

BOLETIN 7

INCEMMET
BIENES CULTURALES

Estimados amigos

34310 04948



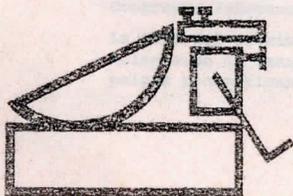
Altamente honrado por dirigirme nuevamente a Uds. en este Séptimo Boletín, que es la continuación de los que emitimos antes y después de la Conferencia Panamericana que con tanto éxito realizamos en 1979, para informarles acerca de las futuras actividades de la Junta Directiva que agrupa a los ingenieros de suelos peruanos así como también de las labores que la familia mundial de la Mecánica de Suelos ha programado para este año 1982.

Al mismo tiempo damos comienzo también a la publicación de un artículo técnico seleccionado de sumo interés para la especialidad esperando divulgar otros en los futuros Boletines a fin de mantenernos informados de los avances más recientes de la ingeniería geotécnica.

Con un saludo muy cordial y nuestra reiterada invocación a participar en las actividades de nuestro Comité, quedo de Uds.

Muy atentamente,

Arnaldo Carrillo Gil
Presidente



COMITE PERUANO DE MECANICA DE SUELOS
FUNDACIONES Y MECANICA DE ROCAS

Caracterización del fenómeno

PRIMERA PARTE - BOLETIN NRO. 7

SEGUNDA PARTE - BOLETIN NRO. 8

RESUMEN

El fenómeno de la licuefacción de suelos saturados sin cohesión ha sido ampliamente estudiado en Dinámica de Suelos durante los últimos veinte años. Si bien los primeros estudios fueron puramente experimentales —a fin de comprender mejor las causas determinantes de la licuefacción— últimamente se ha orientado la investigación hacia la elaboración de modelos numéricos, para predecir el comportamiento in situ de obras de tierra en ambientes sísmicos. Paralelamente se ha registrado un avance considerable en la recopilación de información de campo y en el desarrollo de ensayos de laboratorio a gran escala, que han permitido contrastar las hipótesis de partida de dichos modelos. En este artículo se presenta la dinámica histórica del concepto de licuefacción, a nivel de análisis de los factores que intervienen en el fenómeno, relegándose la descripción de las técnicas de predicción a una publicación posterior.

1.- INTRODUCCION

De manera general el Comité de Dinámica de Suelos de la American Society of Civil Engineers (1978) ha definido la licuefacción como el proceso de transformación de una sustancia en un líquido. Para un medio pulverulento saturado esta transformación tiene lugar por aumento de la presión intersticial de la fase líquida, ya sea como resultado de una carga monótona estática, un impulso, o una carga dinámica alternada.

El estudio sistemático de la licuefacción de suelos ha recibido gran atención el campo de la Ingeniería Sísmica por espacio de las dos últimas décadas, debido a los catastróficos terremotos ocurridos durante ese tiempo en diversas partes del mundo (Chile, 1960; Niigata, 1964; Alaska, 1964; Caracas, 1967; Managua, 1972; Guatemala, 1976; Montenegro, 1979; etc.), en muchos de los cuales hubo licuefacción. No obstante, numerosas ambigüedades en la definición del vocablo "licuefacción",

y un frecuente confusionismo entre el fenómeno en sí y sus consecuencias, han motivado una indeseable falta de comunicación entre los especialistas en la materia.

La exposición que se hace, pretende dar una visión resumida, forzosamente incompleta, del estado actual de los conocimientos sobre la licuefacción, aplicados fundamentalmente al caso específico de terrenos horizontales sin estructuras cimentadas sobre ellos (campo libre). Este caso es el más sencillo de cuantos pueden presentarse —ya que es susceptible de ser analizado unidimensionalmente— pero también es el más crítico, pues en todos los demás casos (taludes, cimentaciones de edificios, etc.) aparecen tensiones iniciales de corte (Figura 1) que tienen en general un efecto estabilizador y tienden a disminuir la velocidad de generación de las presiones intersticiales.

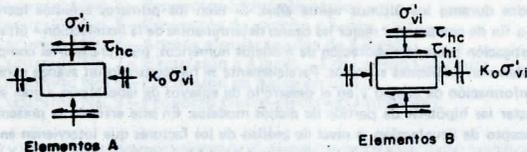
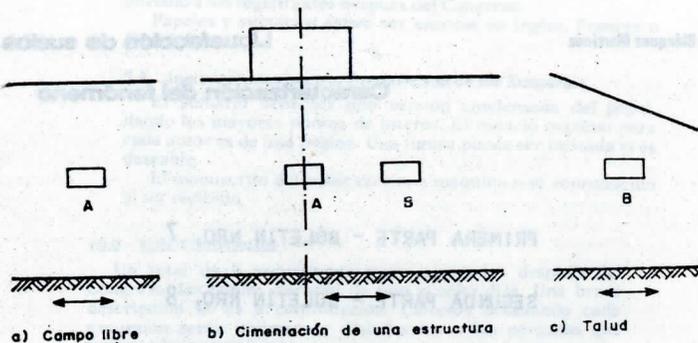


Fig. 1.— Estado tensional de elementos de suelo in situ en distintas condiciones de carga cíclica horizontal.

El trabajo se divide en dos partes. En esta primera parte (A) se procede a describir el fenómeno y analizar los factores que lo determinan, para terminar dando una serie de criterios útiles a nivel de diseño. En la segunda parte (B) se expondrán los métodos de que dispone el ingeniero para predecir cuantitativamente la licuefacción de depósitos de suelo.

2.— TIPOS DE LICUEFACCION Y SUS CAUSAS

El concepto de licuefacción ha sido, y es todavía, uno de los más controvertidos en Mecánica de Suelos, como lo prueba su evolución histórica. El primer paso para entender este fenómeno fue dado por TERZAGHI (1956), al introducir el concepto de "estructura metaestable del suelo" para explicar la mecánica del colapso de determinados taludes submarinos de origen eólico (Figura 2). La estructura metaestable se alcanza al sedimentarse partículas finas de suelo no cohesivo sobre una

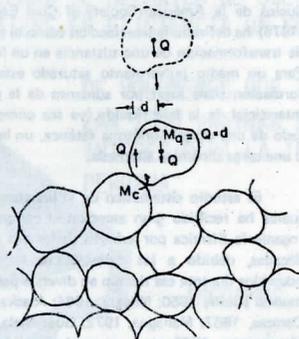


Fig. 2.— Génesis de la estructura metaestable (TERZAGHI, 1956).

estructura preexistente con un alto índice de huecos. El momento resistente, M_c (independiente del

tamaño del grano), producido por adhesión al establecerse el primer contacto de la partícula con el sedimento, impide que aquella ruede o se deslice hacia una posición estable, como requeriría el momento de vuelco, $M_a = Q \cdot d$ (que decrece con la cuarta potencia del tamaño del grano). Por consiguiente, en sedimentos de partículas muy finas, la probabilidad de que las partículas adopten posiciones estables una vez depositadas es muy pequeña y un pequeño movimiento es suficiente para que la estructura metaestable colapse.

Aún reconociendo la utilidad del concepto de estructura metaestable para explicar determinados fenómenos de licuefacción, tales como los producidos por cargas impulsivas en mesas vibrantes (FLORIN e IVANOV, 1961) y en cierta medida los de filtración bajo gradiente hidráulico crítico ("arenas movedizas"; MASLOV, 1957), hay que tener presente que la estructura metaestable no siempre se requiere para producir la licuefacción bajo carga progresiva (no impulsiva), en la que el esfuerzo cortante juega un papel fundamental. Dos casos pueden considerarse dentro de este tipo de carga: carga monótona y carga cíclica.

El caso de carga monótona estática ha sido estudiado en profundidad por A. CASAGRANDE (1936), en relación con el fallo de la presa de Fort Pack. Casagrande comprobó que las arenas densas tienden a aumentar de volumen bajo esfuerzo cortante, mientras que lo contrario ocurre con las arenas sueltas (efecto de dilatación). Para un tipo de arena dado, siempre existirá por tanto un cierto valor del índice de huecos, denominado "índice de huecos crítico", para el que no se produzcan cambios de volumen en el proceso de deformación. En consecuencia, si se supone que el fenómeno tiene lugar sin drenaje (porque el agua no tiene tiempo para escapar del suelo), sólo aquellos suelos con un índice de huecos infracrítico se compactarán durante el proceso, aumentando la presión intersticial y disminuyendo correlativamente la presión efectiva hasta llegar al valor límite de rotura, tras lo cual el terreno desliza, alcanzándose finalmente el valor residual de la presión efectiva (distinto de cero). El deslizamiento cesa cuando la disminución de pendiente del talud hace que la tensión cortante residual sea inferior a la resistencia por viscosidad de la masa deslizante.

Si bien el índice de huecos crítico explica satisfactoriamente determinados casos de rotura de suelos por carga estática, su extensión a fenómenos dinámicos es discutible, habida cuenta además de

su variabilidad con la presión de confinamiento (decrece al aumentar ésta). En 1966, con el advenimiento del ensayo triaxial cíclico, H.B. Seed y K.L. Lee cuestionan la aplicabilidad del concepto de índice de huecos crítico a los casos de carga dinámica, al demostrar experimentalmente que podía obtenerse con la misma excitación licuefacción en arenas densas (supracríticas) y no en arenas sueltas (infracríticas). La explicación de este hecho fue dada por el propio CASAGRANDE (1971), al señalar que Seed y Lee utilizaban el término licuefacción para denominar un fenómeno totalmente distinto, como se analiza en el apartado siguiente.

3.- LICUEFACCION Y MOVILIDAD CICLICA

Según Casagrande, lo observado por Lee en sus ensayos no era la licuefacción, sino la MOVILIDAD CICLICA de la arena densa, caracterizada por un estado de anulación de la presión efectiva con limitación de la deformación posterior del suelo (debido a la dilatación positiva de éste). La diferencia entre los dos fenómenos se indica esquemáticamente en la Figura 3. En dicha figura puede verse que, estrictamente, el concepto de estado crítico no es aplicable en Dinámica de Suelos, ya que implica constancia de volumen y de resistencia (residual) para una deformación continua del suelo, mientras que las vibraciones producen cambios, ya sea en la presión efectiva (licuefacción) o en el índice de huecos (densificación) del material.

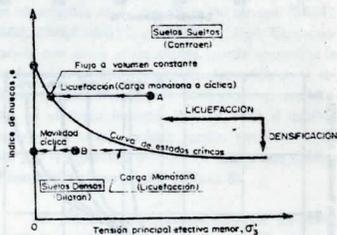


Fig. 3.- Licuefacción y movilidad cíclica de la arena saturada sin drenaje esquematizadas en un diagrama de estado (CASTRO y POLLOS, 1977).

Recientemente SEED (1976) ha sugerido sustituir el término "movilidad cíclica" por el de

"licuefacción con deformación limitada". Esta propuesta se basa en los resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo por DE ALBA et al. (1975), que se muestran en la Figura 4. Se comprueba que, para densidades relativas inferiores al 40 por ciento, la aplicación de la carga cíclica produce una deformación ilimitada del suelo, no ocurriendo así para arenas más densas. En este último caso, con independencia del nivel de tensión cíclica aplicado, a menos que se supere la resistencia sin drenaje de la arena en los ciclos de carga, la deformación tangencial del suelo tiende a un valor constante que decrece fuertemente con la densidad relativa. Quiere esto decir que, para grandes deformaciones, la dilatación de la arena detiene el flujo de ésta, tanto si se llega a anular transitoriamente la presión efectiva como si no.

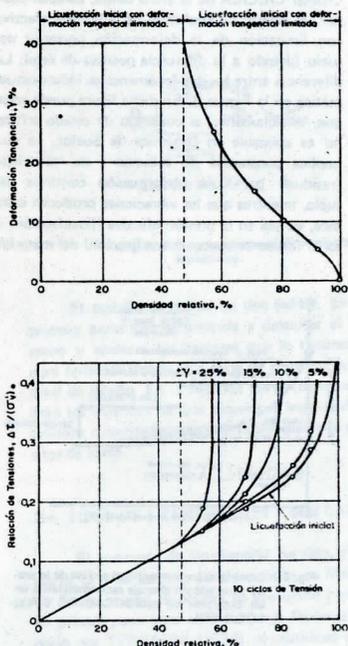


Fig. 4.— Influencia de la densidad relativa sobre la deformación tangencial máxima de la arena en licuefacción. Ensayos de corte simple a gran escala (DE ALBA, CHAN y SEED, 1975).

Para resaltar la importancia que tiene distinguir claramente estos dos fenómenos, GHABOUSSI y WILSON (1973) recomiendan usar distinta nomenclatura para las dos etapas bien diferenciadas de que consta todo proceso de licuefacción. En la primera etapa (*prelicuefacción*) el suelo experimenta una reducción progresiva de sus características resistentes acompañada de deformaciones elásticas y plásticas, recuperables o no. Una vez alcanzado el punto de licuefacción inicial (presión efectiva = 0) se entra en la etapa de *postlicuefacción*, caracterizada por un cambio irreversible de la naturaleza del suelo, que pasa de ser un medio granular saturado de agua a convertirse en un fluido viscoso. El hecho de alcanzarse el punto de licuefacción inicial no implica nada sobre la deformación posterior del material. Esta puede ser lim-

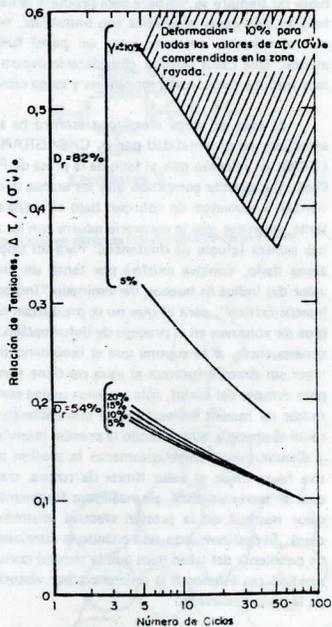


Fig. 5.— Relación entre el parámetro tensional $\Delta T / (\sigma'_v)$ y el número de ciclos para la licuefacción inicial a distintos niveles de deformación tangencial máxima (DE ALBA, CHAN y SEED, 1975).

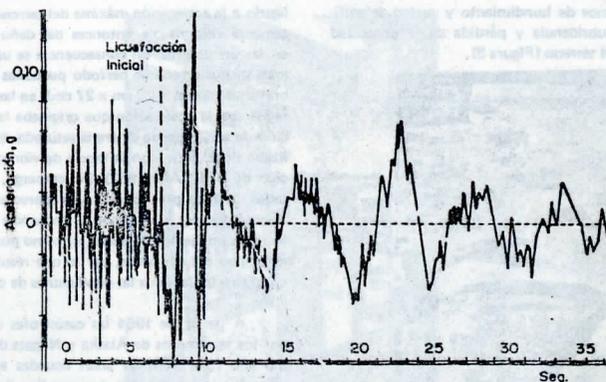


Fig. 6.— Acelerograma medido en Kawagishi-Chao, Niigata, 16-VI-1964 (AMBRASEYS, 1973).

tada (concepto de "licuefacción parcial" de Seed) o ilimitada ("licuefacción completa"), según que la dilatación sea suficiente para detener el flujo o, por el contrario, éste continúe hasta que la tensión cortante aplicada sea menor que la resistencia por viscosidad del material licuado, respectivamente. Precisamente es en esta fase del fenómeno donde la densidad relativa juega un papel más importante, como se deduce de la inspección de la Figura 5, que contempla los efectos de un aumento en el cociente tensional:

(1)

$$\frac{\text{tensión cortante que produce la licuefacción}}{\text{tensión vertical efectiva que resiste la licuefacción}} = \frac{\Delta \tau}{(\sigma'_v)_0}$$

sobre una arena densa ($D_r = 82$ por ciento) y una suelta ($D_r = 54$ por ciento). En el primer caso, para una ligera variación de $\Delta \tau / (\sigma'_v)_0$ la deformación tangencial límite pasará de valer ± 5 por ciento a valer ± 6 por ciento a lo sumo, mientras que la variación es de ± 5 por ciento a ± 20 por ciento en la arena suelta, lo que justifica el tratamiento de la licuefacción de arenas sueltas como un fenómeno de inestabilidad cíclica del suelo.

El estudio de las deformaciones de la arena licuada es una cuestión de vital importancia para determinar los movimientos permanentes del terreno sometido a licuefacción. Los procesos de consolidación y estabilización del material son los

responsables del hundimiento y vuelco de estructuras ubicadas en arena licuada, ya que ésta se comporta como un líquido cuya viscosidad inicial puede determinarse experimentalmente (YEN, 1967). De hecho, la licuefacción a una cierta profundidad de un depósito horizontal de arena no entraña en sí peligro alguno, ya que mientras tiene lugar el terremoto un estrato de arena licuada actúa como un aislador que impide la transmisión de las ondas de corte desde los estratos inferiores a las estructuras cimentadas en la superficie del terreno (SEED, 1963; AMBRASEYS y SARMA, 1969). En consonancia con estas afirmaciones puede apuntarse la modulación en alta frecuencia observada en la zona de postlicuefacción de acelerogramas registrados en el suelo licuado, que se debe al cambio introducido en el período fundamental del depósito por la superficie de discontinuidad que supone el material en licuefacción (Figura 6).

Por contra, es frecuente observar en zonas donde ha habido licuefacción la eyección de agua mezclada con arena bastantes segundos después de cesar el terremoto (40 seg. en Niigata), quedando el terreno sembrado de pequeños cráteres (Figura 7). Este fenómeno se debe a la expulsión en forma violenta del exceso de presión intersticial del terreno, por consolidación de éste; el agua en su flujo ascendente disminuye la presión efectiva del suelo situado encima, haciendo posible la extensión de la licuefacción a zonas más superficiales del depósito. En última instancia este proceso es el causante de

los fenómenos de hundimiento y vuelco de edificios, por subsidencia y pérdida de la capacidad portante del terreno (Figura 8).



Fig. 7.— Pequeños cráteres formados al salir a presión el agua intersticial procedente de la arena licuada. Terremoto de Niigata, Japón (16-V-1964).

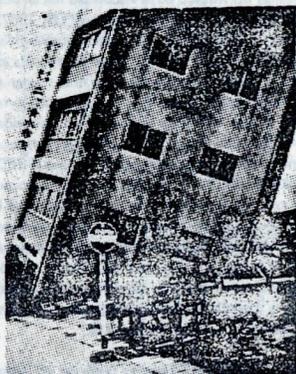


Fig. 8.— Vuelco de un edificio por licuefacción del suelo de la cimentación. Terremoto de Niigata, Japón (16-V-1964).

4.— ANALISIS DE LOS FACTORES QUE DETERMINAN EL POTENCIAL DE LICUEFACCION

Hasta mediados de la década de los sesenta persistió en Ingeniería Sísmica la idea de que el fenómeno de la licuefacción estaba íntimamente

ligado a la *aceleración máxima* del terreno, supuestamente responsable entonces del daño ocurrido en las estructuras. En consecuencia se usaron con gran profusión en este período pequeñas mesas vibratorias (50 cm x 25 cm x 27 cm), en las cuales se registraba la aceleración que originaba la licuefacción de una muestra de arena saturada, que se analizaba de acuerdo con la teoría de vibrocompactación de BARKAN (1962). Sin embargo, los resultados de estos primeros ensayos aparecían muy influenciados por la duración y frecuencia de la aceleración impuesta a la mesa, así como por la deformabilidad del container, por lo que resultaba difícil su extrapolación a las condiciones de campo.

A partir de 1964 las catástrofes originadas por los terremotos de Alaska y Niigata de ese mismo año (con extensas áreas licuadas en ambos) propulsan enormemente los estudios de licuefacción, los cuales ponen de manifiesto que este fenómeno no es de tipo vibratorio, sino más bien de tipo fatiga, y se debe a la pérdida de *resistencia a esfuerzo cortante* del suelo saturado durante el terremoto. En consonancia con estos hallazgos aparecen en orden cronológico los siguientes tipos de ensayos de laboratorio:

- a) Ensayo triaxial con carga axial cíclica (Figura 9).
- b) Ensayo de corte simple.
- c) Ensayo triaxial con carga torsional cíclica.

La superioridad de un ensayo sobre los otros es discutible, ya que ninguno de ellos simula exactamente las condiciones de campo. Las ventajas y limitaciones de los tres tipos de ensayos han sido repetidamente enunciadas en la literatura (PEACOCK y SEED, 1968; ISHIHARA y LI, 1972; YOSHIMI et al., 1977) y aparecen recogidas en la Tabla I.

En un intento de superar los inconvenientes de los ensayos debidos a la pequeñez de la muestra, se han puesto a punto recientemente métodos de ensayo a gran escala, en los cuales se minimizan los efectos de borde. Así DE ALBA et al. (1975) han desarrollado un aparato de corte simple a gran escala, que utiliza muestras muy largas y de poco espesor (225 cm x 100 cm x 10 cm), presurizadas y envueltas en una membrana de goma para impedir el drenaje (Figura 10). Se supone que la parte central de las muestras está libre de concentraciones de tensiones y reproduce fielmente el estado tenso-deformacional de un depósito horizontal

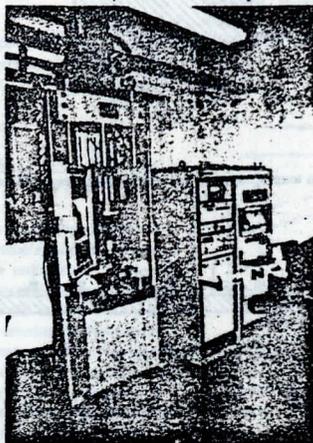
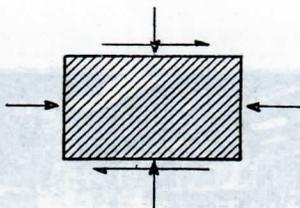


Fig. 9.— Equipo MTS para ensayo triaxial dinámico de suelos (Laboratorio de Carreteras y Geotecnia "José Luis Escario").

TABLA I

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS DE LICUEFACCIÓN CONVENCIONALES

	<u>VENTAJAS</u>	<u>INCONVENIENTES</u>
Triaxial cíclico	<p>Control preciso de las condiciones del ensayo.</p> <p>Experiencia acumulada y coste moderado.</p>	<p>La tensión cíclica aplicada no tiene una relación inmediata con los ciclos de tensión del suelo in situ.</p> <p>El Suelo se consolida isotrópicamente.</p> <p>Las tensiones principales suelo pueden ser horizontales o verticales.</p> <p>La presión intersticial dinámica y la presión total media fluctúan fuertemente durante el ensayo.</p> <p>El estado tensional cíclico no es simétrico ($\sigma_2 = \sigma_3$ en compresión axial; $\sigma_2 = \sigma_1$ en compresión lateral).</p> <p>No hay deformación plana de la muestra (las deformaciones ocurren simultáneamente en las tres direcciones principales), ya que el ensayo tiene simetría cilíndrica.</p>
Corte simple	<p>Simula fielmente las condiciones de campo.</p> <p>Consolidación anisotrópica de la muestra.</p> <p>Fluctuaciones pequeñas de la presión intersticial dinámica.</p>	<p>La ausencia de tensiones cortantes complementarias en las paredes verticales produce concentraciones de tensión en los bordes de la muestra y distribución de tensiones no uniforme en el interior.</p> <p>Tendencia de la muestra a bascular al invertir el sentido del cortante y a la aparición de franjas de arena menos densa.</p> <p>No pueden medirse ni controlarse las tensiones laterales de confinamiento durante el ensayo.</p> <p>Dificultades en la colocación y sellado de la muestra. Pueden quedar burbujas de aire en las esquinas que favorezcan la licuefacción.</p>
Triaxial a torsión	<p>Consolidación anisotrópica de la muestra.</p> <p>Movimiento lateral despreciable al aplicar el par torsor.</p> <p>Posible control del parámetro $K_0 = \sigma_3 / \sigma_1$ durante el ensayo.</p> <p>Se mantiene invariable la forma geométrica de la muestra al aplicar el esfuerzo de corte a torsión.</p>	<p>La distribución de tensiones cortantes horizontales no es uniforme en la muestra, sino que aumenta con la distancia al centro.</p> <p>No pueden aplicarse tensiones cortantes elevadas, porque se produce un deslizamiento relativo entre la muestra y la piedra porosa.</p>



(a) Forma de muestra inapropiada sin tensiones cortantes complementarias



(b) Forma de muestra apropiada sin tensiones cortantes complementarias

Fig. 10.— Configuración de la muestra en ensayos de corte simple a pequeña escala y a gran escala (SEED 1976).

de arena apoyado en una base rocosa rígida. Los resultados obtenidos con este aparato se comparan con estudios experimentales convencionales reportados por diversos autores en la Figura 11. Puede comprobarse que existe un acuerdo notable entre las predicciones de la licuefacción efectuadas mediante distintos ensayos (los datos tomados de ISHIBASHI y SHERIF (1974) presentan una mayor desviación con relación a la media por haberse utilizado un valor de K_0 mayor que en los demás casos, lo que implica una mayor resistencia a la licuefacción).

Resulta extraño a primera vista que en la Figura 11 no se incluyan ensayos triaxiales cíclicos, pese a ser los más frecuentes y mejor documentados en la literatura especializada (LEE y SEED, 1967; CASTRO, 1969; TOWNSEND, 1978; etc.). La razón estriba en que el estado tensional de la probeta es diferente en el ensayo de corte simple y el ensayo triaxial, estando este último bastante alejado de las condiciones de campo. Para poder comparar los dos ensayos es preciso uniformizar los resultados mediante el denominado "parámetro de presión efectiva inicial" (FINN, PICKERING y BRANSBY, 1971) o simplemente Relación de Tensiones, R , que viene fijado por el cociente entre el valor pico de la tensión cortante cíclica (tensión que causa la licuefacción) y la ten-

sión volumétrica efectiva en el instante inicial (tensión que resiste la licuefacción). Para ensayos triaxiales:

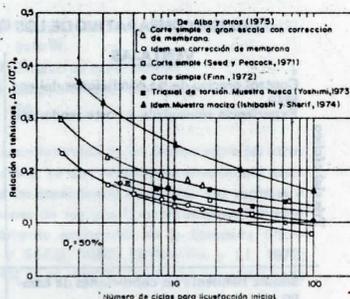


Fig. 11.— Comparación entre ensayos de licuefacción en aparatos de corte simple a gran y pequeña escala y ensayos de corte a torsión (SEED, 1976).

$$R = \frac{\Delta \sigma_d}{2(\sigma'_c)_0} \quad (2)$$

($\Delta \sigma_d$ = desviador cíclico aplicado; $(\sigma'_c)_0$ = tensión efectiva inicial de confinamiento), mientras que para ensayos de corte simple:

$$R = \frac{2 \Delta \tau}{(\sigma_v)_o + K_o (\sigma_v)_o} \quad (3)$$

($\Delta \tau$ = tensión cortante aplicada; $(\sigma_v)_o$ = tensión vertical efectiva al comenzar el ensayo; K_o = coeficiente de empuje al reposo).

De (2) y (3) se deduce:

$$\left[\frac{\Delta \tau}{(\sigma_v)_o} \right]_{\text{corte simple}} \frac{1+K_o}{2} = \left[\frac{\Delta \sigma_d}{2(\sigma_v)_o} \right]_{\text{triaxial}} \quad (4)$$

expresión que es de suma importancia en la estimación de la resistencia a licuefacción de un suelo, ya que sirve de puente de unión entre los resultados de los distintos ensayos de laboratorio y la resistencia a la licuefacción del terreno in situ. En efecto, apoyándose en los estudios de licuefacción en modelo reducido ya comentados (ensayos a gran escala), es posible valorar la incidencia en el proyecto de factores tales como la existencia de estados de corte simple multidireccional. En estos casos investigaciones llevadas a cabo por PYKE et al. (1975), y SEED, PYKE y MARTIN (1975) han demostrado que las presiones intersticiales crecen a un ritmo mayor que en el caso unidireccional, verificándose la relación:

$$\left[\frac{\Delta \tau}{(\sigma_v)_o} \right]_{\text{licuef. in situ}} \approx 0,9 \left[\frac{\Delta \tau}{(\sigma_v)_o} \right]_{\text{licuef. ens. corte simple}} \approx c_r \left[\frac{\Delta \sigma_d}{2(\sigma_v)_o} \right]_{\text{licuef. ensayo triax.}} \quad (5)$$

donde los valores de c_r vienen dados en la Figura 12. Usando estos valores puede comprobarse que existe una equivalencia aceptable entre los resultados del ensayo triaxial y el ensayo de corte simple, divergentes en principio (Figura 13). La misma correlación parece existir entre los ensayos triaxiales y los ensayos de corte simple a gran escala; el valor de c_r crece con el coeficiente de empuje al reposo de la arena en ambos casos, como se deduce de las Ecuaciones (2), (3) y (4).

En base a todo lo expuesto puede decirse que los ensayos triaxiales cíclicos, de corte simple y triaxiales a torsión constituyen una herramienta idónea para determinar el potencial de licuefacción de un depósito de suelo, si bien los resultados obtenidos deben corregirse a fin de poder correlacionar dichos ensayos con las condiciones de campo.

Por otra parte, de diversos estudios experimentales se ha deducido que los factores que de-

terminan la resistencia a licuefacción del suelo son los mismos con independencia del tipo de ensayo utilizado, siendo su influencia cualitativamente similar en los distintos ensayos. Estos factores son (PEACOCK y SEED, 1968; SEED, 1976):

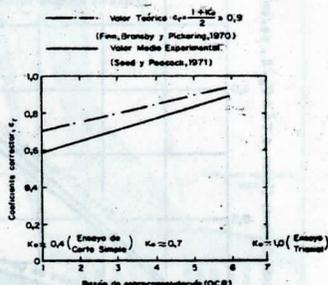


Fig. 12.— Coeficiente corrector para ensayos triaxiales.

- Granulometría.
- Densidad relativa inicial.
- Precisión de confinamiento efectiva al comenzar el ensayo.
- Magnitud de la tensión o deformación cíclica aplicada.
- Número de ciclos.
- Estructura del suelo.
- Historia de deformaciones.
- Razón de sobreconsolidación.
- Secuencia de carga.
- Permeabilidad del material.

El análisis granulométrico es insuficiente para caracterizar el potencial de licuefacción de un suelo. Si bien existen indicios de que la susceptibilidad a licuefacción de la arena puede aumentar al disminuir el tamaño y el coeficiente de uniformidad de los granos (LEE y FITTON, 1968; KISHIDA, 1969; PRAKASH y GUPTA, 1970), no existe ninguna prueba concluyente sobre este punto. Antes bien, WONG et al. (1975) han obtenido —en contra de lo esperado— que la arena bien graduada, con mayor tendencia a la densificación, tiene una resistencia cíclica menor que la arena de granulometría cerrada. Más aún, ANNAKI (1975) ha comprobado que arenas ensayadas con igual granulometría y compactadas por idéntico método al mismo valor de la densidad relativa dan lugar a valores de R con dispersiones de hasta el 20 por ciento sobre la media. Este hecho constituye una

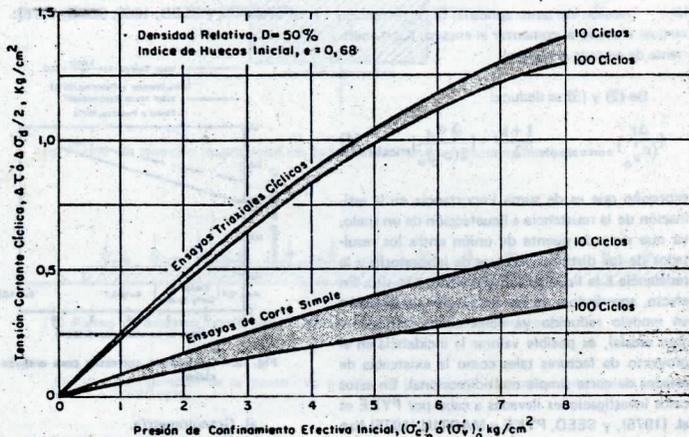


Fig. 13.— Comparación entre el ensayo de corte simple y el ensayo triaxial cíclico en licuefacción (PEACOCK Y SEED, 1966).

llamada de atención sobre el peligro que supone usar indiscriminadamente clasificaciones empíricas puramente granulométricas de terrenos licuados insuficientemente contrastadas por la práctica (Figura 14).

La densidad relativa, D_r , es el parámetro fundamental en la determinación del potencial de licuefacción de un suelo arenoso. A medida que disminuye D_r , la posibilidad de licuefacción del suelo aumenta (Figura 15) y la tensión cíclica necesaria para producir la licuefacción en un número dado de ciclos crece cuasi-linealmente con la densidad relativa inicial y/o la presión de confinamiento. Este último factor se elimina expresando los resultados de los ensayos de licuefacción por medio del parámetro R , antes definido (Ecuaciones (2) y (3)).

En la Figura 16, debida a MULILIS et al. (1975), se muestra la influencia del método de preparación de la muestra en la resistencia a licuefacción. Puede verse que las distintas configuraciones de los granos de arena, ya sea ésta vibrada, depositada por sedimentación, etc., hacen variar el parámetro R , hasta un 200 por ciento. Resultados simi-

lares han sido obtenidos por PYKE (1973) y LADD (1974 y 1976).

La influencia de estados de vibración previa del suelo depende fuertemente de la amplitud y el cociente r_u (grado de licuefacción) entre la presión intersticial dinámica inducida y la presión vertical efectiva (MORI et al, (1978); SINGH et al., (1980)). En general, si dicho cociente es inferior a 0,4 la resistencia a licuefacción aumenta apreciablemente (Figura 17). Por el contrario, para valores de $r_u > 0,6$ este efecto beneficioso desaparece, disminuyendo drásticamente la resistencia para aquellos suelos que han experimentado licuefacción con anterioridad (FINN et al., 1970). Este paradójico fenómeno se conoce como RELICUEFACCION, y se debe según CASTRO (1975) y YOUNG (1977) a la inestabilidad y falta de uniformidad de la estructura cuasi-metaestable creada al consolidar el suelo licuado ("flow structure"), caracterizada por un aumento drástico de la compresibilidad del material. Parece ser que esta estructura puede persistir durante algún tiempo después de ocurrido el terremoto, como han revelado los reconocimientos geotécnicos de emplazamientos que han experimentado licuefacción (Figura

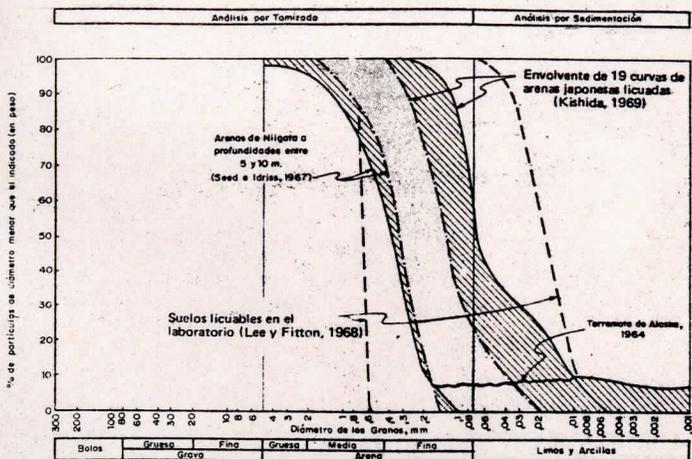


Fig. 14. — Huso granulométrico de arenas susceptibles a licuefacción (SW-AJA, 1972).

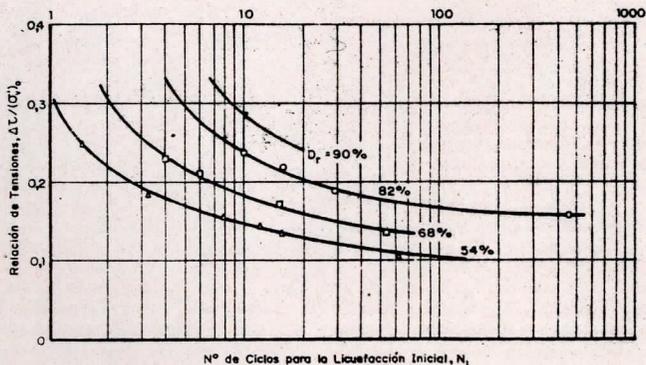


Fig. 15. — Influencia de la densidad relativa en el potencial de licuefacción. Ensayos de corte simple a gran escala (De ALBA, CHAN y SEED; 1975).

18). Ello indicaría que la relucuefacción es un fenómeno que se presenta también en la naturaleza y no producto exclusivamente de las condiciones de ensayo en el laboratorio (YOUDE, 1980). No obstante es lícito suponer que las pequeñas defor-

maciones tangenciales del terreno in situ debidas a las réplicas del terremoto principal son suficientes para estabilizar lentamente la estructura "de flujo" del suelo licuado.

LA SEGUNDA PARTE DE ESTE ARTICULO SE PUBLICARA EN EL BOLETIN NRO. 8 DEL COMITE PERUANO DE MECANICA DE SUELOS, FUNDACIONES Y MECANICA DE ROCAS.