

COMPORTAMIENTO TENSION-DEFORMACION DE LOS SUELOS SOMETIDOS A CARGAS CICLICAS Y DINAMICAS

Ricardo DOBRY*

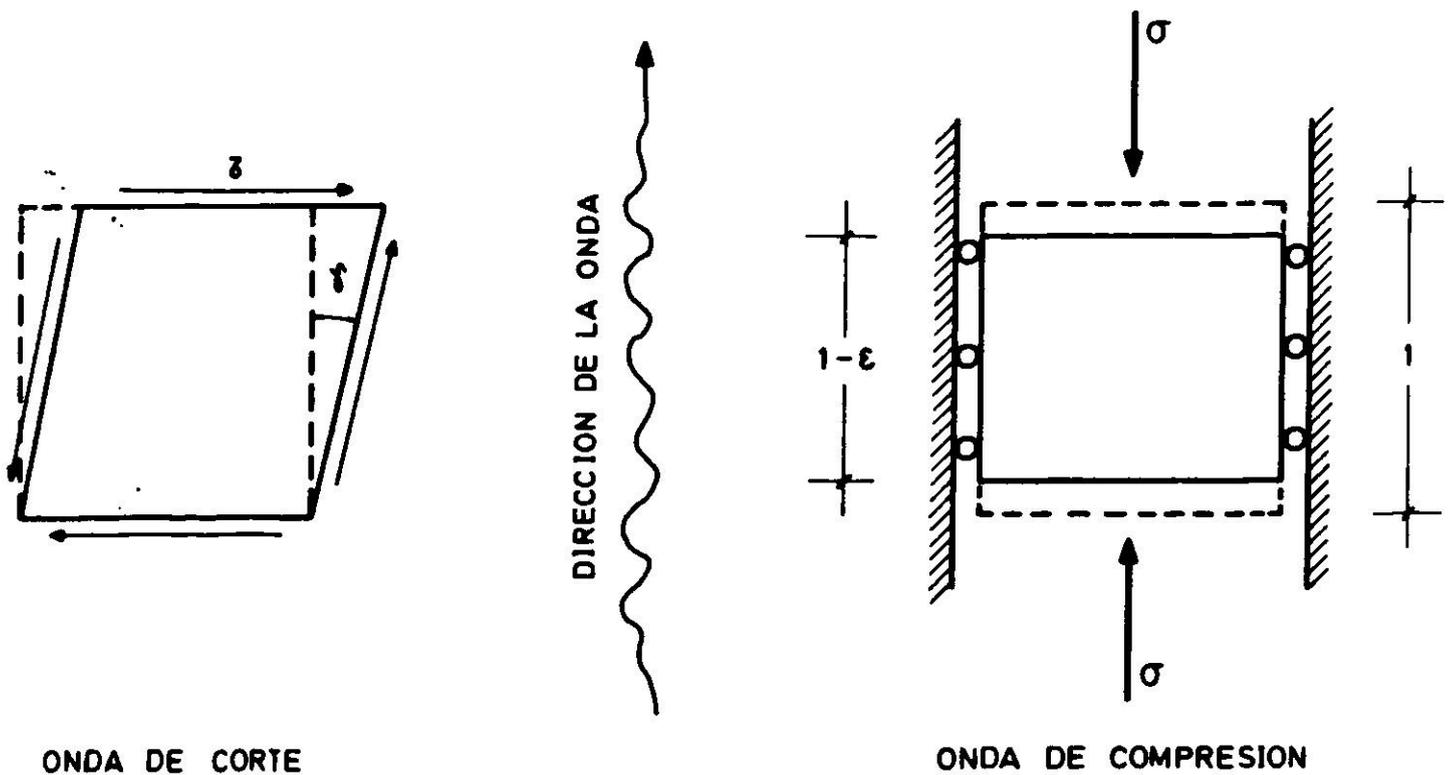
RESUMEN

El comportamiento tensión-deformación de los suelos durante cargas sísmicas u otras de tipo cíclico o dinámico es muy compleja. Esto se debe fundamentalmente a que se trata de materiales formados por partículas y, también frecuentemente a la presencia de agua en los poros del suelo. En general, el suelo puede caracterizarse como un material de comportamiento no lineal (aun para deformaciones muy pequeñas), histerético, friccional e independiente de la frecuencia, con un fuerte acoplamiento entre las tensiones de corte y las deformaciones volumétricas. Un parámetro clave para definir la relación entre las tensiones y las deformaciones unitarias es el nivel de la deformación cíclica de cizalle.

COMPORTAMIENTO BAJO CARGA MONOTONICA

Cuando actúan solicitaciones cíclico-dinámicas en un suelo, como las originadas por terremotos, olas oceánicas y fundaciones de máquinas, se propagan a través de él ondas sísmicas, las que pueden ser de compresión, de corte o superficiales. La Fig. 1 muestra los tipos de carga asociados con el paso de ondas de corte y de compresión. La Fig. 2 muestra formas típicas de las curvas

* Departamento de Ingeniería Civil. Rensselaer Polytechnic Institute.



ONDA DE CORTE

ONDA DE COMPRESION

Fig. 1. Tipos de cargas producidas por una onda de corte y una onda de compresión.

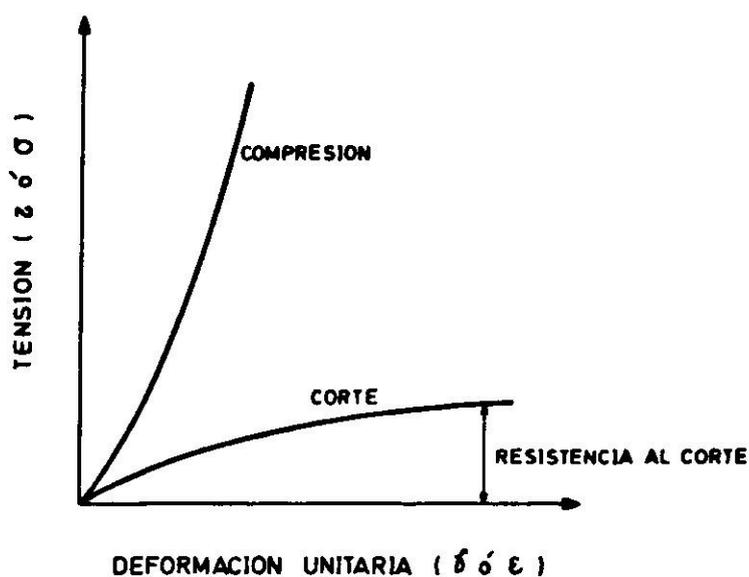


Fig. 2. Curvas tensión-deformación unitaria para cargas monotónicas de suelos granulares secos.

tensión-deformación unitaria observadas en suelos granulares sometidos a corte y compresión de crecimiento monotónico. Ambas curvas de esa figura son no lineales, pero mientras en compresión la rigidez aumenta con la deformación, en corte la rigidez disminuye con la deformación y en el hecho se anula (y el suelo falla) cuando la tensión de corte aplicada llega a igualar a la resistencia del material.

Las características de las curvas de la Fig. 2 se relacionan con el hecho de que el suelo es un material discreto, compuesto de partículas que interactúan mutuamente en las zonas de contacto. La Fig. 3 esquematiza la estructura de un suelo granular a nivel *microscópico*, donde los valores de las componentes normal, N y tangencial, T , de las fuerzas en los contactos determinan en gran medida la relación global tensión-deformación unitaria del suelo a escala *macroscópica*. Esta relación macroscópica es la usual, expresada en términos

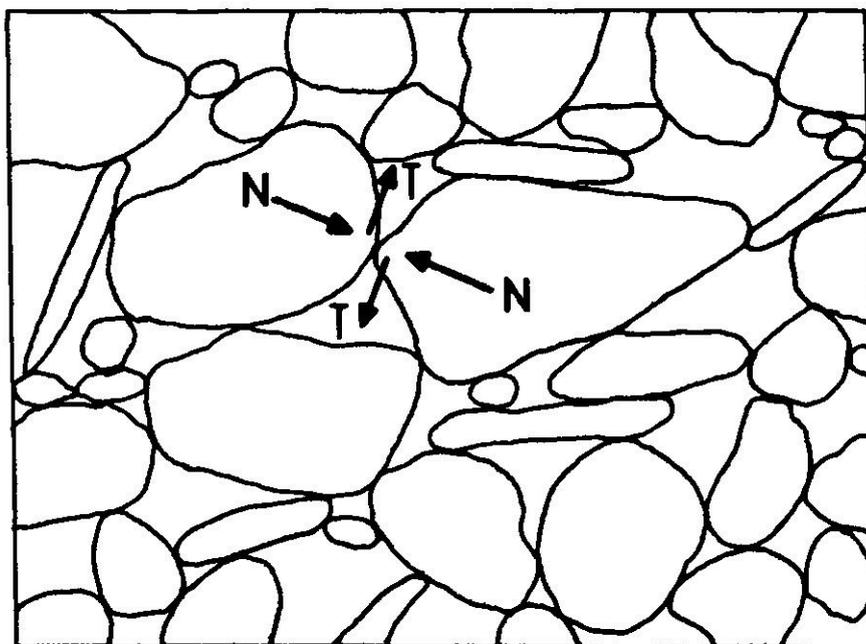


Fig. 3. Interacción entre los granos de un suelo granular.

de la mecánica de los medios continuos. El aumento progresivo de la rigidez en compresión de la Fig. 2, corresponde a un material *con trabazón*, en el cual al aumentar las fuerzas normales, N , en los contactos se hace más difícil el desplazamiento de los granos de suelo en cualquier dirección. La disminución de rigidez en corte, en la misma figura, corresponde a un material *en fluencia*, en el cual, conforme aumenta la deformación de corte impuesta al suelo, un mayor número de partículas se desliza (o rueda) con respecto a sus vecinas, en la medida en que T iguala la resistencia tangencial de los contactos en cada uno de ellos. Por supuesto, esta resistencia tangencial depende en alto grado del valor de N , y esta es una de las razones por las cuales el suelo se comporta macroscópicamente al corte como un material de tipo friccionante.

• Hay otras dos características generales del suelo que interesan en esta discusión. La primera es que, muy a menudo, los poros o huecos del suelo están saturados de agua. A escala macroscópica, las relaciones tensión-deformación unitaria de un suelo saturado y la de un suelo seco son conceptualmente idénticas si del total de la tensión normal, σ , que actúa en cualquier dirección en el suelo saturado, solamente se considera una parte, llamada tensión efectiva, $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u$$

en que u es la presión de poros.

La segunda característica es que, en términos generales, un suelo suelto (o blando) tiende a contraerse cuando se le aplica una deformación de cizalle mediana a grande, mientras que un suelo denso (o duro) tiende a expandirse. Este acoplamiento entre el desviador del tensor de tensiones y la componente volumétrica del tensor de deformaciones también se debe a la naturaleza discreta del suelo y es uno de los aspectos del comportamiento del suelo más difícil de representar en los modelos basados en la mecánica del continuo. En un suelo seco, el cambio de volumen se produce efectivamente, mientras que en un

suelo saturado sujeto a cargas rápidas el agua puede escapar y la tendencia al cambio de volumen se traduce en cambios de presión de poros, u , y de la tensión efectiva, $\bar{\sigma}$.

Las curvas tensión deformación unitaria tienen siempre, para carga de corte monotónica, una forma que es cóncava hacia el eje de las deformaciones, con un valor límite de la tensión de corte, tal como se muestra en la Fig. 2. Esto es cierto tanto para suelos secos como saturados. Variaciones amplias de la velocidad de deformación, tales como las que hay entre un ensayo estático (velocidad de deformación unitaria $< 10^{-2}$ % por segundo) y un ensayo dinámico (velocidad de deformación unitaria $\approx 10^0$ % por segundo), afectan sorprendentemente poco la curva tensión-deformación unitaria y la resistencia de arenas secas^{5, 13}. En general, puede decirse que en los suelos las curvas tensión deformación unitaria de corte asociadas con cargas dinámicas monotónicas tienen forma similar y muestran resistencias parecidas o mayores que las obtenidas con cargas estáticas. Excepción a esta regla podría ser el comportamiento de suelos con una estructura muy sensible, tales como arenas sueltas, saturadas, que bajo ciertas condiciones de ensayos dinámicos pueden tener una resistencia significativamente menor y un comportamiento tensión-deformación cualitativamente diferente¹ (frágil).

El desarrollo de grandes deformaciones y la falla de una masa de suelo se relacionan usualmente con las tensiones y deformaciones de corte inducidas por la sollicitación, sea ésta estática o dinámica. Así mismo, las características del movimiento del terreno en los terremotos en la superficie del suelo o a poca profundidad se asocian directamente con la relación tensión deformación unitaria al corte del suelo. En consecuencia, el resto de este trabajo se centrará en cargas de corte cíclicas. A menos que explícitamente se diga lo contrario, los conceptos de tensión y deformación unitaria se utilizan en el texto en su significado macroscópico corriente.

COMPORTAMIENTO CICLICO PARA DEFORMACIONES UNITARIAS DE CORTE PEQUEÑAS

En suelos secos y saturados sometidos a deformaciones cíclicas de corte pequeñas se ha observado un comportamiento no lineal e hysterético, en que la curva tensión de formación unitaria, en cualquier ciclo de carga, queda representada por un huso de histéresis en general similar a los que se presentan en las Figs. 4 y 6. Este huso es independiente de la frecuencia para amplio rango de frecuencias, que incluye a las que interesan en ingeniería sísmica². Ya a deformaciones unitarias muy pequeñas el comportamiento está lejos de ser elástico, especialmente en el caso de arenas sueltas y arcillas normalmente consolidadas. En cada ciclo se disipa en forma de fricción interna cierta cantidad de energía, que es

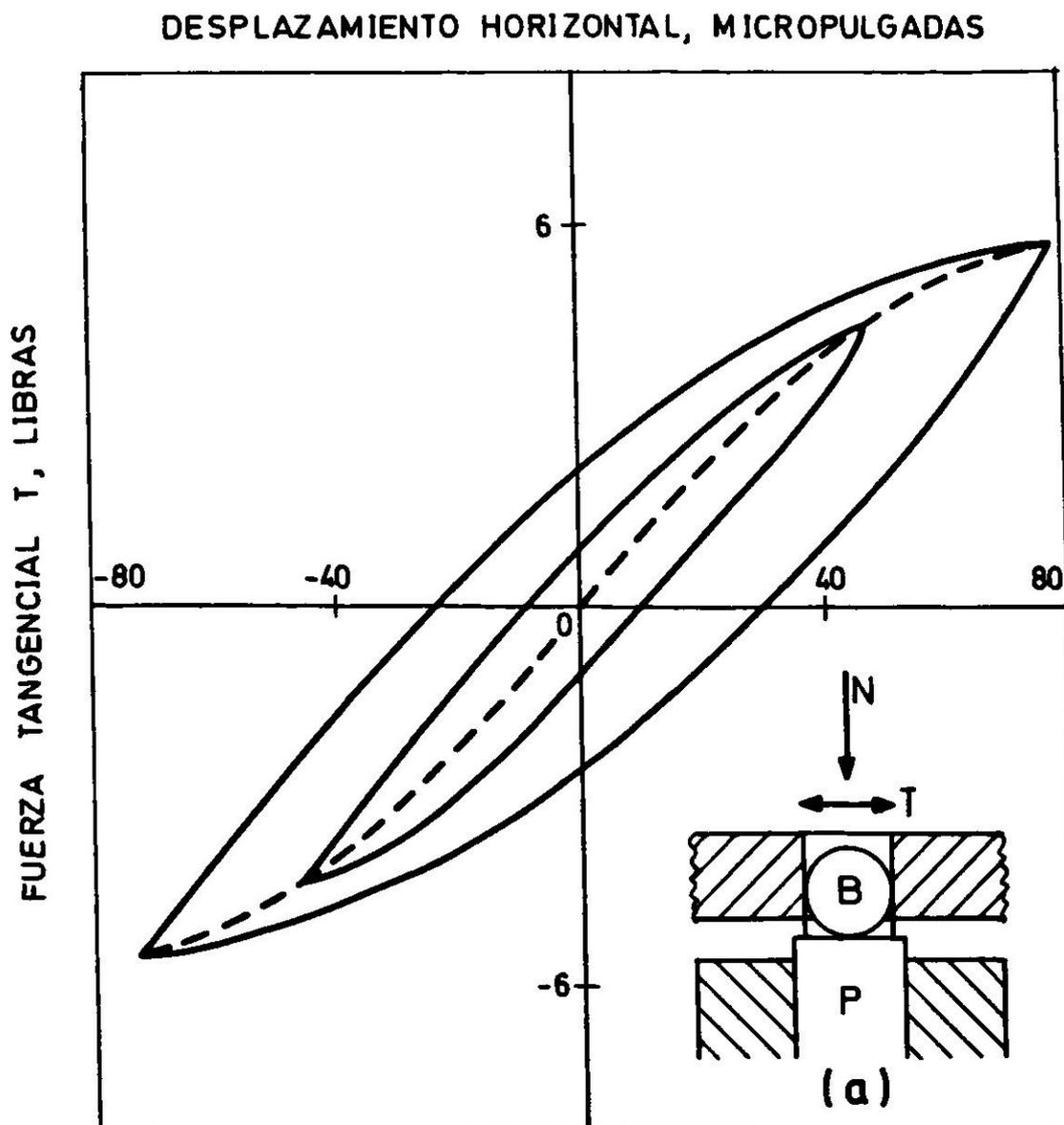


Fig. 4. Husos cíclicos de histéresis obtenidos por carga tangencial de la bola de acero B en la superficie plana de acero P, esquematizado en (a)^{6, 12}.

proporcional al área encerrada por el huso. Esta energía aumenta con la deformación unitaria cíclica (máxima), γ_c . La curva que une los extremos de los husos, que puede imaginarse como idéntica a la curva monótonica de la Fig. 2 a pequeñas deformaciones, es cóncava hacia el eje de las deformaciones unitarias.

Hay otras características del comportamiento observado del suelo sometido a pequeñas deformaciones cíclicas que también son importantes. La principal es que para carga de régimen permanente (deformación unitaria o tensión cíclica constante), el huso es estable, esto es, se repite indefinidamente ciclo tras ciclo. Además, a estas deformaciones las cargas de corte cíclicas no inducen cambios significativos ni del volumen del suelo ni de la presión del agua en los poros. Todas estas características parecen ser válidas por lo menos en suelos predominantemente granulares para deformaciones unitarias de corte cíclicas, γ_c , hasta alrededor de 10^{-2} o/o a 10^{-1} o/o^{3, 10, 11, 14}

El comportamiento descrito hace pensar que, para deformaciones unitarias de corte cíclicas por debajo de cierto umbral, las cargas cíclicas se traducen en una fluctuación de las fuerzas tangenciales, T , en los contactos entre granos, ver Fig. 3. Para estas pequeñas deformaciones los contactos mantienen sus ubicaciones originales, sin que haya cambios en la geometría del conjunto de

partículas, esto es, el deslizamiento y rodado entre granos se produce sólo como acontecimiento aislado y excepcional. En efecto, estudios teóricos y experimentales de los contactos entre esferas elásticas y entre esferas y superficies planas que tienen un valor dado del coeficiente de fricción, f , sugieren que el comportamiento macroscópico observado de suelos granulares a pequeñas deformaciones puede explicarse en términos del comportamiento microscópico carga-deslizamiento de los contactos entre partículas^{6,7}.

La Fig. 4 muestra los resultados de ensayos de cargas cíclicas entre una esfera de acero (diámetro 0.19 a 1.57 pulgadas) y una superficie plana de acero. En estos ensayos la carga normal, N , (4 a 20 libras), se mantuvo constante durante cada ensayo, mientras la carga tangencial, T , se hizo variar cíclicamente y se midió el desplazamiento horizontal relativo entre la esfera y la superficie^{6,12}. Las curvas de la Fig. 4 tienen las mismas características descritas anteriormente para el suelo real a pequeñas deformaciones: un comportamiento estable, no lineal, independiente de la frecuencia e histerético. Mindlin y Deresiewicz⁷ demostraron analíticamente y Johnson⁶ y otros verificaron experimentalmente, que la energía encerrada por el huso se gasta por fricción debida al deslizamiento de un anillo en la región exterior del área de contacto creada entre los dos cuerpos que se tocan. Para $T < fN$, no hay deslizamiento relativo y el centro del área de contacto permanece en su ubicación original. Cuando $T = fN$ el contacto desliza y la disposición geométrica de los cuerpos (partículas) cambia. Para el caso de dos esferas idénticas el modelo predice que, si $T < fN$, el comportamiento cíclico es función del valor cíclico de T , del valor de la carga normal, N , del coeficiente de fricción, f , y del diámetro y de las propiedades elásticas de las esferas.

La existencia de un umbral de deformaciones unitarias de corte, del orden de $\gamma_c = 10^{-2}\%$ a $10^{-1}\%$, en los suelos granulares, tiene importancia práctica. Ello implica que, si se anticipa que la sollicitación dinámica inducirá deformaciones cíclicas menores que este umbral, es posible descartar el peligro de compactación o licuación del suelo. Este concepto ha sido utilizado en el diseño de fundaciones de máquinas en suelos granulares¹⁵.

COMPORTAMIENTO CICLICO PARA DEFORMACIONES UNITARIAS DE CORTE MEDIANAS Y GRANDES

El comportamiento cíclico de los suelos para deformaciones de corte medianas y grandes ($\gamma_c > 0.01$ a 0.1%) tiene mucha importancia práctica. Los terremotos fuertes producen deformaciones por encima de ese nivel y para suelos blandos y/o sismos de gran intensidad la deformación máxima puede ser mayor aun que 1% . En este intervalo de deformaciones medianas a grandes, hay un reordenamiento significativo de las partículas en suelos granulares, con el co-

respondiente proceso de deslizamiento y rodado en los contactos entre ellas. A medida que aumenta la tensión de corte, la fracción de contactos deslizantes también aumenta, hasta que la masa de suelo falla, lo que se manifiesta por un deslizamiento generalizado, por lo menos a lo largo del plano o zona de falla. En este rango de deformación el deslizamiento y rodado entre partículas controla el comportamiento global y las propiedades elásticas de los granos juegan un papel secundario: en efecto, Rowe⁸ demostró que para deformaciones unitarias grandes el comportamiento observado puede predecirse suponiendo partículas perfectamente rígidas.

Algunas de las características del comportamiento del suelo a pequeñas deformaciones se mantienen, o incluso de acentúan, en el rango de deformaciones medianas y grandes. A medida que se deslizan y ruedan más contactos, la curva monotónica tensión deformación unitaria, Fig. 2, se aplana más hasta que se produce la falla. Se forman también husos independientes de la frecuencia, similares a los mostrados en la Fig. 4, los que se hacen más definitivamente no lineales y se van aplanando a medida que la deformación unitaria cíclica aumenta. Pero hay también importantes diferencias con respecto al caso de deformaciones pequeñas. En primer lugar, para deformaciones medianas y grandes el huso de histéresis no es necesariamente estable para carga de régimen permanente. En arenas secas, el huso puede hacerse más empinado, mientras simultáneamente el suelo se va densificando con el número de ciclos⁴, como consecuencia del deslizamiento de los granos a posiciones más estables. En arenas saturadas, y también en arcillas, la tendencia a la densificación del suelo con el número de ciclos se traduce en un aumento de la presión del agua en los poros, con la consecuente disminución de $\bar{\sigma}$ y con una degradación correspondiente de la rigidez del suelo. Eventualmente esto puede conducir a deformaciones excesivas y a la falla del suelo, incluso en casos en que las tensiones de corte que actúan sobre el suelo son relativamente moderadas. La manifestación más conocida y peligrosa de este fenómeno es la licuación de arenas saturadas, que ha ocasionado fallas espectaculares en muchos terremotos.

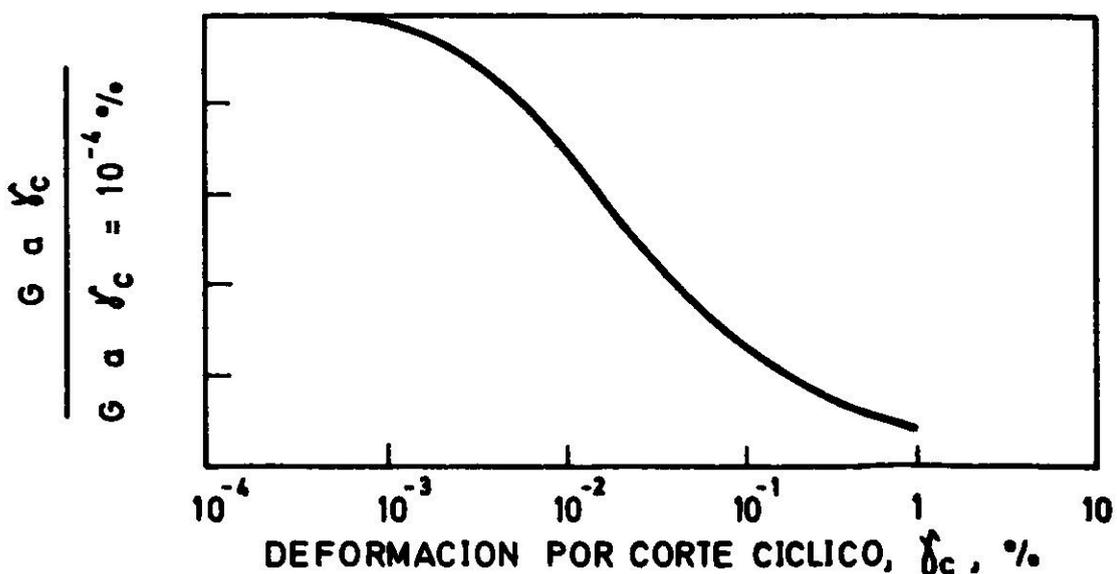


Fig. 5. Variación del módulo de corte secante, G, con γ_c para arenas⁹.

La Fig. 5 presenta la curva propuesta por Seed e Idriss⁹ para representar la reducción del módulo secante de corte, G , a medida que aumenta la deformación unitaria para arenas sometidas a cargas cíclicas. Este valor de G es la inclinación media del huso de histéresis, y generalmente se calcula a partir de una línea recta que une ambos extremos del huso. La Fig. 5 abarca todo el espectro de deformaciones cíclicas, desde pequeñas a grandes. La Fig. 6 ilustra la degradación del comportamiento tensión-deformación y de la rigidez del suelo durante sollicitaciones que producen grandes deformaciones cíclicas. Los husos de histéresis de la Fig. 6 se obtuvieron durante un ensayo triaxial cíclico no drenado

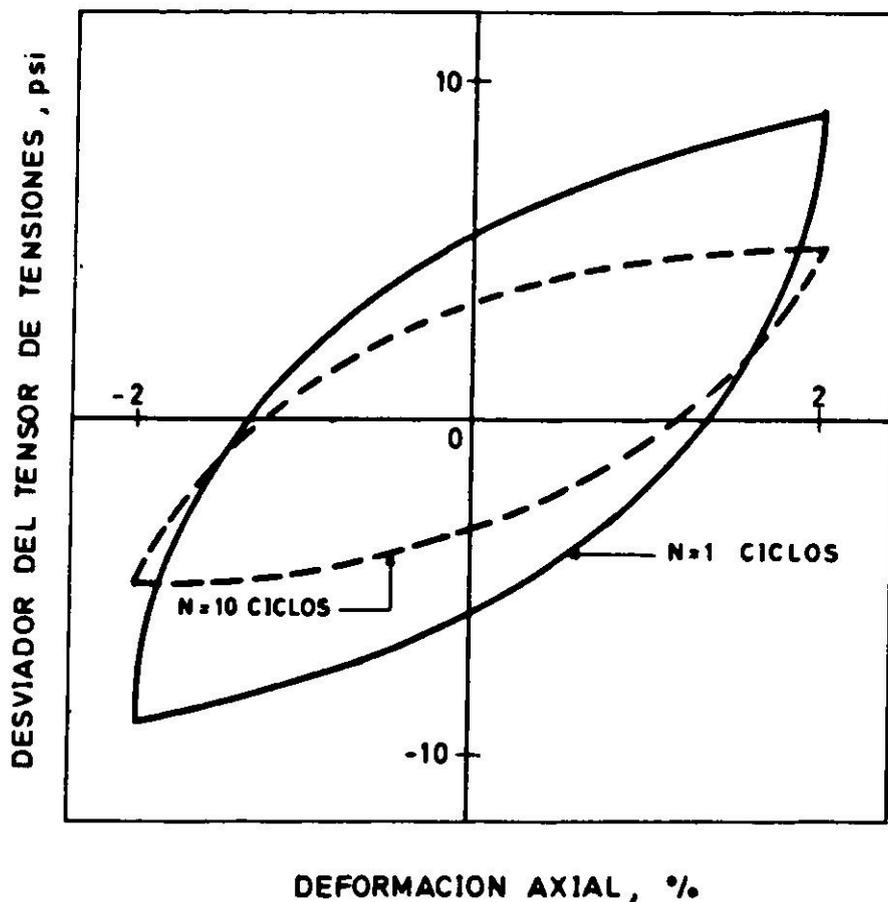


Fig. 6. Degradación del comportamiento tensión-deformación durante el ensayo triaxial cíclico con deformación controlada de una arcilla limosa ($\gamma_c = 2\%$).

con deformaciones controladas de una muestra saturada de arcilla limosa, normalmente consolidada de San Francisco. En este ensayo del suelo $\gamma_c = 2\%$. La Fig. 6 muestra una reducción considerable del módulo secante del suelo a $\gamma_c = 2\%$, entre 1 y 10 ciclos de carga, que se manifiesta en la figura como una disminución en el valor de la tensión de corte cíclica de 9 a 6 psi.

CONCLUSIONES

El comportamiento tensión-deformación de los suelos durante sollicitaciones sísmicas u otras similares, debe estudiarse tomando en cuenta el carácter

discreto del material, así como los aspectos cíclicos y dinámicos de la carga.

Un parámetro clave del comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas y dinámicas es el nivel de deformación de corte máxima, γ_c . En suelos granulares, el comportamiento tensión-deformación para valores de γ_c pequeños es no lineal pero estable, sin tendencia significativa a la densificación o al aumento de la presión de poro. Para deformaciones unitarias mayores, fenómenos tales como el cambio de rigidez con el número de ciclos, y la densificación o licuación del suelo, indican que el comportamiento no es estable. El umbral de deformaciones unitarias que separa ambos tipos de comportamiento parece estar entre $\gamma_c = 0.01\%$ a 0.1% .

Estos y otros aspectos del comportamiento cíclico tensión-deformación de los suelos, pueden asociarse con las características de la relación fuerza-desplazamiento en los contactos entre las partículas constituyentes del material, las que han sido estudiadas mediante investigaciones teóricas y experimentales.

REFERENCIAS

1. CASTRO, G. Liquefaction of sands, Ph. D. Thesis. *Soil Mechanics Series N° 81*, Harvard University, 1969.
2. DOBRY, R. WHITMAN, R.V. y ROESSET, J.M. Las propiedades de histéresis de los suelos y la aproximación lineal, *Revista del IDIEM*, vol. 13, n° 1 (mayo 1974), 23-40.
3. DRENEVICH, V.P. y RICHART, F.E. Jr. Dynamic prestraining of dry sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96, SM2, marzo, pp. 453-469.
4. FINN, W.D. LIAM, LEE, K.W. y MARTIN, G.R. Constitutive laws for sand in dynamic shear, *Proceedings Second International Conference on Numerical Methods in Geomechanic*, vol. 1, p. 270, Blacksburg, Virginia, 1976.
5. HEALY, K.A. *The dependence of dilation in sand on rate of shear strain*, Report N° 13 (Soil Dynamic Series) to U.S. Army of Engineers Waterway Experiment Station, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, 1963.
6. JOHNSON, K.L. Surface interaction between elastically loaded bodies under tangential forces. *Proceedings Royal Society, Series A.*, vol. 230, p. 531, Londres, 1955.
7. MINDLIN, R.D. y DERESIEWICZ. Elastic spheres in contact under varying oblique force, *Journal of Applied Mechanics, Transaction ASCE*, vol. 75 p. 327, 1953.
8. ROWE, P.W. The stresses-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, *Proceedings Royal Society, Series A.*, vol. 269, p. 500, 1962.
9. SEED, H.B. e IDRIS, I.M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, *EERC Report N° 70-10*, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1970.
10. SILVER, M.L. y SEE, H.B. Volume changes in sands during cyclic loading, *Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 97, N° SM9, p. 1171, septiembre 1971.
11. PARK, T. y SILVER, M.L. *Dynamic soil properties required to predict the dynamic behavior of elevated transportation structures*. Interim Report to the Department of

Transportation, Department of Materials Engineering, University of Illinois, Chicago Circle, 1975.

12. WHITE, J.E. *Seismic waves*, Mac Graw-Hill Co. New York, 1965.
13. WHITMAN, R.V. y HEALY, K.A. Shear strength of sands during rapid loading, *Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 88, N° SM2, 1962.
14. YOUD, T.L. Compaction of sands by repeated shear straining, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98, SM7 (julio 1972), pp. 709-725.
15. STOLL, R. y KALD, L. The threshold of dilation under cyclic loading, *Proceedings, Specialty Session on Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, ASCE Annual Convention, Philadelphia*, (septiembre 27 - Octubre 1, 1976).

STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF SOILS DURING CYCLIC-DYNAMIC LOADING

SUMMARY:

The stress-strain behavior of soils during seismic and other cyclic-dynamic loading is very complex, due mainly to the particulate nature of the material, and, very often, to the presence of water in the voids of the soil. In general, soil can be characterized as a nonlinear (even at very small strains), hysteretic, frequency-independent and frictional material, with a strong coupling between shear stresses and volumetric strains. A key parameter in defining the stress-strain behavior is the level of cyclic shear strain.