=\infty$  ( $\sigma'_\infty$ ), su relación (de aproximadamente 0.5-0.6), la presión in situ (comparandola con la  $\sigma'_w$ ) y sobretodo, al realizar las curvas de compresibilidad ( $t=t_p$  y  $t=\infty$ ), con un programa de cargas tal que  $\Delta\sigma/\sigma = \text{cte.}$ , calcular la  $U_p = \text{cte.}$  existente, donde  $U_p = \Delta e_p/\Delta e_r$ .

Las  $U_p = \Delta e_p/\Delta e_r$ , que para arcillas del Valle de México son, de acuerdo a los datos obtenidos de la presente investigación fueron:

Para  $\Delta\sigma/\sigma = 1.0$  :  $U_p = 0.6$ . Que concuerda con lo obtenido por el Dr. E. Juárez Badillo (Ref. 9).

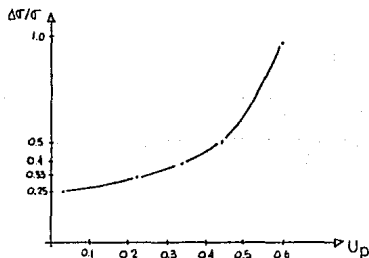
Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.5$  :  $U_p = 0.45$ . Obtenido solo de un incremento, por lo que su valor puede ser dudoso.

Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.4$  :  $U_p = 0.35$ . Obtenido de 9 incrementos.

Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.33$  :  $U_p = 0.224$ . Obtenido de un solo incremento, su valor puede ser dudoso.

Para  $\Delta\sigma/\sigma = 0.25$  :  $U_p = 0.033$ . Obtenido de 3 incrementos.

De los datos anteriores, se hizo la siguiente curva, para verificar si concuerdan:



Con la  $U_p$  correspondiente, y según el procedimiento ya visto, fácilmente a través de la curva  $t=t_p$  se calcula la ecuación de la curva de compresibilidad para el  $t=\infty$ .

Los resultados arrojados para  $U_p$  aparentemente son muy buenos, pero quizás no sean realmente así; es necesario, como ya se mencionó unas líneas antes, realizar investigaciones más a fondo encaminadas a esclarecer la variación que tiene  $U_p$  con  $\Delta\sigma/\sigma$ , para verificar lo anterior o descalificarlo y plantear un mejor o correcto resultado.

Como una última observación, es importante hacer notar, que con el nuevo cálculo hecho para el onceavo incremento de presión del anillo de 2 cm., los resultados de los parámetros se disparan un poco de los demás obtenidos, y por supuesto del mismo onceavo que previamente se escogió:

$$\delta = 0.57 \text{ en vez de } \delta = 0.495$$

$$t\ddagger = 1081 \text{ en vez de } t\ddagger = 1875$$

$$\kappa\tau = 0.9 \text{ en vez de } \kappa\tau = 1.061$$

Este nuevo punto dá más arriba que el obtenido, para la curva de compresibilidad.

Aunque se dispara un poco, el valor es aceptable, ya que está dentro del rango de un 15% arriba aproximadamente.

## CONCLUSIONES

Algunas de las conclusiones más importantes extraídas de las referencias mencionadas, con el fin de complementar las del presente trabajo, son:

1.- La ecuación de la consolidación secundaria (10), es aplicable no sólo a los suelos, sino también a cualquier sólido, líquido o gas.

2.- La ecuación de la consolidación secundaria (10), es una ecuación que describe el cambio de volumen de un suelo con el tiempo cuando éste está sujeto a una cierta presión. La ecuación consiste en dos parámetros: el coeficiente de viscosidad volumétrica ( $\delta$ ) que se relaciona con la forma de la curva de tiempo, y, el tiempo característico ( $t^*$ ) que se relaciona con la rapidez del fenómeno.

3.- Cuando se tiene un valor de  $\delta > 1$  se espera tener una deformación instantánea a un incremento de presión instantánea. Sin embargo, la cantidad depende del valor de  $\delta$  y del tiempo que nos tardemos en registrarla.

4.- La curva de consolidación secundaria graficada semilogarítmicamente, se ve que es una curva antisimétrica y su tercio medio es muy cercano a una línea recta.

5.- El comportamiento secundario de una descarga y sobrecarga posterior a ésta, para arcillas, puede ser descrita por la suma de dos componentes: una componente de expansión y otra de compresión.

Del anterior trabajo, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

6.- La carga de preconsolidación real ( $\sigma'_{\omega}$ ) debe ser muy parecida o igual a la presión vertical *in situ* ( $\sigma'_{v0}$ ) salvo en los casos mencionados con anterioridad.

7.- Como se vió con anterioridad, pueden presentarse más de una opción de curvas de compresibilidad que se apeguen a los puntos obtenidos experimentalmente; aunque es necesario escoger una de las curvas para trabajar con sólo una, es casi indiferente tomar cualquiera, ya que las diferencias entre ellas son muy pequeñas y para fines prácticos da lo mismo tomar cualquiera de ellas.

8.- En la rama de recompresión  $\delta$  es constante con valores de aproximadamente 0.5 (Arcillas del Valle de México).

9.- En la rama virgen  $\delta$  aparentemente tiene valores pequeños,

pero no constantes, sin embargo esto no es seguro, ya que a través del trabajo realizado no se puede esclarecer este punto, es necesario realizar más investigaciones en este punto.

10.- Con las figs. 27-30 se puede observar como varía el  $t^*$  con el tiempo que fue dejado el incremento anterior y con el porcentaje de incremento de presión dado. Sin embargo, el tiempo característico no sólo varía con estas dos variables, sino con otras más aún no determinadas.

11.- El tiempo característico puede depender también de como se llega al punto a partir del cual se hará el siguiente incremento y donde se determinará el  $t^*$ . Para averiguar esto es necesario realizar más pruebas de acuerdo al punto (E) del capítulo anterior.

12.- Es necesario realizar pruebas conforme al punto (C) para ver el comportamiento real de  $t^*$  con  $\Delta p$ .

13.- Aparentemente el espesor de la muestra no influye en ninguno de los dos parámetros  $\delta$  y  $t^*$ , sin embargo deben hacerse pruebas para verificarlo, de acuerdo al punto (A) del capítulo anterior.

14.- Deben realizarse pruebas de acuerdo al punto (D) para poder deducir el comportamiento de  $\delta$  y  $t^*$  en la rama normalmente consolidada.

15.- Los puntos experimentales de la consolidación primaria, contrario a lo esperado, fueron inferiores a los teóricos. Se ignora que es lo que sucede, ya que lógicamente debería ser lo contrario, por retrasar la consolidación primaria a la secundaria.

16.- La corrección con respecto a introducir el 0% de C.P. en vez de la altura inicial del incremento  $H_i$ , para obtener la ecuación de la C.S. no arroja resultados positivos, por lo tanto es necesario analizar como corregir la escala del tiempo, para obtener puntos experimentales superiores a los teóricos en la zona de consolidación primaria.

17.- Cuando se tenga una curva experimental de consolidación del tipo esc (ver página 38), es preferible y confiable tomar el punto  $\alpha$  en la curva final, aunque también tomar, a manera de comprobación, otro punto  $\beta$  en la primera curva, como ya previamente se había mencionado.

DETERMINACION DEL 0% Y 100% DE CONSOLIDACION PRIMARIA

Se vió que al hacer a una muestra de suelo una prueba de consolidación se obtienen curvas de consolidación para cada uno de los incrementos de carga aplicados.

También se vió que al aplicar estrictamente la teoría, se han obtenido curvas teóricas  $U(\%) - T$  en donde  $T$  es el factor tiempo, que involucra a todas las variables que afectan el progreso del proceso de consolidación.

En realidad, ningún suelo sigue la curva teórica y para comparar una curva obtenida con la teórica, es necesario, en primer lugar, definirse en que punto de la curva de consolidación se supondrá el 0% y el 100% de consolidación, para ajustar la escala  $U(\%)$  con la de lecturas micrométricas o alturas de la muestra.

En base a la gráfica de consolidación en trazado semilogarítmico, el Dr. A. Casagrande observó que un punto obtenido como la intersección del tramo recto de consolidación secundaria y de la tangente a la parte curva en su punto de inflexión, representa tolerablemente la línea divisoria entre la consolidación primaria y la secundaria, es decir el 100% de la consolidación primaria.

Para la obtención del 0% de consolidación primaria se sigue el procedimiento descrito a continuación:

Escójase un tiempo arbitrario,  $t_1$ , tal que el punto correspondiente,  $B$ , en la curva observada esté situada antes del 50% de consolidación, de un modo notorio. Obtóngase el punto  $C$ , que corresponde a un tiempo  $t_1/4$  y determínese la diferencia de ordenadas,  $a$ , de los dos puntos.

Debido a que son dos puntos de una parábola y que entre ellos hay una relación de abscisas de 4, por lo tanto, la relación de ordenadas es de 2. Es decir, el origen de la parábola debe estar a una distancia  $a$  arriba de  $C$ . Este procedimiento debe hacerse varias veces partiendo de puntos diferentes, y situar el 0% a una elevación promedio (Ver figura A1).

La determinación del 0% y el 100% por el método anterior, depende de que la forma de la curva de consolidación se apegue a la curva teórica, de modo que se definan los quiebres e inflexiones necesarias. Desgraciadamente, en muchas ocasiones, las curvas obtenidas en la práctica son totalmente inapropiadas para hacer dichas construcciones, es por ello que D. W. Taylor ha desarrollado un método alternativo para obtener el 0 y el 100% de la consolidación primaria. Este método también sirve para calcular los coeficientes de consolidación.

El método exige el trazado de la curva experimental en unos ejes en los que se usan como ordenadas los valores leídos en el micrómetro o las alturas, y como abscisas los valores de  $\sqrt{t}$ .

La curva debe resultar una recta hasta un punto cercano al 60% de consolidación.

De la tabla de valores, ya obtenida,  $U(\%) - T$ , puede determinarse que la abscisa de la curva es 1.15 veces la correspondiente a la prolongación del tramo recto, para una ordenada de 90% de consolidación. Esta característica se usa en la curva de consolidación obtenida en el laboratorio, para encontrar el 90 de consolidación. A continuación se traza otra recta con sus abscisas 1.15 veces corridas hacia la derecha, respecto a la anterior. Esta segunda línea corta a la curva en un punto al que corresponde al 90% de consolidación primaria. Debe notarse que la prolongación del tramo recto de la curva de laboratorio conta el origen de ordenadas en un punto que debe considerarse como el 0% de consolidación primaria y de este punto debe partir la segunda recta mencionada. Una vez que se tiene el 90% y el 0% de la consolidación primaria, con una simple regla de tres, se obtiene el 100% de la misma (Fig. A2).

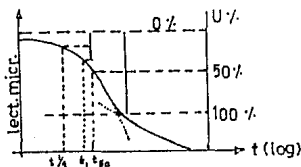


Figura A1

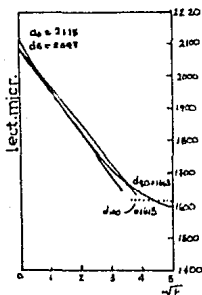


Figura A2



OBTENCION MANUAL DE LOS PARAMETROS  $\delta$  Y  $t_0$

De acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 3, se obtendrán los parámetros de la ecuación general del cambio de volumen con el tiempo:

Utilizando primeramente, como la ecuación básica:

$$\frac{1}{U} = 1 + \left[ \frac{t_0}{t} \right]^\delta$$

Para obtener  $\delta$  utilizamos la ec (36):

$$\delta = \frac{\log \frac{x_2 x_T - x_1}{x_1 x_T - x_2}}{\log \frac{t_1}{t_2}}$$

Recordando:  $x_1$  = punto al inicio de la recta (tercio medio)  
 $x_2$  = punto al final de la recta (tercio medio)  
 $x_3$  = punto en la primera zona curva

Datos:  $H_1 = 18.648$  Punto 1 = 18.18 mm.  $t_1 = 1453$  min.  
 Punto 2 = 17.9985 mm.  $t_2 = 3389$  min.  
 Punto 3 = 18.419 mm.  $t_3 = 240$  min.

Procedimiento: la iteración:

$x_1 = 18.648 - 18.18 = 0.468$  mm. = a  
 $x_2 = 18.648 - 17.9985 = 0.6495$  mm.  
 $x_3 = 18.648 - 18.419 = 0.229$  mm.  
 $3a = 3 * 0.468 = 1.404$

Sustituyendo en la ec. 36:

$$\delta = \frac{\log \frac{0.6495 \cdot 1.404 - 0.468}{0.468 \cdot 1.404 - 0.6495}}{\log \frac{3354}{1453}} = 0.6475$$

Utilizando la ec (37) para obtener  $x_3$ :

$$x_s = \frac{1.4055}{1 + \left[ \frac{1.4055}{0.4685} - 1 \right] \left[ \frac{1453}{240} \right]^{0.6475}} = 0.189$$

Como  $0.189 \neq 0.229$  entonces se hace una 2a iteración:

2a iteración:

Como la  $x_s$  resultante debe subirse para ser igual a la original:

∴ debe subirse la  $x_T$ , subirse a y bajarse el punto 1:

Usando los mismos datos, excepto para los anteriormente mencionados y para el  $t_2$ , el cual se rectificó:

$$\text{Punto 1} = 18.178 \text{ mm.} \quad \rightarrow \quad a = x_1 = 0.47 \quad \begin{matrix} t_1 = 1383.52 \\ t_2 = 3389.61 \end{matrix}$$

$$\delta = 0.5808$$

$$x_s = 0.219$$

$$0.219 < 0.229$$

3a iteración:

Se requiere subir más la  $x_T$  resultante:

$$H_1 = 18.134 \text{ mm.}$$

$$x_1 = a = 0.514 \text{ mm.}$$

$$t_1 = 1690.29 \text{ min.}$$

$$\delta = 0.5394$$

$$x_s = 0.229$$

$$\text{Como } 0.229 = 0.229 \rightarrow$$

Obtenemos el tiempo característico utilizando la ec. (38):

$$t_2 = \left[ \frac{1.542 - 0.6495}{0.6495} \right]^{1/0.5394} \times 3389.61 = 6110.04 \text{ min.}$$

Por lo tanto, finalmente obtenemos:

$$\delta = 0.5394$$

$$t_2 = 6110.04 \text{ min.}$$

$$x_T = 1.542 \text{ mm.}$$

Ecuación:

$$\frac{1.542}{x} = 1 + \left[ \frac{6110.04}{t} \right] 0.5304$$

Ecuación en función de las alturas:

$$H = 18.648 - \frac{1.542}{1 + \left[ \frac{6110.04}{t} \right] 0.5304}$$

PROGRAMA EN LENGUAJE "BASIC" PARA CALCULAR LOS PARAMETROS  $\delta$  Y  $t^*$ .

En las siguientes hojas se enlista el programa para calcular los parámetros  $\delta$  y  $t^*$ ; así como también se presenta una corrida del mismo.

Los datos que se le tienen que proporcionar, son:

Altura inicial:  $H_i$   
 Coordenadas de los puntos  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$   
 en la forma (H,t) [mm.,min.]  
 Coordenadas de un punto al inicio de la parte recta de la gráfica (puede ser el mismo  $x_1$ ) y tres puntos más de la parte final de la parte recta (uno de los cuales puede ser el  $x_2$ ).

Debe tomarse en cuenta que para poder correr el programa se debió de haber dejado el suficiente tiempo el incremento de carga, de tal forma que la zona recta del tercio medio se haya formado bien, y los puntos que se tomen como puntos en la línea recta, sean realmente así. De lo contrario, el programa no correrá correctamente, dando resultados erróneos, o bien, solicitando el mismo, se proporcionen nuevos datos.

Una vez con los resultados de los parámetros y la ecuación, ésta última debe de graficarse sobre la curva experimental, de tal modo que puedan compararse. También es necesario, que de varias corridas, se seleccionen unas cuantas para verificarlas a mano; aunque si la curva teórica se aproxima mucho a la experimental, es seguro que sea correcta la primera.

Cálculo de parámetros delta ( $\delta$ ) y t asterisco ( $t^*$ ) de consolidación secundaria, a través de datos obtenidos de laboratorio.

¿Desea usar el programa? s/n.

? s

Introduzca los datos del problema:

Altura inicial:.....Hi=? 16.695

Primera altura en la primera zona curva:.....x3=? 16.495

Altura al inicio de la zona recta:.....x1=? 16.048

Altura al final de la zona recta:.....x2=? 15.573

Tiempos correspondientes a las alturas anteriores:..t3=? 75.3

.....t1=? 1451

.....t2=? 10100

Proporcione los datos de puntos auxiliares localizados dentro de la zona recta de la gráfica H-t(log):

1: poco abajo del inicio de la recta (H,t):? 16.048

? 1451

2: al final de la recta (H,t):.....? 15.657

? 7276

3: al final de la recta (H,t):.....? 15.6

? 9079

4: al final de la recta (H,t):.....? 15.573

? 10100

Altura inicial:.....Hi= 16.695

Punto 3 (t3,x3):..... (t3,h3)= ( 75.3 , 16.495 )

Punto 1 (t1,x1):..... (t1,h1)= ( 1451 , 16.048 )

Punto 2 (t2,x2):..... (t2,h2)= ( 10100 , 15.573 )

Puntos auxiliares:

1:..... (t,h)= ( 1451 , 16.048 )

2:..... (t,h)= ( 7276 , 15.657 )

3:..... (t,h)= ( 9079 , 15.6 )

4:..... (t,h)= ( 10100 , 15.573 )

Revise sus datos, ¿son correctos? s/n.

? s

Resultados:

Los valores de  $\delta$  y  $t^*$  son:

$\delta = .4935629$

$t^* = 6837.71$

La ecuación es:

$2.047503 / x = 1 + ( 6837.71 / t ) ^ .4935629$

En términos de alturas:

$H = 16.695 - 2.047503 / ( 1 + ( 6837.71 / t ) ^ .4935629 )$

¿Quiere imprimir los resultados? s/n

? n

¿Quiere hacer otro cálculo? s/n.

? n

OK

system

```

10 CLS
20 CLEAR:LOCATE 5:BEEP
30 PRINT "Calculo de parámetros delta (δ) y t asterisco (t*) de consolidación
secundaria, a través de datos obtenidos de laboratorio."
40 PRINT :PRINT "¿Desea usar el programa s/n.":INPUT L$
50 IF L$<>"S" AND L$<>"s" GOTO 900:CLS
60 CLEAR:CLS
70 LOCATE 5:BEEP:PRINT:BEEP:PRINT
80 PRINT "Introduzca los datos del problema:"
90 INPUT "Altura inicial:.....H1=";H0
100 INPUT "Primera altura en la primera zona curva.....x3=";XA
110 INPUT "Altura al inicio de la zona recta.....x1=";XB
120 INPUT "Altura al final de la zona recta.....x2=";XC
130 INPUT "Tiempos correspondientes a las alturas anteriores:..t3=";T3
140 INPUT ".....t1=";T1
150 INPUT ".....t2=";T2
160 CLS
170 LOCATE 5
180 BEEP
190 PRINT "Proporcione los datos de puntos auxiliares localizados dentro de
la zona recta de la gráfica H-t(log):"
200 INPUT "1:poco abajo del inicio de la recta (H,t):";X1:INPUT T1
210 INPUT "2:al final de la recta (H,t):.....";XJ:INPUT T(1)
220 INPUT "3:al final de la recta (H,t):.....";XK:INPUT T(2)
230 INPUT "4:al final de la recta (H,t):.....";XL:INPUT T(3)
240 CLS:BEEP:BEEP
250 PRINT "Altura inicial:.....H1=";H0
260 PRINT "Punto 3 [t3,x3]:..... (t3,h3)= (";T3";";XA;")"
270 PRINT "Punto 1 [t1,x1]:..... (t1,h1)= (";T1";";XB;")"
280 PRINT "Punto 2 [t2,x2]:..... (t2,h2)= (";T2";";XC;")"
290 PRINT:PRINT "Puntos auxiliares:" :PRINT
300 PRINT "1:..... (t,h)= (";T1";";X1;")"
310 PRINT "2:..... (t,h)= (";T(1);";";XJ;")"
320 PRINT "3:..... (t,h)= (";T(2);";";XK;")"
330 PRINT "4:..... (t,h)= (";T(3);";";XL;")"
340 PRINT "Revise sus datos, ¿son correctos? s/n. "
350 INPUT Z$
360 IF Z$<>"S" AND Z$<>"s" THEN GOTO 80
370 A=CSNG(H0-XB)
380 X1=CSNG(C#A)
390 XCX=CSNG(H0-XC)
400 YAX=CSNG(H0-XA)
410 X1=CSNG(H0-X1)
420 Y(1)=CSNG(H0-XJ)
430 X(2)=CSNG(H0-XK)
440 Y(3)=CSNG(H0-XL)
450 GOCUB 920
460 D=CSNG((.4342945*(LOG((XCX/A)*((XT-A)/(XT-XCX)))))/(LOG(T2/T1)))
470 YX=YT/(1+((XT/A)-1)*((T1/T3)^D))
480 XN=CINT(1000*XX)
490 YZ=CINT(1000*YAX)
500 IF XN=0 THEN GOTO 890
510 IF XN=XZX THEN GOTO 590
520 IF YN XZY THEN GOTO 560
530 A=CSNG(A+.0005)
540 XT=CSNG(A#3)
550 T1=CSNG(10^(MP#A+BP)):GOTO 460

```

```

560 A=CSNG(A-.0004)
570 XT=CSNG(AT)
580 T1=CSNG(10*(MP+A*BP)) : GOTO 460
590 TA=CSNG(((XT-XCX)/XCX)^(1/D))*T2
600 PRINT "Resultados:"
610 PRINT
620 PRINT "Los valores de δ y t* son:"
630 PRINT
640 PRINT "δ=";D
650 PRINT
660 PRINT "t*=";TA
670 PRINT
680 PRINT "La ecuación es:"
690 PRINT
700 PRINT XT;"/x = 1+(";TA;"/t)^";D
710 PRINT
720 PRINT "En términos de alturas:"
730 PRINT
740 PRINT "H = ";HO;"-";XT;"/(1+(";TA;"/t)^";D;")" : PRINT
750 PRINT "¿Quiere imprimir los resultados? s/n"
760 INPUT Y$
770 IF Y$<>"S" AND Y$<>"s" THEN GOTO B50
780 LPRINT "Los valores de δ y t* son:" : LPRINT
790 LPRINT "δ=";D : LPRINT
800 LPRINT "t*=";TA : LPRINT
810 LPRINT "La ecuación es:" : LPRINT
820 LPRINT XT1;"/x = 1+(";TA1;"/t)^";D : LPRINT
830 LPRINT "En términos de alturas:" : LPRINT
840 LPRINT "H = ";HO1;"-";XT1;"/(1+(";TA1;"/t)^";D1;")" : LPRINT
850 PRINT "¿Quiere hacer otro cálculo? s/n."
860 INPUT R$
870 IF R$="S" OR R$="s" THEN GOTO 60
880 GOTO 900
890 PRINT "Escoja el punto 3 de nuevo y más abajo, o bien los puntos auxiliares,
ya que no se ha formado bien la recta."
900 END
910 REM Subrutina para calcular recta promedio
920 MT=0
930 BT=0
940 FOR I=1 TO 3
950 M(I)=CSNG(.4342945*(LOG(T(I)/TI)))/(X(I)-X1)
960 B(I)=CSNG(.4342945*(LOG(TI))-M(I)*X1)
970 MT=CSNG(MT+M(I))
980 BT=CSNG(BT+B(I))
990 MP=CSNG(MT/I)
1000 BP=CSNG(BT/I)
1010 NEXT I
1020 RETURN

```

OBTENCION DE LA CARGA DE PRECONSOLIDACION.

Utilizando los resultados de una prueba de consolidación representados en la forma  $e - \log \sigma'v$ , A. Casagrande (1936) propuso el siguiente método para calcular el valor de la máxima presión de consolidación experimentada por el suelo a lo largo de su historia, denominada *presión de preconsolidación* y representada por  $P_c$ . Este método que aparece en la figura A3 consta de los siguientes pasos:

- 1.- Localización en la curva  $e - \log \sigma'v$  del punto de mínimo radio de curvatura  $T$ .
- 2.- Se traza por  $T$  una línea horizontal  $h$  y una tangente a la curva  $t$ .
- 3.- Se traza la bisectriz del ángulo formado por  $t$  y  $h$ , es decir se obtiene la línea  $c$ .
- 4.- Se prolonga la parte virgen de la curva de compresibilidad hacia  $t$  y donde esta línea corta a la recta  $c$  se obtiene  $D$  que es el valor estimado de la máxima presión de preconsolidación  $P_c$ .

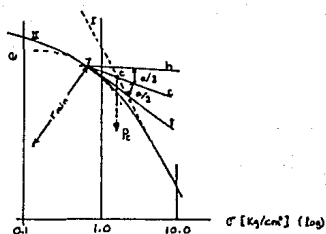


Fig. A3



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. *Mecánica de Suelos Tomo 1*. Tercera Edición. Ed. Limusa, México 1984.
- [2] Juárez Badillo, E. *General theory of consolidation for clays*. Simposium del ASTM sobre el comportamiento de consolidación de los suelos, Ft. Lauderdale, Florida, USA, Enero 1985.
- [3] Jacob, C. E., *Flow of Ground Water*, in *Engineering Hydraulics*, Hunter Rouse, Ed., Wiley N.Y., 1950, p. 321.
- [4] Juárez Badillo, E., *General Permeability Change Equation for Soils*, en trámite. International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials. Universidad de Arizona, Tucson, Enero. 1983, pp. 205-209.
- [5] Davis, E. H. y Raymond G. P., *A Non-Linear Theory of Consolidation*, *Geotechnique*, Vol. 15, Num. 2, 1965, pp. 161-173.
- [6] Juárez Badillo, E. y Chen, B., *Consolidation Curves for Clays*, *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 109, Num. 10, Octubre 1983. pp. 1303.
- [7] Crank, J., y Nicolson, P., *A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type*, *Proceedings*, Camb., Philosophical Society 43, Philadelphia, Pa., 1947, pp. 50-67.
- [8] Juárez Badillo, E. *General compressibility equation for soils*. Décima Conferencia Internacional en Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones, Estocolmo, Suecia, 1981, pp. 171-178.
- [9] Juárez-Badillo, E. *General time volume change equation for soils*. Onceava Conferencia Internacional en Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones, San Francisco, Cal. USA, Vol. 2, 1985, pp. 519-520.
- [10] Mesri, G. *Coefficient of secondary compression*. *Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 99, Num. SM1, Enero 1973, pp. 123-137.
- [11] Juárez-Badillo, E. *Postsurcharge secondary compression equation for clays*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, 1988, pp. 594-599.
- [12] Mesri, G. y Y. K. Choi, *Discusión sobre la ponencia de Yukitoshi Murakami: Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clays of some age*. *Soils and Foundations*, Vol. 20, Num. 4, Diciembre 1980. Sociedad Japonesa de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones.

[13] Comisión Federal de Electricidad, **Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotecnia**, Sección B, Tema 2, Capítulo 2, México 1980, pp. 2.1.1-2.1.10.

[14] Sowers, G. B. y Sowers, G. F. **Introducción a la Mecánica de suelos y Cimentaciones**. Primera edición, cuarta reimpresión, Ed. Limusa, México 1983.

[15] Arias, G. C. y Meza J. L. **Cuaderno de trabajo de Geotecnia II**. UNAM, pp. 179-223.

[16] Lambe, W. T. y Whitman, R. V. **Mecánica de Suelos**. Primera Edición, Cuarta Reimpresión, Ed. Limusa, México 1984, pp. 313-323, 337-346 y 429-446.

[17] Apuntes sobre la clase: **Cimentaciones**, Impartida por el Ing. J. Springall.

[18] Apuntes sobre la clase: **Geotecnia II**, Impartida por el Ing. J. Goddard E.

[19] Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. **Mecánica de Suelos Tomo 3**. Primera Edición, sexta reimpresión. Ed. Limusa, México 1982.

Fe de erratas:

Pág. 29: No se enunció el principio filosófico, el cual es:

"La ecuación de relación  $V$  y  $t$  solo puede existir a través de un parámetro adimensional y constante, independiente de los puntos críticos, satisfacer las condiciones de frontera, las cuales son:  $V = V_0$  para  $t = 0$  y  $V = V_1$  para  $t = t_0$ ."

Pág. 33: Al final del segundo párrafo dice:  
"están asociadas a sus tiempos  $t_{1j}$  y  $t_{2j}$  respectivamente, y por lo tanto, a sus  $t_{1j}$  y  $t_{2j}$ ,

y debe decir:  
están asociadas a sus tiempos  $t_{1j}$  y  $t_{2j}$ ,