

01163
02ej.

RECIBIDA EN
SECRETARIA DE
2

**EFFECTO DE VIBRACIONES EN EL PROCESO DE CONSOLIDACION
DE UN SUELO COHESIVO**

CARLOS CASALES GALVAN

TESIS

Presentada a la División de Estudios de

Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(MECANICA DE SUELOS)

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F., marzo de 1988

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

RESUMEN

Para conocer el efecto de las vibraciones en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo, originadas por el hombre o la naturaleza, es conveniente efectuar ensayos de consolidación unidimensional en paralelo, tanto estáticos como dinámicos. En esta tesis se discuten los resultados obtenidos de una investigación realizada en una muestra inalterada de arcilla de la Ciudad de México, utilizando para tal fin, un dispositivo especialmente diseñado. Se presentan también, los resultados obtenidos de un estudio experimental para determinar la variación de la fricción por área unitaria en la interfaz suelo-anillo de consolidación.

C O N T E N I D O

	PAGINA
1. INTRODUCCION	1
2. IMPORTANCIA	2
3. HIPOTESIS	4
4. OBJETIVOS	5
5. ALCANCES	6
6. PROGRAMA DE ENSAYES	7
7. DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO	8
8. COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL DISPOSITIVO	10
9. PROCEDIMIENTO DE ENSAYES	14
10. RESULTADOS	18
11. CONCLUSIONES	30
12. RECOMENDACIONES	33
13. REFERENCIAS	34
14. TABLAS Y FIGURAS	35
ANEXO A : MEDICION DE LA FRICCION LATERAL EN LA INTERFAZ SUELO - ANILLO DE CONSOLIDACION	81

1. INTRODUCCION

En la mecánica de suelos, para conocer el efecto de las acciones originadas por el hombre o la naturaleza, es necesario efectuar ensayos de laboratorio que las representen. En el caso de suelos granulares, es un hecho experimental que la aplicación de carga ciclica produce cambios en su volumen. De lo anterior surge la inquietud de conocer el efecto que produce la aplicación de carga ciclica en suelos cohesivos, siendo ésta el motivo de la línea de investigación del efecto de la vibración en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo.

2. IMPORTANCIA

En la literatura se encuentra un gran número de trabajos realizados en suelos granulares; en cambio para suelos cohesivos son muy pocos. Algunos de éstos se refieren a vibraciones producidas por sismos; tal es el caso del estudio realizado por Ga Bache y Zhang Fucun, 1976, en el Municipio de Tianjin, China, donde por el sismo de Tangshan en 1976 se observaron hundimientos anormales en edificios cimentados en suelos blandos, razón por la cual el estudio consistió en efectuar en el sitio pruebas de consolidación unidimensional y después aplicar carga ciclica con diferentes aceleraciones.

En Japón, K. Yasuhara, T. Yamanouchi, H. Aoto y K. Hirao, 1983, han estudiado los hundimientos que sufrió una carretera construida en suelo blando después de estar sujeta a las vibraciones producidas por el tránsito de vehículos.

En algunas zonas de la Ciudad de México, existen indicios del efecto de la vibración producida por el tránsito de tranvías y de vehículos (Zeevaert, 1982). También en las carreteras construidas en las zonas de suelos blandos y turbas en Minatitlán y Coatzacoalcos, Ver., acusan por simple inspección ocular, hundimientos anormales.

De lo anterior se manifiesta la importancia que tiene en la práctica profesional de la ingeniería, el conocer el efecto que produce la vibración en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo compresible.

3. HIPOTESIS

El estudio se basa en las siguientes hipótesis:

a. El suelo se encuentra en equilibrio, es decir, que ha disipado el exceso de presión hidrostática (fin de la consolidación primaria).

b. La aplicación de carga repetida de bajo nivel de esfuerzo afecta al proceso de consolidación de un suelo cohesivo.

4. OBJETIVOS

Los objetivos de la línea de investigación son los siguientes:

- a. Desarrollo del equipo de laboratorio para efectuar el trabajo experimental.
- b. Obtención de un conjunto de datos que constituya la base experimental.
- c. Interpretación de los datos.
- d. Desarrollo de un modelo para la predicción de hundimientos bajo carga repetida.
- e. Confrontación del modelo con un conjunto de datos diferentes al utilizado para su creación.
- f. Compatibilidad y limitaciones del modelo en los casos de tránsito de vehículos, sismo y maquinaria.
- g. Confrontación del modelo con base en la instrumentación de un caso real.

5. ALCANCES

Del planteamiento general del problema, se observa que el trabajo que se requiere para estudiar el efecto de la vibración en el proceso de consolidación de suelos cohesivos es extenso. Esta tesis pretende iniciar los primeros tres puntos de estos estudios, con una muestra de suelo cohesivo de la Ciudad de México, que corresponda a la Formación Arcillosa Superior. El trabajo experimental se realizó en el Grupo Dinámica de Suelos de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPTI).

6. PROGRAMA DE ENSAYES

De un sondeo ubicado en las calles de Juárez y Balderas, Colonia Centro, Ciudad de México, se escogió una muestra de suelo cohesivo a una profundidad de 9.87 a 10.10 metros; las características promedio del suelo se indican a continuación:

- a. Arcilla color verde olivo.
- b. Contenido natural de agua igual a 309.3%
- c. Limite líquido igual a 357.0%
- d. Limite plástico igual a 86.6%
- e. Densidad de sólidos igual a 2.387
- f. Clasificación SUCS: CH

Con el fin de verificar las hipótesis, se efectuaron en paralelo ensayos de consolidación unidimensional; unos de manera convencional para obtener curvas de consolidación y compresibilidad bajo condiciones estáticas, estableciendo la base de referencia, y otros en condiciones dinámicas con el dispositivo que se describe a continuación.

7. DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO

El dispositivo utilizado en los ensayos dinámicos está basado en una idea original del Dr. J. Abraham Díaz Rodríguez (1983). En la etapa de diseño intervino Oscar Weckmann. La Fig. 1 muestra un esquema general y esta compuesto por:

a. Un sistema de carga, constituido por un portapesas que transmite la carga aplicada a un marco de acero. El valor máximo de esfuerzo vertical aplicado es de 1.5 Kg/cm^2 .

b. Una mesa vibratoria miniatura con un grado de libertad en el sentido vertical, apoyada en resortes que descansan en el banco de soporte del dispositivo. La plataforma de la mesa es circular de 14 cm de diámetro, unida con una barra de sección transversal circular a un pequeño vibrador de masas excéntricas que puede generar aceleraciones hasta de 0.3 g. La barra está guiada con un buje embalado (ball bushing), garantizando así el movimiento en el sentido vertical. Sobre la plataforma se coloca un consolidómetro de anillo flotante.

c. Un sistema de excitación integrado por un vibrador de cuatro masas excéntricas que es impulsado por un motor de $1/3 \text{ hp}$ y 1725 rpm . El motor está conectado a un reductor de velocidad (cero-max) y mediante una cadena de transmisión y dos catarinas con relación 2:1, se puede tener en el vibrador una velocidad controlada dentro del rango de 0 a 800 rpm .

d. Un sistema de registro, constituido por:

- Una fuente de poder de 6 y 10 volts de corriente continua.
- Dos transductores de deformación; uno registra el movimiento relativo entre la mesa vibratoria y el suelo, el otro indica el movimiento absoluto de la mesa.
- Un acelerómetro para medir la aceleración absoluta de la mesa.
- Una celda de carga, que permite medir la magnitud del esfuerzo vertical aplicado al suelo durante la vibración.
- Amplificadores y filtros que sirven para acondicionar las señales de los transductores.
- Un graficador térmico de cuatro canales, con controles de velocidad de avance del papel y la modificación de la amplitud en milivolts de las señales registradas.

8. COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL DISPOSITIVO

Al aplicar velocidad controlada al vibrador de masas excéntricas, se genera una fuerza excitadora de tipo armónico:

$$F_e = m_e \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

donde,

m_e	masas excéntricas
r	radio de giro
ω	frecuencia circular excitadora
t	tiempo

La fuerza generada produce una vibración forzada en el dispositivo que se desarrolló, el cual se idealizó como un sistema de un grado de libertad amortiguado, (Timoshenko, 1959). El movimiento vertical de la mesa vibratoria miniatura queda representado por:

$$X = A \cdot \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

donde,

A	Amplitud de la vibración forzada
α	Angulo de fase

La amplitud de la vibración forzada queda descrita por:

$$A = \frac{m.e.r.(\Omega/\omega_n)^2}{M \cdot [[1 - (\Omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\Omega/\omega_n)^2]^{1/2}} \quad (3)$$

donde,

ω_n frecuencia natural circular
 ζ fracción de amortiguamiento
 M masa total del sistema

En la Fig. 2 se muestran las curvas teóricas de la relación entre la amplitud y masas (excitadora y total del sistema) contra la relación de frecuencias (excitadora y natural del sistema, Ω/ω_n).

Al representar en el diagrama de Argand los vectores del movimiento, así como los de fuerza, Fig. 3, se observa el desfaseamiento que existe entre el vector de la fuerza excitadora y la amplitud. En la misma figura se indica la relación teórica que existe entre el ángulo de fase α , contra la relación de frecuencias (Ω/ω_n).

Cuando se aplica la vibración forzada, se genera una carga dinámica en el suelo, ΔP :

$$\Delta P = \frac{P \cdot \Omega^2 \cdot A \cdot \text{sen}(\Omega t - \alpha)}{g} \quad (4)$$

donde,

P carga estática aplicada al suelo
g aceleración de la gravedad

En la Fig. 4 se muestran las curvas teóricas de la relación entre cargas (dinámica y estática) contra la relación de frecuencias (Ω/ω_n).

Las curvas mencionadas indican la respuesta a la frecuencia teórica y sirven de base para interpretar la respuesta experimental del dispositivo.

La respuesta experimental del dispositivo se obtiene para el esfuerzo vertical aplicado en el suelo, donde se quiere observar el efecto de la vibración. La secuencia para obtenerla es la siguiente:

- a. Colocar en el portapesas el peso necesario, P, para aplicar un esfuerzo vertical al suelo, σ .
- b. Aplicar la frecuencia excitadora, Ω , con el sistema de excitación y graficar la respuesta con ayuda del sistema de registro.
- c. Obtener la curva experimental a partir de las gráficas.

En la Fig. 5 se muestran las curvas experimentales entre la

frecuencia excitadora y la amplitud de la mesa vibratoria miniatura. En la Fig. 6 se presentan las curvas experimentales entre la frecuencia excitadora y la carga dinámica, también se indica la relación de esfuerzos $\pm\Delta\sigma/\sigma$, en porcentaje:

$\pm\Delta\sigma$ incremento dinámico de esfuerzo aplicado al suelo

σ esfuerzo vertical aplicado al suelo en condiciones estáticas

En las Figs. 5 y 6 también se indica la frecuencia natural, F_n , así como también la frecuencia excitadora, Ω exc., seleccionada para los ensayos dinámicos. La frecuencia elegida de 7.58 Hz está fuera de la zona de resonancia y corresponde al menor incremento dinámico para el esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm² (Curva N° 1).

9. PROCEDIMIENTO DE ENSAYES

Sobre una muestra de suelo cohesivo, se realizó un ensaye de consolidación unidimensional bajo carga estática, E-0, en un consolidómetro convencional de anillo flotante con diámetro igual a 8 cm, y altura de 2 cm. El anillo es de un material plástico, Nylamid, con un ferro interior de teflón. Antes de la etapa de labrado, se colocó una película de grasa ligera de silicón para reducir la fricción suelo - anillo. Los esfuerzos verticales aplicados fueron 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.7 y 2.0 Kg/cm², los cuales permitieron definir las características de compresibilidad, así como el esfuerzo crítico ($\sigma_b = 1.1$ Kg/cm², Fig. 7). La profundidad a la que corresponde es de 9.89 m y en el rango de longitud de la muestra (9.87 a 10.10 metros), el esfuerzo vertical efectivo, σ_{oi} , es de 0.8 Kg/cm². La saturación del espécimen se efectuó al inició con un esfuerzo vertical de 0.2 kg/cm², hasta la mitad del anillo flotante; el resto de agua se agregó en el siguiente incremento de esfuerzo vertical.

Después se iniciaron los ensayos de consolidación unidimensional en paralelo, estático y dinámico, con la misma secuencia de saturación e incrementos de esfuerzo vertical del ensaye E-0. En todos los ensayos se aplicó una película de grasa ligera de silicón para reducir la fricción suelo - anillo. Las características son las siguientes:

a. El ensaye bajo carga dinámica D-1, que corresponde a una profundidad de 9.93 m, se realizó hasta alcanzar el esfuerzo vertical de 1.4 kg/cm^2 , que es mayor al crítico σ_b ; después de 24 h de aplicado este esfuerzo, se inició la secuencia de vibraciones armónicas con una frecuencia de 7.58 Hz; la secuencia consistió de 4 intervalos de diferente duración (1, 5, 10 y 20 min), repetidos tres veces cada uno de ellos; después de cada intervalo de vibración se dejó transcurrir 24 h (manteniendo la carga estática) para observar la evolución de la deformación.

b. El ensaye bajo carga estática E-1, que corresponde a una profundidad de 9.96 m, se realizó hasta el mismo esfuerzo vertical que el ensaye D-1; después de 24 h se aplicó un incremento de esfuerzo vertical de 0.0269 kg/cm^2 , que corresponde al incremento que se provoca durante la aplicación de carga dinámica del ensaye D-1; después se mantuvo la carga estática y el pequeño incremento durante 12 días.

c. El ensaye bajo carga dinámica D-2, que corresponde a una profundidad de 10.02 m, se realizó hasta alcanzar el esfuerzo vertical de 0.8 kg/cm^2 , igual al esfuerzo efectivo vertical; después de 24 h se aplicó la secuencia de vibraciones armónicas indicadas en el ensaye D-1. Al terminar la secuencia se aplicaron los esfuerzos verticales estáticos de 1.0, 1.2 y 1.4 kg/cm^2 , con el objeto de observar la curva de compresibilidad.

d. El ensaye bajo carga estática E-2, que corresponde a una profundidad de 9.99 m, se realizó hasta el mismo esfuerzo vertical que el ensaye D-2; después de 24 h se aplicó una secuencia de incrementos estáticos de esfuerzo vertical igual a 0.0299 Kg/cm², que corresponde al esfuerzo dinámico vertical aplicado en el ensaye D-2. La secuencia consistió de 4 intervalos de diferente duración (1, 5, 10 y 20 min), repetidos tres veces cada uno de ellos; después de cada intervalo de incremento estático se dejó transcurrir 24 h (manteniendo el esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm²) para observar la evolución de la deformación. Al terminar esta secuencia se aplicaron los esfuerzos verticales estáticos de 0.8299, 1.0299, 1.4299, 1.7299 y 2.0299 Kg/cm², con el fin de observar la curva de compresibilidad.

e. El ensaye bajo carga dinámica D-3, que corresponde a una profundidad de 10.04 m, se realizó con un anillo flotante con diámetro igual a 8 cm, y altura de 1.27 cm. El anillo es de un material plástico, Delrin, y no tiene el forro interior de teflón. El espesor es menor al de todos los ensayos anteriores, con el objeto de observar el efecto en la respuesta a la vibración. En el esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm², se aplicó la secuencia de vibraciones armónicas indicadas en el ensaye D-2; después de 24 h se aplicaron los esfuerzos verticales de 1.0, 1.2 y 1.4 Kg/cm². Al término de 24 h se inició la secuencia de vibraciones armónicas indicadas en el ensaye D-1.

En todos los ensayos se efectuó la descarga en intervalos de 24 h para permitir la máxima recuperación.

10. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos se presentan en forma gráfica y tabulada; pueden resumirse en:

a. Las características del suelo ensayado se indican en la tabla número 1; puede observarse que en el rango de 9.89 a 10.04 m de profundidad, las propiedades iniciales determinadas en el laboratorio varían como se indica a continuación:

- contenido natural de agua de 277 a 356%
- relación de vacíos de 6.76 a 8.85
- grado de saturación de 95.7 a 99.9%

La densidad de sólidos se determinó con el material producto del labrado de todos los ensayos, mediante el método de la vía húmeda; el valor obtenido de 2.387, fue utilizado para calcular la relación de vacíos y el grado de saturación indicados anteriormente.

El contenido natural de agua final varió en el rango de 260 a 337% y está relacionado con la duración de los niveles de esfuerzos verticales aplicados en cada ensayo. De lo anterior es evidente que a pesar de tratarse de una muestra inalterada de solo 23 cm de longitud, se obtuvieron variaciones en sus propiedades. Estas variaciones son factibles debido a que el proceso de formación de la arcilla lacustre del Valle de

México es aleatorio y no genera suelos con propiedades constantes. Por lo anterior, en el caso de los ensayos E-1 y D-1, las propiedades obtenidas se consideran similares, estableciendo una base de comparación aceptable; en el caso de los ensayos E-0, E-2, D-2 y D-3, se tienen variaciones en las propiedades iniciales, sin embargo se emplean para comparar el comportamiento del suelo ante vibraciones, debido a la cercanía que tienen uno de otro y a que cualitativamente son semejantes (tienen la misma tendencia en lo que respecta a la deformación vertical unitaria que es igual a la volumétrica, ver Fig. 11). Es importante hacer notar que en un depósito natural es difícil encontrar un suelo homogéneo con respecto a sus propiedades iniciales.

b. Los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos se muestran en la tabla número 2. Se consignan los valores obtenidos para los incrementos de esfuerzo vertical, $\Delta\sigma$, y de deformación, $\Delta\delta$, en cada ensayo. Con los valores anteriores se calculó el esfuerzo vertical aplicado, σ , con su correspondiente deformación total, δ , y su relación de vacíos, e . Se observa que en el ensayo D-1, al nivel de esfuerzo vertical $\sigma = 1.4 \text{ Kg/cm}^2$ (mayor al crítico σ_b), después de 12 días de haber aplicado la secuencia de vibraciones se generó una deformación de 0.943 mm; mientras que en el ensayo E-1 con la aplicación del incremento estático igual en magnitud al dinámico (0.0269 Kg/cm^2), la deformación fue de 1.039 mm. La diferencia entre ambas deformaciones es pequeña, siendo mayor la obtenida en el

ensaye E-1; sin embargo, debe tomarse en cuenta que en el ensaye B-1 la aplicación del pequeño esfuerzo vertical fue intermitente, de acuerdo a la secuencia de vibraciones aplicada durante 12 días, estando presente el efecto de la viscosidad intergranular (Zeevaert, 1984) del esfuerzo vertical previo, mientras que en el ensaye E-1 se presentó durante los 12 días la consolidación secundaria para el pequeño incremento de esfuerzo vertical (efecto de la viscosidad intergranular). De estos resultados puede interpretarse que la deformación generada por las vibraciones intermitentes con incremento de esfuerzo vertical pequeño, después del esfuerzo crítico, es similar al que se produce con incrementos estáticos (igual al incremento dinámico).

En el ensaye D-2, al esfuerzo vertical $\sigma = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ (menor al crítico σ_b), después de 12 días de haber aplicado la secuencia de vibraciones se generó una deformación de 0.097 mm; mientras que en el ensaye E-2 con la secuencia de incrementos estáticos iguales en magnitud al dinámico (0.0299 kg/cm^2), la deformación fue de 0.090 mm. En ambos ensayos, durante 12 días estuvo presente el efecto de la viscosidad intergranular debida al esfuerzo vertical previo; la diferencia entre ambas deformaciones fue pequeña, siendo mayor la obtenida en el ensaye D-2. De estos resultados puede interpretarse que la deformación que producen las vibraciones intermitentes con incremento de esfuerzo vertical pequeño, antes del esfuerzo crítico, puede obtenerse con la deformación que genera una secuencia de incrementos estáticos

(similar en duración y magnitud que el incremento de esfuerzo dinámico).

En el ensaye D-3 se aplicaron las mismas secuencias indicadas para los ensayes D-1 y D-2; después de 12 días al nivel del esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm², la deformación fue de 0.080 mm; mientras que al nivel de esfuerzo vertical de 1.4 Kg/cm², fue de 0.532 mm. Durante 12 días el efecto de la viscosidad intergranular estuvo presente tanto para el esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm² como para el de 1.4 Kg/cm². Las deformaciones obtenidas en el ensaye D-3, no se pueden comparar en forma directa con las de los ensayes D-1 y D-2, debido a que el espesor del anillo es menor. En los siguientes incisos se comenta el efecto que produce el anillo utilizado en el ensaye D-3.

c. La compresibilidad y deformación vertical unitaria de los ensayes se muestra en la tabla número 3, así como también en las Figs. 7 a 15. En la tabla indicada se muestran las relaciones de vacíos obtenidas y su deformación vertical unitaria correspondiente, ϵ_z , calculada como la relación de la deformación, δ , entre el espesor inicial. El ensaye D-3 fue realizado con un anillo de espesor inicial de 12.70 mm, menor al que tenían los demás ensayes (19.82 mm). En la Fig. 11 se muestran las curvas de deformación vertical unitaria de todos los ensayes, se observa que el conjunto tiene las mismas características antes y después del esfuerzo crítico, así como en la descarga. En los ensayes D-1 y E-1 en

el esfuerzo vertical de 1.4 kg/cm^2 (mayor al crítico), puede observarse que después de 12 días de aplicar la secuencia de vibraciones e incremento estático, se generó un cambio en la relación de vacíos, Δe , de 0.369 y 0.415, respectivamente (Fig. 8); el incremento en deformación vertical unitaria, $\Delta \epsilon_z$, fue de 4.758 y 5.242%, respectivamente (Fig. 12). La comparación entre los ensayos D-1 y D-3 en el esfuerzo vertical de 1.4 kg/cm^2 , se muestra en la Fig. 13; el cambio en el valor de $\Delta \epsilon_z$ a los 12 días de aplicar la secuencia de vibraciones fue de 4.758 y 4.189%, respectivamente. En los ensayos D-2 y E-2 en el esfuerzo vertical de 0.8 kg/cm^2 (menor al crítico), se observa que después de 12 días de aplicar la secuencia de vibraciones armónicas e incremento estático, se generó un cambio en la relación de vacíos, Δe , de 0.047 y 0.036, respectivamente (Fig. 9); el incremento $\Delta \epsilon_z$ fue de 0.489 y 0.454%, respectivamente (Fig. 14).

La comparación entre los ensayos D-2 y D-3 al esfuerzo vertical de 0.8 kg/cm^2 , se muestra en la Fig. 15; el cambio en el valor de $\Delta \epsilon_z$ a los 12 días de aplicar la secuencia de vibraciones fue de 0.489 y 0.630%, respectivamente. La curva de compresibilidad del ensayo D-3 se muestra en la Fig. 10; los cambios en la relación de vacíos, Δe , a los 12 días de aplicar la secuencia de vibraciones en los esfuerzos verticales de 0.8 y 1.4 kg/cm^2 fueron de 0.062 y 0.413, respectivamente; estos son mayores a los obtenidos en los ensayos D-2 y D-1 (anillos con espesor mayor),

respectivamente.

d. El efecto de la secuencia de vibraciones armónicas e incrementos estáticos de los ensayos se muestra en la tabla número 4, así como también en las Figs. 16 a 19. En la tabla se indican los valores obtenidos del incremento en la deformación $\Delta\delta$ y el correspondiente $\Delta\epsilon_z$ en porcentaje, al finalizar la vibración y a las 24 h. En los ensayos D-1 y D-3 en el esfuerzo vertical de 1.4 Kg/cm² (mayor al crítico), se tiene que el efecto de la secuencia de vibraciones armónicas (Figs. 16 y 17) generó al terminar la vibración del primer intervalo (con duración de 1 min.), valores de $\Delta\epsilon_z$ iguales a 0.05 y 0.158%, respectivamente, y en el último (con duración de 20 min.) de 0.040 y 0.016%, respectivamente. El comportamiento observado a las 24 h de haber aplicado las vibraciones fue muy similar desde un valor máximo al inicio de $\Delta\epsilon_z$ igual a 1.412% hasta un mínimo de 0.055%. Los valores del ensayo E-1, son equivalentes a los tiempos que duran las vibraciones y a cada 24 h de los ensayos D-1 y D-3; se observa que los $\Delta\epsilon_z$ equivalentes al terminar la vibración son desde 0.015% hasta 0.003%, mientras que las deformaciones a las 24 h son muy similares a los ensayos D-1 y D-3, Fig. 17. De los resultados obtenidos, se puede interpretar que el efecto que se produce al terminar la vibración después del esfuerzo crítico (Fig. 16) es mayor en las primeras aplicaciones y en especial en el anillo de menor espesor, reduciéndose su efecto en las siguientes aplicaciones, a pesar de que se aumentó la duración de cada

aplicación de vibraciones. A las 24 h de aplicar la vibración (Fig. 17), el efecto que se produce es inducir deformaciones adicionales a las que se generan por la consolidación secundaria (efecto de la viscosidad intergranular) del esfuerzo vertical de 1.4 Kg/cm^2 , dando como resultado un incremento de deformación unitaria similar al que se produce en el ensaye E-1 , en el que se presenta la consolidación secundaria debida al pequeño incremento estático (igual al dinámico); este efecto es más importante durante las primeras aplicaciones, disminuyendo en las siguientes, a pesar de que se aumentó la duración de cada aplicación.

En los ensayes D-2 y D-3 en el esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm^2 (menor al crítico), se tiene que al terminar la vibración del primer intervalo (con duración de 1 min.), los valores de $\Delta\epsilon_z$ fueron de 0.040 y 0.142%, respectivamente, y en el último (con duración de 20 min.) de 0.005 y 0%, respectivamente (Fig. 18); el comportamiento observado a las 24 h de aplicar las vibraciones fue mayor en el ensaye D-3 (desde $\Delta\epsilon_z$ igual a 0.197% hasta 0%) que en el D-2 (desde $\Delta\epsilon_z$ igual a 0.050% hasta 0.020%), Fig. 19. El ensaye E-2 al mismo nivel de esfuerzos que los ensayes D-2 y D-3, con la secuencia de incrementos estáticos se observó que al terminar el primer intervalo (con duración de 1 min.), el valor de $\Delta\epsilon_z$ fue de 0.025% (menor al del ensaye D-2) y en el último (con duración de 20 min.) de 0.030% (mayor al de los ensayes D-2 y D-3), Fig. 18; el comportamiento a

las 24 h fue muy similar al del ensaye D-2 con valores de $\Delta\epsilon_z$ al inicio de 0.085% y al final de 0.015%, Fig. 19. La interpretación de estos resultados, es similar a la comentada para el efecto que se produce con la vibración después del esfuerzo crítico; sin embargo, en este caso el ensaye estático E-2 no tuvo constante el pequeño incremento estático (igual en magnitud al dinámico), generándose así a las 24 h, deformaciones adicionales a las que se obtienen por la consolidación secundaria del esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm².

e. Las curvas de consolidación y el efecto que produce la vibración, así como la secuencia observada se muestran en las Figs. 20 a 36. En los ensayos D-1 y E-1, al aplicar el incremento de esfuerzo vertical, $\Delta\sigma$, igual a 0.2 Kg/cm² (Fig. 20) para llegar al esfuerzo vertical, σ , igual a 1.4 Kg/cm² (mayor al crítico), se observó un comportamiento muy similar. El efecto de la vibración en el ensaye D-1 y el que produce la aplicación del incremento estático igual en magnitud al dinámico (0.0269 Kg/cm²) en el ensaye E-1, durante 12 días, se muestran en la Fig. 21; puede observarse que en el ensaye D-1 las deformaciones inducidas por la secuencia de vibraciones generan un efecto de aceleración en el proceso de deformación (consolidación secundaria del esfuerzo vertical previo) con tendencia a disminuir el movimiento durante las últimas aplicaciones de vibración; mientras que en el ensaye E-1 el incremento estático modifica la trayectoria de la deformación y se mantiene constante durante los 12 días sin manifestar la tendencia a disminuir

el movimiento (consolidación secundaria del pequeño incremento) . En la Figs. 22 y 23 se presenta la evolución de la deformación vs. tiempo, para la secuencia de vibraciones del ensaye D-1, en las que se aprecia que el pequeño incremento dinámico es más efectivo para producir deformaciones durante las primeras aplicaciones, y que decrece su efecto al aumentar el número de aplicaciones, a pesar de que se aumentó la duración de cada aplicación. Además, en todas las curvas se observa que al terminar la vibración se tiene una deformación no recuperable, después se detiene el movimiento hasta los 10,000 segundos para continuar deformándose.

En los ensayes E-2 y D-2 al aplicar un $\Delta\sigma$ igual a 0.2 kg/cm^2 (Fig. 24) para llegar al esfuerzo vertical de 0.8 kg/cm^2 (igual al efectivo en el sitio y menor al crítico de 1.1 kg/cm^2), se observó una deformación mayor en el E-2 con una tendencia similar en la consolidación secundaria; en los dos ensayes se presentó el problema de fricción entre el suelo y el anillo de teflón, a pesar de que se aplicó una película delgada de grasa ligera de silicón, la cual reduce del orden de un 50% la fricción (ver anexo A). En la Fig. 25 se muestra el efecto de la vibración en el ensaye D-2, así como el que produce la secuencia de incrementos estáticos del ensaye E-2 de igual magnitud al dinámico (0.0299 kg/cm^2), durante 12 días; se observa en los ensayes que la secuencia de vibraciones así como la secuencia de incremento estático modificaron la trayectoria de deformación (consolidación

secundaria del esfuerzo vertical previo), siendo similares a partir de los 50,000 segundos, con tendencia a disminuir el movimiento durante las últimas aplicaciones de vibraciones del ensaye D-2. En las Figs. 26 y 27 se presenta la evolución de la deformación vs. tiempo, para la secuencia de vibraciones del ensaye D-2, en las que pueden aplicarse los mismos comentarios indicados para la secuencia del ensaye D-1; sin embargo, el problema de la fricción suelo - anillo frenó el movimiento en algunos eventos aproximadamente a partir de los 50,000 segundos. En las Figs. 28 y 29 se presenta la evolución de la deformación vs. tiempo, para la secuencia de incrementos estáticos del ensaye E-2; se observa una deformación hasta el momento que se retira el pequeño incremento de esfuerzo, recuperándose hasta una deformación permanente, después el movimiento se detiene hasta los 10,000 segundos, para continuar deformándose. Con estos resultados se puede interpretar que la secuencia de incrementos estáticos generan deformaciones adicionales a las que se obtienen por la consolidación secundaria del esfuerzo vertical de 0.8 Kg/cm².

Después de la secuencia de incrementos estáticos en el ensaye E-2, se aplicó el mismo pequeño incremento (0.0299 Kg/cm²) manteniéndose durante 24 h (Fig. 30); se observa una curva de consolidación con problema de fricción entre el suelo y el anillo al final del ensaye. La deformación total fue de 0.023 mm, que equivale aproximadamente a un 25% de la deformación total obtenida durante la secuencia de incrementos estáticos

(0.090 mm, tabla 2). Este resultado indica que la deformación desarrollada por la muestra durante la secuencia de incrementos estáticos, es adicional al efecto del esfuerzo vertical previo.

En el ensaye D-3 se efectuó la secuencia de vibraciones armónicas a los esfuerzos verticales de 0.8 y 1.4 kg/cm², de igual forma que en los ensayes D-2 y D-1, respectivamente. En la Fig. 31 se muestra el efecto que produce la vibración en el ensaye D-3 al esfuerzo vertical de 0.8 kg/cm² (menor al crítico); se observa que desde el inicio de la secuencia de vibraciones, se genera un cambio importante en la trayectoria de la deformación que tendría por consolidación secundaria del esfuerzo vertical previo, con el efecto de acelerar inicialmente para después disminuir a partir del onceavo día (vibración con duración de 20 min.). En las Figs. 32 y 33 se presenta la evolución de las deformaciones vs. tiempo, para la secuencia de vibraciones, donde se observa lo mismo que se indicó para el ensaye D-2.

En la Fig. 34 se muestra el efecto que produce la vibración en el ensaye D-3 al esfuerzo vertical de 1.4 kg/cm² (mayor al crítico); se observa un ligero cambio en la trayectoria de la deformación (consolidación secundaria del esfuerzo vertical previo) con la tendencia de disminuir el movimiento en forma similar al ensaye D-1. En las Figs. 35 y 36 se presenta la evolución de las deformaciones vs. tiempo, para la secuencia de vibraciones, donde se observa lo mismo que se

indicó para el ensaye D-1. El efecto observado por la aplicación de la secuencia de vibraciones en el ensaye D-3, fue mas importante para el esfuerzo de 0.8 Kg/cm² (menor al critico), que para el de 1.4 Kg/cm². Al reducir el espesor del anillo (12.70 mm) se amplificó el efecto y el decremento de la relación de vacios (0.062 y 0.413 para la secuencia de vibraciones con esfuerzo vertical de 0.8 y 1.4 Kg/cm², respectivamente).

11. CONCLUSIONES

Con los resultados presentados en esta tesis, se pueden obtener conclusiones respecto al efecto que produce la aplicación de esfuerzos cíclicos de pequeña magnitud en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo de la Ciudad de México, que corresponde a la Formación Arcillosa Superior; sin embargo, estas conclusiones son aplicables únicamente al suelo que se utilizó y a las condiciones experimentales aquí descritas.

a. El dispositivo utilizado en los ensayos dinámicos, permitió aplicar con precisión la secuencia de vibraciones armónicas. La respuesta experimental a la frecuencia del dispositivo fue similar a la respuesta teórica, permitiendo así la calibración y ajuste del equipo para los ensayos.

b. Las propiedades iniciales del suelo determinadas en el laboratorio, variaron a pesar de tratarse de una muestra de solo 23 cm de longitud. Sin embargo, por la cercanía que tienen los ensayos de consolidación unidimensional en paralelo, estático y dinámico, y a que cualitativamente son semejantes (tienen la misma tendencia en lo que respecta a la deformación vertical unitaria, que es igual a la volumétrica), fue posible generar una base confiable para analizar cualitativamente el efecto que produce la aplicación de carga cíclica de pequeña magnitud.

c. La aplicación de carga cíclica de pequeña magnitud de esfuerzos generó deformaciones no recuperables al terminar la aplicación; después el movimiento continuó por el proceso de consolidación secundaria (efecto de la viscosidad intergranular). Este efecto fue determinante en las muestras con un esfuerzo vertical efectivo mayor al crítico.

d. La secuencia de vibraciones armónicas generó mayor efecto en las primeras aplicaciones, reduciendo su efecto en las siguientes, a pesar de que se aumentó la duración de cada aplicación de vibraciones. El efecto que se produce es el de acelerar el proceso de deformación (consolidación secundaria del esfuerzo vertical previo) con tendencia a disminuir el movimiento durante las últimas aplicaciones de vibración.

e. La deformación de la arcilla del Valle de México bajo carga cíclica de pequeña magnitud (menor al 4% del esfuerzo vertical) puede estimarse mediante la aplicación de una secuencia de incrementos estáticos o constantes de igual magnitud al esfuerzo dinámico.

f. Es notable la amplificación que se registró en el efecto de la vibración en el proceso de consolidación del ensaye D-3 que se realizó con espesor del espécimen igual a 12.70 mm, menor al de los demás ensayos (19.82 mm).

g. El uso de una película delgada de grasa ligera de silicón en la interfaz suelo - anillo con forro interior de teflón, permitió reducir la fricción en aproximadamente un 50%. El dispositivo empleado para medirla, tiene la ventaja de que en forma directa con el anillo flotante, suelo remoldeado, holgura de las piedras porosas y sobre todo con la variación de la velocidad relativa entre la interfaz suelo - anillo, permite medir la fricción por área unitaria que se opone al movimiento. Los resultados que se presentan en el Anexo "A", indican que la fricción es una variable función del esfuerzo vertical efectivo al que se consolida el suelo, así como también de la velocidad relativa entre la interfaz suelo - anillo.

12. RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en esta tesis, permiten manifestar la importancia y complejidad del efecto que producen las vibraciones armónicas en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo, por lo que es conveniente continuar con la línea de investigación, ampliando la base experimental con las siguientes variantes:

a. Respuesta a la frecuencia.

b. Variación de la magnitud y duración del esfuerzo cíclico.

c. Muestras inalteradas de suelo obtenidas en sondeos cercanos o bien muestras cúbicas, con objeto de realizar los ensayos en paralelo, tanto estático como dinámico, del mismo horizonte, con propiedades índice iniciales similares. Esto puede resultar teóricamente deseable; sin embargo, en la práctica es difícil lograrlo, ya que como se indicó en el texto, los depósitos naturales no son homogéneos. Lo anterior puede suplirse con una numerosa serie de ensayos que permita eliminar el efecto que producen las variaciones de las propiedades índice iniciales.

Con las conclusiones presentadas, así como con la ampliación de la base experimental, será posible complementar el conocimiento del efecto que produce la vibración en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo.

13. REFERENCIAS

1. Bahoe, Ga y Fucun, Zhang, 1976. " Características de Resistencia y Deformación del Suelo Bajo el Efecto Dinámico", (Referencia incompleta).
2. Yasuhara, K., Yamamouchi, T., Aoto, H. and Hirao, K., 1983. " Approximate Prediction of Soil Deformation under Drained Repeated Loading ", Soils and Foundations, Vol. 23, N° 3, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
3. Zeevaert, L., 1982 (Comunicación Personal).
4. Diaz Rodriguez, J. A., 1983. Informe interno, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
5. Timoshenko, S. P., y Young, D. H., 1959. " Problemas de Vibración en Ingeniería ", Compañía Editorial Continental, S. A., México.
6. Zeevaert, L., 1984. " Viscosidad Intergranular en Suelos Finos Saturados ", División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

14. TABLAS Y FIGURAS

T A B L A 1

CARACTERISTICAS DEL SUELO ENSAYADO

MUESTRA	PROF. EN M	e_o	INICIAL		FINAL	
			W, EN %	GW, EN %	W, EN %	GW, EN %
E-0	9.89	7.393	302.96	97.82	260.33	
D-1	9.93	6.762	282.98	99.89	272.34	
E-1	9.96	6.921	284.30	98.05	280.56	
E-2	9.99	6.910	277.11	95.73	259.92	
D-2	10.02	8.529	352.69	98.71	337.51	
D-3	10.04	8.852	355.99	96.00	333.33	

Ss=2.387

T A B L A 2

RESULTADOS DE LOS ENSAYES ESTATICOS Y DINAMICOS

MUESTRA	$\Delta \bar{v}$, EN KG/CM ²	\bar{v} , EN KG/CM ²	$\Delta \delta$, EN CM X 10 ¹	δ , EN CM X 10 ¹	e	TIPO DE CARGA
E-0	0.0	0.0	0.000	0.000	7.393	
E-0	0.2	0.2	0.284	0.284	7.273	ESTATICA
E-0	0.2	0.4	0.170	0.454	7.201	ESTATICA
E-0	0.2	0.6	0.170	0.624	7.129	ESTATICA
E-0	0.2	0.8	0.192	0.816	7.047	ESTATICA
E-0	0.2	1.0	0.247	1.063	6.943	ESTATICA
E-0	0.2	1.2	0.423	1.486	6.764	ESTATICA
E-0	0.2	1.4	0.799	2.285	6.425	ESTATICA
E-0	0.3	1.7	1.478	3.763	5.799	ESTATICA
E-0	0.3	2.0	1.177	4.940	5.301	ESTATICA
D-1	0.0	0.0	0.000	0.000	6.762	
D-1	0.2	0.2	0.069	0.069	6.735	ESTATICA
D-1	0.2	0.4	0.138	0.207	6.681	ESTATICA
D-1	0.2	0.6	0.157	0.364	6.620	ESTATICA
D-1	0.2	0.8	0.128	0.492	6.570	ESTATICA
D-1	0.2	1.0	0.214	0.706	6.486	ESTATICA
D-1	0.2	1.2	0.484	1.190	6.296	ESTATICA
D-1	0.2	1.4	1.072	2.262	5.876	ESTATICA
D-1	± 0.0269		0.943	3.205	5.507	DINAMICA(*)
E-1	0.0	0.0	0.000	0.000	6.921	
E-1	0.2	0.2	0.182	0.182	6.848	ESTATICA
E-1	0.2	0.4	0.150	0.332	6.788	ESTATICA
E-1	0.2	0.6	0.157	0.489	6.725	ESTATICA
E-1	0.2	0.8	0.182	0.671	6.653	ESTATICA
E-1	0.2	1.0	0.236	0.907	6.558	ESTATICA
E-1	0.2	1.2	0.414	1.321	6.393	ESTATICA
E-1	0.2	1.4	0.872	2.193	6.044	ESTATICA
E-1	0.0269	1.4269	1.039	3.232	5.629	ESTATICA(*)

----CONTINUA EN LA SIGUIENTE HOJA

(*) A los 12 días de haber aplicado el incremento de esfuerzo vertical, $\Delta \bar{v}$

T A B L A 2

RESULTADOS DE LOS ENSAYES ESTATICOS Y DINAMICOS
(CONTINUACION)

MUESTRA	$\Delta \bar{v}$, EN KG/CM ²	\bar{v} , EN KG/CM ²	$\Delta \delta$, EN CM X 10 ⁻¹	δ , EN CM X 10 ⁻¹	e	TIPO DE CARGA
D-2	0.0	0.0	0.000	0.000	8.529	
D-2	0.2	0.2	0.238	0.238	8.414	ESTATICA
D-2	0.2	0.4	0.161	0.399	8.337	ESTATICA
D-2	0.2	0.6	0.163	0.562	8.258	ESTATICA
D-2	0.2	0.8	0.141	0.703	8.191	ESTATICA
D-2	+ 0.0299		0.097	0.800	8.144	DINAMICA(*)
D-2	0.2	1.0	0.165	0.965	8.065	ESTATICA
D-2	0.2	1.2	0.705	1.670	7.726	ESTATICA
D-2	0.2	1.4	0.979	2.649	7.255	ESTATICA
E-2	0.0	0.0	0.000	0.000	6.910	
E-2	0.2	0.2	0.217	0.217	6.824	ESTATICA
E-2	0.2	0.4	0.159	0.376	6.760	ESTATICA
E-2	0.2	0.6	0.158	0.534	6.697	ESTATICA
E-2	0.2	0.8	0.183	0.717	6.624	ESTATICA
E-2	+ 0.0299		0.090	0.807	6.588	ESTATICA(*)
E-2	0.0299	0.8299	0.023	0.830	6.579	ESTATICA
E-2	0.2	1.0299	0.263	1.093	6.474	ESTATICA
E-2	0.2	1.2299	0.680	1.773	6.203	ESTATICA
E-2	0.2	1.4299	0.984	2.757	5.810	ESTATICA
E-2	0.3	1.7299	1.265	4.022	5.305	ESTATICA
E-2	0.3	2.0299	1.079	5.101	4.874	ESTATICA
D-3	0.0	0.0	0.000	0.000	8.852	
D-3	0.2	0.2	0.138	0.138	8.745	ESTATICA
D-3	0.2	0.4	0.107	0.245	8.662	ESTATICA
D-3	0.2	0.6	0.107	0.352	8.579	ESTATICA
D-3	0.2	0.8	0.058	0.410	8.534	ESTATICA
D-3	+ 0.0299		0.080	0.490	8.472	DINAMICA(*)
D-3	0.2	1.0	0.077	0.567	8.413	ESTATICA
D-3	0.2	1.2	0.347	0.914	8.143	ESTATICA
D-3	0.2	1.4	0.560	1.474	7.709	ESTATICA
D-3	+ 0.0269		0.532	2.006	7.296	DINAMICA(*)

(*) A los 12 días de haber aplicado el incremento de esfuerzo vertical, $\Delta \bar{v}$

T A B L A 3
COMPRESIBILIDAD Y DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES

MUESTRA	Δv , EN KG/CM ²	v , EN KG/CM ²	e	E_z , EN %	ESPEJOR INICIAL, EN CM X 10 ⁻¹	DIAMETRO DEL ANILLO EN CM X 10 ⁻¹
E-0	0.0	0.0	7.393	0.000	19.82	80.50
E-0	0.2	0.2	7.273	1.433		
E-0	0.2	0.4	7.201	2.291		
E-0	0.2	0.6	7.129	3.148		
E-0	0.2	0.8	7.047	4.117		
E-0	0.2	1.0	6.943	5.363		
E-0	0.2	1.2	6.764	7.497		
E-0	0.2	1.4	6.425	11.529		
E-0	0.3	1.7	5.799	18.986		
E-0	0.3	2.0	5.301	24.924		
E-0	- 0.3	1.7	5.317	24.733		
E-0	- 0.3	1.4	5.346	24.390		
E-0	- 0.2	1.2	5.373	24.062		
E-0	- 0.2	1.0	5.411	23.613		
E-0	- 0.2	0.8	5.452	23.128		
E-0	- 0.2	0.6	5.516	22.361		
E-0	- 0.2	0.4	5.601	21.347		
E-0	- 0.2	0.2	5.677	20.439		
E-0	- 0.2	0.0	5.915	17.614		
D-1	0.0	0.0	6.762	0.000	19.82	80.50
D-1	0.2	0.2	6.735	0.348		
D-1	0.2	0.4	6.681	1.044		
D-1	0.2	0.6	6.620	1.837		
D-1	0.2	0.8	6.570	2.482		
D-1	0.2	1.0	6.486	3.562		
D-1	0.2	1.2	6.296	6.004		
D-1	0.2	1.4	5.876	11.413		
D-1	± 0.0269		5.507	16.171 (*)		
D-1	- 0.2	1.2	5.520	16.009		
D-1	- 0.4	0.8	5.580	15.227		
D-1	- 0.4	0.4	5.732	13.274		
D-1	- 0.4	0.0	6.485	3.577		

---CONTINUA EN LA SIGUIENTE HOJA

$$E_z = \frac{\delta}{\text{espesor inicial}} \times 100, \text{ deformación vertical unitaria en porcentaje.}$$

(*) A los 12 días de haber aplicado el incremento de esfuerzo vertical, Δv

T A B L A 3
 COMPRESIBILIDAD Y DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES
 (CONTINUACION)

MUESTRA	Δv , EN KG/CM ²	v , EN KG/CM ²	e	ϵ_z , EN %	ESPEJOR INICIAL, EN CM X 10 ⁻¹	DIAMETRO DEL ANILLO EN CM X 10 ⁻¹
E-1	0.0	0.0	6.921	0.000	19.82	80.50
E-1	0.2	0.2	6.848	0.918		
E-1	0.2	0.4	6.788	1.675		
E-1	0.2	0.6	6.725	2.467		
E-1	0.2	0.8	6.653	3.385		
E-1	0.2	1.0	6.558	4.576		
E-1	0.2	1.2	6.393	6.665		
E-1	0.2	1.4	6.044	11.065		
E-1	0.0269	1.4269	5.629	16.307 (*)		
E-1	- 0.2269	1.2	5.644	16.115		
E-1	- 0.4	0.8	5.713	15.242		
E-1	- 0.4	0.4	5.883	13.098		
E-1	- 0.4	0.0	6.533	4.889		
D-2	0.0	0.0	8.529	0.000	19.82	80.50
D-2	0.2	0.2	8.414	1.201		
D-2	0.2	0.4	8.337	2.013		
D-2	0.2	0.6	8.258	2.836		
D-2	0.2	0.8	8.191	3.547		
D-2	+ 0.0299		8.144	4.036 (*)		
D-2	0.2	1.0	8.065	4.869		
D-2	0.2	1.2	7.726	8.426		
D-2	0.2	1.4	7.255	13.365		
D-2	- 0.4	1.0	7.314	12.750		
D-2	- 0.4	0.6	7.429	11.539		
D-2	- 0.4	0.2	7.824	7.392		
D-2	- 0.2	0.0	8.461	0.706		

---CONTINUA EN LA SIGUIENTE HOJA

(*) A los 12 días de haber aplicado el incremento de esfuerzo vertical, Δv

T A B L A 3
 COMPRESIBILIDAD Y DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES
 (CONTINUACION)

MUESTRA	Δv , EN KG/CM ²	v , EN KG/CM ²	e	ϵ_z , EN %	ESPEJOR INICIAL, EN CM X 10 ⁻¹	DIAMETRO DEL ANILLO EN CM X 10 ⁻¹
E-2	0.0	0.0	6.910	0.000	19.82	80.50
E-2	0.2	0.2	6.824	1.095		
E-2	0.2	0.4	6.760	1.897		
E-2	0.2	0.6	6.697	2.694		
E-2	0.2	0.8	6.624	3.618		
E-2	+ 0.0299		6.588	4.072 (*)		
E-2	0.0299	0.8299	6.579	4.188		
E-2	0.2	1.0299	6.474	5.515		
E-2	0.2	1.2299	6.203	8.946		
E-2	0.2	1.4299	5.810	13.910		
E-2	0.3	1.7299	5.305	20.293		
E-2	0.3	2.0299	4.874	25.737		
E-2	- 0.6	1.4299	4.912	25.262		
E-2	- 0.4	1.0299	4.951	24.763		
E-2	- 0.4299	0.6	5.049	23.532		
E-2	- 0.4	0.2	5.317	20.146		
E-2	- 0.2	0.0	6.034	11.075		
D-3	0.0	0.0	8.852	0.000	12.70	80.50
D-3	0.2	0.2	8.745	1.087		
D-3	0.2	0.4	8.662	1.929		
D-3	0.2	0.6	8.579	2.772		
D-3	0.2	0.8	8.534	3.228		
D-3	+ 0.0299		8.472	3.858 (*)		
D-3	0.2	1.0	8.413	4.465		
D-3	0.2	1.2	8.143	7.197		
D-3	0.2	1.4	7.709	11.606		
D-3	+ 0.0269		7.296	15.795 (*)		
D-3	- 0.2	1.2	7.315	15.606		
D-3	- 0.2	1.0	7.340	15.346		
D-3	- 0.4	0.6	7.434	14.402		
D-3	- 0.4	0.2	7.700	11.701		
D-3	- 0.2	0.0	8.248	6.134		

(*) A los 12 días de haber aplicado el incremento de esfuerzo vertical, Δv

T A B L A 4

EFEECTO DE LA SECUENCIA DE VIBRACIONES ARMONICAS E INCREMENTOS
ESTATICOS DE LOS ENSAYES

MUESTRA	Δt , EN MIN.	\bar{V} , EN KG/CM ²	AL TERMINAR Δt		A LAS 24 HORAS	
			$\Delta \bar{S}$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %	$\Delta \bar{S}$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %
D-1		1.4				
D-1	1	+ 0.0269	0.010	0.050	0.280	1.412
D-1	1	+ 0.0269	0.007	0.036	0.160	0.808
D-1	1	+ 0.0269	0.006	0.030	0.117	0.590
D-1	5	+ 0.0269	0.005	0.025	0.094	0.474
D-1	5	+ 0.0269	0.003	0.015	0.066	0.333
D-1	5	+ 0.0269	0.004	0.020	0.041	0.207
D-1	10	+ 0.0269	0.006	0.030	0.041	0.207
D-1	10	+ 0.0269	0.004	0.020	0.031	0.156
D-1	10	+ 0.0269	0.006	0.031	0.031	0.157
D-1	20	+ 0.0269	0.008	0.040	0.029	0.146
D-1	20	+ 0.0269	0.008	0.040	0.022	0.111
D-1	20	+ 0.0269	0.008	0.040	0.031	0.157
E-1		1.4				
E-1	1	1.4269	0.003	0.015	0.281	1.417
E-1	1	1.4269	0.0002	0.001	0.159	0.803
E-1	1	1.4269	0.0001	0.0001	0.116	0.585
E-1	5	1.4269	0.0003	0.001	0.083	0.419
E-1	5	1.4269	0.0006	0.003	0.071	0.358
E-1	5	1.4269	0.0005	0.002	0.059	0.298
E-1	10	1.4269	0.0002	0.001	0.045	0.227
E-1	10	1.4269	0.0003	0.001	0.043	0.216
E-1	10	1.4269	0.0003	0.002	0.050	0.253
E-1	20	1.4269	0.0006	0.001	0.047	0.237
E-1	20	1.4269	0.0006	0.003	0.047	0.237
E-1	20	1.4269	0.0006	0.003	0.038	0.192

----CONTINUA EN LA SIGUIENTE HOJA

NOTA: En la muestra E-1, los valores indicados son equivalentes a los tiempos Δt y a cada 24 horas.

T A B L A 4

EFFECTO DE LA SECUENCIA DE VIBRACIONES ARMONICAS E INCREMENTOS

ESTATICOS DE LOS ENSAYES

(CONTINUACION)

MUESTRA	Δt , EN MIN.	∇ , EN KG/CM ²	AL TERMINAR Δt		A LAS 24 HORAS	
			$\Delta \bar{S}$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %	$\Delta \bar{S}$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %
D-2		0.8				
D-2	1	+ 0.0299	0.008	0.040	0.010	0.050
D-2	1	+ 0.0299	0.001	0.005	0.014	0.071
D-2	1	+ 0.0299	0.001	0.005	0.005	0.025
D-2	5	+ 0.0299	0.003	0.015	0.012	0.061
D-2	5	+ 0.0299	0.001	0.005	0.010	0.050
D-2	5	+ 0.0299	0.001	0.005	0.008	0.041
D-2	10	+ 0.0299	0.003	0.015	0.012	0.060
D-2	10	+ 0.0299	0.001	0.005	0.006	0.030
D-2	10	+ 0.0299	0.001	0.005	0.007	0.036
D-2	20	+ 0.0299	0.001	0.005	0.005	0.025
D-2	20	+ 0.0299	0.001	0.005	0.004	0.020
D-2	20	+ 0.0299	0.001	0.005	0.004	0.020
E-2		0.8				
E-2	1	+ 0.0299	0.005	0.025	0.017	0.085
E-2	1	+ 0.0299	0.002	0.010	0.005	0.026
E-2	1	+ 0.0299	0.005	0.025	0.009	0.045
E-2	5	+ 0.0299	0.006	0.030	0.008	0.040
E-2	5	+ 0.0299	0.007	0.036	0.009	0.046
E-2	5	+ 0.0299	0.007	0.035	0.008	0.040
E-2	10	+ 0.0299	0.007	0.035	0.009	0.046
E-2	10	+ 0.0299	0.007	0.035	0.006	0.030
E-2	10	+ 0.0299	0.006	0.030	0.004	0.020
E-2	20	+ 0.0299	0.007	0.035	0.007	0.035
E-2	20	+ 0.0299	0.008	0.041	0.005	0.026
E-2	20	+ 0.0299	0.006	0.030	0.003	0.015

-----CONTINUA EN LA SIGUIENTE HOJA

T A B L A 4

EFECTO DE LA SECUENCIA DE VIBRACIONES ARMONICAS E INCREMENTOS

ESTATICOS DE LOS ENSAYES

(CONTINUACION)

MUESTRA	Δt , EN MIN.	∇ , EN KG/CM ²	AL TERMINAR Δt		A LAS 24 HORAS	
			$\Delta \delta$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %	$\Delta \delta$, EN CM X 10 ⁻¹	$\Delta \epsilon_z$, EN %
D-3		0.8				
D-3	1	+ 0.0299	0.018	0.142	0.025	0.197
D-3	1	+ 0.0299	0.008	0.063	0.014	0.110
D-3	1	+ 0.0299	0.003	0.024	0.006	0.048
D-3	5	+ 0.0299	0.004	0.031	0.007	0.055
D-3	5	+ 0.0299	0.005	0.039	0.007	0.055
D-3	5	+ 0.0299	0.006	0.047	0.007	0.055
D-3	10	+ 0.0299	0.006	0.047	0.006	0.047
D-3	10	+ 0.0299	0.001	0.008	0.001	0.008
D-3	10	+ 0.0299	0.006	0.047	0.006	0.047
D-3	20	+ 0.0299	0.001	0.008	0.001	0.008
D-3	20	+ 0.0299	0.000	0.000	0.000	0.000
D-3	20	+ 0.0299	0.000	0.000	0.000	0.000
D-3		1.4				
D-3	1	+ 0.0269	0.020	0.158	0.164	1.292
D-3	1	+ 0.0269	0.008	0.063	0.103	0.811
D-3	1	+ 0.0269	0.004	0.031	0.062	0.488
D-3	5	+ 0.0269	0.007	0.055	0.037	0.291
D-3	5	+ 0.0269	0.006	0.047	0.033	0.260
D-3	5	+ 0.0269	0.004	0.032	0.025	0.197
D-3	10	+ 0.0269	0.005	0.039	0.022	0.173
D-3	10	+ 0.0269	0.005	0.039	0.022	0.173
D-3	10	+ 0.0269	0.004	0.032	0.023	0.181
D-3	20	+ 0.0269	0.004	0.032	0.018	0.142
D-3	20	+ 0.0269	0.004	0.032	0.016	0.126
D-3	20	+ 0.0269	0.002	0.016	0.007	0.055

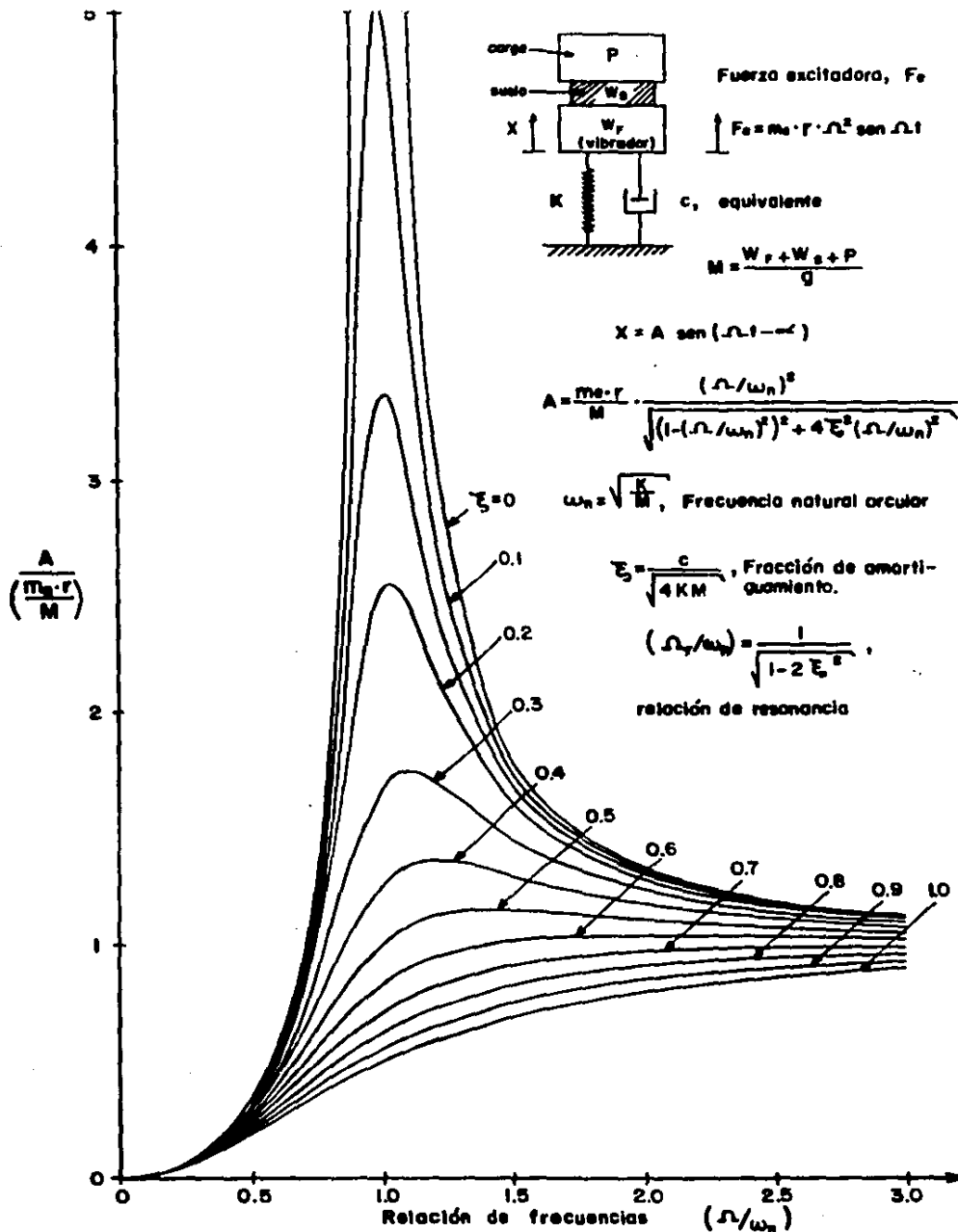


FIG.2 RELACION TEORICA ENTRE LA AMPLITUD Y MASAS CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIAS

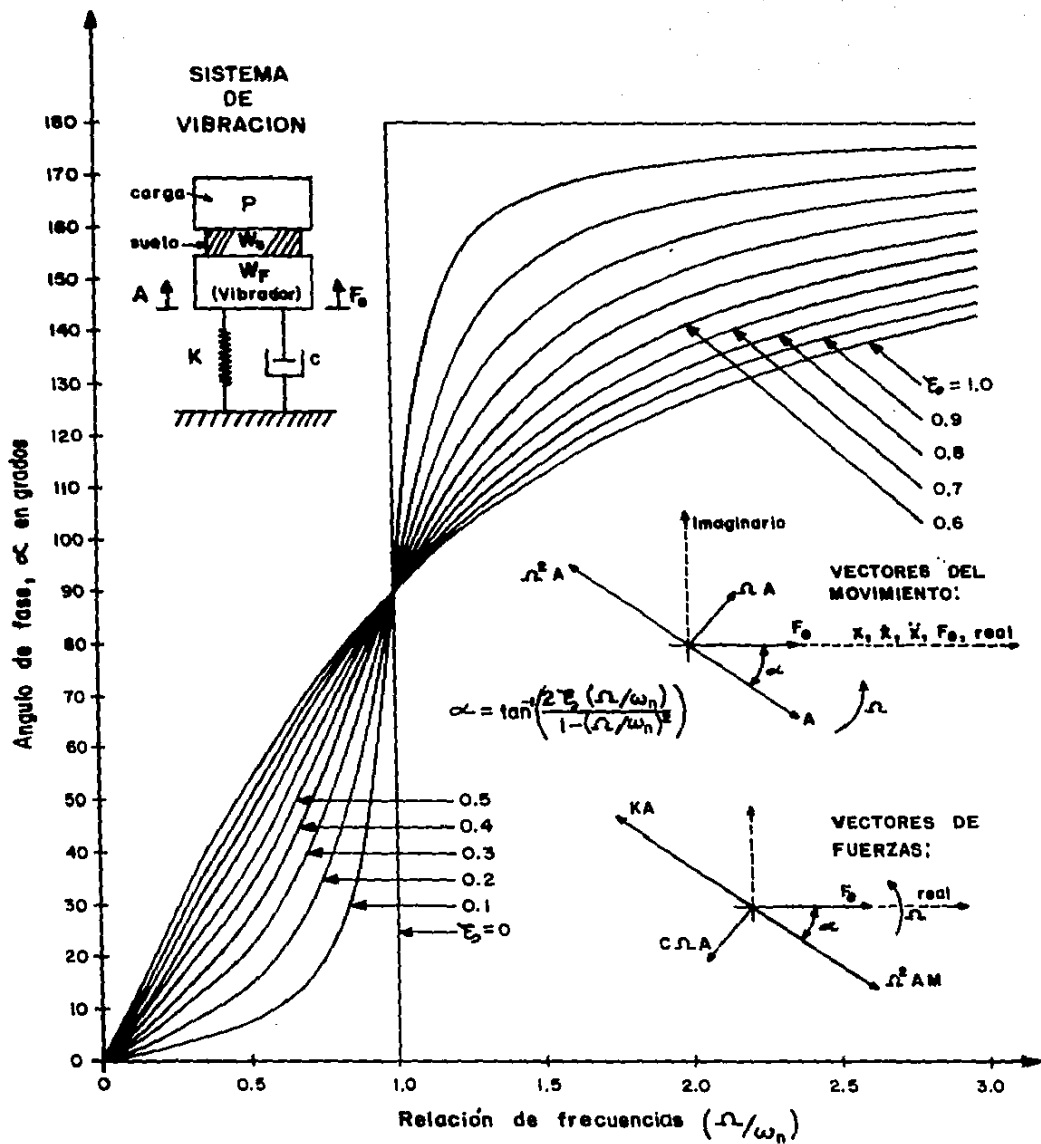


FIG. 3 RELACION TEORICA ENTRE EL ANGULO DE FASE Y LA RELACION DE FRECUENCIAS

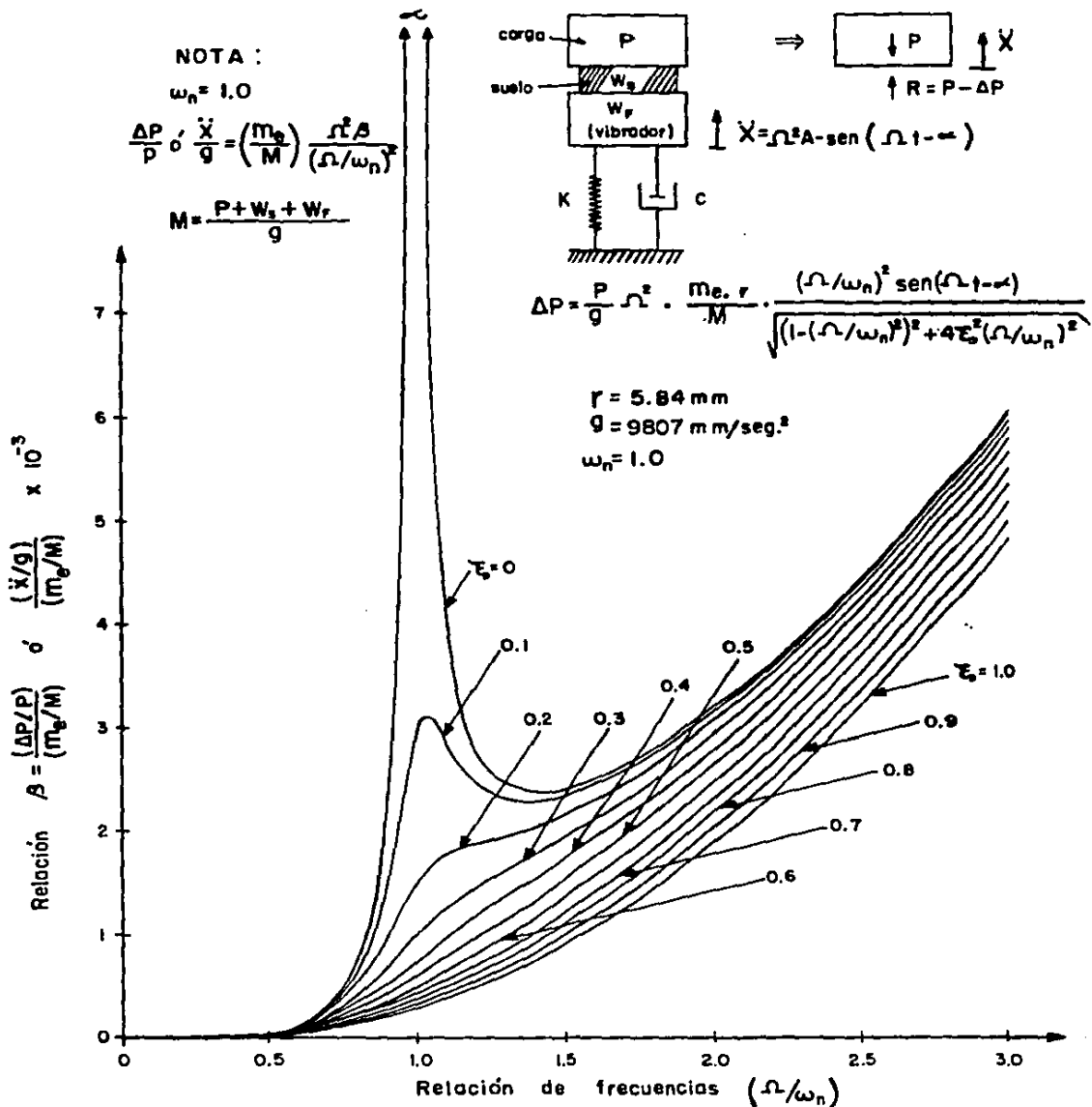


FIG. 4 RELACION TEORICA ENTRE CARGAS (DINAMICA Y ESTATICA) CONTRA RELACION DE FRECUENCIAS

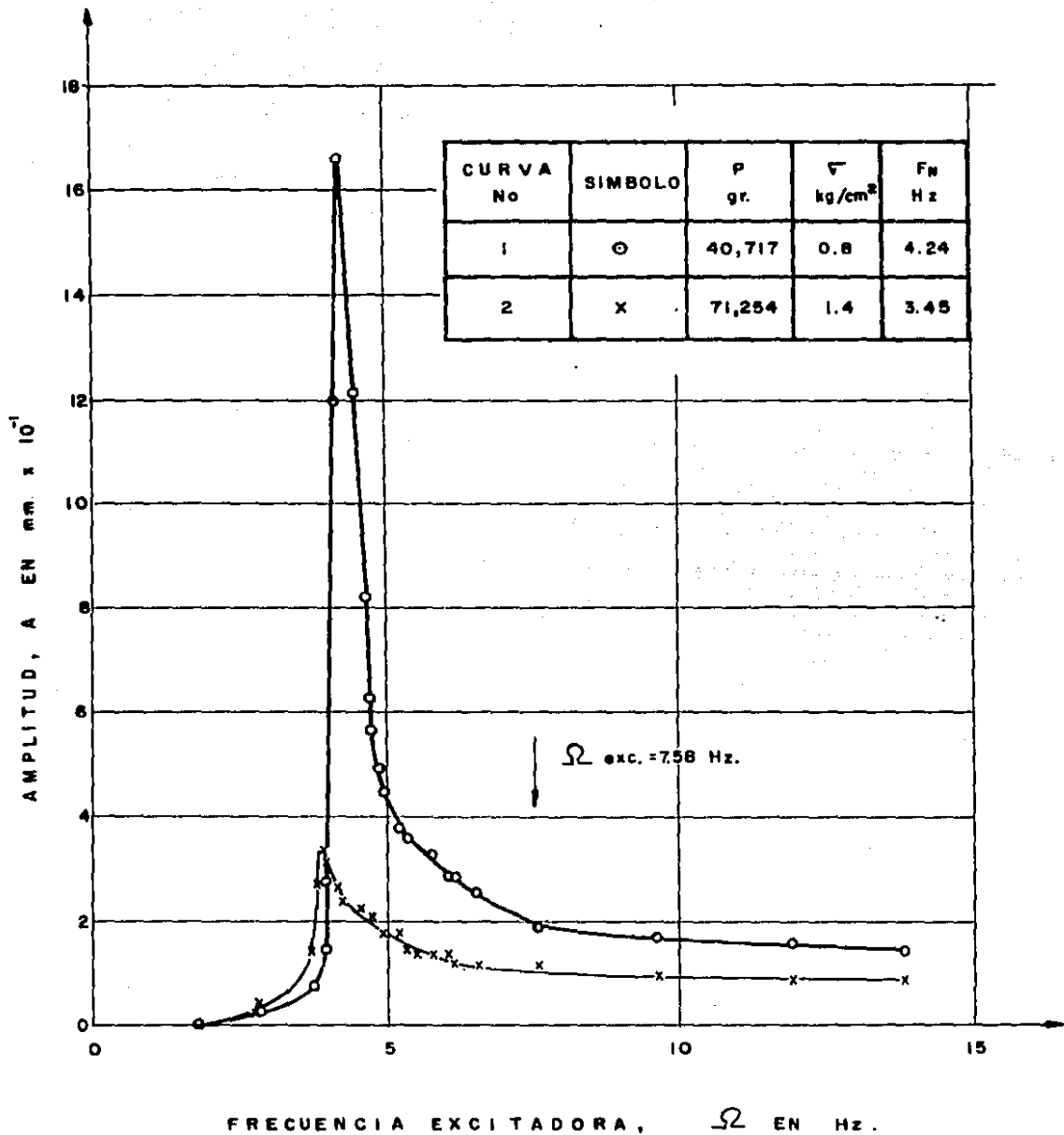


FIG. 5 CURVAS EXPERIMENTALES ENTRE LA FRECUENCIA EXCITADORA Y LA AMPLITUD DE LA MESA VIBRATORIA MINIATURA

CURVA No.	SIMBOLO	P gr.	\bar{V} kg./cm ²	F _N Hz	PARA Ω exc = 7.58 Hz. $\pm \Delta\bar{V}/\bar{V}$ EN %
1	o	40,717.0	0.8	4.24	3.74
2	x	71,254.0	1.4	3.45	1.92

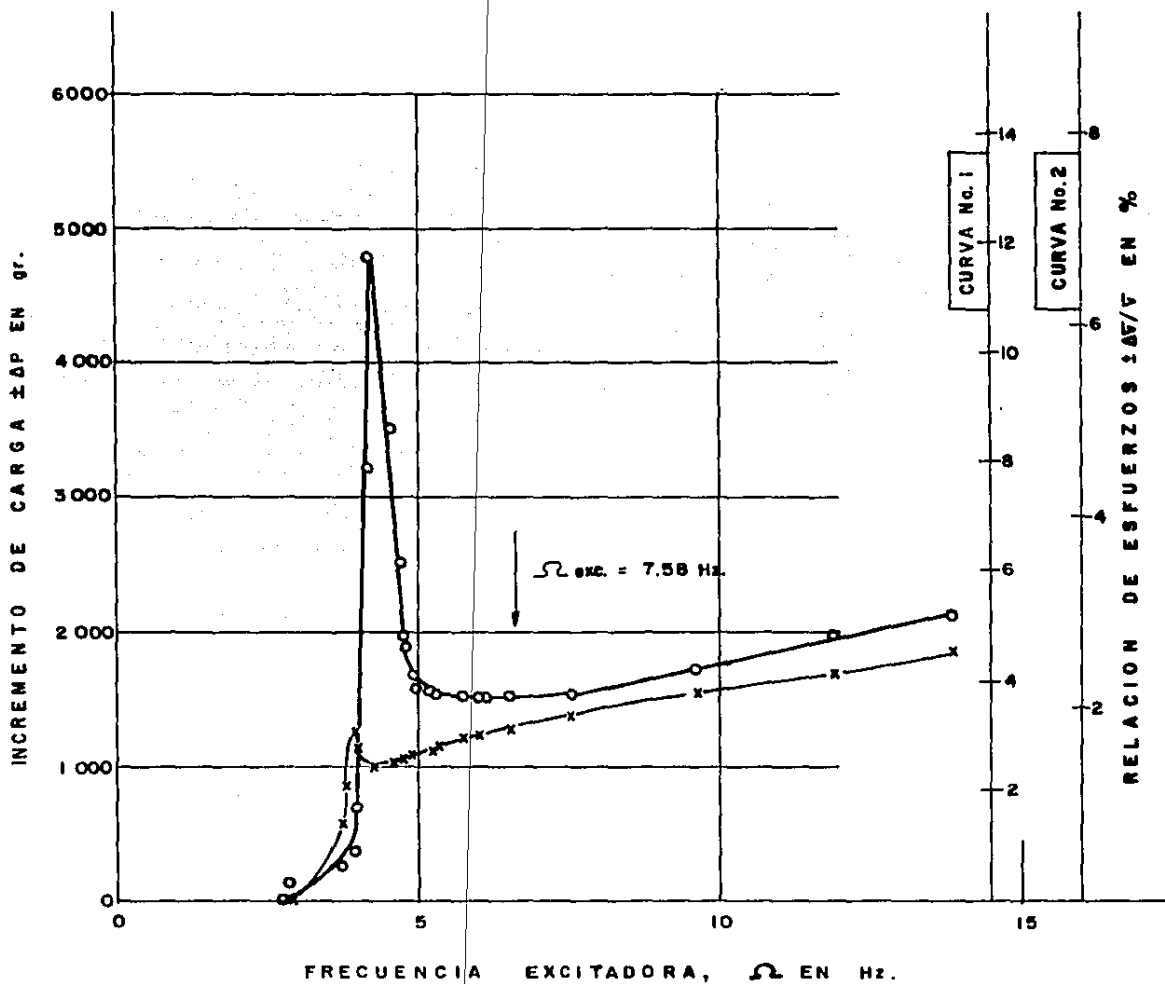
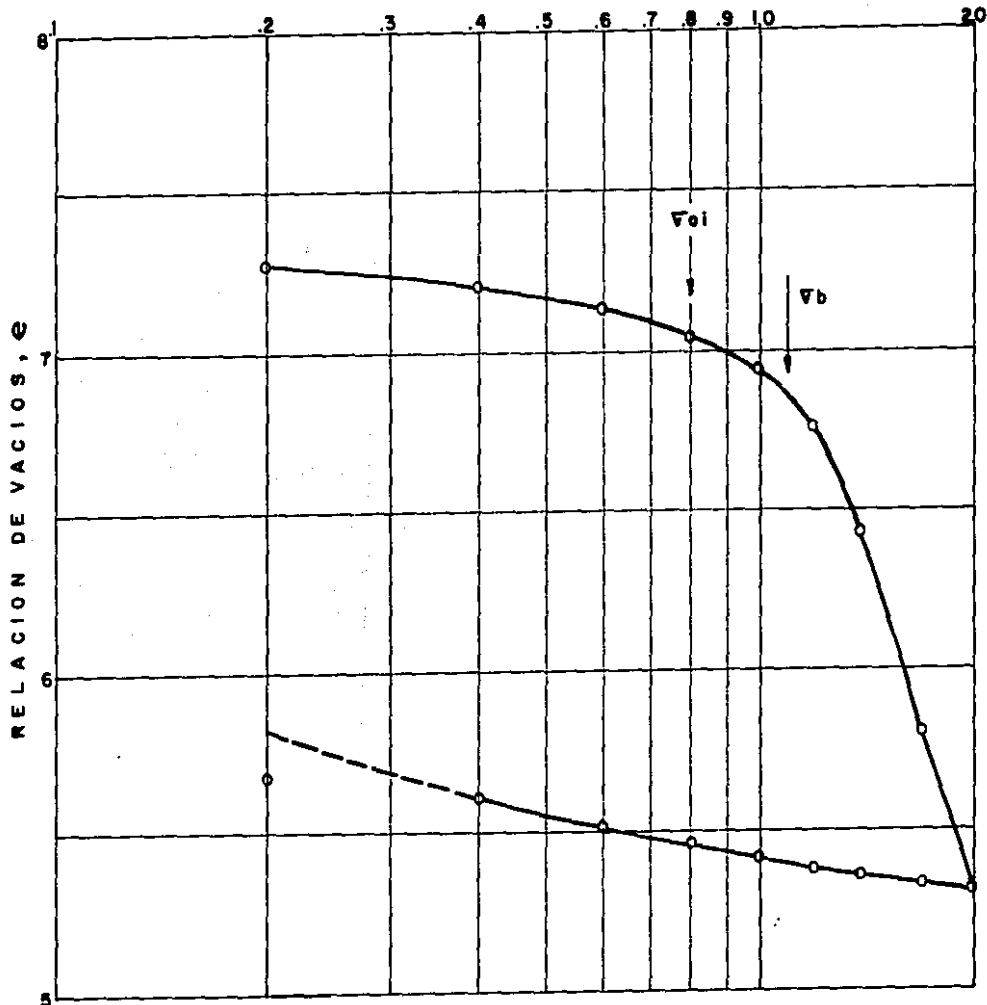


FIG. 6 CURVAS EXPERIMENTALES ENTRE LA FRECUENCIA EXCITADORA Y LA CARGA DINAMICA.

ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO, ∇ , EN Kg./cm²

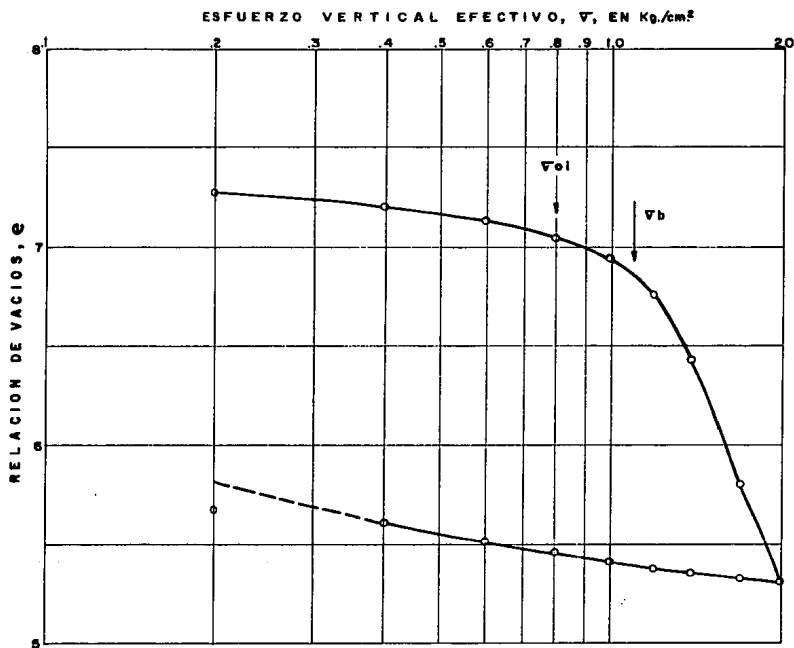


ENSAYE	SIMBOLO	PROF. EN M.	e_0
E - 0	0	9.89	7.393

$\nabla_{01} = 0.8$ Kg./cm², ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO QUE CORRESPONDE A LA PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA.

$\nabla_b = 1.1$ Kg./cm², ESFUERZO CRITICO

FIG. 7 CURVA DE COMPRESIBILIDAD DEL ENSAYE E-0



ENSAYE	SIMBOLO	PROF. EN M.	e
E - 0	0	9.89	7.393

$V_{01} = 0.6 \text{ Kg./cm}^2$, ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO QUE CORRESPONDE A LA PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA.

$V_b = 1.1 \text{ Kg./cm}^2$, ESFUERZO CRITICO

FIG. 7 CURVA DE COMPRESIBILIDAD DEL ENSAYE E - 0

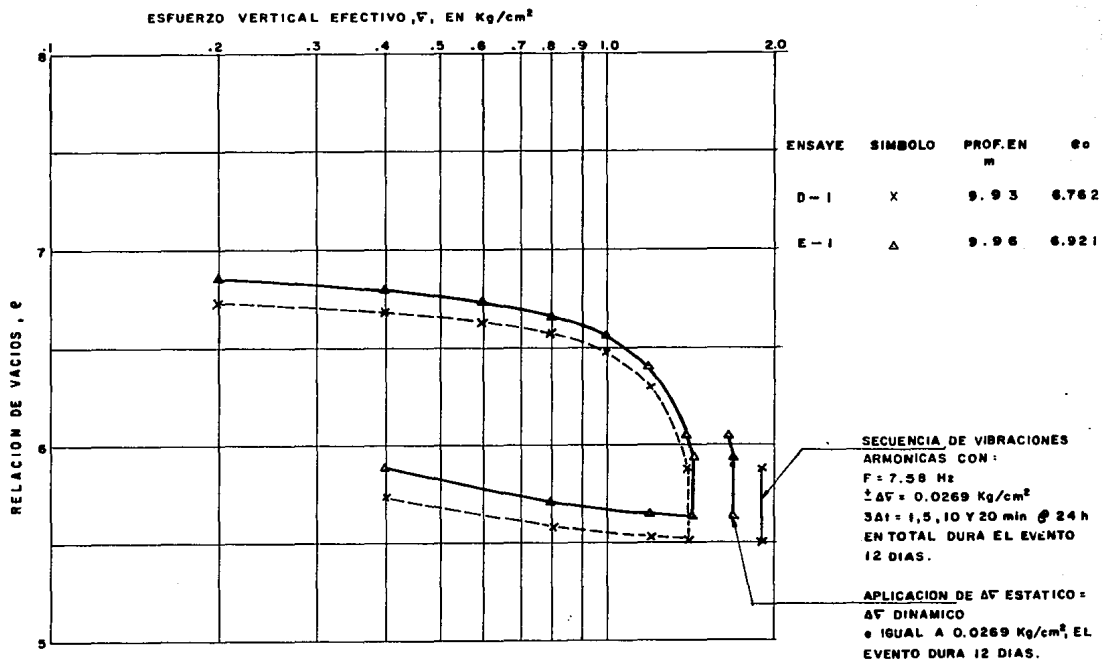


FIG. 8 CURVAS DE COMPRESIBILIDAD DE LOS ENSAYES D-1 Y E-1

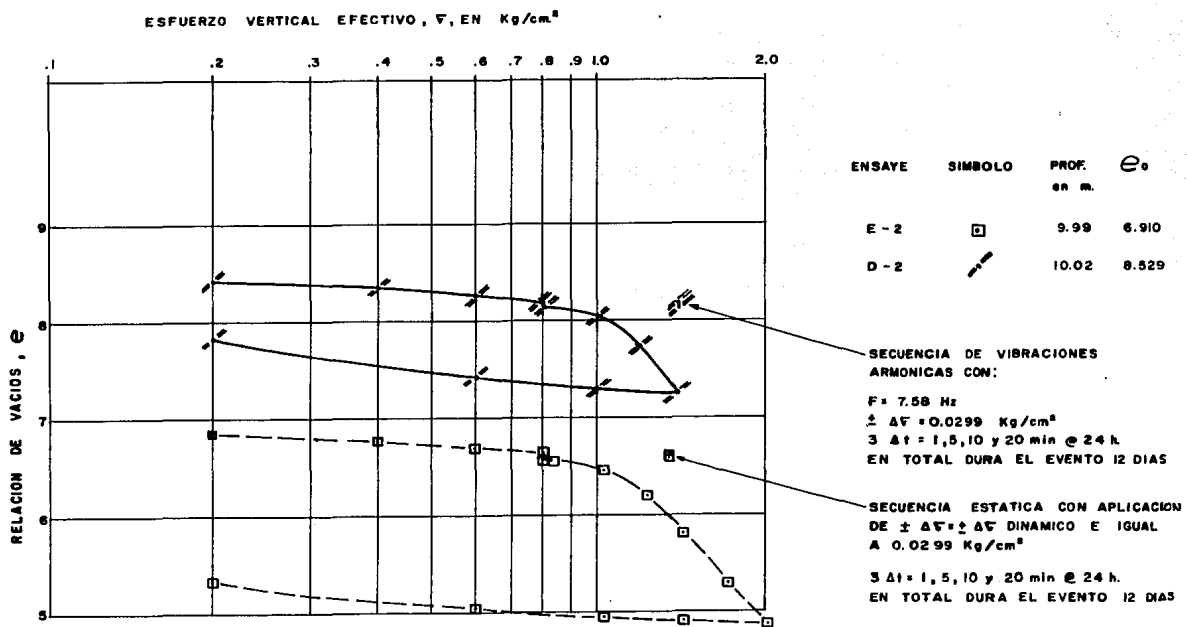


FIG. 9 CURVAS DE COMPRESIBILIDAD DE LOS ENSAYES E-2 y D-2

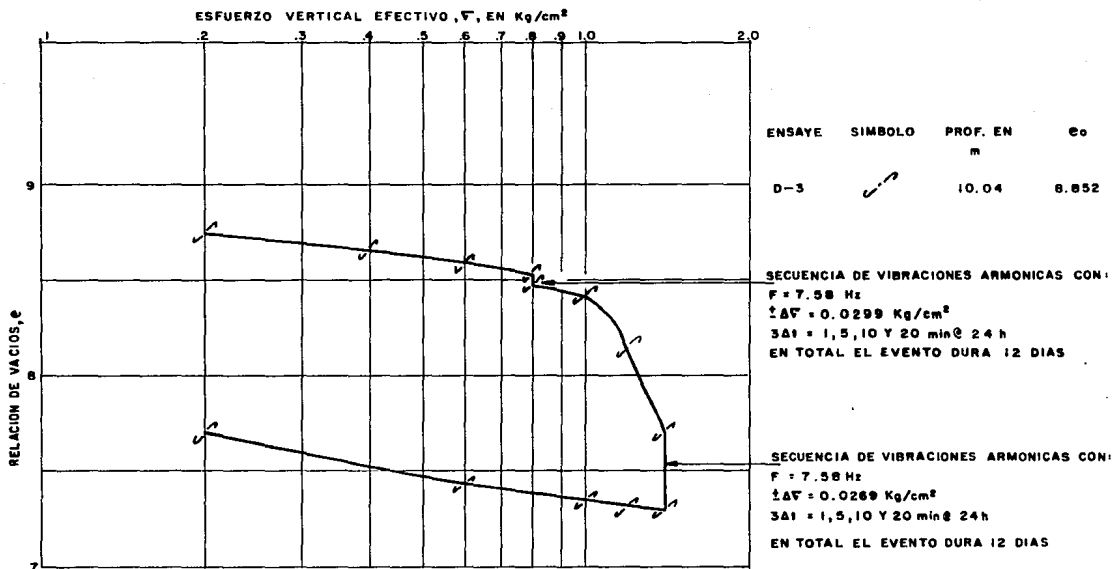


FIG. 10 CURVA DE COMPRESIBILIDAD DEL ENSAYE D-3

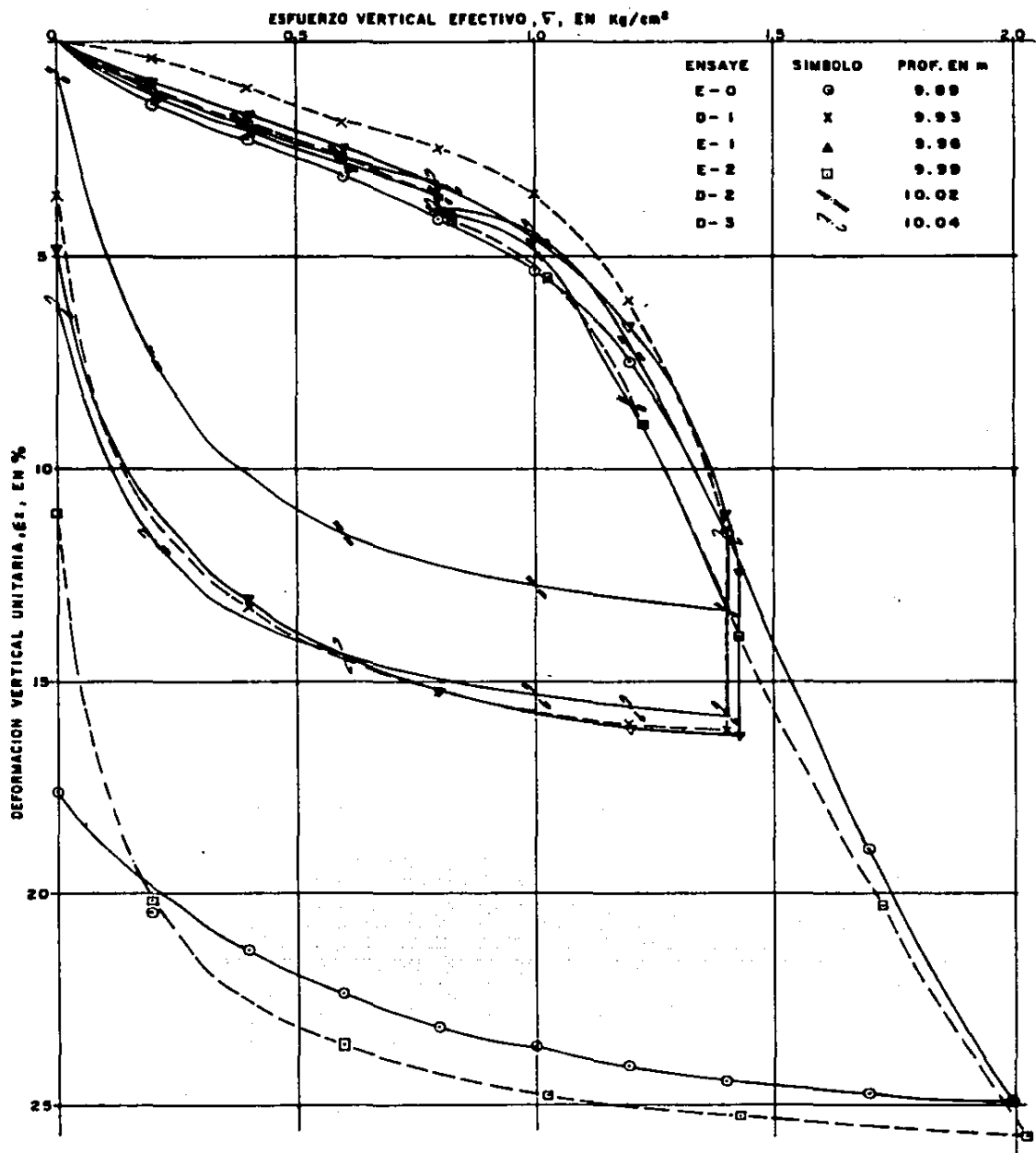


FIG. II CURVAS DE DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE TODOS LOS ENSAYES

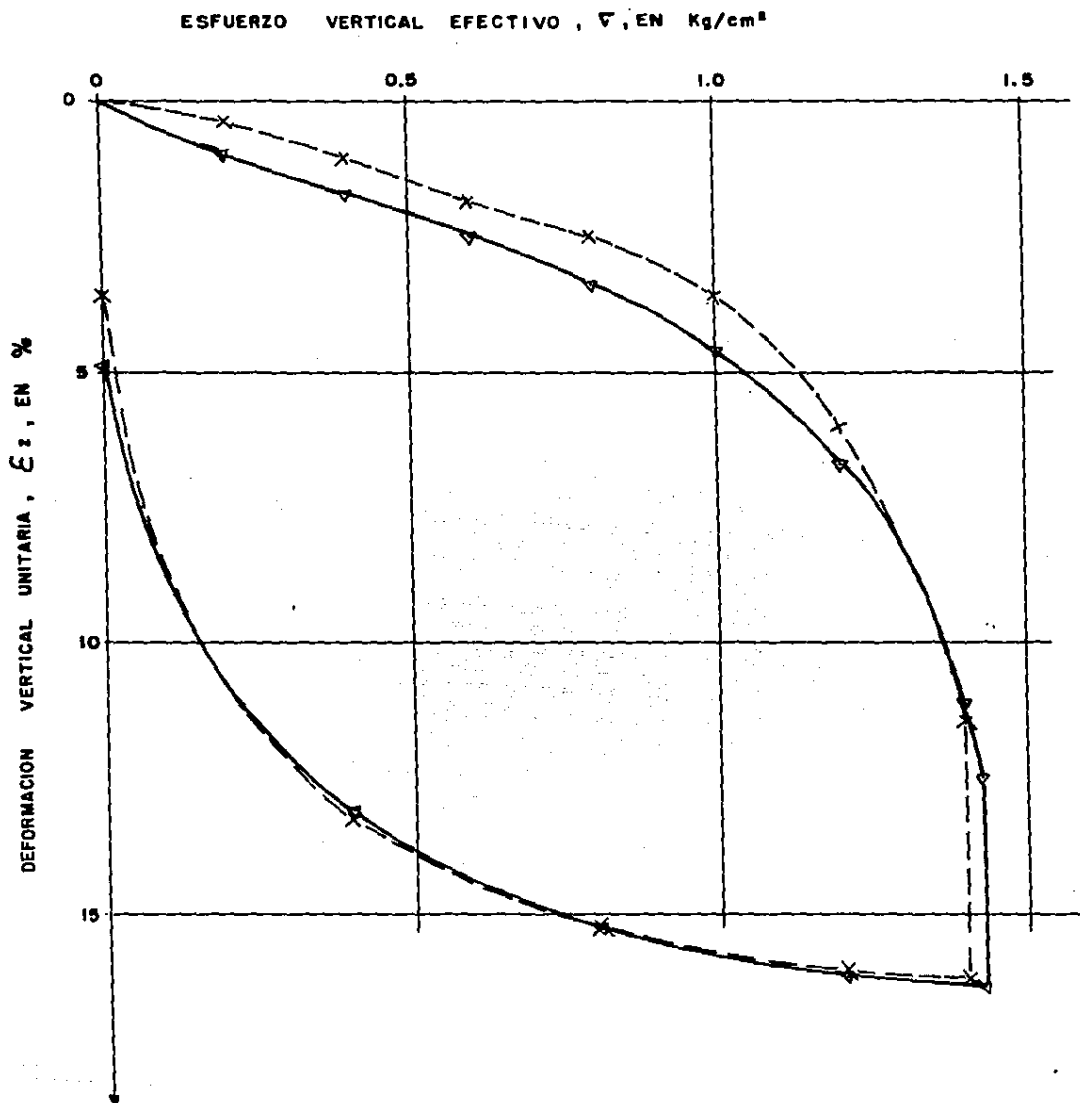
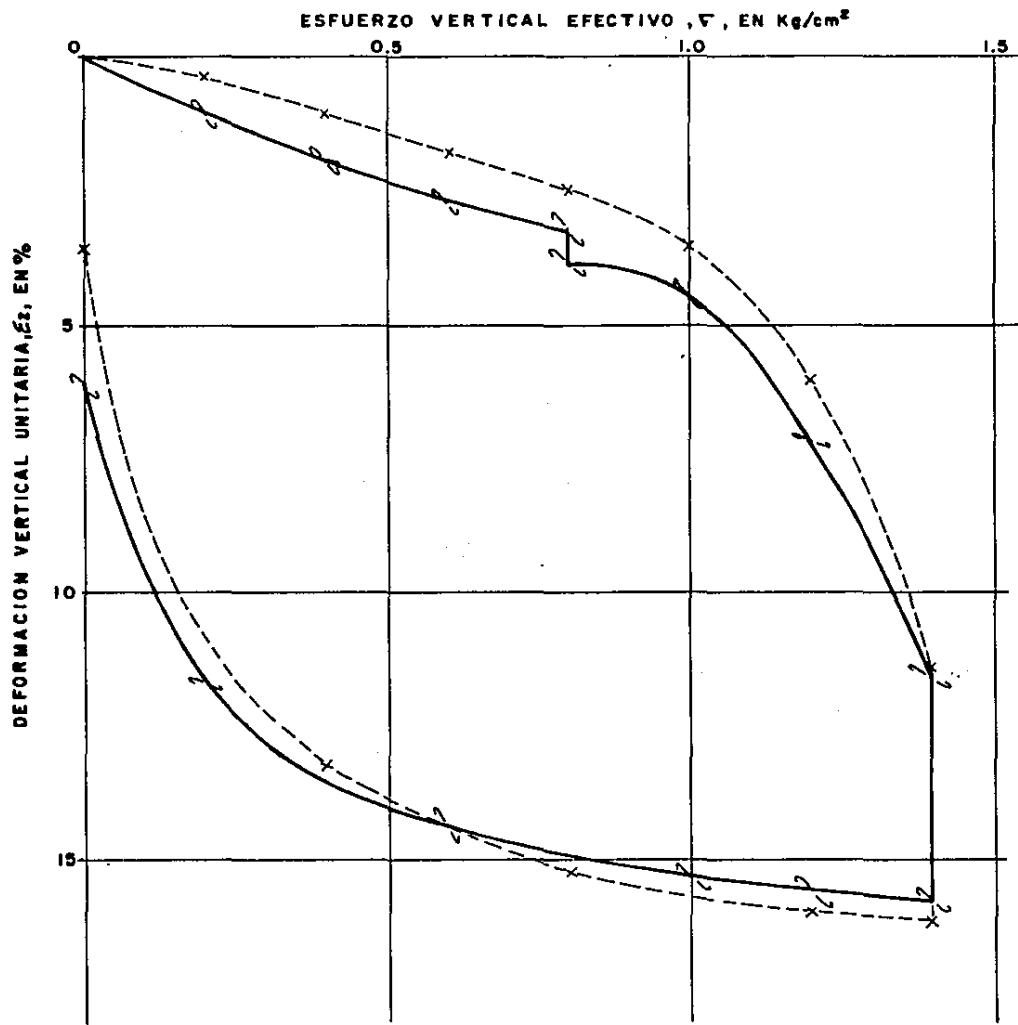


FIG. 12 CURVAS DE DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES D-1 y E-1



ENSAYE	SIMBOLO	PROF. EN m	ALTURA INICIAL EN cm x 10 ⁻¹
D-1	x	9.93	19.82
D-3	~	10.04	12.70

FIG.13 CURVAS DE DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES D-1 y D-3

ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO, σ , EN Kg/cm²

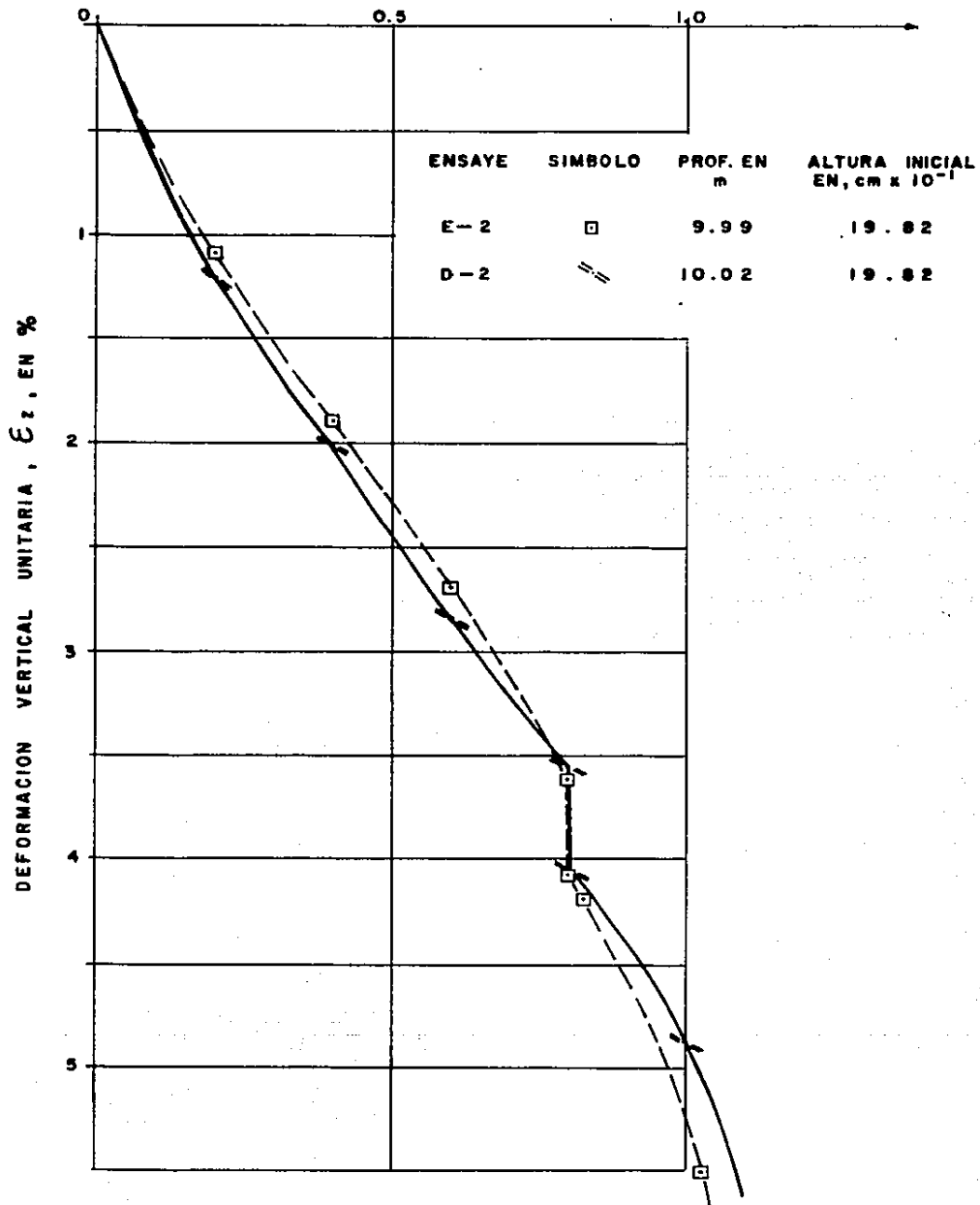


FIG.14 CURVAS DE DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE LOS ENSAYES E-2 y D-2

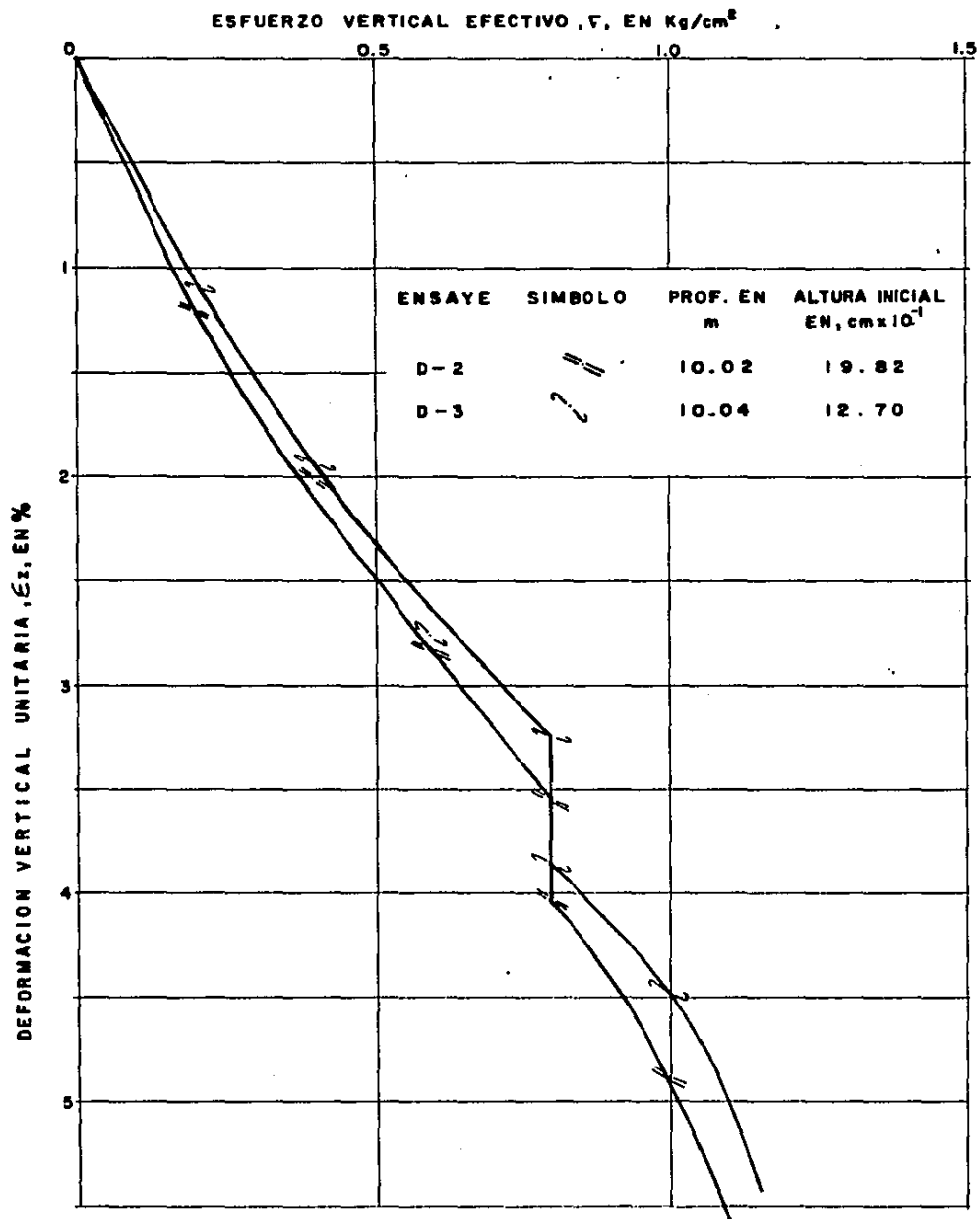


FIG.15 CURVAS DE DEFORMACION VERTICAL UNITARIA DE
LOS ENSAYES D-2 Y D-3

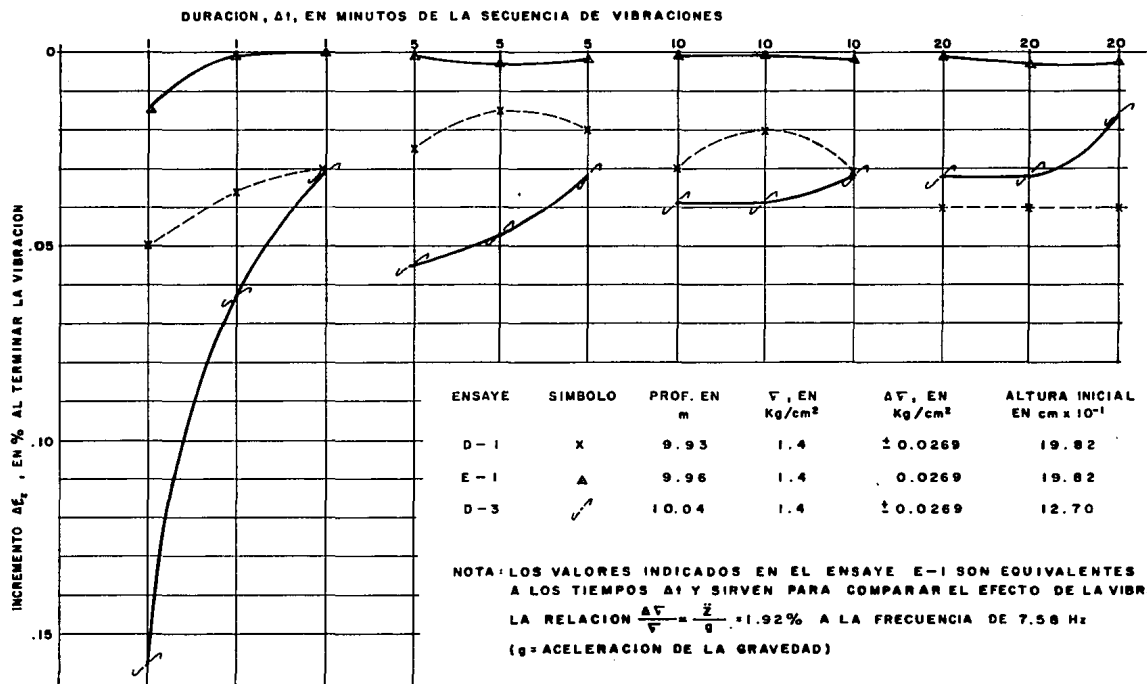


FIG.16 EFECTO AL TERMINAR LA VIBRACION, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO

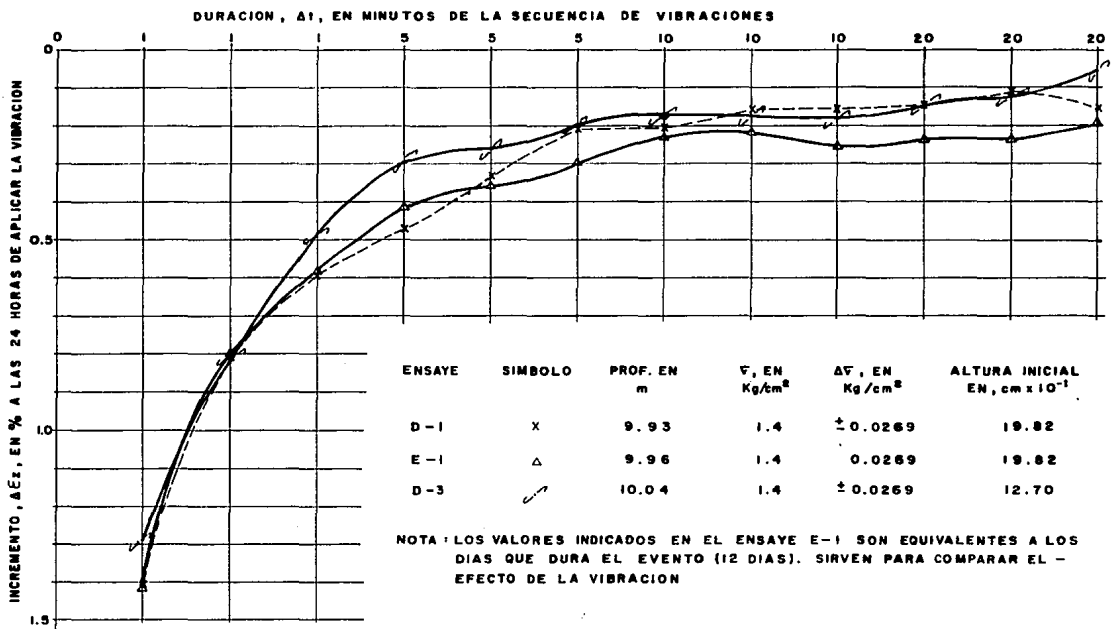


FIG.17 EFECTO A LAS 24 HORAS DE APLICAR LA VIBRACION, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO

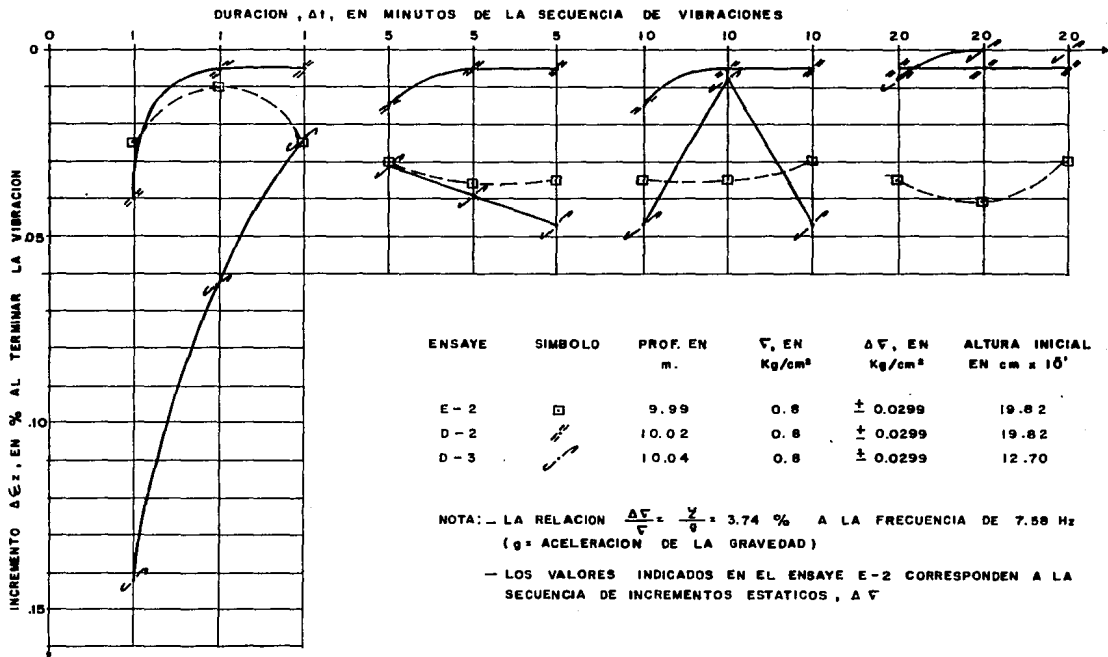


FIG. 18 EFECTO AL TERMINAR LA VIBRACION, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO

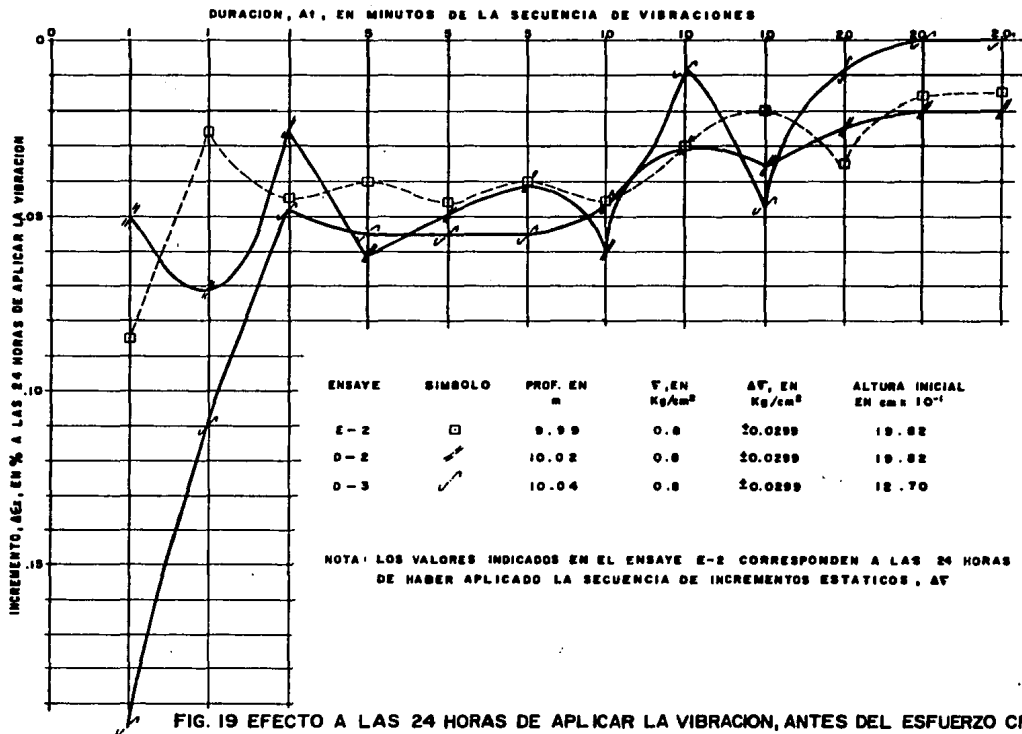


FIG. 19 EFECTO A LAS 24 HORAS DE APLICAR LA VIBRACION, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO

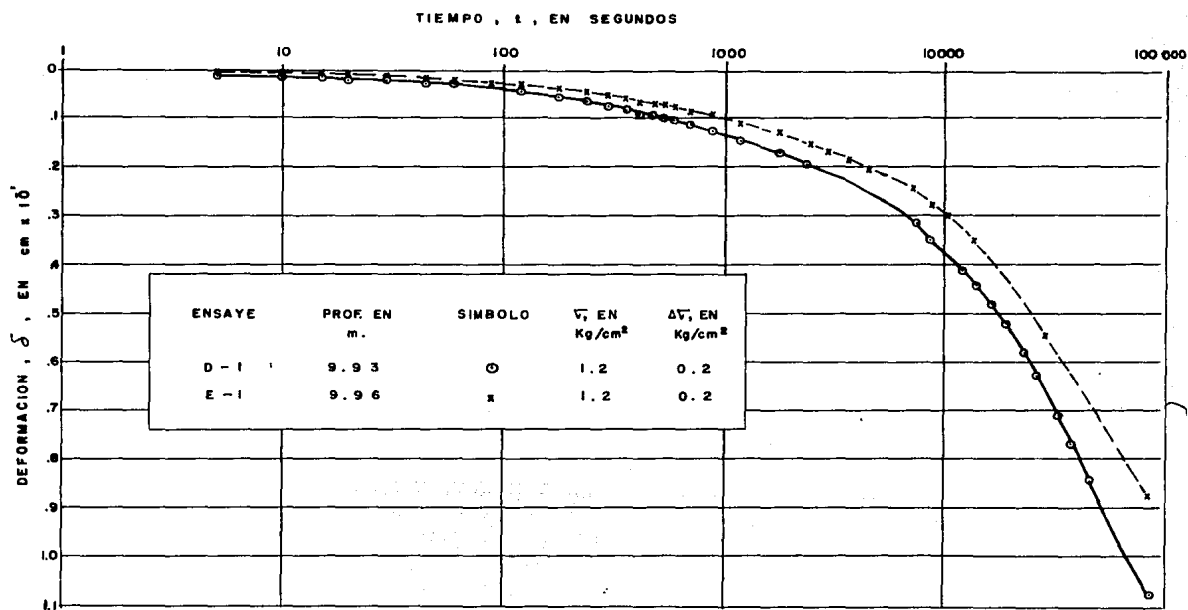


FIG. 20 CURVAS DE CONSOLIDACION, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO EN LOS ENSAYES D-1 y E

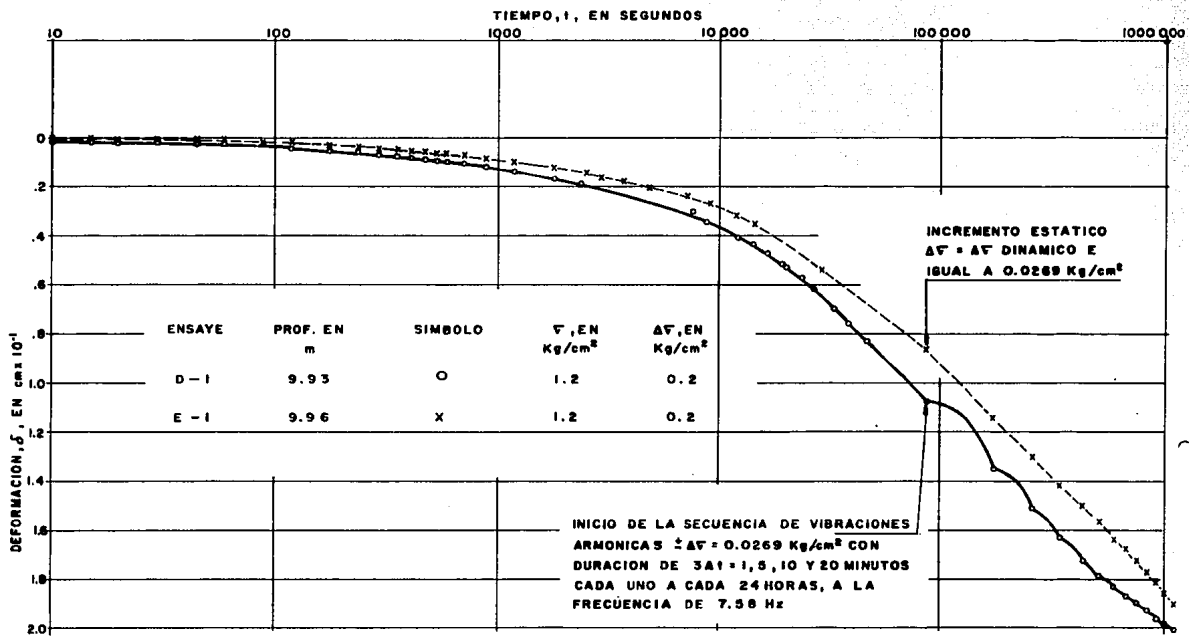


FIG. 21 EFECTO DE LA VIBRACION, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO EN LOS ENSAYES D-1 Y E-1

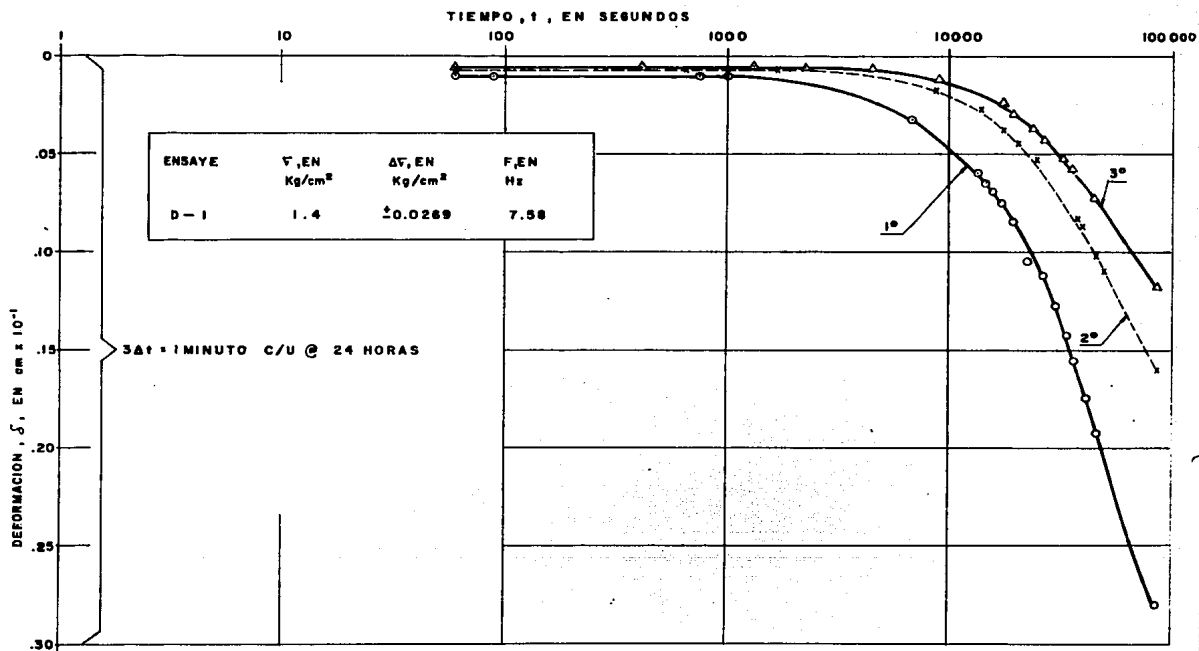


FIG. 22 SECUENCIA DE VIBRACIONES EN EL ENSAYE D-1

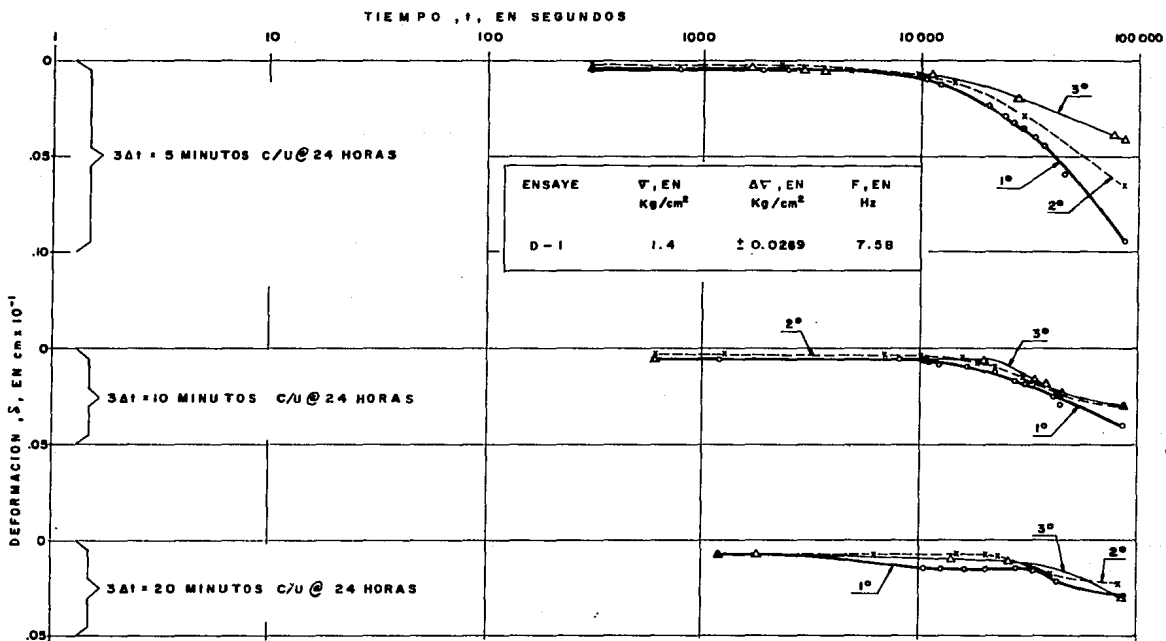
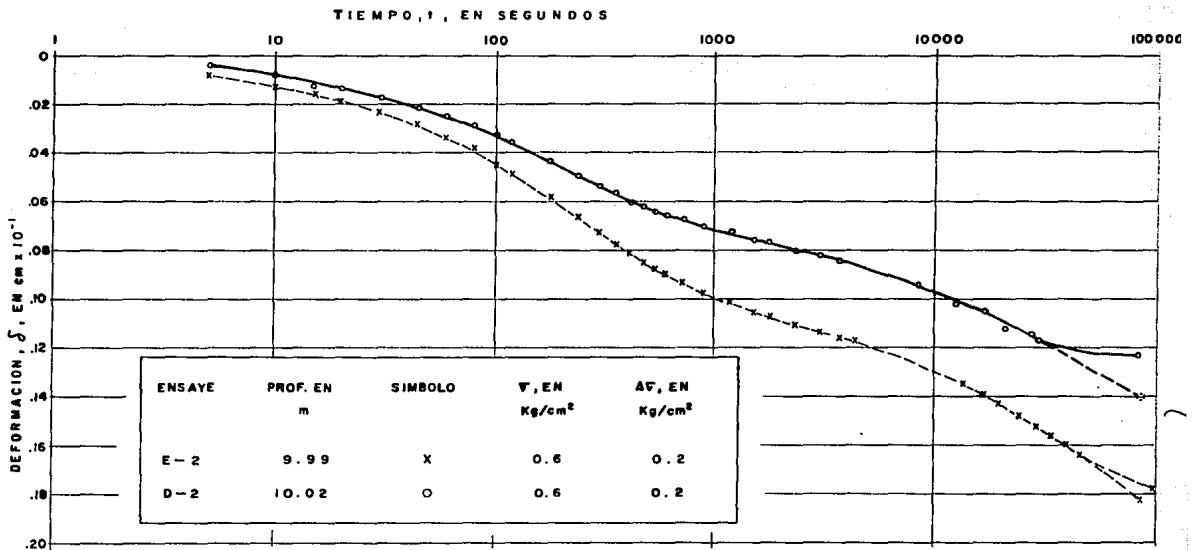


FIG. 23 SECUENCIA DE VIBRACIONES EN EL ENSAYE D-1



NOTA: LOS VALORES X Y O SON INFERIDOS SIN CONSIDERAR EL PROBLEMA DE FRICCION
SUELO - ANILLO CON TEFLON Y GRASA DE SILICON.

FIG. 24 CURVAS DE CONSOLIDACION, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO EN LOS ENSAYES E-2 y D-2

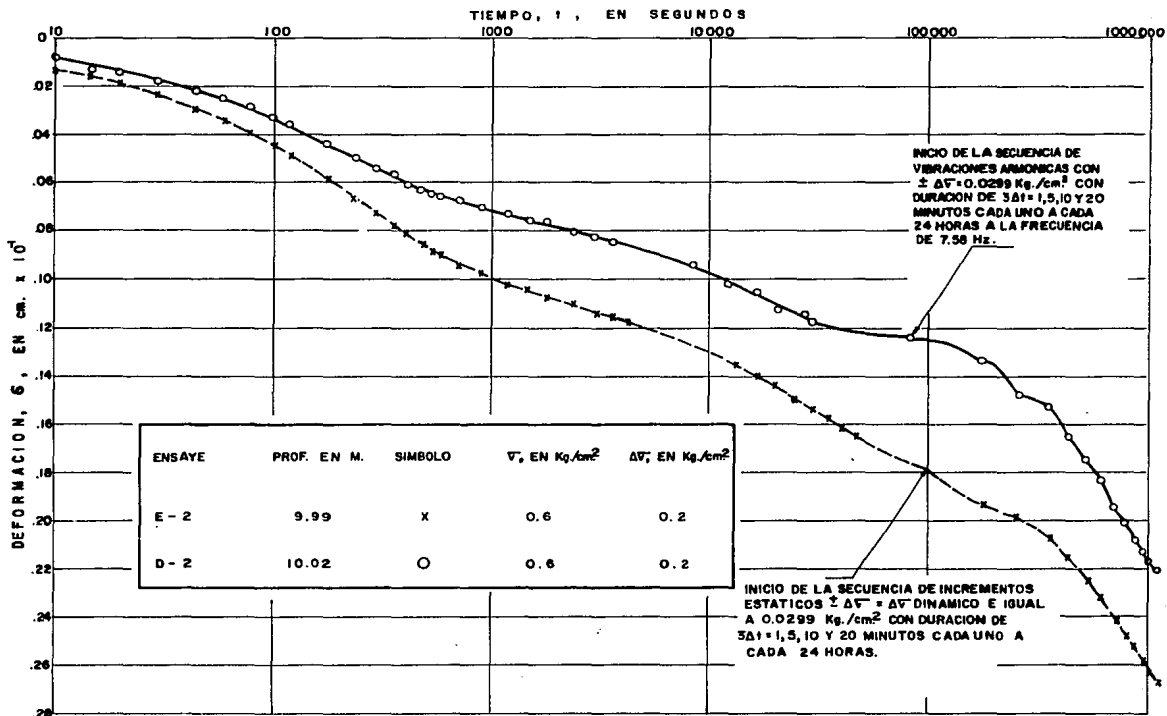


FIG. 25 EFECTO DE LA VIBRACION, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO EN LOS ENSAYES E-2 y D-2

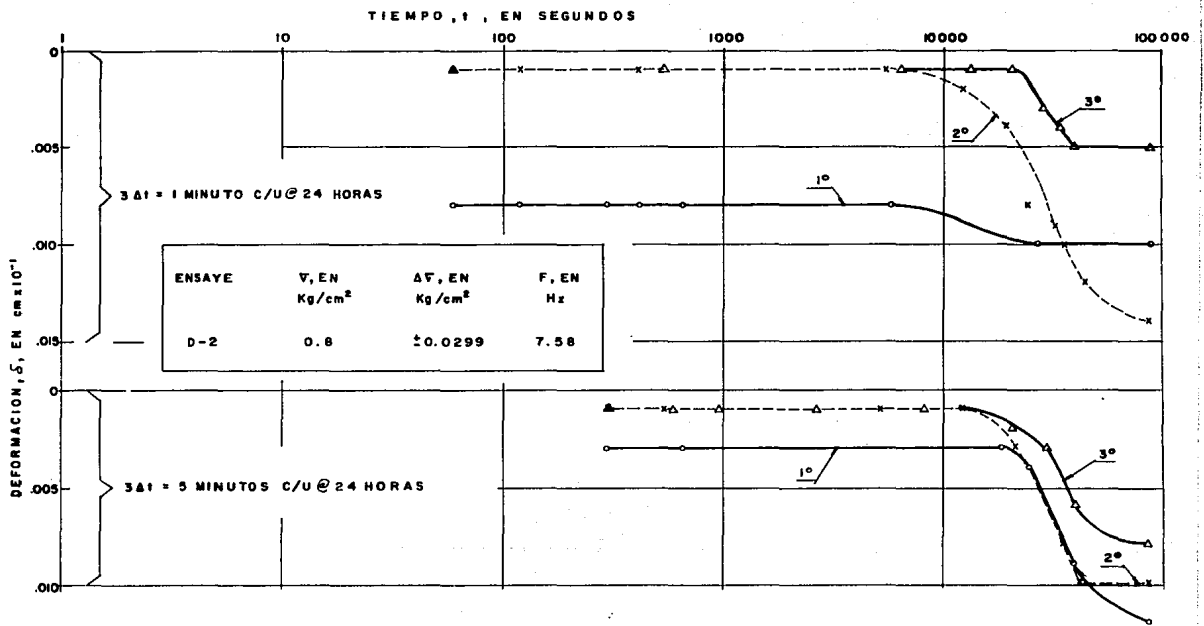


FIG. 26 SECUENCIA DE VIBRACIONES EN EL ENSAYE D-2

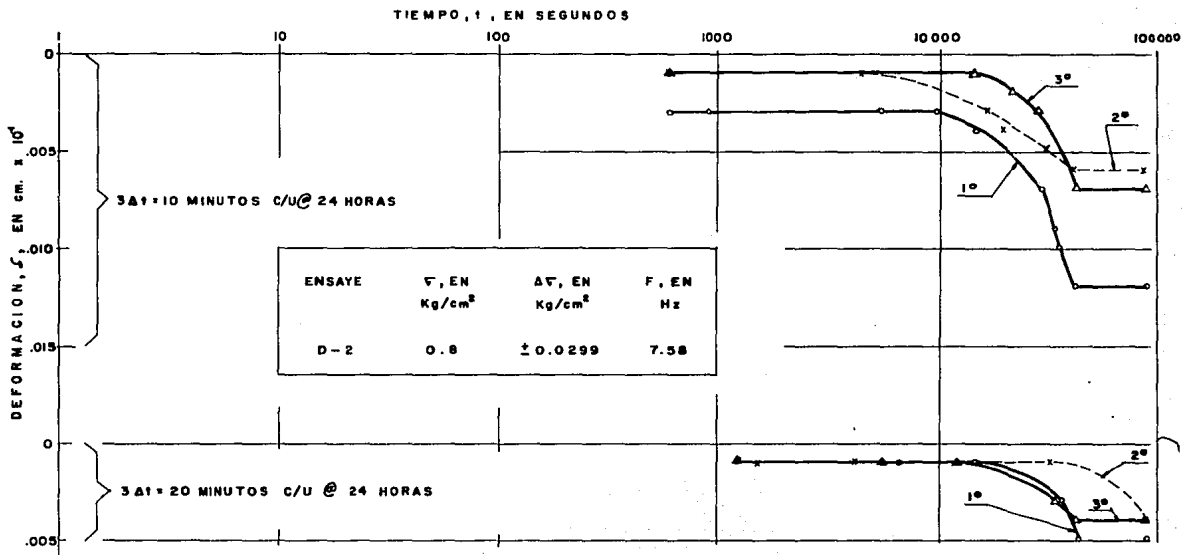


FIG. 27 SECUENCIA DE VIBRACIONES EN EL ENSAYE D-2

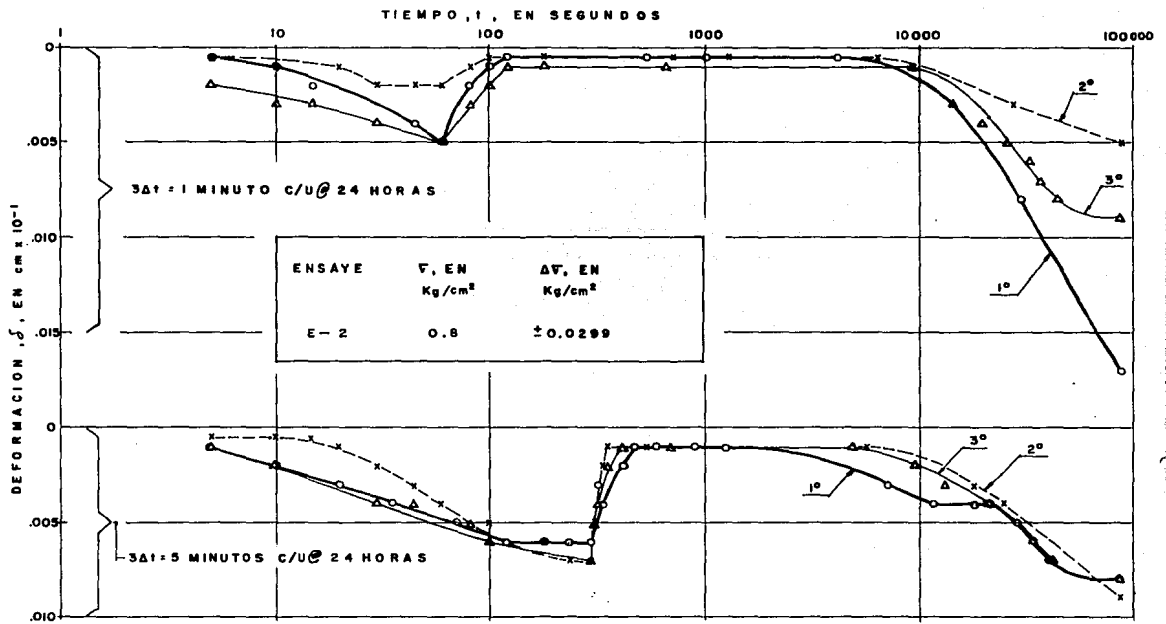


FIG. 28 SECUENCIA DE INCREMENTOS ESTATICOS EN EL ENSAYE E-2

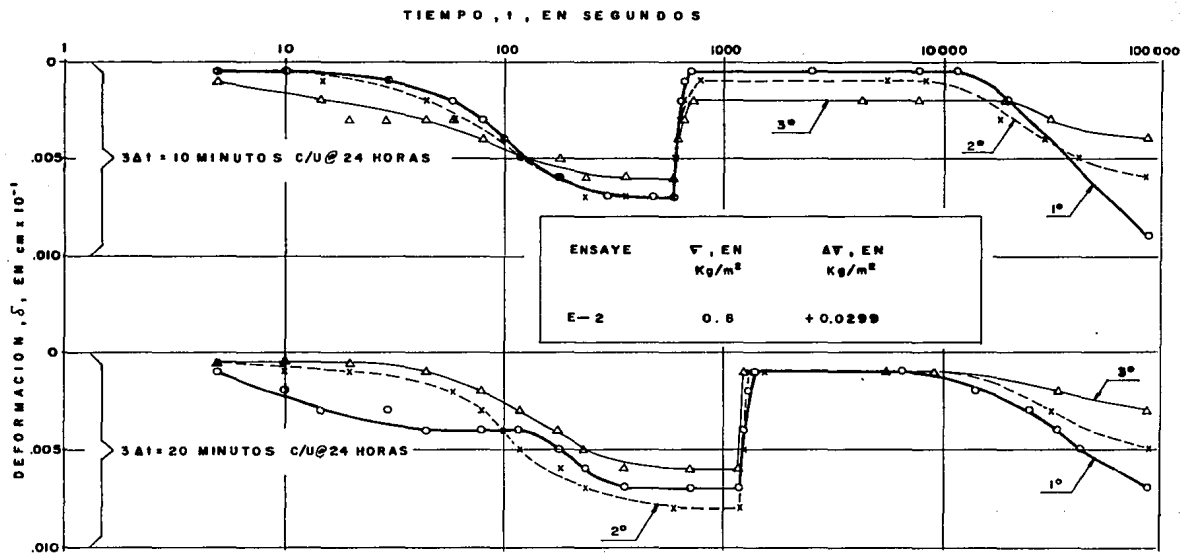


FIG. 29 SECUENCIA DE INCREMENTOS ESTATICOS EN EL ENSAYE E-2

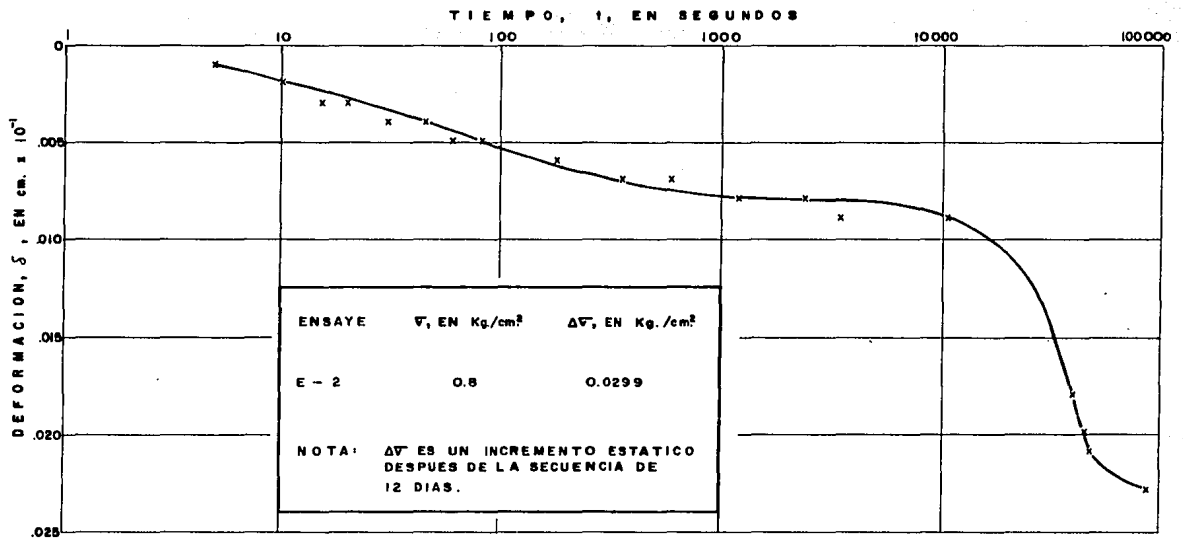


FIG. 30 LA CURVA DE CONSOLIDACION, DESPUES DE LA SECUENCIA APLICADA EN EL ENSAYE E-2

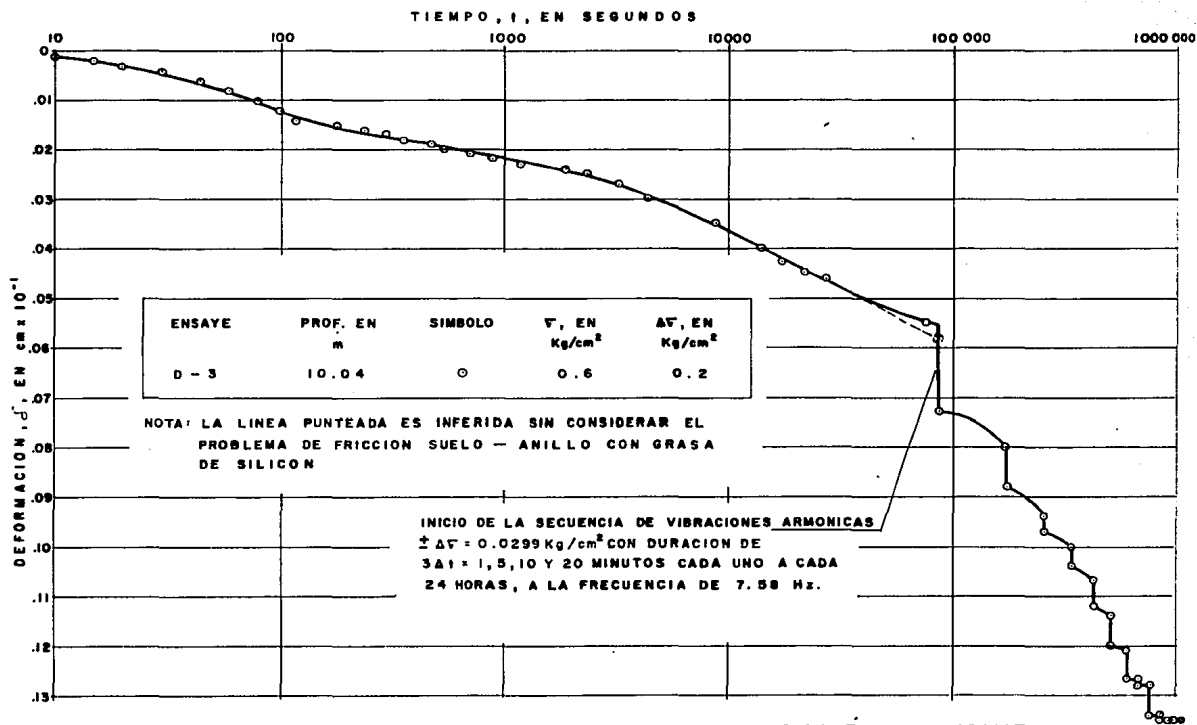


FIG. 31 EFECTO DE LA VIBRACION, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D - 3

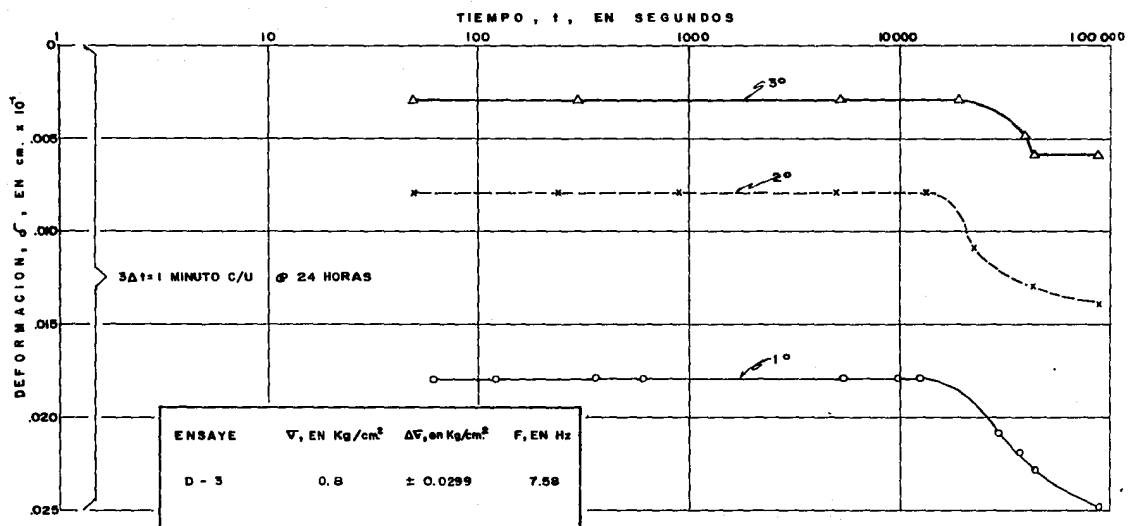


FIG. 32 SECUENCIA DE LAS VIBRACIONES, ANTES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D-3

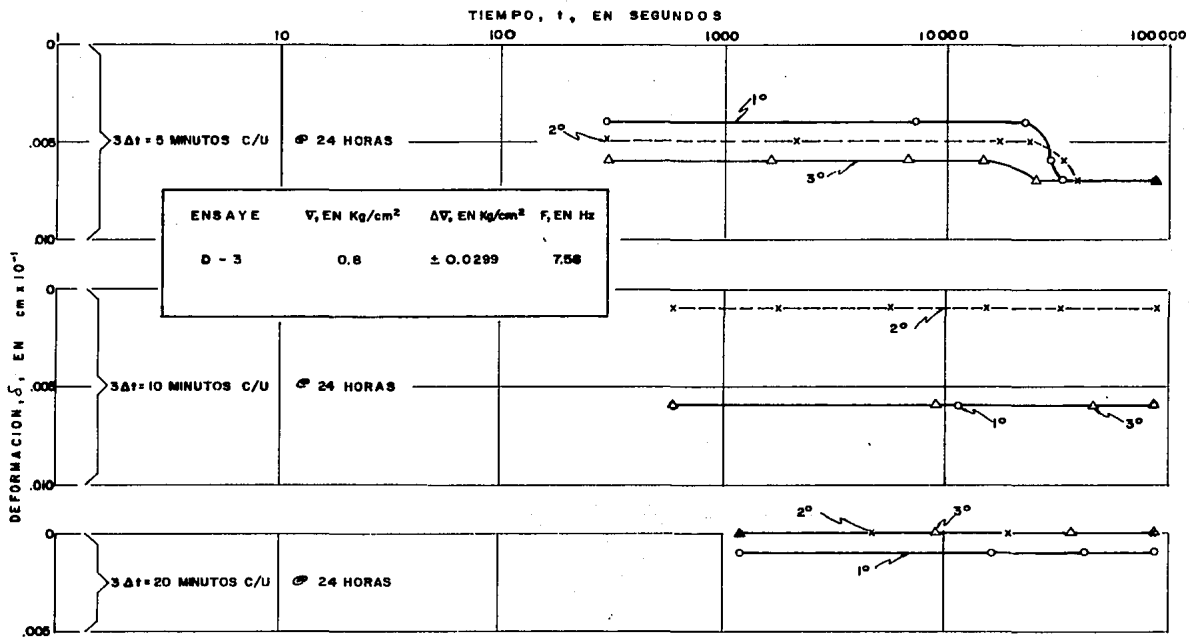


FIG. 33 SECUENCIA DE LAS VIBRACIONES ANTES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D - 3

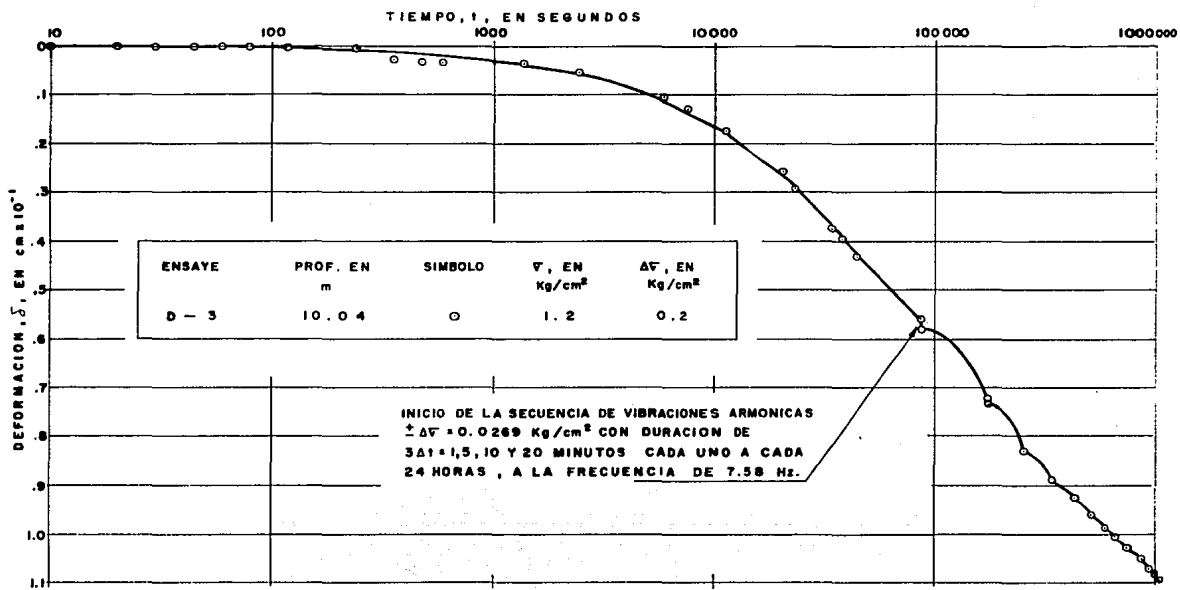


FIG. 34 EFECTO DE LA VIBRACION, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D-3

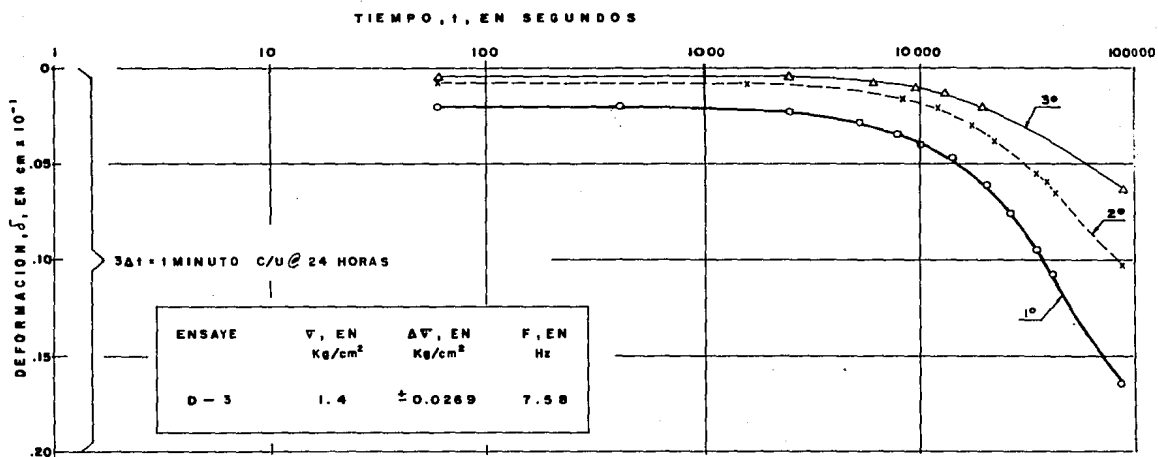


FIG. 35 SECUENCIA DE LAS VIBRACIONES, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D - 3

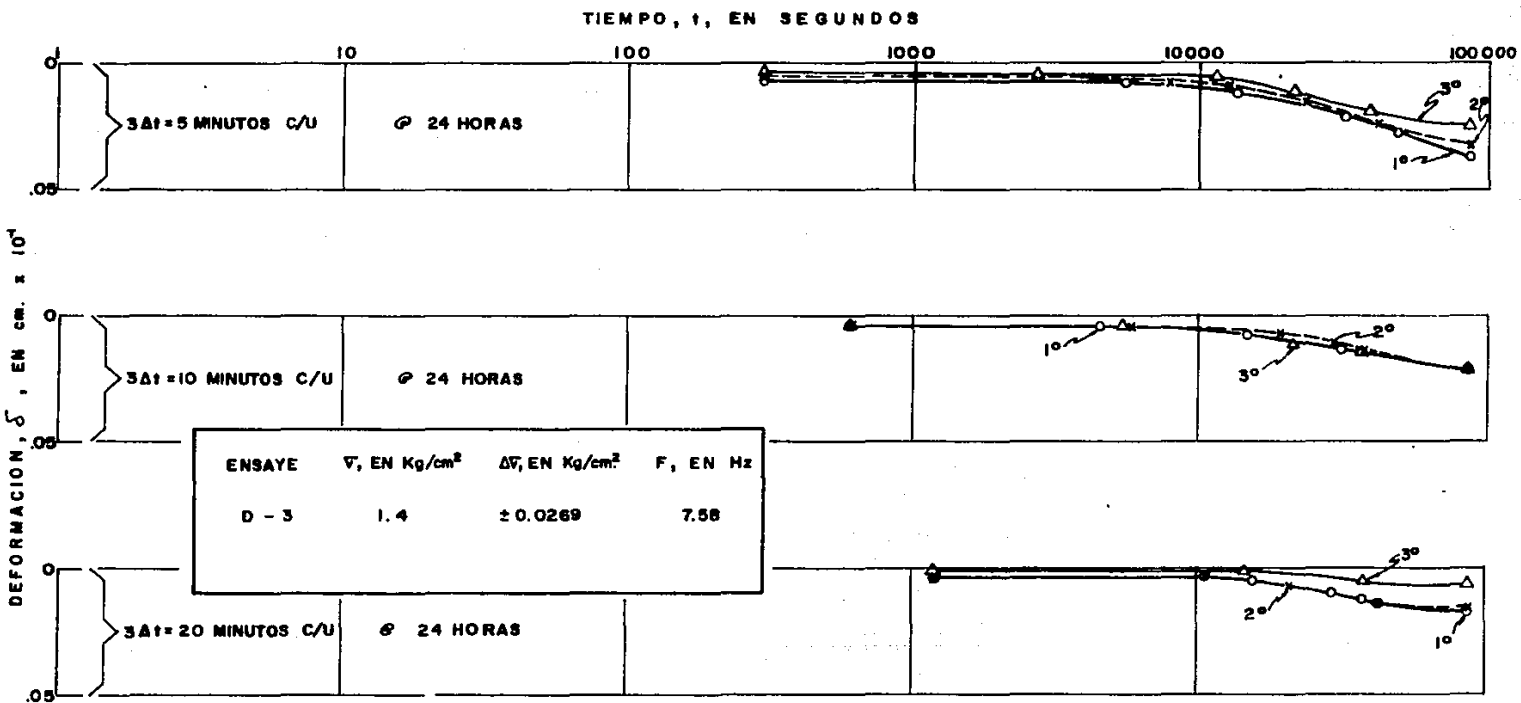


FIG. 36 SECUENCIA DE LAS VIBRACIONES, DESPUES DEL ESFUERZO CRITICO EN EL ENSAYE D-3

**ANEXO A. MEDICION DE LA FRICCION
LATERAL EN LA INTERFAZ
SUELO-ANILLO DE
CONSOLIDACION.**

C O N T E N I D O

	PAGINA
1.A INTRODUCCION	83
2.A DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO	86
3.A PROCEDIMIENTO DE ENSAYES	87
4.A RESULTADOS	90
5.A CONCLUSIONES	94
6.A RECOMENDACIONES	96
7.A REFERENCIAS	98
8.A TABLAS Y FIGURAS	99

1.A INTRODUCCION

Los ensayos de consolidación unidimensional con anillos flotantes, permiten obtener curvas de consolidación más confiables respecto a las que se consiguen con anillos fijos. Esto es debido a que el movimiento relativo entre la interfaz suelo-anillo flotante se genera en ambos sentidos (parte superior e inferior del espécimen del suelo) con una reducción importante en la fricción lateral, mientras que con el anillo fijo todos los movimientos son hacia abajo con relación al anillo.

Los anillos empleados en esta tesis son flotantes de un material plástico Nylamid, con un forro interior de teflón. Antes de la etapa de labrado, se colocó una película delgada de grasa ligera de silicón para reducir la fricción en la interfaz suelo-anillo.

Estudios recientes efectuados en México por Sonia Posada B. en 1985, han indicado la importancia y el efecto que se genera al usar la grasa ligera de silicón en la interfaz suelo-anillo con forro interior de teflón. Los ensayos se efectuaron en equipo de corte directo adaptado, con una arcilla remoldeada de la Ciudad de México; una parte de los resultados de la investigación son:

Suelo	:	arcilla verde olivo
Contenido natural de agua	:	283.3%

Densidad de sólidos	:	2.375
Relación de vacíos	:	6.9
Grado de saturación	:	98.0%
Límite líquido	:	298.6%
Límite plástico	:	91.8%
Angulo de fricción interna del suelo remoldeado	:	28.81°
Sin grasa ligera de silicón	:	
cohesión = 0.26 kg/cm ²		
ángulo de fricción en la interfaz = 10.76°		
Con grasa ligera de silicón	:	
cohesión = 0.16 kg/cm ²		
ángulo de fricción en la interfaz = 7.41°		

De lo anterior se observa una reducción importante en el ángulo de fricción interna en la interfaz (fricción dinámica o residual), así como también de la cohesión cuando se aplica una película delgada de grasa ligera de silicón en la interfaz suelo-anillo.

En esta tesis se empleó un suelo similar al indicado anteriormente, pero con el fin de medir la fricción por área unitaria con y sin grasa ligera de silicón en la interfaz suelo-anillo, se decidió implementar un dispositivo que permitiera medir la fricción con el suelo remoldeado, el anillo de consolidación y la holgura entre las piedras porosas y el anillo. En forma adicional se pensó en

introducir como variable a la velocidad relativa entre el suelo y el anillo. A continuación se describe el dispositivo empleado, el procedimiento de los ensayos, los resultados obtenidos, las conclusiones y las recomendaciones de este estudio complementario a la tesis.

2.A DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

El dispositivo utilizado para medir la fricción por área unitaria se muestra en la Fig. A.1 y está compuesto por:

a. Un marco de deformación controlada que permite simular la deformación relativa en la interfaz suelo-anillo con una determinada velocidad, en el rango de 6×10^{-4} a 0.38 mm/min.

b. Un consolidómetro neumático donde se consolida la arcilla remoldeada con el anillo de consolidación empleado para los ensayos dinámicos de la tesis.

c. Un sistema para medir la fuerza de fricción que consiste en un anillo que detiene al de consolidación, barras de transmisión de carga y un anillo de carga calibrado para el estado inicial de tensión (el sistema se encuentra sujeto a éste y suspendido antes del ensaye).

d. Indicadores de cuadrante para medir la deformación del suelo remoldeado durante la etapa de consolidación y el movimiento total del sistema con velocidad controlada.

3.A PROCEDIMIENTO DE ENSAYES

Con el fin de poder establecer el rango de variación de la velocidad relativa en los ensayos, se calculó en el ensaye E-0 la curva teórica de consolidación para el esfuerzo vertical efectiva de 0.4 kg/cm^2 con el incremento de 0.2 kg/cm^2 , teniendo en cuenta las consideraciones de viscosidad intergranular (Zeevaert, L. 1984). En la Fig. A-2 se muestran los resultados obtenidos , donde se observa que desde el inicio hasta el final del ensaye (24 horas) la fricción en la interfaz suelo-anillo no permite tener una similitud entre la curva del laboratorio y la calculada; al final del ensaye el efecto es mayor, modificando la trayectoria de la deformación por viscosidad intergranular. En la misma figura se ha indicado la variación de la doble velocidad relativa, que va desde 0.012 mm/min hasta $1.11 \times 10^{-5} \text{ mm/min}$. Por lo anterior y teniendo en cuenta los rangos de velocidad del marco de deformación controlada, se establecieron las siguientes velocidades relativas para los ensayos: 0.38 , 0.076 , 0.015 , 0.003 y 0.0006 mm/min .

Las muestras se prepararon con el material almacenado en bolsas de plástico, producto del labrado de los especímenes de los ensayos dinámicos y estáticos discutidos en esta tesis. Se procedió después al amasado del material, manteniéndose en bolsas de plástico, hasta que el suelo remoldeado estuviera homogéneo con ausencia de grumos.

El montaje del material se efectuó colocando el anillo de consolidación encima de un vidrio de dimensiones mayores; después se relleno en forma manual hasta la mitad de la altura del anillo. Posteriormente, se colocó la piedra porosa inferior descendiendo al anillo para enrasar la parte superior y colocar la piedra porosa superior. Enseguida se instaló en la cazuela dentro del consolidómetro neumático, colocando al anillo con el suelo en la parte inferior, para tener la carrera suficiente durante la deformación controlada. Se aplicó el esfuerzo vertical inicial de 0.2 Kg/cm^2 , llenando de agua la cazuela hasta cubrir el anillo de consolidación y esperando 24 h para que se verificara la consolidación bajo ése esfuerzo vertical. Después se efectuaba la medición de la fricción, ajustando el anillo del sistema de transmisión de carga, registrando las lecturas iniciales y aplicando la velocidad relativa de 0.38 mm/min . La fuerza anotada corresponde a la fricción residual, ya que al inicio se tiene una fuerza ligeramente mayor, debida a la adherencia o cohesión en la interfaz.

Inmediatamente se reducía la velocidad relativa a 0.76 mm/min y hasta que se estabilizara la fuerza se procedía a su registro ; de igual manera se obtuvieron los valores de la fuerza para las demás velocidades relativas. Al terminar el ensaye se procedía a retirar la presión e invertir al anillo con el suelo, para poder tener otra vez la carrera suficiente durante la deformación controlada; se aplicaba el siguiente esfuerzo vertical, 0.4 Kg/cm^2 , y se esperaban 24 h para

efectuar el ensaye y registro de la fricción para las diferentes velocidades relativas aplicadas. Así se continuó hasta tener los resultados para los esfuerzos verticales efectivos de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4 kg/cm².

Los ensayes se efectuaron sin grasa de silicón en la interfaz, "A" y con grasa, "B". A continuación se comentan los resultados.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.A RESULTADOS

En la Fig. A-3 se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas de los ensayos con suelo inalterado con grasa E-0 indicados en la tesis, y con suelo remoldeado sin y con grasa ligera de silicón, "A" y "B", respectivamente. Se observa que el contenido natural de agua de los ensayos "A" y "B" están dentro del rango de variación de los ensayos de la tesis (ver tabla 1 de la tesis) ; la curva de compresibilidad de los ensayos "A" y "B" tienden a partir de los esfuerzos verticales de 1.0 kg/cm², a ser similares con la rama virgen del ensayo E-0 (después del esfuerzo crítico de 1.1 kg/cm²).

En la Fig. A-4 se muestra la variación de la fricción en la interfaz del suelo remoldeado y el anillo sin grasa ligera de silicón (ensayo "A"); los valores de la fricción por área unitaria varían desde 67 gr/cm² hasta 210 gr/cm² para los esfuerzos verticales efectivos de 0.2 y 1.4 kg/cm², respectivamente. Es importante hacer notar que conforme se reducía la velocidad relativa, la fricción en la interfaz aumentaba con una diferencia ascendente del orden de 8 gr/cm² (ver tabla A-1).

En la Fig. A-5 se muestra la variación de la fricción en la interfaz del suelo remoldeado con grasa ligera de silicón y el anillo (ensayo "B"); los valores de la fricción por área unitaria varían desde 32 gr/cm² hasta 100 gr/cm² para los esfuerzos verticales efectivos de 0.2 y 1.4 kg/cm²,

respectivamente. Es importante hacer notar que conforme se reducía la velocidad relativa, la fricción en la interfaz disminuía con una diferencia descendente del orden de 10 a 18 gr/cm² (ver tabla A-2).

De la comparación entre los resultados de la fricción por área unitaria de los ensayos "A" y "B" (Figs. A-4 y 5), se tiene que la grasa ligera de silicón en la interfaz suelo-anillo reduce del orden de un 50% la fricción, pero modifica el comportamiento respecto a la velocidad relativa, siendo esto favorable, ya que reduce su valor conforme se disminuye la velocidad relativa.

Con los valores obtenidos de la fricción por área unitaria en los ensayos "A" y "B", para las diferentes velocidades relativas aplicadas, se graficaron en la Fig. A-6 respecto al esfuerzo normal efectivo en la interfaz suelo-anillo, σ_n ; la relación empleada para calcular σ_n , fue la propuesta por Jaky, debido a que el ángulo de fricción en la interfaz, ϕ_i , es menor al remoldeado del suelo, ϕ_r :

$$\sigma_n = (1 - \text{sen } \phi_r) \cdot \sigma_v \quad (A-1)$$

El ángulo de fricción interna del suelo se consideró igual a 28.01°, debido a que las arcillas remoldeadas de la Ciudad de México indican valores de ϕ_r entre 28 y 30° (ref.2).

Con los valores de la fricción, F_r , indicados en las tablas A-1 y 2, se procedió a calcular el ajuste lineal por el

método de mínimos cuadrados, conforme a la siguiente expresión:

$$F_r = F_o + \sigma_n \cdot \tan \theta_i \quad (A-2)$$

donde,

F_o , es la fricción inicial residual que se observa en la Fig. A-6 (existiendo el movimiento relativo en la interfaz con velocidad controlada).

En las tablas A-3 y A-4 se encuentran los resultados, donde se tiene que para el ensaye "A", sin grasa ligera de silicón, los valores que corresponden con todos los puntos de la tabla A-1 son:

$$F_o = 48.640 \text{ gr/cm}^2$$

$$\theta_i = 12.73^\circ$$

$$r = 0.995 \text{ (coeficiente de correlación)}$$

mientras que para el ensaye "B", con grasa ligera de silicón, sin considerar los valores que corresponden al esfuerzo vertical efectivo, $\sigma_v = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$, son:

$$F_o = 53.241 \text{ gr/cm}^2$$

$$\theta_i = 3.53^\circ$$

$$r = 0.872$$

De lo anterior se tiene que al usar la grasa ligera de silicón, la fricción de la interfaz se reduce en un 72.3% respecto al ensaye sin grasa; sin embargo, la fricción inicial residual, F_0 , aumentó en un 1.1%. En las tablas A-3 y A-4, también se indican los ajustes lineales para cada velocidad relativa; los coeficientes de correlación obtenidos son adecuados.

En la Fig. A-7 se presenta la variación de la fricción inicial residual, F_0 , en los ensayos "A" y "B", respecto a la velocidad relativa. Se observa que en los ensayos con grasa ligera de silicón "B" se tienen valores mayores a los del ensaye sin grasa ligera de silicón, "A"; sin embargo, en ambos ensayos la tendencia es a aumentar su valor cuando se disminuye la velocidad relativa.

En las Fig. A-8 y 9 se muestra la variación del ángulo de fricción en la interfaz, ϕ_i , respecto a la velocidad relativa en los ensayos "A" y "B". Se observa que los valores del ensaye sin grasa ligera de silicón "A", son mayores a los del ensaye con grasa ligera de silicón "B"; sin embargo, el comportamiento respecto a la velocidad relativa fue muy diferente, ya que para los ensayos sin grasa ligera de silicón el ángulo ϕ_i aumentó al disminuir la velocidad relativa, mientras que con la grasa ligera de silicón los valores ϕ_i se reducen al disminuir la velocidad relativa.

5.A CONCLUSIONES

Con los resultados presentados en este estudio complementario a esta tesis, se pueden obtener conclusiones respecto a la fricción lateral en la interfaz suelo remoldeado y anillo de consolidación; sin embargo, éstas conclusiones son aplicables únicamente al suelo y anillo de consolidación indicado en la tesis, así como también a las condiciones experimentales aquí descritas.

a. El dispositivo empleado en los ensayos, permitió medir con precisión la fricción por área unitaria que ocurre en la interfaz del suelo remoldeado y el anillo de consolidación indicado en la tesis.

b. Las características de compresibilidad del suelo remoldeado, tienden a ser similares a la rama virgen (después del esfuerzo crítico) del ensaye E-0 indicado en la tesis.

c. El procedimiento de los ensayos se ajustó a lo que sucede en la interfaz del suelo remoldeado de un ensaye de consolidación; es decir, el suelo de los ensayos es el mismo y se consolida con la misma secuencia de esfuerzos verticales, usando el anillo flotante con forro interior de teflón y las mismas piedras porosas (misma holgura del ensaye con espécimen inalterado).

d. Al usar la película delgada de grasa ligera de silicón en la interfaz suelo remoldeado-anillo, se reduce del orden de 50% la fricción lateral respecto a los ensayos sin grasa, pero se modifica el comportamiento respecto a la velocidad relativa entre el suelo y el anillo, siendo favorable ya que reduce su valor conforme se disminuye la velocidad.

e. La variación de la fricción lateral sin y con grasa de silicón respecto al esfuerzo normal efectivo que actúa en la interfaz suelo-anillo, para diferentes velocidades relativas entre el suelo y el anillo, indica la existencia de una fricción inicial residual, F_0 , que aumenta con la disminución de la velocidad relativa. También son importantes las variaciones del ángulo de fricción de la interfaz, ϕ_i , respecto a la velocidad relativa, ya que cuando disminuye ésta, los valores aumentan para los ensayos efectuados sin grasa ligera de silicón y disminuyen cuando se utilizó grasa ligera de silicón.

f. En los ensayos de consolidación E-0, 1, 2 y D-1, 2, 3 indicados en la tesis, se empleó una película delgada de grasa ligera de silicón, reduciéndose en forma importante la fricción por área unitaria; sin embargo, se presentaron problemas de fricción cuando las velocidades relativas entre el suelo y el anillo eran menores a 5×10^{-6} mm/min.

6.A RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en este estudio complementario, permiten confirmar la importante reducción que se logra en la fricción lateral, cuando se aplica una película delgada de grasa ligera de silicón en la interfaz suelo-anillo; sin embargo, es necesario continuar con la investigación, ampliando la base experimental con las siguientes variantes:

a. Emplear en los ensayos muestras inalteradas con el remoldeo que se genera durante el labrado del espécimen.

b. Implementar en el marco de deformación controlada, un sistema que permita reducir la velocidad relativa entre el suelo y el anillo, hasta valores de 5×10^{-6} mm/min.

c. Desarrollar un método analítico que permita corregir las curvas de compresibilidad, teniendo en cuenta la existencia de una fricción inicial residual. Sería más importante corregir las curvas de consolidación, ya que de éstas se obtienen los parámetros de compresibilidad.

d. Desarrollar un anillo flotante para reducir la fricción lateral en el ensaye de consolidación unidimensional. En la fig. A-10 se presenta una propuesta que consiste de un alambre plano helicoidal (slinky adaptado), membrana de latex no pegada al alambre y grasa ligera de silicón en la interfaz. El objetivo de ésta propuesta, es que cuando se

presente la fricción lateral, el anillo de consolidación se deforme axialmente.

Con las conclusiones presentadas, así como con las recomendaciones de este estudio complementario, será posible ampliar el conocimiento de la variación de la fricción lateral entre el suelo y el anillo, obteniendo así mejores curvas de consolidación y parámetros de compresibilidad más confiables.

7.A REFERENCIAS

1. Zeevaert, L., 1984. "Viscosidad Intergranular en Suelos Finos Saturados", División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

2. Posada Bolívar, Sonia C., 1985. "Factores que Afectan la Prueba de Consolidación: "Fricción Lateral ", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

8.A TABLAS Y FIGURAS

T A B L A A-1

VARIACION DE LA FRICCIÓN EN LA INTERFAZ

SUELO-ANILLO DEL ENSAYE "A", SIN GRASA

LIGERA DE SILICON, EN GR/CM²

v_v , EN KG/CM ²	V, EN MM/MIN	0.380	0.076	0.015	0.003	0.0006
0.2	63.955	62.763	66.408	67.639	67.647	
0.4	94.655	101.063	102.368	102.381	102.406	
0.6	112.916	121.095	121.127	121.127	122.504	
0.8	139.358	143.644	146.529	147.992	149.477	
1.0	157.856	162.390	168.429	169.957	170.007	
1.2	185.818	187.423	188.972	190.550	190.607	
1.4	205.486	208.774	210.417	212.095	213.739	

NOTAS: V, es la velocidad relativa entre el suelo y el anillo de consolidación.

v_v , es el esfuerzo vertical efectivo al que se consolida, -
previo al ensaye, el suelo remoldeado.

T A B L A A-2

VARIACION DE LA FRICCIÓN EN LA INTERFAZ
SUELO-ANILLO DEL ENSAYE "B", CON GRASA
LIGERA DE SILICON, EN GR/CM²

V, EN MM/MIN	0.380	0.076	0.015	0.003	0.0006
V _v , EN KG/CM ²					
0.2	32.626	33.795	32.634	32.637	32.641
0.4	66.947	68.203	66.971	66.979	66.979
0.6	78.587	72.038	69.419	68.109	68.109
0.8	82.313	79.580	74.101	74.101	74.101
1.0	98.092	96.684	85.321	79.644	75.377
1.2	103.704	97.792	91.866	84.457	84.457
1.4	106.295	103.258	97.184	91.110	88.086

NOTAS:

V, es la velocidad relativa entre el suelo y el anillo de consolidación.

V_v, es el esfuerzo vertical efectivo al que se consolida, previo al ensaye, el suelo remoldeado.

T A B L A A-3

VARIACION DE LA FRICCION, F_r , RESPECTO AL
 ESFUERZO NORMAL EFECTIVO DEL ENSAYE "A", SIN GRASA DE SILICON

V MM/MIN.	Fo GR/CM ²	Øi GRADOS	r
0.380	44.026	12.663	0.998
0.076	47.872	12.666	0.995
0.015	50.245	12.675	0.997
0.003	50.458	12.788	0.997
0.0006	50.601	12.857	0.997
*	48.640	12.730	0.995

NOTAS: $F_r = F_o + \sqrt{v} \tan \phi_i$

$\sqrt{v} \approx (1 - \sin \phi_r) \sqrt{v}$, esfuerzo normal a la interfaz (ref.2)

\sqrt{v} , esfuerzo vertical efectivo

$\phi_r \approx 28.81^\circ$, ángulo de fricción interna suelo remoldeado

F_o , fricción inicial residual en la interfaz

ϕ_i , ángulo de fricción en la interfaz

r , coeficiente de correlación del ajuste por mínimos cuadrados

* , valores que corresponden con todos los puntos de la Tabla A-1

T A B L A A-4

VARIACION DE LA FRICCION, F_r , RESPECTO AL ESFUERZO
NORMAL EFECTIVO DEL ENSAYE "B", CON GRASA DE SILICON

V MM/MIN.	F_o GR/CM ²	ϕ_L GRADOS	r
0.380	52.311	4.538	0.978
0.076	51.591	4.252	0.970
0.015	51.287	3.623	0.985
0.003	54.869	2.766	0.989
0.0006	56.146	2.461	0.975
*	53.241	3.530	0.872

NOTAS: Ver el significado de la nomenclatura en la Tabla A-3

* , Valores que corresponden con todos los puntos de la
Tabla A-2, excepto los del esfuerzo vertical igual a 0.2Kg/cm^2

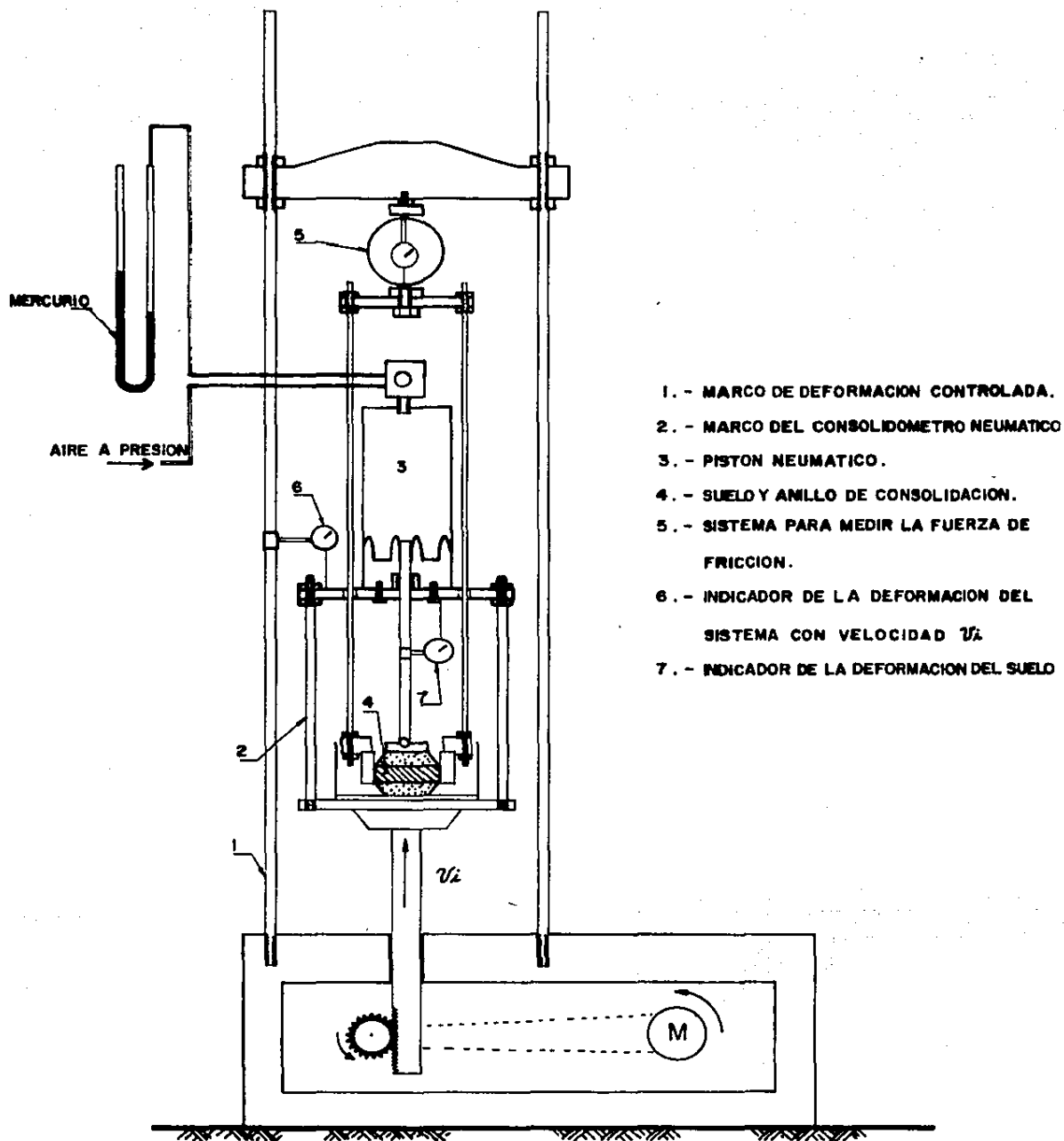


FIG. A-1 DISPOSITIVO PARA MEDIR LA FRICCION, F_r , ENTRE EL SUELO REMOLDEADO Y EL ANILLO DE CONSOLIDACION

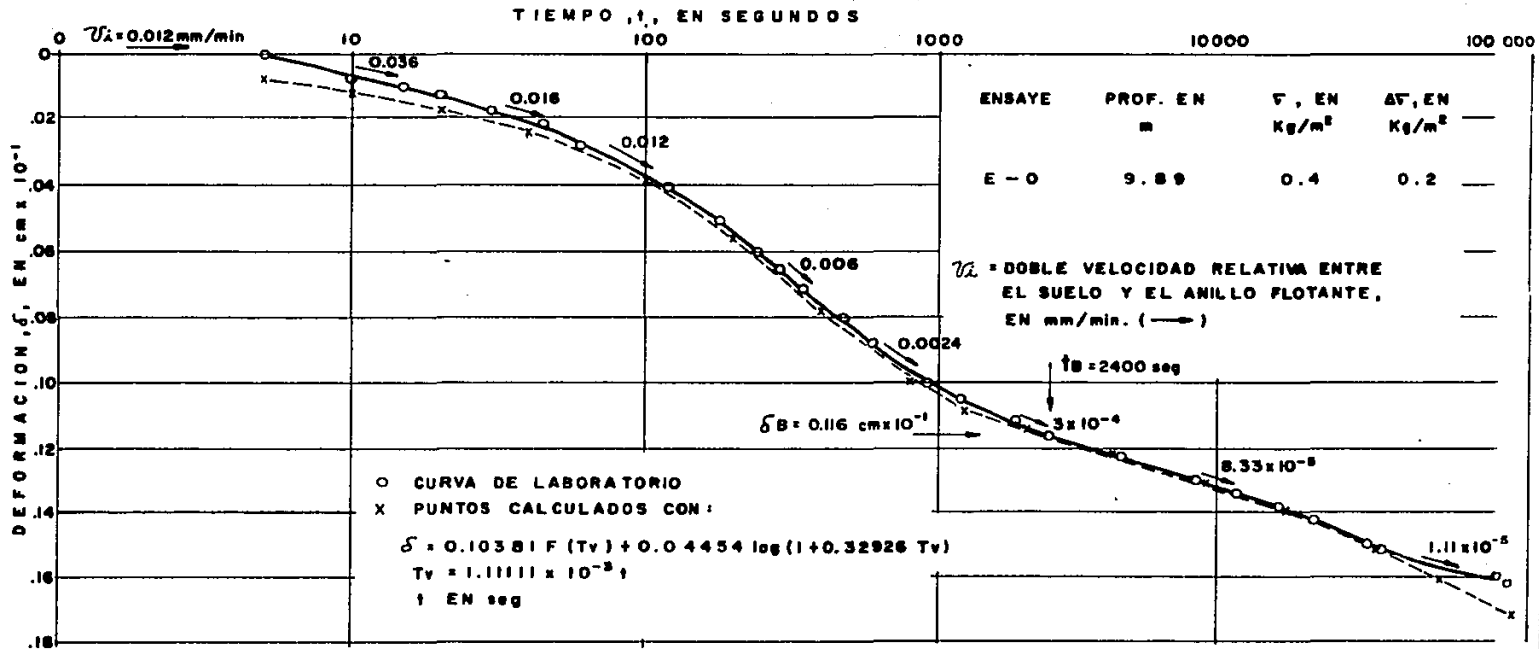
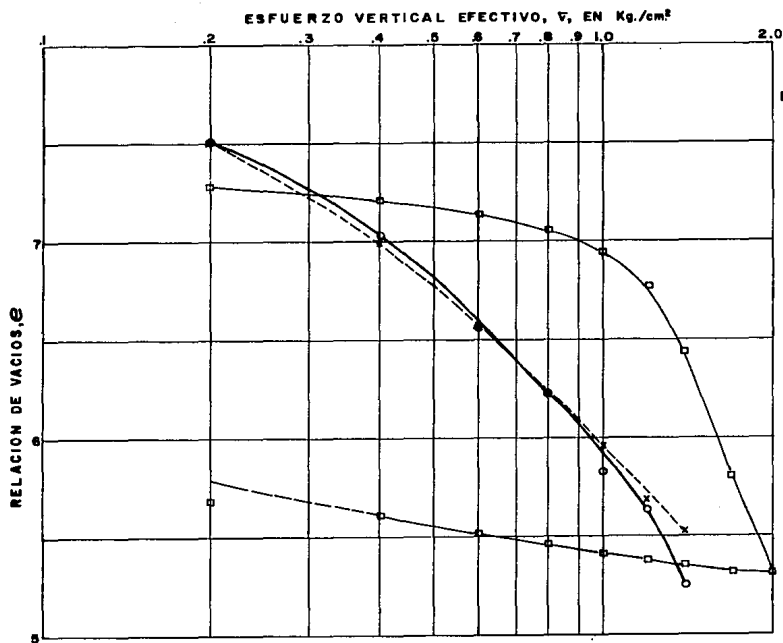


FIG. A-2 EFECTO DE LA FRICCIÓN EN UNA CURVA DE CONSOLIDACION DEL ENSAYE E-0



ENSAYE	SÍMBOLO	e_0	W.L. %	G_{WA} %
E-O	□	7.393	313.28	100.00
A	○	8.786	356.66	96.90
B	x	8.589	352.38	97.93

NOTAS:

1. - EN LOS ENSAYES E-O, "A" Y "B", EL ANILLO DE CONSOLIDACION ES EL MISMO (CON RECUBRIMIENTO INTERIOR DE TEFLON)
2. - LOS ENSAYES "A" Y "B" SON CON SUELO REHOLDEADO DEL CONJUNTO DE ENSAYES E-O, E-1 E-2, D-1, D-2 Y D-3 (SUELO DEL PRODUCTO DEL LABRADO Y AMASADO).
3. - E-O ES EL ENSAYE CON SUELO INALTERADO
4. - "A" ES EL ENSAYE PARA MEDIR LA FRICCIÓN SIN GRASA DE SILICON.
5. - "B" ES EL ENSAYE PARA MEDIR LA FRICCIÓN CON GRASA DE SILICON.

FIG. A-3 CURVAS DE COMPRESIBILIDAD DE LOS ENSAYES E-O, "A" Y "B".

SÍMBOLO	○	x	□	▲	↗	△	▽
ESFUERZO VERTICAL V_v , EN Kg/cm ²	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4

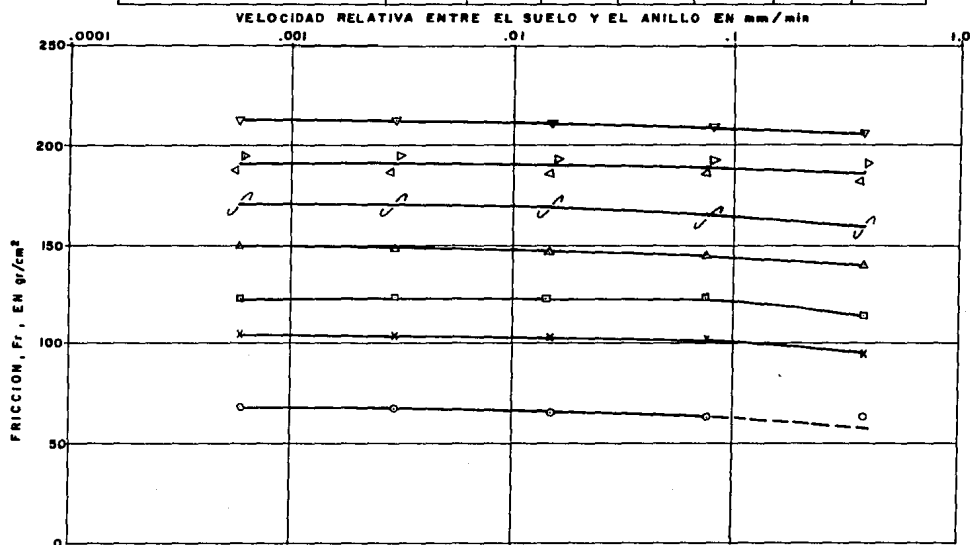


FIG. A-4 VARIACION DE LA FRICCIÓN ENTRE EL SUELO Y EL ANILLO DEL ENSAYE, "A", SIN GRASA DE SILICON

SIMBOLO	o	x	□	△	↗	↘	▽
ESFUERZO VERTICAL Fv, EN Kg/cm ²	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4



FIG. A-5 VARIACION DE LA FRICCIÓN ENTRE EL SUELO Y EL ANILLO DEL ENSAYE, "B", CON GRASA DE SILICON

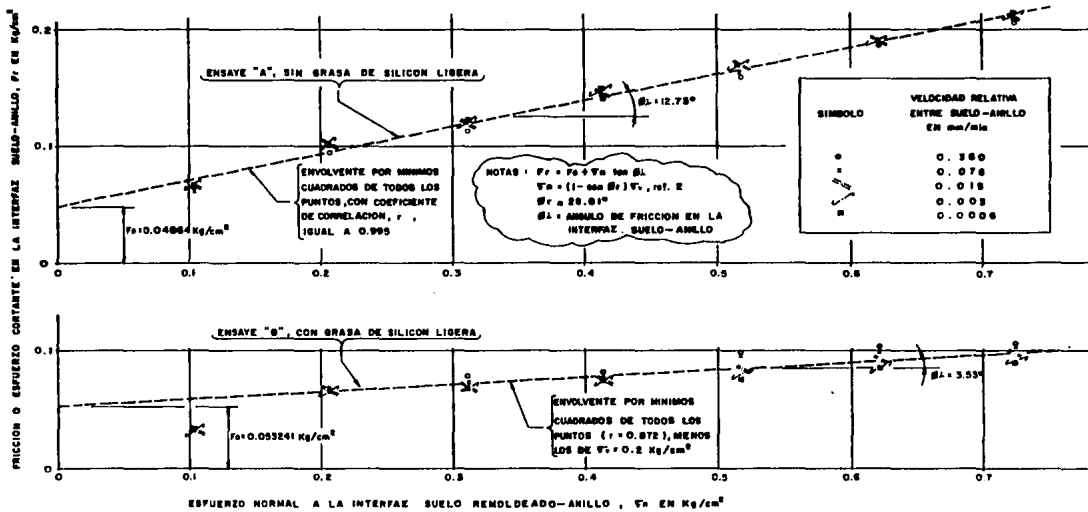


FIG. A-6 VARIACION DE LA FRICCION RESPECTO AL ESFUERZO NORMAL EFECTIVO DE LOS ENSAYES "A" Y "B"

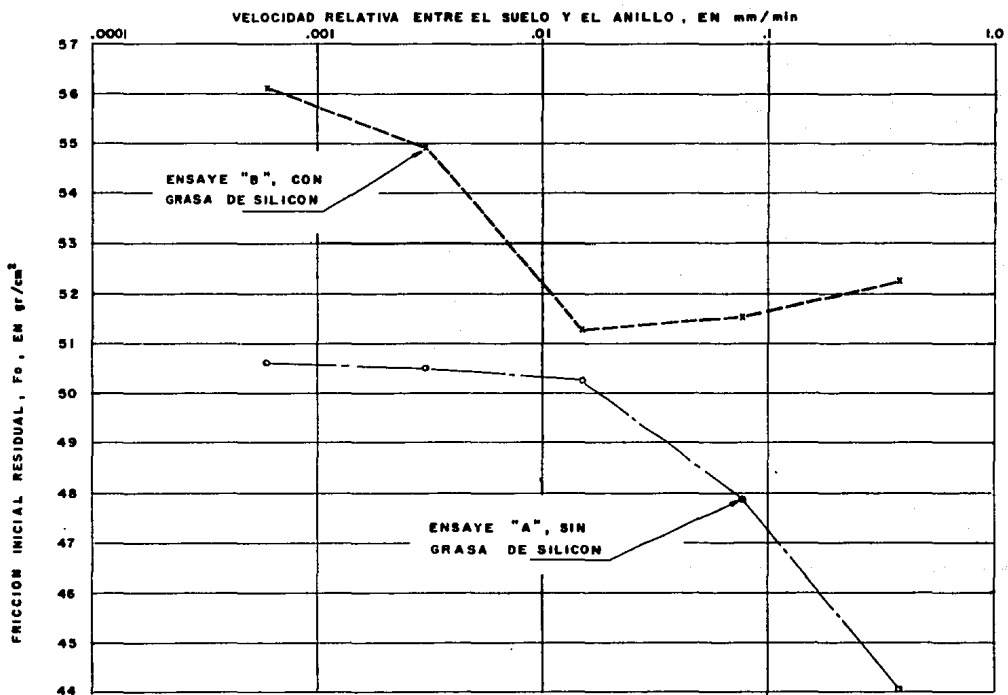


FIG. A-7 VARIACION DE LA FRICCIÓN INICIAL RESIDUAL, EN LOS ENSAYES "A" y "B"

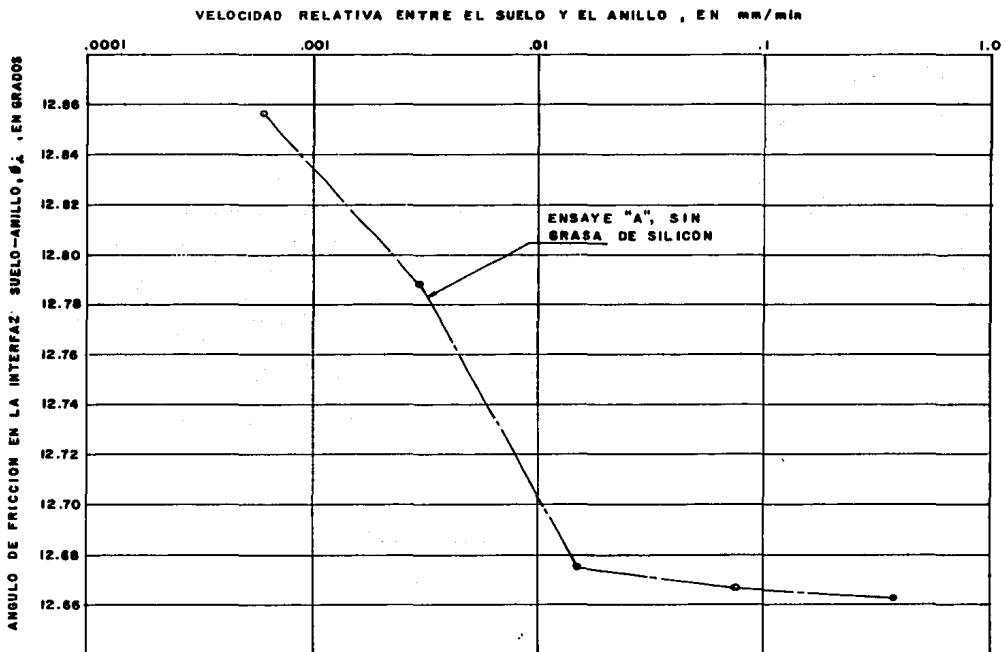


FIG. A-8 VARIACION DEL ANGULO DE FRICCION EN LA INTERFAZ DEL ENSAYE "A"

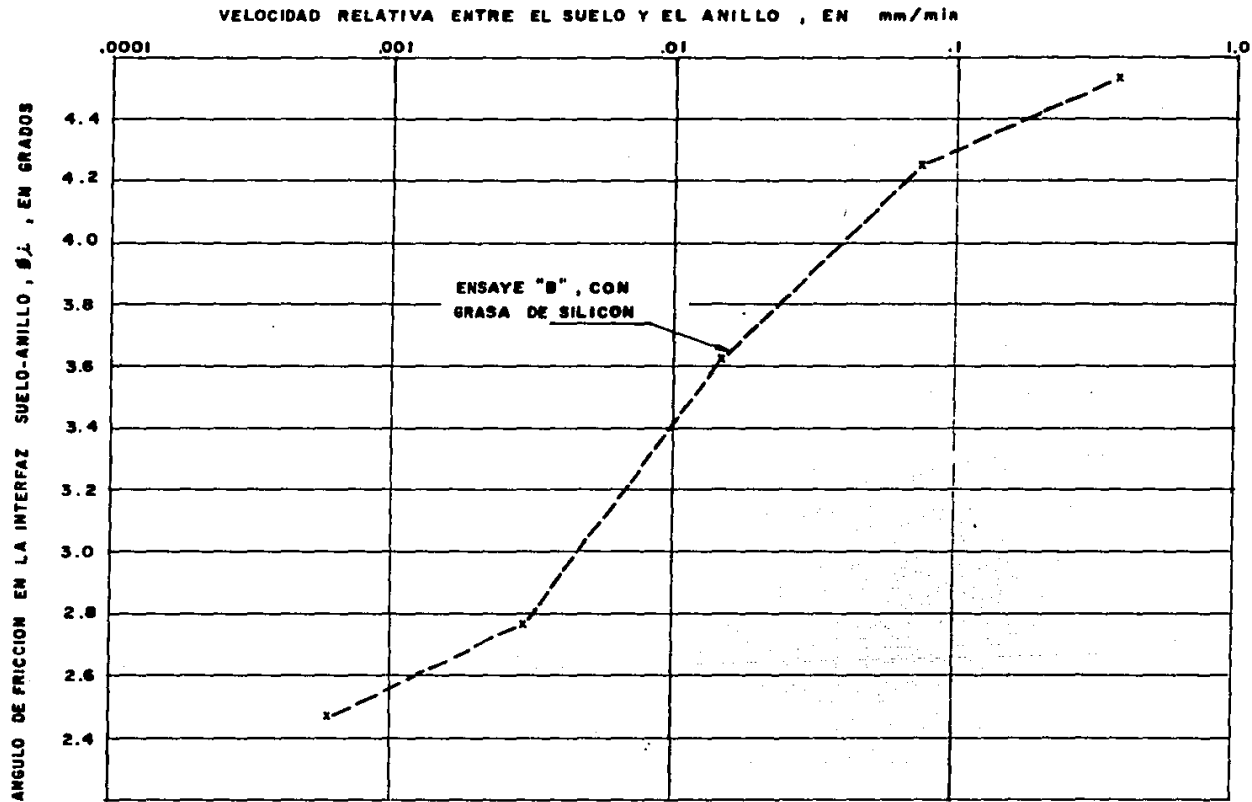
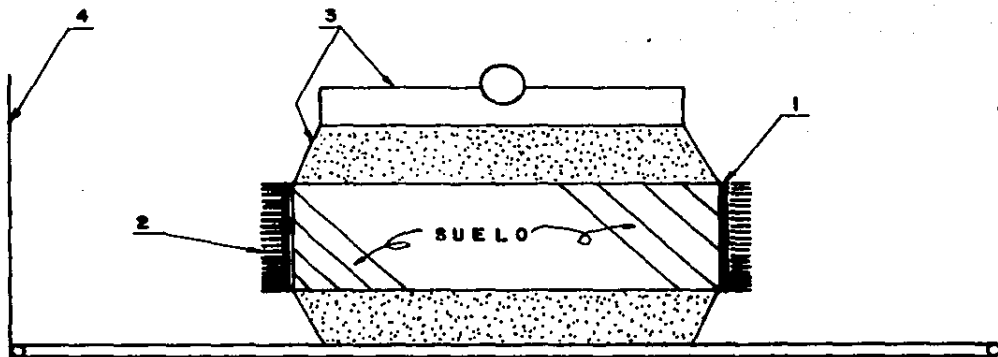


FIG. A-9 VARIACION DEL ANGULO DE FRICCIÓN EN LA INTERFAZ DEL ENSAYE "B"



1. - MEMBRANA DE LATEX CON GRASA LIGERA DE SILICON
2. - ALAMBRE PLANO HELICOIDAL.
3. - PIEDRAS POROSAS Y PLACA PARA APLICACION DEL ESFUERZO VERTICAL, σ_v .
4. - CAZUELA.

FIG. A-10 PROPUESTA DE UN ANILLO FLOTANTE PARA REDUCIR LA FRICCION EN EL ENSAYE DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL .