

# RESISTENCIA A LICUACIÓN DE ARENAS CALCÁREAS

## LIQUEFACTION RESISTANCE OF CALCAREOUS SANDS

EIMAR SANDOVAL VALLEJO

*M.Sc. Grupo de Investigación G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia, eimar.sandoval@correounivalle.edu.co*

Recibido para revisar Noviembre 22 de 2011, Aceptado Marzo 6 de 2012, versión final Marzo 23 de 2012

**RESUMEN:** Las arenas calcáreas son únicas en términos de su origen, mineralogía, forma, fragilidad y porosidad interna de sus granos. Este artículo presenta los resultados de un programa experimental llevado a cabo para estudiar la resistencia a licuación de una arena calcárea de Cabo Rojo en Puerto Rico. El programa experimental involucró caracterización mineralógica, propiedades índice y ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstruidas consolidadas isotrópicamente. Debido a la gran variación en las propiedades de las arenas calcáreas, los resultados se comparan con investigaciones realizadas sobre otras arenas calcáreas del mundo. Los resultados mostraron un amplio rango en la variación de la resistencia a licuación de las arenas calcáreas estudiadas. La arena de Cabo Rojo tuvo mayor resistencia a licuación que la mayoría de las arenas calcáreas utilizadas para la comparación. También se encontraron diferencias importantes en las características de generación de excesos de presión de poros.

**PALABRAS CLAVE:** arenas calcáreas, ensayos triaxiales cíclicos, presión de poros, resistencia a licuación.

**ABSTRACT:** Calcareous sands are unique in terms of their origin, mineralogy, shape, fragility and intraparticle porosity. This article presents results from an experimental program carried out to study the liquefaction resistance of a calcareous sand retrieved from Cabo Rojo at Puerto Rico. The experimental program included mineralogical characterization, index properties, and undrained cyclic triaxial tests on isotropically consolidated reconstituted samples. Due to the large variation in the calcareous sand properties, results are compared with previous researches carried out on other calcareous sands around the world.

Results showed a wide range in the liquefaction resistance of the studied calcareous sands. Cabo Rojo sand experienced greater liquefaction resistance than most of the calcareous sands used for comparison. Important differences in the excess pore pressure generation characteristics were also found.

**KEYWORDS:** calcareous sands, cyclic triaxial tests, liquefaction resistance, pore pressure.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de mayor interés en la ingeniería geotécnica es el fenómeno de licuación, el cual se evidencia después de cargas cíclicas como terremotos o vibraciones. La licuación consiste en una pérdida en la resistencia al corte del suelo, a causa del incremento en las presiones de poros durante la aplicación de la carga cíclica. Si las presiones de poros aumentan considerablemente, el suelo puede perder toda su resistencia y rigidez, y su comportamiento se asemeja al de un líquido, de ahí el término de licuación. Debido a licuación de suelos, pueden presentarse grandes asentamientos, desplazamientos laterales, fallas de taludes, y daños, incluso colapso de las estructuras.

Las arenas calcáreas se encuentran en muchos lugares del mundo y sirven de cimentación a edificaciones importantes, generalmente en zonas costeras. Por

esta razón, en las tres últimas décadas se ha venido investigando, principalmente mediante ensayos cíclicos de laboratorio, la resistencia a licuación de arenas calcáreas. Estas investigaciones se han enfocado especialmente en comparar la resistencia a licuación de las arenas calcáreas con la de arenas terrígenas de sílice o cuarzo, que son las más comunes, y no se ha profundizado en estudiar el amplio rango de variación que puede tener la resistencia a licuación de las arenas calcáreas entre sí.

Este artículo busca contribuir a llenar este vacío, al resaltar la amplia variación que puede tener la resistencia a licuación de arenas calcáreas, cuando varían algunas de sus propiedades índice principales. Se presenta el resumen de una investigación experimental llevada a cabo sobre una arena calcárea no cementada extraída de una playa en Cabo Rojo, al suroeste de Puerto Rico. El programa experimental involucró caracterización mineralógica, determinación de las

principales propiedades índice y 31 ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstituidas consolidadas isotrópicamente. En los ensayos triaxiales cíclicos se utilizaron tres niveles de esfuerzo efectivo de consolidación y cuatro densidades relativas.

Los resultados se comparan con investigaciones realizadas sobre arenas calcáreas de otros lugares del mundo, y que utilizaron también ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras probadas bajo densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación isotrópica similares. La comparación se realiza en términos de curvas de resistencia cíclica y curvas de generación de excesos de presión de poros. Estas últimas también se comparan con la forma típica de generación de excesos de presión de poros esperada para arenas de sílice según Seed et al. (1975) [1].

## 2. SEDIMENTOS BIOGÉNICOS MARINOS Y ARENAS CALCÁREAS

Los sedimentos biogénicos marinos pueden ser tanto silíceos como calcáreos y son formados a partir de organismos planctónicos, que son los más abundantes en el océano. Los dos principales tipos de plancton son fitoplancton (que realizan la fotosíntesis como las plantas) y zooplancton (que se alimentan, como los animales). Los sedimentos calcáreos biogénicos, los cuales son el objeto de este artículo, están compuestos por grandes acumulaciones de residuos esqueléticos de plantas y animales marinos, tales como algas coralinas, cocolitos, foraminífera y equinodermos. Las partículas biogénicas calcáreas más comunes son las conchas o residuos de microorganismos de foraminífera, generalmente de diámetro inferior a 1 mm [2].

El principal componente de las arenas calcáreas es la calcita, por lo cual estas arenas tienen un alto contenido de carbonato de calcio (usualmente mayor al 90%). Las arenas calcáreas son únicas en términos de las características de sus partículas, incluyendo mineralogía, forma, porosidad interna, entre otras, y pueden existir en estado cementado o no cementado. Debido a sus propiedades particulares, estas arenas son más susceptibles al rompimiento de sus granos bajo grandes esfuerzos, más contractivas y menos rígidas que las arenas terrígenas [3]. Estas diferencias conllevan a que su comportamiento geotécnico, incluida su resistencia a licuación, sea diferente al de las arenas terrígenas.

## 3. REVISIÓN DE LITERATURA

Para realizar la comparación sugerida en este artículo, se realizó una revisión de literatura sobre resistencia a licuación de arenas calcáreas no cementadas de diferentes lugares del mundo. Se seleccionaron estudios que utilizaron la misma metodología de prueba (i.e., ensayos triaxiales cíclicos no drenados consolidados isotrópicamente), y que usaron esfuerzos de consolidación y densidades relativas similares a los empleados para las muestras de Cabo Rojo.

Se obtuvo información de investigaciones realizadas sobre arenas calcáreas de Australia, Estados Unidos, Irlanda, Japón y Puerto Rico, para ser comparada con los resultados de la arena calcárea de Cabo Rojo en Puerto Rico.

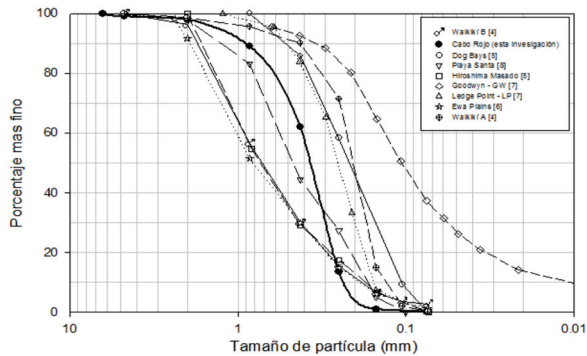
La Tabla 1 presenta un resumen de literatura sobre resistencia a licuación de las arenas calcáreas utilizadas para la comparación, y la Figura 1 ilustra sus curvas de distribución granulométrica. Las curvas de resistencia cíclica y de generación de excesos de presión de poros para estos estudios se presentan más adelante en la sección de resultados y discusión. Con fines de comparación, en la Tabla 1 y en la Figura 1 también se incluye las propiedades de la arena calcárea de Cabo Rojo, las cuales se discutirán en detalle en la siguiente sección.

**Tabla 1.** Resumen de algunos estudios previos de licuación sobre arenas calcáreas

Arena	Cu	Dr %	$e_{min}$ $e_{max}$	Gs	$\sigma'_{3con}$ kPa
Waikiki A [4] (Estados Unidos)	1.6	65	1.12 1.69	2.79	100
Waikiki B [4] (Estados Unidos)	5.1	65	0.66 1.30	2.71	100
Hiroshi. Masado [5] (Japón)	5.8	60	0.78 1.39	2.61	100
Dog Bays [5] (Irlanda)	2.3	60	1.61 2.45	2.72	100
Ewa Plains [6] (Estados Unidos)	4.1	65	0.66 1.30	2.72	100
Goodwyn GW [7] (Australia)	11.3	75	1.27 2.32	2.72	200
Ledge Point LP [7] (Australia)	1.8	75	0.90 1.21	2.76	200
Playa Santa [8] (Puerto Rico)	2.8	60	0.80 1.22	2.75	100
Cabo Rojo	1.8	62 77	1.51 2.07	2.84	100 200

Las arenas escogidas tuvieron distribuciones granulométricas tanto bien como mal gradadas,

tamaños máximos entre 0.85 y 4.75 mm (tamices No 20 y No 4), gravedades específicas ( $G_s$ ) entre 2.61 y 2.79, y relaciones de vacíos máximas ( $e_{max}$ ) entre 1.21 y 2.45. Las muestras fueron preparadas con densidades relativas ( $D_r$ ) de 60, 65 y 75% y consolidadas isotrópicamente bajo esfuerzos efectivos de 100 y 200 kPa.



**Figura 1.** Distribución granulométrica de algunos estudios previos de licuación sobre arenas calcáreas

## 4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

### 4.1. Descripción de la arena de Cabo Rojo

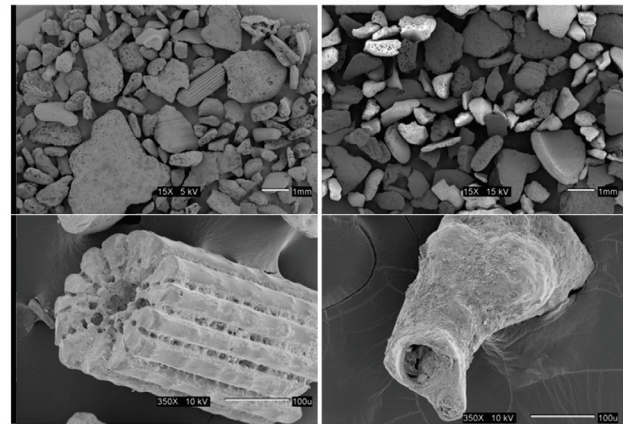
La arena calcárea investigada fue extraída de la Playa Puerto Real en Cabo Rojo al suroeste de Puerto Rico. Esta arena es de color habano a amarillo claro, pobremente gradada, con tamaño máximo  $\frac{1}{4}$ "", con granos sub-angulares a angulares, de tamaño fino a medio y alta porosidad interna.

### 4.2. Caracterización mineralógica

El estudio mineralógico de la arena calcárea de Cabo Rojo consistió en medir el contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el cual es el principal parámetro para definir la naturaleza calcárea de una arena. La medida de  $\text{CaCO}_3$  se realizó mediante dos métodos diferentes: análisis termo-gravimétrico (ATG) y disolución en ácido clorhídrico (HCl). El método del ATG se basa en la pérdida de masa que se espera que ocurra en una muestra de suelo que contiene carbonato de calcio, cuando se somete a altas temperaturas hasta de  $950^\circ\text{C}$ ; mientras que la disolución en HCl descompone todos los materiales carbonatos y otros constituyentes menores. El contenido de ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenido para la arena calcárea de Cabo Rojo mediante estos dos

métodos fue superior al 91%.

También se tomaron micrografías mediante un microscopio electrónico de barrido. La Figura 2 ilustra micrografías tomadas sobre la arena calcárea 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.



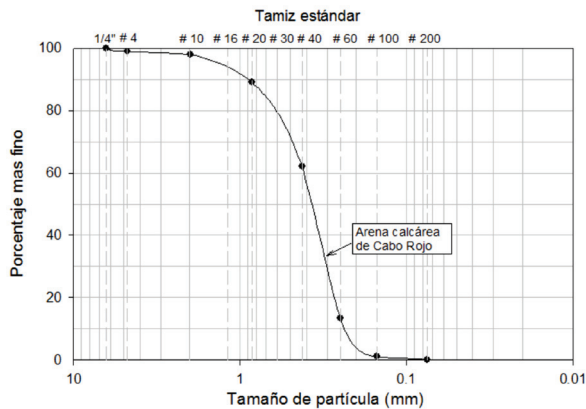
**Figura 2.** Micrografías para la arena de Cabo Rojo

### 4.3. Determinación de propiedades índice

Se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica de sólidos y relaciones de vacíos máximas y mínimas, según las normas técnicas internacionales. La Tabla 2 resume las principales propiedades índice de la arena de Cabo Rojo y la Figura 3 ilustra su distribución granulométrica.

**Tabla 2.** Principales propiedades índice para la arena de Cabo Rojo

Parámetro	Arena Cabo Rojo	Norma ASTM
$D_{10}$	0.24	
$D_{30}$	0.30	
$D_{50}$	0.37	ASTM
$D_{60}$	0.41	D422-63 [9]
$C_u$	1.75	
$C_c$	0.94	
$G_s$	2.84	ASTM D854 [10]
$\gamma_{min}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	9.1	ASTM
$e_{max}$	2.07	D4254 [11]
$\gamma_{max}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	11.1	JIS A1224
$e_{min}$	1.51	[12]



**Figura 3.** Distribución granulométrica para la arena de Cabo Rojo

Debido a la composición mineralógica de las arenas calcáreas, en la Tabla 2 se puede observar la alta gravedad específica de la arena de Cabo Rojo (2.84), lo cual coincide con lo indicado en la Tabla 1, donde arenas calcáreas de otros lugares del mundo presentaron valores de gravedad específica hasta de 2.79, mayores al valor típico de 2.65 para arenas terrígenas. A causa de su porosidad interna, la arena calcárea de Cabo Rojo presentó grandes relaciones de vacíos ( $e_{max}$ ) hasta de 2.07, similar a lo indicado en la Tabla 1, donde se presentan altos valores de  $e_{max}$  con un rango entre 1.21 y 2.45 para arenas calcáreas de otros lugares del mundo.

#### 4.4. Ensayos triaxiales cíclicos

La resistencia a licuación de las arenas calcáreas de Cabo Rojo fue evaluada a partir de ensayos triaxiales cíclicos no drenados bajo esfuerzo controlado, según la metodología de la Norma ASTM-D5311 [13]. Las muestras tuvieron una altura y un diámetro promedio de 101.6 y 50.8 mm respectivamente. Todas las muestras se prepararon usando el método de apisonamiento húmedo (“moist tamping”), que consiste en compactar muestras húmedas dentro de un cilindro metálico recubierto con una membrana de látex y sometido a vacío para garantizar la forma y consistencia de la muestra.

La arena se colocó en cinco capas usando el procedimiento de sub-compactación [14]. Este método sugiere 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%.

Las densidades relativas ( $D_r$ ) al final de la preparación de la muestra variaron entre 20 y 78%. Posteriormente, las muestras fueron saturadas y consolidadas isotrópicamente bajo tres niveles diferentes de esfuerzos efectivos (50, 100 y 200 kPa), lo que ocasionó que los especímenes experimentaran un incremento en las densidades relativas hasta valores entre el 25 y el 83%.

Después de la consolidación de 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. En la siguiente sección se presentan más detalles de la fase cíclica de los ensayos.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección presenta el resumen y discusión de los resultados de resistencia a licuación de la arena calcárea de Cabo Rojo mediante ensayos triaxiales cíclicos, así como su comparación con resultados de otras arenas calcáreas del mundo probadas bajo condiciones de ensayo similares. La Figura 4 presenta resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico no drenado, bajo esfuerzo controlado, sobre una muestra consolidada isotrópicamente. Esta figura muestra tres gráficas, las cuales ilustran el esfuerzo desviador, el exceso de presión de poros y la deformación axial, en función del tiempo.

En un ensayo triaxial cíclico bajo esfuerzo controlado se aplican esfuerzos desviadores cíclicos constantes positivos y negativos  $\pm \sigma_d$  como una función del tiempo (ver Figura 4a). Para el caso de la arena de Cabo Rojo, se aplicó un ciclo de carga cada segundo (frecuencia usada= 1 Hz). Durante la carga cíclica ocurren dos fenómenos determinantes en la medida de la resistencia a licuación: i) el exceso de presión de poros se incrementa hasta que iguala el esfuerzo efectivo de consolidación (ver Figura 4b); ii) la deformación axial, que es baja al inicio de la prueba, se incrementa rápidamente (ver Figura 4c) cuando la muestra se aproxima a licuación. Debe resaltarse que en algunos casos, cuando la combinación de densidad relativa y relación de esfuerzos cíclicos no ocasionan el fenómeno de licuación en las muestras, ni las

presiones de poros se incrementan hasta igualar el esfuerzo efectivo de consolidación, ni ocurren grandes deformaciones axiales.

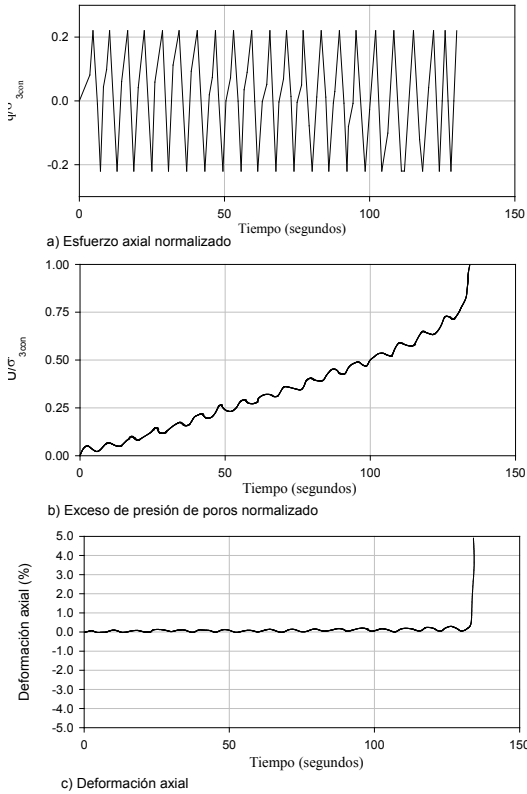


Figura 4. Resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico no drenado bajo esfuerzo controlado

5.1. Curvas de resistencia cíclica (CRR<sub>TX</sub>)

En esta investigación, la resistencia a licuación se presenta en términos de curvas de relación de esfuerzo cíclico (CSR), como una función del número de ciclos para producir licuación. La relación de esfuerzo cíclico (CSR) fue definida por Seed and Idriss (1971) [15], como el cociente entre el esfuerzo cortante generado por el sismo o vibración ( $\tau$ ) y el esfuerzo vertical efectivo ( $\sigma'_{vo}$ ).

Debido a que estas curvas representan la capacidad del suelo para resistir licuación, suelen denominarse curvas de resistencia cíclica (CRR<sub>TX</sub>), para diferenciarlas de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) que podría ser generada por un terremoto o vibración. El subíndice (TX) indica que las curvas fueron obtenidas a partir de ensayos triaxiales cíclicos. En ensayos triaxiales cíclicos,

la relación de esfuerzo cíclico se define como la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y el esfuerzo efectivo de consolidación de la muestra ( $\sigma'_{3cons}$ ). Debido a que en un ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente, el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) sobre el plano de interés es igual a la mitad del esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d$ ), la CRR<sub>TX</sub> se expresa como se indica en la Ecuación 1:

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

CRR<sub>TX</sub>: relación de resistencia cíclica en el ensayo triaxial

$\sigma_d$ : esfuerzo desviador

$\sigma'_{3cons}$ : 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 esfuerzo cíclico. 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 ( $\Delta U$ ) es igual al esfuerzo efectivo de consolidación ( $\sigma'_{3cons}$ )), o cuando la doble amplitud de la deformación axial ( $e$ ) fue de  $\pm 5\%$ . El programa sistemático de ensayos utilizado permitió obtener curvas de resistencia cíclica para diferentes densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación. La Figura 5 presenta un resumen de todas las curvas de resistencia cíclica obtenidas en esta investigación para la arena calcárea de Cabo Rojo. Se realizaron ocho curvas de resistencia cíclica, de las cuales, seis tuvieron un comportamiento contráctil según su posición con respecto a la línea de estado crítico, determinada como se indica en [16].

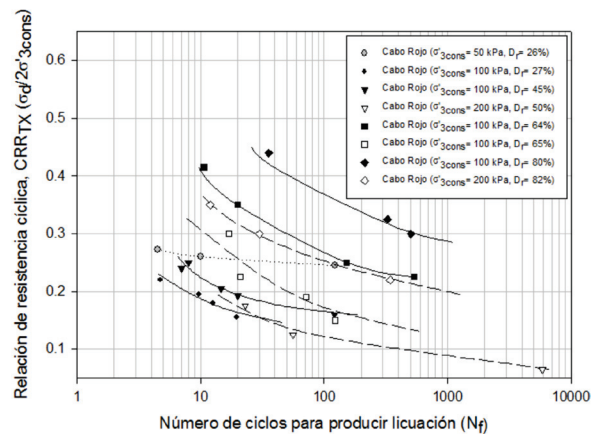


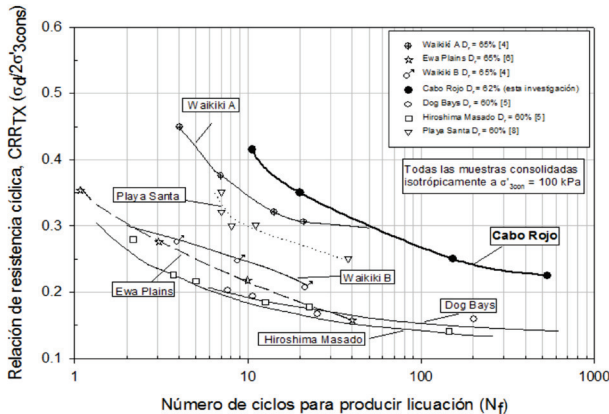
Figura 5. Curvas de resistencia cíclica para la arena calcárea de Cabo Rojo

**5.2. Comparación de curvas  $CRR_{TX}$  para la arena de Cabo Rojo con otras arenas calcáreas**

La resistencia a licuación de la arena calcárea de Cabo Rojo se comparó con investigaciones realizadas sobre arenas calcáreas de otros lugares del mundo. La comparación se realizó para dos grupos: i) muestras con densidades relativas entre 60 y 65% consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa; y ii) muestras con densidades relativas entre 75 y 77% consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 200 kPa.

La Figura 6 ilustra curvas de comparación de resistencia cíclica para muestras en estado medio-denso con densidades relativas entre 60% y 65% y consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa. Se compararon los resultados de las arenas de Cabo Rojo con los de seis arenas procedentes de Estados Unidos, Irlanda, Japón y Puerto Rico.

En la Figura 6 se puede observar la amplia variación en la resistencia a licuación de las arenas calcáreas. En esta figura también se evidencia que la arena de Cabo Rojo tuvo mayor resistencia a licuación que las otras arenas calcáreas, para esta condición similar de ensayo.



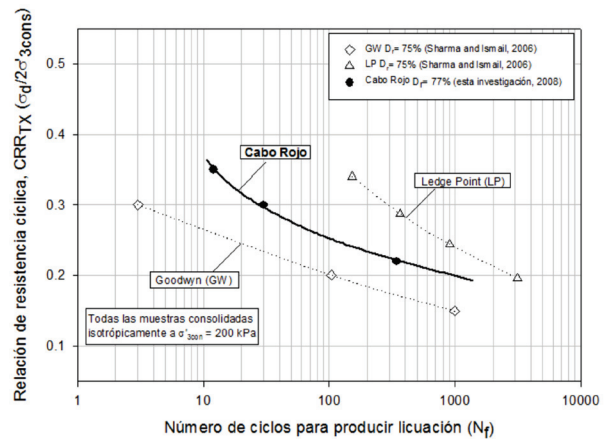
**Figura 6.** Comparación de curvas de resistencia cíclica, ( $\sigma'_{3cons} = 100$  kPa;  $D_r = 60-65\%$ )

La mayor resistencia a licuación de la arena de Cabo Rojo se evidenció a partir de curvas de resistencia cíclica más altas para esta arena, con relaciones de resistencia cíclica hasta de dos o tres veces mayores que las de otras arenas calcáreas, para un mismo número de ciclos de esfuerzo.

La Figura 7 ilustra curvas de comparación de resistencia cíclica para muestras en estado denso con densidades relativas entre 75% y 77% y consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 200 kPa. Se comparó la arena de

Cabo Rojo con dos arenas procedentes de Australia. En la Figura 7 también se puede observar una importante variación en la resistencia a licuación de las arenas comparadas. La arena calcárea de Cabo Rojo tuvo una resistencia intermedia entre las dos arenas de Australia, mientras que la arena Ledge Point (LP) presentó la mayor resistencia a licuación, bajo esta condición de análisis.

En las Figuras 6 y 7 se puede observar la amplia variación en la resistencia a licuación de arenas calcáreas, cuando son ensayadas bajo condiciones similares. Las relaciones de resistencia cíclica pueden ser hasta tres veces mayores para un mismo número de ciclos de esfuerzo, para diferentes arenas.



**Figura 7.** Comparación de curvas de resistencia cíclica, ( $\sigma'_{3cons} = 200$  kPa;  $D_r = 75-77\%$ )

A partir de las Figuras 6 y 7, y según las propiedades índice de las arenas calcáreas indicadas en la Tabla 1, se puede inferir preliminarmente que las arenas calcáreas de gradación uniforme (valores de  $C_u$  menores) y con mayores valores de gravedad específica ( $G_s$ ), parecen tener mayor resistencia a licuación que aquellas arenas calcáreas con una granulometría más distribuida y valores más bajos de gravedad específica. Las arenas calcáreas de Ledge Point, Cabo Rojo y Waikiki A, tuvieron las mayores resistencias a licuación y las propiedades índice anteriormente mencionadas.

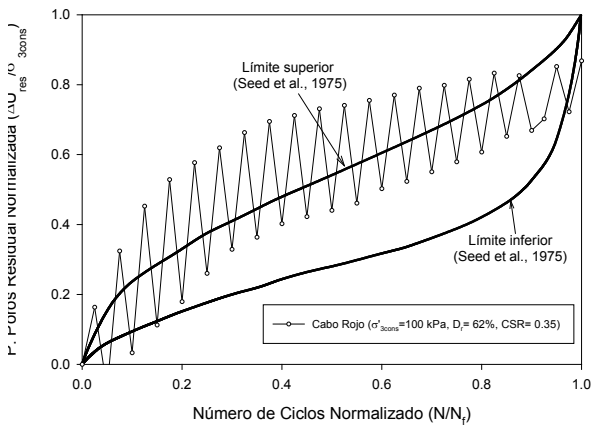
**5.3. Comparación de la generación de excesos de presión de poros de las arenas de Cabo Rojo con el rango propuesto por Seed et al. (1975) [1]**

Durante la fase de esfuerzo cíclico, debido a que no se permite el drenaje de la muestra, se generan excesos de presión de poros, que pueden llegar a igualar el

esfuerzo efectivo de consolidación con el que inicia la fase cíclica, momento en el cual ocurre el fenómeno de licuación. La forma como se generan estos excesos de presión de poros depende de la naturaleza y propiedades particulares de los granos de la arena.

Seed et al. (1975) [1] reportaron un rango típico que permite estimar la generación de excesos de presión de poros debido a carga cíclica, en arenas limpias de sílice. El rango propuesto se basó en resultados de laboratorio por Lee and Albaisa (1974) [17], a partir de ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras reconstituidas de arenas de grano uniforme. Los resultados cayeron dentro de una banda estrecha, la cual posteriormente fue publicada por Seed et al. [1].

La Figura 8 compara los resultados obtenidos para la arena calcárea de Cabo Rojo con el rango propuesto por Seed et al. [1], para un estado medio-denso ( $D_r = 62\%$ ) y un esfuerzo efectivo de consolidación de 100 kPa. En esta figura, el eje de las ordenadas corresponde al exceso de presión de poros residual ( $\Delta U_{res}$ ), normalizado respecto al esfuerzo efectivo de consolidación ( $\sigma'_{3cons}$ ). El exceso de presión de poros residual ( $\Delta U_{res}$ ), representado en las ordenadas, se define como el valor del exceso de presión de poros cuando el esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d$ ) es igual a cero durante cada ciclo de carga [18]. 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.,  $N/N_p$ ).



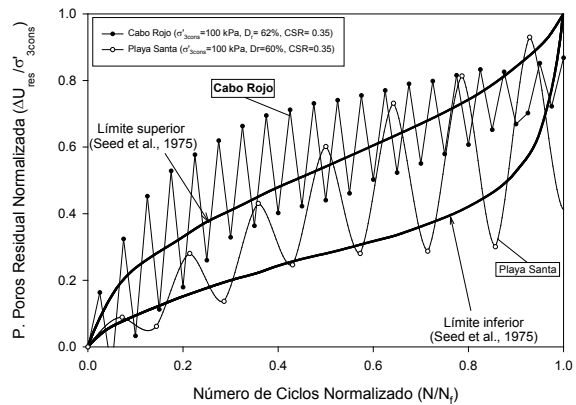
**Figura 8.** Comparación de generación de excesos de presión de poros con el rango de Seed et al. [1], ( $\sigma'_{3cons} = 100$  kPa,  $D_r=62\%$ ,  $CSR=0.35$ )

En la Figura 8 se puede observar que la arena de Cabo Rojo tiende más hacia el límite superior del rango

sugerido y por lo general excede este límite, lo que indica que esta arena puede sostener excesos de presión de poros más cercanos al esfuerzo efectivo de consolidación, antes de que se presente licuación. En la Figura 8 también se notan fluctuaciones marcadas en los excesos de presión de poros entre cargas cíclicas, indicando una especie de relajación entre ciclos de carga.

**5.4. Comparación de los excesos de presión de poros de la arena de Cabo Rojo con otra arena calcárea**

La tendencia en la generación de excesos de presión de poros para la arena de Cabo Rojo en estado medio-denso, se comparó también con la de la arena de Playa Santa [8], como se ilustra en la Figura 9. Se compararon estas dos muestras debido a que además de utilizar densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación similares, también utilizaron la misma relación de esfuerzo cíclico ( $CSR=0.35$ ). En la Figura 9, el eje de las ordenadas corresponde al exceso de presión de poros residual ( $\Delta U_{res}$ ) normalizado respecto al esfuerzo efectivo de consolidación ( $\sigma'_{3cons}$ ), y el eje de las abscisas indica el número de ciclos normalizado respecto al número de ciclos requeridos para producir licuación.



**Figura 9.** Comparación de excesos de presión de poros con el rango de Seed et al. y con arena Playa Santa, ( $\sigma'_{3cons} = 100$  kPa,  $D_r=60\% - 62\%$ ,  $CSR=0.35$ )

En la Figura 9 se puede observar que la arena de Playa Santa también presenta fluctuaciones marcadas en la generación de excesos de presión de poros. Ambas curvas se salen en varios puntos del rango propuesto

por Seed et al. [1], con tendencia hacia el límite superior para el caso de las arenas de Cabo Rojo y hacia el límite inferior para las arenas de Playa Santa.

Las grandes fluctuaciones en los excesos de presión de poros durante la fase cíclica presentadas por las arenas calcáreas, podrían ser atribuidas a un reajuste de las partículas, o a deformación individual de sus granos, debido a sus características específicas como granos con formas únicas, rugosidad superficial, alta porosidad interna, entre otras.

## 6. CONCLUSIONES

Las arenas calcáreas comparadas presentaron un amplio rango de variación en la resistencia a licuación, cuando fueron probadas bajo densidad relativa y esfuerzos efectivos de consolidación similares.

Para muestras en un estado medio denso ( $D_r = 60\% - 65\%$ ), consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa, la arena de Cabo Rojo tuvo mayor resistencia a licuación que las seis arenas con las que fue comparada. Para muestras en un estado denso ( $D_r = 75\% - 77\%$ ), consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 200 kPa, la arena de Cabo Rojo tuvo una resistencia intermedia entre las dos arenas calcáreas con las que fue comparada.

Para las arenas calcáreas comparadas, la mayor resistencia a licuación la presentaron muestras con mayores gravedades específicas y con una gradación más uniforme. Esta tendencia se evidenció en ambas condiciones comparadas, para esfuerzos efectivos de consolidación de 100 y 200 kPa, donde las arenas de Cabo Rojo, Waikiki A y Ledge Point tuvieron las mayores resistencias a licuación, las mayores gravedades específicas y los menores coeficientes de uniformidad.

Las curvas de generación de excesos de presión de poros para la arena de Cabo Rojo y para otra arena calcárea comparada, presentaron fluctuaciones marcadas entre cargas cíclicas, indicando cierta relajación de los excesos de presión de poros entre ciclos de carga. Según la comparación con la tendencia típica para arenas de sílice propuesta por Seed et al. [1], la arena calcárea de Cabo Rojo puede sostener presiones de poros más cercanas al esfuerzo efectivo de consolidación, antes de que se presente licuación.

La forma y alta rugosidad de los granos de las arenas calcáreas podrían ser las responsables de su tendencia particular en la generación de excesos de presión de poros, debido a que se podrían presentar un reajuste o deformaciones elásticas individuales de las partículas, las cuales se podrían recuperar durante la fase de extensión de la carga cíclica.

Los anteriores planteamientos en cuanto a posibles causas de la mayor resistencia a licuación y tendencias en la generación de excesos de presión de poros son sólo hipótesis con base en el comportamiento visto en los ensayos cíclicos y en las características de los granos de las arenas calcáreas. Deberían hacerse ensayos cíclicos simultáneos para diferentes arenas calcáreas, incluidas arenas de la costa norte colombiana, haciendo énfasis en la gravedad específica y en el coeficiente de uniformidad. También se podrían incluir análisis de micro-mecánica para evaluar la compresión y deformación individual de los granos, al igual que modelar la línea de inestabilidad según lo sugerido por [19], con el fin de comparar las diferentes tendencias.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al profesor Miguel Pando, consejero graduado y presidente de su comité de tesis de maestría, al igual que a la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez.

El autor también reconoce y agradece el apoyo financiero recibido de: Programa de Movimientos Fuertes de Puerto Rico, Programa Sea Grant de Puerto Rico, y Programa NEHRP del USGS de los Estados Unidos.

## REFERENCIAS

- [1] Seed, H B., Martin, P. P. and Lysmer, J., The Generation and Dissipation of Pore Water Pressures during Soil Liquefaction. University of California, Berkeley, CA, Tech. Rep. UCB-EERC-75/26, Aug. 1975.
- [2] Silva, A. J., Marine Geomechanics: Overview and Projections, In: Deep-sea Sediments: Physical and Mechanical Properties, (Ed. A.L. Inderbitzen), Plenum Press New York and London, pp. 45-76, 1974.
- [3] Catano, J. and Pando, M. A., Static and Dynamic Properties of a Calcareous Sand from Southwest Puerto



- Rico. Proc. Advances in Analysis, Modeling and Design, ASCE. West Palm Beach, FL, pp. 842-851, February 2010.
- [4] Flynn, W. L., A Comparative Study of Cyclic Loading Responses and Effects of Cementation on Liquefaction Potential of Calcareous and Silica Sands [MS Thesis]. Manoa, HI: University of Hawaii, 1997.
- [5] Hyodo, M., Hyde, A. F. L. and Aramaki, N., Liquefaction of crushable soils, *Geotech.*, Vol. 48 (4), pp. 527-543, 1998.
- [6] Morioka, B. T. and Nicholson, P. G., Evaluation of the Liquefaction Potential of Calcareous sand. Proc. 10th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle, WA, pp. 494-500, May 2000.
- [7] Sharma, S.S. and Ismail, M. A., Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 132 (12), pp. 1581-1591, 2006.
- [8] Lavielle, T. H., Liquefaction Susceptibility of Uncemented Calcareous Sands from Puerto Rico by Cyclic Triaxial Testing [MS Thesis]. Blacksburg, VA: VirginiaTech, 2008.
- [9] ASTM International. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Standard ASTM D 422-63, 2007.
- [10] ASTM International. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, Standard ASTM D 854, 2010.
- [11] ASTM International. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, Standard ASTM D4254, 2006.
- [12] Japanese Industrial Standard. Test Method for Minimum and Maximum Densities of Sands, Standard JIS A1224, 2009.
- [13] ASTM International. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, Standard ASTM D 5311-92, 2004.
- [14] Ladd, R. S., Preparing test specimens using undercompaction, *Geotech. Test. J.*, Vol. 1 (1), pp. 16-23, 1976.
- [15] Seed, H. B. and Idriss, I. M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. Soil Mech. Found. Div.*, Vol. 97 (9), pp. 1249-1273, 1971.
- [16] Sandoval, E., Pando, M. A. and Olgun, C.G., Liquefaction Susceptibility of a Calcareous sand from Southwest Puerto Rico. Proc. 5<sup>th</sup> Internacional Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 5ICEGE. Santiago de Chile, Chile, January 2011.
- [17] Lee, K. L. and Albaisa, A., Earthquake induced settlements in saturated sands, *J. Geotech. Eng. Div.*, Vol. 100 (4), pp. 387-406, 1974.
- [18] Seed, H. B. and Lee, K. L., Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, *J. Soil Mech. Found. Div.*, Vol. 92 (3), pp. 25-58, 1966.
- [19] Ramos, A. M., Andrade, J. E. and Lizcano, A., Numerical simulation of the instability line based on laws of physics, *DYNA*, No. 170, pp. 24-30, 2011.