

Mecanismos de licuación y flujo de suelos granulares durante sismos

ADOLFO ALARCON GUZMAN
Ingeniero Civil, MSCE, Ph.D.,
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Una amplia evidencia experimental ha mostrado que vibraciones de pequeña amplitud producen una disminución progresiva del volumen en suelos granulares; ello ocurre aún en el caso de arenas densas que podrían dilatar durante carga monotónica o unidireccional bajo un cierto nivel de esfuerzos de confinamiento. Por tanto, cuando un depósito de arena saturada se ve sometido a las ondas de corte que se propagan durante un sismo, la estructura de la arena tiende a densificarse. Sin embargo, como la duración de aplicación de los esfuerzos de corte cíclicos es, en general, muy pequeña en comparación con el tiempo necesario para que ocurra algún drenaje, la tendencia de la arena a disminuir de volumen durante cada ciclo se refleja en un incremento progresivo de la presión de poros (8, 14). Esto produce una reducción continua del esfuerzo efectivo y consecuentemente una disminución en la resistencia al corte de la arena. Una disminución considerable de la resistencia puede conducir a fallas por corte, que en algunas ocasiones son de consecuencias catastróficas.

Si en el curso de la carga cíclica la presión de poros aumenta hasta un valor igual al esfuerzo de confinamiento inicial, el esfuerzo efectivo o intergranular existente en el esqueleto de la arena se reduce a cero y en consecuencia la arena pierde completamente la resistencia al corte, al menos en principio. En otras palabras, la arena se licúa, esto es, se comporta como un líquido viscoso. En el estado de "licuación", el cual puede ser temporal, se considera que los granos individuales existen como si estuvieran en suspensión en el agua (8), como se ilustra en la Figura 1. Los efectos del fenómeno sobre las estructuras suprayacentes son obvios. Una vez se presenta la licuación, se inicia un proceso de flujo de agua hacia las fronteras del depósito más permeables o hacia zonas donde los excesos de presión de poros sean menores. Simultáneamente con este flujo se produce una reorganización de los granos, los cuales al final del proceso adquieren una fábrica más densa (Figura 1c). La

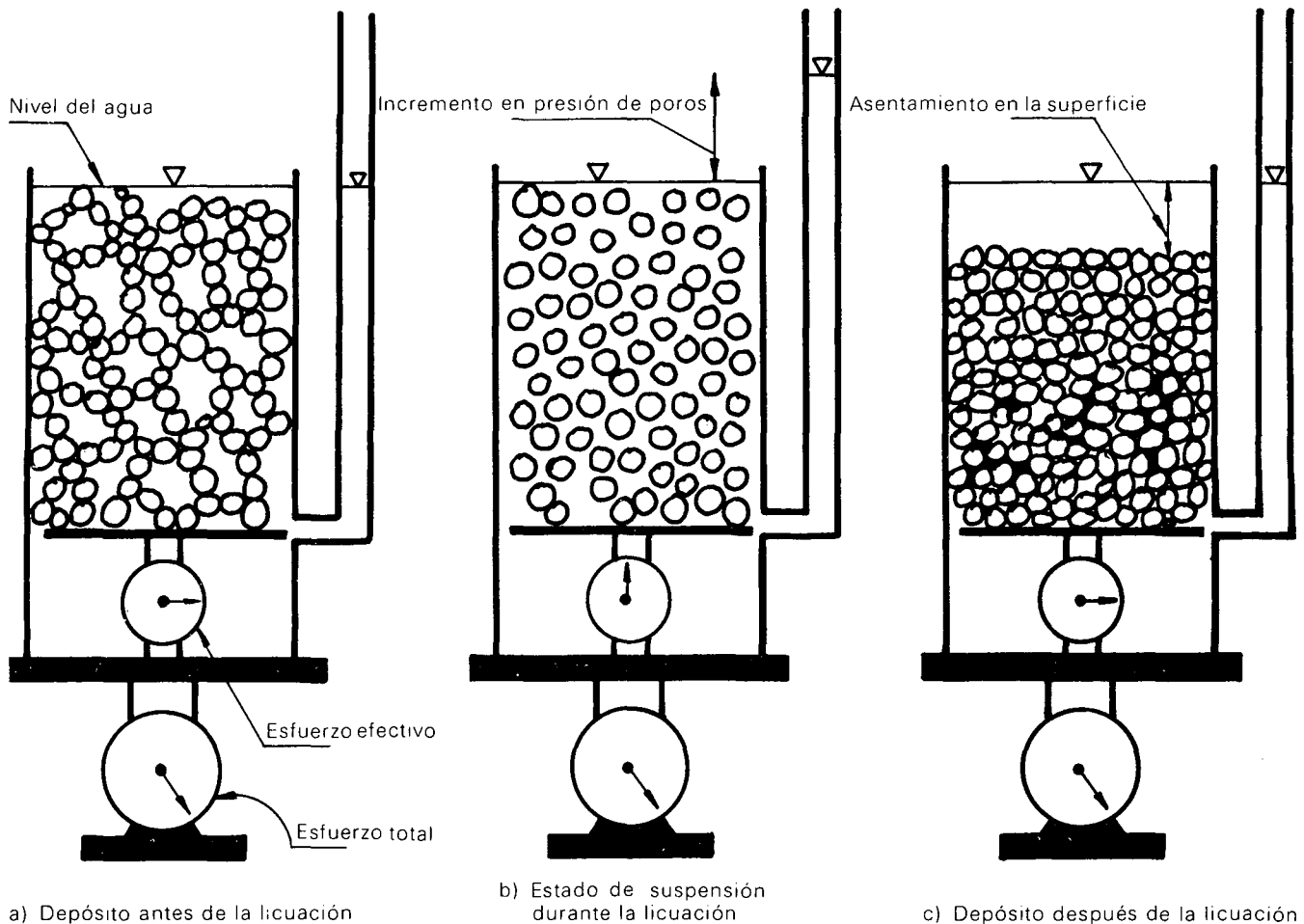


FIGURA 1. Definición del estado de licuación (Ref. 8).

duración del estado de licuación depende de las condiciones de drenaje del depósito y del número de aplicaciones de esfuerzo cíclico inmediatamente después de la ocurrencia del estado de licuación.

La acumulación de presión de poros antes de la ocurrencia de licuación está controlada por las características de compresibilidad de la arena, principalmente dentro del límite de pequeñas deformaciones. Los resultados de varias investigaciones han mostrado que densidad relativa y el estado inicial de esfuerzos no son suficientes para caracterizar el comportamiento mecánico de suelos granulares. Otros factores, como composición, gradación, forma de los granos, fábrica, historia de esfuerzos y deformaciones, e inclusive la edad del depósito, entre otros, pueden influir de una manera significativa el comportamiento esfuerzo-deformación de suelos no cohesivos (9). En consecuencia, todos ellos también afectan la tasa de acumulación de presión de poros y el consecuente desarrollo de deformaciones en depósitos de suelos arenosos y limosos durante un sismo.

El presente artículo discute el mecanismo que produce la licuación de suelos granulares cuan-

do se someten a carga cíclica, así como las diferencias y similitudes entre el fenómeno de licuación y los procesos de flujo (flow deformation) de estos suelos, los cuales se pueden presentar bajo condiciones de carga cíclica o monotónica (estática).

RESULTADOS TÍPICOS DE ENSAYOS TRIAXIALES CÍCLICOS

Desde los trabajos pioneros de Seed y Lee (10, 15), las condiciones de esfuerzos cíclicos bajo las cuales se produce la licuación de arenas saturadas se han investigado extensamente por medio de ensayos sobre muestras reconstituidas (dada la dificultad de obtener muestras inalteradas) usando varios tipos de técnicas de laboratorio. Sin embargo, hasta muy recientemente, los ensayos triaxiales cíclicos han sido los más ampliamente usados, aunque estos ensayos presentan grandes limitaciones para simular apropiadamente las condiciones de carga cíclica durante un sismo (1, 3, 14). A pesar de esto, los resultados de ensayos triaxiales cíclicos han suministrado información muy valiosa para un entendimiento adecuado del comportamiento de suelos granulares saturados bajo carga cíclica.

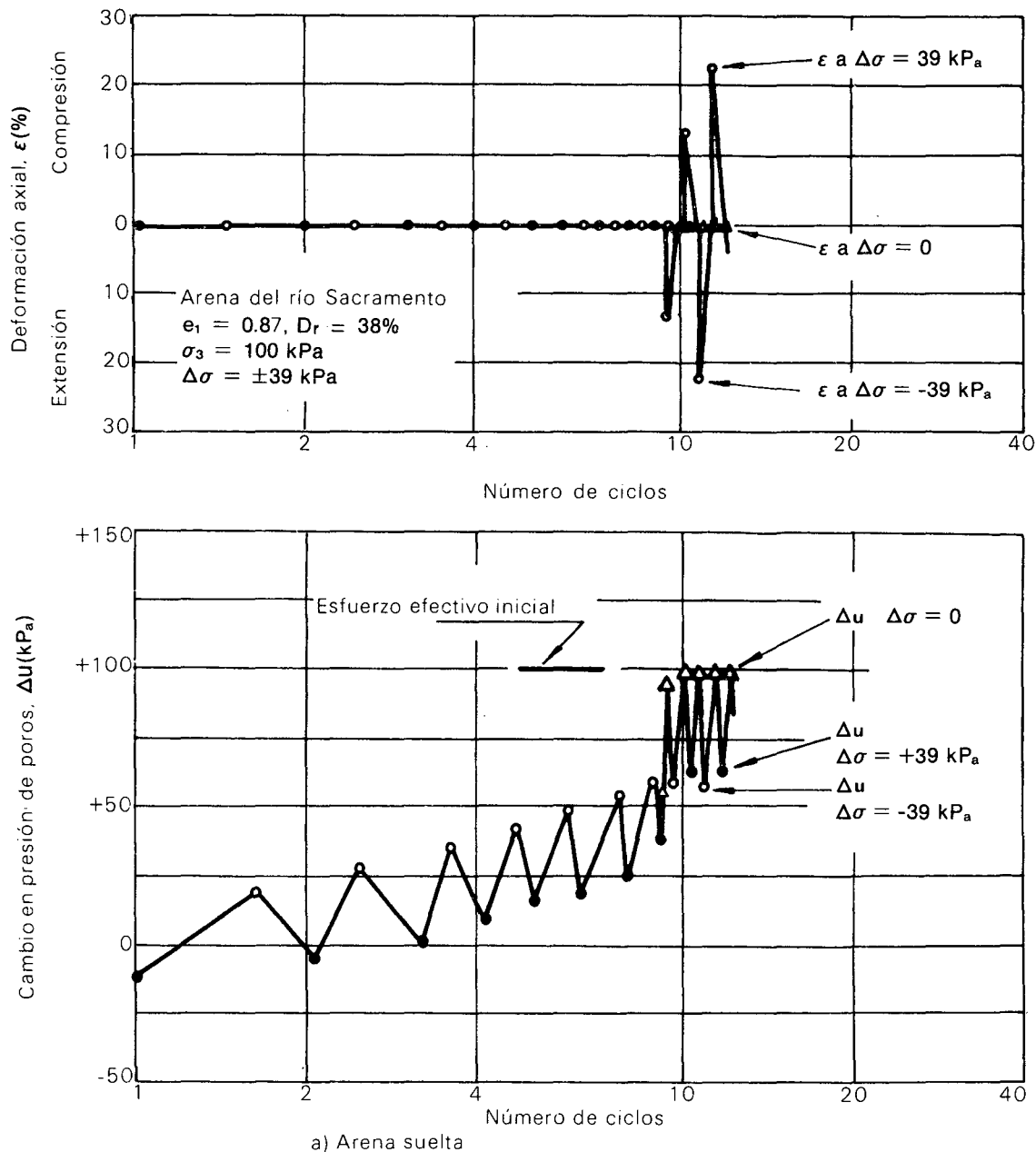
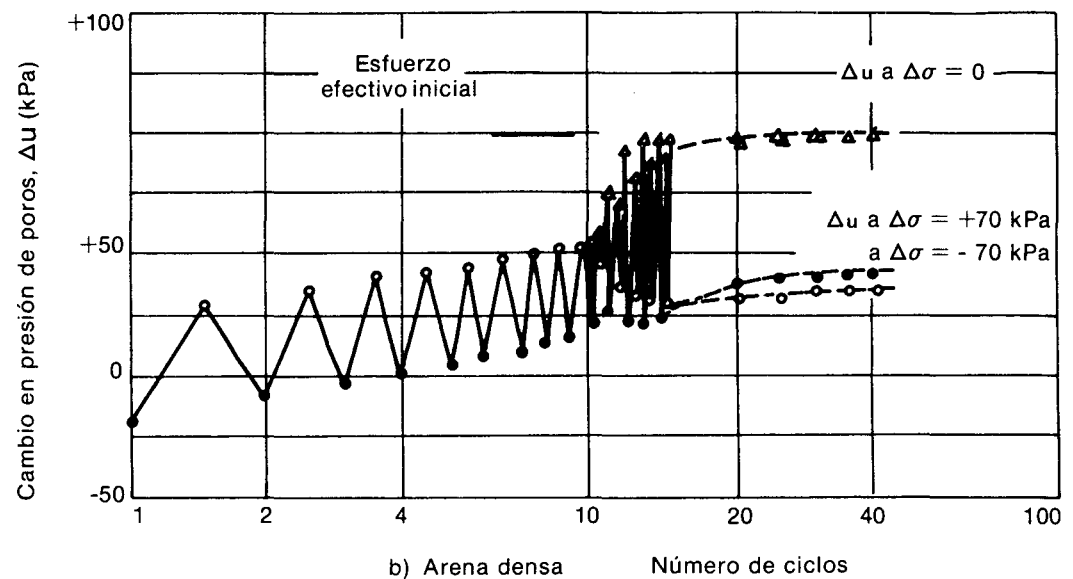
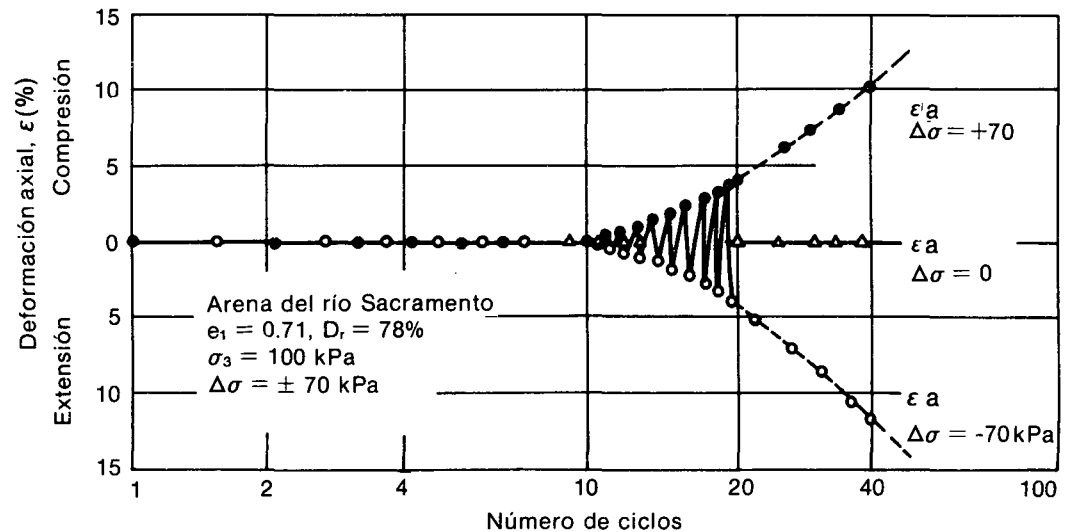


FIGURA 2.
Resultados típicos de ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras consolidadas isotrópicamente (Ref. 15)

La Figura 2 presenta resultados típicos de ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstruidas de una arena, a dos densidades relativas diferentes, las cuales corresponden a un estado contractivo (suelto) y dilatativo (denso), respectivamente. La densidad relativa es por supuesto un parámetro de primer orden indicativo de las tendencias al cambio de volumen debido a esfuerzos de corte. Es claro que a medida que aumenta la tendencia de la arena a contraerse, el proceso de acumulación de presión de poros será más rápido y en consecuencia el potencial de licuación bajo una serie dada de esfuerzos cíclicos será mayor. Por ejemplo, se puede observar que en los dos casos presentados en la Figura 2, la licuación, esto es, la condición de esfuerzo efectivo cero se desarrolló en aproximadamente 10 ciclos. Sin embargo, el esfuerzo desviador en el ensayo

sobre la muestra de arena suelta fue 39 kPa, mientras que para la arena densa dicho esfuerzo fue mucho mayor (70 kPa).

En ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras de arena suelta saturadas y consolidadas isotrópicamente, en general se observan los siguientes eventos (15, 16): durante los primeros ciclos de carga la deformación de la muestra es insignificante, aunque la presión de poros aumenta continuamente. Sin embargo, después de un cierto número de ciclos, la presión de poros aumenta súbitamente hasta un valor igual a la presión de cámara aplicada externamente a la muestra, la cual en este momento experimenta grandes deformaciones que aumentan en amplitud durante los ciclos de carga subsecuentes. Por otra parte, a medida que la densidad relativa aumenta, las deformaciones axiales se acumu-



lan a una tasa mucho menor con un número de ciclos crecientes, aún si la presión de poros alcanza un valor igual a la presión de cámara. Después de la ocurrencia de la licuación, la tasa de acumulación de deformaciones en muestras de arena densa puede inclusive disminuir y las deformaciones acumuladas eventualmente pueden alcanzar un valor límite, independientemente del número de ciclos con una amplitud de esfuerzo dada.

Es importante observar por ahora que durante el proceso de carga cíclica, la presión de poros puede llegar a ser igual a la presión de confinamiento, independientemente de la densidad relativa de la arena. Por otra parte, como se ilustra en la Figura 2, esta condición de esfuerzo efectivo cero siempre ocurre en el momento en que el esfuerzo desviador es cero, esto es, cuando la muestra queda sometida a un estado isotrópico de esfuerzos. Sin embargo, la presión de poros disminuye sustancialmente cuando se aplica ya sea la carga de compresión o la de extensión axial.

MECANISMOS DE ACUMULACION DE PRESION DE POROS

El comportamiento descrito en la sección anterior y la relación entre el proceso de acumulación de presión de poros y el desarrollo de deformaciones durante carga cíclica se pueden visualizar más claramente si los resultados de los ensayos cíclicos se presentan usando trayectorias de esfuerzos (8, 18), como se ilustra en la Figura 3.

Las muestras de arena suelta son contractivas y por lo tanto durante corte no drenado desarrollan presiones de poros positivas. En consecuencia, a medida que la presión de poros aumenta con el número de ciclos, la trayectoria de esfuerzos efectivos se mueve gradualmente hacia la izquierda (Figura 3a). La magnitud del incremento de presión de poros durante cada ciclo depende de la deformación volumétrica potencial (14), la cual está esencialmente asociada con el resbalamiento relativo entre los granos de arena. En consecuencia, esta deformación volumétrica potencial está determinada por una combina-

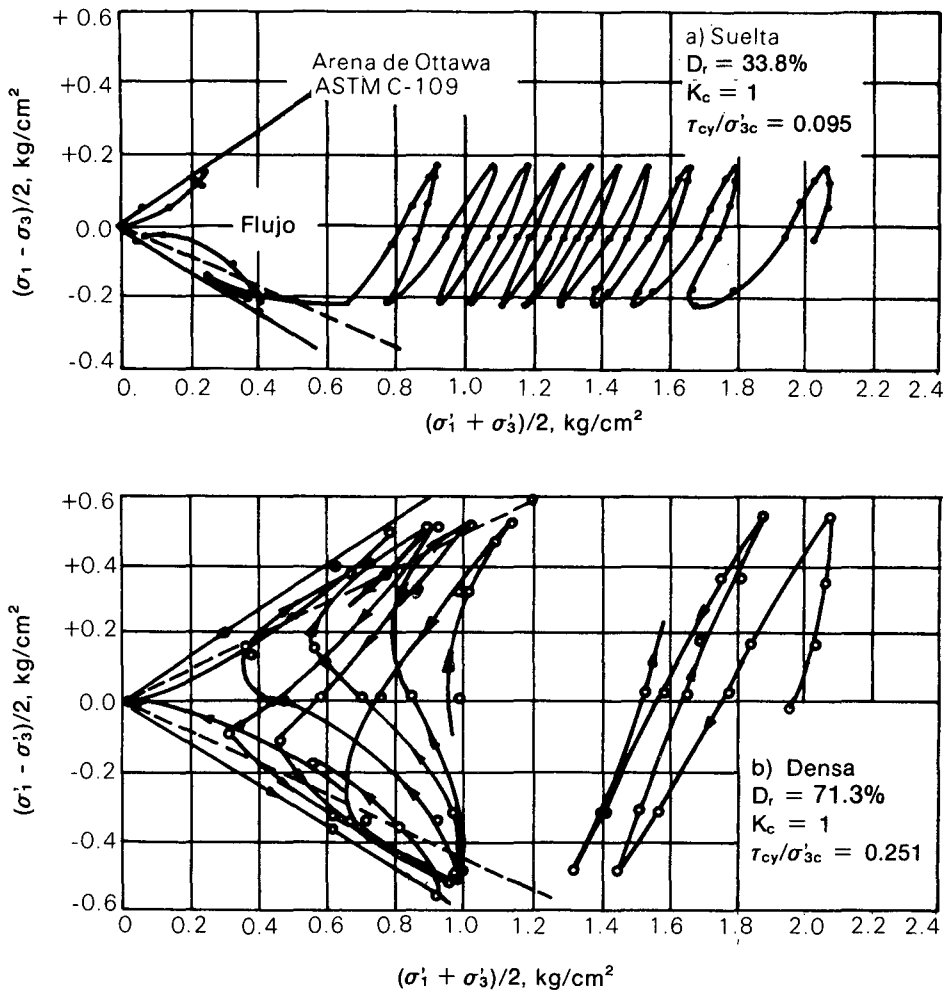


FIGURA 3. Trayectorias de esfuerzos efectivos típicos en ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras consolidadas isotrópicamente (Ref. 18).

ción de factores como la gradación y forma de las partículas, la densidad relativa, la fábrica inicial, el estado de esfuerzos, la historia de esfuerzos y deformaciones, etc., como se discutió previamente.

Es poco probable que la fábrica de arenas *in situ* sea tan uniforme como la fábrica de muestras reconstituidas mediante un procedimiento particular de laboratorio. Por el contrario, dicha fábrica puede estar caracterizada por la presencia de bolsas o grupos de partículas formando "huecos" o vacíos más grandes, que pueden ser estables bajo carga estática pero que serán más bien inestables cuando el esqueleto de la arena se somete a una serie de aplicaciones de esfuerzos de corte cíclicos (20). Deformaciones de corte muy pequeñas pueden ser suficientes para causar el colapso de algunos de estos grupos inestables (Figura 4a), lo cual causa un incremento aún mayor de la presión de poros bajo condiciones no drenadas. Los ciclos subsiguientes llevan a colapsos adicionales y entonces a un incremento continuo de la presión de poros. Durante este proceso se presenta generalmente el rompimiento de algunos granos, pero particularmente se produce un proceso de desgaste de los granos por rompimiento de las

asperezas en los puntos de contacto.

Sin embargo, el mecanismo de generación de presión de poros cambia drásticamente a niveles bajos del esfuerzo de confinamiento efectivo, como se observa en la Figura 3. Es bien conocido que las tendencias contractivas de muestras de arena suelta son menores a bajas presiones de confinamiento (7). Por tanto, una vez el esfuerzo efectivo llega a ser suficientemente bajo, la respuesta de la muestra cambia de contractiva a dilatativa al aumentar los esfuerzos de corte en cualquier dirección, a pesar de un aumento progresivo de la presión de poros existente al final de cada ciclo. Este cambio de comportamiento es evidente por el cambio en la forma de las trayectorias de esfuerzos en la Figura 3. Las tendencias dilatativas se deben a que a bajas presiones efectivas, los granos tienden a deslizarse y rodar (encaramarse) unos sobre otros (Figura 4b), lo cual produce una disminución en la presión de poros a volumen constante (11, 17, 20). Durante esta etapa se pueden inclusive crear localmente algunos vacíos grandes cerca de las partículas dilatantes. Al producirse la inversión en la dirección del movimiento de los granos, se genera un gran incremento en la presión de poros debido en parte al colapso de estos huecos inestables (20). El incremento en

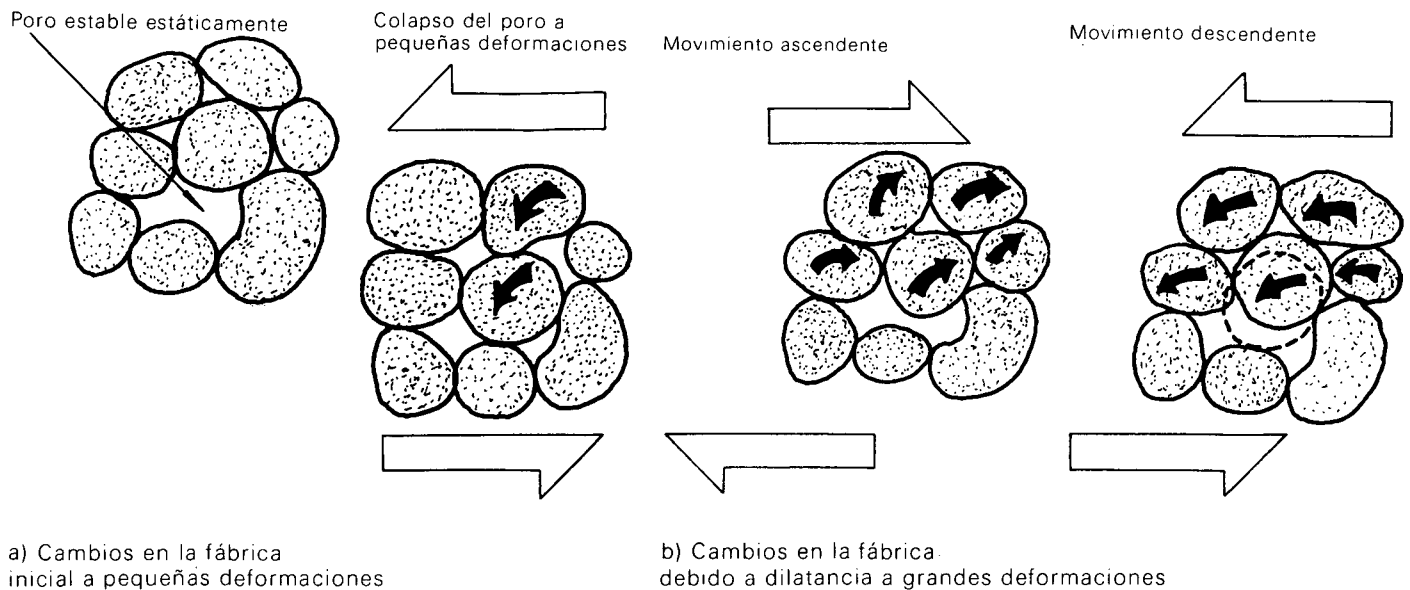


FIGURA 4. Cambios en la fábrica durante carga cíclica (adaptada de la Ref. 20).

presión de poros se puede asociar también con el hecho físico de que una vez se inicia la descarga, algunos de los granos en el esqueleto dilatado pueden empezar un movimiento descendente bajo la acción de las fuerzas normales, lo cual conduce a un incremento en la presión de poros (11). Por otra parte, es muy probable que al invertirse la dirección de corte, el número de contactos entre granos vecinos disminuya drásticamente. Entonces, la estructura de la arena tiende a colapsar produciendo un gran incremento en la presión de poros. Como resultado de estos mecanismos, la presión de poros disminuye durante las etapas de carga y aumenta drásticamente durante las etapas de descarga, esto es, a medida que el esfuerzo de corte disminuye a cero. En consecuencia, la trayectoria de esfuerzos efectivos se mueve hacia el origen del diagrama de esfuerzos (esfuerzo efectivo cero) durante las etapas de descarga y se aleja del origen durante las etapas de carga (Figura 3).

De la discusión anterior es evidente que el arreglo inicial de las partículas o fábrica puede cambiar drásticamente en el curso de la carga cíclica. La fábrica inicial controla la respuesta de presión de poros durante los primeros ciclos de carga (Figura 4a), pero a medida que el número de ciclos aumenta dicha respuesta refleja más bien los cambios en fábrica inducidos por cada ciclo (11, 17, 20). La nueva fábrica que se crea a medida que el número de ciclos aumenta depende de la magnitud de las deformaciones de corte que se desarrollan en cada ciclo. Estos cambios en la fábrica son claramente evidentes una vez se observa dilatación (Figura 4b).

A medida que la densidad relativa aumenta, el comportamiento de las muestras de arena es más dilatante inclusive a niveles de confina-

miento relativamente altos (Figura 3b). En consecuencia, la acumulación de presión de poros durante un proceso de carga cíclica resulta principalmente de la alternación de ciclos de dilatación al aumentar los esfuerzos de corte en cualquier dirección (los granos se encaraman unos sobre otros) y contracción al invertirse la dirección del movimiento (pérdida de contactos y movimiento descendente de los granos), lo cual conduce a un aumento progresivo de la presión de poros. Es bien conocido que arenas densas son ligeramente contractivas bajo vibraciones de pequeña amplitud. El comportamiento contractivo es amplificado por el hecho físico de una inversión en la dirección de corte. En consecuencia, cada vez que el estado de esfuerzos en la muestra se acerca a una condición isotrópica, la muestra desarrolla una respuesta contractiva dentro de un pequeño rango de esfuerzos de corte y se genera un cierto incremento en la presión de poros. Debido al efecto acumulado de varios ciclos, eventualmente se desarrolla una condición de esfuerzo efectivo cero.

POTENCIAL DE DEFORMACIONES

Una vez el esfuerzo efectivo disminuye a cero, la resistencia al corte de suelos no cohesivos es en principio cero. En consecuencia, deberían ocurrir grandes deformaciones al aplicar un pequeño esfuerzo cortante en la dirección contraria de carga inmediatamente después de la ocurrencia de la condición de esfuerzo efectivo cero.

Sin embargo, las deformaciones reales que exhibe una muestra dependen de la densidad relativa (5, 16). Las arenas muy sueltas exhiben deformaciones casi ilimitadas bajo esfuerzos de corte esencialmente nulos. En términos prácti-

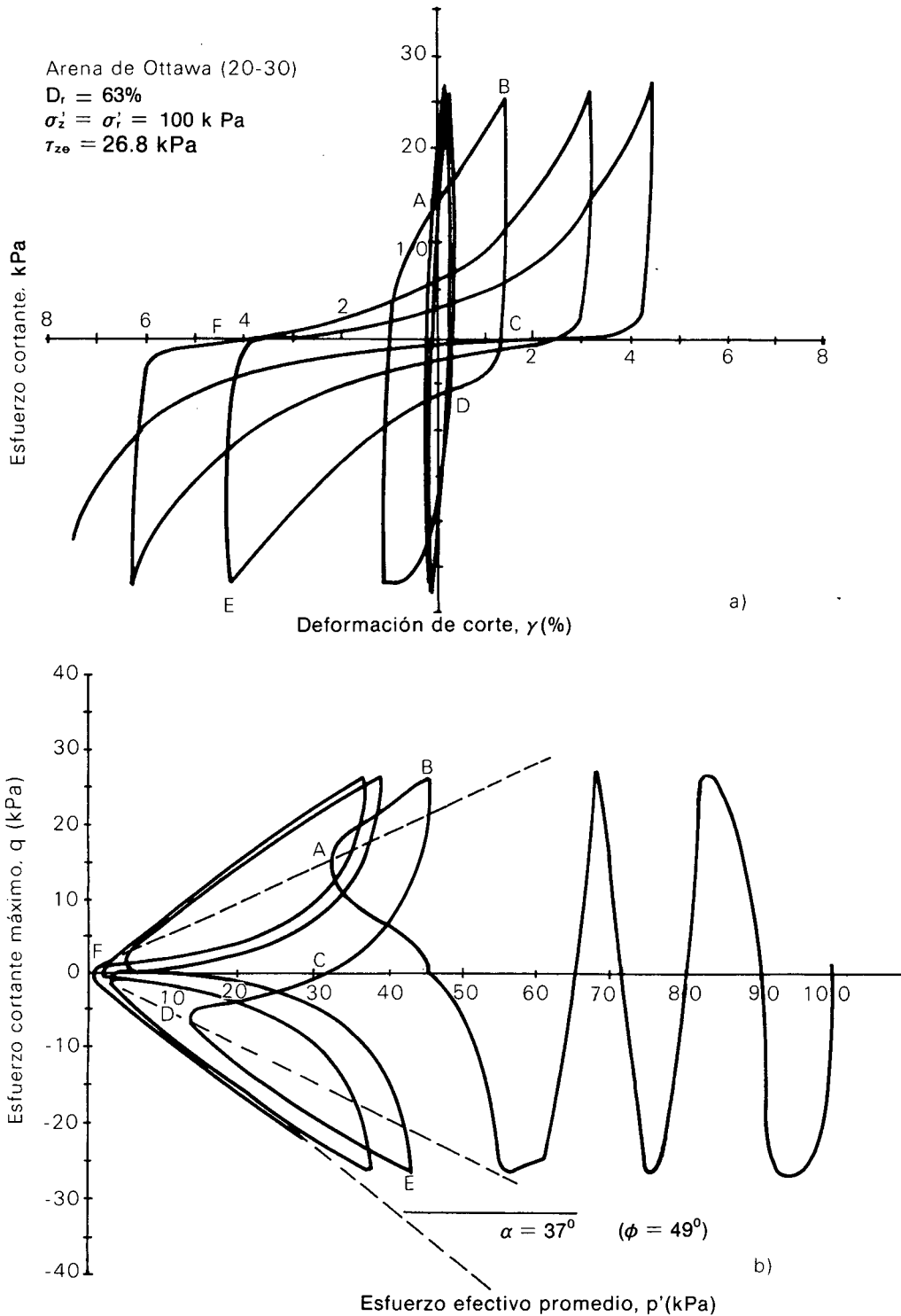


FIGURA 5. Ensayo de corte torsional cíclico sobre una muestra de arena de densidad media (Ref. 1).

cos, la muestra se licúa puesto que no exhibe resistencia alguna sobre un límite amplio de deformaciones (8, 10, 15). Por otra parte, como se discutió previamente, las deformaciones correspondientes de arenas densas pueden ser de magnitud limitada.

Debido al proceso de deformación continua, es muy improbable que la muestra de arena pueda permanecer indefinidamente en un estado de licuación, esto es, con un número mínimo de contactos entre granos vecinos. Por el contrario, después de cierta deformación, inevitablemente

se desarrollan nuevos puntos de contacto, permitiendo dilatación del esqueleto de la arena, puesto que la presión de confinamiento es muy baja. En consecuencia, el proceso de deformación continua es desacelerado debido a la disminución de presión de poros causada por la dilatación y el sistema revierte gradualmente a un estado sólido (16, 20). Es ahora evidente que el límite de deformaciones para el cual la muestra permanece en estado de "licuación" depende de la densidad relativa de la arena. Si la carga cíclica continúa, la muestra experimenta ciclos repetidos de licuación, deformación con-

tinua y rigidización o solidificación debido a la dilatancia, con la trayectoria de esfuerzos efectivos desplazándose hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la envolvente de falla durante las etapas de carga y aproximándose al origen durante las etapas de descarga (Figura 3). Este comportamiento se puede visualizar más claramente observando la relación entre las curvas esfuerzo-deformación y la correspondiente trayectoria de esfuerzos, como se ilustra en la Figura 5, la cual presenta los resultados de un ensayo torsional cíclico ejecutado por el autor sobre una muestra de arena de Ottawa consolidada isotrópicamente (1). En la Figura 5a se observan claramente las etapas de licuación (grandes deformaciones al invertirse el signo de los esfuerzos de corte) seguidas por etapas de rigidización, durante las cuales la trayectoria de esfuerzos se aleja del origen del diagrama a lo largo de la trayectoria de esfuerzos (Figura 5b). Los resultados de varias investigaciones han permitido observar que la envolvente de resistencia durante carga cíclica corresponde a la misma línea de falla determinada a grandes deformaciones en ensayos monotónicos (8, 18). Es también importante observar que el estado de esfuerzo efectivo cero se presenta en el momento que la trayectoria de esfuerzos pasa por el estado hidrostático (Figura 5b), puesto que las líneas de falla para un material no cohesivo pasan a través del origen. En consecuencia, la licuación sólo puede ocurrir en el momento en que el esfuerzo principal mayor y menor son iguales.

El desarrollo de la primera condición de esfuerzo efectivo cero se denomina comúnmente "licuación inicial" (8, 10, 14), la cual en arenas muy

seltas está asociada con el desarrollo de deformaciones muy grandes. Sin embargo, en arenas densas, pequeñas deformaciones de corte pueden ser suficientes para reconstruir la mayor parte de los contactos entre granos (16, 20), lo cual permite dilatancia y la consecuente reducción en la presión de poros. En esta forma la muestra resiste los esfuerzos aplicados sin mayores deformaciones, independientemente del número de ciclos después de la licuación inicial. Entonces, la "licuación" de arenas densas es solo un estado momentáneo que no implica inestabilidad alguna. Es claro entonces que las deformaciones asociadas con la licuación disminuyen a medida que la densidad relativa aumenta, siendo insignificantes a densidades relativas altas, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 6. Esta curva representa conceptualmente el potencial de deformación después de la ocurrencia de licuación (5, 14). Estas deformaciones límite son función no solo de la densidad relativa, sino también del número de ciclos, del tipo de arena y del nivel de esfuerzos de confinamiento. Algunos investigadores llaman "movilidad cíclica" (4, 8, 14) al desarrollo de una condición momentánea de esfuerzo efectivo cero en arenas densas, el cual implica un potencial de deformación finito, para diferenciar este comportamiento del de arenas sueltas, las cuales pueden experimentar deformaciones casi ilimitadas al licuarse (Figura 6).

LICUACION VS. FLUJO DE SUELOS GRANULARES

La estructura de suelos granulares en estado suelto es metaestable, esto es susceptible a colapsar. En un esqueleto colapsable, aun

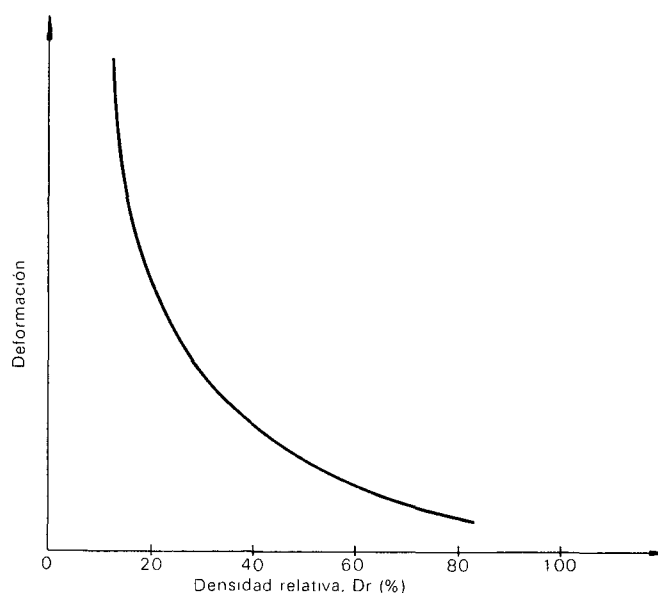


FIGURA 6. Potencial de deformación debido a la licuación (esquemático).

pequeñas deformaciones de corte pueden ser suficientes para producir una reorganización súbita de los granos, la cual puede implicar una disminución del número de contactos entre granos vecinos. Al colapsar la estructura, la carga es transferida súbitamente del esqueleto al agua que llena los vacíos, resultando en un gran incremento en la presión de poros. Como resultado de estos dos mecanismos, a saber: pérdida de contactos y aumento en la presión de poros, la resistencia al corte disminuye drástica-

mente y entonces la muestra experimenta grandes deformaciones en un periodo de tiempo muy corto. El fenómeno no se puede evitar ni siquiera reduciendo la tasa de carga. En consecuencia, existe una analogía clara entre el comportamiento "sensible" de arenas sueltas saturadas y el de arcillas fluidas (2, 3, 6). Debido al proceso de deformación, los granos se orientan formando una nueva fábrica que ofrece una mínima resistencia al corte y entonces la masa alcanza un estado de deformación conti-

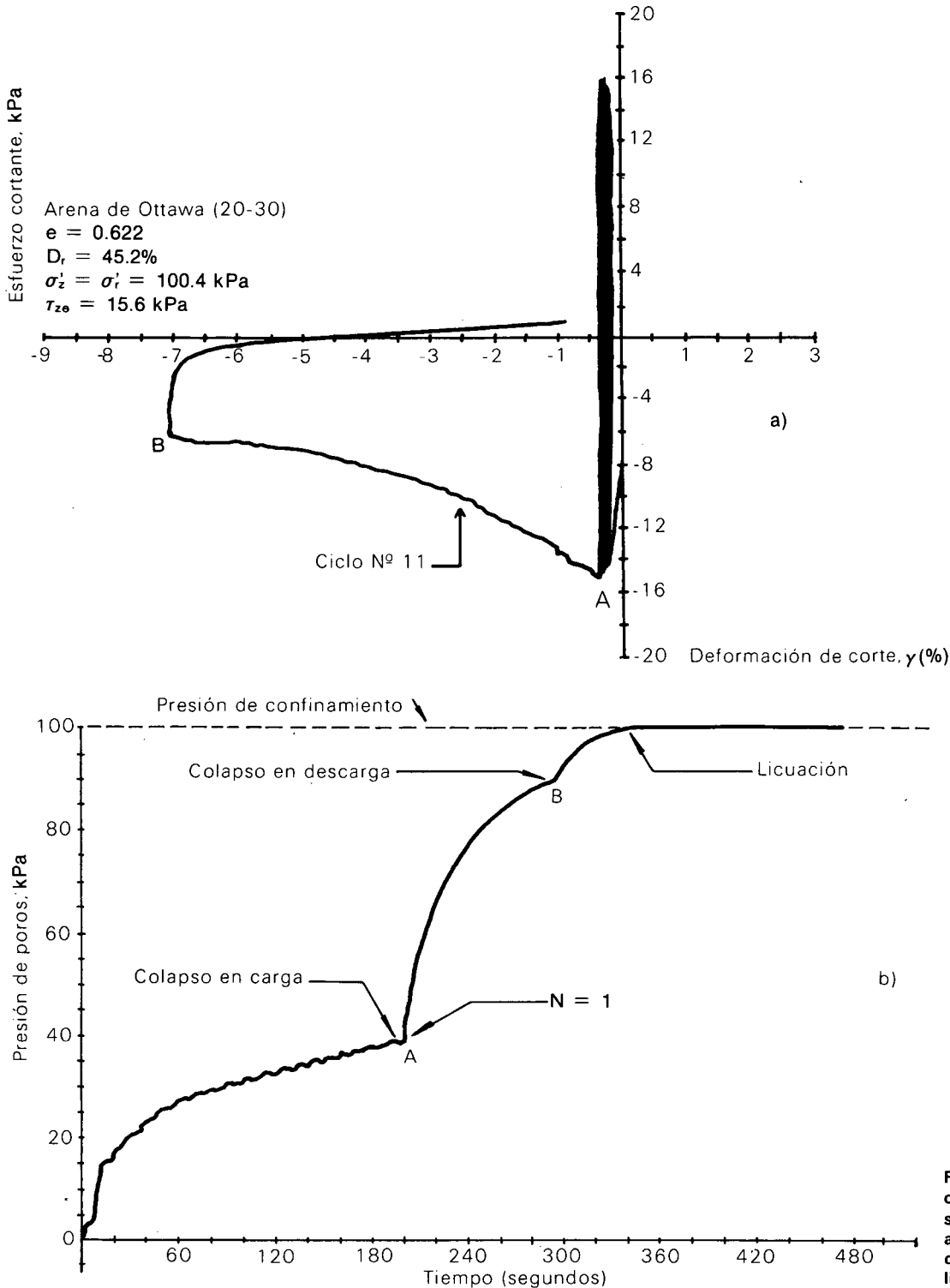


FIGURA 7. Ensayo de corte torsional cíclico sobre una muestra de arena que experimenta deformación de flujo y licuación (Ref. 1).

na (12, 13), semejando el flujo de un líquido viscoso (3). El esfuerzo cortante necesario para continuar la deformación eventualmente alcanza un valor constante. Sin embargo, es importante notar que si bien la resistencia final o residual puede ser muy baja, es diferente de cero. Este tipo de deformación se denomina "flujo" o estado de deformación continua. La resistencia de la arena en el estado de deformación continua depende entre otros factores de las características de los granos y de la relación de vacíos (4, 12, 13).

Es claro que la respuesta "sensible" de arenas sueltas y la consecuente pérdida de resistencia asociada con el rompimiento súbito de la estructura, puede ocurrir en cualquier etapa de carga (aumento en el esfuerzo cortante) en el curso de la carga cíclica, como resultado del aumento continuo de la presión de poros y de la acumulación de deformaciones (18, 19). Este comportamiento se ilustra en la Figura 7, la cual presenta la respuesta esfuerzo-deformación de una muestra de arena suelta ($D_r = 45\%$), la cual fue sometida a carga cíclica no drenada usando un aparato de corte torsional (1). La deformación de corte acumulada al final de los diez primeros ciclos es muy pequeña (Figura 7a), mientras que la presión de poros aumentó progresivamente (Figura 7b). Durante la primera etapa de carga del ciclo número 11, la muestra "colapsa" (punto A). El colapso de la estructura se manifiesta en un gran incremento en la presión de poros y en una acentuada reducción en la resistencia a medida que la deformación aumenta. Después de una deformación unidireccional de aproximadamente 7%, la dirección de rotación fue invertida súbitamente en el punto B. Al revertir la dirección de rotación, la muestra experimenta un segundo colapso que se refleja en un incremento adicional en la presión de poros, la cual alcanza un valor igual a la presión de confinamiento, determinando así la ocurrencia de la licuación. Se observa que en este punto la curva esfuerzo-deformación se hace horizontal reflejando la pérdida casi total de resistencia.

En resumen, los resultados en la Figura 7 permiten señalar las siguientes etapas en el proceso de generación de presión de poros:

1. La acumulación de presión de poros durante los ciclos iniciales debido a la tendencia contractiva, la cual prosigue a una tasa decreciente a medida que la fábrica se hace más estable debido a los ciclos previos.
2. Un aumento drástico en la presión de poros debido al colapso de la estructura durante una etapa de carga (aumento en el esfuerzo cortante), el cual también prosigue a una tasa decreciente, y
3. Un aumento adicional en la presión de poros

cuando la estructura colapsa de nuevo como resultado de inversiones súbitas en la dirección de movimiento de los granos.

CONCLUSIONES

La licuación de suelos granulares durante un sismo se produce cuando el esfuerzo efectivo existente en el esqueleto del suelo se reduce a cero, como consecuencia del aumento gradual de la presión de poros. En el estado de licuación el número de contactos entre granos vecinos es mínimo y en consecuencia, a densidades relativas bajas, el suelo puede experimentar grandes deformaciones durante incrementos subsecuentes en los esfuerzos de corte. Sin embargo, las deformaciones asociadas con la licuación de suelos granulares muy densos son insignificantes (Figura 6).

Por otra parte, los suelos granulares sueltos también pueden exhibir un comportamiento sensible (pérdida de resistencia con deformación), bajo carga cíclica en condiciones no drenadas, aun sin el desarrollo de un estado de esfuerzo efectivo cero. En esta condición, el suelo puede alcanzar un estado de deformación continua bajo esfuerzos de corte en general muy bajos. Este tipo de deformación se asemeja al flujo de un líquido viscoso. Es evidente que si los esfuerzos de corte *in situ* son mayores que la resistencia correspondiente al estado de deformación continua, incrementos de esfuerzos cíclicos relativamente pequeños pueden ser suficientes para provocar la iniciación de un flujo del suelo, la cual tendrá consecuencias catastróficas bajo condiciones de esfuerzo controlado, como cerca de la cara de un talud.

En resumen, las grandes deformaciones de suelos granulares sueltos saturados durante un sismo se pueden deber a un fenómeno de flujo cuando los esfuerzos aplicados son mayores que la resistencia residual o última, o a la licuación del depósito o a una combinación de los dos mecanismos. En otras palabras, la estructura, de suelos granulares sueltos es susceptible a colapsar (reorganización súbita de los granos que implica pérdida de contactos) ya sea porque los esfuerzos cortantes alcanzan un valor límite que el esqueleto no puede soportar, o como resultado de inversiones súbitas en la dirección de desplazamiento de los granos del suelo a niveles de confinamiento bajos. Bajo condiciones no drenadas ambos tipos de "colapso" resultan en un aumento drástico de la presión de poros y una disminución correspondiente en la resistencia. El primer mecanismo de colapso puede conducir a un proceso de deformación continua (flujo), mientras que el segundo conduce a la licuación del depósito, como se discute en este artículo.

REFERENCIAS

1. ALARCON-GUZMAN, A.: Cyclic Stress-Strain and Liquefaction Characteristics of Sands. Thesis, Submitted to the Faculty of Purdue University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, West Lafayette, IN, U.S.A., August, 1986.
2. BISHOP, A. W.: Shear Strength Parameters for Undisturbed and Remoulded Soil Specimens. Stress-Strain Behavior of Soils. Edited by R.H.G. Parry, 1972. Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University, pp. 3-58, March 29-31, 1971.
3. CASTRO, G.: Liquefaction of Sands. Harvard Soil Mechanics Series No. 81, Ph. D. Dissertation, Harvard University, Cambridge, Mass., 1969.
4. CASTRO, G. and POULOS, S. J.: Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, pp. 501-516, June, 1977.
5. DE ALBA, P., SEED, H. B. and CHAN, C. K.: Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT9, pp. 909-927, September, 1976.
6. Hanzawa, H.: Undrained Strength and Stability of a Quick Sand. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 20, No. 2, pp. 17-29, June, 1980.
7. HOLTZ, R. D. and KOVACS, W.D.: An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., Eaglewood Cliffs, N.J., 1981.
8. ISHIHARA, K.: Stability of Natural Deposits during Earth quakes. Theme Lecture No. 7. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 321-376, San Francisco, 1985.
9. LADD, C.C., FOOTE, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F. and POULOS, H. G.: Stress-Deformation and Strength Characteristics. SAR Report, Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 421-494, Tokyo, 1977.
10. LEE, K. L. and SEED, H.B.: Cyclic Stress Conditions Causing Liquefaction of Sand. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM1, pp. 47-70, January, 1967.
11. NEMAT-NASSER, S. and TAKAHASHI, K.: Liquefaction and Fabric of Sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 9, pp. 1,291-1306, September, 1984.
12. POULOS, S. J.: The Steady-State of Deformation. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT5, pp. 553-562, May, 1981.
13. POULOS, S.J., CASTRO, G. and FRANCE, J.W.: Liquefaction Evaluation Procedure. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 6, pp. 772-792, June, 1985.
14. SEED, H.B.: Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105 No. GT2, pp. 201-255, February, 1979.
15. SEED, H.B. and LEE K.L.: Liquefaction of Saturated Sands, during Cyclic Loading. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92 No. SM6, pp. 105-134, November, 1966.
16. SELIG, E.T. and CHANG, C.S.: Soil Failure Modes in Undrained Cyclic Loading. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT5, pp. 539-551, May, 1981.
17. TOBITA, Y.: Effects of Fabric Change on Deformation Characteristics of Sand in Cyclic Shearing. Advances in the Mechanics and the Flow of Granular Materials, Mohsen Shahinpoor, Editor, Trans. Tech. Publications, Vol. 2, pp. 885-901, 1983.
18. VAID, Y.P. and CHERN, J.C.: Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 23, No. 1, pp. 47-60, March, 1983.
19. VAID, Y.P. and CHERN, J.C.: Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands. Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, ASCE Annual Convention, pp. 120-147, Detroit, October 21-25, 1985.
20. YOUNG, T.L.: Packing changes and Liquefaction Susceptibility. Technical Note. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT8, pp. 918-923, August, 1977.