

SUSCEPTIBILIDAD A LICUACIÓN DE ARENAS CALCÁREAS NO CEMENTADAS DEL SUROESTE DE PUERTO RICO¹

Miguel Pando² y Eimar Sandoval Vallejo³

Resumen: Las arenas calcáreas están conformadas principalmente por residuos de organismos marinos y normalmente tienen una mineralogía única (con alto contenido de carbonatos de calcio) y características especiales de sus partículas como la forma, rugosidad superficial, granos más compresibles y quebradizos, y efectos de porosidad interna. Las arenas calcáreas pueden encontrarse en estado cementado o no cementado. Las características únicas de este tipo de arenas sugieren que su comportamiento geotécnico puede ser muy diferente al de las arenas de origen insular (terrienas) con mineralogía de cuarzo o silíceas. Esta investigación se enfocó al estudio de la susceptibilidad al fenómeno de licuación de estas arenas en un estado no cementado. Específicamente este artículo presenta un resumen de una investigación experimental llevada a cabo sobre una arena calcárea no cementada extraída de una playa de Cabo Rojo en el suroeste de Puerto Rico. El programa involucró ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstituidas de arena calcárea consolidadas isotrópicamente. Los resultados se presentan en términos de curvas de resistencia cíclica normalizada (CRR) versus número de ciclos para licuarse. En general los resultados muestran que las arenas calcáreas de Cabo Rojo presentaron mayor resistencia a licuación comparada con la de las arenas de sílice. También se encontró que estas arenas presentaron mayor resistencia a licuación que arenas calcáreas no cementadas de otras regiones del mundo.

Palabras clave: arenas calcáreas, resistencia a licuación.

LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY OF UNCEMENTED CALCAREOUS SANDS FROM SOUTHWEST PUERTO RICO

Abstract: Calcareous sands are generally composed of skeletal remains of marine organisms and typically have unique mineralogy (high content of calcium carbonate) and particle characteristics such as particle shape, surface roughness, crushability, and intraparticle porosity. Calcareous sands may exist in both cemented and uncemented states. These unique characteristics of calcareous sands suggest that their geotechnical behavior can be different compared to that of terrigenous and silica sands, including their behavior under seismic loading. This paper presents results from an experimental study on the liquefaction susceptibility of an uncemented calcareous sand from southwestern Puerto Rico. The experimental program involved a comprehensive set of undrained cyclic triaxial tests on isotropically consolidated reconstituted samples of this calcareous sand. For comparison purposes, Ottawa silica sand samples at similar conditions were also tested. For this paper, the results are presented in terms of curves of normalized cyclic resistance ratio (CRR) versus number of cycles to liquefaction. The CRR curves were prepared for a range of relative densities and consolidation stresses. Pore pressure generation characteristics are also presented and discussed for both tested sands. In general, test results show that the calcareous sand exhibit higher liquefaction resistance than the Ottawa silica sand tested under similar conditions. The cyclic resistance curves obtained for the calcareous sand from southwest Puerto Rico were found to be higher than similar curves published for calcareous sands of other parts of the world tested under similar conditions.

Keywords: calcareous sands, liquefaction resistance.

¹ Artículo recibido el 25 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final en 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, Charlotte, NC, 28223. E-mail: mpando@uncc.edu

³ Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia. E-mail: eimar.sandoval@correounivalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

Una gran extensión de los depósitos de playa de Puerto Rico está conformada por arenas calcáreas. Producto de varios procesos biogénicos, estas arenas se caracterizan por la presencia de granos formados a partir de fósiles de animales y plantas marinas, ricos en carbonatos de calcio. Asimismo, los procesos bioquímicos a que se ven expuestas en un ambiente marino de aguas cálidas, hace que estas arenas presenten una estructura interna particular, con abundantes micro porosidades en sus partículas y la posibilidad de que se generen procesos de cementación de sus granos. Diferentes estudios realizados en este tipo de arenas han demostrado que las características especiales de las partículas de estas arenas (en cuanto a su mineralogía, forma, porosidad interna, etc.) resultan muchas veces en un comportamiento ingenieril diferente al de las arenas de origen insular (terrágenas) con mineralogía de cuarzo o silícea. Esto es debido principalmente a las características de sus granos incluyendo su susceptibilidad a romperse ante cargas externas y a la adherencia natural que se puede desarrollar entre ellos. Las características particulares de estas arenas, sumado con la alta sismicidad de la isla de Puerto Rico, y a su ambiente costero, hacen que el estudio de su susceptibilidad a licuación sea un aspecto importante en el diseño de estructuras civiles cimentadas sobre estas arenas.

Aunque las arenas calcáreas se pueden encontrar en estado no cementado o cementadas, esta investigación se enfocó al estudio de la susceptibilidad al fenómeno de licuación de arenas en estado no cementado el cual es representativo de su condición a bajas profundidades en las playas donde se obtuvieron las muestras de arena. Específicamente se presenta una investigación experimental llevada a cabo sobre una arena calcárea no cementada extraída de una playa en Puerto Real, Cabo Rojo, Puerto Rico. El programa involucró la caracterización mineralógica, determinación de propiedades índice principales y 31 ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstituidas de arena calcárea consolidadas isotrópicamente. En los ensayos triaxiales cíclicos se utilizaron tres niveles de esfuerzo efectivo de consolidación y cuatro densidades relativas. Con fines de comparación, un análisis mineralógico, determinación de propiedades índice y ocho ensayos triaxiales cíclicos fueron realizados en la arena estándar de sílice Ottawa, bajo densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación similares a los utilizados para la arena calcárea.

METODOLOGÍA: PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta investigación involucró ensayos sobre una arena calcárea (arena de Cabo Rojo) y sobre una arena estándar de sílice (arena de Ottawa # 20-30). La arena estándar se utilizó con el fin de comparar la influencia de características de factores como distribución granulométrica, forma de las partículas, textura, porosidad y mineralogía, en la resistencia a la licuación de las arenas. El programa experimental incluyó la determinación del contenido de carbonato de calcio de la arena calcárea mediante reacción con ácido clorhídrico (HCl), micrografías mediante microscopio de barrido electrónico, determinación de propiedades índice, y ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstituidas consolidadas isotrópicamente. Se realizaron en total 39 ensayos triaxiales cíclicos; de los cuales, 31 fueron ejecutados sobre la arena calcárea de Cabo Rojo y ocho sobre la arena de sílice Ottawa.

Las arenas calcáreas fueron extraídas de la Playa Puerto Real en Cabo Rojo al suroeste de Puerto Rico. Son de color habano a amarillo claro, pobremente gradadas, con granos sub-angulares a angulares, de tamaño fino a medio, alta porosidad interna y alto contenido de carbonato de calcio CaCO_3 mayor al 91%. La Figura 1 ilustra micrografías de las arenas calcáreas de Cabo Rojo, en las cuales se pueden observar algunos de sus componentes biogénicos, su alta porosidad interna, su alta rugosidad, entre otras propiedades específicas. El comportamiento esfuerzo-deformación de estas arenas calcáreas fue previamente estudiado por Cataño y Pando (2010). La arena silícea utilizada para fines comparativos es una arena estándar conocida como arena de Ottawa # 20-30, con granos finos sólidos y redondeados, y contenido de CaCO_3 menor al 1%. Sus partículas son de color blanco, y es una arena pobremente gradada con tamaños entre el tamiz No 20 (0.841 mm) y el tamiz No 30 (0.595 mm). La Tabla 1 resume las principales propiedades índices de las dos arenas estudiadas.

Tabla 1: Principales propiedades índice de las arenas usadas.

Parámetro	Arena calcárea Cabo Rojo	Arena de sílice Ottawa	NORMA TÉCNICA
D_{50} (mm)	0.37	0.75	
C_u	1.75	2.1	
C_c	0.94	1.1	
G_s	2.84	2.65	ASTM D854-06
γ_{\min} (KN/m^3)	9.1	14.6	ASTM
e_{\max}	2.07	0.78	D4254-00
γ_{\max} (KN/m^3)	11.1	17.3	
e_{\min}	1.51	0.50	

La Tabla 1 muestra importantes diferencias tanto en su composición mineralógica como de propiedades de los granos. Por ejemplo, debido a la composición mineralógica de las arenas calcáreas, estas arenas presentan una alta gravedad específica del orden de 2.84, la cual es mayor que el valor típico de 2.65 de las arenas de sílice. Este valor de gravedad específica de 2.84 de las arenas de Cabo Rojo es también mayor que la gravedad específica de la calcita (2.71). Los autores consideran que este valor se debe a la presencia de cristales de Aragonito ($G_s = 2.93$) que se detectaron mediante ensayos de difracción de rayos X por Cataño y Pando (2010). Otra diferencia importante es la porosidad interna de estas arenas calcáreas que presentaron grandes relaciones de vacíos (e), entre 1.51 y 2.07, mientras que las arenas de sílice tuvieron valores de e entre 0.50 y 0.78. La Figura 2 ilustra las curvas de distribución granulométrica para ambas arenas, donde también se observan algunas diferencias en el tamaño máximo y rangos de tamaños para las dos arenas estudiadas.

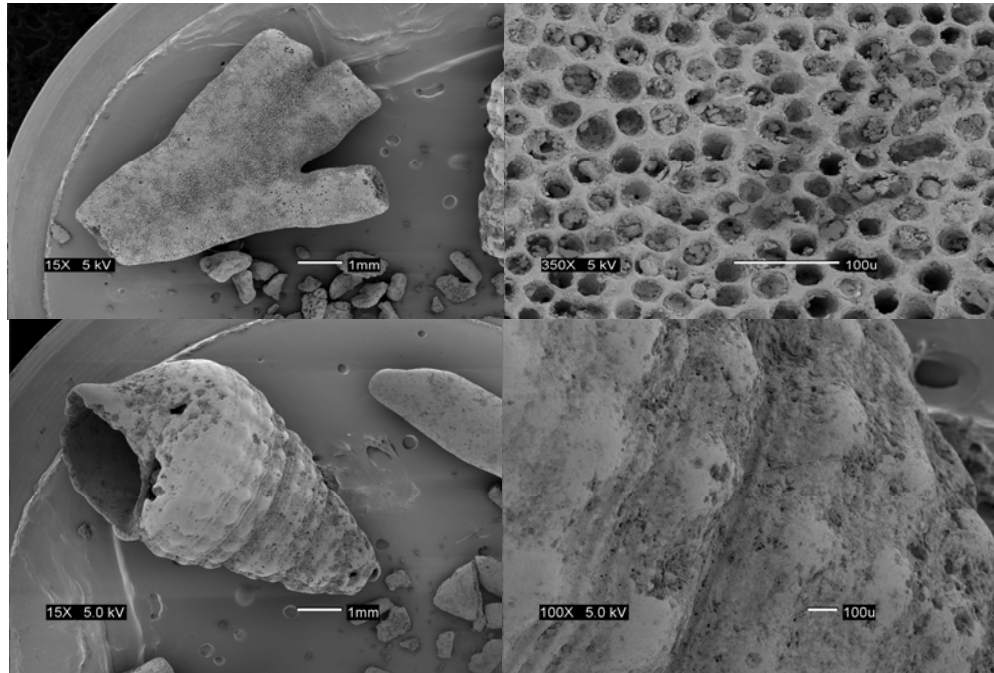


Figura 1: Micrografías de las arenas calcáreas de Cabo Rojo (Cataño y Pando, 2010).

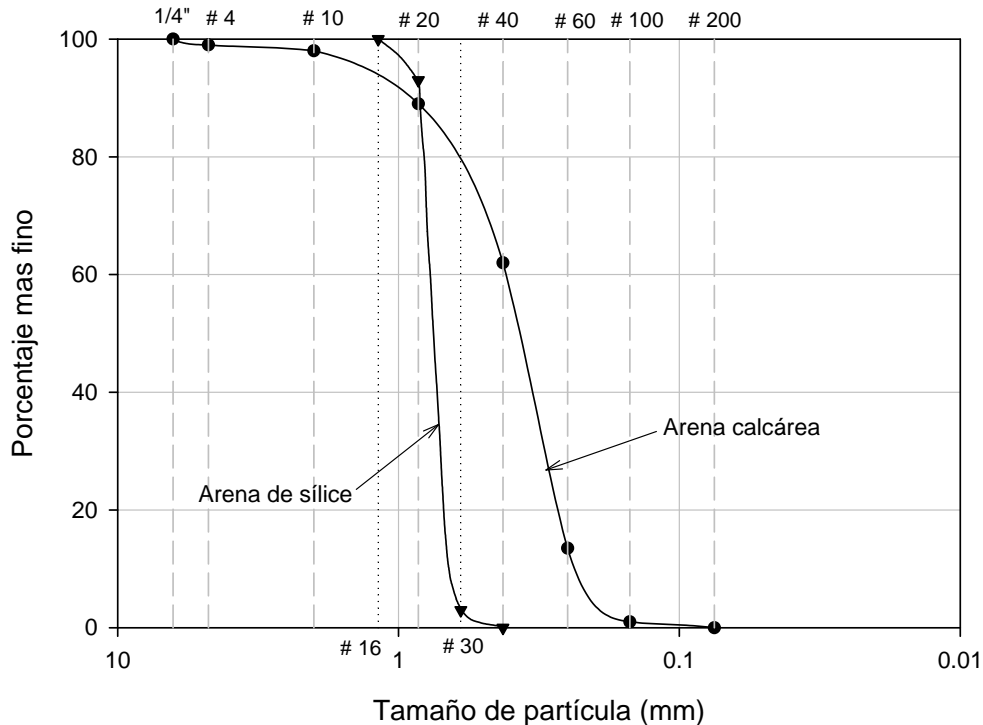


Figura 2: Distribución granulométrica de las arenas ensayadas.

Procedimiento de ensayos triaxiales cíclicos

La resistencia a licuación de las dos arenas objeto de esta investigación fue evaluada mediante ensayos triaxiales cíclicos no drenados, según la metodología de la Norma ASTM-D5311. En promedio, las muestras para los ensayos triaxiales cíclicos tuvieron una altura y un diámetro de 101.6 mm y 50.8 mm respectivamente. Todos los especímenes se prepararon usando el método de apisonamiento húmedo (“moist tamping”). Este método consiste en agregar cierta cantidad de agua y compactar las muestras mediante un pisón, dentro de un cilindro metálico recubierto con una membrana de látex y sometido a vacío para garantizar la forma y consistencia de la muestra. El suelo se colocó en cinco capas usando el procedimiento de sub-compactación (“undercompaction”), sugerido por Ladd (1978). Este método recomienda que la densidad inicial de las capas inferiores sea menor, debido a que el peso de las capas superiores incrementará su densidad al final de la preparación de la muestra. El apisonamiento húmedo fue realizado con humedades entre 4% y 25% para la arena calcárea y entre 2% y 8% para la arena de sílice. Las densidades relativas (D_r) variaron entre 20% y 75% al final de la preparación de la muestra y entre 23% y 83% después de la etapa de consolidación.

Para saturar las muestras fue necesario circular un flujo de CO_2 a través de las muestras por un periodo de 30 a 45 minutos. Este procedimiento ha sido realizado por otros autores (por ej., Naeini y Moayed, 2007), y su finalidad es reemplazar el aire atrapado dentro de la muestra por CO_2 , debido a que éste entra en solución con el agua a bajas presiones, facilitando el proceso de saturación. Las presiones de flujo utilizadas para circular el CO_2 estuvieron entre 15 kPa y 30 kPa. Después de este proceso, se procedió a pasar agua des-aireada, con el fin de expulsar el CO_2 presente en los poros. Este proceso se llevó a cabo hasta que visualmente no se notara la salida de CO_2 de la muestra, y fluyera agua continuamente. Luego de colocar el flujo de CO_2 y de circular agua des-aireada, se terminó el proceso de saturación convencional mediante la aplicación del método de contrapresión (“back pressure”). Este procedimiento fue llevado a cabo hasta obtener valores del parámetro B de Skempton (1954) mayores o iguales a 0.95.

Tan pronto se alcanzaron niveles altos del grado de saturación de las muestras (valores de $B \geq 0.95$), los especímenes se consolidaron isotrópicamente bajo tres niveles de esfuerzos efectivos diferentes (50, 100 y 200 kPa). Después de consolidar isotrópicamente las muestras, se esperó un tiempo de estabilización de 30 minutos antes de aplicar la carga cíclica. La fase cíclica se realizó bajo esfuerzo controlado sinusoidal, con una frecuencia de aplicación de la carga (f) de 1 Hz, y sin permitir el drenaje de la muestra. La amplitud de la carga cíclica se eligió para obtener diferentes valores de esfuerzo cíclico normalizado (CSR). En la siguiente sección se presentan más detalles de la fase cíclica de los ensayos.

LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO PARA LA ARENA DE CABO ROJO

En general se recomienda evaluar el potencial de licuación de arenas en función del estado de la arena con respecto a la línea de estado crítico. La línea de estado crítico se presenta en la Figura 3. Esta línea de estado crítico fue obtenida mediante ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) presentados por Cataño y Pando (2010) y con datos complementarios (ver símbolos abiertos en la Figura 3) obtenidos en esta investigación mediante un método simplificado alterno propuesto por Santamarina y Cho (2001).

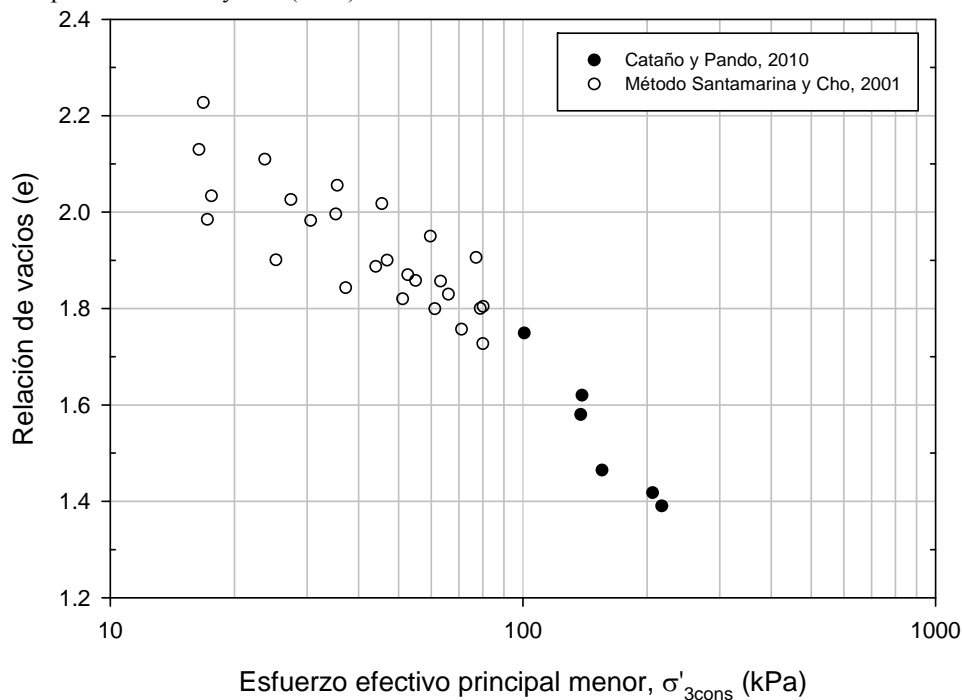


Figura 3: Línea de estado crítico para la arena de Cabo Rojo.

RESULTADOS

En esta investigación, la resistencia a licuación fue presentada en términos de curvas de relación de esfuerzo cíclico (CSR), como una función del número de ciclos para producir licuación (por ej., Seed y Lee, 1966). En ensayos triaxiales cíclicos, la relación de esfuerzo cíclico se define como la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el esfuerzo efectivo de consolidación (σ'_{3cons}). Debido a que en un ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente, el esfuerzo cortante sobre el plano de interés es igual a la mitad del esfuerzo desviador aplicado (σ_d), la CSR se expresa como:

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_{3cons}} \quad (1)$$

donde:

- CSR: Relación de esfuerzo cíclico
- σ_d : Esfuerzo desviador
- σ'_{3cons} : Esfuerzo efectivo de consolidación

Para cada densidad relativa y esfuerzo efectivo de consolidación, se realizaron entre tres y cinco ensayos triaxiales cíclicos para diferentes niveles de CSR. En cada prueba se registró el número de ciclos necesario para producir licuación. El criterio de licuación se definió como una condición para la cual el esfuerzo efectivo es igual a cero (i.e., el exceso de presión de poros (ΔU) es igual al esfuerzo de consolidación), o cuando la doble amplitud de la deformación axial (ϵ) fue de $\pm 5\%$. Se prepararon curvas de resistencia a la licuación para cada densidad relativa y esfuerzo de consolidación, las cuales por tratarse de curvas de resistencia, suelen denominarse curvas de resistencia cíclica (CRR).

Comparación de curvas CRR para la arena de Cabo Rojo y la arena Ottawa

La Figura 4 muestra curvas de resistencia cíclica (CRR) de las dos arenas estudiadas. Estas curvas corresponden a muestras preparadas en estado suelto ($Dr = 23\% - 27\%$) y consolidadas isotrópicamente bajo un esfuerzo efectivo de 50 kPa. La Figura 5 presenta una comparación similar, pero para muestras preparadas en estado medio-denso ($Dr = 64\% - 68\%$) y consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa. En las Figuras 4 y 5 se puede observar que las arenas calcáreas de Cabo Rojo presentan una resistencia a licuación considerablemente mayor que la de las arenas de Ottawa, para muestras probadas a densidades relativas similares, bajo el mismo esfuerzo efectivo de consolidación.

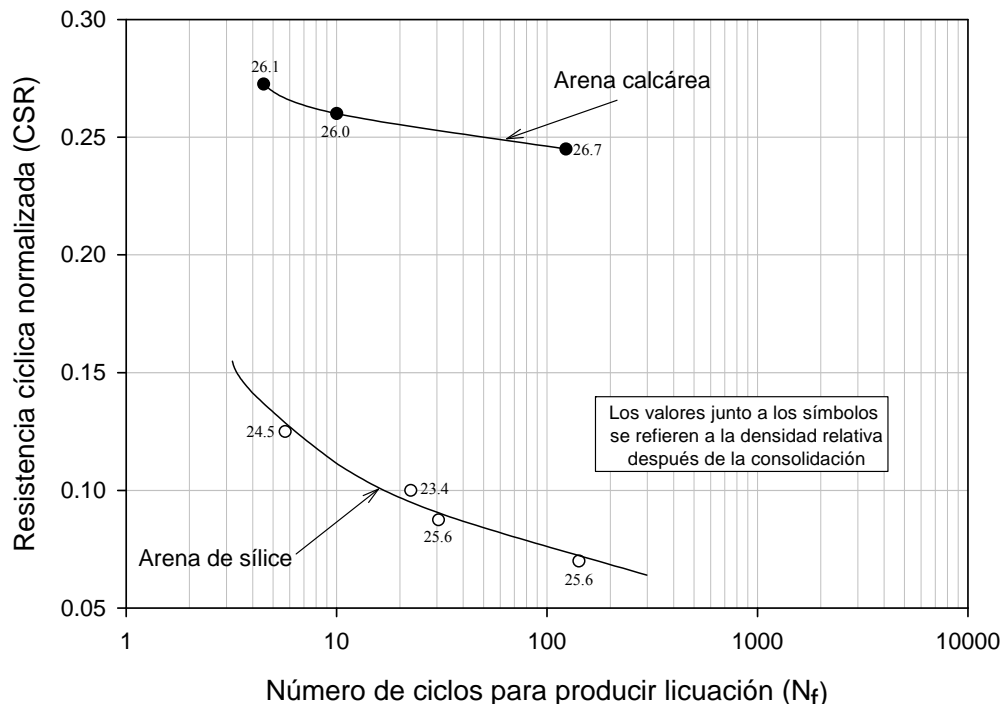


Figura 4: Curvas de CRR para la arena calcárea y la arena de sílice (estado suelto, $\sigma'_{3cons} = 50$ kPa).

Comparación de curvas de generación de excesos de presión de poros

La Figura 6 ilustra curvas de generación de exceso de presión de poros para las dos arenas estudiadas, para muestras preparadas en estado suelto ($Dr = 25\% - 26\%$), y consolidadas isotrópicamente bajo un esfuerzo efectivo de 50 kPa. Una

comparación similar se presenta en la Figura 7, para muestras en estado medio-denso ($D_r = 64\% - 68\%$), consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa. El eje de las ordenadas corresponde al exceso de presión de poros residual (ΔU_{res}), normalizado respecto al esfuerzo efectivo de consolidación (σ'_{3cons}). En estas gráficas, el exceso de presión de poros residual (ΔU_{res}) se define como el valor del exceso de presión de poros cuando el esfuerzo desviador aplicado (σ_d) es igual a cero durante cada ciclo de carga (Seed y Lee, 1966). El eje de las abscisas indica el número de ciclos en cada instante de la prueba, normalizado respecto al número de ciclos requeridos para producir licuación (i.e., N/N_f).

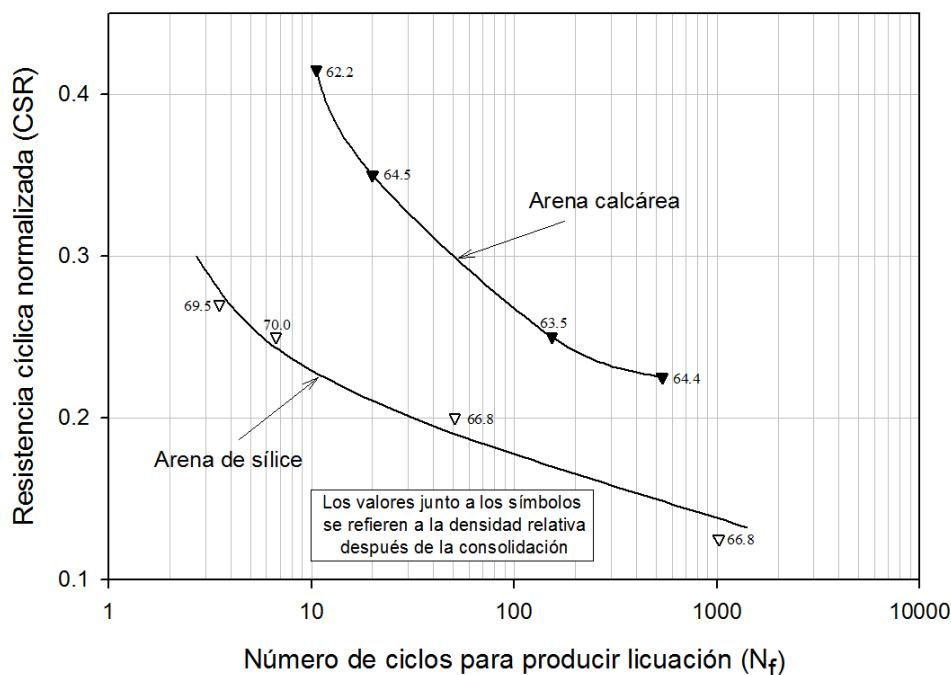


Figura 5: Curvas de CRR para la arena calcárea y la arena de sílice (estado medio denso, $\sigma'_{3cons} = 100$ kPa).

En las Figuras 6 y 7 se pueden apreciar importantes diferencias en cuanto a las características de generación de excesos de presión de poros de las arenas calcáreas comparadas con las arenas de sílice. Por ejemplo, cerca del inicio de la fase de aplicación de la carga cíclica, la arena calcárea desarrolló valores más altos de excesos de presión de poros que la arena de sílice, cuando fueron ensayadas bajo el mismo esfuerzo de consolidación con densidades relativas similares. Otra diferencia importante es que la arena calcárea presentó fluctuaciones marcadas en los excesos de presión de poros entre cargas cíclicas, indicando una especie de relajación entre ciclos de carga. Por otra parte, la arena de sílice mostró un lento y gradual exceso de presión de poros al inicio de la fase cíclica, y no se observaron fluctuaciones importantes entre ciclos de carga. Una tercera diferencia es que al final de la prueba, cuando la muestra se aproxima a licuación, las arenas de sílice típicamente mostraron un incremento súbito y repentino en los excesos de presión de poros, mientras que las arenas calcáreas mostraron un incremento lento y gradual en la generación de excesos de presión de poros hasta llegar a licuación, menor que el incremento presentado al inicio de la fase cíclica.

Las grandes fluctuaciones en los excesos de presión de poros durante la fase cíclica, presentadas por las arenas calcáreas, podrían ser atribuidas a un reacomodo de las partículas, debido a sus características específicas como granos con formas únicas, rugosidad superficial, porosidad interna, entre otras. La diferencia de magnitud de las fluctuaciones de exceso de presión de poros entre la arena calcárea y sílicea es consistente con las diferencias encontradas por Cataño y Pando (2010) entre los valores del parámetro A de presión de poros de Skempton (1954) en los ensayos triaxiales monotónicos de tipo consolidados no drenados (CU). Esta relajación en los excesos de presión de poros, podría contribuir a la alta resistencia a licuación presentada por las arenas calcáreas comparada con la de las arenas de sílice. Las características en la generación de excesos de presión de poros de las arenas calcáreas de Cabo Rojo fueron similares a lo descrito por Ross y Nicholson (1995) y por Morioka y Nicholson (2000) para dos arenas calcáreas de Hawái.

En las Figuras 6 y 7 se muestra también un rango típico de generación de excesos de presión de poros descrito por Seed et al. (1975). El rango propuesto se basó en resultados de laboratorio obtenidos por Lee y Albaisa (1974), quienes realizaron ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras reconstituídas de seis tipos de arenas de grano uniforme. En estas figuras se puede observar que las arenas de sílice se ajustan bien al límite inferior de la banda sugerida por Seed et al. (1975). En contraste, las arenas calcáreas tienden a estar más cerca del límite superior del rango indicado; sin embargo, debido a la alta relajación en las presiones de poros, se salen en varios puntos de la banda superior. Esta tendencia se evidencia más cuando se incrementa la densidad relativa de la muestra. Cabe mencionar que no se encontró mayor

evidencia en términos de rompimiento de granos al comparar curvas granulométricas antes y después de los ensayos cíclicos.

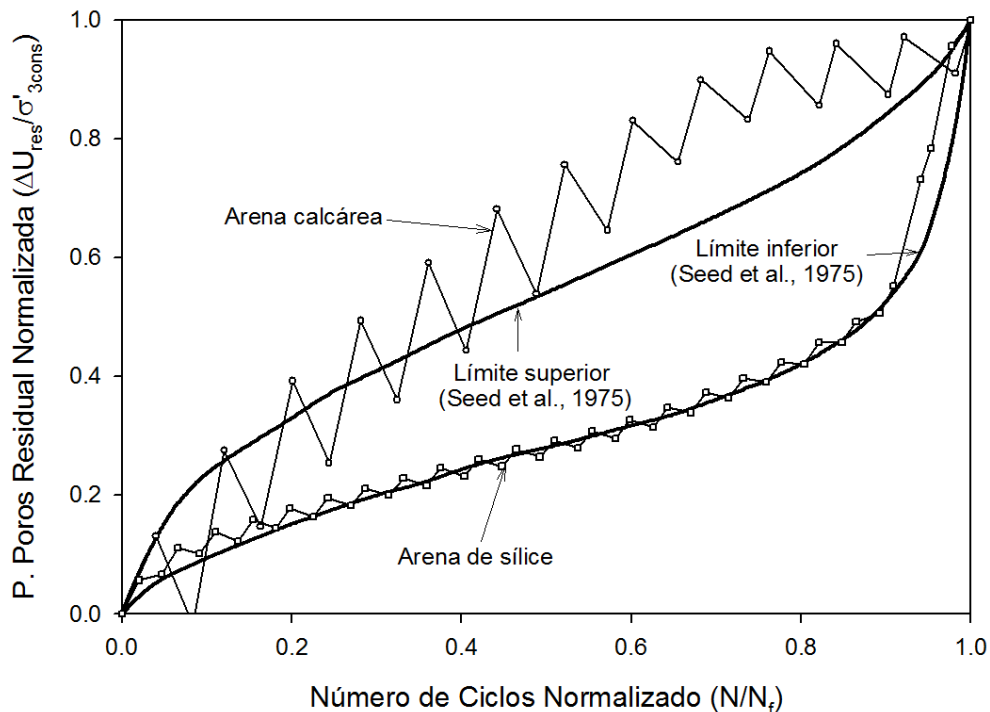


Figura 6: Curvas de presión de poros para las arenas ensayadas (estado suelto, $\sigma'_{3cons} = 50$ kPa).

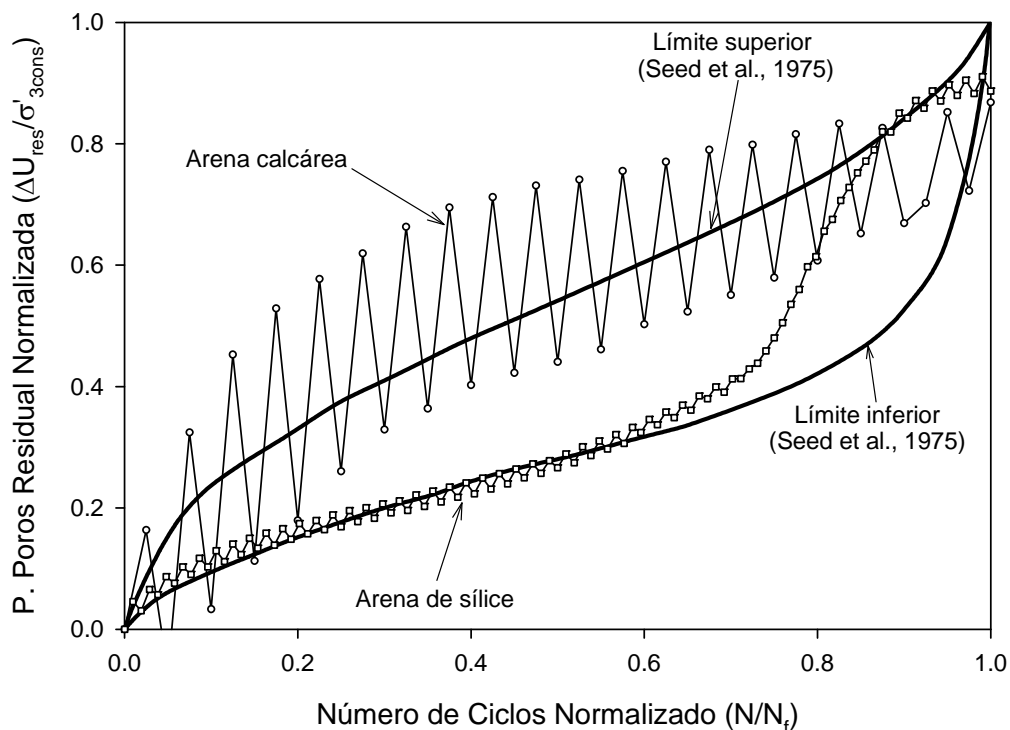


Figura 7: Curvas de presión de poros para las arenas ensayadas (estado medio-denso, $\sigma'_{3cons} = 100$ kPa).

Comparación de las curvas de CRR de las arenas de Cabo Rojo con otras arenas calcáreas del mundo

La Figura 8 compara las curvas de CRR obtenidas en este estudio con la arena calcárea de Cabo Rojo con resultados con arenas calcáreas de otras regiones del mundo que fueron ensayadas bajo condiciones similares (en esta figura se presentan resultados de arenas en estado medio denso, D_R entre 59– 65%, y obtenidas de ensayos en muestras consolidadas

isotrópicamente a un esfuerzo efectivo de 100 kPa). Se puede observar de la Figura 8 que las arenas calcáreas de Cabo Rojo tienen una resistencia a la licuación mayor que otras arenas calcáreas ensayadas bajo condiciones similares y utilizando procedimientos experimentales similares.

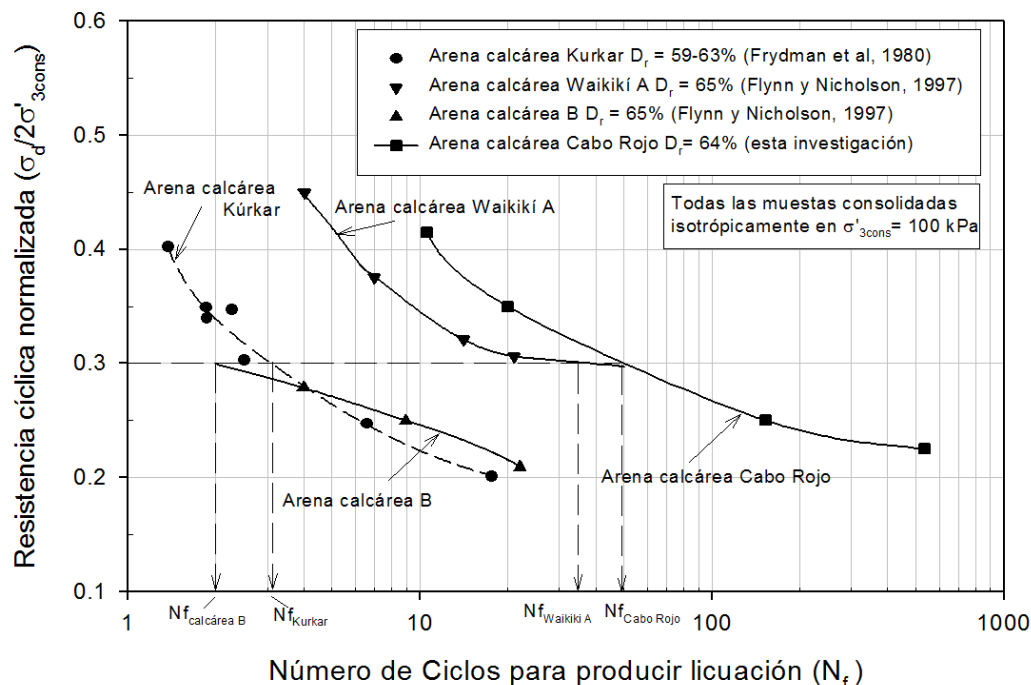


Figura 8: Comparación de curvas de CRR para diferentes arenas calcáreas, estado medio denso ($\sigma'_{3cons} = 100$ kPa).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las arenas calcáreas de Cabo Rojo presentaron mayor resistencia a licuación comparada con la de las arenas de sílice. Este comportamiento se evidenció en curvas de resistencia cíclica más altas para las arenas calcáreas con respecto a las de las arenas de sílice, para muestras ensayadas bajo condiciones similares. Adicionalmente se encontró que las arenas calcáreas de Cabo Rojo presentaron una mayor resistencia a licuación comparado con arenas calcáreas no cementadas de otras regiones del mundo.

Las curvas de generación de presión de poros de las arenas calcáreas de Cabo Rojo presentaron características únicas mostrando grandes fluctuaciones de exceso de presiones de poros entre los ciclos de carga. Estas fluctuaciones no convencionales pueden atribuirse a relajación de esfuerzos durante los ciclos de carga que podrían asociarse a las características únicas de los granos de estas arenas como son las formas de sus granos, la rugosidad de los granos, la porosidad de las partículas, entre otras. Las características diferentes de los granos de las dos arenas estudiadas se traducen en diferencias importantes de las características de los contactos entre las partículas de los dos tipos de arenas. La forma y alta rugosidad de los granos de las arenas calcáreas puede generar mayor fricción entre partículas, y podría ser la responsable de que la generación de presiones de poros y resistencia a licuación de las arenas calcáreas sea considerablemente diferente a la de las arenas silíceas.

REFERENCIAS

- Cataño, J. y Pando, M.A. (2010). "Static and dynamic properties of a calcareous sand from southwest Puerto Rico", *Proceedings of the Annual Geo-Congress of the Geo-Institute of ASCE*, West Palm Beach, Florida, USA, p. 842-851.
- Frydman, S., Hendron, D., Horn, H. y Steinbach, J. (1980). "Liquefaction study of cemented sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. 3, pp. 275-297.
- Flynn, W. L. y Nicholson, P.G. (1997). "A comparative study of cyclic loading responses and effects of cementation on liquefaction potential of calcareous and silica sands", *Research Report*, University of Hawaii, Manoa, Hawaii, USA.
- Ladd, R. S. (1978). "Preparing test specimen using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23.

- Lee, K. L. y Albaisa, A. (1974). "Earthquake induced settlements in saturated sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. 4, pp. 387-406.
- Morioka, B.T. y Nicholson, P. G. (2000). "Evaluation of the liquefaction potential of calcareous sand", *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seattle, Washington, USA, pp. 494-500.
- Naeini, S.A. y Moayed, R.Z. (2007). "Evaluation of undrained shear strength of loose silty sands using CPT results". *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 104-117.
- Ross, M. S. y Nicholson, P.G. (1995). "Liquefaction potential and cyclic loading response of calcareous soils", *Research Report UHM/CE/95-05*, University of Hawaii, Manoa, Hawaii, USA.
- Santamarina, J.C. y Cho, G.C. (2001). "Determination of critical state parameters in sandy soils - Simple procedure", *ASTM Testing Journal*, Vol. 24, No. 2, pp. 185-192.
- Seed, H. B. y Lee, K. L. (1966). "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 92, No. 3, pp. 25-58.
- Seed, H. B., Martin, P. P. y Lysmer, J. (1975). "The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction", *Report No EERC 75-29*, University of California, Berkeley, California, USA.
- Skempton, A.W. (1954). "The pore pressure coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol. 4, pp. 143-147.