

61



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**"DETERMINACION DEL MODULO DE RIGIDEZ DINAMICO Y
RELACION DE AMORTIGUAMIENTO EN MUESTRAS
INALTERADAS Y COMPACTADAS, UTILIZANDO DIFERENTES
EQUIPOS"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ARTURO MARTINEZ ESPITIA

277295



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/009/99

Señor
ARTURO MARTINEZ ESPITIA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. GERMAN LOPEZ RINCON, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"DETERMINACION DEL MODULO DE RIGIDEZ DINAMICO Y RELACION DE AMORTIGUAMIENTO EN MUESTRAS INALTERADAS Y COMPACTADAS, UTILIZANDO DIFERENTES EQUIPOS"

- I. INTRODUCCION
- II. PENDULO DE TORSION DE VIBRACION LIBRE
- III. CALIBRACION DEL EQUIPO
- IV. COLUMNA RESONANTE
- V. EQUIPOS COMPLEMENTARIOS A LA COLUMNA RESONANTE
- VI. SUELOS ENSAYADOS
- VII. PRESENTACION DE RESULTADOS
- VIII. CONCLUSIONES
- IX. REFERENCIAS
- X. ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 8 de febrero de 1999.
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

*A mis Padres,
Hermanos y Amigos.*

*En especial para Justino**

Tema :

“Determinación del módulo de rigidez dinámico y relación de amortiguamiento en muestras inalteradas y compactadas, utilizando diferentes equipos”

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. PÉNDULO DE TORSIÓN DE VIBRACIÓN LIBRE	4
1.1 Descripción del equipo	4
1.1.1 Bastidor	
1.1.2 Sistema excitador	
1.1.3 Cámara triaxial	
1.1.4 Mesa de registro	
1.1.5 Equipo para saturar y consolidar la muestra	
1.2 Consideraciones teóricas	14
1.3 Programación de una prueba	24
1.3.1 Descripción de la prueba	
1.3.2 Calibración del equipo	
1.3.3 Labrado de la muestra	
1.3.4 Propiedades índice	
1.3.5 Montaje de la muestra	
1.3.6 Saturación y consolidación de la muestra	
1.3.7 Estimación de la deflexión	
II. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	29
2.1 Cálculo del momento polar de inercia de masa	29
2.1.1 Anclaje del contrapeso	
2.1.2 Vástago superior y broquero	
2.1.3 Brazo	
2.1.4 Vástago inferior	
2.1.5 Sistema de tuercas	
2.1.6 Sistema de masas	
2.1.7 Resumen de resultados	
2.2 Descripción de la calibración	37
2.2.1 Procedimiento	
2.2.2 Presentación y análisis de resultados	
2.3 Recomendaciones durante el proceso de calibración	43
III. COLUMNA RESONANTE	46
3.1 Generalidades	46
3.2 Descripción de la cámara triaxial de columna resonante	47

3.2.1	Cámara triaxial, marco de carga y sistema excitador	
3.2.2	Panel de controles hidroneumático y de vacío	
3.2.3	Consola de registro y de controles eléctricos	
3.3	Descripción de la columna resonante	50
3.3.1	Instrumentos de medición	
3.3.2	Sistema de excitación y captura de datos	
IV.	EQUIPOS COMPLEMENTARIOS A LA COLUMNA RESONANTE	
4.1	Cámara triaxial cíclica torsionante	52
4.1.1	Generalidades	
4.1.2	Descripción del equipo	
4.2	Sonda suspendida	56
4.2.1	Generalidades	
V.	SUELOS ENSAYADOS	
5.1	Muestras inalteradas	58
5.1.1	Características	
5.1.2	Propiedades	
5.1.3	Procedimiento de ensaye	
5.2	Muestras compactadas	60
5.2.1	Características	
5.2.2	Propiedades	
5.2.3	Procedimiento de ensaye	
VI.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
6.1	Procedimiento para la obtención de resultados del péndulo de torsión	64
6.1.1	Resumen de resultados	
6.2	Resultados obtenidos de las muestras inalteradas	67
6.2.1	Muestra inalterada 1	
6.2.2	Muestra inalterada 2	
6.3	Resultados obtenidos de las muestras compactadas	72
6.3.1	Muestra compactada 1	
6.3.2	Muestra compactada 2	
6.3.3	Muestra compactada 3	
6.3.4	Muestra compactada 4	
VII.	CONCLUSIONES	
7.1	Péndulo de torsión	91
7.2	Muestras inalteradas	92
7.3	Muestras compactadas	93
ANEXO A	Resultados numéricos de las calibraciones	
	Resultados numéricos de las muestras inalteradas y compactadas	
ANEXO B	Resultados numéricos de muestras compactadas, con tres equipos	

INTRODUCCIÓN

Entre las propiedades dinámicas más importantes que hay que obtener de un suelo, se pueden mencionar; el módulo dinámico de rigidez al esfuerzo cortante (μ), relación de amortiguamiento (ζ), módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν). Estas son propiedades que permiten analizar en forma directa el comportamiento de un suelo, al ser excitado por un movimiento sísmico. Con el valor de μ se calcula la velocidad de onda de corte (V_s) y el periodo fundamental de vibración de la masa de suelo (T_s).

Con el estudio de las propiedades dinámicas del suelo se solucionan problemas, tanto en la ingeniería de cimentaciones como en el comportamiento de una estructura sujeta a un sismo mediante un análisis suelo-estructura.

Otra aplicación de dichas propiedades es en el diseño de cimentaciones para maquinaria las cuales generan vibraciones importantes.

El módulo dinámico de rigidez al esfuerzo cortante se define a partir de la ley de Hooke en donde se plantea la relación que guarda el esfuerzo cortante y la deformación en una sección, al aplicar torsión libre. Si se aplica esa torsión a un eje cilíndrico, los esfuerzos guardan una relación lineal con las deformaciones. En una sección plana cualquiera de un cilindro, el esfuerzo cortante (σ), será proporcional a la deformación unitaria por cortante (γ). La constante de proporcionalidad se define como **Módulo dinámico de rigidez al esfuerzo cortante** (μ), también, a éste valor se le acostumbra llamar G.

$$\sigma = \mu \gamma$$

El **Amortiguamiento** (ζ), es una medida de la disipación de energía en un sistema. Los factores que más influencia tienen son:

- Amplitud de la deformación
- Presión de confinamiento

- Granulometría
- Número de ciclos de esfuerzo

A la relación de amortiguamiento también se le llama porcentaje de amortiguamiento crítico, coeficiente de amortiguamiento o simplemente amortiguamiento; y se le conoce con la letra ζ .

La determinación del módulo de rigidez dinámico y relación de amortiguamiento, se puede hacer con diferentes métodos:

Registro sísmico. Se basan en el análisis de registros de terremotos (acelerogramas), por medio de acelerógrafos y sismógrafos. Estos producen resultados directos.

Generación artificial de sismos. Se basan en análisis de pequeños sismos generados artificialmente.

Métodos analíticos. Se apoyan en estudios de campo y laboratorio, que evalúan propiedades del suelo.

Los métodos de campo, tienen por objeto determinar la velocidad de las ondas sísmicas en el suelo. Los métodos de laboratorio, tienen por objeto determinar la respuesta del suelo ante una excitación dinámica.

a) Métodos de campo

- Prueba de refracción sísmica
- Prueba en pozo
 - * Pozo-abajo (down-hole)
 - * Pozo cruzado (cross-hole)
 - * Pozo-arriba (Up-hole)
- Prueba de sonda suspendida

b) Métodos de laboratorio

- Prueba de péndulo de torsión
- Prueba de columna resonante
- Prueba de columna torsionante
- Prueba de corte simple cíclico

En el presente trabajo se pretende cumplir los siguientes objetivos:

Se obtendrán las constantes de calibración del péndulo de torsión (Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, UNAM), para utilizarlos en posteriores ensayos. los resultados se presentarán gráficamente de la siguiente forma:

- Periodo de vibración (T_{ac}) vs. rigidez del aparato
- Relación de amortiguamiento del aparato (ζ_a) vs. rigidez del aparato
- Momento polar de inercia (J_a) vs. rigidez del aparato

- Constante dinámica de resorte (K_d) vs. rigidez del aparato

Se pretende obtener el módulo dinámico de rigidez al esfuerzo cortante y relación de amortiguamiento en muestras inalteradas y compactadas. La descripción de las muestras ensayadas y los procedimientos de ensaye. Los resultados se presentan en forma gráfica, con las siguientes correlaciones:

- Módulo de rigidez dinámico (μ) vs. distorsión angular (γ)
- Relación de amortiguamiento (ζ) vs. distorsión angular (γ)
- Módulo de rigidez dinámico (μ) vs. presión de confinamiento (σ_c)
- Relación de amortiguamiento (ζ) vs. presión de confinamiento (σ_c)

Y por último, se complementarán los resultados obtenidos del péndulo de torsión; con los de la columna resonante (Instituto de Ingeniería) y cámara triaxial de columna resonante (CENAPRED).

CAPÍTULO I: Péndulo de torsión de vibración libre

1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El péndulo de torsión de vibración libre permite conocer el comportamiento dinámico de muestras de suelo cilíndricas, de aproximadamente 7 cm de diámetro y 15 cm de altura, ante una vibración torsional pura, bajo un determinado confinamiento de esfuerzos efectivos. El equipo permite conocer de manera confiable el módulo de rigidez dinámico, la relación de amortiguamiento y las distorsiones permanentes.

A continuación se describen las cinco partes principales del equipo.

1.1.1 BASTIDOR

a) Base superior

La base superior es una placa de acero que mide 15 cm de ancho por 82 cm de largo, en el centro se encuentra un orificio de 1.9 cm de diámetro y con holgura de 0.2 cm, por donde se introduce el vástago superior. La base permite el giro y el movimiento vertical del vástago, pero impide el movimiento horizontal. Además, en su parte inferior tiene un valero que facilita aún más el giro. Se une a la base inferior por medio de 4 barras de acero que permiten se nivele a la altura deseada, (figura 1.1).

b) Base inferior

Es una placa de acero de 57.0 de ancho por 81.0 cm de largo y 1.5 cm de espesor perfectamente nivelada que soporta el peso de la cámara triaxial y de todo el sistema. Esta sujeta al piso por medio de un tetrapie, (figura 1.1).

c) Tetrapie

Es una pieza formada por 4 barras de perfil tubular unidas en forma de "V" invertida sujetas al piso por medio de 4 tornillos, y unidas tanto a la base inferior como a la superior en cada extremo, (figura 1.1).

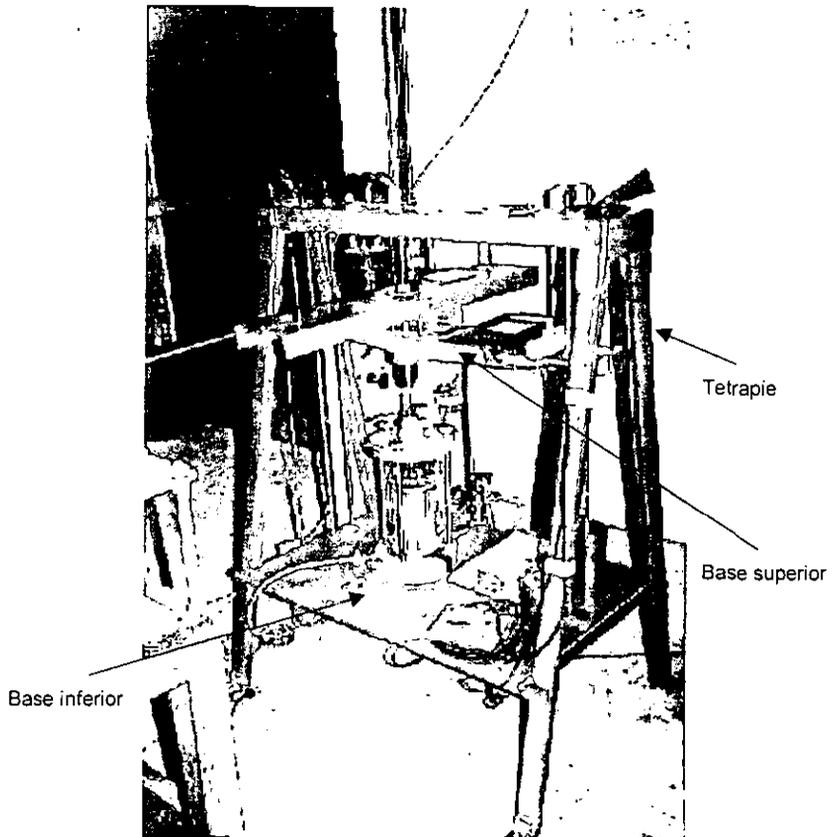


FIGURA 1.1 Bastidor

1.1.2 SISTEMA EXCITADOR

a) Anclaje del contrapeso

Es una pieza de acero inoxidable, de 3.64 cm de diámetro, contiene en la parte inferior una ranura a lo largo del diámetro de 1.73 cm. Sirve de unión entre el contrapeso y el vástago superior por medio de un tornillo de sujeción de acero con peso despreciable, (figura 1.2).

b) Vástago superior

Es una pieza de acero inoxidable de 27.1 cm de largo y un diámetro de 1.88 cm; en uno de sus extremos cuenta con cuerda para unir a la base inferior, y en el otro extremo tiene un broquero el cual transmite la vibración torsional, (figura 1.2).

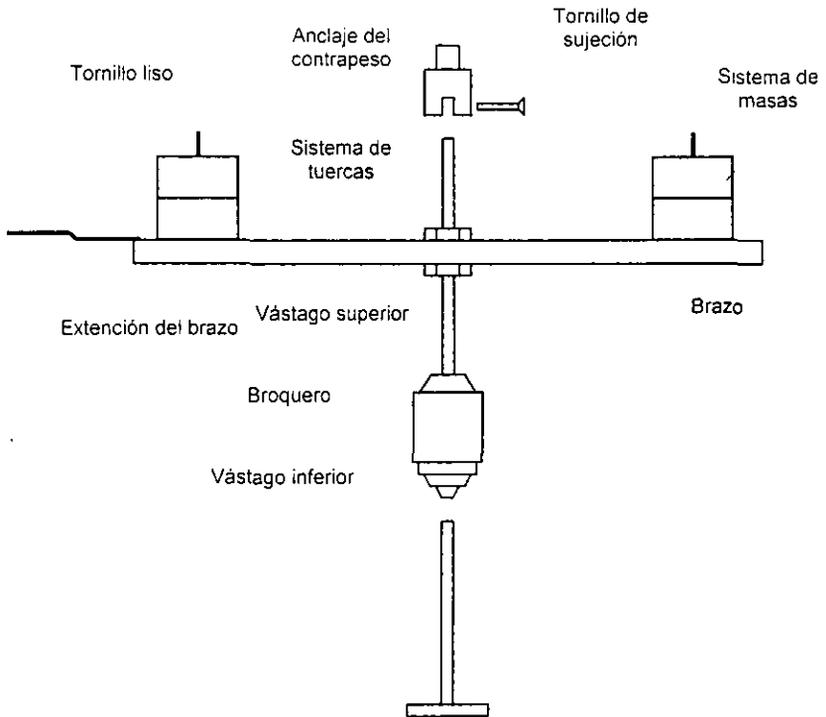


FIGURA 1.2 Sistema excitador

c) Brazo

Es una sección canal CE 152.4x12.20 que tiene una longitud de 84.5 cm. Su función es transmitir el momento de torsión al sistema, (figura 1.2). En el centro de la base tiene un orificio de 1.9 cm de diámetro y una holgura de 0.5 cm, aproximadamente. La canal se encuentra ubicada en la parte superior del vástago, exactamente donde tiene cuerda. En uno de los extremos se coloca una extensión de bronce de 55 cm de largo que registra la vibración inducida en la mesa registradora por medio de una plumilla.

d) Sistema de tuercas

Se sujeta el brazo al vástago superior por medio de dos tuercas de 2.85 cm de diámetro y dos roldanas de 8.05 cm de diámetro, (figura 1.2).

e) Sistema de masas

El brazo cuenta con un tornillo liso en cada extremo, en los cuales se sobreponen simultáneamente masas de 1 kg (hasta cinco en cada extremo), las cuales sirven para modificar, reducir o aumentar, la rigidez del aparato, (figura 1.2)

f) Broquero

Tiene la función de unir el vástago superior con el vástago inferior, y transmitir el momento de torsión a la probeta. Permite que al consolidarse la muestra y sufrir un cambio de volumen, la diferencia de altura que resulta se ajusta por medio del broquero, (figura 1.2).

g) Vástago inferior

Es una pieza de acero inoxidable de 1.05 cm de diámetro y 10.61 cm largo. En el extremo superior se reduce el diámetro a 0.88 cm con el fin de introducirlo en el broquero una longitud de 2.72 cm aproximadamente. En el otro extremo tiene una rosca de 2.01 cm con diámetro de 0.95 cm, la cual va unida al cabezal, (figura 1.2).

h) Sistema de poleas y contrapeso

Este sistema tiene la función de equilibrar el peso del brazo y masas, con el fin de que la muestra ensayada no sufra una presión externa más que la de confinamiento, así se asegura la condición isotrópica de esfuerzos. El sistema de poleas esta sujeto a una sección canal CE 152.4x12.20 que tiene una longitud de 92.5 cm (forma parte del tetrapie). El contrapeso se sujeta con un cable de acero de 120 cm de largo, (figura 1.3).

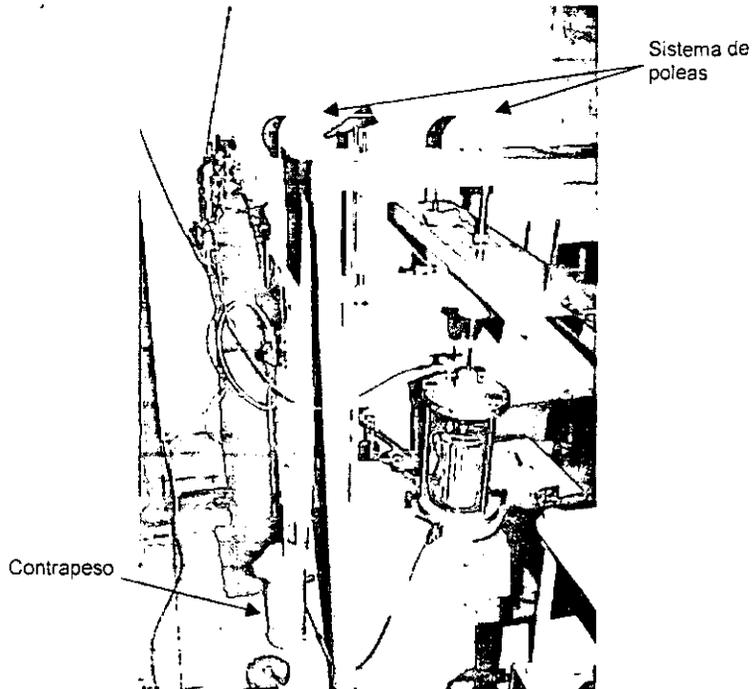


FIGURA 1.3 Sistema de poleas y contrapeso

1.1.3 CÁMARA TRIAXIAL

Es un equipo que cuenta con una celda triaxial constituida por un cilindro de lucita reforzado que soporta presiones confinantes hasta 10 Kg/cm^2 , (figura 1.4), su base y su tapa construidas en acero están sujetas mediante tres barras del mismo material, tanto el pedestal como el cabezal tienen la misma sección transversal que la muestra y poseen navajas radiales con que la fijan, así como piedras porosas que permiten su drenaje. La cámara triaxial queda sujeta a la base inferior del bastidor, impidiéndole cualquier movimiento.

1.1.4 MESA DE REGISTRO

a) base de aluminio

Esta base mide 16 cm de ancho por 49 cm de largo, la cual soporta el peso del sistema registrador. Esta placa se apoya sobre una mesa de madera por medio de 4 tornillos de aluminio de 1.6 cm de diámetro, que permiten nivelar la base perfectamente, (figura 1.5).

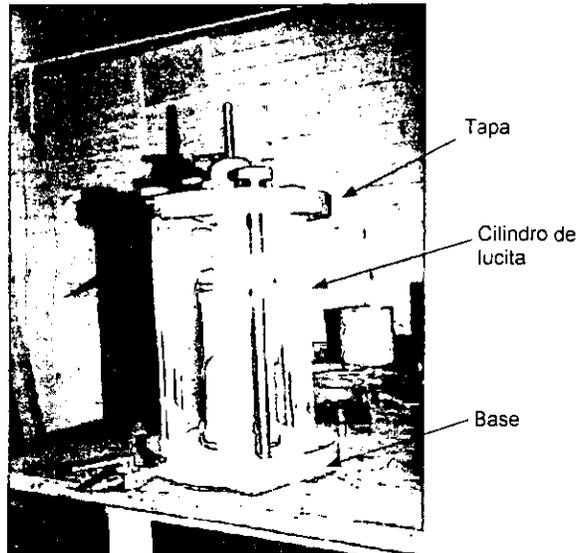


FIGURA 1.4 Cámara triaxial

b) Sistema registrador

Este sistema consiste en un motor que hace girar a una velocidad de 1.5 cm/s aproximadamente a un rodillo de aluminio de 2.5 cm de diámetro y 16.5 cm de largo. La velocidad debe ser compatible con el rango de periodos de vibración que se esperan como respuesta de la probeta de suelo. En estos rodillos se coloca una tira de papel albanene milimétrico de 15 cm de ancho por 120 cm de largo, obteniéndose con ello la gráfica de un sistema amortiguado.

c) Marcador de tiempo

El marcador de tiempo transforma pulsaciones eléctricas en pulsaciones mecánicas por medio de una extensión de cobre de 6 cm de largo, donde se coloca un bolígrafo que registra dichas pulsaciones sobre el papel. El tiempo de pulsaciones es de 1 s, aproximadamente.

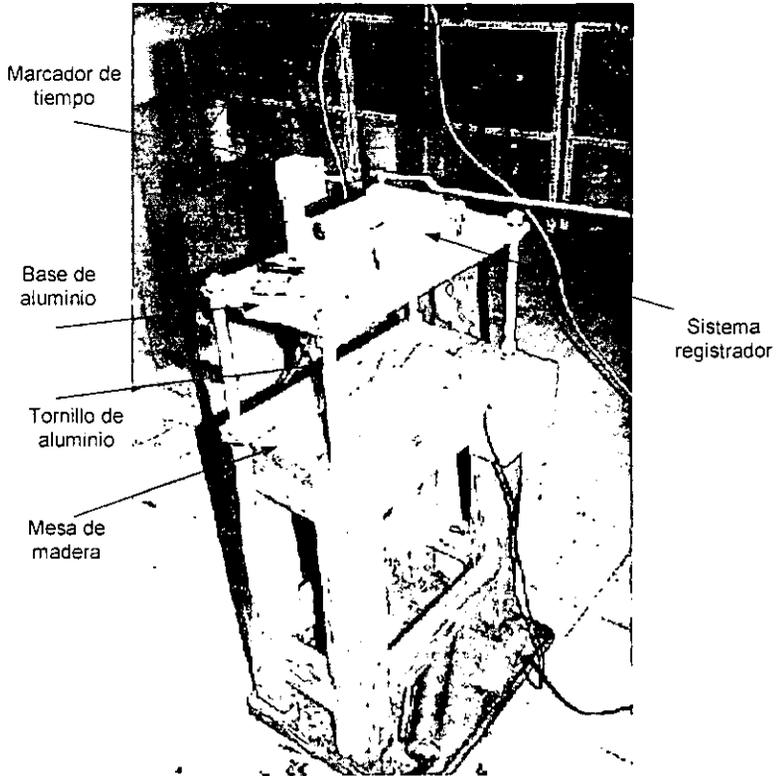


FIGURA 1.5 Mesa de registro

1.1.5 EQUIPO PARA SATURACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRA

Este equipo consta de las siguientes partes (figura 1.5):

a) Regulador de presión **A**

Este regulador **A** permite fijar la presión de confinamiento, en kg/cm^2 , a la cámara triaxial.

b) Regulador de presión **B**

El regulador **B** permite fijar la contrapresión en kg/cm^2 .

c) Bureta

Este instrumento controla los cambios volumétricos, en cm^3 , que ocurren en la muestra saturada durante la consolidación, y que se reflejan en el ascenso y descenso de una columna de agua.

d) Manómetro A y B

Indican la presión aplicada a la muestra.

e) Vaso de policarbonato

Este vaso sirve para retener agua en cantidad suficiente durante la consolidación. Además, actúa como interfase entre la presión del aire y el volumen de agua que circula hacia la muestra.

La posición del vaso está en función de la altura en que se colocará la muestra, se asegura que se genere un gradiente hidráulico entre el vaso y la muestra, durante la consolidación. El gradiente hidráulico es inversamente proporcional a la permeabilidad del material.

f) Depósito de agua desaireada

Abastece de agua desaireada al vaso de policarbonato.

g) Transductor

Con el transductor se determina la presión de poro que se genera en la muestra debido a la consolidación, enviándolo en forma de voltaje al convertidor de señal.

h) Convertidor de señal

Este instrumento convierte el voltaje enviado por el transductor a unidades de ingeniería (kg/cm^2), mostrándolos en una pantalla digital.

En la figura 1.6 se muestra un esquema del péndulo de torsión de vibración libre, en la parte superior se encuentra el anclaje del contrapeso sujeto al vástago superior. La canal sirve de brazo para transmitir el momento de torsión. El vástago superior es el que transmite la vibración torsional libre por medio del broquero ajustado al vástago inferior. El broquero que sirve para unir al vástago superior con el vástago inferior. El contrapeso en la parte derecha y la cámara triaxial en la parte inferior de la figura.

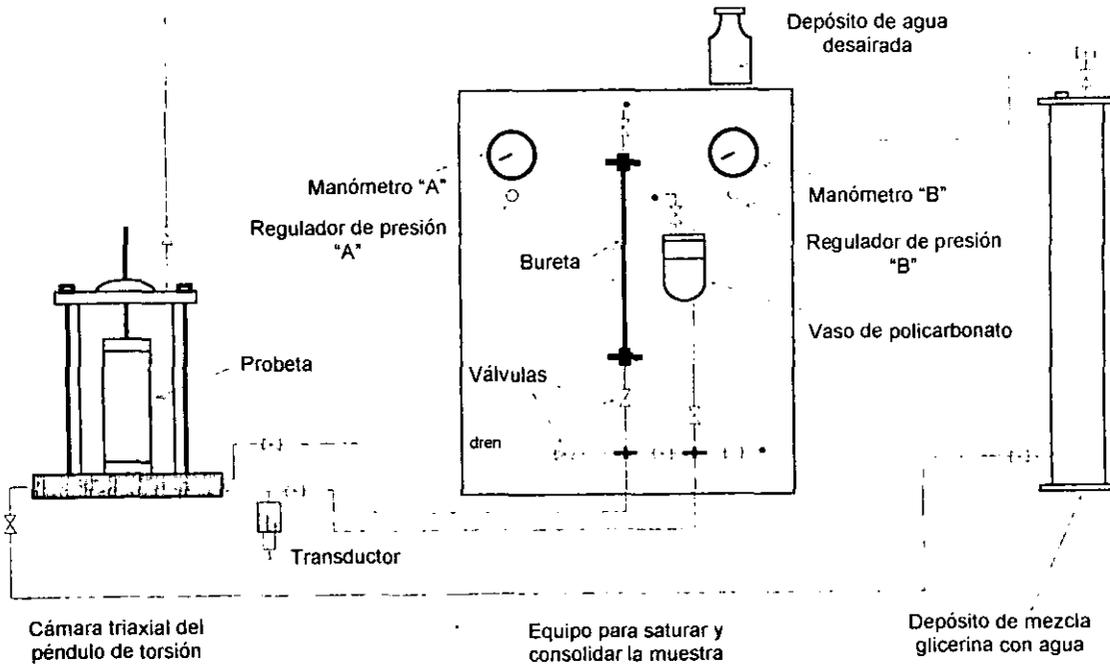


FIGURA 1.5 Equipo de saturación y consolidación de la muestra

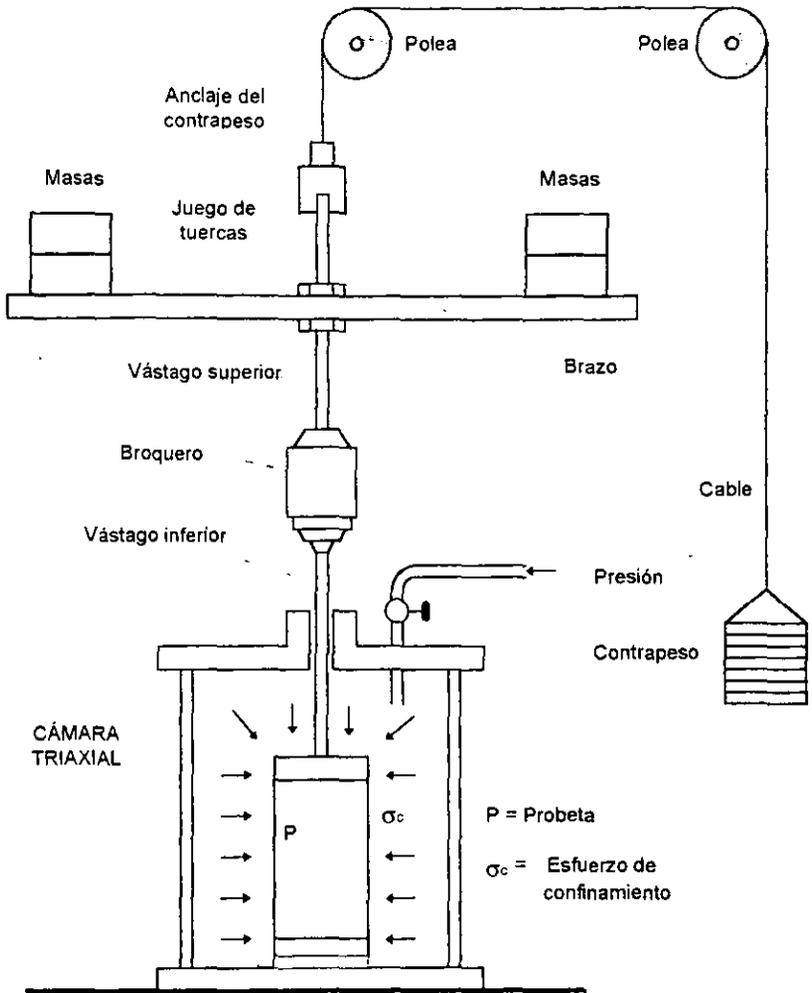


FIGURA 1.6 Péndulo de torsión de vibración libre

1.2 CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La teoría del instrumento se basa en la segunda Ley de Newton; $F = ma$.

El péndulo de torsión de vibración libre se considera un sistema (suelo-aparato). El momento polar de inercia, J_s , representa la masa del sistema. La rigidez del sistema se define como K_s .

La teoría no se basa en un movimiento armónico simple, ya que el sistema absorbe energía por medio de un elemento Newtoniano equivalente a un amortiguador (figura 1.7). Se considera entonces un movimiento armónico simple con amortiguamiento.

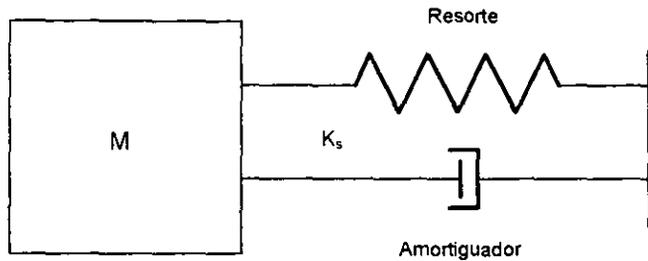


FIGURA 1.7 Vibración amortiguada

De la segunda ley de Newton y del diagrama de cuerpo libre del sistema; se establece la ecuación de equilibrio dinámico del sistema:

$$J_s \ddot{\theta} + C \dot{\theta} + K_s \theta = 0 \quad (1)$$

Donde:

J_s = momento polar de inercia del sistema, en kg cm s^2

c = coeficiente de amortiguamiento

K_s = rigidez del sistema, en kg/cm^2

La solución de esta ecuación diferencial es una función del valor C , dependiendo de que este valor sea mayor o menor que el amortiguamiento crítico:

$$C_c = 2 J_s \omega_s \quad (2)$$

Donde:

C_c = coeficiente de amortiguamiento crítico
 ω_s = frecuencia circular del sistema, en rad/s

La relación $C/C_c = \zeta$ queda definida como una fracción del amortiguamiento crítico o bien una relación de amortiguamiento. El valor real que representa la vibración libre amortiguada se obtiene para $\zeta \leq 1$. Cuando $\zeta = 1$ no se produce vibración, lo que implica que la distorsión ocasionada al sistema regrese a su posición original sin vibración.

Cuando $\zeta \leq 1$ la ecuación diferencial (2) se satisface por:

$$\theta = A e^{-\zeta \omega_s t} (\cos \omega_{sd} \cdot t) \quad (3)$$

Donde:

ζ_s = relación de amortiguamiento
 ω_s = frecuencia circular libre del sistema, en rad/s
 ω_{sd} = frecuencia circular amortiguada del sistema, en rad/s
 t = variable independiente tiempo, en s

La ecuación (3) se obtiene al sustituir las condiciones iniciales; $t_0 = 0$ y $\theta_0 = \theta_s$, con ello se obtiene el desplazamiento máximo, θ_s , que se presenta en un tiempo determinado. A dicho intervalo de tiempo se le denomina período de vibración.

La frecuencia circular amortiguada del sistema vale:

$$\omega_{sd}^2 = \omega_s^2 (1 - \zeta_s^2) \quad (4)$$

Del a ecuación (3) podemos conocer la amplitud máxima del movimiento:

$$\theta_n = A e^{-\zeta_s \omega_s (n T_{sd})} \quad (5)$$

Donde:

$n T_{sd}$ = Tiempo correspondiente a la n ésima cresta del movimiento

Considerando dos vibraciones sucesivas obtenemos:

$$\frac{\theta_n}{\theta_{n-1}} = e^{-\zeta_s \omega_s T_{sd}} \quad (6)$$

De la ecuación (4):

$$\frac{T_{sd}}{T_s} = \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta_s^2}} \quad (7)$$

Al sustituir la ecuación (7) en (6), se obtiene.

$$\frac{\theta_n}{\theta_{n-1}} = e^{-\frac{2\pi\zeta_s}{1-\zeta_s^2}} \quad (8)$$

De donde

$$\ln \frac{\theta_n}{\theta_{n-1}} = \frac{2\pi\zeta_s}{1-\zeta_s^2} = \Delta \quad (9)$$

Al término $\frac{2\pi\zeta_s}{1-\zeta_s^2}$ se le conoce como decremento logarítmico, Δ .

Conociendo el valor del decremento logarítmico, se calcula la relación de amortiguamiento del sistema:

$$\zeta_s^2 = \frac{\Delta^2}{(2\pi)^2 + \Delta^2} \quad (10)$$

La teoría del péndulo de torsión se basa en la respuesta del sistema vibratorio formado por el sistema la probeta de suelo y el instrumento. Llamemos K_p y K_a las constantes dinámicas de resorte de la probeta e instrumento, respectivamente. Y K_s la del sistema. El impulso de momento dado al brazo (figura 1.8) es:

$$M_s = F \cdot \lambda = K_s \cdot \theta_s \quad (11)$$

También se obtienen de la siguientes forma:

$$F \cdot \lambda = K_p \cdot \theta_p \quad \text{y} \quad F \cdot \lambda = K_a \cdot \theta_a \quad (12)$$

Donde:

M_s = momento torsionante, en kg cm

F = fuerza aplicada al brazo, en kg

λ = distancia del centro de rotación al punto donde se aplica el impulso, en cm

θ_s = amplitud del sistema

θ_a = amplitud del aparato

θ_p = amplitud de la muestra de suelo

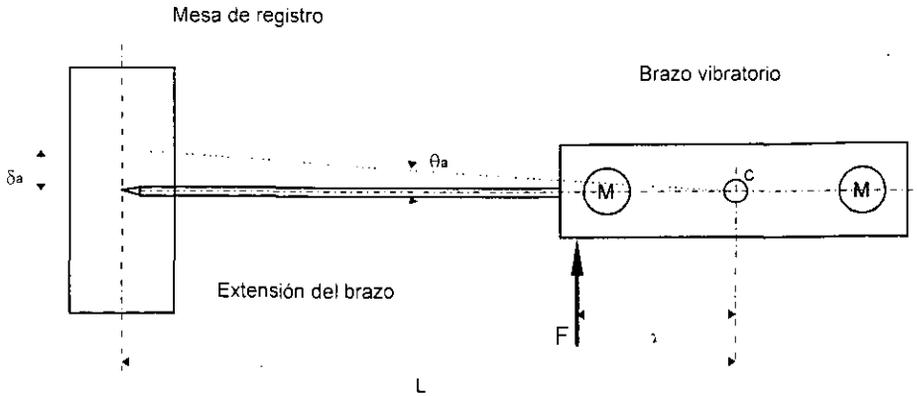


FIGURA 1.8 Brazo vibratorio

donde:

c = centro de rotación

L = longitud desde el centro de rotación al punto donde se registra el movimiento δ_a , en cm

δ_a = deformación lineal

La amplitud de la rotación del sistema (figura 1.9) es:

$$\theta_s = \theta_p + \theta_a \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en (12) se obtiene:

$$\theta_s = \frac{K_p + K_a}{K_p \cdot K_a} F \cdot \lambda \quad (14)$$

Y usando la ecuación (11) se obtiene:

$$K_s = \frac{K_p \cdot K_a}{K_p + K_a} \quad (15)$$

De la segunda ley de Newton se tiene que la aceleración circular del sistema esta dada por:

$$\dot{\theta}_s = \theta_s \cdot \omega_s^2 \quad (16)$$

Al hacer la sustitución de la ecuación (16) en (11), se tiene que:

$$M_t = \theta_t \cdot \omega_t^2 \cdot J_t \quad (17)$$

Donde:

J_t = momento polar de inercia del sistema, en kg cm s^2

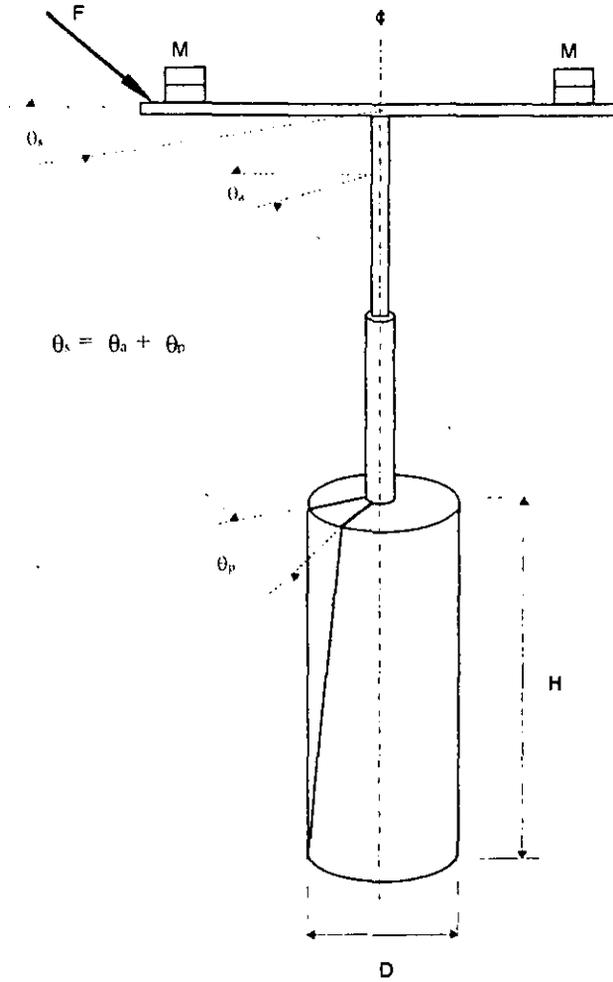


FIGURA 1.9 Amplitud de la rotación

El módulo de elasticidad al esfuerzo cortante, puede obtenerse de la teoría de la elasticidad, para ello hay que recordar que la distribución de esfuerzos en la sección transversal de la probeta (figura 1.10). La deformación unitaria por cortante varía linealmente a lo largo de cualquier línea radial desde cero en el eje de la sección transversal hasta un máximo en la superficie. Tomando en cuenta las consideraciones de que la sección es circular, el material es homogéneo y se comporta elásticamente.

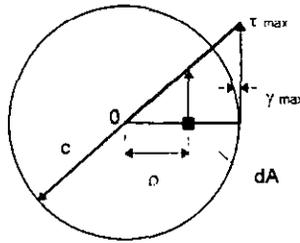


FIGURA 1.10 Diagrama de esfuerzos cortantes de la sección transversal de la probeta

El esfuerzo cortante se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_{\max} = \frac{M_s \cdot c}{J_p} \quad (18)$$

Donde:

τ_{\max} = esfuerzo cortante máximo, en kg/cm^2

M_s = momento de torsión, en kg cm^2

c = radio de la sección transversal de la probeta, en cm

J_p = momento polar de inercia de la probeta, en kg cm^2

Si el materia es elástico- lineal, entonces se aplica la ley de Hooke (el esfuerzo cortante es proporcional a la deformación unitaria por cortante):

$$\tau_{\max} = \mu \gamma_{\max} \quad (19)$$

Donde:

γ_{\max} = distorsión máxima

μ = módulo de rigidez dinámico al esfuerzo cortante, en kg/cm^2

De la definición de deformación unitaria por cortante se puede escribir finalmente que:

$$\tau_{\max} = \frac{\theta_p \cdot c}{h} \quad (20)$$

Donde:

h = altura de la probeta, en cm

θ_p = deformación angular de la probeta

Al sustituir la ecuación (20) en (19), se tiene que:

$$\tau_{\max} = \frac{\theta_p \cdot c \cdot \mu}{h} \quad (21)$$

Como nos referimos a la probeta de sección circular, el momento polar de inercia vale:

$$J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (22)$$

Al igualar la ecuación (18) con (21) y despejando μ se tiene:

$$\mu = \frac{M_s \cdot h}{J_p \cdot \theta_p} \quad (23)$$

Al despejar el término M_s/θ_p de la ecuación (23) y considerando:

$$M_s = K_p \theta_p$$

se tiene:

$$K_p = \frac{\mu \cdot J_p}{h} \quad (24)$$

donde:

$$C_p = \frac{J_p}{h} \quad (25)$$

Al sustituir la ecuación (25) en (24):

$$K_p = \mu \cdot C_p \quad (26)$$

Además, si consideramos:

$$K_s = J_s \cdot \omega_s^2 \quad (27)$$

$$K_s = J_s \cdot \omega_s^2 \quad (28)$$

Al sustituir las ecuaciones (26), (27) y (28) en la ecuación (15) y despejando μ se tiene:

$$\mu = \frac{\omega_s^2 \cdot \omega_a^2}{\omega_s^2 J_a - \omega_s^2 J_s} \cdot \frac{J_a \cdot J_s}{C_p} \quad (29)$$

Como el momento polar de inercia de las masas de la probeta es muy pequeño con respecto al del aparato, se considera entonces que $J_s = J_a$, y la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{\omega_s^2}{1 - \frac{\omega_s^2}{\omega_a^2}} \cdot G \quad (30)$$

donde:

$$G = \frac{J_a}{C_p} = \frac{J_a}{\left(\frac{J_p}{h} \right)} \quad (31)$$

De la calibración del aparato se obtiene la frecuencia circular libre amortiguada:

$$\omega_{sd}^2 = \omega_s^2 (1 - \zeta_s^2) \quad (32)$$

$$\omega_{sd}^2 = \omega_a^2 (1 - \zeta_a^2) \quad (33)$$

Sustituyendo los valores de las ecuaciones (32) y (33) en (30); obtenemos finalmente el módulo de rigidez dinámico al esfuerzo cortante:

$$\mu = \frac{\omega_{sd}^2 \cdot G}{\left(1 - \zeta_s^2 \right) - \left(1 - \zeta_a^2 \right) \left(\frac{\omega_{sd}}{\omega_{sd}} \right)^2} \quad (34)$$

La relación de amortiguamiento, ζ_s . Se obtiene a partir del momento máximo (ecuación 17):

$$M_s = (\theta_s + \theta_p) \cdot \omega_s^2 \cdot J_s \quad (35)$$

Se tienen las ecuaciones:

$$M_s = K_s \cdot \theta_s \quad \text{y} \quad J_s = J_s \quad (36)$$

Al sustituir la ecuación (36) en (37) se tiene:

$$\frac{1}{\omega_s^2} = \frac{J_s}{K_s} + \frac{J_a}{K_p} \quad (37)$$

Además, si hacemos las siguientes consideraciones:

$$\text{Si } K_p \rightarrow \infty, \text{ entonces } \frac{K_s}{J_s} = \omega_s^2 \quad (38)$$

$$\text{Si } K_p \rightarrow \infty, \text{ entonces } \frac{K_p}{J_s} = \omega_p^2 \quad (39)$$

se tiene:

$$\frac{1}{\omega_p^2} = \frac{1}{\omega_s^2} - \frac{1}{\omega_a^2} \quad (40)$$

Tomando en cuenta las frecuencias circulares amortiguadas:

$$\frac{1}{\omega_{pd}^2} \approx \frac{1}{\omega_{sd}^2} + \frac{1}{\omega_{ad}^2} \quad (41)$$

Considerando las ecuaciones (32) y (33), finalmente la relación de amortiguamiento queda de la siguiente forma:

$$\zeta_p^2 = \frac{\zeta_s^2 - \zeta_a^2 \left(\frac{\omega_{sd}}{\omega_{ad}} \right)^2}{1 - \left(\frac{\omega_{sd}}{\omega_{ad}} \right)^2} \quad (42)$$

Para cierta distorsión angular inicial γ_p , se obtiene el valor de μ y ζ_p , para cada diferente esfuerzo de confinamiento σ_c . El esfuerzo cortante máximo en la probeta que tiene de radio $D/2$ es:

$$\tau = \frac{F \cdot \lambda}{J_p} \cdot \frac{D}{2} \quad (43)$$

Además, por la Ley de Hooke sabemos que $\gamma_p = \frac{\tau}{\mu}$; sustituyéndola en la ecuación (43) se tiene:

$$\gamma_p = \frac{D}{2 \cdot J_p \cdot \mu} \cdot F \cdot \lambda \quad (44)$$

El impulso de momento esta dado por:

$$F \cdot \lambda = \theta_s \cdot K_s \quad (45)$$

Además:

$$K_s = \omega_s^2 \cdot J_s$$

$$\theta_s = \frac{\delta_s}{L}$$

Al sustituir la ecuación (45) en (44) se tiene:

$$\gamma_p = \frac{D \cdot J_s}{2 \cdot J_p \cdot \mu} \cdot \frac{\omega_s^2 \cdot \delta_s}{L} \quad (46)$$

Finalmente la distorsión angular se define como:

$$\gamma_p = \frac{16 \cdot J_s}{\pi \cdot D^3 \cdot L} \cdot \frac{\omega_{sd}^2}{(1 - \zeta_s^2)} \cdot \frac{\delta_s}{\mu} \quad (47)$$

1.3 PROGRAMACIÓN DE UNA PRUEBA¹

1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

Se monta una probeta de suelo cilíndrica de aproximadamente 7 cm de diámetro por 17 cm de altura. Se somete a un esfuerzo de confinamiento equivalente al rango de esfuerzos efectivos que presenta en campo. La muestra se sujeta en ambos extremos con cabezas provistas de cuchillas que se hincan en la muestra de suelo.

Se aplica un momento de torsión a la muestra mediante un impulso al brazo (figura 1.9) . Para cada impulso se registra la vibración libre amortiguada en la mesa registradora.

De la interpretación de estas gráficas de respuesta se obtiene:

¹ Se describe sólo un resumen, el detalle completo de la programación se puede consultar en la tesis " Cálculo del módulo de rigidez..." (referencia 1)

a) El período de vibración del sistema (T_{sd}) y la relación de amortiguamiento del sistema (ζ_{sd}).

b) Los parámetros del suelo:

- Relación de amortiguamiento del suelo:

$$\zeta_p^2 = \frac{\zeta_{sd}^2 - \zeta_a^2 \left(\frac{T_a}{T_{sd}} \right)^2}{1 - \left(\frac{T_a}{T_{sd}} \right)^2}$$

- Módulo de rigidez dinámico al esfuerzo cortante del suelo, en kg/cm^2 :

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot G}{(1 - \zeta_{sd}^2) \cdot T_{sd}^2 - (1 - \zeta_a^2) \cdot T_a^2}$$

Donde G es una constante geométrica y vale:

$$G = \frac{32 \cdot J_s}{\pi \cdot D^4}$$

1.3.2 CALIBRACION DEL EQUIPO²

La calibración del equipo se realiza por medio de un cilindro de acero de 7 cm de diámetro por 15 cm de altura. De la calibración se obtienen los siguientes parámetros:

Período de vibración del aparato (T_a), en s
 Relación de amortiguamiento del aparato (ζ_a), en %
 Constante dinámica del resorte (k_a)

1.3.3 LABRADO DE LA MUESTRA

Se trabaja generalmente con material inalterado, utilizando el cortador con alambre y el tomo para lograr muestras cilíndricas de 7 cm de diámetro por 17 cm de altura, aproximadamente.

² En el capítulo 2 se describe con detalle el proceso de calibración del equipo

1.3.4 PROPIEDADES INDICE

Es necesario obtener las propiedades índice, para determinar su clasificación, y los esfuerzos que soporta el material ensayado.

Las propiedades índice que se determinan son:

- a) Límite plástico (LP)
- b) Límite líquido (LL)
- c) Densidad de sólidos (S_s)
- d) Resistencia a compresión simple (q_u)

1.3.5 MONTAJE DE LA MUESTRA

Se anota en un formato el sondeo, número de muestra y profundidad a la que fue extraída. Se obtiene el contenido de agua de la parte superior e inferior de la muestra. Se monta en la cámara triaxial verificando que la cabeza y la base se encuentren perfectamente fijadas.

Se determina el peso de la probeta y se mide la geometría de la misma (altura y diámetro). Se fija la cámara en la base del péndulo. Se llena la cámara con una mezcla de glicerina y agua o simplemente agua (dejando un colchón de aire) y finalmente se satura la muestra.

1.3.6 SATURACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRA

a) Saturación de la muestra

Una vez montada la muestra en la cámara triaxial, se somete a un proceso de saturación el cual consiste en generar un gradiente hidráulico al circular agua desaireada en la muestra. Y en función de éste gradiente se establece la magnitud de la presión confinante y la contrapresión.

La altura de la columna de mercurio permite precisar la presión confinante (figura 1.11).

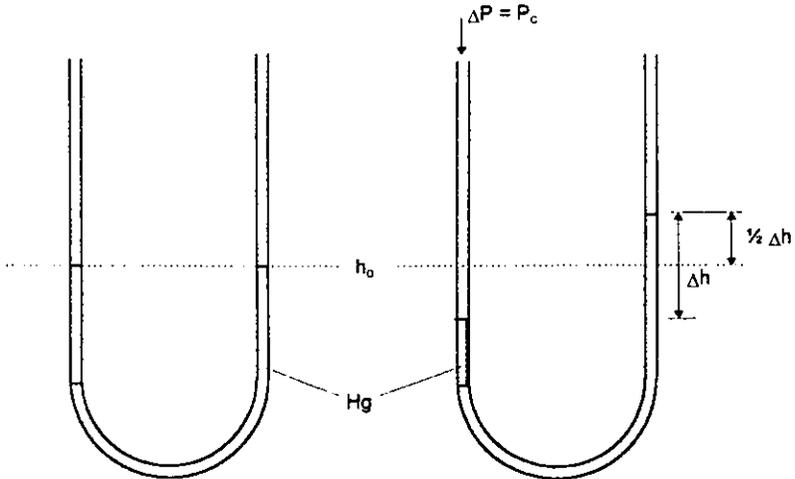


FIGURA 1.11 Manómetro de mercurio. (al aplicar una presión de confinamiento se eleva el nivel de la columna de mercurio)

La altura total vale:

$$h = h_0 + \frac{1}{2} \Delta h$$

Donde:

h = altura de la columna de mercurio, en cm
 h_0 = altura inicial en el manómetro de mercurio, en cm
 Δh = incremento de altura en el manómetro, en cm

Además, se tiene que:

$$\Delta P = \Delta h \cdot \gamma_{Hg}$$

de la ecuación anterior se despeja Δh :

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\gamma_{Hg}} = \frac{P_c}{\gamma_{Hg}}$$

Donde :

ΔP = incremento de presión, en kg/cm^2
 P_c = presión de confinamiento, en kg/cm^2
 γ_{Hg} = peso específico del mercurio, en kg/cm^3

finalmente se tiene que:

$$h = h_0 + \frac{P_c}{2 \gamma_{Hg}}$$

La presión de confinamiento siempre será mayor a la contrapresión.

El grado de saturación de la muestra, se determina también, mediante la B de Skempton:

$$B = \frac{\Delta V}{\Delta \sigma}$$

Donde:

ΔV = incremento en la presión de poro, en kg/cm^2

$\Delta \sigma$ = incremento de esfuerzo de confinamiento, en kg/cm^2

b) Consolidación de la muestra

Se determinan los esfuerzos de consolidación, (están en función del esfuerzo efectivo a que estuvo sometida la muestra en campo). Se establece la gráfica de consolidación.

1.3.7 ESTIMACIÓN DE LA DEFLEXIÓN

Antes de realizar la prueba se calcula la magnitud de la deflexión que debe darse en la mesa registradora, con el fin de evitar rebasar la resistencia al esfuerzo cortante del material. Se calcula de la siguiente forma:

$$\delta_{max} = \frac{0.5 \times q_u \times h \times L}{\mu \times D}$$

Donde:

δ_{max} = deflexión máxima, en cm

q_u = resistencia a compresión simple, en kg/cm^2

h = altura de la probeta, en cm

L = longitud del eje del péndulo de torsión al extremo final de la extensión del brazo; 93.1 cm

$\mu = 30 q_u$ en kg/cm^2

D = diámetro de la muestra, en cm

Nota: El valor de $\mu = 30 q_u$ es estadístico.

CAPÍTULO II: Calibración del equipo

2.1 CALCULO DEL MOMENTO POLAR DE INERCIA DE MASA

El momento polar de inercia está definido como el segundo momento de una área respecto al polo o eje z. Para mostrar como se define consideremos el área A, (figura 2.1), ubicada en el plano x-y. Por definición, los momentos de inercia del elemento diferencial dA respecto a los ejes x y y son $dI_x = y^2 dA$ y $dI_y = x^2 dA$, respectivamente. Para toda el área, el momento de inercia se determina mediante integración, es decir,

$$I_x = \int_A y^2 dA$$

$$I_y = \int_A x^2 dA$$

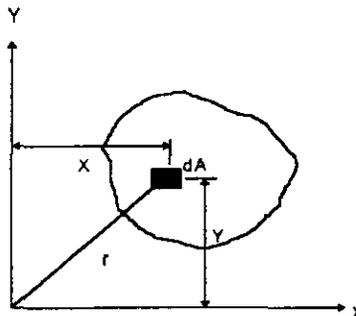


FIGURA 2.1 Elemento diferencial

También puede formularse el segundo momento del elemento diferencial respecto al polo o eje z. Este se conoce como el MOMENTO POLAR DE INERCIA, $dI_z = r^2 dA$. Aquí, r es la distancia perpendicular del polo (eje z) al elemento dA . Para toda el área el momento polar de inercia es:

$$J_z = \int r^2 dA$$

Una relación entre I_x , I_y y J_z es posible puesto que $r^2 = x^2 + y^2$, (figura 2.1). Las unidades del momento polar de inercia están dadas en cm^4 .

Para el cálculo del momento polar de inercia se dividió el sistema excitador en elementos, en el que se definieron las dimensiones y distancias al eje z. Se realizó la suma algebraica de los elementos resultantes (positivos y negativos) y se obtuvo el valor total del sistema.

La forma del elemento y el momento polar de inercia que se utiliza se describe a continuación:

Figura	Esquema	Momento polar de inercia, en kg cm s ²
Cilindro		$J_z = \frac{1}{2} mr^2$
Cono		$J_z = \frac{3}{10} mr^2$
Paralelepípedo		$J_z = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$

2.1.1 ANCLAJE DEL CONTRAPESO

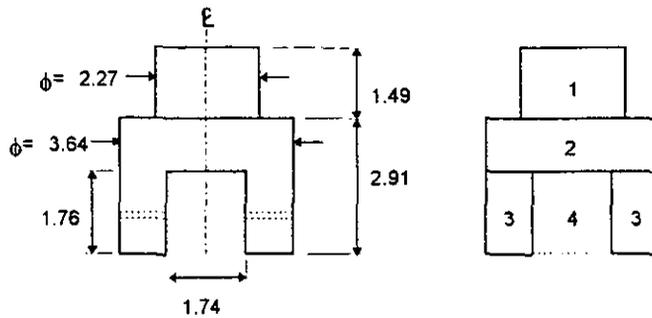


FIGURA 2.2 Anclaje del contrapeso

E	Figura	a (cm)	b (cm)	h (cm)	r (cm)	d (cm)	PV (g/cm ³)	V (m ³)
1	Cilindro			1.490	1.138	2.275	7.700	6.057
2	Cilindro			1.150	1.819	3.637	7.700	11.947
3	Cilindro			1.760	1.819	3.637	7.700	18.285
4	Paralelep.	1.740	3.170	1.760			-7.700	9.708
Total								45.997
	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J_z (kg cm s ²)					
	0.047	4.754E-05	3.076E-05					
	0.092	9.378E-05	1.551E-04					
	0.141	1.435E-04	2.373E-04					
	0.075	-7.620E-05	-8.303E-05					
	0.205	2.086E-04	3.401E-04					

TABLA 2.1 Cálculo del momento polar de inercia del anclaje del contrapeso

2.1.2 VASTAGO SUPERIOR Y BROQUERO

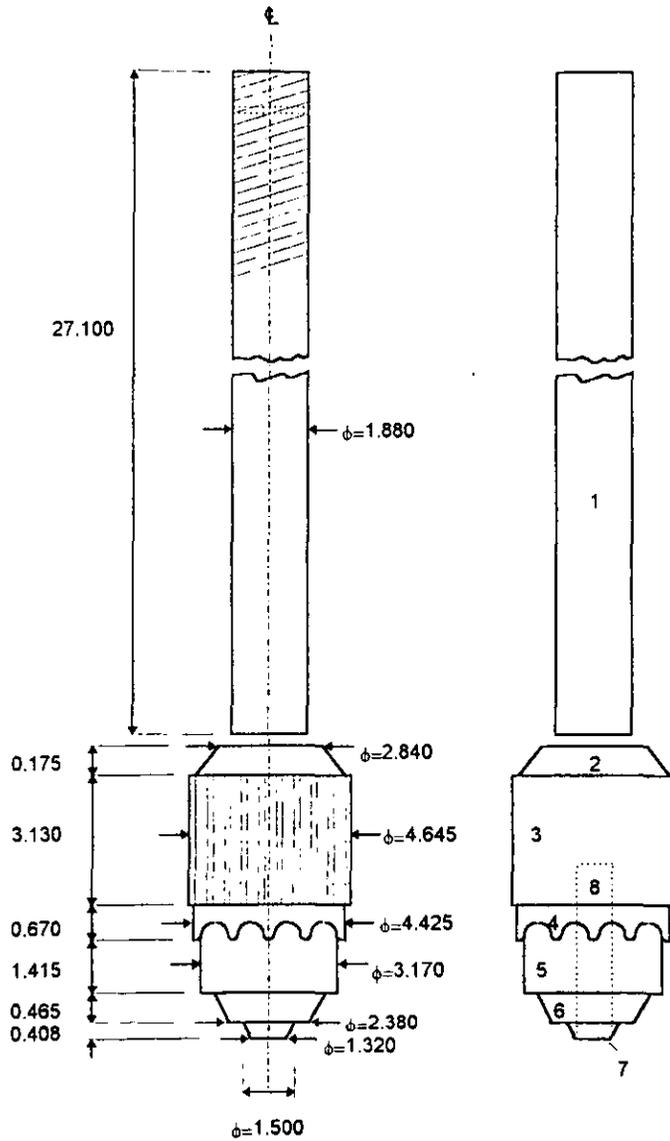


FIGURA 2.3 Vástago superior y broquero

E	Figura	h (cm)	r (cm)	d (cm)	PV (g/cm ³)	V (cm ³)	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J _z (kg cm s ²)
1	Cilindro	27.100	0.940	1.880	7.700	75.227	0.579	5.905E-04	2.609E-04
2	Cono	1.996	2.213	4.425	7.700	10.232	0.079	8.031E-05	1.179E-04
2'	Cono	0.458	1.420	2.840	-7.700	0.967	-0.007	-7.591E-06	-4.592E-06
3	Cilindro	3.130	2.323	4.645	7.700	53.040	0.408	4.163E-04	1.123E-03
4	Cilindro	0.470	2.213	4.425	7.700	7.228	0.056	5.673E-05	1.389E-04
5	Cilindro	1.415	1.585	3.170	7.700	11.168	0.086	8.786E-05	1.101E-04
6	Cono	1.865	1.585	3.170	7.700	4.906	0.038	3.851E-05	2.902E-05
6'	Cono	0.465	1.190	2.380	-7.700	0.690	-0.005	-5.412E-06	-2.299E-06
7	Cono	3.400	0.750	1.500	7.700	2.003	0.015	1.572E-05	2.653E-06
7'	Cono	0.408	0.660	1.320	-7.700	0.186	-0.001	-1.461E-06	-1.909E-07
8	Cilindro	4.195	0.660	1.320	-7.700	5.741	-0.044	-4.506E-05	-9.814E-06
Total					171.388	1.203	1.226E-03	1.77E-03	

TABLA 2.2 Cálculo del momento polar de inercia del vástago superior

2.1.3 BRAZO

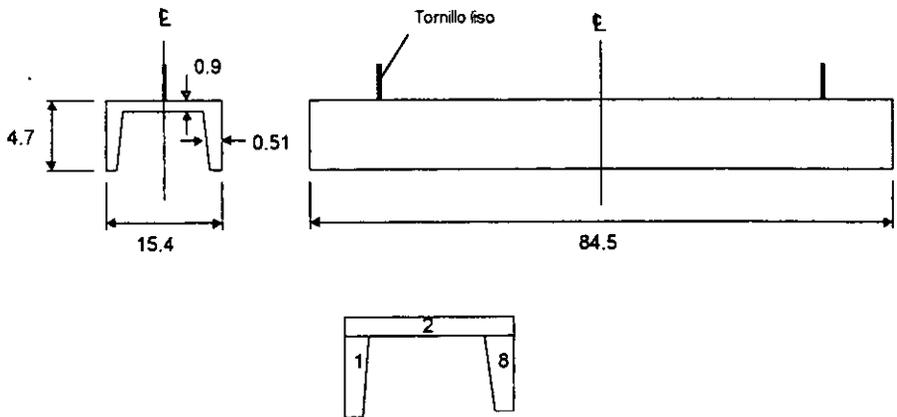


FIGURA 2.4 Brazo

E	Figura	a (cm)	b (cm)	h (cm)	PV (g/cm ³)	V (cm ³)	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J _z (kg cm s ²)
1	Paralelep.	4.190	84.500	0.900	7.700	318.650	2.454	2.501E-03	1.637
2	Paralelep.	0.510	84.500	15.400	7.700	663.663	5.110	5.209E-03	3.203
3	Paralelep.	4.190	84.500	0.900	7.700	318.650	2.454	2.501E-03	1.637
Total						1300.96	10.017	1.021E-02	6.476

TABLA 2.3 Cálculo del momento polar de inercia del brazo

2.1.4 VÁSTAGO INFERIOR

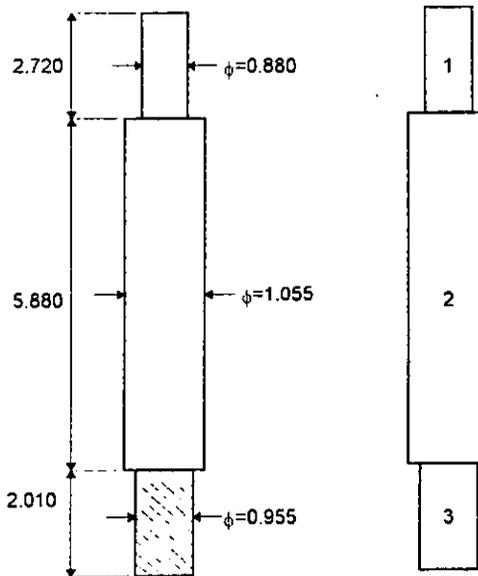


FIGURA 2.5 Vástago inferior

E	Figura	h (cm)	r (cm)	d (cm)	PV (g/cm ³)	V (cm ³)	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J _z (kg cm s ²)
1	Cilindro	2.720	0.440	0.880	7.700	1.654	0.013	1.299E-05	1.257E-06
2	Cilindro	5.880	0.528	1.055	7.700	5.140	0.040	4.035E-05	5.613E-06
3	Cilindro	2.010	0.478	0.955	7.700	1.440	0.011	1.130E-05	1.288E-06
Total						8.234	0.063	6.463E-05	8.158E-06

TABLA 2.4 Cálculo del momento polar de inercia del vástago inferior

2.1.5 SISTEMA DE TUERCAS

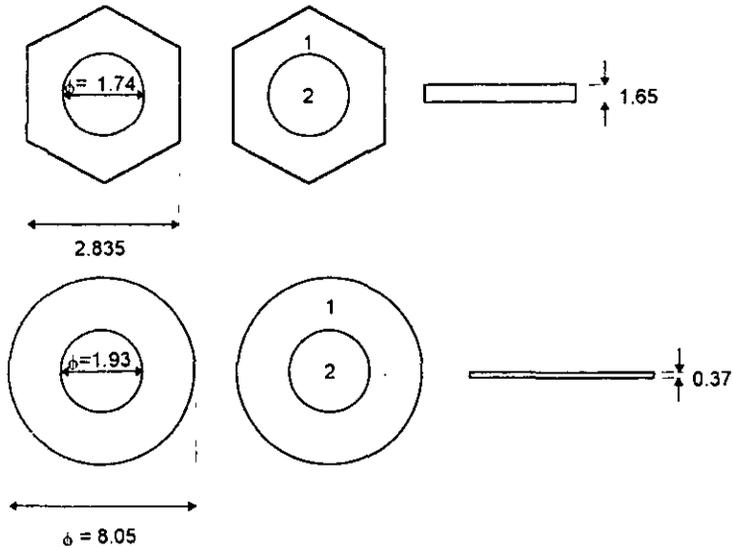


FIGURA 2.6 Sistema de tuercas

a) Tuercas

E	Figura	h (cm)	r (cm)	d (cm)	PV (g/cm ³)	V (cm ³)	W (kg)	m (kg s ² /cm)	J _z (kg cm s ²)
1	Cilindro	1.655	1.637	3.273	7.700	13.925	0.107	1.093E-04	1.464E-04
2	Cilindro	1.655	0.873	1.745	-7.700	3.958	-0.030	-3.107E-05	-1.183E-05
Total						17.883	0.077	7.823E-05	1.345E-04

Se tienen dos tuercas, el momento polar de inercia vale 2.691E-04 kg cm s²

b) Roldanas

E	Figura	h (cm)	r (cm)	d (cm)	PV (g/cm ³)	V (cm ³)	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J _z (kg cm s ²)
1	Cilindro	0.370	4.025	8.050	7.700	18.831	0.145	1.478E-04	1.197E-03
2	Cilindro	0.370	0.965	1.930	-7.700	1.082	-0.008	-8.496E-06	-3.956E-06
Total						19.914	0.137	1.393E-04	1.193E-03

Se tienen dos roldanas, el momento polar de inercia vale 2.386E-04 kg cm s²

TABLA 2.5 Cálculo del momento polar de inercia del sistema de tuercas

2.1.6 RESUMEN DE RESULTADOS

ELEMENTO	J_z (kg cm s ²)
ANCLAJE DEL CONTRAPESO	3.401E-04
VASTAGO SUPERIOR	8.158E-06
BRAZO	6.476
VASTAGO SUPERIOR	1.765E-03
TUERCAS	2.691E-04
ROLDANAS	2.386E-03
Total	6.4807

2.1.7 SISTEMA DE MASAS

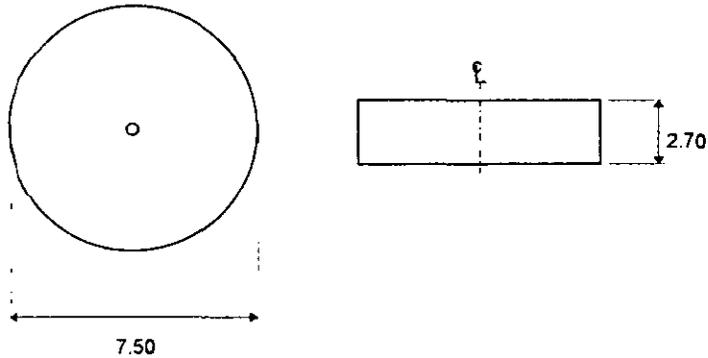


FIGURA 2.7 Sistema de masas

Masa Acum.	Figura	h (cm)	r (cm)	d (cm)	W (Kg)	m (kg s ² /cm)	J_m (kg cm s ²)	J_z (kg cm s ²)
0	Cilindro	0.370	4.025	8.050	0.000	-	-	6.4807
1	Cilindro	0.370	4.025	8.050	1.000	1.019E-03	2.0877	8.5684
2	Cilindro	0.370	4.025	8.050	2.000	2.039E-03	4.1753	10.6560
3	Cilindro	0.370	4.025	8.050	3.000	3.058E-03	6.2630	12.7437
4	Cilindro	0.370	4.025	8.050	4.000	4.077E-03	8.3507	14.8314
5	Cilindro	0.370	4.025	8.050	5.000	5.097E-03	10.4380	16.9187

TABLA 2.6 Cálculo del momento polar de inercia del sistema de masas

donde:

J_m = momento polar de inercia de cada masa

J_z = momento polar de inercia del aparato

$$J_z = \text{Momento polar de inercia del sistema excitador} + J_m$$

6.4807

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA CALIBRACIÓN

La calibración del instrumento se realiza sustituyendo la probeta de suelo con un cilindro de acero, con dimensiones similares a la muestra (7 cm de altura y 15 cm de diámetro). Para propósitos de la calibración éste cilindro se considera indeformable, por lo que su rigidez es infinita.

Los parámetros por determinar son: el período del aparato (T_{ad}), la relación de amortiguamiento (ζ_a) y la constante dinámica del resorte (K_a). Estos valores se calculan para cada masa colocada sobre el brazo.

De la interpretación de resultados se obtienen cuatro diferentes gráficas que definen la correcta calibración del aparato, estas son:

J_a contra N_m
 ζ_a contra N_m
 T_{ad} contra N_m
 K_a contra N_m

Donde:

J_a = momento polar de inercia, en kg cm s^2

ζ_a = relación de amortiguamiento, en %

T_{ad} = período de vibración, en s

K_a = constante dinámica del resorte, en kg/cm

N_m = rigidez del aparato representada por el número de masas

2.2.1 PROCEDIMIENTO

De la gráfica de respuesta de la vibración libre amortiguada del péndulo de torsión (figura 2.8), se obtiene la siguiente información:

L_m = longitud de N_m ciclos, en cm

N_m = número de ciclos

L_p = longitud de N_p pulsos, en cm

N_p = número de pulsos
 t_{ap} = periodo del reloj marcador, en s
 Y_1 = Amplitud de la onda 1, en cm
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1 , en cm

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se selecciona un determinado número de ondas, se mide la longitud que hay a partir de la primera onda a la n ésima onda, a éste valor se le llama L_m , y al número de ondas N_m .
- De la línea que se traza por el marcador de tiempo (parte superior de la figura 2.8), se selecciona un determinado número de pulsos, se mide la distancia que hay entre el primer pulso y el n ésimo, esta distancia se llama L_p , y al número de pulsos N_p . Además, se mide el tiempo total de pulsaciones t_p .
- Se mide la amplitud de la primera y $N_m + 1$ onda; que representan Y_1 y Y_{N_m+1} , respectivamente.

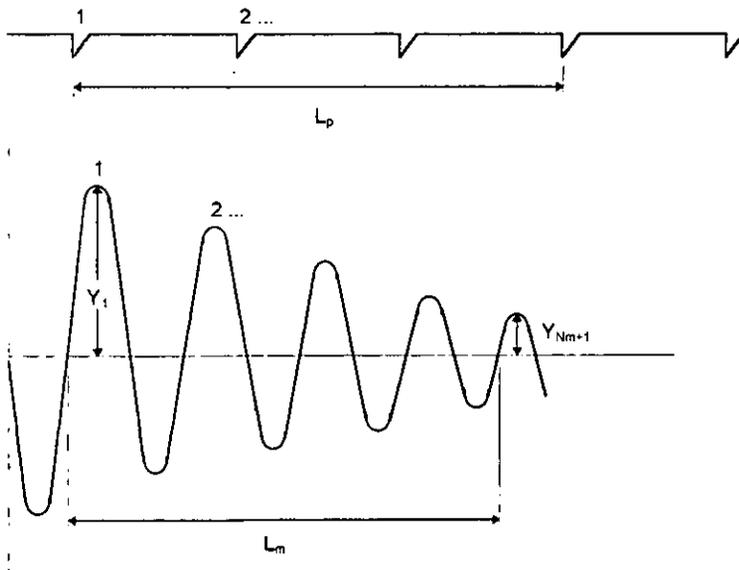


FIGURA 2.8 Vibración libre amortiguada del sistema

- Se calcula el periodo del reloj marcador, dividiendo el tiempo total de las pulsaciones entre el número de pulsaciones:

$$t_{op} = \frac{t_p}{N_p}$$

- Se calcula el período del aparato, en s:

$$T_{ad} = \frac{L_m N_p}{L_p N_m} \cdot t_{op}$$

- La relación de amortiguamiento del aparato, en %:

$$\zeta_a^2 = \frac{\Delta^2}{(2\pi)^2 + \Delta^2}$$

donde el decremento logarítmico Δ se calcula como:

$$\Delta = \frac{t}{N_m} \ln \frac{Y_1}{Y_{N_m+1}}$$

- La frecuencia circular, en s^{-1} :

$$\omega_{ad} = \frac{2\pi}{T_{ad}}$$

- La constante dinámica del resorte, en kg/cm:

$$K_a = \frac{J_a \omega_{ad}^2}{\lambda L}$$

donde:

J_a = momento polar de inercia, en $kg\ cm^2$

λ = distancia del centro de rotación al punto donde se aplica el impulso, en cm

L = distancia del centro de rotación al punto donde se registra el movimiento, en cm

Para cada número de masas se obtienen de 9 a 13 repeticiones. Se calcula un promedio representativo eliminando el menor y mayor valor.

2.2.2 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron dos calibraciones, la primera el 22 de Mayo de 1988, y la segunda el 26 de Mayo del mismo año, variando la rigidez del aparato representada por el número de masas. Los resultados obtenidos de la relación de amortiguamiento, período de vibración del aparato, momento polar de inercia, frecuencia circular y constante dinámica del resorte, se presentan en la tabla 2.7 y 2.8. A éstos resultados se les llama *constantes de calibración*.

Masas	ζ_a (%)	T_{ad} (s)	J_a (kg cm s ²)	ω_a (s ⁻¹)	K_a (kg/cm)
0.	2.8231372	0.3280929	6.4807	19.150627	0.6196
1	3.2181849	0.3647521	8.5684	17.225907	0.6628
2	2.8900195	0.4058353	10.656	15.482107	0.6656
3	3.2698905	0.4349887	12.7437	14.44448	0.6931
4	3.4487021	0.4672624	14.8314	13.446802	0.6991
5	3.7900058	0.492423	16.9187	12.759731	0.7181

TABLA 2.7 Constantes de calibración 1

Masas	ζ_a (%)	T_{ad} (s)	J_a (kg cm s ²)	ω_a (s ⁻¹)	K_a (kg/cm)
0	2.73818540	0.3230389	6.4807	19.450238	0.6391
1	2.80230056	0.3679267	8.5684	17.077271	0.6514
3	2.56143068	0.44158150	12.7437	14.228824	0.6559
5	2.56070445	0.5257453	16.9187	11.951004	0.6299

TABLA 2.8 Constantes de calibración 2

A partir de esta información se grafican los resultados de las dos calibraciones. Se ajustan a una curva de tipo lineal.

a) J_a contra N_m

En la figura 2.9, se presenta la variación del momento polar de inercia, (J_a), con el número de masas. Se observa que conforme aumenta el número de masas en el péndulo de torsión; crece el momento polar de inercia. Los resultados que se obtienen son para las dos calibraciones. La pendiente siempre es positiva.

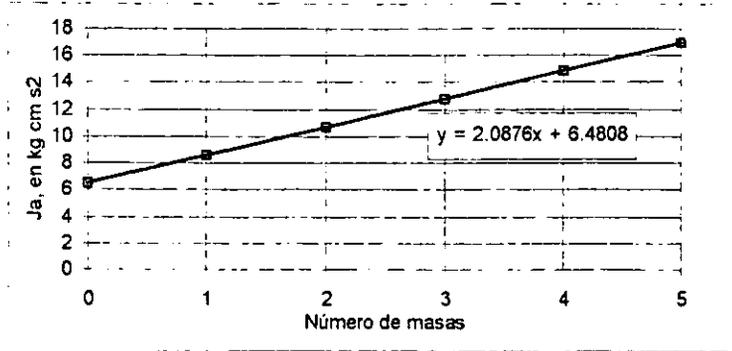


FIGURA 2.9 Variación del momento polar de inercia con el número de masas, para las dos calibraciones

b) ζ_a contra N_m

La variación del amortiguamiento del aparato, (ζ_a), con el número de masas se presenta en la figura 2.10. Para la calibración 1; se observa que a medida que aumenta el número de masas, aumenta también, el amortiguamiento. En cambio, para la calibración 2; el amortiguamiento disminuye conforme se aumenta el número de masas. La tendencia que se espera tenga el péndulo de torsión corresponde al aumento del amortiguamiento conforme aumenta el número de masas (una pendiente positiva).

El comportamiento de la calibración 2, no es el esperado, puede ser factor suficiente para descartar los valores obtenidos.

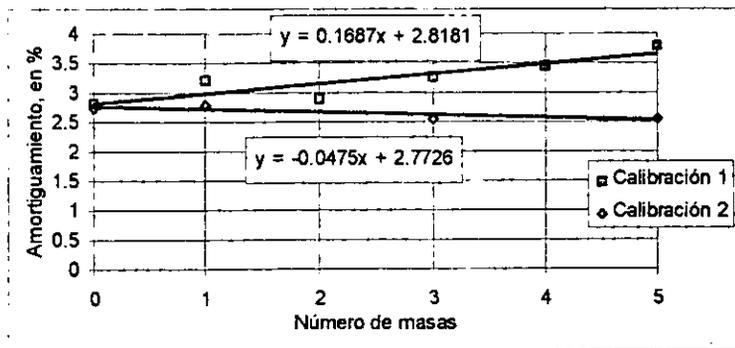


FIGURA 2.10 Variación del amortiguamiento con el número de masas, para dos calibraciones diferentes

c) T_{ad} contra N_m

La variación del periodo de vibración del aparato, (T_{ad}), con el número de masas se presenta en la figura 2.11. Para la calibración 1 y 2; el comportamiento y los valores que presentan, casi son los mismos. Al aumentar el número de masas, aumenta el periodo de vibración.

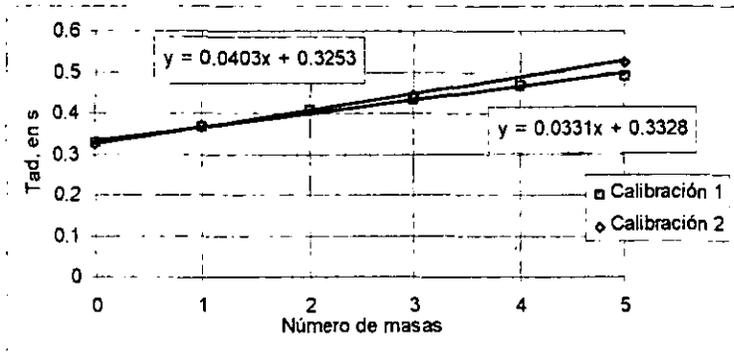


FIGURA 2.11 Variación del periodo de vibración del aparato con el número de masas

d) K_a contra N_m

los resultados que se obtienen para la calibración 1; muestran un comportamiento lineal, es decir, al aumentar el número de masas, aumenta la constante dinámica de resorte, (K_a). Muy diferente es el comportamiento que presenta la calibración 2; que tiende a disminuir a medida que aumenta el número de masas. En la figura 2.12, se presenta la variación de la constante dinámica de resorte, (K_a), con el número de masas.

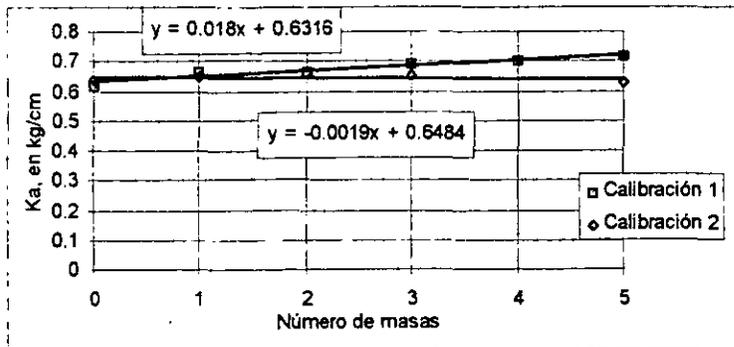


FIGURA 2.12 Variación de la constante dinámica de resorte con el número de masas

Del análisis de las cuatro gráficas anteriores se concluye que la calibración 1 presenta un mejor comportamiento que la calibración 2. El factor más importante que determina esta decisión, es la variación que tiene el amortiguamiento con el número de masas, la cual al ajustarla a una distribución lineal, presenta una pendiente positiva. Corroborando lo obtenido en calibraciones anteriores en otros equipos. El ajuste de los puntos obtenidos se realiza con aquella distribución que mejores resultados presente, puede ser lineal, exponencial, potencial, etc.

Cabe señalar que los valores de amortiguamiento que se obtuvieron son muy grandes, en general los valores ideales deben estar en el rango del 1 al 2%.

Al elegir los valores de la calibración 1, éstos se ajustan con las ecuaciones correspondientes en cada caso (la ecuación se presenta en la parte superior de las figuras 2.9 a 2.12). En la tabla 2.9, se presentan dichos valores.

Numero de masas	$\lambda = 41.2 \text{ cm}$			$L = 93.1 \text{ cm}$	
	J_a (kg cm s ²)	T_{ad} (s)	ω_a (s ⁻¹)	K_a (kg /cm)	ζ_a (%)
0	6.4807	0.3328	18.8798	0.6316	2.8181
1	8.5684	0.3659	17.1719	0.6496	2.9868
2	10.656	0.3990	15.7473	0.6676	3.1555
3	12.7437	0.4321	14.5410	0.6856	3.3242
4	14.8314	0.4652	13.5064	0.7036	3.4929
5	16.9187	0.4983	12.6092	0.7216	3.6616

Tabla 2.9 Constantes de calibración

Estos son los valores que se recomiendan para ensayos posteriores. Cabe resaltar que son únicamente para aquellos que se realicen en el laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Para otros equipos deben consultarse las correspondientes constantes de calibración.

2.3 RECOMENDACIONES DURANTE EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

- Se nivela el tetrapie y la base inferior con el equipo apropiado de topografía.
- Se ajusta la polea, de tal forma que quede alineado el cable del contrapeso con el eje de giro del péndulo de torsión, esto se logra haciendo la ranura del brazo más grande (figura 2.13). Para la calibración fue necesario ajustar estas ranuras, haciéndola de 2 a 3 mm más grandes. Así se puede mover la polea hasta que quede alineado, el cable con el eje.

- Se nivela y centra la cámara triaxial de tal forma que quede alineado con el broquero.
- Se nivela el brazo en ambos sentidos con respecto al eje de giro, (figura 2.14), para evitar excentricidades, considerando el contrapeso y la extensión del brazo. Esto se resuelve haciendo más grande el orificio que tiene la canal (por donde pasa el vástago superior), permitiendo con ello mayor movilidad para corregir la presencia del contrapeso. Para nuestro caso fue necesario corregir el orificio de 2 a 3 mm en todo el perímetro, utilizando una lima.

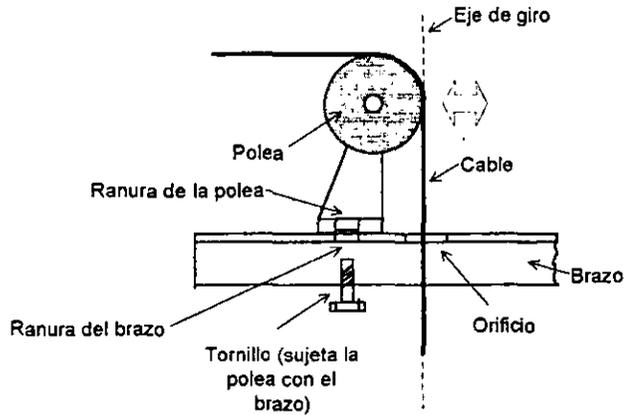


FIGURA 2.13 Sección longitudinal del brazo y pulea

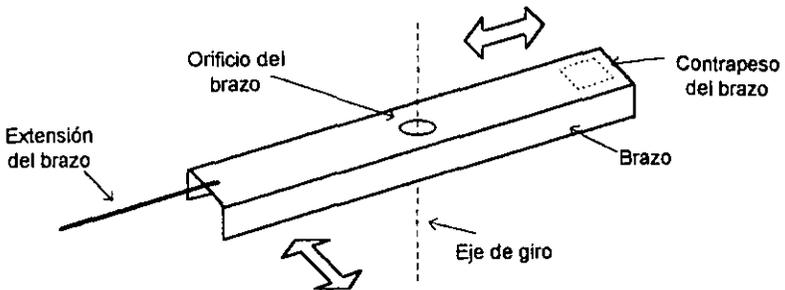


FIGURA 2.14 Nivelación del brazo

- Durante la calibración se tiene que considerar la cámara triaxial con todos sus elementos
- Deben evitarse los errores de excentricidad. Ya que esto ocasiona fricción y afecta el amortiguamiento del aparato.

Nota :

Todas las medidas y cálculos que se presentan en el capítulo, corresponden al Péndulo de Torsión del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

CAPÍTULO III: Columna resonante

3.1 GENERALIDADES

En el presente capítulo se describen dos columnas resonantes; la cámara triaxial de columna resonante perteneciente al laboratorio de dinámica de suelos del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), y la columna resonante perteneciente al laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La cámara triaxial de columna resonante del CENAPRED, (figura 3.1), permite determinar el comportamiento dinámico de los suelos, en el intervalo de distorsiones de pequeñas a medianas, de 0.0005% a 0.3%. El procedimiento se basa en la medición de la frecuencia de resonancia, asociado a estados de esfuerzos y niveles de deformación perfectamente establecidos. Este instrumento cuenta con características tecnológicas avanzadas que permiten conocer el módulo de rigidez dinámico al esfuerzo cortante y relación de amortiguamiento de muestras de suelo, ya sean macizas o huecas de 7 a 10 cm de diámetro.

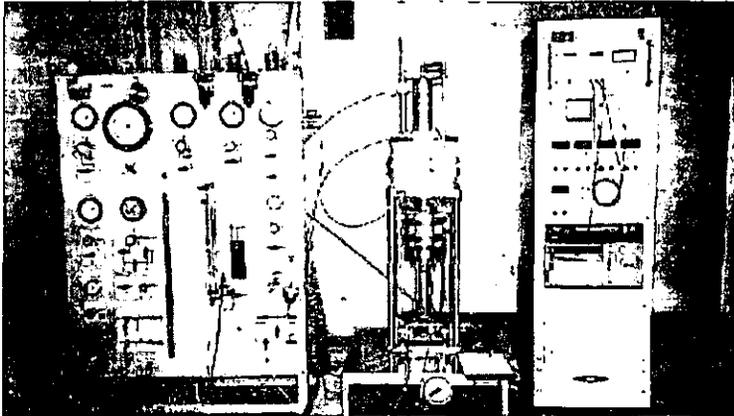


FIGURA 3.1 Cámara triaxial de columna resonante del CENAPRED

En cuanto a la columna resonante del Instituto de Ingeniería, (figura 3.2), el intervalo de deformación angular es de 0.0001 a 0.1%. La prueba consiste en someter a un espécimen cilíndrico de suelo a un estado de vibración forzada torsional, variando la frecuencia de excitación hasta lograr su resonancia.

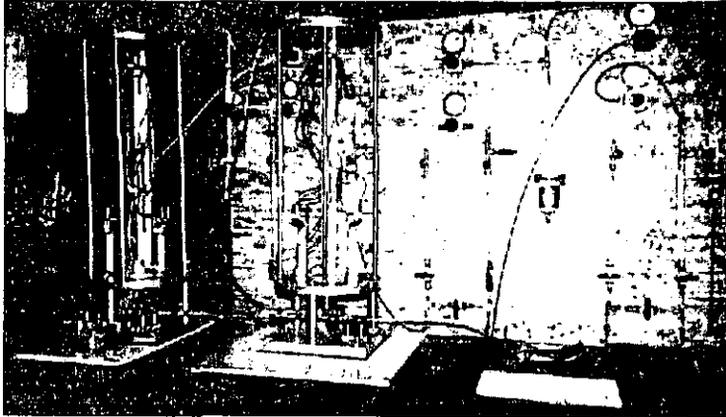


FIGURA 3.2 Columna resonante del Instituto de Ingeniería

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA TRIAXIAL DE COLUMNA RESONANTE

3.2.1 CÁMARA TRIAXIAL, MARCO DE CARGA Y SISTEMA EXCITADOR

El diseño de la cámara triaxial es tal que descansa sobre un gran pedestal (figura 3.3), que es posible desplazar axialmente, éste a su vez se encuentra sobre una plataforma que soporta a cuatro columnas metálicas que reciben en su extremo superior a una gruesa placa de acero, con la que forma un marco suficientemente rígido. La celda triaxial está constituida por un cilindro de lucita reforzado con tres zunchos metálicos perimetrales que soportan una presión confinante de 10 kg/cm^2 . No existen barras metálicas que compriman al tubo acrílico contra base y tapa como en la cámara triaxial del péndulo de torsión, sino que en el extremo superior del tubo cuenta con una brida metálica con la que se sujeta y sella a la cara inferior de la placa superior del marco de carga.

Este equipo permite alojar muestras de suelo cilíndricas o macizas de 7 a 10 cm de diámetro exterior y 10 cm de altura. En muestras cilíndricas el espesor de pared es de 2 cm y requiere una membrana de latex no sólo en el exterior sino también en el interior. El cabezal y pedestal permiten voltear en los extremos la membrana y comprimirla radialmente por medio de un arosello. Tanto el pedestal como el cabezal tienen la misma sección transversal que la muestra, tienen 6 navajas radiales de 1.5 mm de altura, con las que fijan a ésta a sus extremos e impiden su desplazamiento.

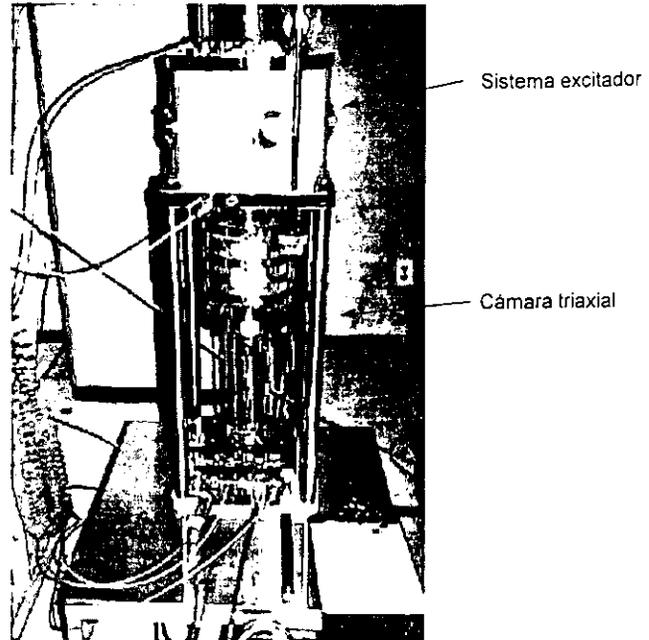


FIGURA 3.3 Cámara triaxial y sistema excitador

El sistema excitador (figura 3.3), está formado por un par de bobinas dispuestas horizontal y paralelamente, en sentidos encontrados, y diametralmente opuestas a la columna vertical motriz a una distancia de 5 cm de su centro. Cada bobina consta de una coraza o cilindro hueco magnetizado que aloja a una barra cilíndrica o magneto, que se convierte en un vibrador con movimiento axial, al alternarse la corriente eléctrica con una frecuencia seleccionada, generando un campo magnético de polaridad alterante.

3.2.2 PANEL DE CONTROLES HIDRONEUMÁTICO Y DE VACIO

La presión estática suministrada al actuador neumático se aplica a través del panel de controles (figura 3.4), haciendo uso de un relevador de presiones mediante el que se establece la relación de esfuerzos principales (confinante a axial), aplicándose automáticamente estas dos presiones mediante un solo regulador. A través de éste panel de controles se aplica la contrapresión (máxima de 5 kg/cm^2) para asegurar la saturación de la muestra de suelo. Se miden los cambios volumétricos que sufre la muestra. Se genera y controla el vacío necesario a moldes y membranas para la formación de la probeta (en suelos granulares). Se mantiene e introduce agua desairada al sistema. Y finalmente, se llena y vacía la celda triaxial con el agua confinante.

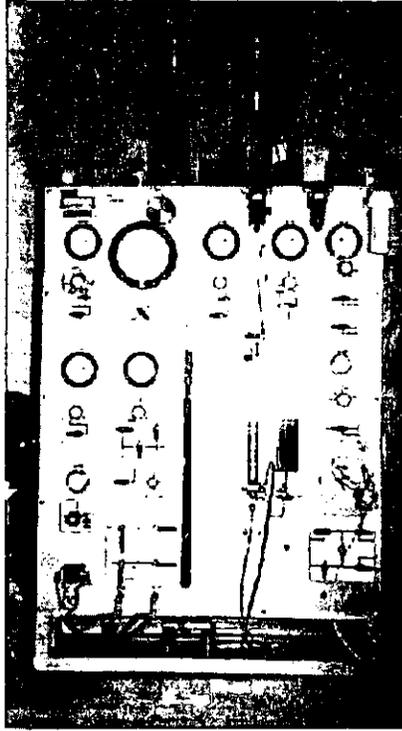


FIGURA 3.4 Panel de controles

3.2.3 CONSOLA DE REGISTRO Y DE CONTROLES ELECTRÓNICOS

En la figura 3.5, se observa la consola que se encarga de controlar y registrar las amplitudes y frecuencias del sistema excitador, y en donde se amplifican, acondicionan y despliegan las señales de sus transductores de aceleración y velocidad. Se cuenta con un osciloscopio en el que se muestran las señales de excitación y de respuesta del sistema vibrante, en una pantalla rectangular de 6" de rayos catódicos con retícula interna. El equipo cuenta con cinco sensores, cuyos acondicionadores de señal están conectados a esta consola. En la parte inferior se encuentra un oscilógrafo optoelectrónico que permite registrar en papel, la variación de los sensores seleccionados con respecto al tiempo durante el ensaye.

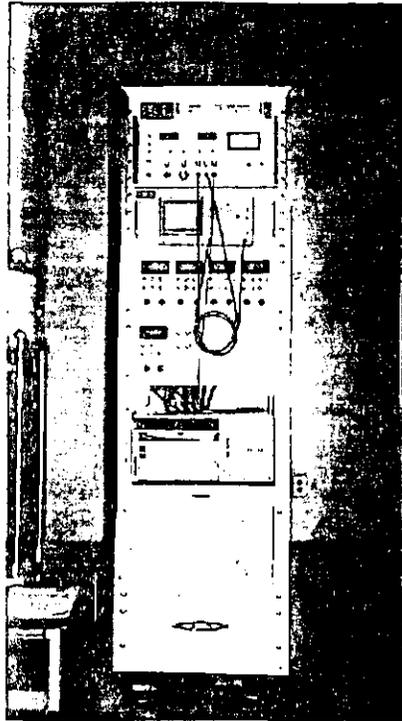


FIGURA 3.5 Consola de registro

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA COLUMNA RESONANTE

3.3.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La columna resonante pertenece al Instituto de Ingeniería de la UNAM, es uno de los dispositivos usados para estudiar los suelos en condiciones dinámicas. Los instrumentos de medición con que cuenta la columna resonante son (figura 3.6):

- **Celda de presión.** Se registran los valores de presión confinante y contrapresión a los que está sometida la probeta, así como la presión de poro que se genera durante el ensaye.
- **Medidor de desplazamientos (DCDT).** El cual registra la deformación axial de la probeta en cada etapa de la prueba.

- **Acelerómetro.** Esta empotrado en una de las esquinas de la placa del sistema móvil, permite registrar la aceleración de respuesta de la probeta, excitada a diferentes frecuencias.

El acelerómetro tiene una constante por la cual se multiplica el voltaje de respuesta de la probeta y se obtiene el valor de la aceleración correspondiente. La celda de presión y el medidor de desplazamientos se calibran previamente.

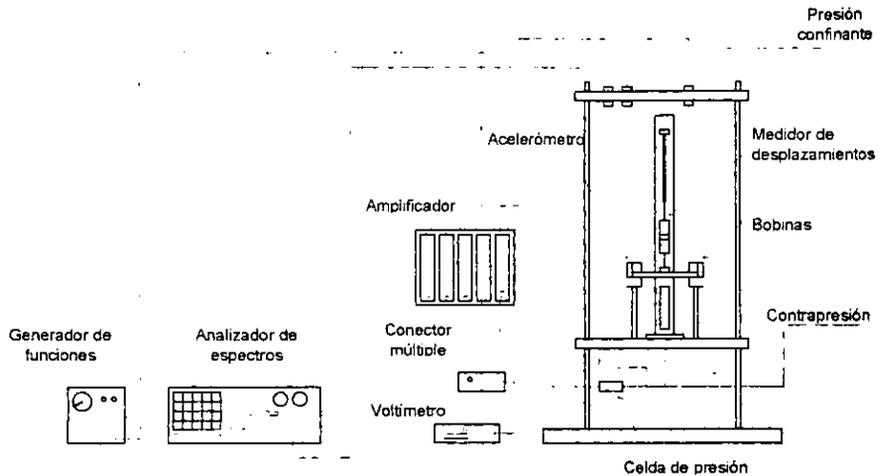


FIGURA 3.7 Esquema de la columna resonante

3.3.2 SISTEMA DE EXCITACIÓN Y CAPTURA DE DATOS

El sistema de excitación y captura de datos consta de los siguientes elementos:

- **Generador de funciones.** Manda la señal senoidal de amplitud y frecuencia conocidas a unas bobinas, las cuales mueven la placa conectada al cabezal superior y aplica a la muestra una deformación torsional.
- **Analizador de espectros.** Este dispositivo presenta el voltaje correspondiente a la aceleración de respuesta de la probeta, registrada por el acelerómetro.
- **Voltímetro.** Donde se leen los voltajes (después de pasar por un amplificador) correspondientes a la presión de poro y la deformación longitudinal de la probeta.

CAPÍTULO IV: Equipos complementarios a la columna resonante

4.1 CÁMARA TRIAXIAL CICLICA DE COLUMNA TORSIONANTE

4.1.1 GENERALIDADES

La cámara triaxial cíclica torsionante, (figura 4.1), permite conocer el comportamiento dinámico de muestras cilíndricas de suelo, ya sean macizas o huecas de 7 a 10 cm de diámetro, ante esfuerzos cortantes cíclicos de amplitud y frecuencia controlados, a diferencia del péndulo de torsión que no se puede controlar. Permite conocer de manera precisa el módulo de rigidez dinámico al esfuerzo cortante, la relación de amortiguamiento y las distorsiones permanentes, en un intervalo de frecuencia de 0.001 a 2 Hz y con distorsiones que van de 0.2% a 10%, aproximadamente. Se someten las muestras de suelo a estados de esfuerzos y deformación parecidos a los que se encuentran en el campo. La cámara triaxial cíclica torsionante es un equipo que pertenece al laboratorio de dinámica de suelos del CENAPRED.

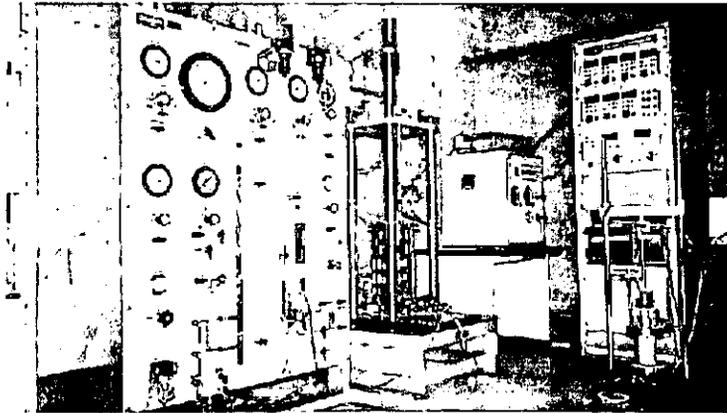


FIGURA 4.1 Cámara triaxial cíclica de columna resonante del CENAPRED

4.1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

a) Cámara triaxial y actuadores neumáticos estático y cíclico

La celda triaxial esta constituida por un cilindro de lucita reforzado que soporta presiones confinantes hasta de 10 kg/cm^2 , su base y su tapa de acero inoxidable están firmemente sujetas mediante tres barras del mismo material dispuestas en el interior de la celda, (figura 4.2). Esta celda permite colocar muestras cilíndricas macizas o huecas de 7 a 10 cm de diámetro exterior, 10 cm de altura y 2 cm de espesor de pared en las muestras huecas. Para estos huecos se requiere membranas de latex tanto en el interior como en el exterior. El pedestal y la cabeza tienen la misma sección transversal que la muestra, poseen navajas radiales con que la fijan, así como piedras porosas para su drenaje.

En la parte superior del marco de carga de la cámara triaxial, se ubica el primer actuador neumático de 200 kg de capacidad, permite aplicar un esfuerzo axial a fin de cumplir con una condición de compresión anisotrópica, o bien, equilibrar la fuerza resultante de la presión de confinamiento.

En la parte intermedia del marco de carga se ubica un segundo actuador neumático transversal de la misma capacidad que el axial, el que mediante un mecanismo de polea horizontal, genera y transfiere el par torsionante a la columna vertical del sistema motriz y esta a la muestra de suelo. Los momentos de torsión alternantes dinámicos aplicados, inducen al suelo los esfuerzos cortantes cíclicos.

b) Unidad de controles hidroneumático y de vacío

La presión suministrada al primer actuador neumático es controlada mediante la unidad de control neumático y de vacío (figura 4.3), con un solo regulador automáticamente se aplican estas dos presiones. En esta unidad de control se aplica una contrapresión a la muestra (máxima de 5 kg/cm^2) para asegurar la saturación del suelo. Se miden los cambios volumétricos que suceden en las muestras. Se mantiene e introduce agua desairada al sistema. Se llena y vacía la cámara con el agua de confinamiento. Se aplican presiones controladas bajo la cámara triaxial para generar un colchón de aire y facilitar su movimiento lateral sobre la placa base durante el montaje.

c) Unidad de control de presiones cíclicas

Suministra la presión al actuador transversal (después de recibir la presión primaria de la compresora), con la amplitud, frecuencia y número de ciclos seleccionados.

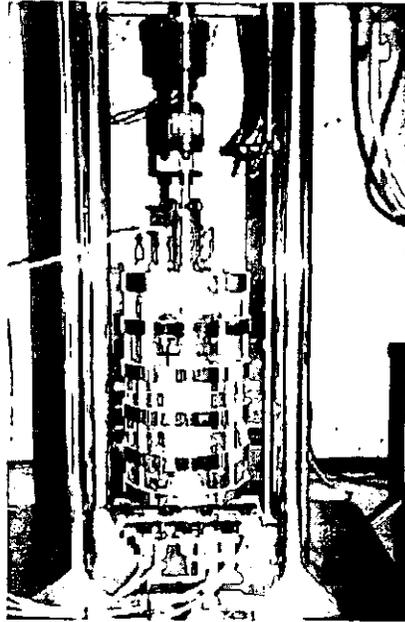


FIGURA 4.2 Cámara triaxial

d) Consola de mediciones electrónicas

En esta consola se tienen dispuestos los acondicionadores de señal que muestran digitalmente los valores en unidades ingenieriles de las siete variables que se monitorean durante el ensaye, (figura 4.4)

e) Sistema automático de adquisición de datos

Se cuenta con un sistema digitalizado para capturar, almacenar y desplegar las señales de los sensores que miden las variables. El sistema automático de adquisición de datos experimentales posee la capacidad, rapidez y precisión requerida para cumplir con los objetivos de los ensayos realizados. La conversión analógica/digital se realiza por medio de una tarjeta de circuitos impresos que se implementó en una computadora personal compatible. Las entradas de adquisición resultan los datos analógicos (voltajes) que aportan los acondicionadores de señal y las salidas digitales se graban en un disco duro o en uno flexible de la computadora.

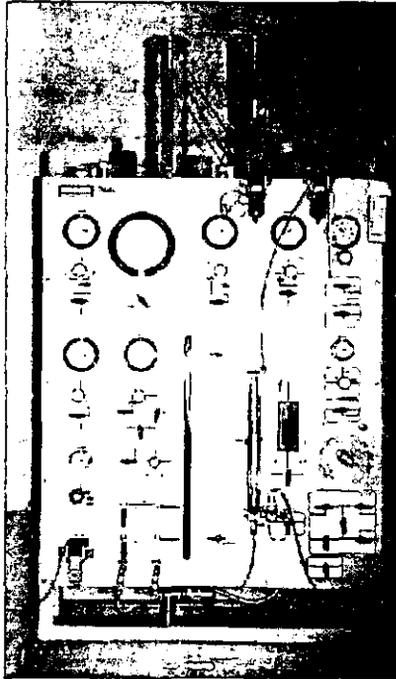


FIGURA 4.3 Unidad de control hidroneumático y de vacío

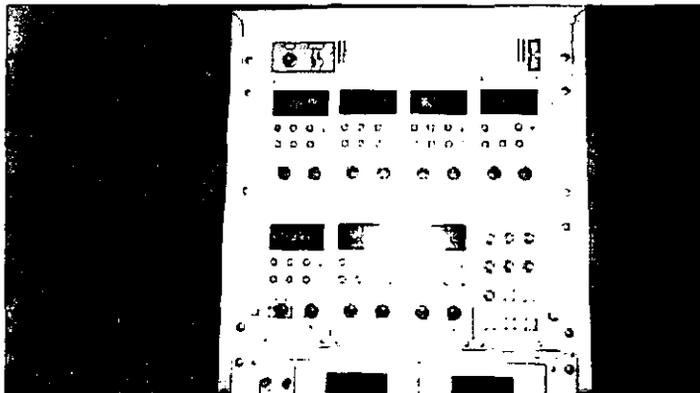


FIGURA 4.4 Consola de mediciones electrónicas (7 canales monitoreados)

4.2 SONDA SUSPENDIDA

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El dispositivo consiste en una sonda en la que están integrados tanto la fuente de excitación como dos geófonos receptores, (figura 4.5), estos últimos con separación de un metro. Sumergida la sonda dentro del fluido de una perforación hecha en el sitio y sin tocar sus paredes, se provocan perturbaciones mecánicas en dirección transversal al eje de la perforación, que se propagan al suelo circundante. Tanto la excitación como la respuesta se dan a través de lodo bentonítico. Posee un mecanismo de martinets capaz de producir impactos laterales con longitudes de onda superiores al diámetro del pozo, haciendo que las ondas se transmitan hacia los geófonos que captan las componentes horizontal y vertical de las perturbaciones.

Entre la fuente y los sensores se tiene un elemento tubular de hule, para impedir el paso de las ondas a través del tubo de la sonda y evitar un posible engaño de las ondas recibidas. La longitud total de la sonda es de 7 m aproximadamente, dependiendo de los filtros que se requieran. Tiene un diámetro de 54 mm; el punto central de los geófonos se ubica a unos 5 m del extremo inferior. La posición de la sonda se controla por medio de un malacate ubicado en la superficie del terreno. La operación del sistema y el análisis preliminar de los registros, se realiza mediante una consola de controles en la que se seleccionan los filtros y los amplificadores requeridos.

La perforación que se práctica es de 70 a 150 mm de diámetro, esta debe realizarse con la mayor verticalidad posible, cuidando la regularidad en las paredes, para evitar el arrastre de la sonda a lo largo del pozo, lo que puede ocasionar que se atore temporal o permanentemente. Para medir las velocidades sin interferencias por la presencia de un ademe en el pozo, es recomendable evitarlo cuando sea posible. Se sugiere que el sondeo se lleve a cabo inmediatamente después de terminar la perforación.

Cuando no se puede evitar la utilización de un ademe, se tendrá que utilizar uno de PVC, de pared delgada (nunca de acero), debidamente adherido a las paredes del pozo para evitar pérdidas o distorsiones de la señal de la fuente. El pozo deberá ademarse cuando se presenten pérdidas de fluido o derrumbes frecuentes. El pozo debe mantenerse lleno de fluido para que la señal pueda ser transmitida.

CAPÍTULO V: Suelos ensayados

5.1 MUESTRAS INALTERADAS

Se ensayaron muestras inalteradas de suelo arcilloso de la ciudad de México, obtenidas de un sondeo realizado en la esquina del Eje Central Lázaro Cárdenas y Xola. Se ensayaron las muestras: M-8 (muestra inalterada 1), proveniente de una profundidad de 9.6 m; y la M-22-3 (muestra inalterada 2), de una profundidad de 18.8 m.

5.1.1 CARACTERÍSTICAS

En la tabla 5.1, se muestran las características geométricas de cada muestra ensayada.

Muestra inalterada	D_m (cm)	H_m (cm)	H_e (cm)	A_m (cm ²)	W (gr)	V (cm ³)
1	7.00	17.09	14.73	38.48	731.19	657.62
2	7.04	17.20	14.82	38.92	831.66	669.52

TABLA 5.1 Características de las muestras inalteradas ensayadas en el péndulo de torsión

Donde:

D_m = diámetro medio, en cm

H_m = altura media, en cm

H_e = altura efectiva, en cm

A_m = área media, en cm²

W = peso, en g

V = volumen, en cm³

5.1.2 PROPIEDADES

En la tabla 5.2, se reportan algunas de las propiedades índice de ambas probetas ensayadas.

Muestra	γ_m (T/m ³)	* Resist. a la comp. (kg/cm ²)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plástico (%)	Densidad de sólidos
1	1.08	0.152	525.04	286.20	238.84	2.200
2	1.24	0.400	294.62	155.92	138.71	2.278

TABLA 5.2 Propiedades índice de las muestras inalteradas ensayadas en el péndulo de torsión
* Resistencia a la compresión no drenada-no consolidada (UU)

5.1.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

Las probetas se ensayaron para diferentes esfuerzos de confinamiento, saturándolas previamente. En la muestra 1 se aplicaron esfuerzos de 0.3, 0.6, 1.0 y 1.2 kg/cm²; mientras que en la muestra 2 dichos esfuerzos fueron de 0.25, 0.50, 1.0 y 1.4 kg/cm². Para asegurar que el esfuerzo de confinamiento fuera efectivo durante la etapa de saturación, se aplicó una contrapresión de 1.0 kg/cm²; contrarrestada por una presión de confinamiento igual más 0.2 kg/cm².

5.2 MUESTRAS COMPACTADAS

Se ensayaron muestras compactadas de un material limo-arcilloso residual proveniente de la descomposición de basalto en la ladera derecha de la presa Necaxa, estado de Puebla, conocido como MH-Necaxa. El ensaye se realizó con el espécimen tal como se compactó, sin saturarlo y en condiciones no-drenadas.

5.2.1 CARACTERÍSTICAS

En la tabla 5.3, se reportan las características geométricas de las muestras ensayadas.

	Muestra compactada	D _m (cm)	H _m (cm)	H _e (cm)	A _m (cm ²)	W (gr)	V (cm ³)
Péndulo de torsión	0	7.10	17.90	15.00	39.59	1271.73	708.69
	1	7.08	17.90	14.78	39.36	1277.31	704.70
	2	7.13	17.80	14.80	39.92	1258.74	710.70
	3	7.13	17.90	14.95	39.92	1326.93	714.69
	4	7.13	17.90	15.23	39.92	1341.61	714.69
Cámara triaxial de columna resonante	1	6.95	-	9.93	37.99	677.70	377.25
	2	6.96	-	9.93	37.99	668.10	377.25
	3	6.96	-	9.93	37.99	668.10	377.25
	4	-	-	-	-	-	-
Columna resonante	1	3.60	-	8.10	10.17	149.40	82.37
	2	3.60	-	8.10	10.17	145.70	82.37
	3	3.64	-	8.16	10.40	153.61	84.91

TABLA 5.3 Características de las muestras ensayadas

5.2.2 PROPIEDADES

De las muestras ensayadas en péndulo de torsión, se presentan los resultados de las propiedades físicas en la tabla 5.4.

	Muestra compactada	γ_m (T/m ³)	W_i (%)	W_f (%)	W_p (%)	W_c (%)	* Limite liquido (%)	* Limite plástico (%)
Péndulo de torsión	1	1.81	40.02	39.17	39.59	41.57		
	2	1.77	41.63	40.97	41.29	43.23		
	3	1.86	34.06	33.22	33.64	35.86		
	4	1.87	34.47	34.02	34.24	36.00		
Cámara triaxial de columna resonante	1	1.79	-	-	-	41.72		
	2	1.76	-	-	-	43.20		
	3	1.87	-	-	-	35.57		
	4	1.87	-	-	-	36.35		
						74.0	23.7	
Columna resonante	1	1.81	-	-	-	41.72		
	2	1.76	-	-	-	43.20		
	3	1.82	-	-	-	35.57		
	4	-	-	-	-	-		

TABLA 5.4 Resumen de propiedades de las muestras ensayadas

* Después de haber sido almacenado

Donde:

γ_m = peso volumétrico de la muestra, en t/m³

W_i = contenido de agua inicial, en %

W_f = contenido de agua final, en %

W_p = contenido de agua promedio, en %

W_c = contenido de agua de compactación, en %

La granulometría del material compactado se describe en la tabla 5.5.

Malla No.	Vía húmeda	Vía seca
4	100	100
10	100	72
20	100	43.5
40	100	19
60	100	9
100	100	6
200	98	2.5
>2 μ	46	-

TABLA 5.5 Granulometría por vía seca y por vía húmeda

Para tener una mejor apreciación de la variación del peso volumétrico con cada muestra compactada y con cada equipo, en la figura 5.1, se presentan los valores obtenidos con los tres equipos. La variación que presentan entre ellos es mínima, las tendencias coinciden.

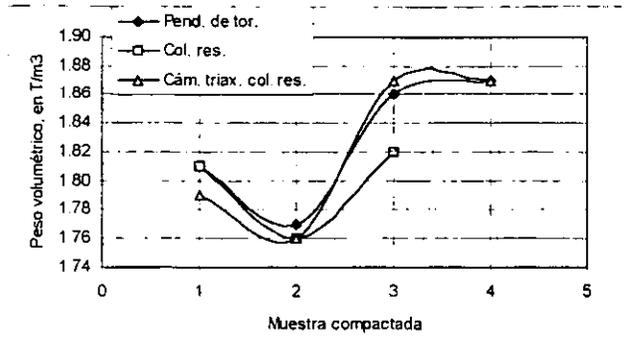


FIGURA 5.1 Variación del peso volumétrico con cada muestra compactada

También se analiza la variación del contenido de agua con cada muestra compactada, (figura 5.2), los valores tienen diferencias del 1 a 2%. Los valores que utilizaron en el Instituto de ingeniería son los mismos que se calcularon en el CENAPRED.

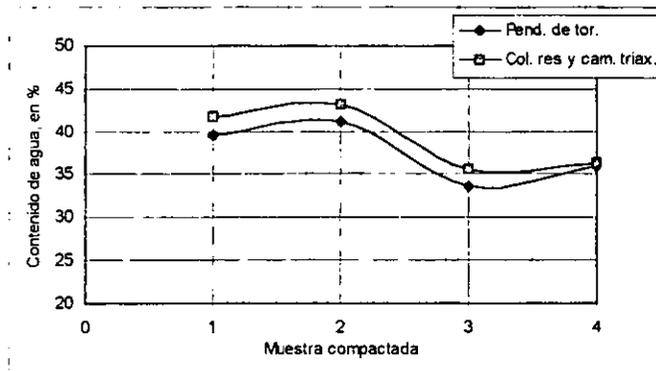


FIGURA 5.2 Variación del contenido de agua con cada muestra compactada

5.2.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

En la tabla 5.6, se presentan los resultados obtenidos de la compactación realizada en instalaciones del CENAPRED.

Muestra compactada	Aparato	E_c	W_c	W_c	γ_m	γ_d
		(kg cm/cm ³)	(%)	Promedio (%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
0	Pend. torsión	6.05	42.31	42.08	1.78	1.25
	Cám. triax. col. res.		41.61		1.79	1.26
	Col. resonante		42.20		1.78	1.25
1	Pend. torsión	6.05	41.52	41.60	1.79	1.26
	Cám. triax. col. res.		41.72		1.79	1.26
	Col. resonante		-		1.80	1.27
2	Pend. torsión	3.00	43.23	43.19	1.77	1.23
	Cám. triax. col. res.		43.20		1.77	1.23
	Col. resonante		43.28		1.76	1.23
3	Pend. torsión	14.70	35.86	35.55	1.86	1.37
	Cám. triax. col. res.		35.57		1.87	1.38
	Col. resonante		35.57		1.86	1.37
4	Pend. torsión	19.98	36.00	36.33	1.86	1.37
	Cám. triax. col. res.		36.35		1.87	1.37
	Col. resonante		36.60		1.86	1.36

TABLA 5.6 Datos de la compactación por impactos de cada una de las muestras

Donde E_c , es la energía que se aplica al suelo por unidad de volumen, y se define como energía específica de compactación. Para las muestras se utilizó el método de compactación por impactos, el valor de E_c esta en función del peso y altura de caída del pisón compactador, así como del número de golpes, el número de capas y el volumen total de suelo.

En este caso, la energía de compactación que se obtiene en las muestras 0 y 1, es la que se obtiene para la prueba proctor, y para las muestras, 2, 3, y 4; se modificó el número de golpes, así como el número de capas para obtener; la mitad, el doble y el triple del valor estándar de dicha prueba.

De las cinco muestras que se compactaron sólo se ensayaron las muestras 1, 2 y 3, en los tres aparatos simultáneamente. La muestra 0 sólo se ensayó en el péndulo de torsión. La muestra 4 se ensayó en el péndulo de torsión y en la cámara triaxial de columna resonante.

Debido a la naturaleza de las muestras de suelo compactadas, no se requirió la saturación y consolidación de las probetas por cada esfuerzo de confinamiento. Esto permitió ejecutar las pruebas rápidamente, aplicando presiones confinantes crecientes; de 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 kg/cm², en las muestra 1; 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 y 4.0 kg/cm², en las muestras 2 y 3; y 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 y 4.0 kg/cm², en la muestra 4.

CAPÍTULO VI: Presentación de resultados

6.1 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL PÉNDULO DE TORSIÓN

El procedimiento para la obtención del módulo de rigidez dinámico y del amortiguamiento es el siguiente:

- Para cada confinamiento diferente que se aplica a la muestra de suelo, se obtienen de 9 a 14 repeticiones de la vibración libre amortiguada, de la cual se calculan los parámetros del módulo de rigidez dinámico, μ , y de la relación de amortiguamiento, ζ . Se gráfica la variación del módulo de rigidez con respecto a la distorsión angular, (figura 6.1).
- Los valores obtenidos se ajustan a una curva de tipo exponencial. Como el rango de distorsiones es muy pequeño, va de 0.09% a 0.18%, al observar todos los resultados se elige un nivel de deformación adecuado para obtener el correspondiente valor del Módulo de rigidez dinámico, para este caso el nivel de deformación que se elige es el de 0.1%, obteniéndose con ello un valor del módulo de rigidez igual a 107.88 kg/cm².

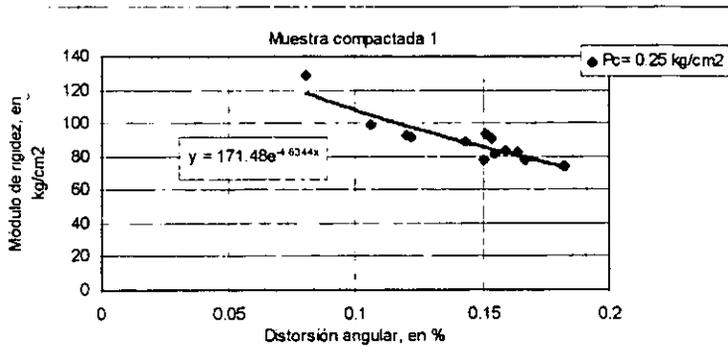


FIGURA 6.1 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular para una $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

- Para el amortiguamiento el procedimiento es el mismo. Se gráfica la variación del amortiguamiento con respecto a la distorsión angular, (figura 6.2), Los valores obtenidos se ajustan a una curva de tipo lineal. Se elige el mismo nivel de distorsión 0.1%, con esto se obtiene el valor del amortiguamiento que vale 25.45%.

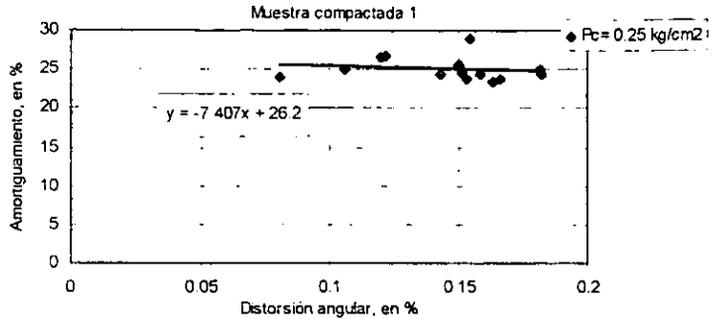


FIGURA 6.2 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular para una $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

Siguiendo el mismo procedimiento se obtienen para diferentes esfuerzos de confinamiento, los correspondientes valores del módulo de rigidez dinámico y de la relación de amortiguamiento, (tabla 6.1).

P_c (kg/cm^2)	Distorsión angular (%)	Módulo de rigidez (kg/cm^2)	Amortiguamiento (%)
0.25	0.1	107.88	25.45
0.50	0.1	136.21	25.30
1.00	0.1	217.47	15.66
2.00	0.1	290.25	11.74
4.00	0.1	369.93	10.94

TABLA 6.1 Resumen de resultados de la muestra compactada 1 (lo que esta enmarcado representa los resultados que se mencionan anteriormente)

6.1.1 RESUMEN DE RESULTADOS

En la tabla 6.2, se presenta un resumen de los resultados numéricos del módulo de rigidez dinámico de las muestras inalteradas y compactadas. Los resultados de la relación de amortiguamiento se presentan en la tabla 6.3.

MÓDULO DE RIGIDEZ DINÁMICO
(Kg/cm²)

Pc (kg/cm ²)	Muestras inalteradas		Muestras compactadas				
	MI1	MI2	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4
0.25				107.88		351.66	387.12
0.3	10.57	9.92					
0.5				136.21		390.99	435.89
0.6	13.68	14.67					
1.0	23.23	24.19		217.47	121.37	357.41	467.45
1.4	27.15	28.49					
1.5					179.03		
2.0				290.25	193.69	479.63	615.55
3.0				322.74	210.74		
4.0				369.93	255.07	428.84	575.49

TABLA 6.2 Resumen de resultados del módulo de rigidez dinámico, de las muestras ensayadas en el péndulo de torsión

RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO
(%)

Pc (kg/cm ²)	Muestras inalteradas		Muestras compactadas				
	MI1	MI2	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4
0.25				25.45		11.91	13.06
0.3	9.05	8.43					
0.5				25.30		14.98	15.07
0.6	13.55	11.47					
1.0	11.00	10.73		15.66	23.67	6.14	11.60
1.4	11.55	15.09					
1.5					19.56		
2.0				11.74	17.62	9.23	9.06
3.0				12.40	15.41		
4.0				10.94	15.36	6.06	5.30

TABLA 6.3 Resumen de resultados de la relación de amortiguamiento, de las muestras ensayadas en péndulo de torsión

El las tablas A.3 y A.4, del anexo A, se presentan los resultados numéricos completos de las muestras inalteradas 1 y 2, respectivamente, obtenidas del péndulo de torsión. Y los resultados numéricos de las muestras compactadas 1, 2, 3 y 4; se presentan en las tablas A5 a A8, del mismo anexo.

6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS INALTERADAS

Se ensayaron dos muestras inalteradas de suelo de la Ciudad de México. Los resultados que se presentan fueron obtenidos de la información únicamente del péndulo de torsión (Facultad de Ingeniería). Las otras dos instituciones con sus equipos (CENAPRED e Instituto de Ingeniería) no participaron en el proyecto.

6.2.1 MUESTRA INALTERADA 1 (MI 1)

En las figuras 6.3 y 6.4, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la distorsión angular, utilizando cero y una masas, estos resultados se definieron a partir de la medición del péndulo de torsión, con diferentes presiones de confinamiento. El módulo de rigidez dinámico aumenta conforme aumenta la presión de confinamiento, para una misma distorsión angular. Los valores del módulo de rigidez dinámico varían de 10 a 30 kg/cm².

En las figuras 6.5 y 6.6, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la distorsión angular. Se observa que la relación de amortiguamiento se mantiene constante para los diferentes niveles de confinamiento. La relación de amortiguamiento varía de 7 a 15%.

En la figura 6.7, el módulo de rigidez dinámico crece conforme aumenta la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%.

En la figura 6.8, se observa la variación de la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, las tendencias que se presentan para cada masa son diferentes, pero se aprecia una disminución del mismo a medida que aumenta la presión de confinamiento.

6.2.2 MUESTRA INALTERADA 2 (MI 2)

En las figuras 6.9 y 6.10, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la distorsión angular, utilizando cero y una masas. El módulo de rigidez dinámico aumenta al incrementarse la presión de confinamiento, para una misma distorsión angular. Los valores varían de 15 a 40 kg/cm².

En las figuras 6.11 y 6.12, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la distorsión angular. Se observa que la relación de amortiguamiento disminuye al aumentar la presión de confinamiento, contrariamente con lo obtenido en la muestra inalterada 1.

En la figura 6.13, el módulo de rigidez dinámico crece al incrementarse la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%.

En la figura 6.14, se observa la variación de la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, la relación de amortiguamiento disminuye con el aumento de la presión de confinamiento.

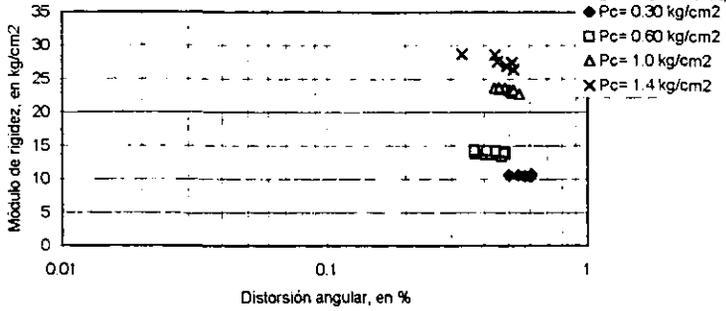


FIGURA 6.3 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 0 masas, MI 1

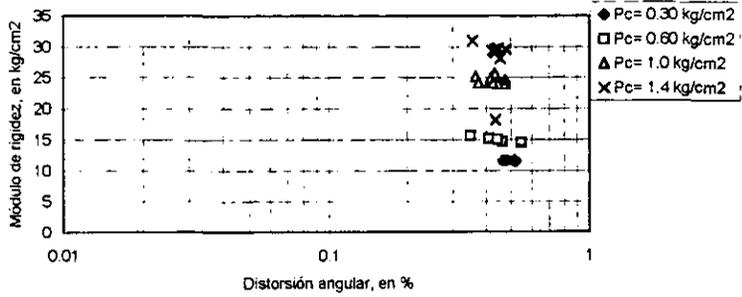


FIGURA 6.4 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 1 masa, MI 1

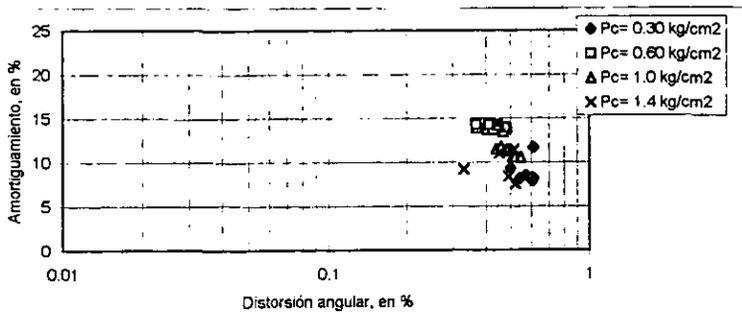


FIGURA 6.5 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular, 0 masas, MI 1

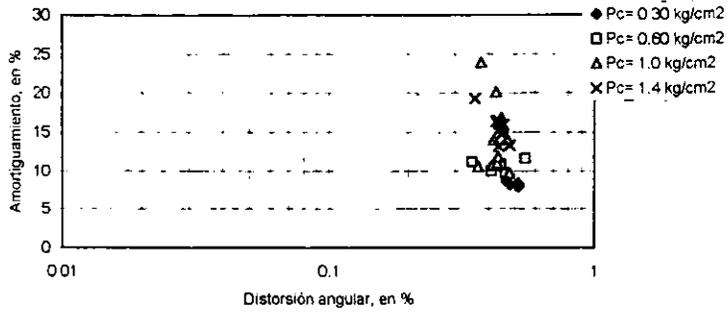


FIGURA 6.6 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular, 1 masa, MI 1

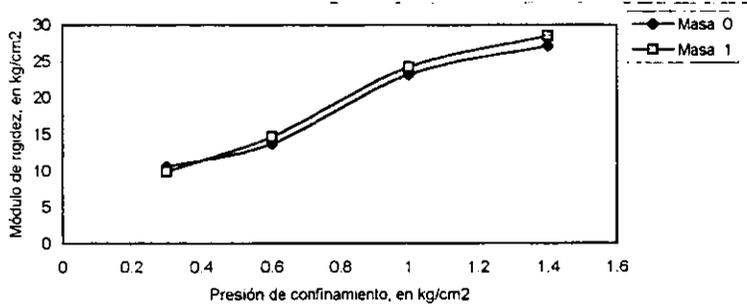


FIGURA 6.7 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%, MI 1

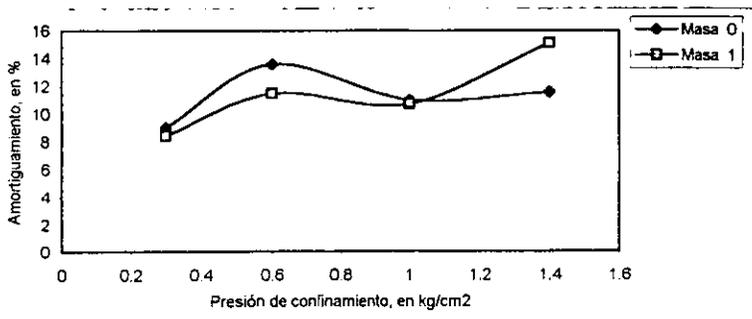


FIGURA 6.8 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%, MI 1

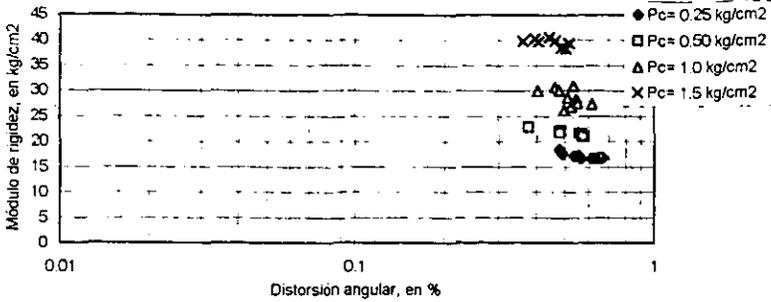


FIGURA 6.9 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 0 masas, MI 2

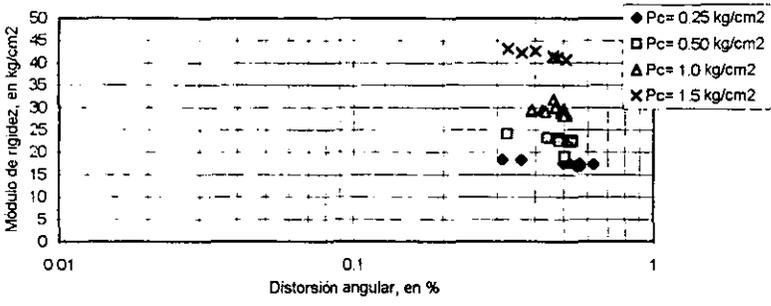


FIGURA 6.10 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 1 masa, MI 2

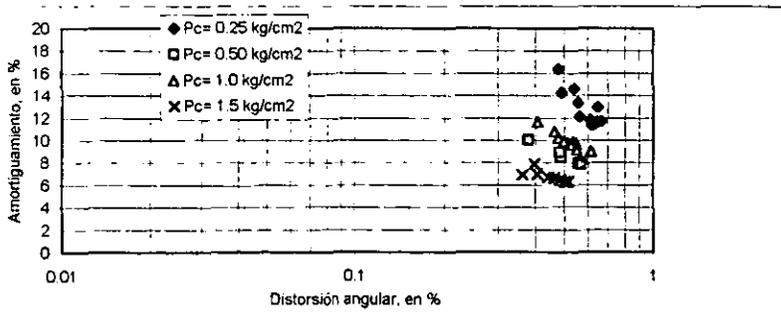


FIGURA 6.11 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 0 masas, MI 2

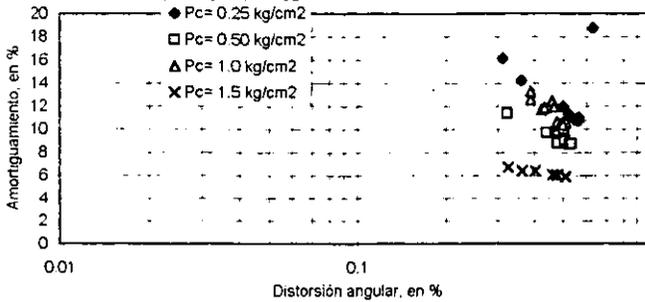


FIGURA 6.12 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular, 1 masa, MI 2

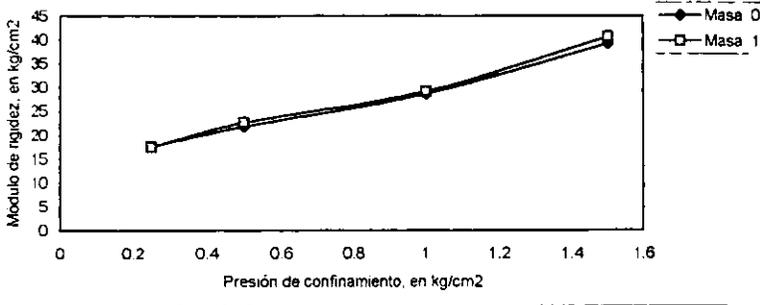


FIGURA 6.13 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%, MI 2

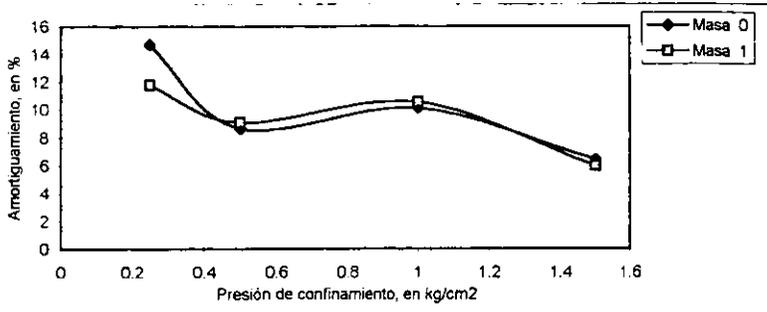


FIGURA 6.14 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión angular de 0.5%, MI 2

6.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS COMPACTADAS

Se ensayaron cuatro muestras compactadas de suelo denominado MH-Necaxa, con diferentes energías de compactación. Los resultados que se presentan fueron obtenidos de la información de los tres diferentes aparatos: péndulo de torsión (Facultad de Ingeniería), cámara triaxial de columna resonante (CENAPRED) y columna resonante (Instituto de Ingeniería).

6.3.3 MUESTRA COMPACTADA 1 (MC1)

Muestra compactada con $E_c = 6.05 \text{ kg cm/cm}^3$ y $W_c = 41.72\%$

En las figuras 6.15 a 6.19, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la distorsión angular, estos resultados se definieron a partir de las mediciones de los tres aparatos; péndulo de torsión, cámara triaxial de columna resonante y columna torsionante. Se distinguen en la curva los puntos proporcionados por cada equipo. Se observan diferencias de resultados entre los tres aparatos, por la interpretación tan diferente que tiene cada equipo, en la obtención de cada parámetro estudiado. El módulo de rigidez dinámico disminuye conforme aumenta la distorsión angular.

En las figuras 6.20 a 6.24, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la distorsión angular, los resultados se definieron a partir de las mediciones de los tres aparatos ya mencionados. Se observa que la relación de amortiguamiento tiende a aumentar conforme crece la distorsión angular.

En la figura 6.25, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la presión de confinamiento, para niveles de distorsión angular diferentes, los valores del módulo de rigidez dinámico crecen al incrementarse la presión de confinamiento.

En la figura 6.26, se observa la variación de la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, para varios niveles de distorsión angular diferentes, se aprecia el decremento del mismo a medida que crece la presión de confinamiento.

Finalmente, en el tabla B.1 del anexo B, se presentan los resultados numéricos pertenecientes a la muestra compactada 1, en el que se incluyen resultados de los tres aparatos, tanto del módulo de rigidez dinámico como de la relación de amortiguamiento.

6.2.4 MUESTRA COMPACTADA 2 (MC2)

Muestra compactada con $E_c = 3.0 \text{ kg cm/cm}^3$ y $W_c = 43.2\%$

En las figuras 6.27 a 6.31, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la distorsión angular, pertenecientes a la muestra compactada 2. Se distingue al igual que en la

muestra compactada 1 diferencias de resultados entre los tres aparatos. Se presentan gráficas para cada esfuerzo de confinamiento.

En las figuras 6.32 a 6.36, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la distorsión angular. Se observa el aumento del amortiguamiento conforme es crece la distorsión angular.

En la figura 6.37, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la presión de confinamiento, para varios niveles de distorsión angular, los valores del módulo de rigidez dinámico crecen conforme aumenta la presión de confinamiento.

En la figura 6.38, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, en niveles de distorsión que varían de 0.0001 a 0.1%, se observa el decremento del mismo al incrementarse la presión de confinamiento.

Finalmente en el tabla B.2 del anexo B, se presentan los resultados numéricos pertenecientes a la muestra compactada 2.

6.2.5 MUESTRA COMPACTADA 3 (MC3)

Muestra compactada con $E_c = 14.7 \text{ kg cm/cm}^3$ y $W_c = 35.57\%$

En las figuras 6.39 a 6.43, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la distorsión angular, pertenecientes a la muestra compactada 3. Se puede distinguir las mismas discrepancias que en las anteriores muestras. Se presentan gráficas para cada esfuerzo de confinamiento.

En las figuras 6.44 a 6.48, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la distorsión angular. Se observan las tendencias de cada uno de los equipos, las cuales se van dispersando.

En la figura 6.49, se presenta la variación del módulo de rigidez dinámico con la presión de confinamiento, para niveles de distorsión angular de 0.0001 a 0.1%, los valores del módulo de rigidez dinámico crecen al incrementarse la presión de confinamiento.

En la figura 6.50, se presenta la variación de la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, para diferentes niveles de distorsión angular, se aprecia el decremento del mismo a medida que crece la presión de confinamiento.

En la tabla B.3 del anexo B, se presentan los resultados numéricos pertenecientes a la muestra compactada 3.

6.2.6 MUESTRA COMPACTADA 4 (MC4)

Muestra compactada con $E_c = 19.98 \text{ kg cm/cm}^3$ y $W_c = 36.35\%$

Esta muestra sólo se ensayó con la cámara triaxial de columna resonante por el CENAPRED y con el péndulo de torsión por la Facultad de Ingeniería.

La variación del módulo de rigidez con respecto la distorsión angular se presentan en las figuras 6.51 a 6.55, en la gráficas se puede apreciar la disminución del módulo de rigidez dinámico al aumentar el nivel de distorsión angular.

La variación del amortiguamiento con respecto la distorsión angular se presenta el las figuras 6.56 a 6.60.

En las gráficas 6.61 y 6.62 se presenta la variación del modulo de rigidez dinámico y la relación de amortiguamiento con la presión de confinamiento, respectivamente.

En la tabla B.4 del anexo B, se presentan los resultados numéricos pertenecientes a la muestra compactada 4.

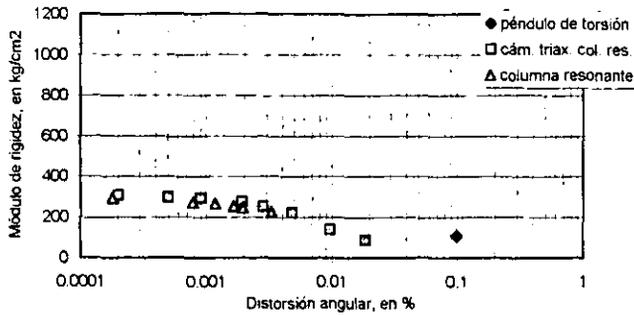


FIGURA 6.15 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

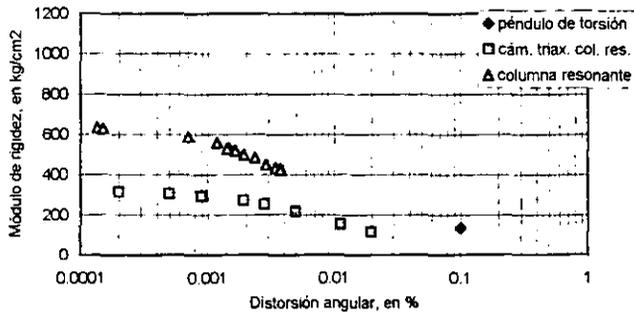


FIGURA 6.16 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

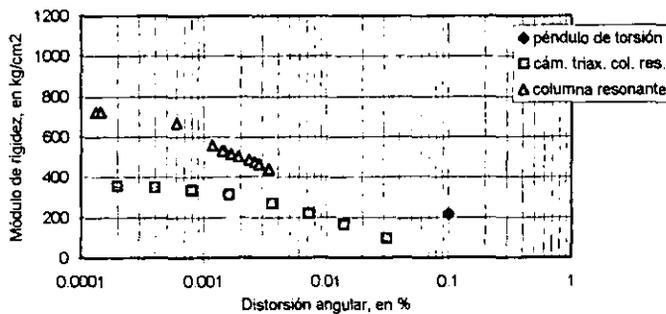


FIGURA 6.17 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

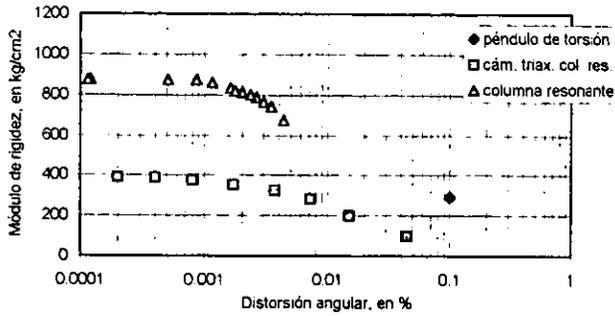


FIGURA 6.18 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

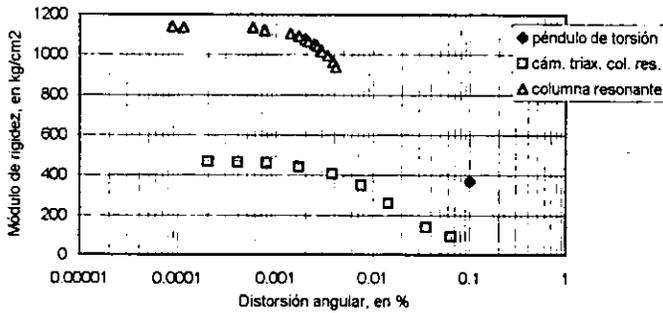


FIGURA 6.19 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

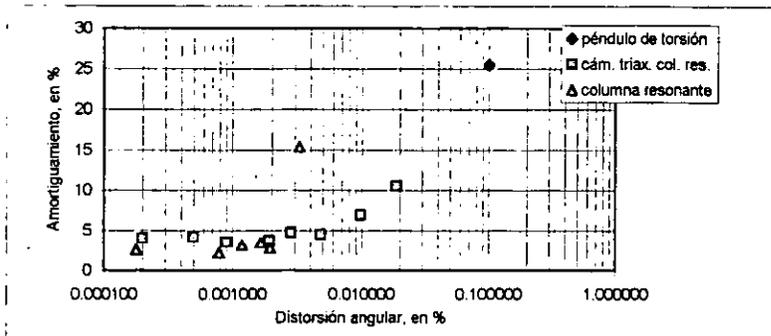


FIGURA 6.20 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

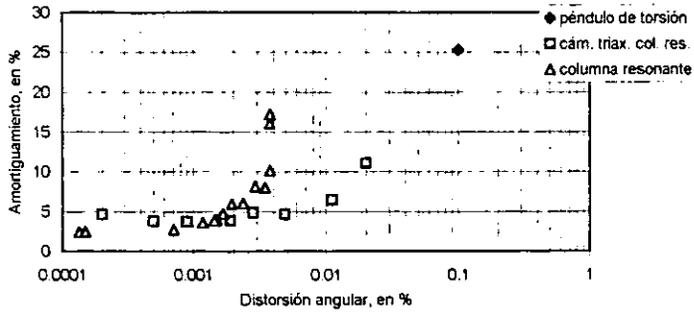


FIGURA 6.21 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

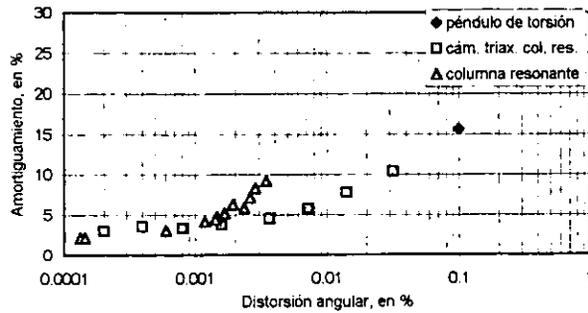


FIGURA 6.22 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

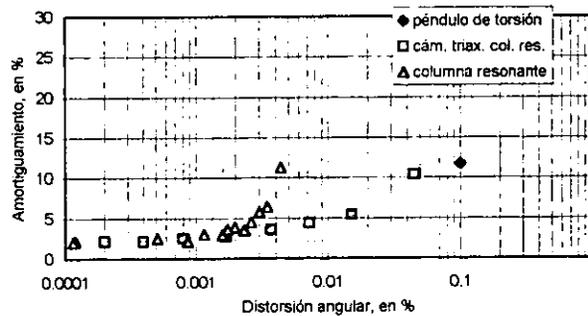


FIGURA 6.23 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

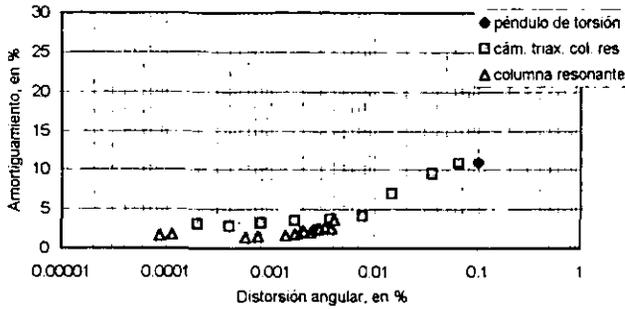


FIGURA 6.24 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular

$$P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$$

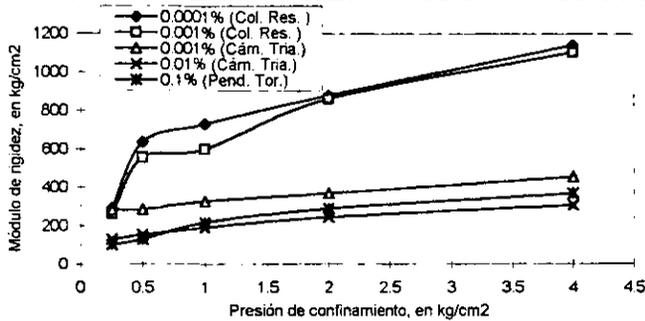


FIGURA 6.25 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.0001%

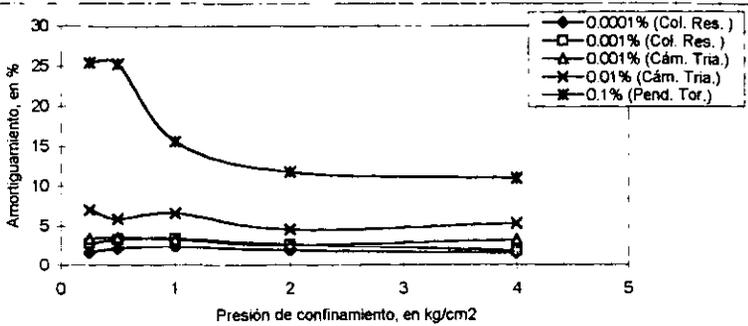


FIGURA 6.26 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.0001%

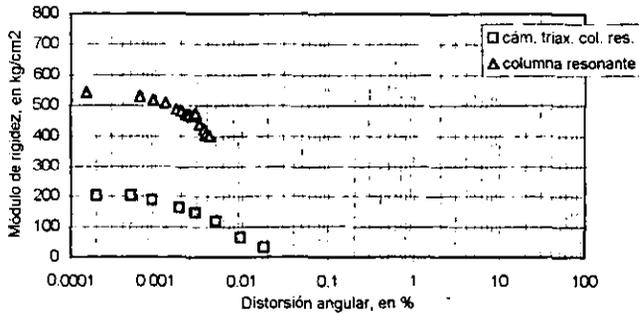


FIGURA 6.27 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
Pc = 0.25 kg/cm²

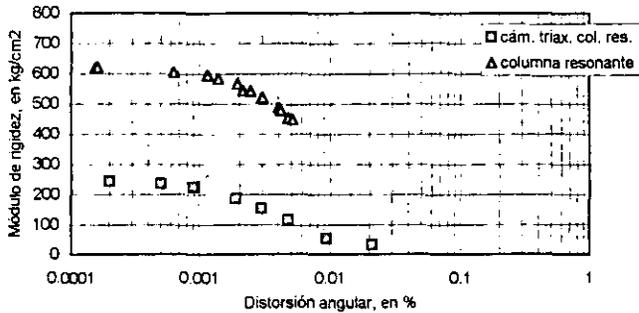


FIGURA 6.28 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
Pc = 0.5 kg/cm²

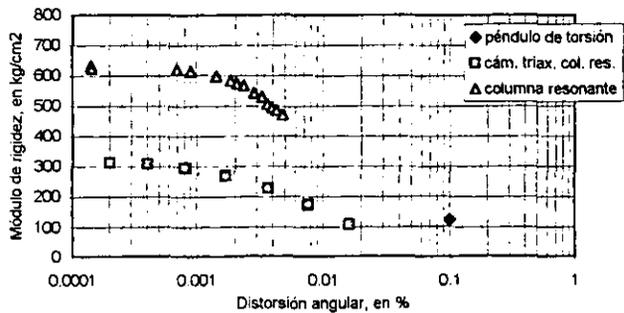


FIGURA 6.29 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
Pc = 1.0 kg/cm²

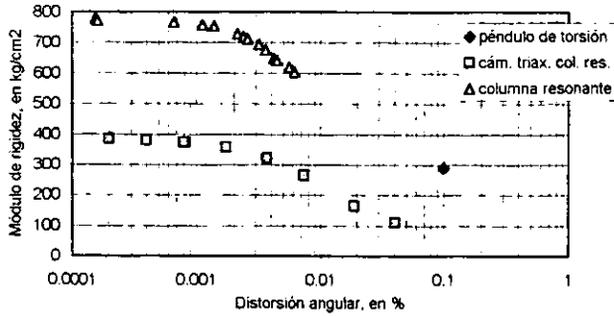


FIGURA 6.30 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

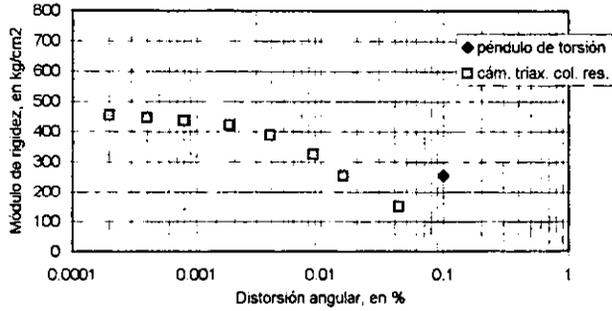


FIGURA 6.31 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

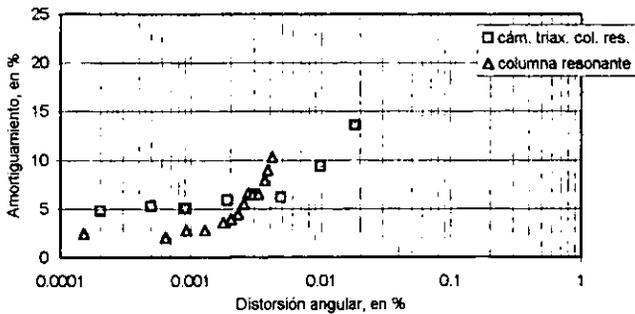


FIGURA 6.32 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

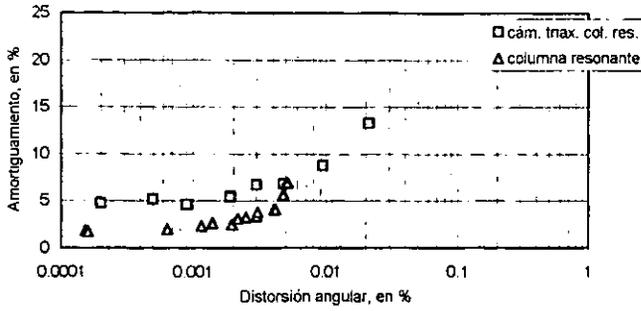


FIGURA 6.33 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

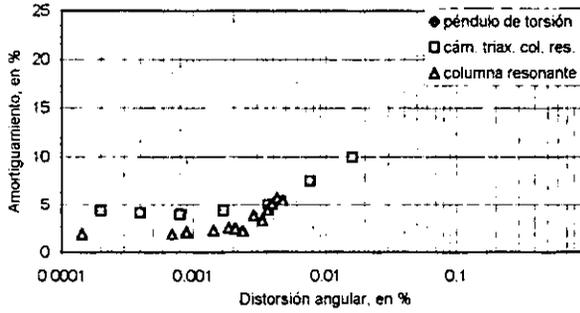


FIGURA 6.34 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

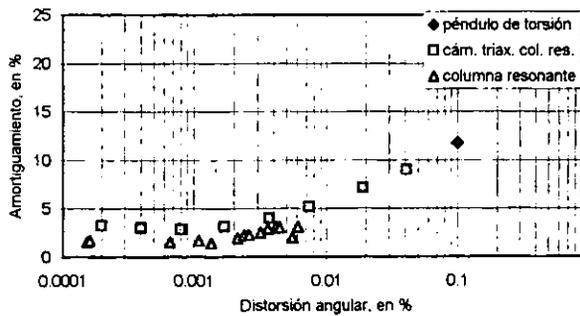


FIGURA 6.35 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

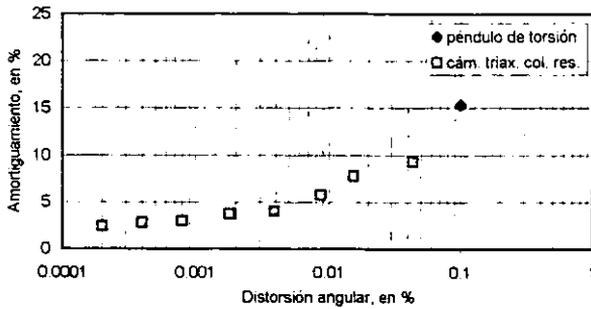


FIGURA 6.36 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

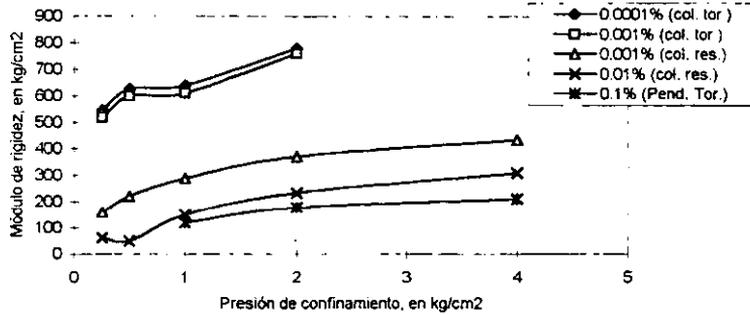


FIGURA 6.37 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1%-a 0.0001%

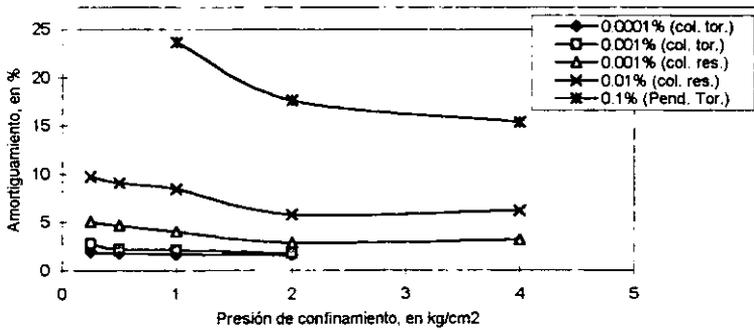


FIGURA 6.38 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.0001%

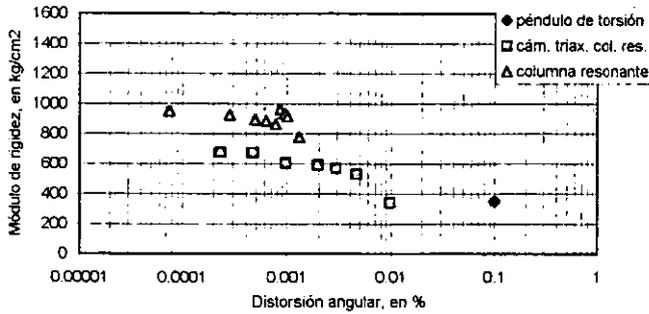


FIGURA 6.39 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

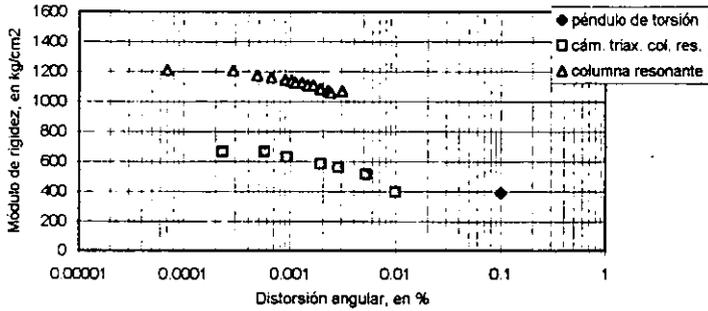


FIGURA 6.40 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.50 \text{ kg/cm}^2$

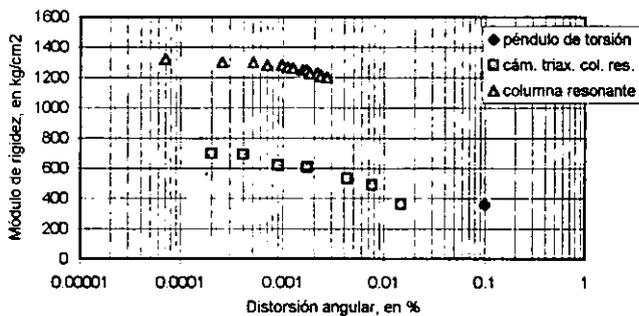


FIGURA 6.41 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

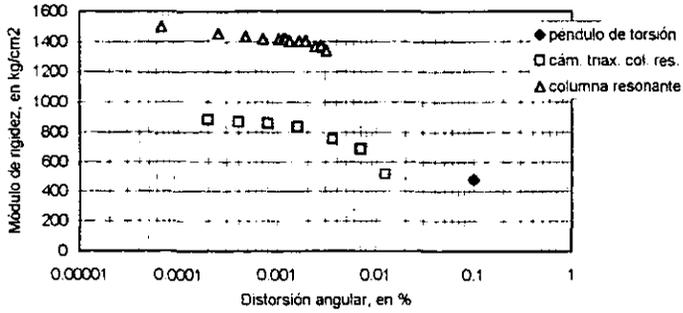


FIGURA 6.42 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

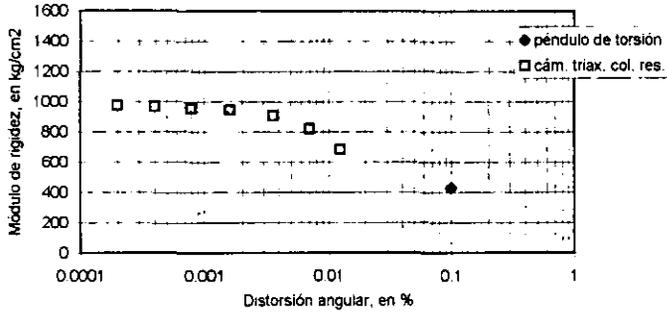


FIGURA 6.43 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

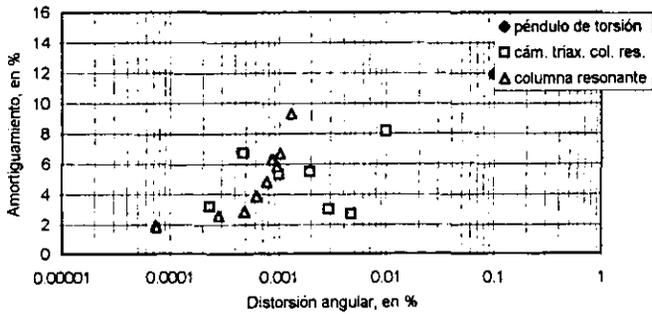


FIGURA 6.44 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

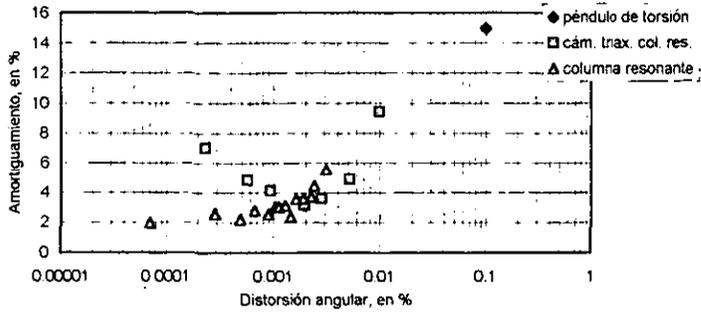


FIGURA 6.45 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

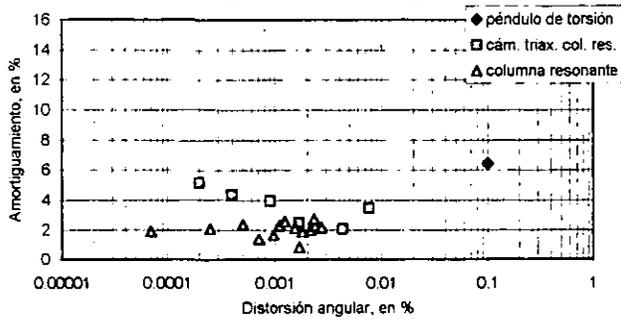


FIGURA 6.46 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

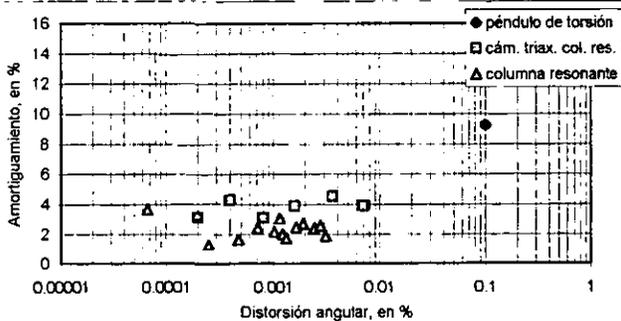


FIGURA 6.47 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

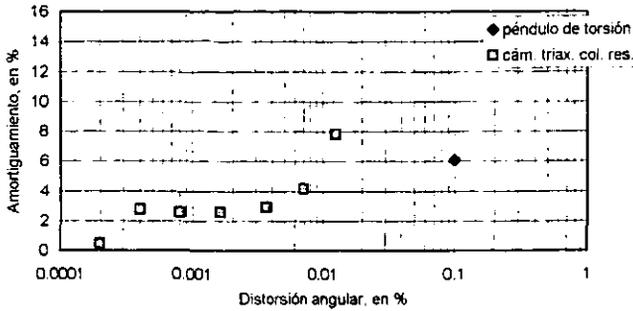


FIGURA 6.48 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular

$$P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$$

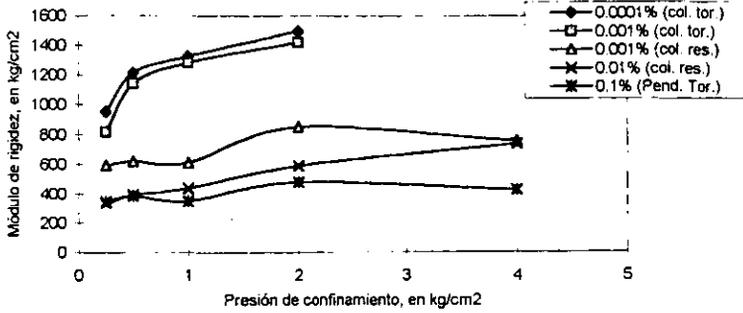


FIGURA 6.49 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.0001%

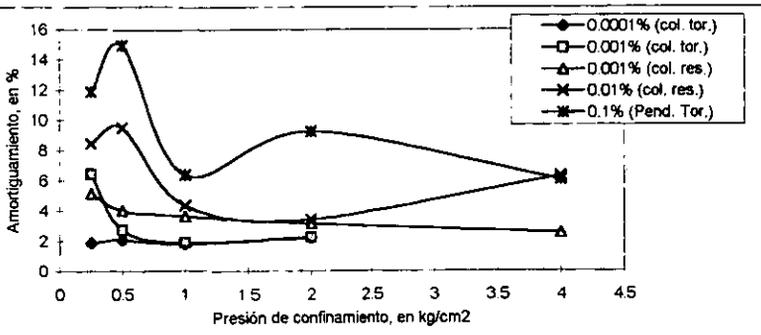


FIGURA 6.50 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.0001%

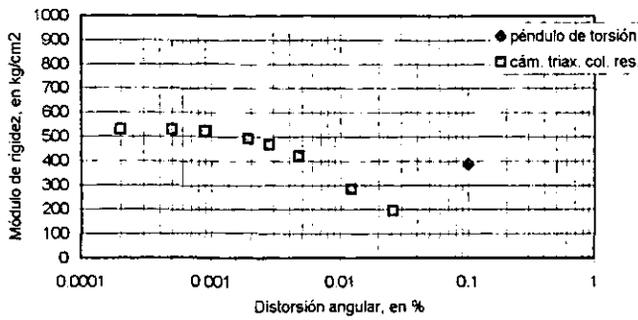


FIGURA 6.51 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

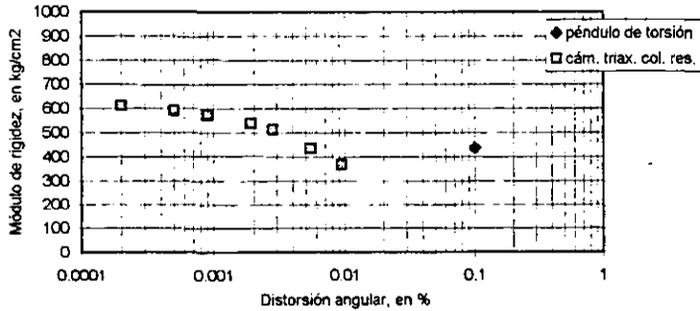


FIGURA 6.52 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 0.50 \text{ kg/cm}^2$

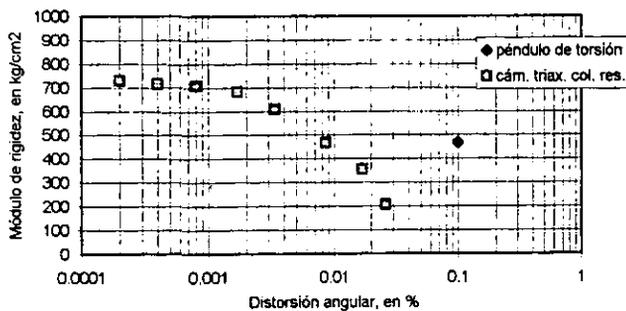


FIGURA 6.53 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

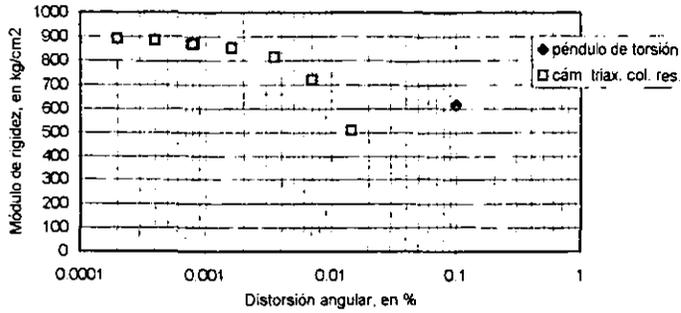


FIGURA 6.54 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

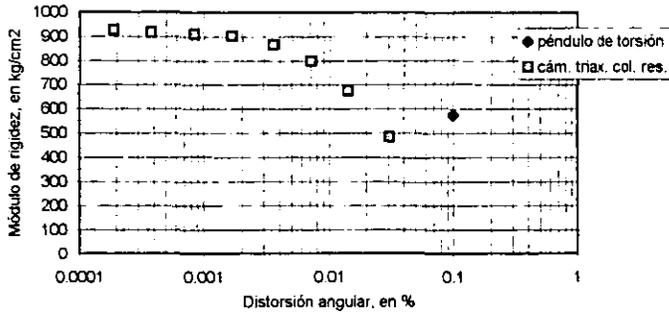


FIGURA 6.55 Variación del módulo de rigidez con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

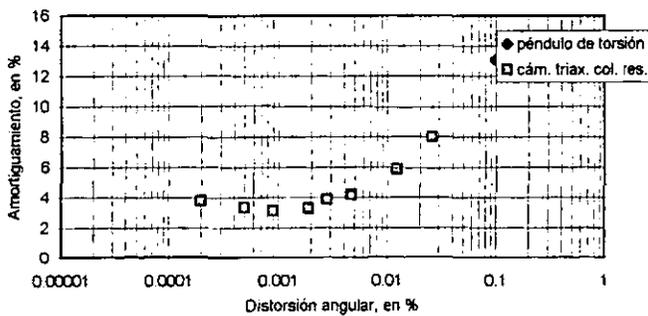


FIGURA 6.56 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

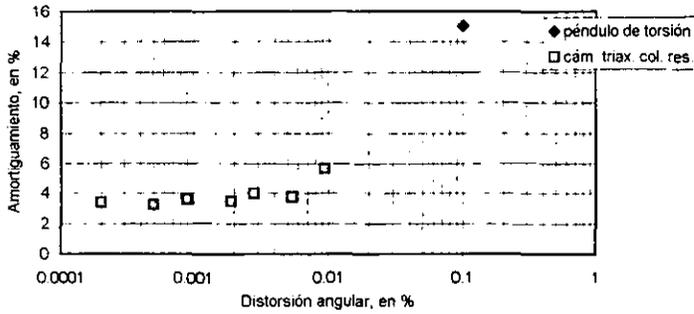


FIGURA 6.57 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

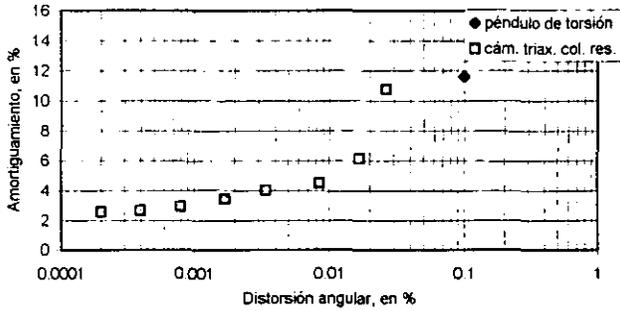


FIGURA 6.58 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

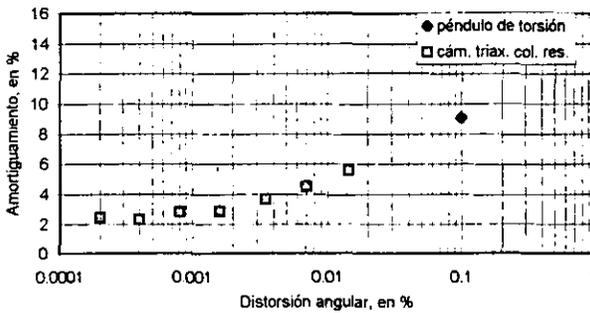


FIGURA 6.59 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

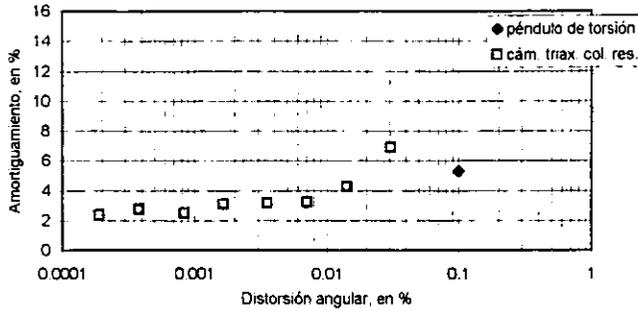


FIGURA 6.60 Variación del amortiguamiento con la distorsión angular
 $P_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

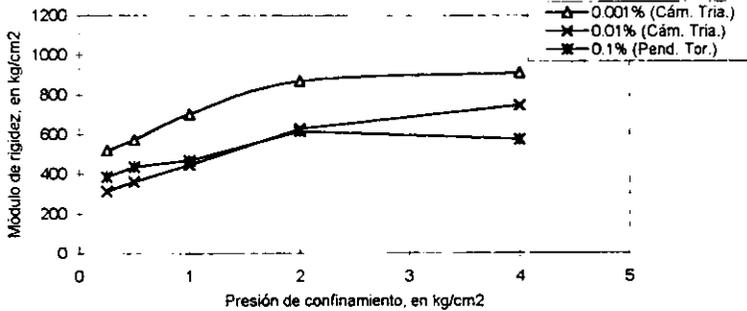


FIGURA 6.61 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento,
 para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.001%

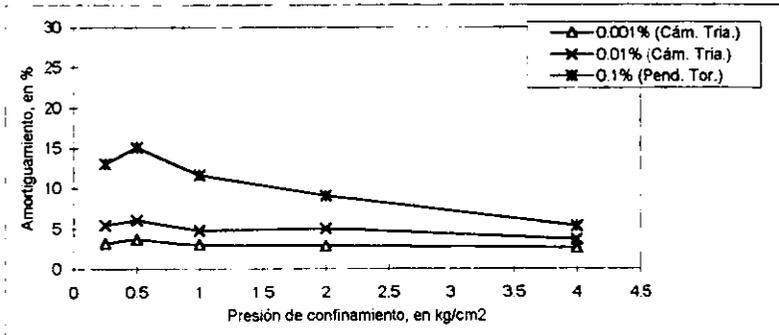


FIGURA 6.62 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento,
 para diferentes niveles de distorsión angular, de 0.1% a 0.001%

CAPITULO VII: Conclusiones

7.1 PENDULO DE TORSIÓN

Se describió el péndulo de torsión de vibración libre, su calibración y los resultados obtenidos, de los cuales se concluye lo siguiente:

- Se describió detalladamente el proceso de calibración, desde el cálculo del momento polar de inercia, hasta la obtención de las constantes de calibración. Se realizaron las modificaciones correspondientes al equipo para obtener el menor error posible. Se practicaron dos calibraciones, para comparar los resultados y obtener de una de ellas el mejor comportamiento.
- De las dos calibraciones realizadas, se presentaron valores de relación de amortiguamiento, del orden de 2 a 3%; muy elevado de lo esperado, del orden de 1%.
- Se obtuvo un mejor comportamiento de la calibración 1, (figura 7.1), ya que al analizar los resultados de la relación de amortiguamiento del aparato, ésta presentó una pendiente positiva, corroborando la tendencia esperada. La relación de amortiguamiento aumenta al incrementarse el número de masas.

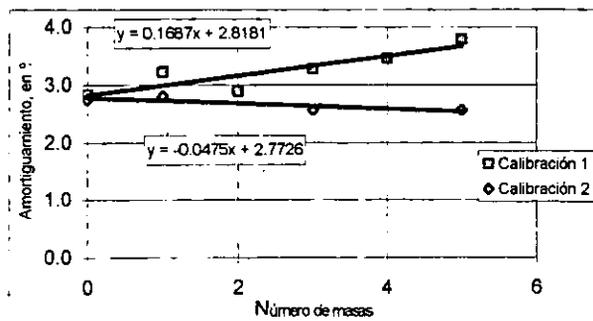


FIGURA 7.1 Variación del amortiguamiento con el número de masas

- En cuanto a los otros dos parámetros en estudio; periodo de vibración del aparato y constante dinámica de resorte, la diferencia que existió entre las dos calibraciones, no fue significativa, no fueron elementos para determinar cual de las dos calibraciones era la de mejor comportamiento. Los dos parámetros aumentan al incrementarse el número de masas.
- El cuarto parámetro fue el momento polar de inercia de masa, el cual aumenta al incrementarse el número de masas.
- Es urgente la necesidad de automatizar el equipo, para partir en iguales condiciones con otros equipos, aumentando así, la precisión de los resultados. Es necesario contar con un dispositivo, que genere y transfiera el par torsionante al vástago superior y éste al espécimen de prueba. Logrando con ello, un mayor control sobre las distorsiones.
- Contar con sensores que registren el par torsionante y el giro, en la muestra ensayada.
- En cuanto al sistema de registro, se requiere de un dispositivo electrónico, que genere las gráficas correspondientes. Esto se puede lograr con un oscilógrafo optoelectrónico (similar al que tiene la cámara triaxial de columna resonante), que permite registrar en papel continuo la variación de la vibración.

7.2 MUESTRAS INALTERADAS

Se ensayaron dos muestras inalteradas con el péndulo de torsión, determinando los parámetros dinámicos más importantes; el módulo de rigidez y relación de amortiguamiento. Con lo cual se concluye lo siguiente:

- De cada una de las dos muestras inalteradas, el módulo de rigidez aumenta, al incrementarse la presión de confinamiento, (figura 7.2). Al aumentar el número de masas en el equipo, la curva se corre hacia arriba ligeramente. Se puede utilizar cualquiera de los dos resultados (ó un promedio), para fines prácticos.

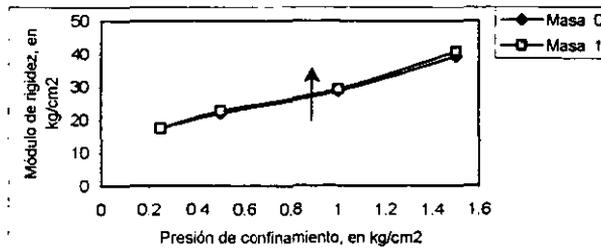


FIGURA 7.2 Variación del módulo de rigidez con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión de 0.5%, de la muestra inalterada 2

- La variación de la relación de amortiguamiento disminuye conforme aumenta la presión de confinamiento, (figura 7.3), pero en una forma irregular. Al aumentar el número de masas en el equipo, la curva se corre hacia arriba.

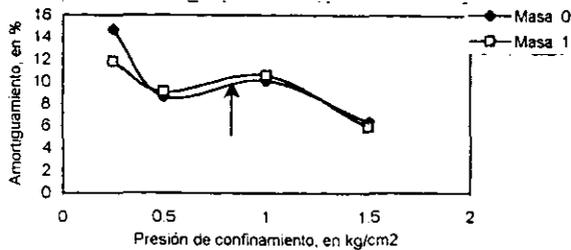


FIGURA 7.3 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento, para un nivel de distorsión de 0.5%, de la muestra inalterada 2

7.3 MUESTRAS COMPACTADAS

Se obtuvo el módulo de rigidez dinámica y relación de amortiguamiento, en cuatro muestras compactadas, empleando tres equipos dinámicos; el péndulo de vibración libre, la cámara triaxial de columna resonante y la columna resonante. Se cubrieron tres niveles de distorsión angular provocada a los especímenes.

Las condiciones de ensaye se realizaron lo más cercano posible a las condiciones de campo. Comparando los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- La presión de confinamiento tiene una influencia clara en la variación del módulo de rigidez y relación de amortiguamiento, (figura 7.4). Al incrementarse dicho valor, el módulo de rigidez dinámico aumenta, corriéndose hacia arriba y la derecha, las curvas que relacionan a μ y γ .
- Para el amortiguamiento, al aumentar el nivel de presión de confinamiento, las curvas que relacionan ζ contra γ , se corren hacia abajo y la derecha, (figura 7.5). Para una distorsión de 0.0001 a 0.001% el amortiguamiento se mantiene constante.
- De la información para cada presión de confinamiento, se concluye que los valores del módulo de rigidez obtenidos en el péndulo de torsión, tienen mayor coincidencia con los obtenidos en la columna resonante, no así con los obtenidos en la cámara triaxial de columna resonante, (figura 7.6). A medida que aumenta la distorsión angular, disminuye el módulo de rigidez.

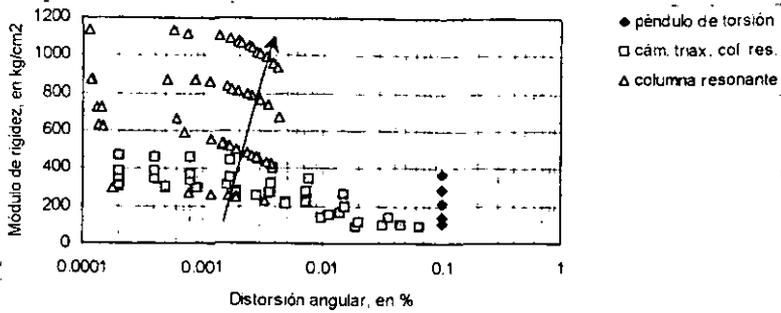


FIGURA 7.4 Variação del módulo de rigidez con la distorsión angular, de la muestra compactada 1

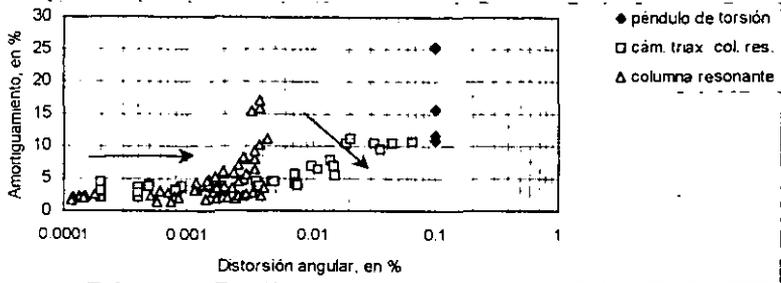


FIGURA 7.5 Variação del amortiguamiento con la distorsión angular, de la muestra compactada 1

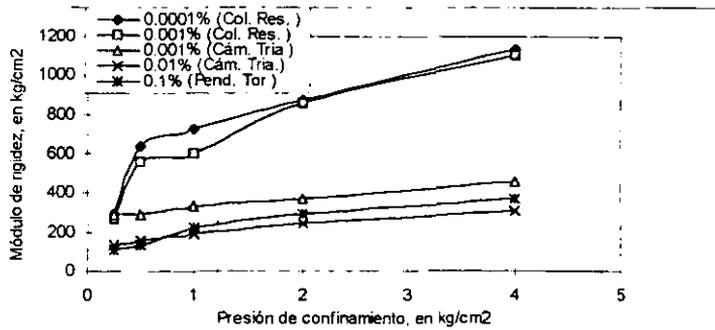


FIGURA 7.6 Variação del módulo de rigidez con la presión de confinamiento, de la muestra compactada 1

- Los valores obtenidos de la relación de amortiguamiento, en el péndulo de torsión, coinciden con los obtenidos en la cámara triaxial de columna resonante; esto por que se calculan con la misma expresión. A medida que aumenta la distorsión angular, aumenta la relación de amortiguamiento, (figura 7.7).

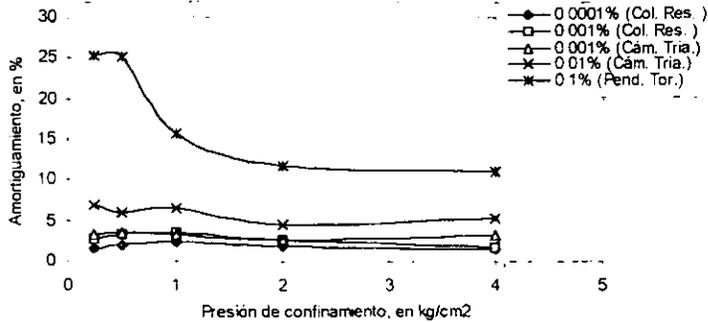


FIGURA 7.7 Variación del amortiguamiento con la presión de confinamiento, De la muestra compactada 1

- Los equipos con los que se ensayaron las muestras mostraron discrepancias en los valores obtenidos del módulo de rigidez y relación de amortiguamiento. A estas diferencias presentadas, se les atribuyen no sólo aparatos con técnicas diferentes, sino los procedimientos de obtención de dichos parámetros, así como las dimensiones de las probetas ensayadas.
- Es necesario seguir ensayando muestras con diferentes materiales, por ejemplo, la utilización de caucho o neopreno, que contribuyan al mejoramiento de los equipos.

REFERENCIAS

1. Castañeda Arceo Carlos
"Determinación del módulo de rigidez dinámico (G), en muestras de arcilla de la Cd. de México, utilizando el péndulo de torsión"
Facultad de Ingeniería, UNAM
1998
2. Zeevaert W. Leonardo
"Teoría y práctica del péndulo de torsión"
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM
1993
3. Mendoza López M. J., Dominguez Morales L. y Orozco Calderón M.
"Cámara triaxial de columna resonante para determinar propiedades dinámicas de suelos, en el intervalo de distorsiones pequeñas a medianas"
Memorias XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 1, SMMS, Morelia
1996
4. Flores Castrellón Osvaldo
"Propiedades dinámicas de Jales"
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM
1996
5. Mendoza López M. J., Dominguez Morales L. y Orozco Calderón M.
"Cámara triaxial ciclica torsionante para la determinación de propiedades dinámicas de suelos, en el intervalo de distorsiones medianas a grandes"
Memorias XVIII Reunión Nacional de Mecánica d Suelos, Vol. 1, SMMS, Morelia
1996
6. Mendoza López M. J., Hernández C. Victor M. y Sánchez L. Antonio
"Comportamiento dinámico de suelos muestreados en la zona de la etapa II, de la Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas, Mich."

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación
1990

7. Mendoza López M. J., Gutiérrez C. A. y Domínguez Morales L.
"Determinación del módulo cortante dinámico de suelos en el laboratorio (columna resonante) y en el campo (sonda suspendida)"

8. Colindres Selva Rafael
"Dinámica de suelos y estructuras"
LIMUSA
1983

9. Hibbeler Russel C.
"Dinámica"
LIMUSA

ANEXO A

- TABLA A1. Resultados numéricos de la calibración 1, del péndulo de torsión
- TABLA A2. Resultados numéricos de la calibración 2, del péndulo de torsión
- TABLA A3. Resultados numéricos de la muestra inalterada 1,
del péndulo de torsión
- TABLA A4. Resultados numéricos de la muestra inalterada 2,
del péndulo de torsión
- TABLA A5. Resultados numéricos de la muestra compactada 1,
del péndulo de torsión
- TABLA A6. Resultados numéricos de la muestra compactada 2,
del péndulo de torsión
- TABLA A7. Resultados numéricos de la muestra compactada 3,
del péndulo de torsión
- TABLA A8. Resultados numéricos de la muestra compactada 4,
del péndulo de torsión

TABLA A1. Resultados numéricos de la calibración 1, del péndulo de torsión

M = Número de masas
 N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{Nm+1} = amplitud de la onda N_m+1
 t_{ap} = periodo del reloj marcador
 T_{ad} = periodo del aparato
 Δ = decremento logarítmico
 ζ_a = amortiguamiento del aparato

M	N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	Y_{Nm+1} (mm)	t_{ap} (s)	T_{ad} (s)	Δ	ζ_a (%)
0	1	4.42	10	4.05	3	1.18	0.3	1.029639	0.337111	0.136949	2.179089
	2	4.38	10	3.98	3	1.4	0.38	1.029639	0.339936	0.130406	2.075023
	3	4.5	10	4.01	3	1.55	0.42	1.029639	0.346637	0.130576	2.077726
	4	4.45	10	4	3	1.45	0.4	1.029639	0.343642	0.128785	2.049253
	5	4.53	10	4.13	3	1.52	0.4	1.029639	0.338809	0.133500	2.124241
	6	4.48	10	4.09	3	1.4	0.35	1.029639	0.338346	0.138629	2.205819
	7	4.55	10	4.2	3	1.35	0.38	1.029639	0.334633	0.126769	2.017179
	8	4.51	10	4.12	3	1.32	0.3	1.029639	0.338132	0.148160	2.357392
Promedio									0.339656		2.135715
Desviación estándar									0.003802		0.109962
0	1	4.42	10	4.1	3	1.38	0.15	0.977836	0.316247	0.221920	3.529771
	2	4.41	10	4.11	3	1.38	0.15	0.977836	0.314763	0.221920	3.529771
	3	4.49	10	4.16	3	1.28	0.15	0.977836	0.316622	0.214398	3.410265
	4	4.45	10	4.16	3	1.39	0.15	0.977836	0.313801	0.222642	3.541241
	5	4.55	10	4.19	3	1.3	0.12	0.977836	0.318555	0.238263	3.789346
	6	4.57	10	4.2	3	1.4	0.18	0.977836	0.319194	0.205127	3.262960
Promedio									0.316530		3.510559
Desviación estándar									0.002091		0.173647
1	1	4.82	10	4	3	1.42	0.18	1.004842	0.363250	0.206546	3.285500
	2	4.85	10	4.04	3	1.25	0.18	1.004842	0.361892	0.193794	3.082864
	3	4.9	10	4.04	3	1.3	0.18	1.004842	0.365623	0.197716	3.145195
	4	4.9	10	4.03	3	1.38	0.18	1.004842	0.366531	0.203688	3.240096
	5	5	10	4.12	3	1.28	0.18	1.004842	0.365841	0.196166	3.120556
	6	5.03	10	4.15	3	1.3	0.15	1.004842	0.365375	0.215948	3.434898
	7	5.07	10	4.16	3	1.28	0.18	1.004842	0.367395	0.196166	3.120556
	8	5.02	10	4.19	3	1.4	0.2	1.004842	0.361168	0.194591	3.095528
Promedio									0.364752		3.218185
Desviación estándar									0.001785		0.130496

M	N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y _i (mm)	Y _{N_m-1} (mm)	t _{ap} (s)	T _{ad} (s)	Δ	ζ _a (%)
2	1	3.78	7	4	3	1.3	0.35	1.001575	0.405638	0.187455	2.982115
	2	3.85	7	4.02	3	1.42	0.4	1.001575	0.411094	0.180993	2.879391
	3	3.83	7	4.1	3	1.4	0.39	1.001575	0.400979	0.182583	2.904672
	4	3.84	7	4.08	3	1.4	0.39	1.001575	0.403997	0.182583	2.904672
	5	3.85	7	4.07	3	1.35	0.39	1.001575	0.406044	0.177388	2.822087
	6	3.89	7	4.1	3	1.4	0.4	1.001575	0.407261	0.178966	2.847180
	7	3.93	7	4.19	3	1.4	0.39	1.001575	0.402611	0.182583	2.904672
	8	3.93	7	4.2	3	1.4	0.42	1.001575	0.401652	0.171996	2.736378
	9	3.99	7	4.22	3	1.48	0.4	1.001575	0.405851	0.186905	2.973365
Promedio									0.405835		2.890019
Desviación estándar									0.003369		0.055631
3	1	4.08	7	4	3	1.38	0.3	0.996186	0.435475	0.218008	3.467619
	2	4.09	7	4.02	3	1.4	0.35	0.996186	0.434371	0.198042	3.150373
	3	4.11	7	4.05	3	1.4	0.36	0.996186	0.433262	0.194018	3.086416
	4	4.2	7	4.06	3	1.4	0.3	0.996186	0.441659	0.220064	3.500274
	5	4.21	7	4.15	3	1.3	0.34	0.996186	0.433109	0.191596	3.047933
	6	4.22	7	4.17	3	1.32	0.3	0.996186	0.432056	0.211658	3.366729
	7	4.24	7	4.19	3	1.4	0.36	0.996186	0.432031	0.194018	3.086416
	8	4.29	7	4.2	3	1.4	0.37	0.996186	0.436085	0.190104	3.024207
	9	4.29	7	4.21	3	1.3	0.3	0.996186	0.435050	0.209477	3.332074
Promedio									0.434989		3.269891
Desviación estándar									0.003471		0.199381
4	1	4.4	7	4.05	3	1.5	0.32	1.000755	0.465960	0.220700	3.510383
	2	4.39	7	4.05	3	1.4	0.3	1.000755	0.464901	0.220064	3.500274
	3	4.42	7	4.08	3	1.3	0.29	1.000755	0.464636	0.214320	3.409023
	4	4.45	7	4.02	3	1.45	0.32	1.000755	0.474772	0.215857	3.433443
	5	4.46	7	4.09	3	1.38	0.3	1.000755	0.467695	0.218008	3.467619
	6	4.48	7	4.1	3	1.42	0.3	1.000755	0.468646	0.222090	3.532465
	7	4.54	7	4.18	3	1.25	0.31	1.000755	0.465833	0.199190	3.168608
	8	4.57	7	4.2	3	1.4	0.33	1.000755	0.466679	0.206448	3.283947
	9	4.5	7	4.25	3	1.25	0.33	1.000755	0.454124	0.190258	3.026663
Promedio									0.467768		3.475535
Desviación estándar									0.003772		0.047594
4	1	4.35	7	4.02	3	1.45	0.35	1.004856	0.466005	0.203055	3.230036
	2	4.36	7	4	3	1.3	0.3	1.004856	0.469411	0.209477	3.332074
	3	4.4	7	4.05	3	1.3	0.3	1.004856	0.467869	0.209477	3.332074
	4	4.4	7	4.05	3	1.4	0.3	1.004856	0.467869	0.220064	3.500274
	5	4.5	7	4.17	3	1.48	0.32	1.004856	0.464733	0.218782	3.479920
	6	4.51	7	4.18	3	1.5	0.3	1.004856	0.464651	0.229920	3.656838
	7	4.53	7	4.15	3	1.41	0.28	1.004856	0.470086	0.230936	3.672988
	8	4.53	7	4.2	3	1.5	0.31	1.004856	0.464490	0.225235	3.582432
	9	4.5	7	4.21	3	1.45	0.29	1.004856	0.460317	0.229920	3.656838
Promedio									0.466757		3.421870
Desviación estándar									0.001930		0.153397
5	1	4.65	7	4	3	1.4	0.29	0.999210	0.497821	0.224907	3.577210

M	N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	t _{ap} (s)	T _{ad} (s)	Δ	ζ _a (%)
	2	4.64	7	4.02	3	1.42	0.28	0.999210	0.494279	0.231946	3.689024
	3	4.7	7	4.04	3	1.45	0.28	0.999210	0.498192	0.234933	3.736460
	4	4.74	7	4.15	3	1.4	0.29	0.999210	0.489114	0.224907	3.577210
	5	4.74	7	4.15	3	1.35	0.22	0.999210	0.489114	0.259176	4.121410
	6	4.71	7	4.15	3	1.42	0.24	0.999210	0.486019	0.253968	4.038722
	7	4.75	7	4.1	3	1.45	0.27	0.999210	0.496123	0.240128	3.818970
	8	4.8	7	4.15	3	1.5	0.3	0.999210	0.495306	0.229920	3.656838
	9	4.81	7	4.15	3	1.5	0.24	0.999210	0.496337	0.261797	4.163022
Promedio									0.492423		3.790006
Desviación estándar									0.005075		0.234656

TABLA A2. Resultados numéricos de la calibración 2, del péndulo de torsión

M = Número de masas
 N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 t_{ap} = periodo del reloj marcador
 T_{ad} = periodo del aparato
 λ = decremento logarítmico
 ζ_a = amortiguamiento del aparato

M	N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	Y_{N_m+1} (mm)	t_{ap} (s)	T_{ad} (s)	Δ	ζ_a (%)
0	1	3.02	7	5.3	4	12.2	3.8	0.994206	0.323720	0.166634	2.651123
	2	3.07	7	5.36	4	13.9	4.1	0.994206	0.325396	0.174415	2.774825
	3	3.09	7	5.4	4	9.1	2.8	0.994206	0.325090	0.168379	2.678878
	4	3.07	7	5.41	4	10.9	3	0.994206	0.322389	0.184307	2.932079
	5	3.09	7	5.38	4	11.6	3.5	0.994206	0.326298	0.171177	2.723363
	6	3.09	7	5.42	4	12.3	4	0.994206	0.323890	0.160472	2.553161
	7	3.09	7	5.5	4	8.9	2.4	0.994206	0.319179	0.187226	2.978474
	8	3.11	7	5.55	4	12	3.8	0.994206	0.318351	0.164272	2.613581
Promedio									0.323039		2.738185
Desviación estándar									0.002900		0.150120
1	1	3.41	7	5.41	4	10.9	3	1.009968	0.363770	0.184307	2.932079
	2	3.4	7	5.35	4	9.8	2.8	1.009968	0.366771	0.178966	2.847180
	3	3.4	7	5.33	4	12	3.8	1.009968	0.368147	0.164272	2.613581
	4	3.4	7	5.37	4	10.6	3	1.009968	0.365405	0.180320	2.868705
	5	3.5	7	5.43	4	11.2	3.1	1.009968	0.371995	0.183502	2.919275
	6	3.51	7	5.49	4	11.3	3.1	1.009968	0.368981	0.184772	2.939459
	7	3.5	7	5.42	4	10.9	3	1.009968	0.372682	0.184307	2.932079
	8	3.51	7	5.49	4	14.9	4.8	1.009968	0.368981	0.161821	2.574604
	9	3.5	7	5.54	4	14.4	4.6	1.009968	0.364609	0.163025	2.593744
Promedio									0.367927		2.802301
Desviación estándar									0.003111		0.159515
3	1	4.1	7	6.62	5	13.6	4.2	1.001754	0.443159	0.167855	2.670543
	2	4.09	7	6.71	5	11.5	3.5	1.001754	0.436148	0.169941	2.703700
	3	4.19	7	6.71	5	14.8	4.9	1.001754	0.446812	0.157913	2.512472
	4	4.15	7	6.78	5	11.6	3.8	1.001754	0.437977	0.159429	2.536577
	5	4.2	7	6.81	5	15.6	5.2	1.001754	0.441301	0.156945	2.497072
	6	4.27	7	6.88	5	13.8	4.7	1.001754	0.444092	0.153872	2.448220

M	N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	t _{ap} (s)	T _{ad} (s)	λ	ε _a (%)
Promedio									0.441582		2.561431
Desviación estándar									0.003968		0.102097
5	1	4.62	7	6.62	5	15.6	5.5	1.010687	0.503817	0.148932	2.369658
	2	4.7	7	6.17	5	14	4.6	1.010687	0.549922	0.159000	2.529756
	3	4.71	7	6.73	5	13.5	4.1	1.010687	0.505236	0.170243	2.708511
	4	4.73	7	6.27	5	14.1	4.3	1.010687	0.544606	0.169651	2.699102
	5	4.72	7	6.27	5	13	4.1	1.010687	0.543455	0.164852	2.622795
	6	4.85	7	6.9	5	14.3	4.9	1.010687	0.507436	0.153003	2.434404
Promedio									0.525745		2.560704
Desviación estándar									0.022318		0.140189

TABLA A3. Resultados numéricos de la muestra inalterada 1, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 Δ = decremento logarítmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_p = amortiguamiento del suelo
 $\Delta\mu/\mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (cm)	Y_{N_m+1} (cm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	Δ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_p (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	
1	4.98	3	6.71	5	17.9	2.1	1.2422	5.0579	0.7143	11.295	0.60956	10.72	11.675	1.10	
2	5.08	3	6.72	5	25.7	5.7	1.2653	4.9658	0.502	7.964	0.60956	10.72	8.206	1.10	
3	5.20	3	6.80	5	24.1	5.0	1.2800	4.9089	0.5243	8.315	0.57217	10.45	8.563	1.12	
4	5.19	3	6.82	5	21.1	3.8	1.2737	4.9329	0.5714	9.057	0.49991	10.59	9.336	1.11	
5	5.27	3	6.89	5	25.5	6.0	1.2802	4.9078	0.4823	7.654	0.60611	10.45	7.877	1.13	
6	5.29	3	6.96	5	22.8	5.1	1.2722	4.939	0.4992	7.920	0.54122	10.59	8.156	1.11	
Esf. efectivo de confinamiento							0.3 kg/cm ²		Distorsión angular			0.005			
Número de masas							0		Constante geométrica			0.4036			
Módulo de rigidez							10.57 kg/cm ²		Desv. est. del periodo			0.0142			
Relación de amortiguamiento							9.1%		Desv. est. del mod. de rig.			0.1176			
1	3.01	2	4.01	3	16.1	2.8	1.1328	5.5468	0.8746	13.787	0.37002	13.80	13.801	2.2	
2	3.01	2	4.01	3	20.9	4.0	1.1328	5.5468	0.8267	13.045	0.4814	13.77	13.771	2.2	
3	3.08	2	4.08	3	17.6	2.7	1.1392	5.5154	0.9373	14.755	0.40366	13.67	13.673	2.2	
4	3.09	2	4.06	3	20.3	3.9	1.1485	5.4706	0.8248	13.016	0.46877	13.36	13.361	2.3	
5	3.02	2	4.08	3	16.1	2.4	1.1170	5.6249	0.9517	14.976	0.36766	14.28	14.284	2.1	
6	3.09	2	4.10	3	18.6	3.0	1.1384	5.5191	0.9123	14.369	0.42708	13.68	13.676	2.2	
7	3.10	2	4.15	3	20.8	3.9	1.1273	5.5738	0.837	13.204	0.47845	13.92	13.924	2.2	
8	3.11	2	4.19	3	19.4	3.4	1.1201	5.6094	0.8707	13.727	0.44503	14.14	14.141	2.2	
9	3.12	2	4.21	3	18.0	2.6	1.1184	5.6181	0.9674	15.218	0.41081	14.26	14.258	2.1	
Esf. efectivo de confinamiento							0.6 kg/cm ²		Distorsión angular			0.005			
Número de masas							0		Constante geométrica			0.4036			
Módulo de rigidez							13.68 kg/cm ²		Desv. est. del periodo			0.0107			
Relación de amortiguamiento							13.6%		Desv. est. del mod. de rig.			0.3057			
1	3.57	3	4.00	3	22.0	2.9	0.8880	7.0755	0.6754	10.688	0.48124	23.59	11.425	1.5	
2	3.59	3	4.01	3	21.1	2.7	0.8908	7.0537	0.6853	10.843	0.46181	23.44	11.586	1.5	
3	3.60	3	4.04	3	20.1	2.6	0.8866	7.0867	0.6817	10.787	0.43935	23.69	11.533	1.5	
4	3.69	3	4.11	3	23.0	3.1	0.8933	7.0337	0.668	10.572	0.50417	23.27	11.290	1.5	
5	3.71	3	4.11	3	23.2	3.5	0.8981	6.9957	0.6305	9.984	0.51011	22.95	10.648	1.6	
6	3.75	3	4.18	3	23.6	3.6	0.8926	7.039	0.6268	9.926	0.518	23.27	10.595	1.5	
7	3.80	3	4.19	3	24.8	3.8	0.9024	6.963	0.6253	9.903	0.54615	22.70	10.554	1.6	

N	L _m (cm)	N _m	L _p	N _p	Y ₁ (cm)	Y _{1(m-1)} (cm)	T _{sd} (s)	ω _{sd} (s ⁻¹)	λ	ξ _s (%)	γ	μ ₁ (kg/cm ²)	μ _p (%)	μ _{1 μ_p} (%)
8	3 68	3	4 13	3	21 0	2 6	0 8866	7 0871	0 6963	11 015	0 45875	23 70	11 780	1 5
Esf. efectivo de confinamiento					1 0 kg/cm ²			Distorsión angular					0 005	
Número de masas					0			Constante geométrica					0 4036	
Módulo de rigidez					23 23 kg/cm ²			Desv. est. del periodo					0 0056	
Relación de amortiguamiento					11 0%			Desv. est. del mod. de rig.					0 3591	
1	2 21	2	4 07	3	15 5	5 3	0 8154	7 7053	0 5366	8 509	0 33097	28 66	9 191	3 2
2	2 25	2	4 07	3	21 1	5 8	0 8302	7 5683	0 6457	10 223	0 4518	27 58	11 037	3 3
3	2 28	2	4 06	3	24 0	9 9	0 8433	7 4503	0 4428	7 029	0 52014	26 40	7 525	3 4
4	2 28	2	4 09	3	22 7	8 5	0 8372	7 5054	0 4911	7 793	0 49005	26 90	8 369	3 4
5	2 30	2	4 15	3	24 0	6 3	0 8323	7 5493	0 6688	10 584	0 5139	27 44	11 426	3 3
6	2 30	2	4 21	3	20 9	3 9	0 8204	7 6584	0 8394	13 242	0 4418	28 60	14 357	3 2
Esf. efectivo de confinamiento					1 4 kg/cm ²			Distorsión angular					0 005	
Número de masas					0			Constante geométrica					0 4036	
Módulo de rigidez					27 15 kg/cm ²			Desv. est. del periodo					0 0104	
Relación de amortiguamiento					11 5%			Desv. est. del mod. de rig.					0 9041	
1	7 45	4	8 00	6	22 0	2 9	1 4028	4 4789	0 507	8 036	0 51971	11 57	8 293	0 9
2	7 53	4	8 08	6	19 9	2 1	1 4039	4 4756	0 562	8 912	0 4694	11 58	9 203	0 9
3	7 60	4	8 15	6	19 7	2 3	1 4047	4 4728	0 537	8 514	0 46507	11 55	8 790	0 9
4	7 69	4	8 20	6	21 9	2 8	1 4127	4 4476	0 514	8 157	0 51778	11 40	8 414	0 9
5	7 71	4	8 31	6	20 4	2 7	1 3976	4 4956	0 506	8 020	0 48166	11 67	8 278	0 9
6	7 86	4	8 49	6	21 9	3 1	1 3946	4 5053	0 489	7 756	0 51714	11 72	8 004	0 9
Esf. efectivo de confinamiento					0 3 kg/cm ²			Distorsión angular					0 005	
Número de masas					1			Constante geométrica					0 5336	
Módulo de rigidez					9 92 kg/cm ²			Desv. est. del periodo					0 0063	
Relación de amortiguamiento					8 43%			Desv. est. del mod. de rig.					0 1077	
1	4 9	3	5 38	4	15 2	2 0	1 2242	5 1324	0 676	10 698	0 34878	15 65	11 182	2 8
2	4 99	3	5 40	4	17 8	2 9	1 2396	5 0688	0 605	9 582	0 41048	15 19	9 996	2 9
3	5 09	3	5 42	4	20 0	3 4	1 2597	4 9877	0 591	9 359	0 46286	14 65	9 748	3 0
4	5 12	3	5 50	4	19 3	2 7	1 2487	5 0316	0 656	10 378	0 44492	14 97	10 826	3 0
5	5 26	3	5 57	4	23 8	2 9	1 2668	4 96	0 702	11 098	0 54921	14 53	11 567	3 1
Esf. efectivo de confinamiento					0 6 kg/cm ²			Distorsión angular					0 005	
Número de masas					1			Constante geométrica					0 5336	
Módulo de rigidez					14 67 kg/cm ²			Desv. est. del periodo					0 0168	
Relación de amortiguamiento					11 5%			Desv. est. del mod. de rig.					0 4458	
1	2 68	2	4 04	3	16 8	4 8	0 9901	6 3463	0 626	9 920	0 3657	25 22	10 626	2 3
2	2 72	2	4 06	3	21 8	6 9	0 9999	6 2839	0 575	9 116	0 47689	24 60	9 741	2 4
3	2 77	2	4 11	3	19 0	5 3	1 0059	6 2465	0 638	10 108	0 41549	24 32	10 805	2 4
4	2 71	2	4 10	3	19 8	5 4	0 9865	6 3693	0 650	10 285	0 43012	25 45	11 027	2 3
5	2 69	2	4 08	3	20 1	5 0	0 984	6 3853	0 695	11 004	0 43549	25 65	11 811	2 3
6	2 70	2	4 03	3	19 3	3 7	0 9999	6 2837	0 826	13 032	0 41793	24 85	13 972	2 3
7	2 79	2	4 10	3	21 6	4 1	1 0156	6 1866	0 831	13 109	0 46991	23 98	14 022	2 4
8	2 80	2	4 15	3	20 8	3 2	1 007	6 2397	0 936	14 733	0 4489	24 59	15 789	2 4
9	2 85	2	4 19	3	20 7	2 8	1 0187	6 1677	1 000	15 722	0 44677	24 02	16 825	2 4
10	2 92	2	4 24	3	17 9	1 0	1 0278	6 113	1 442	22 375	0 3758	24 26	23 938	2 4
11	2 89	2	4 22	3	20 0	1 8	1 0221	6 1474	1 204	18 819	0 42664	24 15	20 143	2 4
Esf. efectivo de confinamiento					1 0 kg/cm ²			Distorsión angular					0 005	
Número de masas					1			Constante geométrica					0 5336	
Módulo de rigidez					24 19 kg/cm ²			Desv. est. del periodo					0 0148	
Relación de amortiguamiento					10 7%			Desv. est. del mod. de rig.					0 5808	
1	2 54	2	2 23	2	19 4	4 0	1 1472	5 4771	0 789	12 467	0 43691	18 16	13 128	21 2
2	2 55	2	2 77	2	22 7	4 8	0 9272	6 7768	0 777	12 271	0 47988	29 61	13 314	13 0
3	2 54	2	2 76	2	21 3	3 8	0 9269	6 7789	0 862	13 590	0 44837	29 76	14 756	12 9
4	2 52	2	2 72	2	21 0	3 5	0 9331	6 7337	0 896	14 116	0 44424	29 34	15 313	13 1
5	2 58	2	2 78	2	20 3	3 0	0 9347	6 7221	0 956	15 042	0 42653	29 31	16 319	13 1
6	2 60	2	2 79	2	20 7	3 0	0 9386	6 6944	0 966	15 192	0 43536	29 04	16 471	13 2
7	2 68	2	2 84	2	21 5	3 3	0 9504	6 611	0 937	14 751	0 45501	28 15	15 955	13 6

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (cm)	Y _{2(m+1)} (cm)	T _{sg} (s)	σ _{sd} (s ⁻¹)	λ	ξ _s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ξ _p (%)	V _{1/11} (%)
8	2 55	2	2 80	2	17 3	1 8	0 9172	6 8502	1 131	17 723	0 35698	31 00	19 308	12 4
9	2 61	2	2 82	2	20 8	3 2	0 9322	6 7405	0 936	14 733	0 43707	29 47	15 989	13 0
Esf. efectivo de confinamiento							1 4 kg/cm ²		Distorsión angular			0 005		
Número de masas							1		Constante geométrica			0 5336		
Módulo de rigidez							28 49 kg/cm ²		Desv. est. del periodo			0 0721		
Relación de amortiguamiento							15 1%		Desv. est. del mod. de rig.			3 8402		

TABLA A4. Resultados numéricos de la muestra inalterada 2, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 λ = decremento logarítmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_p = amortiguamiento del suelo
 $\Delta\mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	Y_{N_m+1} (mm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	λ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_p (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)
1	2.61	2	3.93	3	21.6	3.0	0.9935	6.3241	0.987	15.519	0.4797	18.28	16.384	2.8
2	2.73	2	3.98	3	28.6	6.0	1.0262	6.123	0.7808	12.332	0.6465	16.84	12.961	3.1
3	2.74	2	4.00	3	23.9	4.1	1.0248	6.1313	0.8814	13.893	0.5376	16.97	14.611	3.0
4	2.78	2	4.09	3	24.6	4.9	1.0169	6.1791	0.8068	12.735	0.5543	17.20	13.400	3.0
5	2.81	2	4.10	3	29.3	7.2	1.0253	6.128	0.7018	11.100	0.6643	16.81	11.660	3.1
6	2.82	2	4.17	3	21.8	3.9	1.0117	6.2106	0.8605	13.568	0.4894	17.44	14.288	2.9
7	2.88	2	4.19	3	28.4	7.0	1.0283	6.1103	0.7002	11.076	0.6444	16.71	11.632	3.1
8	2.89	2	4.19	3	27.0	6.5	1.0319	6.0892	0.712	11.260	0.6128	16.59	11.822	3.1
9	2.89	2	4.20	3	27.8	7.0	1.0294	6.1037	0.6896	10.909	0.6312	16.66	11.454	3.1
10	2.91	2	4.22	3	27.3	7.0	1.0316	6.0906	0.6805	10.767	0.6203	16.57	11.302	3.1
11	2.91	2	4.22	3	24.8	5.8	1.0316	6.0906	0.7265	11.486	0.5625	16.60	12.060	3.1
Esf. efectivo de confinamiento							0.25 kg/cm ²	Distorsión angular				0.005		
Número de masas							0	Constante geométrica				0.3978		
Módulo de rigidez							17.51 kg/cm ²	Desv. est. del periodo				0.0116		
Relación de amortiguamiento							14.7%	Desv. est. del mod. de rig.				0.5145		
1	4.79	4	5.38	4	17.2	1.6	0.8931	7.0356	0.5937	9.408	0.3777	22.89	10.035	2.6
2	4.88	4	5.41	4	22.0	2.9	0.9048	6.9443	0.5066	8.036	0.4863	22.15	8.540	2.7
3	4.95	4	5.43	4	25.1	3.8	0.9144	6.8714	0.472	7.490	0.5571	21.60	7.940	2.8
4	4.98	4	5.46	4	25.5	3.8	0.9149	6.8678	0.4759	7.553	0.566	21.57	8.006	2.8
5	4.95	4	5.48	4	21.8	2.6	0.9061	6.9347	0.5316	8.431	0.4817	22.09	8.963	2.7
6	5.00	4	5.50	4	21.8	2.6	0.9119	6.8904	0.5316	8.431	0.4826	21.77	8.955	2.7
7	5.10	4	5.55	4	25.6	3.9	0.9217	6.8167	0.4704	7.466	0.5695	21.21	7.905	2.8
8	5.17	4	5.60	4	25.6	3.9	0.926	6.785	0.4704	7.466	0.5702	20.98	7.901	2.8
Esf. efectivo de confinamiento							0.50 kg/cm ²	Distorsión angular				0.005		
Número de masas							0	Constante geométrica				0.3978		
Módulo de rigidez							21.86 kg/cm ²	Desv. est. del periodo				0.0104		
Relación de amortiguamiento							8.65%	Desv. est. del mod. de rig.				0.5975		
1	2.13	2	4.00	3	19.3	5.0	0.7962	7.8912	0.6753	10.687	0.4059	30.06	11.629	5.5
2	2.19	2	4.03	3	24.0	7.7	0.8126	7.7326	0.5684	9.010	0.5108	28.52	9.747	5.8
3	2.12	2	4.01	3	22.0	6.3	0.7905	7.9483	0.6252	9.902	0.4622	30.53	10.780	5.5
4	2.12	2	4.03	3	25.4	8.1	0.7866	7.9879	0.5714	9.057	0.5336	30.83	9.857	5.4

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	T _{sd} (s)	ω _{sd} (s ⁻¹)	λ	ξ _s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ξ _p (%)	M ₀₁₁ (%)
5	2.18	2	4.09	3	22.6	6.9	0.797	7.8837	0.5932	9.399	0.477	29.90	10.210	5.6
6	2.24	2	4.10	3	25.6	8.2	0.8169	7.6913	0.5692	9.023	0.5459	28.16	9.752	5.9
7	2.32	2	4.11	3	23.1	7.2	0.844	7.4442	0.5829	9.237	0.4982	26.09	9.934	6.4
8	2.30	2	4.12	3	24.4	7.9	0.8347	7.5272	0.5639	8.938	0.5245	26.76	9.625	6.2
9	2.31	2	4.19	3	25.7	8.8	0.8244	7.622	0.5359	8.498	0.5505	27.54	9.163	6.0
10	2.32	2	4.20	3	28.7	9.9	0.826	7.6072	0.5322	8.440	0.6152	27.41	9.096	6.1
Esf efectivo de confinamiento					0.1 kg/cm ²				Distorsión angular				0.005	
Número de masas					0				Constante geométrica				0.3978	
Módulo de rigidez					28.70 kg/cm ²				Desv est del periodo				0.0197	
Relación de amortiguamiento					10.1%				Desv est del mod. de rig.				1.6657	
1	3.75	4	4.02	3	19.8	3.3	0.7044	8.9197	0.4479	7.111	0.3965	40.33	7.876	2.0
2	3.78	4	4.03	3	20.2	4.1	0.7083	8.8709	0.3987	6.332	0.4063	39.72	6.976	2.0
3	3.81	4	4.07	3	23.0	5.0	0.7069	8.8884	0.3815	6.061	0.4623	39.90	6.667	2.0
4	3.82	4	4.11	3	22.1	4.8	0.7019	8.9523	0.3817	6.064	0.4425	40.63	6.682	2.0
5	3.85	4	4.11	3	18.0	3.7	0.7074	8.8825	0.3955	6.282	0.3618	39.85	6.920	2.0
6	3.93	4	4.18	3	25.6	6.0	0.71	8.8499	0.3627	5.763	0.516	39.45	6.319	2.0
7	3.96	4	4.17	3	23.9	5.4	0.7171	8.7619	0.3719	5.908	0.4841	38.48	6.472	2.1
8	3.99	4	4.20	3	24.8	5.8	0.7174	8.7585	0.3632	5.772	0.5025	38.43	6.315	2.1
Esf efectivo de confinamiento					1.5 kg/cm ²				Distorsión angular				0.005	
Número de masas					0				Constante geométrica				0.3978	
Módulo de rigidez					39.13 kg/cm ²				Desv est del periodo				0.0056	
Relación de amortiguamiento					6.40%				Desv est del mod. de rig.				0.7942	
1	2.99	2	3.98	3	14.0	2.0	1.138	5.521	0.973	15.303	0.3116	18.38	16.143	2.9
2	3.00	2	3.99	3	16.1	2.9	1.139	5.5164	0.8571	13.515	0.3605	18.24	14.249	2.9
3	3.11	2	4.03	3	24.9	6.8	1.169	5.3747	0.649	10.274	0.5658	17.06	10.784	3.1
4	3.12	2	4.07	3	24.8	6.6	1.1613	5.4106	0.6619	10.476	0.5625	17.33	11.006	3.0
5	3.14	2	4.09	3	22.0	5.2	1.163	5.4026	0.7212	11.403	0.498	17.31	11.984	3.1
6	3.15	2	4.05	3	24.2	6.6	1.1782	5.3328	0.6496	10.285	0.5509	16.77	10.787	3.2
7	3.15	2	4.06	3	24.9	6.8	1.1753	5.3459	0.649	10.274	0.5665	16.86	10.778	3.1
8	3.16	2	4.14	3	24.8	6.8	1.1563	5.434	0.647	10.243	0.5622	17.48	10.763	3.0
9	3.25	2	4.19	3	28.3	2.9	1.175	5.3473	1.1391	17.838	0.6285	17.28	18.760	3.1
10	3.28	2	4.28	3	23.0	5.9	1.1609	5.4122	0.6803	10.764	0.5212	17.35	11.310	3.0
Esf efectivo de confinamiento					0.25 kg/cm ²				Distorsión angular				0.005	
Número de masas					1				Constante geométrica				0.3978	
Módulo de rigidez					17.45 kg/cm ²				Desv est del periodo				0.0141	
Relación de amortiguamiento					11.8%				Desv est del mod. de rig.				0.5284	
1	5.30	4	5.29	4	14.8	1.0	1.0042	6.2568	0.6737	10.660	0.3227	24.10	11.404	0.1
2	5.41	4	5.32	4	20.0	2.0	1.0193	6.1644	0.5756	9.123	0.4397	23.20	9.723	0.1
3	5.50	4	5.40	4	21.7	2.7	1.0209	6.1547	0.521	8.264	0.4781	23.08	8.793	0.1
4	5.60	4	5.42	4	23.7	3.0	1.0356	6.0672	0.5167	8.196	0.5245	22.33	8.703	0.1
5	5.66	4	5.50	4	22.9	2.7	1.0315	6.0915	0.5345	8.476	0.5059	22.54	9.009	0.1
6	5.71	4	5.54	4	21.8	2.1	1.0331	6.082	0.585	9.270	0.481	22.50	9.863	0.1
7	5.71	4	5.57	4	23.9	3.0	1.0275	6.115	0.5188	8.229	0.5276	22.73	8.748	0.1
8	5.85	4	5.69	4	24.1	3.0	1.0305	6.0972	0.5209	8.262	0.5325	22.58	8.780	0.1
9	5.81	4	5.21	4	22.3	2.0	1.1177	5.6213	0.6029	9.551	0.5023	18.83	10.067	0.2
Esf efectivo de confinamiento					0.5 kg/cm ²				Distorsión angular				0.005	
Número de masas					1				Constante geométrica				0.3978	
Módulo de rigidez					22.70 kg/cm ²				Desv est del periodo				0.0323	
Relación de amortiguamiento					9.07%				Desv est del mod. de rig.				1.4530	
1	2.48	2	4.02	3	20.0	5.1	0.9224	6.8114	0.6832	10.810	0.4233	29.42	11.726	3.3
2	2.49	2	4.02	3	18.3	4.2	0.9262	6.7841	0.7359	11.633	0.387	29.21	12.618	3.4
3	2.51	2	4.10	3	22.5	6.5	0.9154	6.864	0.6209	9.833	0.4759	29.90	10.668	3.3
4	2.55	2	4.11	3	20.4	5.1	0.9277	6.7728	0.6931	10.965	0.4325	29.04	11.883	3.4
5	2.53	2	4.12	3	23.5	6.9	0.9182	6.8429	0.6127	9.706	0.4978	29.67	10.523	3.3
6	2.58	2	4.15	3	22.9	6.8	0.9296	6.7592	0.6071	9.618	0.4875	28.81	10.403	3.4
7	2.58	2	4.12	3	23.9	6.9	0.9363	6.7103	0.6212	9.838	0.5099	28.33	10.632	3.5
8	2.59	2	4.13	3	23.3	6.9	0.9377	6.7006	0.6085	9.639	0.4976	28.22	10.411	3.5

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	T _{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	λ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ³)	ζ_p (%)	$\lambda_{0,1}$ (%)
9	2.58	2	4.18	3	18.4	3.9	0.9229	6.808	0.7757	12.252	0.3879	29.51	13.304	3.3
10	2.45	2	4.10	3	22.0	5.2	0.8935	7.0321	0.7212	11.403	0.459	31.81	12.449	3.1
11	2.52	2	4.12	3	22.1	5.5	0.9146	6.8701	0.6954	11.001	0.4659	30.05	11.953	3.3
Esf. efectivo de confinamiento							1.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.005	
Numero de masas							1	Constante geométrica					0.3978	
Módulo de rigidez							29.25 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0122	
Relación de amortiguamiento							10.5%	Desv. est. del mod. de rig.					0.9802	
1	5.18	5	5.30	4	16.4	2.4	0.7865	7.9885	0.3844	6.106	0.3254	43.16	6.747	2.4
2	5.30	5	5.40	4	20.2	3.2	0.7898	7.9549	0.3685	5.855	0.402	42.69	6.450	2.4
3	5.26	5	5.34	4	18.2	2.9	0.7927	7.9264	0.3673	5.836	0.3629	42.29	6.424	2.4
4	5.44	5	5.45	4	23.8	4.2	0.8033	7.822	0.3469	5.513	0.4782	40.87	6.031	2.5
5	5.43	5	5.42	4	25.3	4.6	0.8062	7.7933	0.3409	5.418	0.5094	40.49	5.917	2.5
6	5.50	5	5.52	4	23.0	4.0	0.8018	7.836	0.3498	5.559	0.4616	41.06	6.087	2.5
7	5.50	5	5.53	4	23.0	4.0	0.8004	7.8502	0.3498	5.559	0.4612	41.25	6.089	2.5
Esf. efectivo de confinamiento							1.5 kg/cm ²	Distorsión angular					0.005	
Numero de masas							1	Constante geométrica					0.3978	
Módulo de rigidez							40.65 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0075	
Relación de amortiguamiento							5.93%	Desv. est. del mod. de rig.					1.0186	

TABLEA A5. Resultados numéricos de la muestra compactada 1, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 Δ = decremento logaritmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_p = amortiguamiento del suelo
 $\Delta \mu / \mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	Y_{N_m+1} (mm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	Δ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_p (%)	$\Delta \mu / \mu$ (%)
1	0.90	1	2.70	2	6.0	1.9	0.6693	9.3883	1.1499	18.002	0.08049	129.06	24.086	10.9
2	0.97	1	2.69	2	7.1	2.0	0.7240	8.6786	1.2669	19.766	0.10589	99.20	25.052	14.2
3	1.00	1	2.70	2	8.0	2.0	0.7436	8.4495	1.3863	21.545	0.12188	92.05	26.896	15.3
4	1.00	1	2.68	2	9.2	2.6	0.7492	8.3869	1.2637	19.717	0.14322	88.76	24.501	15.9
5	1.00	1	2.71	2	7.9	2.0	0.7409	8.4808	1.3737	21.359	0.11998	93.03	26.718	15.1
6	1.00	1	2.70	2	9.9	2.9	0.7436	8.4495	1.2278	19.179	0.15329	90.57	23.926	15.6
7	1.08	1	2.72	2	11.0	2.9	0.7972	7.8816	1.3332	20.756	0.18182	73.82	25.012	19.1
8	1.05	1	2.71	2	9.8	2.1	0.7779	8.0769	1.5404	23.812	0.15457	81.25	29.044	17.3
9	1.03	1	2.71	2	10.0	2.8	0.7631	8.2338	1.2730	19.856	0.15884	83.84	24.434	16.8
10	1.06	1	2.72	2	9.3	2.4	0.7824	8.0303	1.3545	21.074	0.15054	78.26	25.619	18.0
11	1.01	1	2.75	2	9.9	2.8	0.7374	8.5208	1.2629	19.706	0.15121	93.38	24.705	15.1
12	1.09	1	2.80	2	10.2	2.9	0.7816	8.0389	1.2577	19.627	0.18647	77.78	23.864	18.1
13	1.05	1	2.75	2	10.2	3.0	0.7666	8.1962	1.2238	19.118	0.16359	82.28	23.465	17.1
14	1.11	1	2.80	2	11.0	3.0	0.7959	7.8941	1.2993	20.250	0.18213	73.93	24.417	19.1
Esf efectivo de confinamiento						0.25 kg/cm ²			Distorsión angular			0.001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0.7635		
Módulo de rigidez						107.88 kg/cm ²			Desv est del periodo			0.0337		
Relación de amortiguamiento						25.5%			Desv est del mod. de rig.			14.091		
1	0.85	1	2.61	2	7.1	2.0	0.6503	9.6626	1.2669	19.766	0.08920	145.98	27.117	9.6
2	0.92	1	2.65	2	9.7	2.4	0.6932	9.0642	1.3967	21.699	0.13402	116.81	28.315	11.9
3	0.91	1	2.70	2	10.0	2.9	0.6730	9.3367	1.2379	19.330	0.13414	127.66	25.765	10.9
4	0.91	1	2.79	2	10.0	3.0	0.6512	9.6479	1.2040	18.819	0.12695	144.03	25.773	9.7
5	0.99	1	2.78	2	12.2	3.2	0.7110	8.8365	1.3383	20.832	0.17620	106.20	26.713	13.1
6	0.91	1	2.73	2	10.9	3.0	0.6656	9.4404	1.2902	20.114	0.14258	133.84	27.056	10.4
7	1.00	1	2.73	2	11.5	3.1	0.7314	8.5908	1.3109	20.425	0.17300	96.37	25.734	14.5
8	0.95	1	2.78	2	11.9	3.3	0.6823	9.2086	1.2826	20.001	0.16250	121.98	26.387	11.4
9	0.98	1	2.81	2	11.0	3.0	0.6964	9.0230	1.2993	20.250	0.15477	113.66	26.329	12.3
10	0.95	1	2.80	2	10.0	3.0	0.6774	9.2748	1.2040	18.819	0.13614	124.12	24.951	11.2
11	0.98	1	2.80	2	10.9	3.8	0.6988	8.9909	1.0538	16.540	0.15801	109.54	21.417	12.7
12	0.96	1	2.80	2	11.8	3.9	0.6846	9.1782	1.1071	17.353	0.16499	118.34	22.811	11.8
13	1.01	1	2.81	2	17.5	3.9	0.7177	8.7550	1.5012	23.239	0.25123	104.88	29.641	13.3

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm-1} (mm)	T _{sd} (s)	t _{sd} (s)	λ	ε _s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ε _p (%)	μ ₁ μ ₂ (%)
14	1 00	1	2 80	2	12 0	3 6	0 7131	8 8111	1 2040	18 819	0 17647	103 70	24 071	13 4
Esf. efectivo de confinamiento						0 50 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0 7635		
Módulo de rigidez						136 21 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0245		
Relación de amortiguamiento						25 3%			Desv. est. del mod. de rig.			13 941		
1	2 39	3	4 03	3	7 9	1 2	0 5955	10 551	0 6282	9 948	0 08670	199 26	14 780	10 5
2	2 29	3	4 01	3	8 9	1 4	0 5734	10 957	0 6165	9 765	0 08764	239 52	15 270	8 8
3	2 33	3	4 08	3	9 9	1 6	0 5734	10 957	0 6075	9 624	0 09756	239 33	15 038	8 8
4	2 41	3	4 09	3	10 9	1 1	0 5917	10 620	0 7645	12 078	0 11626	207 69	18 206	10 1
5	2 41	3	4 10	3	11 0	1 1	0 5902	10 646	0 7675	12 125	0 11650	210 18	18 338	10 0
6	2 35	3	4 09	3	9 1	1 3	0 5769	10 891	0 6486	10 269	0 09110	232 73	15 945	9 0
7	2 45	3	4 10	3	11 0	1 6	0 6000	10 472	0 6426	10 175	0 12299	192 65	14 988	10 9
8	2 48	3	4 14	3	11 9	1 8	0 6015	10 446	0 6296	9 970	0 13402	190 33	14 633	11 0
9	2 50	3	4 14	3	11 9	1 7	0 6063	10 362	0 6486	10 269	0 13653	183 85	14 945	11 4
10	2 48	3	4 15	3	12 1	1 7	0 6000	10 471	0 6542	10 356	0 13519	192 77	15 264	10 9
11	2 47	3	4 19	3	10 3	1 5	0 5919	10 615	0 6422	10 168	0 11112	205 16	15 235	10 2
12	2 50	3	4 19	3	10 7	1 5	0 5991	10 488	0 6549	10 367	0 11907	194 16	15 310	10 8
13	2 51	3	4 21	3	12 1	1 4	0 5986	10 496	0 7189	11 368	0 13370	195 83	16 853	10 7
14	2 59	3	4 19	3	11 5	1 1	0 6207	10 123	0 7823	12 356	0 13788	167 90	17 617	12 5
Esf. efectivo de confinamiento						1 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0 7635		
Módulo de rigidez						217 47 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0130		
Relación de amortiguamiento						15 6%			Desv. est. del mod. de rig.			20 985		
1	3 61	5	3 96	3	8 9	1 0	0 5457	11 513	0 4372	6 942	0 07425	312 10	11 542	4 7
2	3 70	5	4 00	3	11 4	1 0	0 5538	11 346	0 4867	7 723	0 10042	287 09	12 615	5 2
3	3 71	5	4 00	3	11 4	1 1	0 5553	11 316	0 4677	7 423	0 10158	282 27	12 027	5 2
4	3 70	5	4 01	3	11 1	1 1	0 5524	11 375	0 4623	7 338	0 09701	290 80	11 990	5 1
5	3 78	5	4 00	3	13 5	1 1	0 5657	11 106	0 5015	7 956	0 12827	255 01	12 560	5 8
6	3 78	5	4 09	3	12 1	1 2	0 5533	11 356	0 4622	7 336	0 10642	288 03	11 950	5 1
7	3 80	5	4 09	3	12 1	1 2	0 5562	11 296	0 4622	7 336	0 10855	279 41	11 839	5 3
8	3 79	5	4 10	3	11 9	1 4	0 5534	11 354	0 4280	6 796	0 10497	287 06	10 988	5 2
9	3 80	5	4 13	3	12 1	1 4	0 5508	11 407	0 4313	6 849	0 10482	295 06	11 175	5 0
10	3 86	5	4 12	3	14 6	1 5	0 5609	11 202	0 4551	7 224	0 13506	266 47	11 480	5 6
11	3 84	5	4 16	3	13 2	1 5	0 5526	11 370	0 4350	6 906	0 11576	289 57	11 212	5 1
Esf. efectivo de confinamiento						2 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0 7635		
Módulo de rigidez						290 25 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0052		
Relación de amortiguamiento						11 7%			Desv. est. del mod. de rig.			14 795		
1	2 90	4	4 04	3	10 9	1 7	0 5390	11 657	0 4645	7 373	0 08604	338 12	12 644	6 1
2	2 95	4	4 04	3	12 5	2 0	0 5483	11 459	0 4581	7 272	0 10615	303 73	12 036	6 8
3	3 00	4	4 07	3	14 2	1 9	0 5535	11 352	0 5028	7 498	0 12499	287 57	12 228	7 1
4	2 99	4	4 08	3	14 2	2 0	0 5503	11 418	0 4900	7 775	0 12206	297 90	12 853	6 9
5	3 00	4	4 10	3	13 2	2 0	0 5495	11 435	0 4718	7 487	0 11292	300 28	12 375	6 8
6	3 00	4	4 10	3	13 6	2 1	0 5495	11 435	0 4670	7 413	0 11638	300 18	12 241	6 8
7	3 01	4	4 11	3	14 8	2 1	0 5499	11 425	0 4882	7 746	0 12690	299 03	12 817	6 9
8	3 02	4	4 12	3	14 0	2 1	0 5504	11 415	0 4743	7 527	0 12059	297 16	12 405	6 9
9	3 10	4	4 16	3	15 0	2 0	0 5596	11 228	0 5037	7 991	0 13718	270 81	12 849	7 6
10	3 02	4	4 19	3	13 4	2 1	0 5412	11 609	0 4633	7 354	0 10772	329 32	12 501	6 2
11	3 12	4	4 18	3	14 9	2 1	0 5605	11 210	0 4899	7 773	0 13719	268 09	12 438	7 7
12	3 10	4	4 19	3	14 3	2 1	0 5556	11 309	0 4796	7 611	0 12759	281 58	12 345	7 3
Esf. efectivo de confinamiento						3 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0 7635		
Módulo de rigidez						322 74 Kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0063		
Relación de amortiguamiento						12 4%			Desv. est. del mod. de rig.			20 555		
1	3 50	5	3 97	3	12 0	1 8	0 5286	11 887	0 3794	6 028	0 08681	383 69	10 548	4 1
2	3 52	5	3 99	3	13 6	1 8	0 5289	11 879	0 4045	6 424	0 09855	382 53	11 322	4 1

	D	L _m	N _m	L _p	Y _n	Y _t	T _{ap}	T _{sd}	v _{sd}	λ	G	γ	μ	-p
	(cm)	(cm)		(cm)	(cm)	(mm)	(s)	(s)	(s ⁻¹)		kg/cm ² sz	(%)	(kg/cm ²)	(%)
3	3.54	5	4.00	3	14.0	1.9	0.5306	11.841	0.3994	6.344	0.10310	374.01	11.082	4.2
4	3.55	5	4.03	3	12.9	1.7	0.5282	11.897	0.4053	6.437	0.09276	386.62	11.390	4.1
5	3.58	5	4.02	3	13.1	1.8	0.5339	11.768	0.3970	6.305	0.09946	358.27	10.850	4.4
6	3.61	5	4.06	3	14.0	1.9	0.5331	11.786	0.3994	6.344	0.10549	362.13	10.964	4.3
7	3.65	5	4.08	3	14.7	1.9	0.5364	11.714	0.4092	6.499	0.11392	347.83	11.114	4.5
8	3.65	5	4.10	3	14.0	2.0	0.5338	11.772	0.3892	6.182	0.10618	358.91	10.618	4.4
9	3.69	5	4.12	3	14.0	2.0	0.5370	11.701	0.3892	6.182	0.10921	344.77	10.480	4.6
10	3.69	5	4.12	3	14.9	2.0	0.5370	11.701	0.4016	6.379	0.11613	345.05	10.858	4.6
11	3.70	5	4.18	3	14.0	1.9	0.5307	11.839	0.3994	6.344	0.10320	373.52	11.077	4.2
Esf. efectivo de confinamiento							4.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001	
Número de masas							3	Constante geométrica					0.7635	
Módulo de rigidez							369.93 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0034	
Relación de amortiguamiento							10.9%	Desv. est. del mod. de rig.					15.717	

TABLA A6. Resultados numéricos de la muestra compactada 2, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 Δ = decremento logarítmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_{sp} = amortiguamiento del suelo
 $\Delta\mu/\mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	L_p	Y_1 (mm)	Y_{N_m+1} (mm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	Δ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_{sp} (%)	μ/μ (%)
1	0.86	1	2.69	2	4.5	1.1	0.6473	9.7073	1.4088	21.878	0.05532	147.41	30.161	13.6
2	0.81	1	2.70	2	5.0	1.8	0.6074	10.3448	1.0217	16.049	0.05596	183.90	23.551	10.9
3	0.90	1	2.69	2	6.0	1.5	0.6774	9.2759	1.3863	21.545	0.08043	123.46	28.595	16.2
4	0.86	1	2.71	2	5.8	2.0	0.6425	9.7795	1.0647	16.707	0.07323	145.68	23.134	13.8
5	0.94	1	2.71	2	7.0	2.0	0.7023	8.9472	1.2528	19.553	0.10080	106.92	25.270	18.7
6	0.90	1	2.69	2	6.8	2.0	0.6774	9.2759	1.2238	19.118	0.09289	121.15	25.352	16.5
7	0.90	1	2.70	2	7.0	2.1	0.6749	9.3103	1.2040	18.819	0.09524	122.54	25.024	16.4
8	0.98	1	2.75	2	6.0	2.0	0.7215	8.7086	1.0986	17.224	0.09104	96.13	21.854	20.8
9	0.90	1	2.71	2	6.8	2.1	0.6724	9.3448	1.1750	18.382	0.09223	123.83	24.508	16.2
10	0.92	1	2.71	2	7.1	2.3	0.6873	9.1417	1.1272	17.658	0.10027	113.81	23.148	17.6
11	0.91	1	2.79	2	7.8	2.4	0.6603	9.5150	1.1787	18.437	0.10247	132.54	24.945	15.1
12	0.91	1	2.78	2	7.3	2.3	0.6627	9.4809	1.1550	18.079	0.09677	130.41	24.383	15.4
13	0.95	1	2.80	2	7.9	2.7	0.6869	9.1470	1.0736	16.843	0.11204	113.46	22.079	17.7
14	0.90	1	2.78	2	8.1	2.8	0.6554	9.5862	1.0622	16.670	0.10627	134.71	22.674	14.9
15	0.93	1	2.81	2	6.9	2.1	0.6701	9.3771	1.1896	18.602	0.09289	125.62	24.872	16.0
16	0.91	1	2.85	2	7.2	2.8	0.6464	9.7196	0.9445	14.855	0.10602	140.52	20.437	14.3
Esf. efectivo de confinamiento						1.0 kg/cm ²			Distorsión angular			0.001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0.7434		
Módulo de rigidez						121.37 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0.0264		
Relación de amortiguamiento						23.7%			Desv. est. del mod. de rig.			20.039		
1	1.55	2	2.61	2	6.0	1.0	0.5940	10.5769	0.8959	14.116	0.06424	200.95	21.241	7.7
2	1.62	2	2.70	2	8.0	1.3	0.6002	10.4688	0.9085	14.311	0.06793	191.79	21.264	8.1
3	1.61	2	2.71	2	7.9	1.4	0.5943	10.5729	0.8652	13.641	0.08494	199.95	20.503	7.8
4	1.62	2	2.72	2	8.9	1.5	0.5958	10.5464	0.8903	14.029	0.09610	198.11	21.031	7.8
5	1.61	2	2.69	2	8.1	1.4	0.5987	10.4948	0.8777	13.835	0.08873	193.39	20.606	8.0
6	1.68	2	2.74	2	9.0	1.6	0.6133	10.2445	0.8636	13.617	0.10484	173.27	19.707	9.0
7	1.70	2	2.73	2	9.6	1.8	0.6229	10.0870	0.8370	13.204	0.11613	161.76	18.782	9.6
8	1.68	2	2.70	2	9.0	1.8	0.6224	10.0949	0.8047	12.704	0.10899	161.85	18.070	9.6
9	1.70	2	2.78	2	9.0	1.9	0.6117	10.2718	0.7777	12.284	0.10499	173.95	17.791	8.9
10	1.70	2	2.79	2	9.0	1.9	0.6095	10.3087	0.7777	12.284	0.10409	176.72	17.864	8.8
11	1.72	2	2.79	2	9.2	1.6	0.6167	10.1888	0.8746	13.787	0.10843	169.40	19.838	9.2
12	1.72	2	2.79	2	9.5	1.9	0.6167	10.1888	0.8047	12.704	0.11267	168.34	18.250	9.2
13	1.75	2	2.80	2	10.3	1.9	0.6252	10.0501	0.8451	13.331	0.12552	159.41	18.894	9.8
Esf. efectivo de confinamiento						1.5 kg/cm ²			Distorsión angular			0.001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0.7434		
Módulo de rigidez						179.03 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0.0115		
Relación de amortiguamiento						19.6%			Desv. est. del mod. de rig.			15.546		

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	L _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	T _{sd} (s)	ω _{sd} (s ⁻¹)	λ	ξ _s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ξ _p (%)	μ/μ ₀ (%)
1	1.39	2	2.51	2	6.1	1.8	0.5542	11.3375	0.6103	9.667	0.05367	280.99	15.986	12.0
2	1.55	2	2.69	2	7.7	1.8	0.5766	10.8963	0.7267	11.489	0.07687	228.74	17.923	14.7
3	1.63	2	2.60	2	9.1	1.8	0.6274	10.0149	0.8102	12.790	0.11207	156.64	18.047	21.5
4	1.61	2	2.60	2	9.0	1.9	0.6197	10.1393	0.7777	12.284	0.10818	154.50	17.541	20.5
5	1.52	2	2.62	2	9.0	2.0	0.5806	10.8223	0.7520	11.884	0.09153	221.50	18.374	15.2
6	1.68	2	2.71	2	10.4	2.0	0.6204	10.1279	0.8243	13.008	0.12482	154.37	18.576	20.5
7	1.65	2	2.72	2	9.1	1.9	0.6071	10.3501	0.7832	12.369	0.10418	179.97	18.075	18.7
8	1.61	2	2.72	2	10.3	2.3	0.5923	10.6073	0.7496	11.847	0.11099	200.82	17.821	16.8
9	1.61	2	2.68	2	9.9	2.1	0.6012	10.4513	0.7753	12.246	0.11069	187.89	18.099	17.9
10	1.63	2	2.69	2	10.2	2.1	0.6064	10.3615	0.7902	12.479	0.11639	180.97	18.262	18.6
11	1.69	2	2.76	2	10.0	2.1	0.6128	10.2537	0.7803	12.325	0.11711	172.67	17.817	19.5
12	1.66	2	2.78	2	9.0	2.1	0.5976	10.5147	0.7276	11.504	0.09947	192.39	17.100	17.5
13	1.68	2	2.70	2	9.3	2.2	0.6227	10.0905	0.7208	11.397	0.11349	160.47	16.162	21.0
14	1.60	2	2.71	2	8.8	2.0	0.5908	10.6343	0.7408	11.709	0.09424	203.11	17.667	16.6
Esf. efectivo de confinamiento						2.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7434		
Módulo de rigidez						193.69 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0205		
Relación de amortiguamiento						17.6%	Desv. est. del mod. de rig.					33.695		
1	1.58	2	2.68	2	10.1	2.8	0.5878	10.6885	0.6415	10.156	0.10752	206.41	15.355	7.0
2	1.55	2	2.64	2	10.9	2.7	0.5854	10.7327	0.6978	11.037	0.11415	211.55	16.830	6.8
3	1.57	2	2.66	2	11.1	2.8	0.5885	10.6763	0.6887	10.895	0.11609	208.05	16.488	7.0
4	1.65	2	2.71	2	12.8	2.9	0.6071	10.3496	0.7424	11.734	0.14707	179.30	17.122	8.1
5	1.64	2	2.70	2	11.9	2.8	0.6057	10.3743	0.7235	11.439	0.13614	180.94	16.726	8.0
6	1.65	2	2.70	2	12.8	2.9	0.6093	10.3114	0.7424	11.734	0.14839	176.40	17.049	8.2
7	1.65	2	2.70	2	13.0	2.8	0.6093	10.3114	0.7677	12.128	0.15039	176.77	17.637	8.2
8	1.69	2	2.76	2	12.0	2.8	0.6105	10.2911	0.7276	11.504	0.13994	174.67	16.669	8.3
9	1.70	2	2.78	2	13.0	3.0	0.6097	10.3047	0.7332	11.590	0.15106	175.76	16.823	8.3
10	1.69	2	2.75	2	13.0	3.1	0.6128	10.2538	0.7168	11.334	0.15303	171.78	16.350	8.4
11	1.68	2	2.74	2	11.8	2.9	0.6114	10.2773	0.7017	11.099	0.13832	173.30	16.042	8.3
12	1.69	2	2.80	2	10.0	2.8	0.6018	10.4402	0.6365	10.078	0.11336	184.93	14.787	7.8
Esf. efectivo de confinamiento						3.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7434		
Módulo de rigidez						210.74 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0101		
Relación de amortiguamiento						15.4%	Desv. est. del mod. de rig.					14.462		
1	2.23	3	3.92	3	9.7	1.3	0.5676	11.0700	0.6699	10.602	0.09248	247.21	16.899	5.9
2	2.30	3	4.01	3	11.8	1.9	0.5723	10.9795	0.6087	9.643	0.11618	235.49	15.117	6.2
3	2.26	3	4.02	3	10.1	1.8	0.5609	11.2017	0.5749	9.112	0.09318	261.58	14.709	5.6
4	2.30	3	4.03	3	11.9	2.0	0.5694	11.0343	0.5945	9.419	0.11541	241.45	14.862	6.1
5	2.30	3	4.05	3	10.2	1.8	0.5666	11.0891	0.5782	9.164	0.09743	247.59	14.553	5.9
6	2.34	3	4.09	3	12.1	2.0	0.5708	11.0072	0.6000	9.506	0.11825	238.44	14.949	6.2
7	2.35	3	4.10	3	12.0	2.0	0.5719	10.9871	0.5973	9.463	0.11799	236.13	14.836	6.2
8	2.32	3	4.11	3	11.8	2.0	0.5632	11.1563	0.5917	9.375	0.11029	256.13	15.053	5.7
9	2.31	3	4.11	3	12.0	2.0	0.5608	11.2046	0.5973	9.463	0.11041	262.44	15.312	5.6
10	2.31	3	4.15	3	11.9	2.0	0.5554	11.3137	0.5945	9.419	0.10568	277.20	15.497	5.3
11	2.38	3	4.12	3	12.0	2.0	0.5764	10.9015	0.5973	9.463	0.12094	226.80	14.664	6.5
12	2.40	3	4.18	3	12.5	2.0	0.5729	10.9681	0.6109	9.677	0.12346	234.26	15.147	6.3
Esf. efectivo de confinamiento						4.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7434		
Módulo de rigidez						255.07 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0062		
Relación de amortiguamiento						15.4%	Desv. est. del mod. de rig.					14.683		

TABLA A7. Resultados numéricos de la muestra inalterada 3, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 $Y_{N_{m+1}}$ = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 Δ = decremento logarítmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_p = amortiguamiento del suelo
 $\lambda; \mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	$Y_{N_{m+1}}$ (mm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	Δ	ζ_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_p (%)	λ/μ (%)
1	3.34	5	3.93	3	9.0	1.0	0.5118	12.276	0.4394	6.9769	0.0536	487.71	13.581	13.8
2	3.49	5	3.95	3	13.9	1.7	0.5321	11.808	0.4203	6.6736	0.1031	361.82	11.654	18.7
3	3.64	5	4.00	3	15.2	1.8	0.5481	11.465	0.4267	6.7756	0.1285	299.45	11.147	22.5
4	3.69	5	4.02	3	18.1	2.0	0.5528	11.366	0.4171	6.6243	0.1409	284.30	10.701	23.7
5	3.68	5	4.05	3	14.3	1.7	0.5472	11.482	0.4259	6.7633	0.1201	302.15	11.157	22.3
6	3.70	5	4.02	3	14.0	1.9	0.5543	11.335	0.3994	6.3445	0.1239	279.59	10.150	24.1
7	3.74	5	4.10	3	13.7	1.4	0.5494	11.437	0.4562	7.2413	0.1167	295.73	11.937	22.8
8	3.80	5	4.10	3	15.5	1.9	0.5582	11.256	0.4198	6.6664	0.1406	269.04	10.597	25.1
9	3.84	5	4.12	3	16.0	2.0	0.5613	11.193	0.4159	6.6046	0.1481	260.72	10.391	25.9
10	3.84	5	4.18	3	14.5	1.7	0.5533	11.356	0.4287	6.8072	0.1272	283.16	11.012	23.8
Esf. efectivo de confinamiento							0.25 kg/cm ²		Distorsión angular			0.001		
Número de masas							3		Constante geométrica			0.7521		
Módulo de rigidez							351.66 kg/cm ²		Desv. est. del periodo			0.0146		
Relación de amortiguamiento							11.9%		Desv. est. del mod. de rig.			67.493		
1	2.61	4	3.87	3	11.3	2.1	0.509	12.343	0.4207	6.6809	0.0649	510.71	13.164	9.3
2	2.79	4	3.97	3	14.9	3.1	0.5304	11.845	0.3925	6.2345	0.1091	369.10	10.873	12.9
3	2.84	4	4.01	3	15.5	3.4	0.5346	11.754	0.3793	6.0252	0.1179	349.78	10.277	13.6
4	2.81	4	4.05	3	14.8	3.2	0.5237	11.998	0.3829	6.0823	0.1014	404.48	10.904	11.7
5	2.87	4	4.10	3	15.0	3.6	0.5283	11.892	0.3568	5.6692	0.1079	378.59	9.835	12.5
6	2.89	4	4.10	3	13.9	3.0	0.532	11.81	0.3833	6.0894	0.1033	361.31	10.513	13.1
7	2.86	4	4.09	3	15.4	3.7	0.5278	11.905	0.3565	5.6649	0.1102	381.42	9.850	12.5
8	2.88	4	4.11	3	13.9	3.0	0.5289	11.88	0.3833	6.0894	0.1003	376.47	10.657	12.6
9	2.89	4	4.14	3	13.1	2.9	0.5269	11.925	0.377	5.989	0.0928	386.67	10.551	12.3
Esf. efectivo de confinamiento							0.50 kg/cm ²		Distorsión angular			0.001		
Número de masas							3		Constante geométrica			0.7522		
Módulo de rigidez							390.99 kg/cm ²		Desv. est. del periodo			0.0074		
Relación de amortiguamiento							15.0%		Desv. est. del mod. de rig.			47.497		
1	2.42	4	3.80	3	10.9	2.4	0.4779	13.147	0.3783	6.0103	0.0339	1070.00	15.618	15.0
2	2.65	4	4.01	3	12.2	2.9	0.4959	12.67	0.3592	5.7072	0.0576	655.22	12.069	24.4
3	2.69	4	4.03	3	12.8	3.2	0.5009	12.543	0.3466	5.5075	0.0657	589.98	11.118	27.1

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{1:m-1} (mm)	T _{sd} (s)	σ _{sd} (s ⁻¹)	λ	ξ _s (%)	γ	β ₁ (kg/cm ²)	ξ _p (%)	M ₁₁ (%)
4	2 70	4	4 02	3	14 0	3 8	0 504	12 466	0 326	5 1817	0 0755	554 64	10 092	28 9
5	2 69	4	4 04	3	13 1	3 2	0 4997	12 575	0 3524	5 5993	0 0659	605 16	11 448	26 5
6	2 71	4	4 11	3	12 8	3 4	0 4948	12 698	0 3314	5 2673	0 0593	669 69	11 050	23 9
7	2 78	4	4 12	3	13 2	3 7	0 5064	12 408	0 318	5 0542	0 0737	530 94	9 633	30 2
8	2 71	4	4 12	3	13 0	3 1	0 4936	12 729	0 3584	5 6946	0 0588	689 88	12 280	23 2
9	2 73	4	4 16	3	14 8	3 9	0 4925	12 758	0 3334	5 299	0 0657	706 52	11 364	22 7
Esf. efectivo de confinamiento					1 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001			
Número de masas					3			Constante geométrica			0 7522			
Módulo de rigidez					357 41 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0083			
Relación de amortiguamiento					6 41%			Desv. est. del mod. de rig.			160 08			
1	3 19	5	4 07	3	11 5	1 8	0 4716	13 322	0 3709	5 893	0 0289	1358 58	16 884	9 6
2	3 21	5	4 03	3	14 8	2 1	0 4793	13 109	0 3905	6 2036	0 0479	1022 64	15 899	12 7
3	3 20	5	4 03	3	12 9	2 1	0 4778	13 15	0 3631	5 7686	0 0401	1070 75	14 887	12 2
4	3 23	5	4 05	3	15 0	2 4	0 4799	13 092	0 3665	5 8234	0 0496	999 13	14 628	13 0
5	3 25	5	4 10	3	13 9	2 0	0 477	13 172	0 3877	6 1595	0 042	1106 09	16 292	11 8
6	3 30	5	4 15	3	14 8	2 5	0 4785	13 131	0 3557	5 6516	0 047	1045 05	14 382	12 5
7	3 30	5	4 13	3	14 9	2 5	0 4808	13 068	0 357	5 6729	0 0505	969 62	14 007	13 4
Esf. efectivo de confinamiento					2 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001			
Número de masas					3			Constante geométrica			0 7522			
Módulo de rigidez					479 63 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0030			
Relación de amortiguamiento					9 23%			Desv. est. del mod. de rig.			130 12			
1	2 50	4	4 00	3	13 9	2 4	0 4692	13 391	0 4391	6 9716	0 0312	1540 32	21 550	20 0
2	2 58	4	4 03	3	16 4	3 2	0 4806	13 073	0 4085	6 4883	0 0549	982 81	16 459	31 3
3	2 50	4	4 02	3	13 3	2 6	0 4669	13 458	0 4081	6 4809	0 0269	1721 69	20 857	17 9
4	2 61	4	4 07	3	15 9	3 1	0 4814	13 051	0 4087	6 4914	0 0544	958 22	16 297	32 1
5	2 61	4	4 10	3	17 3	4 0	0 4779	13 147	0 3661	5 8168	0 0539	1067 63	15 017	28 8
6	2 60	4	4 14	3	15 1	3 1	0 4715	13 326	0 3958	6 2873	0 0376	1374 63	18 289	22 4
7	2 71	4	4 18	3	16 6	3 8	0 4867	12 909	0 3686	5 8564	0 0651	818 57	13 578	37 6
8	2 69	4	4 20	3	17 0	3 9	0 4808	13 067	0 3681	5 8478	0 0576	970 53	14 526	31 7
9	2 70	4	4 23	3	17 0	4 0	0 4792	13 112	0 3617	5 7476	0 0551	1021 89	14 538	30 1
Esf. efectivo de confinamiento					4 0 kg/cm ²			Distorsión angular			0 001			
Número de masas					3			Constante geométrica			0 7522			
Módulo de rigidez					428 84 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0 0065			
Relación de amortiguamiento					6 06%			Desv. est. del mod. de rig.			307 89			

TABLA A8. Resultados numéricos de la muestra inalterada 4, del péndulo de torsión

N = Número de repetición
 L_m = longitud de N_m ondas
 N_m = número de ondas
 L_p = longitud de N_p pulsaciones
 N_p = número de pulsaciones
 Y_1 = amplitud de la onda 1
 Y_{N_m+1} = amplitud de la onda N_m+1
 T_{sd} = periodo del sistema
 ω_{sd} = frecuencia del sistema
 Δ = decremento logarítmico
 ζ_s = amortiguamiento del sistema
 γ = distorsión angular
 μ = módulo de rigidez
 ζ_p = amortiguamiento del suelo
 $\lambda \mu$ = error probable

N	L_m (cm)	N_m	L_p (cm)	N_p	Y_1 (mm)	Y_{N_m+1} (mm)	T_{sd} (s)	ω_{sd} (s ⁻¹)	Δ	C_s (%)	γ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ_p (%)	$\lambda \mu / \mu$ (%)
1	2.74	4	2.68	2	10.7	2.0	0.5096	12.329	0.4193	6.6581	0.0608	515.00	13.066	11.8
2	2.84	4	2.71	2	13.6	2.3	0.5224	12.028	0.4443	7.0535	0.0898	421.96	12.969	14.5
3	2.90	4	2.72	2	15.1	2.7	0.5314	11.823	0.4304	6.8334	0.1092	372.11	12.000	16.4
4	2.89	4	2.70	2	16.1	2.8	0.5335	11.777	0.4373	6.943	0.1186	362.42	12.104	16.8
5	2.91	4	2.71	2	14.7	2.1	0.5352	11.739	0.4865	7.7194	0.1096	356.05	13.495	17.1
6	2.99	4	2.71	2	16.9	2.9	0.55	11.425	0.4407	6.996	0.142	299.05	11.473	20.4
7	3.00	4	2.78	2	15.9	2.3	0.5379	11.681	0.4834	7.6701	0.1213	344.46	13.257	17.7
8	3.06	4	2.80	2	16.1	2.5	0.5447	11.534	0.4656	7.3905	0.13	317.41	12.405	19.2
9	3.05	4	2.82	2	14.2	1.9	0.5391	11.655	0.5028	7.9776	0.1092	339.99	13.766	17.9
10	3.05	4	2.84	2	13.6	1.7	0.5353	11.737	0.5199	8.2457	0.1011	356.75	14.485	17.1
Esf. efectivo de confinamiento						0.25 kg/cm ²			Distorsión angular			0.001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0.7662		
Módulo de rigidez						387.12 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0.0113		
Relación de amortiguamiento						13.1%			Desv. est. del mod. de rig.			60.997		
1	2.69	4	2.69	2	12.6	1.2	0.5002	12.561	0.5878	9.3151	0.061	627.24	20.145	7.8
2	2.78	4	2.69	2	14.9	1.6	0.517	12.154	0.5578	8.8435	0.0915	463.02	17.062	10.5
3	2.76	4	2.69	2	14.8	1.9	0.5132	12.242	0.5132	8.1406	0.0873	489.13	15.950	9.9
4	2.79	4	2.70	2	15.7	1.8	0.5169	12.156	0.5415	8.5859	0.0966	462.62	16.537	10.5
5	2.80	4	2.73	2	14.8	1.9	0.513	12.247	0.5132	8.1406	0.0871	490.67	15.968	9.9
6	2.82	4	2.76	2	14.1	1.5	0.5111	12.294	0.5602	8.8803	0.0805	509.81	17.743	9.5
7	2.89	4	2.79	2	14.5	1.8	0.5181	12.126	0.5216	8.2729	0.0907	452.71	15.780	10.7
8	2.87	4	2.80	2	15.1	1.9	0.5127	12.254	0.5182	8.2197	0.0885	493.56	16.167	9.9
9	2.83	4	2.80	2	12.9	1.3	0.5056	12.428	0.5737	9.0931	0.0881	563.57	18.872	8.6
10	2.87	4	2.79	2	14.1	1.8	0.5146	12.211	0.5146	8.1627	0.0846	478.72	15.872	10.2
11	2.86	4	2.80	2	14.8	1.8	0.5109	12.297	0.5267	8.3536	0.0847	509.13	16.633	9.6
12	2.89	4	2.82	2	12.9	1.5	0.5126	12.257	0.5379	8.5304	0.0753	495.39	16.835	9.8
Esf. efectivo de confinamiento						0.50 kg/cm ²			Distorsión angular			0.001		
Número de masas						3			Constante geométrica			0.7662		
Módulo de rigidez						435.89 kg/cm ²			Desv. est. del periodo			0.0050		
Relación de amortiguamiento						15.1%			Desv. est. del mod. de rig.			48.642		

N	L _m (cm)	N _m	L _p (cm)	N _p	Y ₁ (mm)	Y _{Nm+1} (mm)	T _{sd} (s)	ω _{sd} (s ⁻¹)	λ	ζ _s (%)	γ	μ (kg/cm ²)	ζ _p (%)	λ _{μ/μ} (%)
1	2.69	4	2.69	2	12.9	2.1	0.5021	12.514	0.4538	7.204	0.0655	593.55	15.025	6.4
2	2.70	4	2.70	2	14.4	2.8	0.5021	12.514	0.4094	6.5021	0.0735	590.74	13.388	6.4
3	2.75	4	2.71	2	15.1	3.0	0.5095	12.332	0.404	6.4169	0.0858	515.33	12.539	7.3
4	2.73	4	2.72	2	12.9	2.3	0.5039	12.468	0.4311	6.8448	0.0676	571.40	14.001	6.6
5	2.79	4	2.74	2	13.9	2.9	0.5113	12.29	0.3918	6.2235	0.0809	499.63	11.977	7.8
6	2.79	4	2.78	2	14.9	3.1	0.5039	12.469	0.3925	6.2345	0.0783	569.65	12.593	6.6
7	2.79	4	2.79	2	14.4	3.0	0.5021	12.514	0.3922	6.2292	0.0736	589.73	12.745	6.4
8	2.79	4	2.80	2	12.9	2.8	0.5003	12.559	0.3819	6.087	0.0642	610.45	12.528	6.2
9	2.80	4	2.80	2	13.0	2.9	0.5021	12.514	0.3751	5.9587	0.0666	588.78	12.104	6.4
10	2.82	4	2.79	2	14.7	3.2	0.5075	12.381	0.3812	6.0554	0.0814	532.77	11.883	7.1
11	2.79	4	2.80	2	12.3	2.7	0.5003	12.559	0.3791	6.0224	0.0612	610.28	12.420	6.2
Esf. efectivo de confinamiento						1.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7662		
Módulo de rigidez						467.45 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0037		
Relación de amortiguamiento						11.6%	Desv. est. del mod. de rig.					37.83		
1	4.55	7	5.34	4	13.9	1.8	0.4882	12.871	0.292	4.6425	0.0557	796.40	9.984	6.2
2	4.63	7	5.39	4	15.1	1.9	0.4922	12.767	0.2961	4.7077	0.0656	722.69	9.797	6.9
3	4.61	7	5.40	4	14.8	2.0	0.4891	12.846	0.2859	4.5459	0.0605	777.17	9.615	6.4
4	4.68	7	5.49	4	14.4	1.9	0.4884	12.865	0.2893	4.6001	0.058	791.56	9.839	6.3
5	4.68	7	5.51	4	14.1	2.0	0.4866	12.912	0.279	4.4361	0.0547	828.18	9.531	6.0
6	4.74	7	5.57	4	16.7	2.2	0.4876	12.887	0.2896	4.6037	0.066	808.96	9.933	6.1
7	4.83	7	5.60	4	17.9	2.4	0.4942	12.715	0.287	4.5637	0.0808	689.62	9.236	7.2
Esf. efectivo de confinamiento						2.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7662		
Módulo de rigidez						615.55 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0027		
Relación de amortiguamiento						9.06%	Desv. est. del mod. de rig.					49.54		
1	3.79	6	3.99	3	14.9	1.9	0.4727	13.291	0.3433	5.4549	0.0385	1315.84	15.064	12.9
2	3.81	6	4.01	3	16.9	2.2	0.4729	13.288	0.3398	5.4003	0.0439	1308.41	14.844	13.0
3	3.85	6	4.00	3	15.9	2.0	0.479	13.117	0.3455	5.491	0.0504	1045.18	13.785	16.3
4	3.86	6	4.07	3	14.2	2.0	0.472	13.312	0.3267	5.1923	0.0358	1352.77	14.339	12.6
5	3.91	6	4.13	3	14.2	1.9	0.4712	13.335	0.3352	5.3278	0.0346	1403.89	15.044	12.1
6	3.95	6	4.11	3	17.0	2.9	0.4783	13.136	0.2948	4.6859	0.0531	1063.24	11.348	16.0
7	4.00	6	4.15	3	17.0	2.7	0.4797	13.098	0.3067	4.8748	0.0552	1017.35	11.741	16.7
8	4.07	6	4.20	3	18.0	2.9	0.4823	13.028	0.3043	4.837	0.0627	938.79	11.249	18.1
9	4.05	6	4.24	3	17.0	2.7	0.4754	13.217	0.3067	4.8748	0.0484	1180.51	12.486	14.4
Esf. efectivo de confinamiento						4.0 kg/cm ²	Distorsión angular					0.001		
Número de masas						3	Constante geométrica					0.7662		
Módulo de rigidez						575.49 kg/cm ²	Desv. est. del periodo					0.0040		
Relación de amortiguamiento						5.30%	Desv. est. del mod. de rig.					170.06		

ANEXO B

- TABLA B1. Resultados numéricos de la muestra compactada 1, con tres equipos
- TABLA B2. Resultados numéricos de la muestra compactada 2, con tres equipos
- TABLA B3. Resultados numéricos de la muestra compactada 3, con tres equipos
- TABLA B4. Resultados numéricos de la muestra compactada 4, con tres equipos

TABLA B1. Resultados numéricos de la muestra compactada 1, con tres equipos

P_c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
0.25	0.0002					293.90	2.59
	0.0002			307.58	4.04		
	0.0005			298.41	4.15		
	0.0008					274.00	2.23
	0.0009			292.62	3.55		
	0.0012					266.70	3.17
	0.0016					254.80	3.47
	0.0019			276.37	3.75		
	0.0019					247.80	2.82
	0.0028			257.19	4.77		
	0.0033					229.50	15.37
	0.0048			223.39	4.54		
	0.0098			139.73	6.99		
	0.0189			88.64	10.5		
0.1000		107.88	25.45				
0.5	0.0001					635.00	2.42
	0.0001					627.60	2.43
	0.0002			313.94	4.58		
	0.0005			303.86	3.79		
	0.0007					591.10	2.74
	0.0009			293.10	3.72		
	0.0012					559.20	3.59
	0.0014					528.20	3.86
	0.0015					531.60	4.01
	0.0017					518.10	4.71
	0.0019			271.33	3.86		
	0.0019					498.10	5.96
	0.0024					485.00	6.04
	0.0028			250.85	4.83		
	0.0029					453.00	8.16
	0.0034					434.30	7.98
	0.0037					431.20	10.14
	0.0038					428.20	16.07
0.0038					425.10	17.20	
0.0049				217.62	4.62		
0.0112				153.58	6.42		
0.0201				114.71	11.10		
0.1000		136.21	25.30				
1.0	0.0001					723.60	2.20
	0.0001					723.60	2.20

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
	0.0002			356.27	3.04		
	0.0004			348.21	3.63		
	0.0006					669.00	3.14
	0.0008			333.31	3.36		
	0.0012					559.20	4.22
	0.0015					528.20	4.82
	0.0016			311.84	3.77		
	0.0017					514.70	5.21
	0.0019					501.40	6.27
	0.0014					531.60	4.49
	0.0024					485.00	5.87
	0.0026					472.00	7.14
	0.0028					459.30	8.28
	0.0034					434.30	9.22
	0.0036			268.04	4.50		
	0.0072			218.79	5.72		
	0.0141			163.78	7.78		
	0.0317			95.95	10.36		
	0.1000	217.47	15.66				
2.0	0.0001					873.80	2.13
	0.0001					873.80	2.00
	0.0002			387.96	2.16		
	0.0004			386.05	2.13		
	0.0005					873.80	2.50
	0.0008			373.97	2.54		
	0.0009					873.80	2.13
	0.0012					860.70	3.02
	0.0016					834.90	2.94
	0.0030					763.90	5.75
	0.0026					788.60	4.47
	0.0023					801.10	3.52
	0.0020					813.70	3.89
	0.0017			352.31	2.71		
	0.0017					822.10	3.61
	0.0035					743.60	6.37
	0.0037			322.76	3.58		
	0.0043					676.70	11.22
	0.0072			280.67	4.37		
	0.0151			198.57	5.44		
	0.0449			99.02	10.37		
	0.1000	290.25	11.74				
4.0	0.0001					1140.50	1.64
	0.0001					1135.60	1.75

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
	0.0002			467.22	3.08		
	0.0004			462.04	2.81		
	0.0006					1135.60	1.37
	0.0008					1120.70	1.49
	0.0008			458.95	3.21		
	0.0014					1105.90	1.67
	0.0017			440.92	3.52		
	0.0017					1091.20	1.85
	0.0020					1076.60	2.03
	0.0021					1066.90	2.15
	0.0024					1052.50	1.99
	0.0026					1042.90	2.40
	0.0028					1021.50	2.45
	0.0030					1014.50	2.55
	0.0034					995.70	2.75
	0.0038			405.27	3.70		
	0.0039					963.30	2.50
	0.0041					940.50	3.61
	0.0076			348.83	4.15		
	0.0146			259.82	7.02		
	0.0358			141.08	9.52		
	0.0644			91.34	10.81		
	0.1000	369.93	10.94				

TABLA B2. Resultados numéricos de la muestra compactada 2, con tres equipos

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
0.25	0.0002					541.90	2.43
	0.0002			202.63	4.80		
	0.0005			202.14	5.27		
	0.0006					529.60	2.02
	0.0009			187.37	5.06		
	0.0009					517.40	2.78
	0.0013					508.40	2.80
	0.0018					490.60	3.60
	0.0019			161.81	5.9		
	0.0020					484.70	3.93
	0.0023					473.00	4.43
	0.0025					470.20	5.52
	0.0027					464.40	6.64
	0.0029			145.92	6.48		
	0.0029					474.40	6.45
	0.0032					439.00	6.51
	0.0036					422.40	7.93
	0.0038					403.50	8.94
	0.0042					400.80	10.30
	0.0049			118.31	6.16		
0.0098			65.97	9.35			
0.0182			32.45	13.59			
0.1000							
0.5	0.0002					618.80	1.87
	0.0002					621.20	1.75
	0.0002			245.02	4.74		
	0.0005			235.42	5.19		
	0.0006					608.90	2.02
	0.0009			223.80	4.58		
	0.0012					595.90	2.32
	0.0014					582.90	2.62
	0.0019			186.51	5.43		
	0.0020					567.00	2.51
	0.0021					545.00	3.13
	0.0025					541.90	3.29
	0.0030					517.40	3.36
	0.0030			154.65	6.70		
	0.0031					520.50	3.79
	0.0040					487.60	4.07
	0.0042					478.80	4.10

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
	0 0048					453.00	5 63
	0 0048			118 60	6 80		
	0 0051					447 40	6 92
	0 0094			52.49	8 80		
	0 0211			31 00	13 25		
	0 1000						
1 0	0 0001					632.10	1 85
	0 0001					625 40	1 99
	0 0002			313 20	4 35		
	0 0004			307.38	4 12		
	0 0007					618.80	1 87
	0 0008			294 31	3 99		
	0 0009					612.20	2.15
	0 0014					599 10	2 31
	0 0017			269 60	4 32		
	0 0018					582 90	2.62
	0 0021					573 30	2.50
	0 0024					567 00	2 23
	0 0028					541.90	3.86
	0.0033					529.60	3.36
	0 0036					505.40	4.44
	0 0037			225 55	5.06		
	0.0039					493.50	5.09
	0 0043					484.70	5.74
	0 0048					470.20	5 52
	0 0076			173 09	7 50		
	0.0161			107 97	9.94		
	0 1000	121.37	23.67				
2 0	0 0002					776.70	1.55
	0 0002					773.00	1.67
	0 0002			384 87	3.30		
	0 0004			380 22	3.04		
	0.0007					765.60	1.56
	0 0008			373 84	2.85		
	0.0011					758.20	1.69
	0.0014					754.60	1.45
	0 0017			357 53	3 13		
	0 0021					729.20	1.97
	0 0024					718 50	2.23
	0.0026					711.40	2.24
	0 0032					693.70	2.53
	0 0036					676.30	2.94
	0 0037			321.15	4.01		

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
	0.0042					646.60	3.14
	0.0044					642.60	3.02
	0.0056					618.80	2.01
	0.0061					602.40	3.12
	0.0074			265.48	5.16		
	0.0190			165.04	7.14		
	0.0404			110.95	9.00		
	0.1000	290.25	11.74				
4.0	0.0002			454.06	2.44		
	0.0004			445.10	2.77		
	0.0008			436.26	3.01		
	0.0018			421.78	3.73		
	0.0039			389.11	4.01		
	0.0087			325.29	5.73		
	0.0154			254.19	7.76		
	0.0434			149.39	9.29		
	0.1000	255.07	15.36				

* No se determinó

TABLA B3. Resultados numéricos de la muestra compactada 3, con tres equipos

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
0.25	0.00007					948.10	1.92
	0.00008					948.10	1.82
	0.00020			671.08	3.22		
	0.00028					920.00	2.6
	0.00049					892.30	2.86
	0.00050			671.97	6.72		
	0.00062					884.40	3.87
	0.00077					861.10	4.82
	0.00085					961.10	6.28
	0.00095					930.50	5.82
	0.00100			603.24	5.31		
	0.00101					915.40	6.68
	0.00131					778.20	9.32
	0.00200			590.09	5.49		
	0.00290			567.64	2.97		
	0.00470			531.34	2.69		
0.00980			340.24	8.17			
0.10000		351.66	11.91				
0.5	0.00007					1211.40	1.98
	0.00020			666.22	7.03		
	0.00029					1206.80	2.56
	0.00048					1175.00	2.21
	0.00050			667.21	4.83		
	0.00066					1161.50	2.80
	0.00089					1143.70	2.53
	0.00090			630.59	4.13		
	0.00104					1139.20	3.02
	0.00112					1125.90	3.04
	0.00128					1125.90	3.14
	0.00145					1108.40	2.37
	0.00163					1108.40	3.56
	0.00190					1082.20	3.60
	0.00190			582.50	3.15		
	0.00309					1069.30	5.53
	0.00223					1069.30	3.72
	0.00240					1056.40	4.45
0.00280			561.42	3.61			
0.00520			513.79	4.89			
0.00990			397.41	9.42			
0.10000		390.99	14.98				

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
1.0	0.00007					1323.80	1.90
	0.00020			697.65	5.19		
	0.00025					1300.00	2.10
	0.00040			692.38	4.37		
	0.00050					1300.00	2.37
	0.00071					1281.10	1.38
	0.00090			620.61	3.95		
	0.00098					1281.10	1.65
	0.00110					1267.00	2.31
	0.00125					1262.30	2.57
	0.00154					1248.30	2.14
	0.00169					1248.30	0.84
	0.00170			606.35	2.51		
	0.00181					1225.20	1.88
	0.00214					1225.20	1.97
	0.00235					1211.40	2.27
	0.00231					1206.80	2.75
	0.00270					1197.70	2.19
	0.00430			529.70	2.09		
	0.00760			488.24	3.47		
0.01480			362.25	-			
0.10000		357.41	6.44				
2.0	0.00007					1496.70	3.66
	0.00020			881.09	3.16		
	0.00025					1451.20	1.33
	0.00040			866.61	4.30		
	0.00047					1436.20	1.65
	0.00071					1416.30	2.45
	0.00080			856.52	3.10		
	0.00103					1416.30	2.19
	0.00115					1416.30	3.06
	0.00123					1416.30	2.01
	0.00133					1401.50	1.76
	0.00160			835.38	3.88		
	0.00165					1401.50	2.46
	0.00192					1401.50	2.72
	0.00243					1367.30	2.40
	0.00274					1372.10	2.58
	0.00310					1338.20	1.89
	0.00360			750.67	4.53		
	0.00700			686.99	3.88		
	0.01250			514.98	-		
0.10000		479.63	9.23				

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Câm. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
4.0	0 00020			974 12	0 47	*	.
	0 00040			967 69	2 76		
	0 00080			955 54	2 55		
	0 00160			944 56	2 58		
	0 00360			908 46	2 93		
	0 00700			820 84	4 14		
	0 01250			682 38	7 81		
	0 10000	428 84	6 06				

* No se determinó

TABLA B4. Resultados numéricos de la muestra compactada 4, con tres equipos

P _c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
0.25	0.0002			528.31	3.83	*	*
	0.0005			528.10	3.36		
	0.0009			522.39	3.10		
	0.0019			492.08	3.29		
	0.0028			467.49	3.87		
	0.0047			419.87	4.16		
	0.0122			284.33	5.85		
	0.0257			194.73	7.98		
	0.1000	387.12	13.07				
0.5	0.0002			609.97	3.38	*	*
	0.0005			591.06	3.23		
	0.0009			573.54	3.57		
	0.0019			539.58	3.47		
	0.0028			511.70	3.99		
	0.0054			433.86	3.76		
	0.0094			367.73	5.65		
	0.1000	435.89	15.07				
	1.0	0.0002			728.73	2.58	*
0.0004				715.80	2.66		
0.0080				706.80	2.93		
0.0017				683.08	3.44		
0.0034				609.38	4.01		
0.0085				466.97	4.48		
0.0169				355.29	6.13		
0.0263				206.20	10.74		
0.1000		467.45	11.60				
2.0	0.0002			890.17	2.44	*	*
	0.0004			883.95	2.30		
	0.0008			869.55	2.79		
	0.0016			853.66	2.88		
	0.0035			812.27	3.66		
	0.0070			720.24	4.48		
	0.0145			508.52	5.54		
	0.1000	615.55	9.06				
	4.0	0.0002			925.68	2.35	*
0.0004				916.60	2.76		
0.0008				910.46	2.50		
0.0017				901.35	3.10		
0.0035				867.30	3.16		
0.0071				797.66	3.23		

P_c (kg/cm ²)	γ (%)	Péndulo de torsión		Cám. triax. de col. resonante		Columna resonante	
		μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)	μ (kg/cm ²)	ζ (%)
	0.0142			673.76	4.28		
	0.0307			483.08	6.89		
	0.1000	575.49	5.30				

* No se determinó