

VISCOSIDAD INTERGRANULAR EN SUELOS FINOS SATURADOS
Leonardo Zeevaert Wiechers

1a. edición: octubre 1984

F-DEPFI

D-59

1984

g.3



DEPFI

VISCOSIDAD INTERGRANULAR EN SUELOS

FINOS SATURADOS

L. Zeevaert*

SINOPSIS

Los sedimentos finos saturados como arcillas limosas y limos arcillosos que se encuentran en ambientes lacustres, marinos, lagunas marginales y llanuras de inundación cerca de la desembocadura de los ríos presentan generalmente un comportamiento "*viscoso intergranular*" comúnmente conocido como compresión ----- secundaria.

Cuando el subsuelo se encuentra altamente estratificado con intercalaciones de arena, la compresión primaria debido al fenómeno hidrodinámico de la consolidación se verifica rápidamente, mostrándose más evidente la compresión secundaria. El ingeniero de cimentaciones no puede ignorar en estos casos el fenómeno de compresión secundaria, ya que los desplazamientos diferidos por el efecto de la viscosidad intergranular pueden ocasionar hundimientos totales y diferenciales de la cimentación, pudiéndose dañar el proyecto en cuestión.

El autor ha investigado durante varias décadas el fenómeno de viscosidad intergranular. En este trabajo se ofrece una mejor interpretación de la teoría expuesta con anterioridad, ⁽¹⁾ así como la determinación de los parámetros que intervienen en dicha teoría.

* Profesor Sección de Mecánica de Suelos. División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería, UNAM

INTRODUCCION

El suelo se encuentra en la naturaleza con un determinado estado de esfuerzos efectivos y presión hidráulica. Al ser colocado en el odómetro para efectuar una prueba de compresibilidad, éste es aliviado del estado de esfuerzos y presiones hidráulicas a la que estaba sometido⁽²⁾. Al ser cargado en el odómetro, se obtiene la recompresión del suelo como indica la rama plana de la curva de compresibilidad (Fig 1). Cuando se rebasa el "esfuerzo crítico" de compresión confinada σ_b se observa un quiebre en la curva de compresibilidad el cual se origina por la falla interna de la estructura del suelo al alcanzarse su resistencia al esfuerzo cortante. Teóricamente, el quiebre puede valorizarse por medio de la siguiente ecuación.

$$\sigma_b = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} (2c) \quad (1)$$

en donde ν representa el valor de la relación de Poisson en el momento del quiebre y c es la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. El valor de ν en el quiebre de la curva tiende a ser del orden de 0.25, o bien $\sigma_b/2c \approx 1.5$.

La rama inclinada de la curva de compresibilidad representa la compresión del suelo para una nueva condición estructural impuesta por el confinamiento que le proporciona el anillo del odómetro. Las deformaciones volumétricas unitarias en esta rama de la curva de compresibilidad, cerca del quiebre, son grandes comparadas con las de la curva antes del esfuerzo crítico σ_b (Fig 1). En este tipo de suelos la rama inclinada no debe usarse para diseño si se quieren evitar fuertes desplazamientos verticales.

En el rango de los esfuerzos de la recompresión las curvas de consolidación muestran la configuración que indica la Fig 2. Dicha configuración depende del coeficiente de consolidación del suelo c_v , de la viscosidad intergranular de éste, del espesor del estrato y de las condiciones de drenado. La magnitud de la viscosidad intergranular es, sin embargo, una función importante del nivel de esfuerzos cortantes que se generan durante la prueba del odómetro.

El objetivo del trabajo que se presenta se limita a efectuar la confrontación

de la teoría que se expone con los resultados de pruebas del odómetro para curvas de consolidación realizadas a niveles de esfuerzos menores del esfuerzo crítico.

CONSIDERACIONES TEORICAS

La teoría se establece por medio de dos hipótesis fundamentales,⁽¹⁾ a saber

- 1) El suelo está constituido por dos estructuras básicas, la primera está formada por granos microscópicos carentes de cohesión, y la segunda por flóculos de granos submicroscópicos que forman aglomeraciones de minerales de arcilla.
- 2) Ambas estructuras se encuentran saturadas con agua. La primera representa la compresión primaria, y la segunda, un comportamiento altamente viscoso intergranular o compresión secundaria debido a las fuerzas cortantes que se originan en los contactos intergranulares (Fig 3).

Al someterse el suelo a un incremento de carga unitaria Δp se origina un cambio volumétrico de la estructura primaria $\Delta \epsilon_{v1}$, y de la secundaria $\Delta \epsilon_{v2}$. Es evidente que el cambio total por el efecto de la compresión de las dos estructuras consideradas será

$$\Delta \epsilon_v = \Delta \epsilon_{v1} + \Delta \epsilon_{v2} \quad (2)$$

Dichos cambios volumétricos son retardados por el fenómeno hidrodinámico de la consolidación. Para analizar el fenómeno físico que se presenta usaremos dos modelos reológicos.

- a) La compresión primaria se analiza por medio del modelo de Kelvin, el cual puede ser correlacionado con el modelo reológico de Terzaghi, que implica que la compresión primaria tiende a ser finita.
- b) La compresión secundaria se analiza con un modelo propuesto por el autor denominado Unidad -Z, el cual representa el comportamiento viscoso intergranular del suelo ⁽¹⁾.

MODELO DE KELVIN

El modelo de Kelvin queda representado por dos elementos en paralelo (Fig 4a). Un elemento es resistente y capaz de tomar carga permanente al final del proceso primario, y el otro, representa un amortiguamiento Newtoniano de fluidez lineal ϕ_1 . Por consiguiente, se pueden establecer las siguientes condiciones

De equilibrio

$$\Delta p = \Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_{N1} \quad (3)$$

De deformación volumétrica unitaria

$$\Delta \epsilon_{v1} = \Delta \epsilon_1 = \Delta \epsilon_{N1} \quad (4)$$

De esfuerzo-deformación volumétrica unitaria

$$\Delta \epsilon_1 = \alpha_1 \Delta \sigma_1 \quad (5)$$

$$\dot{\Delta \epsilon}_N = \phi_1 \Delta \sigma_{N1} \quad (6)$$

Resolviendo para el valor de $\dot{\Delta \epsilon}_{v1}$, se encuentra la siguiente ecuación diferencial del fenómeno primario.

$$\dot{\Delta \epsilon}_{v1} + \frac{\phi_1}{\alpha_1} \Delta \epsilon_{v1} = \phi_1 \Delta p \quad (7)$$

integrando, se obtiene

$$\Delta \epsilon_{v1} = \alpha_1 \Delta p (1 - e^{-\phi_1 t / \alpha_1}) \quad (8)$$

Para un número grande de unidades se puede escribir

$$\Delta \epsilon_{v1} = \Delta p (\sum \alpha_1 - \sum \alpha_1 e^{-\phi_1 t / \alpha_1}) \quad (9)$$

considerando que $\Sigma \alpha_1 = \alpha$ representa la compresibilidad, se obtiene finalmente

$$\Delta \epsilon_{v1} = \alpha \Delta p \left(1 - \Sigma \frac{\alpha_1}{\alpha} e^{-\phi_1 t / \alpha_1} \right) \quad (10)$$

Por otro lado, de la teoría de consolidación de Terzaghi se obtiene

$$\Delta \epsilon_{v1} = m_v \cdot \Delta p \left(1 - \Sigma \frac{2}{M} e^{-M \cdot T_v} \right) \quad (11)$$

en donde $T_v = c_v \cdot T / H^2$ es el factor tiempo primario, y $M = (2m - 1)^2 \pi^2 / 4$.

Si comparamos las ecuaciones 10 y 11 vemos que el modelo de Kelvin y el de Terzaghi son equivalentes. Su correspondencia queda establecida por medio de las siguientes relaciones

$$\frac{\alpha_1}{\alpha} = \frac{2}{M} \quad \text{y} \quad \frac{\phi_1}{\alpha_1} = M c_v / H^2$$

de donde se obtiene

$$\alpha = m_v \quad \text{y} \quad \frac{\phi_1}{\alpha} = \frac{2 c_v}{H^2} \quad (12)$$

Del análisis anterior queda establecido para la compresión el uso de la función de Terzaghi; $F(T_v)$, luego podemos escribir

$$\Delta \epsilon_{v1} = m_v \cdot \Delta p \cdot F(T_v) \quad (13)$$

UNIDAD -Z

La Unidad -Z queda constituida por dos elementos en paralelo a semejanza del modelo de Kelvin, esto es, uno Newtoniano de fluidez no lineal que representa la fluidez intergranular que disminuye con el tiempo, y el otro que representa un amortiguador Newtoniano de fluidez lineal, ϕ_2 , el cual retarda la

deformación volumétrica unitaria de la estructura secundaria (Fig 4b). Se es establecen para esta Unidad las siguientes condiciones.

De equilibrio

$$\Delta p = \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_{N2} \quad (14)$$

De deformación volumétrica unitaria

$$\Delta \epsilon_{v2} = \Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_{N2} \quad (15)$$

De esfuerzo-deformación volumétrica unitaria

$$\dot{\Delta \epsilon}_2 = \frac{a}{b + t} \Delta \sigma_2 \quad (16)$$

$$\dot{\Delta \epsilon}_{N2} = \phi_2 \Delta \sigma_{N2} \quad (17)$$

Resolviendo para $\dot{\Delta \epsilon}_{v2}$, se obtiene la siguiente ecuación diferencial para la Unidad -Z

$$\dot{\Delta \epsilon}_{v2} = \frac{a}{b + a/\phi_2 + t} \cdot \Delta p \quad (18)$$

Integrando y considerando que para $t = 0$, $\Delta p = \Delta \sigma_{N2}$ de la ec. 17 y 18 se obtiene $b = 0$, por consiguiente

$$\Delta \epsilon_{v2} = 2.31 a \Delta p \log \left(1 + \frac{\phi_2}{a} \cdot t \right) \quad (19)$$

La ec. 19 se puede escribir en forma conveniente como sigue

$$\Delta \epsilon_{v2} = 2.31 a \Delta p \log \left(1 + \frac{\phi_2}{a} \cdot \frac{\alpha}{\phi_1} \cdot \frac{\phi_1}{\alpha} t \right)$$

Llamemos $2.31 a = m_t$ un valor medio para el incremento sostenido de Δp . De las relaciones Kelvin-Terzaghi se obtiene

$$\frac{\alpha}{a} = 2.31 m_v/m_t \quad y \quad \frac{\phi_1}{\alpha} = 2c_v/H^2$$

Definiendo $m_t/m_v = \beta$ se encuentra para la compresión volumétrica unitaria del fenómeno de viscosidad intergranular

$$\Delta \epsilon_{v2} = m_t \log \left(1 + \frac{4.62}{\beta} \frac{\phi_2}{\phi_1} T_v \right) \Delta p \quad (20)$$

en donde

$$\frac{4.62}{\beta} \frac{\phi_2}{\phi_1} = \xi \quad (21)$$

El valor de ξ es un parámetro adimensional que se determina de las pruebas. Nótese que $c_v \xi/H^2 = 1/\tau$ es el inverso de un tiempo, que representa el tiempo de relajamiento de la compresión secundaria, así pues

$$\xi = \frac{H^2}{\tau c_v} \quad (22)$$

La ec. 20 también se puede escribir

$$\Delta \epsilon_{v2} = m_t \log (1 + t/\tau) \Delta p \quad (23)$$

Nótese que los valores de τ para la misma deformación volumétrica unitaria se encuentran en la siguiente proporción.

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{H_1^2}{H_2^2} \quad (24)$$

De la ec. 2 se puede escribir en forma adimensional para la deformación total volumétrica unitaria

$$\frac{\Delta \epsilon_v}{m_v \Delta p} = F(T_v) + \beta \log (1 + \xi T_v) \quad (25)$$

por tanto

$$\Delta \varepsilon_v = m_v \cdot \Delta p \cdot \Omega$$

en donde Ω representa la configuración de las curvas de consolidación incluyendo el fenómeno de viscosidad intergranular. En la Fig 5, se ha dibujado una familia de curvas para un valor fijo de β haciendo variar el valor de ξ . De estas configuraciones se puede juzgar la importancia de la compresión secundaria. Nótese que para $\beta = 0$, esto es, $m_t = 0$, no existe la compresión secundaria, y por tanto, la curva límite sería la correspondiente a $F(T_v)$. A medida que ξ crece para cualquier valor fijo de β , la curva límite de viscosidad intergranular tiende a ser una línea recta en escala semi-log, e inmediatamente después del quiebre de dicha curva (Fig 5). Lo anterior ocurre cuando $\phi_2 = \phi_1$ de donde resulta un valor teórico límite de $\xi = 5.0$.

Los parámetros m_v , c_v , β y ξ son funciones del nivel de esfuerzo sobre el cual se aplica un incremento Δp de carga unitaria que produce el fenómeno de consolidación y pueden ser determinados de la prueba del odómetro. Los parámetros que se citan tienen el siguiente significado.

m_v , coeficiente de compresibilidad volumétrica unitario para la compresión primaria

c_v , coeficiente de consolidación del fenómeno primario

β , factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular

ξ , factor adimensional que modifica el valor de $T_v = c_v t/H^2$ en el fenómeno viscoso intergranular, ec. 25.

METODO DE AJUSTE PARA DETERMINAR PARAMETROS

Para la determinación y análisis de los parámetros que intervienen en la ec. 25, se utiliza dicha ecuación en la siguiente forma

$$\delta = \delta_v F(T_v) + C_t \log (1 + t/\tau) \quad (26)$$

Se observa de las configuraciones de la Fig 5, que para un valor de $T_v \approx 2.0$, se obtiene $F(T_v) \approx 1$, que corresponde aproximadamente al lugar donde la curva sufre una inflexión en su curvatura. Este punto se designa por B con coordenadas δ_B, t_B . Además, se escoge otro punto, F, lo más alejado posible del quiebre de la curva de consolidación, esto es, al final de la zona recta en escala semi-log de la compresión secundaria, con coordenadas δ_F, t_F . Para estos dos puntos se obtiene, según la ec. 26,

$$\delta_B - \delta_F = 0.43 C_t \ln \frac{1 + t_B/\tau}{1 + t_F/\tau} \quad (27)$$

resolviendo la ec. 27 para el valor de τ se obtiene

$$\tau = \frac{e^a t_F - t_B}{1 - e^a} \quad (28)$$



en donde $a = 2.31 (\delta_B - \delta_F)/C_t$.

El valor de C_t se determina de la pendiente de la curva en la zona recta de la ley logarítmica para dos puntos sobre ésta

$$C_t = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\log t_2/t_1} \quad (29)$$

Conociendo el valor de τ , se calcula δ_v por medio de

$$\delta_v = \delta_B - C_t \log (1 + t_B/\tau) \quad (30)$$

Como primera aproximación para el valor de c_v , se utiliza $\delta_v/2$ encontrando en la curva un valor para t_{50} , que corresponde al 50% de compresión primaria, esto es, para $T_v = 0.2$ y $F(T_v) = 0.5$, de donde

$$c_v = 0.2 H^2/t_{50} \quad (31)$$

Enseguida se calcula $\xi = H^2/\tau c_v$ y se entra en la siguiente ecuación para el 50% de consolidación

$$\delta_{50} = \delta_v/2 + C_t \log (1 + 0.2\xi) \quad (32)$$

Con un nuevo valor de δ_{50} , calculando de la ec. 32, se encuentran nuevos valores de t_{50} , c_v y ξ respectivamente. Se repite el cálculo, y usando la ec 32 nuevamente, se encuentra un valor mejorado de δ_{50} . Se prosigue con la iteración hasta que los valores de c_v y ξ ya no cambien substancialmente.

Los parámetros que intervienen en la ec. 25 podrán ser calculados por medio de las expresiones que se proporcionan a continuación para un determinado nivel de esfuerzo medio $p + 1/2 \Delta p$ correspondiente a cada una de las curvas de consolidación obtenidas en el odómetro, respectivamente.

$$m_v = \frac{\delta_v}{2H \Delta p}, \quad m_t = \frac{C_t}{2H \cdot \Delta p}, \quad \beta = \frac{m_t}{m_v} \quad (33)$$

Los valores de c_v y ξ serán los obtenidos anteriormente durante el método de ajuste.

Con el objeto de ilustrar el procedimiento de ajuste, se utiliza una curva de consolidación obtenida en el odómetro en una arcilla limosa inalterada con un contenido de agua de 288%, (Fig 6). El incremento de esfuerzo unitario usado $\Delta p = 0.6 \text{ k/cm}^2$ fue aplicado a un nivel de esfuerzo de 1.2 k/cm^2 con un espesor de la probeta de $2H = 1.72 \text{ cm}$. El esfuerzo crítico $\sigma_b = 3.7 \text{ K/cm}^2$ se muestra en la curva de compresibilidad para el suelo ensayado (Fig 1).

El punto B elegido cuando la curva cambia de curvatura y el punto F, (Fig 6), tienen los siguientes valores en micras, μ y segundos, t , a saber

$$\text{Punto B} \quad \delta_B = 135 \mu, \quad t_B = 800 \text{ seg}$$

$$\text{Punto F} \quad \delta_F = 248 \mu, \quad t_F = 100,000 \text{ seg}$$

El valor de C_t se determina en la zona recta de la curva y se obtiene un valor de 60 μ . Con la ec. 28 se obtiene

$$a = 2.31 (135 - 248)/60 = - 4.3505$$

de donde el valor de $\tau = 496.4$ seg. Aplicando la ec. 30, se calcula:

$$\delta_v = 135 - 60 \log (1 + 800/496.4) = 110.0 \mu$$

Entrando a la curva de laboratorio, (Fig 6), con $\frac{1}{2} \delta_v = 55.0$, se obtiene $t_{50} = 58$ seg, de donde los valores:

$$c_v = 0.2 (0.86)^2 / 58 = 2.550 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\xi = (0.86)^2 / c_v \cdot \tau = 0.584$$

Para mejorar los valores de c_v y ξ , se utiliza la ec. 32

$$\delta_{50} = 55.0 + 60 \log (1 + 0.584 \cdot 0.2)$$

$$\delta_{50} = 57.87 \mu$$

Entrando nuevamente en la curva de la Fig 6, con 57.9 μ se determina $t_{50} = 60$ seg y se calcula nuevamente $c_v = 2.465 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$ y $\xi = 0.604$. Como los valores mejorados de c_v y ξ muestran suficiente precisión se suspende la iteración, por lo que la curva teórica queda de la siguiente manera:

$$\delta = 110.0 F(T_v) + 60 \log (1 + 0.604 T_v) \quad (34)$$

en donde $T_v = (3.333 \times 10^{-3}) t$

Para confrontar el ajuste de la curva teórica con la de laboratorio, se calcularon los valores de δ con la ec. 34 y se registraron en la Fig 6. Se puede reconocer que la concordancia entre la curva teórica y la obtenida en el ----

odómetro se muestra muy satisfactoria. Sin embargo, en la primera fase de la compresión primaria el ajuste no es tan perfecto; lo anterior se puede atribuir principalmente a la descompresión del agua de poro que libera gas en forma de burbujas microscópicas que afectan la permeabilidad del suelo⁽²⁾. Para evitar esto en la prueba, sería necesario efectuar las pruebas del odómetro bajo una presión hidrostática equivalente a la de campo para la cual se obtuvo la muestra. Esta práctica podrá dar mejores resultados en la determinación de los parámetros antes descritos.

Para el comportamiento de la curva que muestra la Fig 6, los parámetros son

- 1) Nivel medio de esfuerzos 1.5 K/cm^2
- 2) Incremento 0.6 K/cm^2
- 3) $m_v = 0.0107 \text{ cm}^2/\text{K}$
- 4) $c_v = 2.465 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$
- 5) $m_t = 0.00581 \text{ cm}^2/\text{K}$
- 6) $\beta = 0.543$
- 7) $\xi = 0.604$

Usando los parámetros antes encontrados, la curva teórica se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta \epsilon_v = 0.00642 \{ F(T_v) + 0.543 \log (1 + 0.604 T_v) \}$$

Para el nivel de esfuerzos e incrementos antes citados, $T_v = (3,333 \times 10^{-3}) t$.

Otro de los problemas que se suscitan en la prueba del odómetro es la fricción del suelo contra el anillo, la cual aumenta a medida que el suelo se consolida. Lo anterior se puede reducir considerablemente si usan anillos flotantes y un producto repelente al suelo que haga disminuir la fricción. Algunos repelentes, como la gelatina de silicón, pueden reducir la fricción sobre el anillo en forma considerable.

Por otro lado, la membrana de suelo remoldeado que se forma al afinar la pastilla de suelo en el anillo del odómetro, tiende a retrasar el proceso de consolidación en su primera fase, ya que dicha membrana tiene una permeabilidad considerablemente más baja que el suelo inalterado del espécimen. La importancia de lo anterior debe ser investigado para poder efectuar una corrección en el valor del coeficiente de consolidación. Así también, dicha membrana de suelo remoldeado afecta la compresibilidad, haciéndose necesario efectuar la corrección correspondiente.

Finalmente, se puede decir que a pesar de los problemas que presenta el odómetro, los parámetros que se encuentran con su uso tienen precisión suficiente desde un punto de vista práctico, si las probetas son confiables, la prueba se realiza cuidadosamente y se efectúan las correcciones antes mencionadas⁽³⁾.

REFERENCIAS

- (1) "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions" (1982) by Leonardo Zeevaert, Second Edition. Van Nostrand Reinhold Co. Chapter II. P. 85-114
- (2) "Descompresión en Depósitos de Suelos Impermeables" (1982) por Leonardo Zeevaert. Facultad de Ingeniería, UNAM, División de Estudios de Posgrado.
- (3) "An Investigation of the Factors Affecting Laboratory Consolidation of Clays" (1948) by T. W. Van Zelst, Proc. Second International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam Vol. VII, P. 52

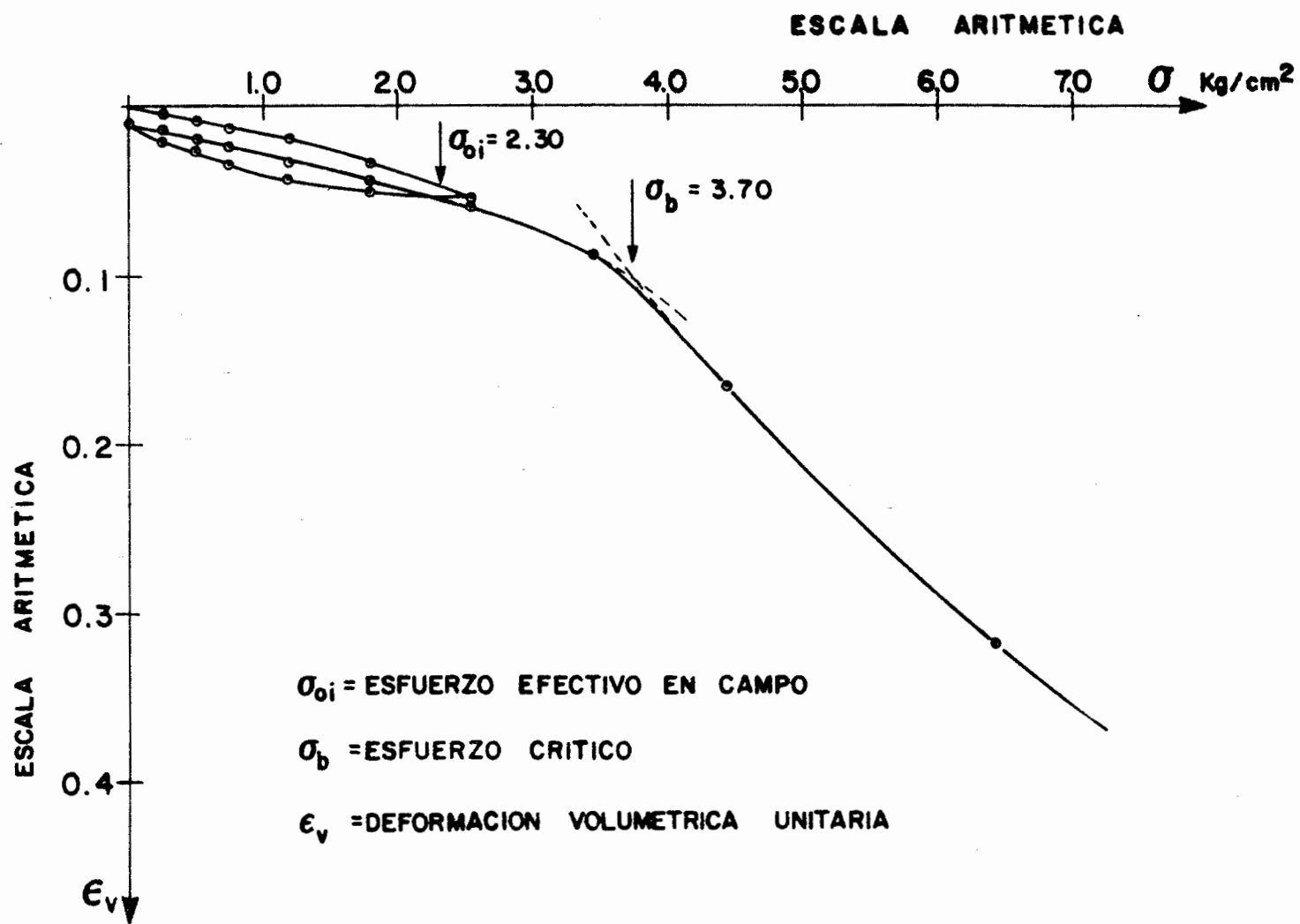


FIG- I CURVA DE COMPRESIBILIDAD

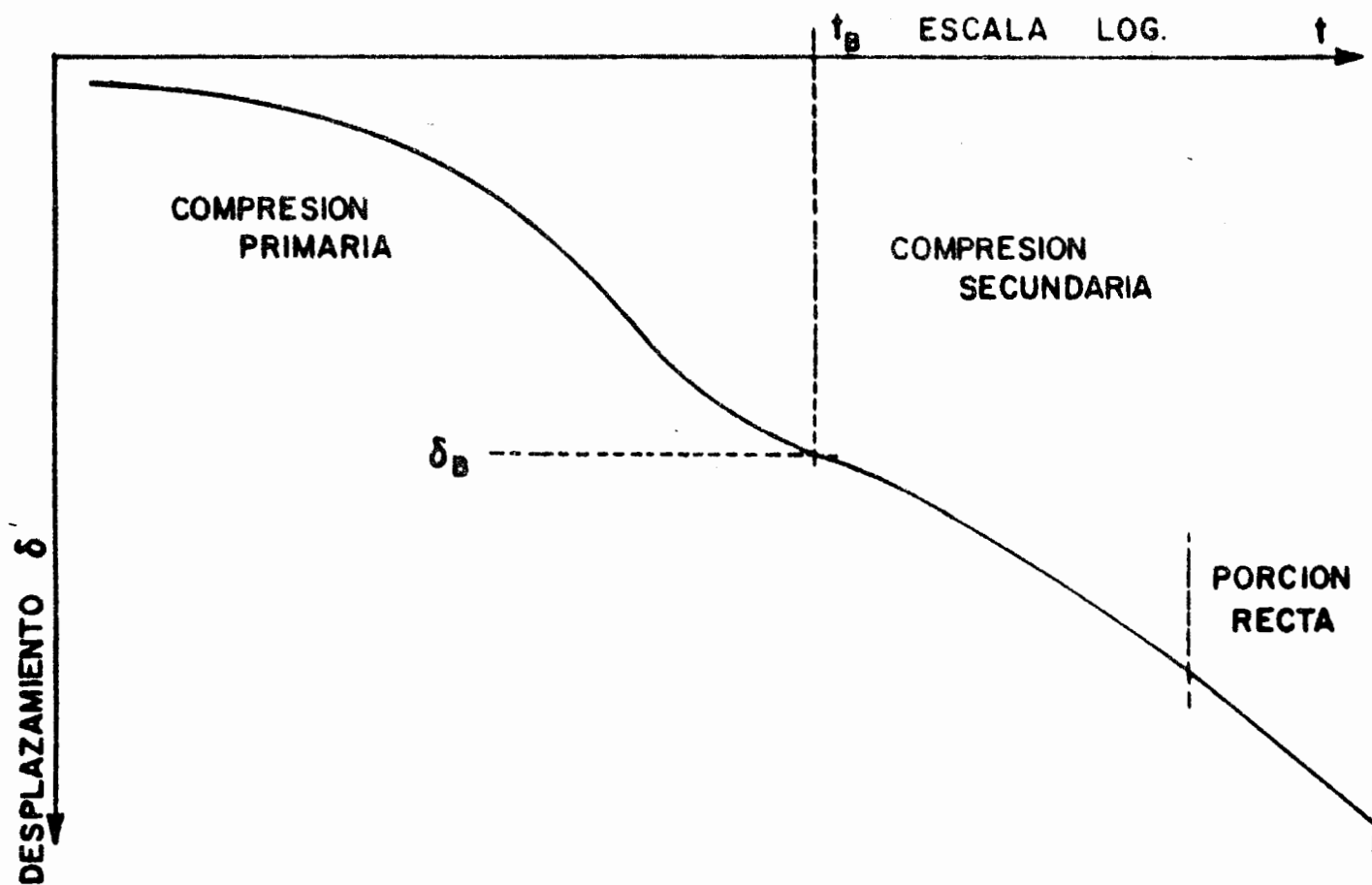
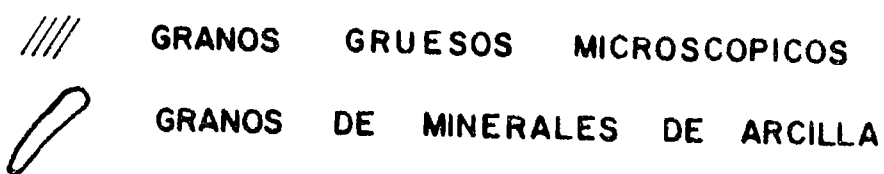
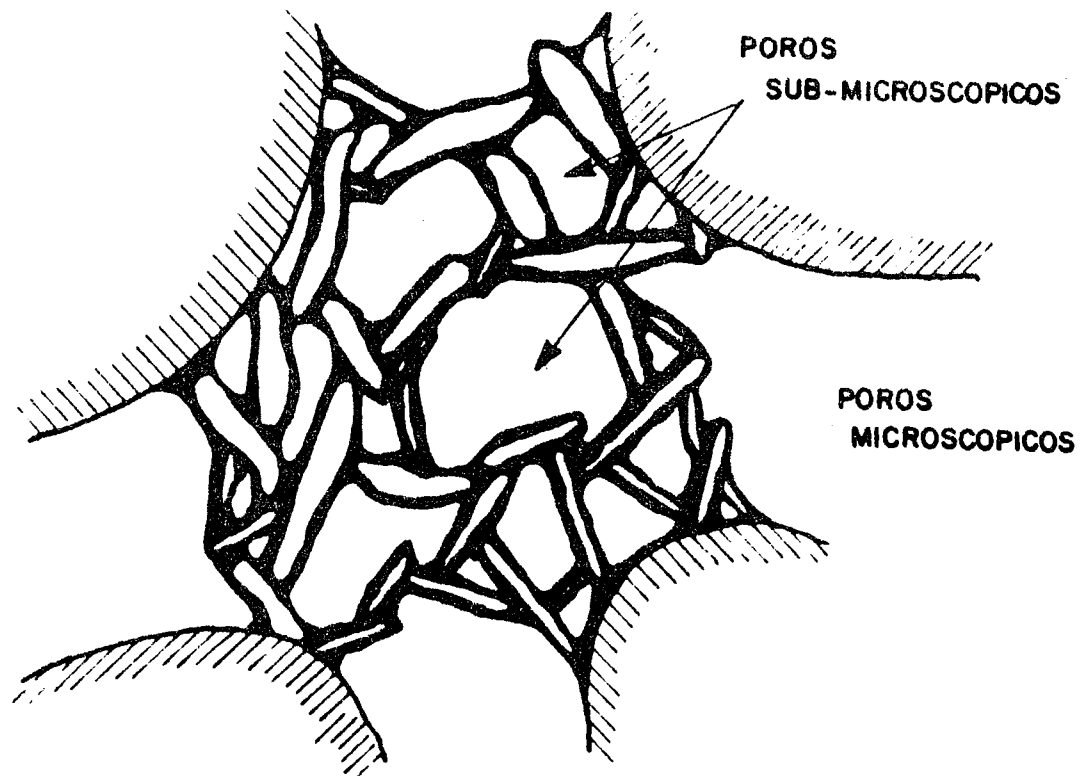


FIG- 2 CURVA DE CONSOLIDACION ANTES
DEL ESFUERZO CRITICO



**FIG-3 CONCEPCION ARTISTICA DE AGLOMERACION
DE GRANOS SUBMICROSCOPICOS**

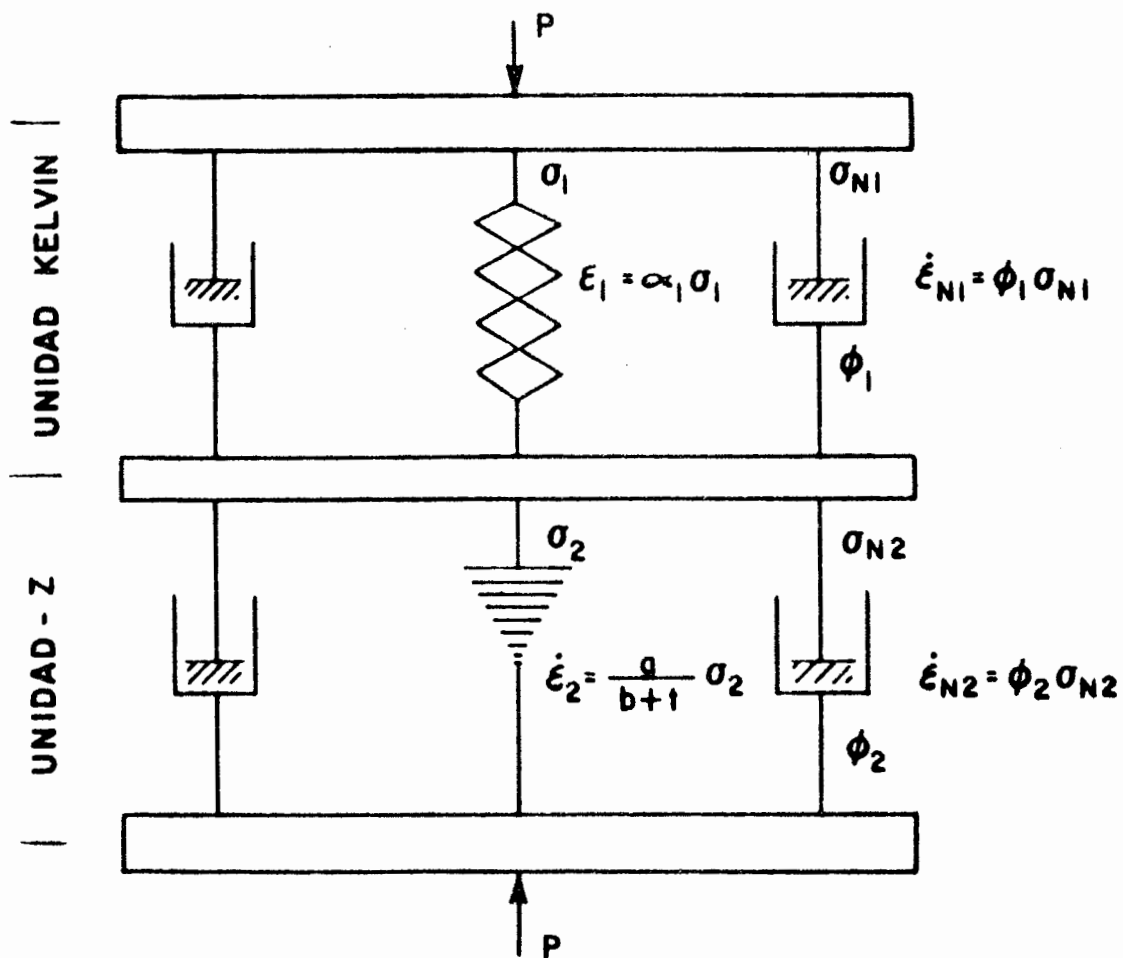


FIG- 4 MODELO REOLOGICO

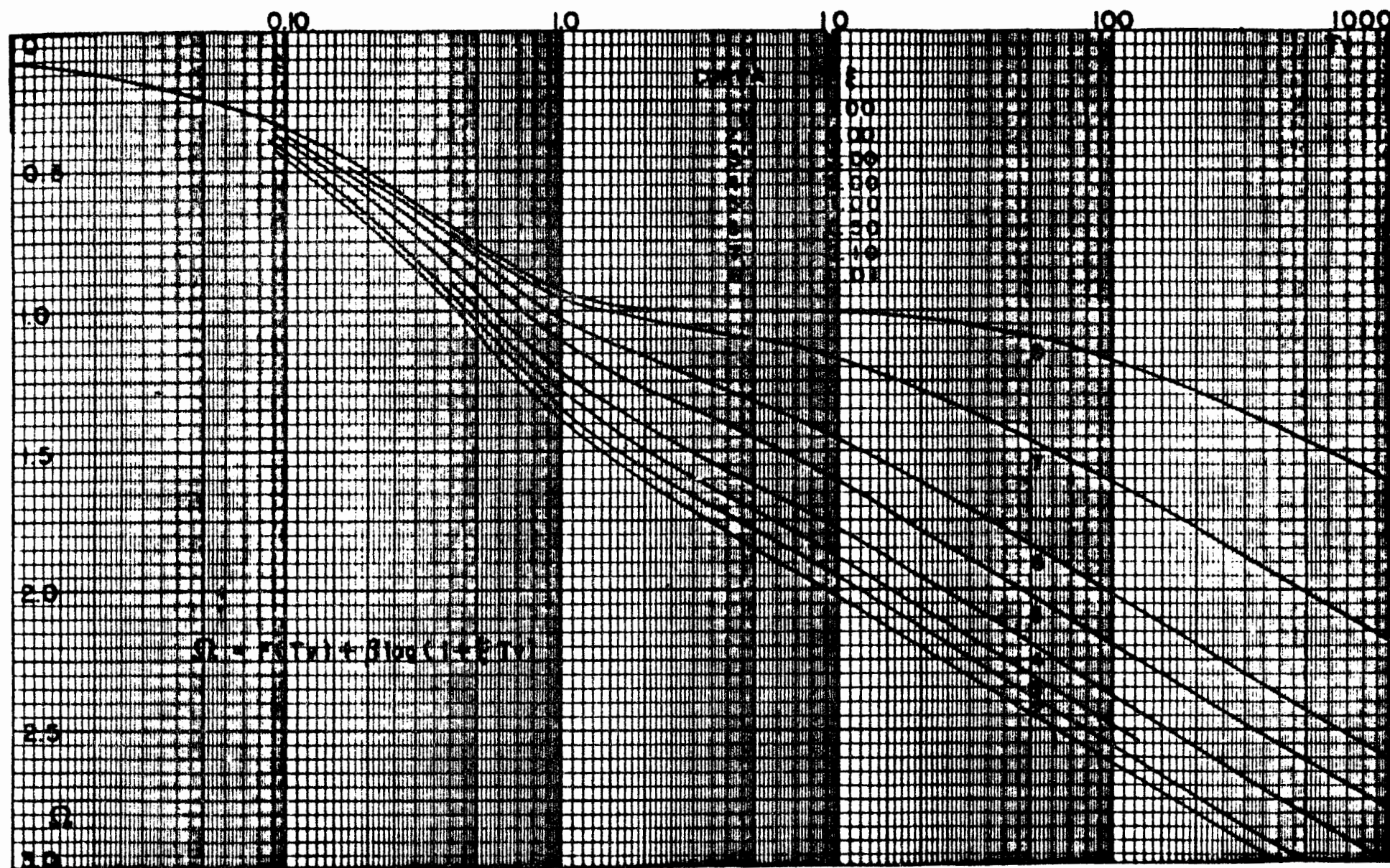
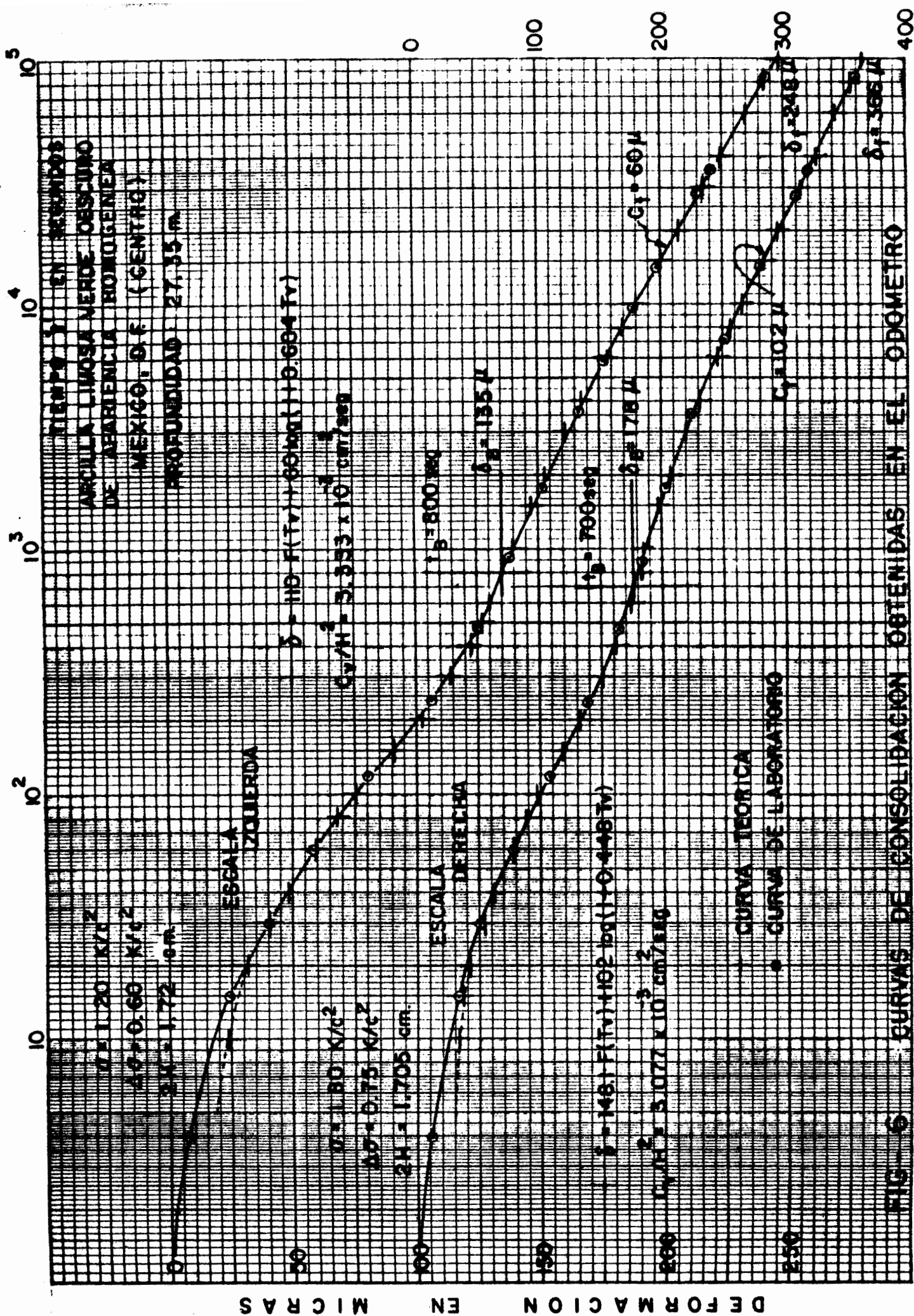


FIG-5 CURVAS TEORICAS DE CONSOLIDACION PARA $\beta = 0.6$



F-DEPFI/D- 59/1984/Ej.3



719134

F-DEPFI
D-59
1984
Ej.3

C(2) 719134