

Caracterización en laboratorio de las propiedades dinámicas de los suelos(*)

Por M. PASTOR y R. BLAZQUEZ

Doctores Ingenieros de Caminos, profesores de la ETSICCP
(Universidad Politécnica de Madrid)

y C. OLALLA

Ingeniero de Caminos,
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Se presenta en este artículo la metodología y aplicación práctica de distintos tipos de ensayos utilizados actualmente en el Laboratorio de Carreteras y Geotécnia "José Luis Escario" para caracterizar el comportamiento dinámico de suelos. Tras describir pormenorizadamente las características de los equipos, se analizan las ventajas y limitaciones propias de cada uno de ellos, mostrándose finalmente algunos resultados representativos. A lo largo de la exposición se pone especial énfasis en el caso sísmico, particularmente complejo, ya que implica una gama de deformaciones dinámicas del terreno muy amplia.

1. OBJETIVOS

La determinación de la respuesta del terreno a terremotos de intensidad moderada o alta es una parte importante del proyecto antisísmico de centrales nucleares. Los métodos de análisis empleados para ello requieren invariablemente evaluar las propiedades dinámicas del terreno y su comportamiento frente a posibles efectos de licuefacción, asiento excesivo y fatiga del suelo. La cuantificación de estos fenómenos no es en modo alguno inmediato, ya que el suelo se comporta como un material anelástico marcadamente no lineal. Por otra parte, dependiendo del nivel de deformación impuesto por la acción sísmica varía la relación tensodeformacional y en consecuencia el efecto de histéresis del terreno. Así, si se adopta —como es lo usual— el denominado modelo lineal equivalente como ecuación constitutiva del suelo, se observa en los ensayos que el módulo de rigidez transversal aumenta (y el amortiguamiento disminuye) para valores bajos de la deformación tangencial impuesta por el sismo, invirtiéndose la tendencia para valores altos (figura 1). Este hecho lleva

consigo la necesidad de caracterizar la respuesta dinámica del suelo para un amplio rango de deformaciones, lo cual es bastante difícil de conseguir con un solo instrumento.

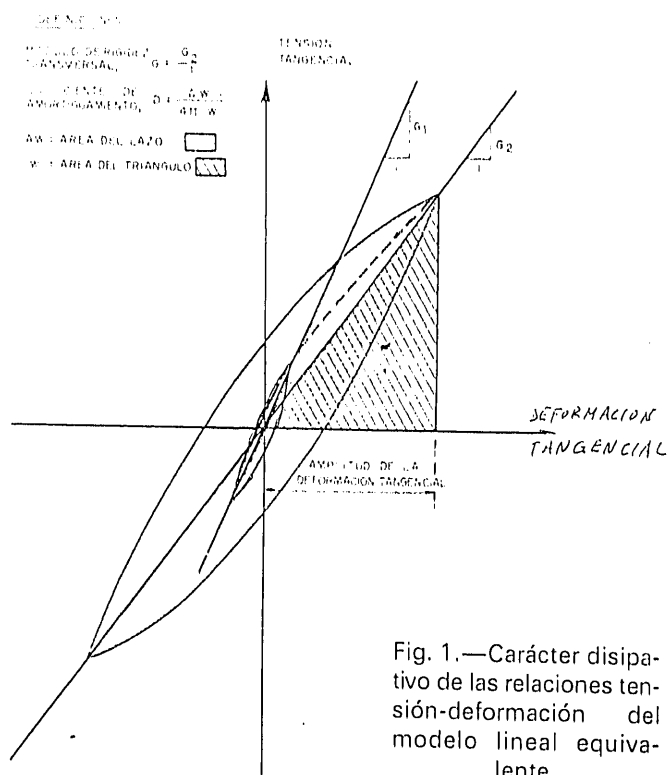


Fig. 1.—Carácter disipativo de las relaciones tensión-deformación del modelo lineal equivalente.

(*) Artículo presentado al Seminario sobre «Aspectos de Seguridad en Relación con el Emplazamiento de Centrales Nucleares» (OIEA); Viena, noviembre, 1982.

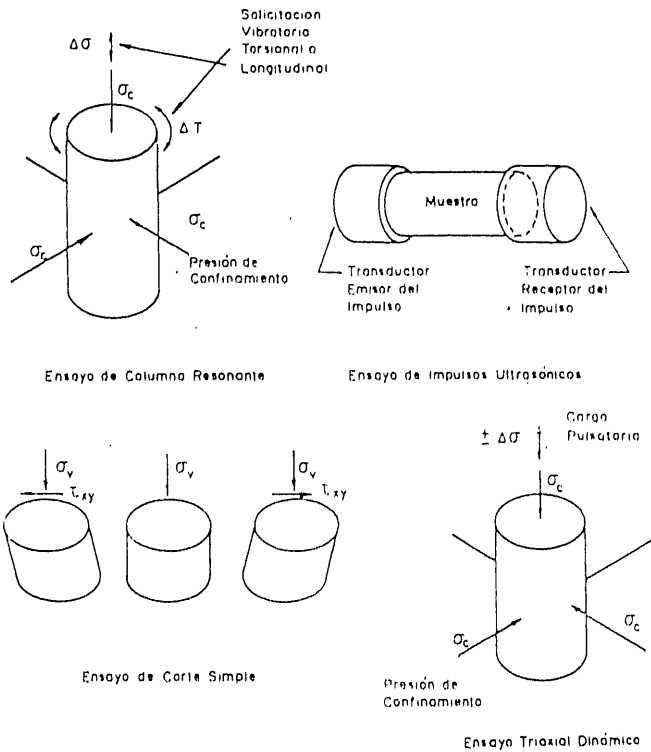


Fig. 2.—Tipos de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades dinámicas de los suelos (Park, 1975).

Básicamente son cuatro los tipos de ensayos de laboratorio comúnmente utilizados para caracterizar el comportamiento dinámico del terreno (figura 2):

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| a) Ensayo de impulsos ultrasónicos | } Nivel bajo de deformación |
| b) Ensayo de columna resonante | |
| c) Ensayo de corte simple | } Nivel alto de deformación |
| d) Ensayo triaxial dinámico | |

diferenciándose entre sí en aspectos tales como el modo de aplicación de la carga, forma de la probeta, estado tensional, etcétera. A continuación se describen dos de estos ensayos disponibles actualmente en el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia «José Luis Escario» (LCG), del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dichos ensayos constituyen en opinión de los autores una herramienta válida y a todas luces suficiente (en combinación con técnicas de cross-hole y sísmica de refracción) para la correcta realización de este tipo de estudios.

2. ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

El equipo que posee el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia para la realización de los ensayos de columna resonante, ha sido suministrado por la «Soil Dynamics Instruments», basándose en las ideas desarrolladas por Drnevich (1970).

2.1. Descripción del ensayo y del equipo

El ensayo de columna resonante es simplemente un método para la determinación en el laboratorio de los diferentes módulos y amortiguamientos del suelo, en función del nivel de deformaciones. Para un determinado tipo de suelos, los resultados que se obtienen dependen no sólo del nivel de deformaciones, sino también del estado tensional a que se vea sometida la probeta y de la porosidad. Como se verá posteriormente, depende también del tiempo que se tenga la muestra consolidando, y en menor medida de la temperatura ambiente.

El ensayo se basa en la propagación de ondas (longitudinales o transversales) a lo largo de muestras cilíndricas. Matemáticamente se demuestra que existe proporcionalidad —para cada tipo de condiciones de contorno— entre la frecuencia de resonancia de la probeta y la velocidad de propagación de la onda correspondiente (Richart et al., 1970). Por lo tanto, el ensayo consiste simplemente en conocer, bajo las condiciones deseadas, la frecuencia de resonancia más baja, para la cual se encuentra en fase la fuerza (o el momento) excitatriz, con el movimiento de la probeta (Hardin, 1970; Drnevich, 1978; Drnevich et al., 1978).

En el croquis de la figura 3 se presenta el esquema de funcionamiento del equipo. Consta básicamente de dos unidades bien diferenciadas:

- Una de ellas se podría llamar «mecánica»; está constituida por un conjunto de mecanismos que permiten someter a la muestra a las presiones de confinamiento e intersticiales deseadas. Igualmente permite, manteniéndola empotrada en uno de sus extremos, solicitar a la probeta longitudinal o torsionalmente en el otro extremo, por medio de un esfuerzo que

SOLICITACION CICLICA EXTERIOR

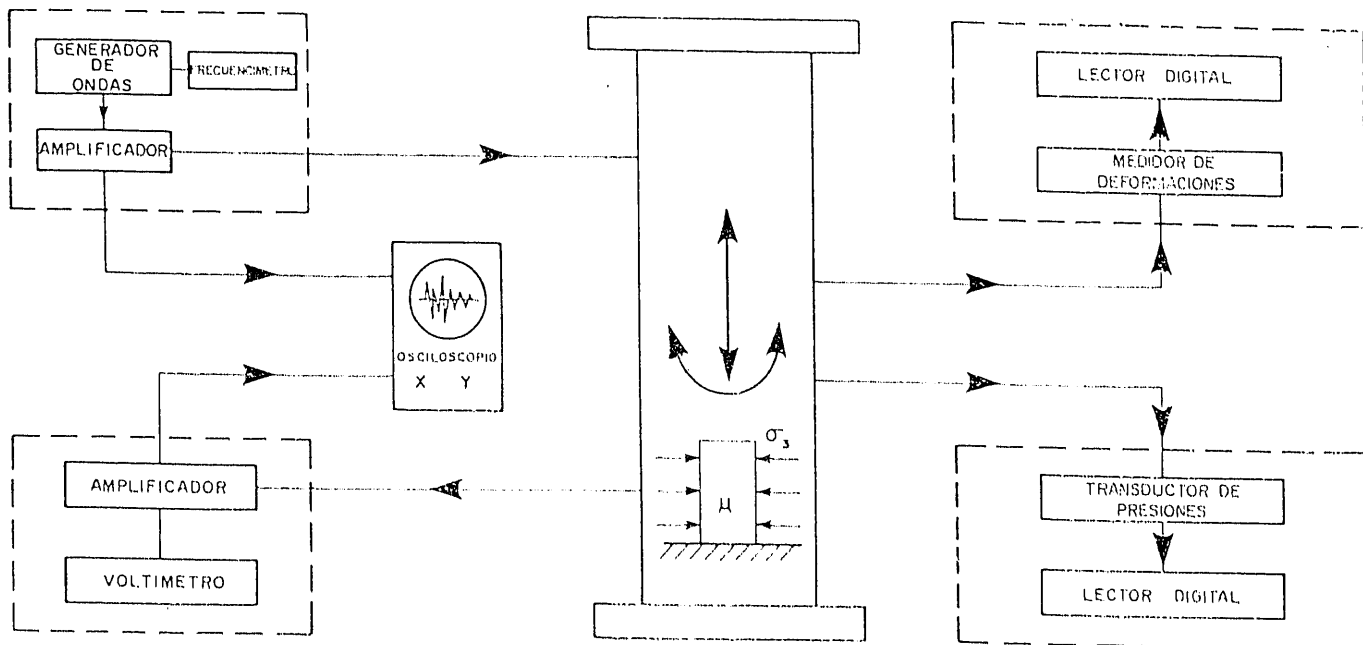


Fig. 3.—Esquema del equipo de columna resonante.

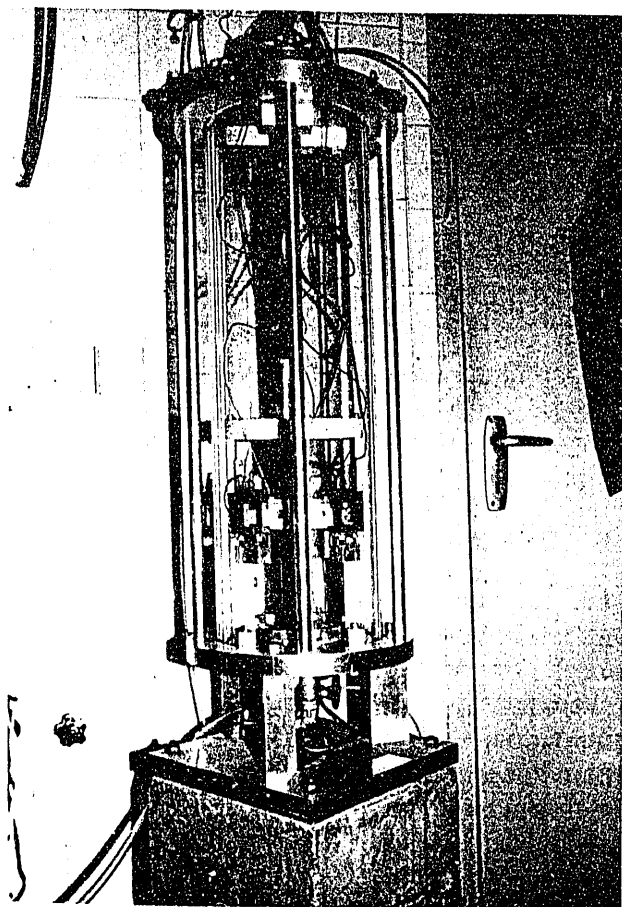


Fig. 4.—Vista general del equipo de columna resonante.

varía sinusoidalmente en el tiempo, utilizando para ello un sistema electromagnético (figura 4).

- La otra unidad, se podría llamar «eléctrica»; está constituida por una serie de aparatos que permiten, por un lado, generar, ampliar y medir las fuerzas excitatrices, y por otro, conocer las deformaciones que sufre la probeta por medio de un conjunto de trasductores.

Las condiciones teóricas que se supone cumple la probeta, presumen el empotramiento rígido de la misma en uno de sus bordes (pasivo), manteniendo libre el borde opuesto (activo) en donde actúan las sollicitaciones cíclicas exteriores.

Los resultados que se obtienen, permiten ser utilizados directamente al analizar el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas según el modelo viscoelástico lineal, tipo Kelvin-Voigt, compuesto por un muelle y un amortiguador.

2.2. Problemática específica

Al igual que con la mayoría de los ensayos utilizados normalmente en el campo de la inge-

nería geotécnica, se pueden obtener resultados imprecisos cuando:

1. Las muestras son deficientes.
2. El aparato utilizado está incorrectamente calibrado.
3. Se superan los límites «de trabajo» propios del equipo.
4. Se utilizan procedimientos de ensayo rudimentarios.
5. Las condiciones del ensayo en cuanto a presión de confinamiento, intersticial, etcétera, no son las adecuadas.

Paralelamente existen otra serie de fuentes de error propias de este ensayo que ya han sido analizadas con detalle por el propio Drnevich (1978), y que son las siguientes:

1. El acoplamiento entre la muestra y su plataforma de apoyo.
2. La máxima rigidez de la muestra tolerable por el aparato.
3. Los problemas asociados con el efecto del tiempo en los resultados del ensayo.

No obstante, por haberse presentado de una manera muy significativa en nuestra propia experiencia, se comentan a continuación las siguientes dificultades encontradas:

1. Migración del aire a través de la membrana. Es sobradamente conocido que en materiales cohesivos el resultado del ensayo depende del tiempo de consolidación a que se ha sometido la muestra, por lo que resulta obligado solicitar, al menos durante una serie de días, a la probeta, para intentar reproducir las condiciones reales en las que se encontraba en el terreno. Durante este tiempo, por efecto de las presiones de trabajo, el aire puede entrar, a través de la membrana, en el interior del material, pudiendo modificar considerablemente el grado de saturación del mismo y por lo tanto sus módulos y amortiguamientos.

De entre las diferentes técnicas ya ensayadas por otros autores para eliminar el problema, se ha optado por utilizar, por un lado, agua doblemente desaireada, y

por otro, recubrir la probeta con una membrana doble, embadurnando tanto el interior como el exterior con silicona.

Habiendo limitado al máximo el tiempo de ensayo y comprobado que los resultados obtenidos por este procedimiento eran satisfactorios, no se ha considerado necesario utilizar otras técnicas (tampoco exentas de problemas), basadas fundamentalmente en el uso de otros líquidos distintos del agua para aplicar las presiones de confinamiento, y que han sido referenciadas por otros autores (Novak y Kim, 1981; Marcuson y Walls, 1978, etcétera).

2. Deposición de sales de silicatos de aluminio y calcio. Este problema, de carácter muy específico, se ha presentado debido a la nociva coincidencia de: 1) las características físico-químicas del material, 2) las características propias del material que constituye la base del aparato (aluminio), a través de la cual se daba la presión de cola, y 3) la propia composición mineralógica del agua de Madrid.

La precipitación de estas sales en los orificios de salida de la base que constituye el empotramiento de la probeta, y la consiguiente colmatación de las piedras porosas utilizadas, obligó a utilizar agua doblemente desmineralizada y a limpiar profundamente las piedras porosas al finalizar cada ensayo, conservándose para un futuro próximo la modificación del material de la base de apoyo de la muestra en el interior del aparato.

2.3. Resultados obtenidos e interpretación

Los resultados que se han obtenido se han contrastado con los valores dados por otros autores con diferentes equipos en condiciones similares. A título de ejemplo se presentan en la figura 5 los resultados obtenidos con un material arcilloso típico, representativo de las condiciones de cimentación de una central nuclear española actualmente en período de construcción.

Por las condiciones de ejecución tan sumamente delicadas en las que se realiza este tipo

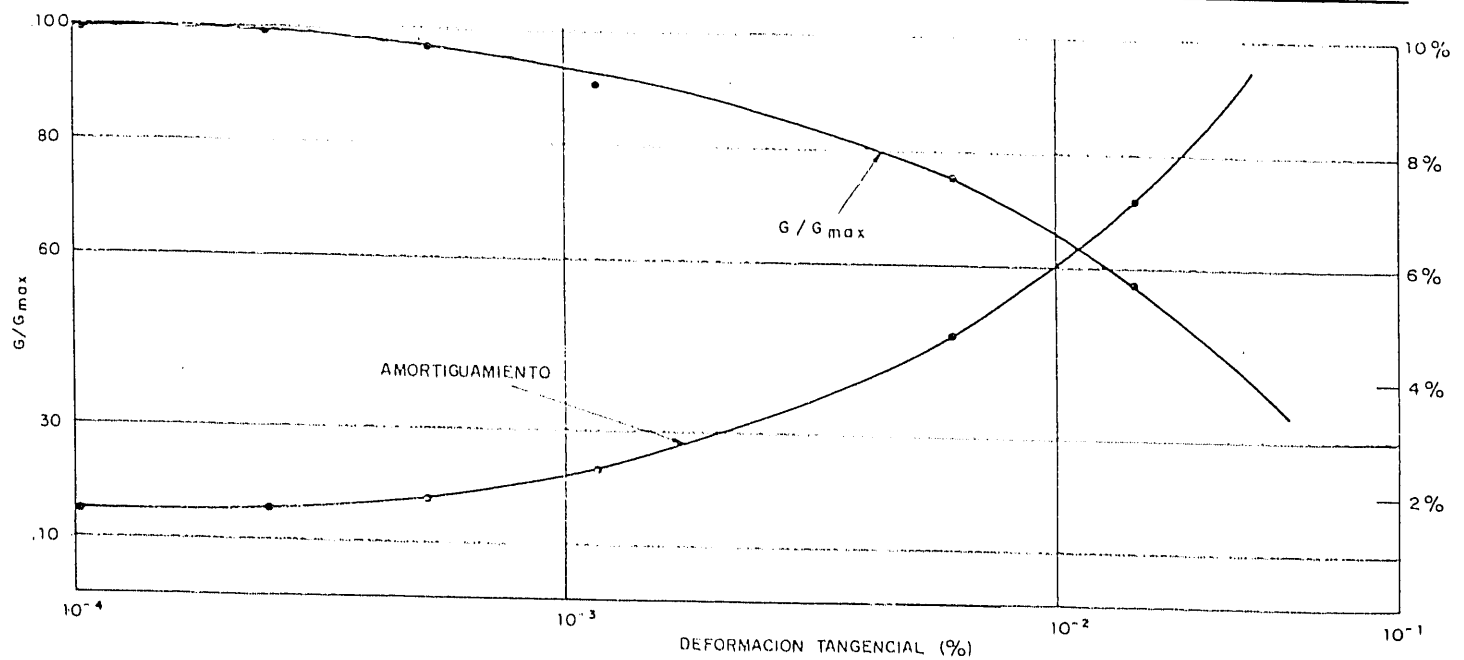


Fig. 5.—Variación del módulo de deformación transversal y el coeficiente de amortiguamiento con el nivel de deformaciones tangenciales (ensayo de columna resonante).

de ensayos, la casuística que ha venido aplicándose en el LCG para la interpretación de los resultados obtenidos ha sido:

- a) Aceptar como válidos los «aspectos» de las curvas, es decir la variación porcentual de los módulos con el nivel de deformaciones.
- b) Escalar los valores absolutos de los módulos de deformación, de tal manera que en el rango elástico, correspondiente a muy pequeñas deformaciones, coincidan con los valores deducidos de ensayos de campo.

3. ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO

3.1. Finalidad

El objetivo de cualquier ensayo dinámico es determinar las propiedades dinámicas del terreno considerado. Para ello se deberían reproducir en una probeta de suelo las tensiones esenciales existentes en el terreno, y, a continuación, superponer el estado tensional inducido por el terremoto.

Sin embargo, es prácticamente imposible simular con exactitud las condiciones de carga descritas. En los diferentes ensayos dinámicos

se aproximan de una u otra forma las condiciones reales por otras más sencillas.

Así, en el ensayo triaxial, el estado inicial se reproduce mediante una presión de confinamiento hidrostática, que incluso se puede combinar con una compresión vertical, y aplicar ambas escalonadamente, siguiendo la historia tensional que se supone ha existido en el terreno.

Las tensiones inducidas por el terremoto se simulan en la probeta mediante la aplicación de una tensión vertical cíclica, junto, en ocasiones, con ciclos de presión de confinamiento.

Por otra parte hay que destacar la complejidad del comportamiento del suelo, difícil, si no imposible, de introducir en los modelos matemáticos empleados en el proyecto. Esto lleva a la definición de unos parámetros, sencillos de obtener, a partir de los resultados del ensayo.

3.2. Tipos de ensayos

El aparato triaxial dinámico en sus versiones más modernas permite efectuar una gran variedad de ensayos, en función del tipo, amplitud y duración de la excitación, material ensayado, variables controladas y fenómenos a modelar.

Los tipos fundamentales de ensayos son:

- a) *Ensayos de carga controlada.*—En ellos se fija la historia tensional a aplicar, ya sea en base a ciclos regulares de carga, como irregulares, simétricos o asimétricos. Esta clase de ensayos suelen emplearse preferentemente para el estudio del comportamiento del suelo en grandes deformaciones (fatiga de suelos cohesivos, licuefacción de suelos granulares saturados, etcétera).

Pueden, asimismo, realizarse ensayos de carga controlada para la determinación de parámetros dinámicos (módulo de elasticidad dinámico y amortiguamiento) y el estudio de su evolución a lo largo del proceso.

- b) *Ensayos de deformación controlada.*—Se somete al suelo a una serie de ciclos en los cuales la deformación axial varía entre un valor máximo y uno mínimo especificados en el ensayo. Durante el mismo, se mide la carga vertical y, en su caso, la variación de la presión intersticial. A partir de las medidas realizadas se obtiene el módulo dinámico secante y el coeficiente de amortiguación histerético.

Es práctica normal obtener la variación de ambos parámetros con el nivel de deformación impuesta, obteniéndose unas curvas de forma característica ($G \leftrightarrow \gamma$ y $\lambda \leftrightarrow \gamma$).

3.3. Descripción de los equipos disponibles

Se han empleado hasta la fecha dos equipos triaxiales dinámicos en el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia «José Luis Escario». El primer sistema, de fabricación nacional y bajo coste, fue diseñado y puesto a punto en el propio laboratorio (Pastor et al., 1979). Con él se ha llevado a cabo una investigación sobre el comportamiento de suelos cohesivos compactados y posteriormente saturados en procesos de carga cíclica sin drenaje (Pastor, 1980). En la figura 6 se da una vista del mencionado servoaccionador cíclico (SAC-1).

Posteriormente, se ha adquirido un equipo MTS, que incorpora sistemas de control, generación de carga y registro altamente sofisticados. En la actualidad, se está empleando este equipo

para el estudio de la licuefacción de suelos granulares saturados y la obtención de parámetros dinámicos (módulos de elasticidad y coeficientes de amortiguamiento (figura 7).

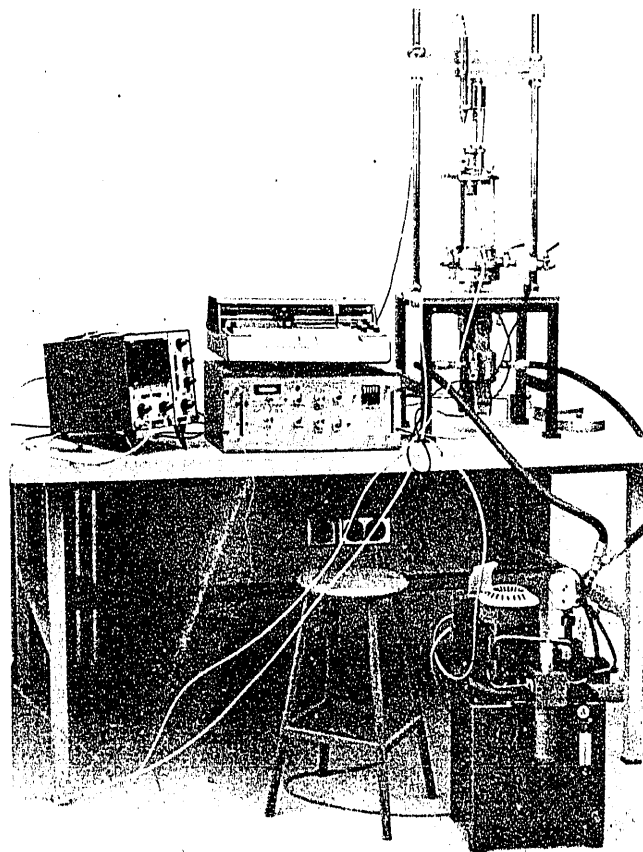


Fig. 6.—Vista general del equipo SAC-1.



Fig. 7.—Vista general del equipo MTS.

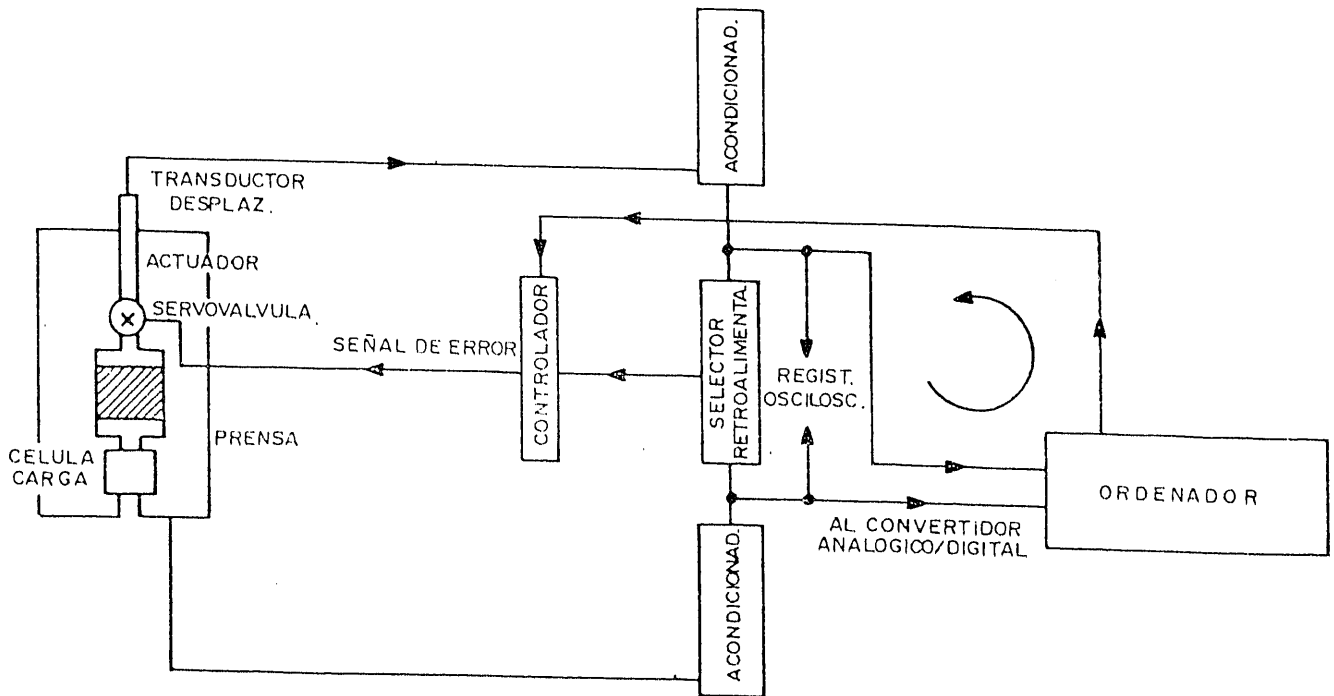


Fig. 8.—Esquema de funcionamiento del equipo MTS con control por ordenador.

En esencia, un equipo triaxial para ensayos dinámicos consta de varias partes claramente diferenciadas:

- Una célula triaxial.
- Un sistema que suministre las presiones de confinamiento y de cola.
- Un bastidor y un actuador para transmitir la carga a la probeta.
- Un sistema de control.
- Un sistema de acondicionamiento y registro de las variables de ensayo.

El principio básico de funcionamiento del sistema (figura 8) se basa en la actuación sobre la servoválvula (que controla la carga aplicada por el accionador) de una señal eléctrica, proporcional a la diferencia entre una señal de control y otra emitida por un transductor, de forma que en cada momento se ajuste la variable controlada (carga, deformación, etc.) a la señal de control, consiguiéndose así una evolución de aquélla según una ley prevista de antemano.

Existen dos posibilidades de generar dicha ley:

- Mediante un generador de función, que

proporciona una forma estable de onda (cuadrada, sinusoidal o triangular).

- Mediante un ordenador, provisto de una interfase en la que se transforma una señal digital en analógica.

En el sistema MTS de que dispone el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia «José Luis Escario» se emplea este segundo sistema, habiéndose desarrollado el software necesario para la realización de los ensayos.

El sistema soporte del mismo es una unidad dual de «floppy-disk», con capacidad de 245 K, teniendo la memoria central 32 K palabras.

El ordenador es un equipo DEC PDP-11 04, y está conectado a una pantalla gráfica interactiva Tektronix, desde la cual se pueden introducir las variables de ensayo. Esta, a su vez, está conectada a una unidad de Hardcopy, siendo posible el registro en fotocopia del contenido de la pantalla.

Es de destacar también que se realiza mediante el ordenador el registro, almacenamiento y tratamiento de los datos del ensayo, obteniéndose al final del mismo un informe con los datos de interés. Es también posible, en cualquier mo-

mento del ensayo, disponer de resultados tales como ciclos tensión-deformación, etcétera.

La incorporación del ordenador al equipo se decidió por las importantes ventajas que proporcionaba, entre otras:

- a) Pueden programarse ensayos muy complejos utilizando lenguajes conversacionales de alto nivel (Basic, por ejemplo). En el caso del equipo descrito, se ha adaptado el Basic, convenientemente, a las necesidades de la máquina de ensayo, dotándole de las subrutinas necesaria para muestreo de señales analógicas, dibujo de gráficos, etcétera.
- b) Es posible tomar decisiones y conocer resultados del ensayo en *tiempo real*, eliminando la fase subsiguiente de proceso de la información adquirida.
- c) Pueden controlarse varias variables simultáneamente y obligar a que se cumpla durante el ensayo determinadas condiciones que dependen de la respuesta mecánica del material.
- d) La capacidad de almacenamiento e intercambio de información por parte del sistema es muy potente, permitiendo el acceso a bancos de datos mediante técnicas de teleproceso.

3.4. Resultados obtenidos

Se describen brevemente a continuación algunos resultados típicos de ensayos de carga y deformación controlada, en los casos de pequeña y gran deformación.

En la figura 9 (carga controlada) se muestra, para un suelo cohesivo compactado en diferentes condiciones, la influencia del nivel de carga cíclica en el número de ciclos necesario para alcanzar una deformación axial del 5 %, siendo de destacar la mayor resistencia —para una misma energía de compactación y presión de consolidación— del suelo compactado con una humedad ligeramente superior a la correspondiente al óptimo Proctor.

En las figuras 10 y 11 se muestran, respectivamente, la evolución de la deformación no recuperable a lo largo del ensayo para el mismo

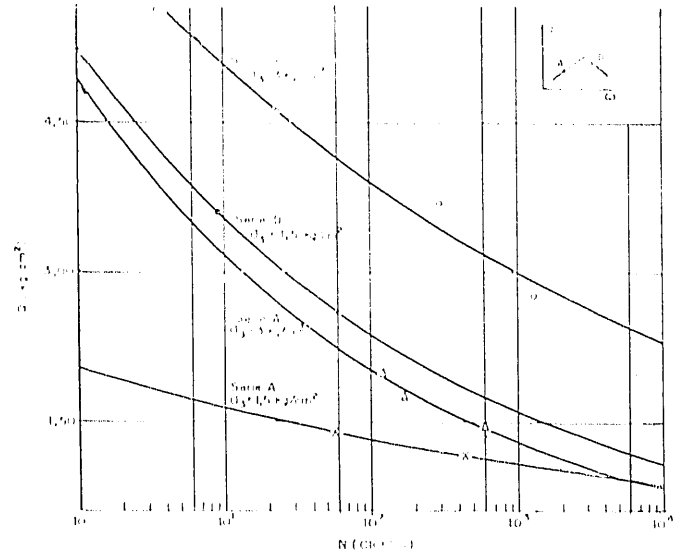


Fig. 9.—Curvas de fatiga para la arcilla de Guadalix.

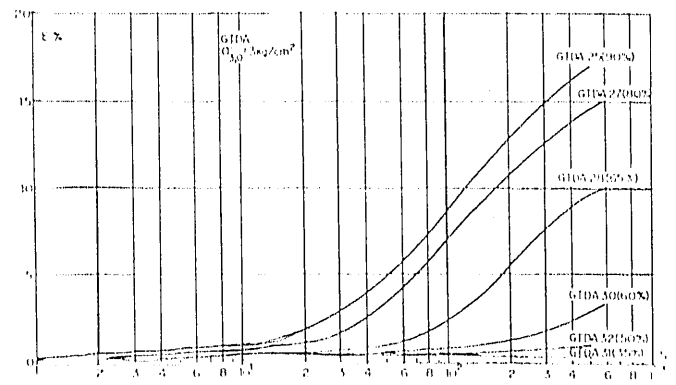


Fig. 10.—Evolución de la deformación no recuperable con el número de ciclos. Arcilla de Guadalix compactada en las condiciones «A».

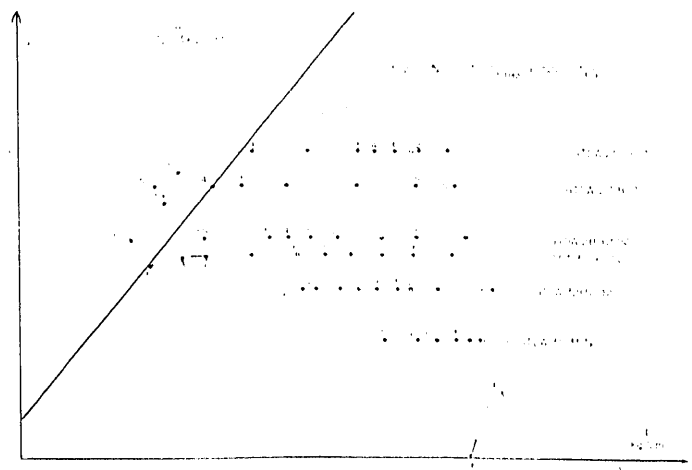


Fig. 11.—Recorridos tensionales.

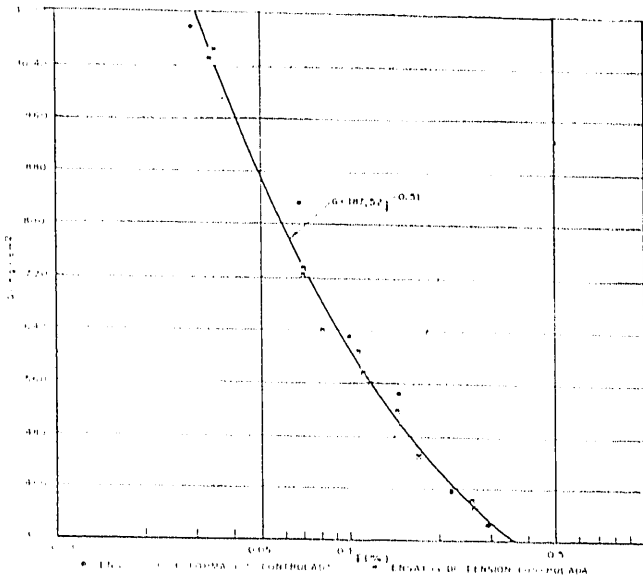


Fig. 12.—Variación del módulo de deformación transversal con el nivel de deformaciones (ARENA).

material compactado en las condiciones «A», y los sucesivos puntos correspondientes a los máximos de cada ciclo de carga en el plano q - p' .

Por último, en la figura 12 se dan, para un suelo granular, las curvas experimentales de variación del módulo dinámico G con el nivel de deformación tangencial γ , obtenidas para el material utilizado en una presa de tierra en Ecuador.

3.5. Valoración crítica

En los resultados del ensayo triaxial influyen, de forma importante, el método de preparación de la probeta —sobre todo en el caso de ensayos de licuefacción de suelos granulares saturados—, las características del equipo y la forma de realizar el ensayo.

Sería deseable, pues, establecer unas especificaciones mínimas para la realización de los ensayos triaxiales dinámicos, las cuales, debido en parte a la gran variedad de equipos, no existen en el presente.

Son muy interesantes a este respecto las conclusiones y recomendaciones de Silver en el trabajo realizado para la American Society for Testing Materials, financiado por la U. S. Nuclear Regulatory Commission (Silver, 1977).

Los principales problemas que plantea el ensayo triaxial dinámico, se pueden clasificar en tres grupos:

- a) Preparación de las probetas (materiales granulares).
- b) Condiciones de aplicación de la carga.
- c) Sistemas de medida de carga, presión de confinamiento e intersticial y deformaciones.

Respecto de la preparación de probetas de material granular, diferentes investigadores han estudiado el efecto de la misma en los resultados de los ensayos dinámicos, especialmente en los de licuefacción (Ladd, 1974; Mulilis et al., 1975). Los métodos recomendados de fabricación son los siguientes:

- Método de vertido.
- Método de vibrado.
- Método de compactación.

Los problemas debidos a la aplicación de la carga cíclica se originan tanto por la forma de los pulsos aplicados como por excentricidades o inclinaciones de los distintos elementos de acoplamiento y unión.

Por último, hay que tener en cuenta los sistemas de medida de carga, deformación y presión intersticial.

Respecto a la carga aplicada, hay que considerar, en los casos en que la célula de carga no está situada en el interior de la célula triaxial, el rozamiento entre ésta y el pistón. Se pueden realizar medidas en vacío, aplicando ciclos de deformación, y obtener la relación existente entre la amplitud de la deformación cíclica y el rozamiento para la frecuencia de trabajo.

La medida de la deformación se realiza en el exterior de la célula triaxial, obteniéndose una deformación axial media de la probeta. Sin embargo, sería aconsejable realizar las medidas en la zona central de la misma, punto en el cual se está trabajando actualmente en el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia.

La presión intersticial es la magnitud más delicada de medir por los motivos siguientes:

- El transductor debe ser lo suficientemen-

te rígido para que no influya su deformabilidad en la medida de la presión intersticial.

- Interesa medir la presión intersticial en la zona central de la probeta, siendo necesario emplear sistemas tipo aguja hipodérmica o drenes laterales de papel de filtro que homogeneicen las presiones.
- Debido a la baja permeabilidad de los suelos cohesivos, es necesario el emplear frecuencias bajas, por ejemplo, un ciclo cada veinte segundos, debiéndose justificar este punto mediante un estudio experimental previo.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

En este trabajo se ha expuesto de forma resumida el uso y problemática de los equipos de ensayo dinámico de suelos recientemente adquiridos por el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia. Dichos equipos son, como ya se ha dicho, bastante versátiles y sofisticados y permitirán en el futuro incorporar una serie de alternativas de ensayo aún por explorar. Entre dichas posibilidades pueden vislumbrarse las siguientes:

- a) Realización de ensayos con tensión lateral controlada (y medida) por medio del ordenador, tanto en condiciones estáticas como dinámicas.
- b) Efecto de la temperatura sobre la respuesta del suelo, utilizando cámaras de temperatura controlada.
- c) Utilización de espectros de carga arbitraria (generando digitalmente la excitación «compatible» correspondiente) y comparación con los resultados para carga cíclica.
- d) Medida de la presión intersticial dinámica generada durante el ensayo e interpretación de los resultados de éste en presiones efectivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CUELLAR, V., BLAZQUEZ, R., y OLALLA, C.: «Comportamiento dinámico de suelos, con especial relación a centrales nucleares y presas de materiales sueltos». (Segunda parte). Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, CDX, pp. 512, 1980.
- DRNEVICH, V. P., HARDIN, B. O., y SHIPPY, D. J.: «Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method». Dynamic Geotechnical Testing, ASTM, STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 91-125, 1978.
- DRNEVICH, V. P.: «Resonant Column Testing-Problems and Solutions». Dynamic Geotechnical Testing, ASTM, STP 654, pp. 385-398, 1980.
- DRNEVICH, V. P.: «Drnevich Resonant Column Apparatus Operating Manual». Soil Dynamics Instruments, Inc., Lexington, KY.
- HARDIN, B. O.: «Suggested Methods of Test for Shear Modulus and Damping of Soils by the Resonant Column». ASTM, STP 479, pp. 516-29, 1970.
- LADD, R. S.: «Specimen Preparation and Liquefaction of Sands». Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT10, October, 1974.
- MARCUSON, W. F., y WALLS, H. E.: «Time effects of dynamic shear modulus of clays». ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, Vol. 98 (SM-12), pp. 1359-1373, 1972.
- MULILIS, J. P.; CHAN, C. K., y SEED, H. B.: «The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands». Report No. EERC-75-18, University of California, Berkeley, December, 1975.
- NOVAK, M., y KIM, T. C.: «Resonant column technique for dynamic testing of cohesive soils». Canadian Geotechnical Journal, núm. 18, pp. 448-455, 1981.
- PARK, T.: «Dynamic Soil Behavior under Cyclic Loading Conditions». Ph D dissertation. Department of Civil Engineering. University of Illinois, Chicago (USA), 1975.
- PASTOR, M.: «Comportamiento de arcillas compactadas en procesos de carga cíclica sin drenaje». Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1980.
- PASTOR, M.; HERRERO, J.; OTEÑO, C., y SAEZ, J.: «El Servoaccionador cíclico: un nuevo equipo para ensayos de suelos». Boletín de Información del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, núm. 131. Enero-febrero, 1979.
- RICHART, F. E.; HALL, J. R., y WOODS, R. D.: «Vibration of Soils and Foundations». Prentice Hall Int. Series, New Jersey (EE.UU). Chap. 3, 1970.
- SILVER, M. L.: «Laboratory Triaxial Testing Procedures to Determine the Cyclic Strength of Soils». Report No. NUREG-31, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1977.