

Comportamiento dinámico de muestras remoldeadas y talladas de arcilla frente a solicitaciones uniformes e irregulares

V. CUÉLLAR (*)
M^o E. MARTÍN (**)
C. OLALLA (*)

RESUMEN En este artículo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el equipo triaxial dinámico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en probetas talladas sobre muestras inalteradas extraídas del núcleo de la presa de Canales varios años después de su construcción. Dichos resultados se han comparado con los hallados en probetas remoldeadas del mismo material compactadas a las condiciones de diseño de la obra. La influencia que las oscilaciones de amplitud y frecuencia de la sollicitación sísmica pueden tener en los resultados obtenidos ha sido estudiada sometiendo ambos tipos de probetas a ciclos uniformes e historias irregulares de carga.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF REMOULDED AND UNDISTURBED CLAY SAMPLES SUBJECTED TO UNIFORM AND IRREGULAR LOAD HISTORIES

ABSTRACT In this paper the results obtained testing in the laboratory undisturbed samples, taken from the core of the Canales earthdam, with a cyclic triaxial equipment are presented. The data obtained have been compared with those collected in remoulded samples of the same material compacted to the conditions stated in the project. To assess the influence that the lack of uniformity of the loading amplitude and frequency of the seismic input may have in the dynamic response of the dam both type of samples have been subjected to irregular and uniform loading histories.

Palabras clave: Comportamiento dinámico; Núcleo de presas; Muestras inalteradas y remoldeadas; Cargas uniformes e irregulares.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objeto describir los ensayos triaxiales cíclicos efectuados utilizando las sollicitaciones dinámicas obtenidas de un cálculo por elementos finitos de la presa de Canales. Los ensayos se han realizado sobre muestras extraídas del propio núcleo de la Presa y sobre muestras remoldeadas con material compactado. En este sentido, se ha intentado reproducir en laboratorio, lo más fielmente posible, en la medida que la técnica de hoy en día lo permite, las condiciones teóricas de la obra en el posible momento en que se produzca una sacudida sísmica.

Todos estos ensayos han permitido contrastar y corroborar los trabajos efectuados previamente para definir el comportamiento dinámico de la Presa.

2. CÁLCULOS DINÁMICOS REALIZADOS

En este caso particular, el resultado del cálculo dinámico ha permitido identificar las historias de las tensiones tangen-

ciales cíclicas en las zonas del núcleo de presa más susceptibles de sufrir daños por un posible terremoto.

Para ello se ha partido de la valoración de la sismicidad de la zona, con el fin de definir los acelerogramas de cálculo. El cálculo de la respuesta sísmica del cuerpo de presa se ha efectuado por medio de la técnica de los elementos finitos y del modelo lineal equivalente. Se ha efectuado un cálculo en dos dimensiones de la sección transversal teórica principal.

Previamente se determinó mediante ensayos de columna resonante la evolución de los módulos de corte y amortiguamiento en función del nivel de deformaciones tangenciales, tanto con la arcilla del núcleo como con el material de la zona de transición de la presa. Así mismo se dispuso de los datos obtenidos en la geofísica sísmica de campo y en otros ensayos de laboratorio realizados con los distintos materiales que constituyen la sección tipo definida.

3. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ENSAYADO

El material arcilloso que constituye el núcleo de la presa pertenece a una formación miocena próxima al emplazamiento. Se trata de una arcilla gris con Límite Líquido com-

(*) Jefe de Área, Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX (MOPTMA).

(**) Técnica Licenciada en Ciencias Físicas.

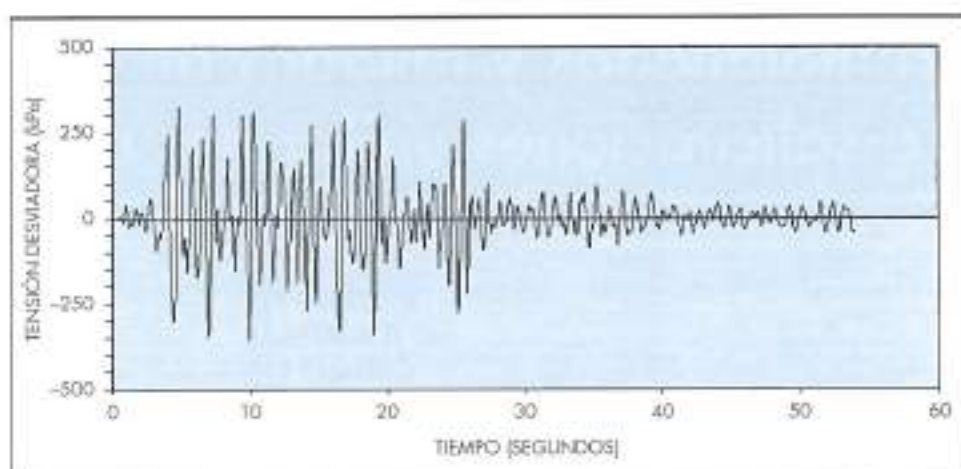


FIGURA 1. Historia de tensiones y desviadoras correspondiente al sismo de diseño.

prendido entre 60 y 70 y un Índice de Plasticidad que puede oscilar entre 35 y 45. Compactada con la energía del ensayo Proctor Normal presenta unos valores óptimos de densidad seca y humedad de 16 KN/m^3 y 20% respectivamente.

En esas condiciones experimenta un hinchamiento comprendido entre 10 y 15% cuando se la satura en el edómetro bajo una presión nominal de 10 KPa y puede llegar a desarrollar una presión de hinchamiento comprendida entre 200 y 400 KPa. En su composición mineralógica intervienen fundamentalmente la mica y la montmorillonita y también, aunque en menor proporción, la caolinita, el cuarzo y la cuarrita. Tiene un contenido en carbonato cálcico del 25% y una proporción del ion SO_4 que varía entre 0, y 4%. El peso específico de sus partículas es de 27,3 KN/m^3 .

El material, una vez extraído de cantera, se apila y se regaba frecuentemente para evitar su desecación. Esto dio

lugar a la formación de nódulos resistentes con tamaños comprendidos entre 1 y 2 cm, que apenas se vieron afectados por el procedimiento de puesta en obra utilizado. Junto a este hecho la existencia en cantera de cristales de yeso de diferentes tamaños y distribución variable ha contribuido a aumentar el grado de heterogeneidad del material utilizado en la presa.

Para el contraste en laboratorio de sus propiedades dinámicas con respecto a las hipótesis de proyecto se utilizaron dos tipos de probetas: "remoldeadas" y "talladas".

Las probetas "remoldeadas" se prepararon con material de cantera una vez molido y hecho pasar a través del tamiz n° 200 de la serie ASTM. Teniendo en cuenta las recomendaciones de proyecto para la construcción del núcleo de la presa se prepararon las probetas compactando dicho material por tongadas, utilizando en cada una de ellas la energía

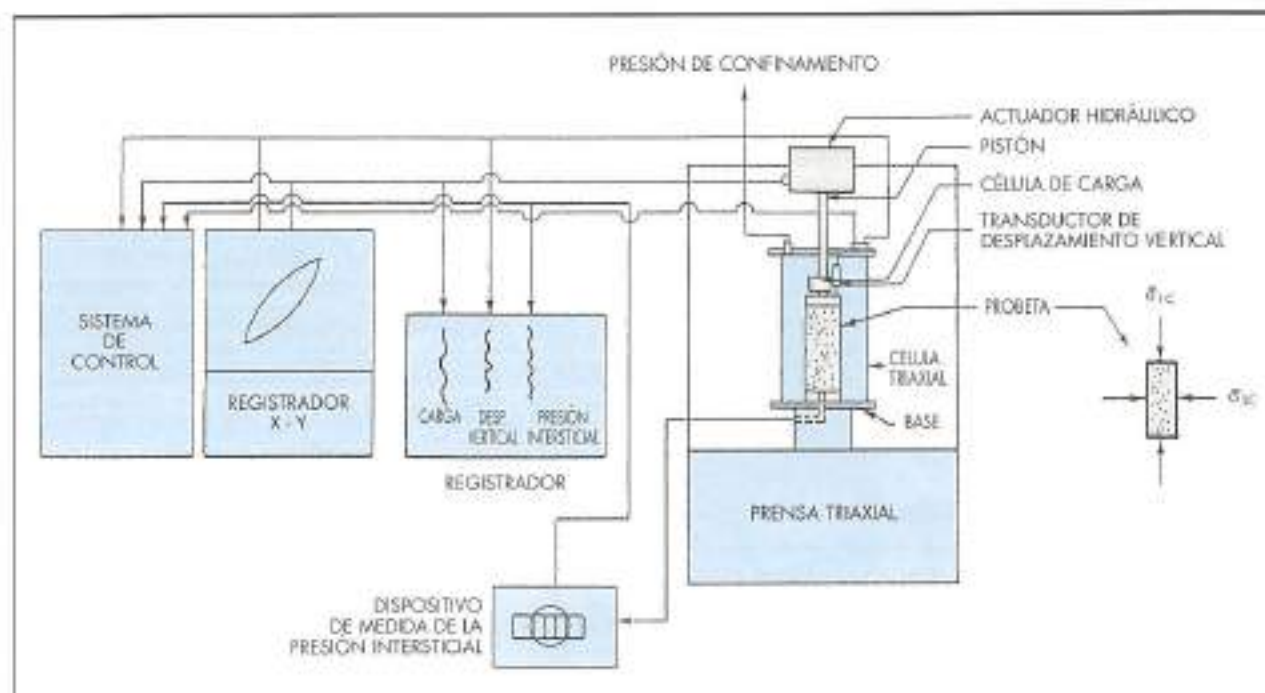


FIGURA 2. Esquema simplificado del equipo utilizado para la realización de ensayos triaxiales dinámicos de suelos.

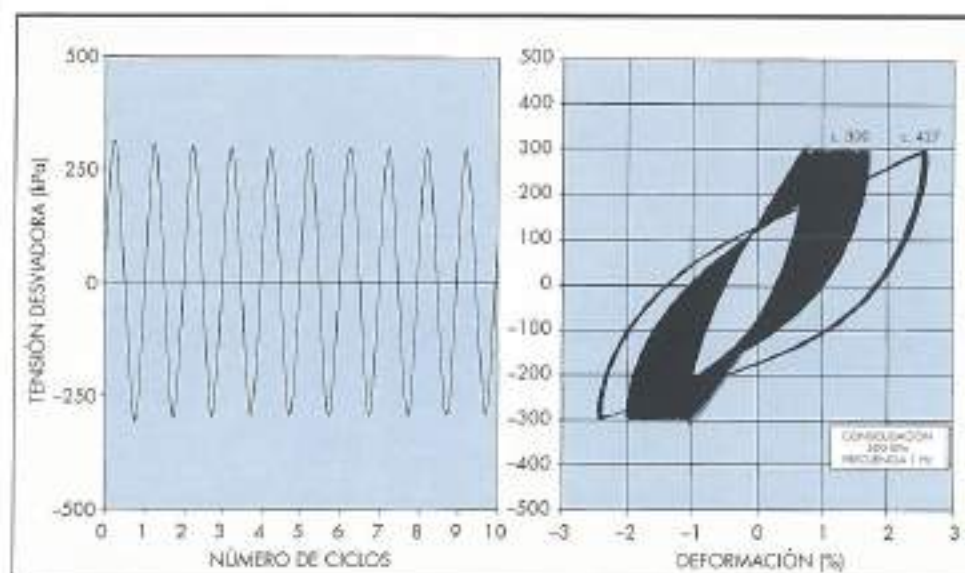


FIGURA 3: Ensayo triaxial cíclico con carga uniforme.

del ensayo Proctor Normal. De esta manera se obtuvieron probetas cuya densidad seca osciló entre 15,5 y 16,5 KN/m^3 y con humedades comprendidas entre 17 y 22%.

Las probetas "talladas" corresponden a muestras inalteradas extraídas en varios sondeos perforados en el núcleo de la presa, varios años después de ser construido. La densidad seca de dichas probetas osciló entre 17 y 19 KN/m^3 y su humedad varió entre 15 y 20%. En este tipo de probetas se pudo observar la existencia de cristales de yeso y nódulos con tamaños comprendidos entre 1 y 20 mm.

4. SOLICITACIONES IMPUESTAS A LAS PROBETAS

Una de las limitaciones del cálculo que mayores incertidumbres plantea y que ha sido objeto de diferentes planteamientos, radica en el hecho de utilizar un modelo lineal y elástico de respuesta del suelo. Debido a ello es necesario traducir las historias de tensiones dinámicas de cada elemento finito a una deformación permanente, irreversible, calificada como de "potencial" (Makdisi et al. 1978). Se suele efectuar a partir de un análisis del número de ciclos y de sus correspondientes amplitudes, y existen en la bibliografía diferentes procedimientos para poderlo llevar a cabo con materiales granulares Ej.: Prakash y Gupta (1970), Lee y Chan (1973), Ishihara y Yasuda (1973), Lee y Focht (1975), Seed et al. (1975). Esta traducción de los efectos se realiza utilizando los resultados de los ensayos de laboratorio. Son ensayos que comúnmente se denominan de fatiga, en el sentido de que utilizan un número determinado de impulsos sinusoidales de igual frecuencia y amplitud, en los cuales se van registrando las deformaciones durante el proceso de carga.

Desde un punto de vista formal, la realidad en la respuesta de una presa es distinta en la medida en que la sollicitación que los materiales sufren durante el tiempo que dura el terremoto, es una sollicitación aleatoria en el dominio de las frecuencias y de las amplitudes y variable en función de la posición que ocupa cada punto en el cuerpo de presa.

Con el fin de comprobar la influencia que la irregularidad del proceso de carga puede tener en la estimación de las deformaciones potenciales de la presa se han seguido dos pro-

cedimientos diferentes para determinar mediante ensayos cíclicos de laboratorio el comportamiento de los dos tipos de probetas descritos en el apartado anterior. En el primero, se las sometió a las mismas historias de ciclos uniformes que las obtenidas utilizando el mismo criterio que el sugerido por los autores recién citados para reducir las historias de cargas irregulares a historias de ciclos uniformes. En el segundo, se impusieron sollicitaciones irregulares a las probetas siguiendo las siguientes pautas:

1. A partir del cálculo realizado, se han seleccionado aquellas partes del núcleo de la presa que a priori son susceptibles de sufrir mayor "daño", entendiendo por tal aquellas que el cálculo pronosticaba deformaciones "potenciales" del orden del, o superiores, al 5%.
2. Para estas zonas, se han identificado numéricamente las presiones de confinamiento, (a partir del cálculo estático realizado en base al modelo hiperbólico y la técnica de los elementos finitos) y las presiones intersticiales, que mejor se corresponden con su estado en período de servicio, a embalse lleno.
3. Para el terremoto lejano, que aparece potencialmente como el más dañino de los dos terremotos supuestos, se ha extraído, de los resultados del cálculo mencionado en el apartado anterior, la historia de tensiones tangenciales cíclicas (Z_{xy}) sobre plano horizontal. Dicha historia se ha convertido en historia de desviadores cíclicos, apta para ser impuesta a las probetas de laboratorio, multiplicando sus amplitudes por 2 (ver Fig. 1).

5. EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO UTILIZADO

Los ensayos se han realizado en el equipo triaxial dinámico propiedad del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. En síntesis es un sistema servocontrolado que consta de:

- un grupo hidráulico que suministra el aceite a una presión de 28 MPa;
- un panel de control que gobierna las prensas con un sistema de electrónica analógica;
- una prensa de 16 KN de capacidad con un activador que pone en movimiento el pistón de carga a través de un sis-

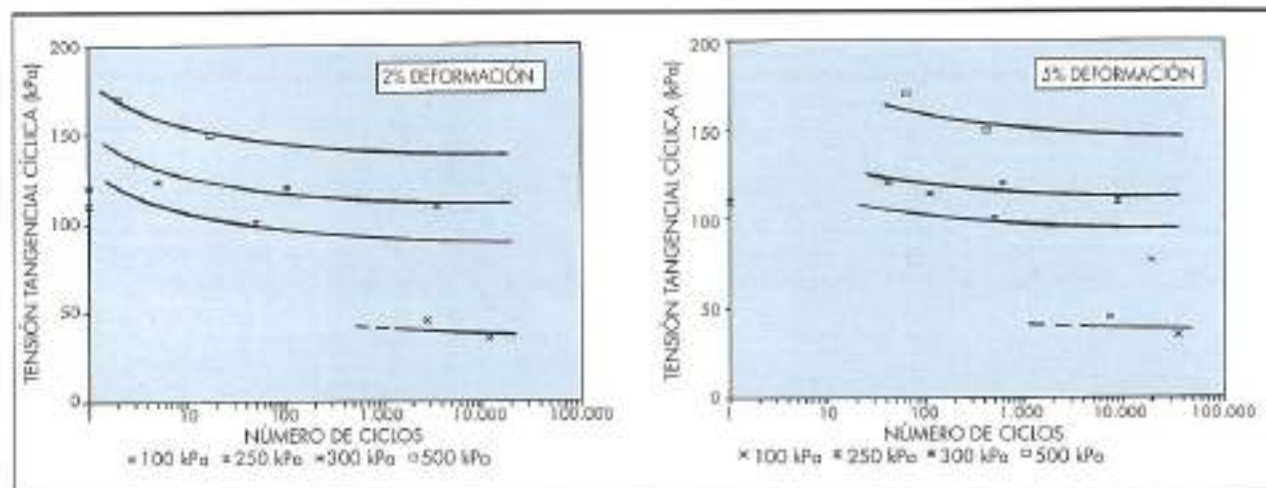


FIGURA 4. Curvas de fatiga de las probetas "talladas".

tema de control servoalimentado, con lo que cualquier desviación con la señal de mando se corrige automáticamente;

- una célula triaxial que dispone en su interior de una célula de carga y un transductor L.V.D.T. para medir respectivamente la fuerza y deformación axial ejercidas sobre la probeta de suelo.

El ensayo se realiza en control de carga, enviando la señal desde el ordenador central (General Automation GA-600) que dispone el equipo. Así mismo se registran en tiempo real los datos generados durante el ensayo. Dispone de un transductor para medir la evolución de presión intersticial. En la Fig. 2 se adjunta un croquis de funcionamiento del equipo.

Para poder imponer a las probetas las historias irregulares de carga se dotó al equipo de una nueva terminal y del software adecuado que permitió su comunicación directa con el ordenador central.

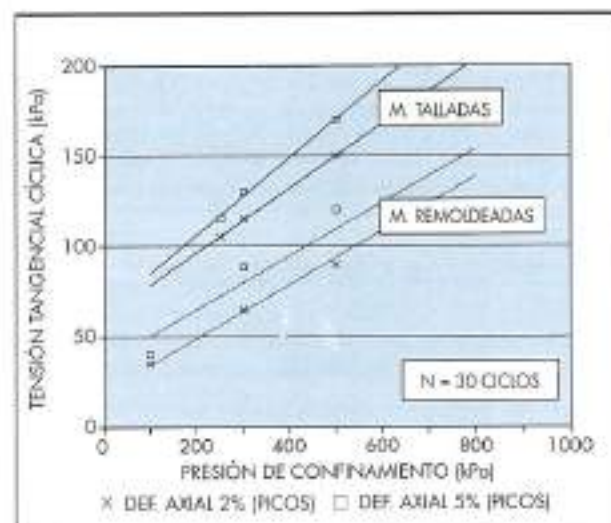


FIGURA 5. Síntesis del comportamiento dinámico de la arcilla.

6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

6.1. CARGA CÍCLICA UNIFORME

Para determinar el efecto de degradación de las cargas cíclicas en las características mecánicas del material se ensayaron con el equipo descrito en el apartado anterior 15 probetas "compactadas" y 11 "talladas". Todas ellas se sometieron a historias de ciclos uniformes de desviador vertical tales como la indicada en la Fig. 3, en las que manteniendo constante la frecuencia de 1Hz se midió la historia de deformaciones axiales.

Las muestras, con un diámetro de 50 mm y una altura de 100 mm, se saturaron y se consolidaron isotrópicamente durante 48 horas bajo distintas presiones de confinamiento.

En la Fig. 4 se muestran las curvas que proporcionan para cada nivel de tensión tangencial el número de ciclos al que fue necesario someter las probetas "talladas" para obtener deformaciones axiales pico a pico del 2 y 5%. Eligiendo en dicha figura los niveles de tensión tangencial que producen para cada presión de confinamiento esas deformaciones en 30 ciclos, se obtienen los dos gráficos situados en la parte superior de la Fig. 5. Realizando el mismo proceso con los datos obtenidos en los ensayos realizados con las muestras "remoldeadas" se obtuvieron las dos curvas situadas en la parte inferior de dicha figura. Comparando las distintas curvas de esta figura se observa que la resistencia de las probetas "talladas" es notablemente superior a la de las probetas "remoldeadas".

6.2. CARGAS IRREGULARES

Para estudiar el efecto que tanto las variaciones en amplitud como en frecuencia del proceso de carga pueden tener en la degradación de las características mecánicas de la arcilla se ensayaron dos probetas más: una "remoldeada" ($\gamma_D = 16 \text{ KN/m}^3$) y otra "tallada" ($\gamma_D = 17,6 \text{ KN/m}^3$), sometiéndolas a la historia de tensiones tangenciales cíclicas determinada por el procedimiento mencionado anteriormente.

En la Fig. 6 se muestran las historias de deformaciones obtenidas para ambas probetas introduciendo en la célula triaxial del equipo dinámico a través del nuevo terminal la historia de desviadores indicada en la Fig. 1. Se observa que así como la probeta "remoldeada" falla aproximadamente a los 7,5 segundos del inicio del proceso de carga, la muestra "tallada" aguanta perfectamente la carga impuesta con una deformación residual relativamente pequeña (inferior al 1%).

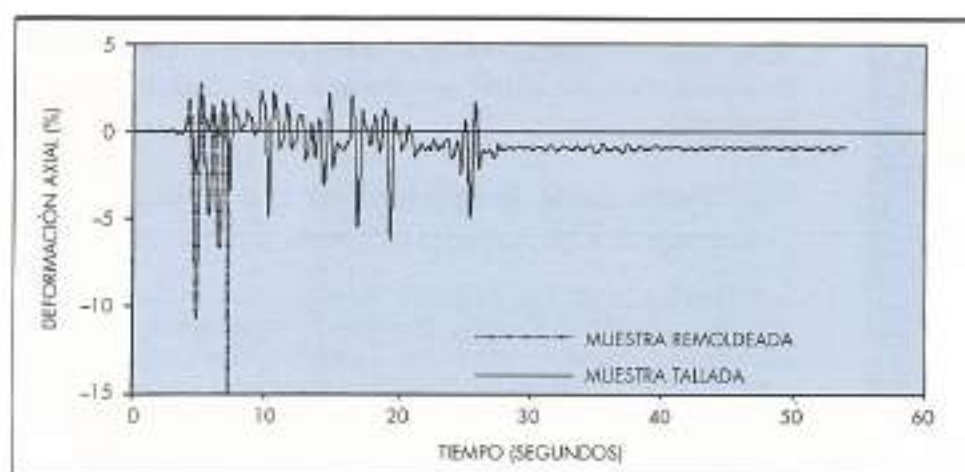


FIGURA 6. Historias de deformaciones producidas por la historia de desviadores de la Fig. 1.

De acuerdo con el criterio de Lee y Chan (1972), la historia de desviadores de la Fig. 1 (con un valor máximo de tensión tangencial de 185 KN/m^2 igual a la mitad del valor máximo de dicha historia) puede reducirse a una historia equivalente de 30 ciclos uniformes de carga con una amplitud de 125 KN/m^2 .

El último ciclo significativo de la historia irregular de cargas empieza a los 25.5 segundos, termina a los 26.2 segundos y tiene una amplitud muy similar a la de la carga equivalente. La deformación pico a pico obtenida en este ciclo tal y como puede observarse en la Fig. 7, es del 4%, valor éste que teniendo en cuenta la densidad seca de la probeta concuerda con el proporcionado por la Fig. 5 para una historia de 30 ciclos uniformes de carga con una amplitud de 125 KN/m^2 .

Se comprueba así la posibilidad de poder aplicar a la arcilla del núcleo de la presa de Canales el mismo criterio que el utilizado para materiales granulares por otros autores, para reducir la historia de cargas irregulares a un conjunto de ciclos uniformes.

7. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo se deduce que las probetas "talladas" en muestras inalteradas extraídas del núcleo de la presa de Canales ofrecen una resistencia frente a las solicitaciones dinámicas considerablemente superior a la que cabría esperar en muestras "remoldeadas" del mismo material compactadas a las condiciones del diseño. El mayor grado de compactación y heterogeneidad del primer tipo de probetas refleja sin duda las condiciones de puesta en obra del material.

Los resultados preliminares obtenidos en este estudio confirman la validez para el material del núcleo del método normalmente utilizado con materiales granulares para convertir una historia irregular de carga en otra de ciclos uniformes.

Finalmente se ha comprobado la capacidad del equipo triaxial dinámico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para reproducir fielmente tanto en amplitudes como en frecuencias las historias de cargas irregulares que cabe esperar se produzcan en el núcleo de la presa bajo el efecto de la sollicitación sísmica de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

ISHIHARA, K. & YASUDA, S. (1973). "Sand liquefaction under random earthquake loading conditions". Fifth

World Conference on Earthquake Engineering, Rome.
LEE, K. L. & CHAN, C. K. (1972). "Number of equivalent significant cycles in strong motion earthquakes". First Int. Conf. Microzonation, Seattle, Vol. 2: pp. 609-677.
LEE, K. L. & FOCHT, J. A. (1975). "Cyclic testing of soil to ocean wave loading problems". Seventh Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
MAKDISI, F. I., SEED, H. B. & IDRIS, I. M. (1978). "Analysis of Chabot dam during the 1906 earthquake". Earthquake Engineering and Soil Dynamic. ASCE Specialty Conf. Pasadena, California, Vol II: pp. 569-587.
PRAKASH, S. & GUPTA, M. K. (1970). "Settlement of sands under multidirectional shaking" J. Geotech. Engng. Div. ASCE, 101, GT 4: pp. 379-398.
SEED, H. B., ARANGO, I. & CHAN, C. K. (1975). "Evaluation of soil liquefaction potential during earthquakes". Report EERC 75-28. Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.

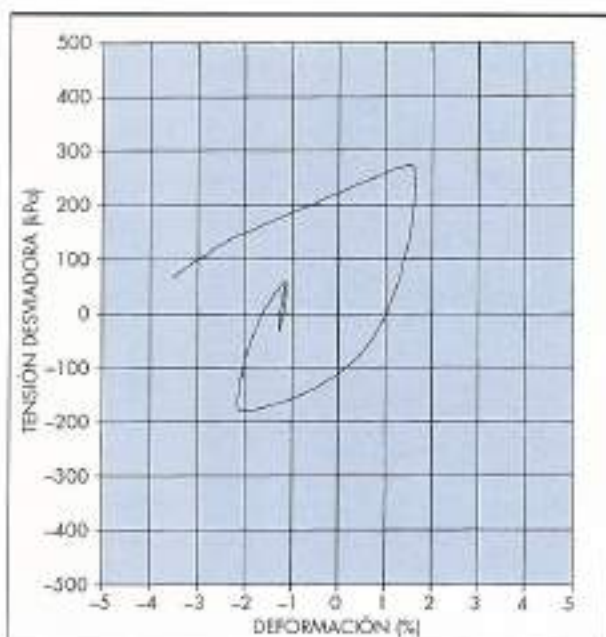


FIGURA 7. Último ciclo de histéresis significativo con carga irregular.



Ser miembro
de la IAHR es
una oportunidad
que no puede
dejar escapar

Esperamos poder recibirle como miembro de nuestra asociación. Si todavía no se ha decidido, estaremos encantados de proporcionarle información más detallada; por favor, no dude en contactar con nosotros en el teléfono: 31-15-56 93 53 o fax: 31-15-61 96 74.

IAHR Secretariat
P.O. Box 177
2600 MH Delft
Holanda

La Asociación Internacional de Investigación Hidráulica (IAHR), fundada en 1935, es una organización independiente mundial de y para ingenieros y científicos cuyo campo de trabajo sea la hidráulica y sus aplicaciones prácticas. La IAHR promueve especialmente el intercambio de conocimiento a través de congresos, simposios, comisiones de investigación y publicaciones sobre recursos hidráulicos, hidráulica de ríos y costas, evaluación de riesgos, energía, medio ambiente, prevención de desastres, procesos industriales.

¡Aproveche ahora la oportunidad que se le brinda para incorporarse a la comunidad hidráulica internacional!

La IAHR incluye 14 secciones dentro de 3 divisiones técnicas que satisfacen las necesidades de sus miembros. Las secciones organizan regularmente congresos y simposios sobre su propio trabajo, son la base para la cooperación en proyectos de investigación específicos, elaboran monografías, etcétera. Tres divisiones regionales —Sudamérica, Asia y Pacífico— se ocupan de organizar actividades, incluyendo congresos en su propia región.

Además, se abordan temas de gran interés para los miembros de la IAHR en grupos de trabajo orientados a la Educación y Formación Continuada y a la Gestión de la Investigación Hidráulica.

La IAHR ofrece la posibilidad a nivel internacional de que usted pueda enriquecerse de su vida profesional y ampliar su visión de la investigación hidráulica y todo lo que se relaciona con la misma.

CATEGORÍAS	CUOTAS 1994	BENEFICIOS MAS IMPORTANTES
INDIVIDUAL	NLG 125 US\$ 65	Revista de Investigación Hidráulica y Hoja Informativa de gran calidad científica (con un amplio calendario de congresos dos veces al año). Reducción en los precios de otras publicaciones de IAHR así como en las cuotas de participación en congresos y simposios de la IAHR (co-patrocinados).
CORPORACION	NLG 60 US\$ 32	Esta opción se ofrece a ingenieros y científicos cuyo empresario sea miembro corporativo de la IAHR. Los beneficios son los mencionados anteriormente, pero no se incluye la Revista de Investigación Hidráulica. El empresario, como miembro corporativo, recibirá dos copias para su biblioteca.
CORPORATIVO	NLG 900 US\$ 475	Esta categoría se ofrece a universidades, centros de investigación, empresas de ingeniería, consultores. La Revista de Investigación Hidráulica y la Hoja Informativa por duplicado; un juego de la documentación del congreso bienal de la IAHR; otros beneficios que se presentan como «individuales».

MEMBERSHIP APPLICATION FORM

NAME _____ DATE OF BIRTH _____

POSITION/AFFILIATION _____

ADDRESS _____

TELEPHONE _____ FAX _____ TELEX _____

*1 IAHR Corporate member registration no. (See Register of Members) C _____

Year from which membership to run: 1 January 19 _____

PAYMENT EFFECTED BY:

- ☐ International postal money order
☐ Postal transfer (no. 639739)
☐ Bank transfer (no. 44 20 42 000 with ABRO Bank, Delft, the Netherlands)
☐ Eurocheque
☐ Credit card

My credit card may be charged with NLG _____

☐ Eurocard ☐ Master card ☐ Access ☐ American Express ☐ Visa

Card number

Expiry date _____
month/year

Signature _____



GEOTEYCO

LABORATORIO ACREDITADO

- Asistencia Técnica.
- Control de Calidad.
- Estudios Geotécnicos.
- Ensayos de Campo.
- Ensayos de Laboratorio.

AREAS DE ACREDITACION

Area de ensayos de laboratorio de perfiles y barras de acero para estructuras.

Area de control "in situ" de la ejecución de la soldadura de elementos estructurales de acero.

Area de control de hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, áridos, agua, acero para armaduras, adiciones y aditivos.

Area de ensayos de laboratorio de mecánica del suelo.

Area de toma de muestras inalteradas, ensayos y pruebas "in situ" de suelos.

Area de suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales.

Plano de la Habana, 81, Pda. Pinar - 20030 MADRID

Tel.: (91) 457 06 28 (5 líneas)

Fax: (91) 457 43 39

GEOTEYCO

Polígono Industrial Valdeaviso
Nave 2-16-2-10
28940 FUENLABRADA (Madrid)
Tel.: (91) 890 11 00 / 806 50 11
Fax: (91) 890 24 02

PRIMAVERA PROJECT PLANNER PARA WINDOWS

El estándar más extendido en el mundo de la **Planificación y Control de Proyectos**. Con más de 50.000 aplicaciones en el ámbito de las Ingenierías, Constructoras, Centrales Nucleares, etc.

Con toda la facilidad de los entornos Windows,
Con toda la precisión de un clásico en el **Control de Proyectos**.

- Hasta 100.000 actividades por proyecto.
- Control total de Recursos, Costes y Presupuesto.
- Programación en horas, días, semanas, etc.
- Compatible con cualquier otra aplicación Windows vía portapapeles.
- Conexión ODBC (Base de Datos).
- Máxima capacidad de organización con WBS.
- Más de 200 gráficos e informes predefinidos.
- Verdadera capacidad Multiusuario (Acceso Simultáneo en Red).
- WYSIWYG.
- Número ilimitado de proyectos y subproyectos.
- Número ilimitado de recursos.
- Hasta 31 calendarios por proyecto.

¡Ahora más cerca de usted desde P3 HISPANIA distribuidor autorizado en España!

Desarrollado por: PRIMAVERA SYSTEMS INC.

Distribuido en España por: P3 HISPANIA

C/. TORNEO, 81 - 1.ª • 41002 - SEVILLA

Tels.: (95) 490 35 79 Fax: (95) 490 35 79

(95) 490 43 83



PRIMAVERA
How the world says
project management

P3
HISPANIA

LA UNIÓN HACE LA

FUERZA

EL COMPROMISO
U.E.E.

AHORRO

en costes y tiempo

CERCANÍA

a cada obra, en toda España

EJECUCIÓN

sencilla, capaz, limpia

EXPERIENCIA

más de cien años

FACILIDAD

nuestros técnicos se ocupan de todo

INGENIO

la eficacia dirigida

TÉCNICA

método, especialistas, un proyecto

PROBLEMA

resuelto

SATISFACCIÓN

por las cosas bien hechas

SOLUCIÓN

la mejor garantía



UNIÓN
UEE ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, S.A.