

RESISTENCIA A LICUACIÓN DE LA ARENA TERRÍGENA DE AGUABLANCA EN SANTIAGO DE CALI

LIQUEFACTION RESISTANCE OF AGUABLANCA TERRIGENOUS SAND IN SANTIAGO DE CALI

EIMAR SANDOVAL-VALLEJO

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

WILMER CAMPAÑA-DIAZ

Ingeniero civil, Grupo de Investigación G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia, wilmer.campana@correounivalle.edu.co

ALEJANDRO CRUZ-ESCOBAR

M.Sc. Grupo de Investigación G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia, alejandro.cruz@correounivalle.edu.co

Recibido para revisar Enero 25 de 2013, aceptado Julio 3 de 2013, versión final Julio 15 de 2013

RESUMEN: La zona nororiental de Santiago de Cali/Colombia contiene abundantes depósitos de arenas terrígenas. Estas arenas se encuentran con bajo contenido de finos, muy baja compacidad, y con niveles freáticos altos debido a su cercanía a las riveras del río Cauca. Estas características, junto con la alta sismicidad de la ciudad, hacen que el fenómeno de licuación sea un riesgo inminente en la zona. Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental llevado a cabo para evaluar la resistencia a licuación de la arena terrígena de Aguablanca en Santiago de Cali. El programa experimental involucró caracterización mineralógica, propiedades índice y ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstruidas consolidadas isotrópamente. Se realiza una comparación con investigaciones realizadas sobre otras arenas de sílice, y sobre una arena calcárea. Los resultados mostraron una muy baja resistencia a licuación de las arenas del sector de Aguablanca con respecto a las demás, cuando fueron probadas bajo condiciones similares.

PALABRAS CLAVE: arenas terrígenas, densidad relativa, ensayos triaxiales cíclicos, resistencia a licuación.

ABSTRACT: The northeastern of Santiago de Cali contains abundant terrigenous sands deposits. These sands are with low fine content, in a loose state, and with high water table levels, due to its proximity to the banks of the Cauca River. These characteristics, and the high seismicity of the city, make the liquefaction phenomenon an imminent risk in the area. This paper presents the results of an experimental study carried out to evaluate the liquefaction resistance of Aguablanca terrigenous sands in Santiago de Cali. The experimental program included mineralogical characterization, index properties, and undrained cyclic triaxial tests on isotropically consolidated reconstituted samples. A comparison with researches conducted on others silica sands and one calcareous sand is performed. Results showed a very low liquefaction resistance of the Aguablanca sand in comparison with the other sands, when were tested under similar conditions.

KEYWORDS: terrigenous sands, cyclic triaxial tests, liquefaction resistance, relative density.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de licuación constituye uno de los problemas en la ingeniería sísmo-geotécnica, el cual se evidencia en suelos con ciertas propiedades, principalmente después de ser sometidos a cargas cíclicas como terremotos o vibraciones. El fenómeno de 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. Debido a licuación de suelos, pueden presentarse grandes asentamientos, desprendimientos laterales, fallas de taludes, y daños, incluso el colapso de estructuras.

A pesar de que la resistencia a licuación de arenas terrígenas, como las usadas en esta investigación, ha sido estudiada ampliamente en el mundo desde hace más de cuatro décadas, es necesario estudiar este fenómeno de manera local para los suelos de nuestra región, sobre los cuales se ha investigado muy poco al respecto.

El distrito de Aguablanca ubicado al nororiente de Santiago de Cali, alberga aproximadamente el 20% de la población de la ciudad. Ahí también se han ubicado estructuras indispensables y de atención a la comunidad como la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PTAR, la Planta de Potabilización de Agua de Puerto Mallarino y la Ciudadela Educativa Nuevo Latir, que ofrece servicios a cerca de 4000 beneficiarios de niveles educativos desde preescolar hasta técnico.

Aunque la comunidad geotécnica de la región y del país ha conocido sobre el posible potencial de licuación de las arenas de Aguablanca, poca investigación mediante ensayos especializados se ha llevado a cabo para estudiar este fenómeno. Los estudios realizados se han enfocado principalmente en evaluar la resistencia a licuación usando el Método Simplificado a partir del ensayo de Penetración Estándar (N) sugerido por Seed & Idriss (1971) [1], o en realizar algunos ensayos triaxiales cíclicos sin un control adecuado, y sin información detallada de los parámetros de prueba [2].

Esta investigación busca contribuir a llenar este vacío, al proponer una serie de ensayos triaxiales cíclicos para construir curvas de resistencia cíclica de la arena de Aguablanca consolidadas bajo el mismo esfuerzo efectivo, y con densidades relativas similares, extraídas en cercanías de la Planta de Potabilización de Agua de Puerto Mallarino. El programa experimental involucró caracterización mineralógica mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) con espectrometría de rayos X por energía dispersiva (EDS), determinación de las principales propiedades índice y 20 ensayos triaxiales cíclicos no drenados sobre muestras reconstruidas consolidadas isotrópamente. En los ensayos triaxiales cíclicos se utilizaron dos niveles de esfuerzo efectivo de consolidación y dos densidades relativas.

Los resultados se comparan con investigaciones realizadas sobre otras arenas en Estados Unidos y Puerto Rico, y que utilizaron también ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras probadas bajo densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación isotrópica similares.

2. ARENAS TERRÍGENAS

Los sedimentos terrígenos, que son los más abundantes en el mundo, son aquellos que se forman por la meteorización de rocas de origen no marino, i.e., rocas expuestas sobre la superficie del mar, como cristalinas, volcánicas y sedimentarias. Aunque en estos sedimentos pueden encontrarse cientos de minerales,

los minerales más comunes presentes en los sedimentos terrígenos son los silicatos, conformados por silicio (Si) y oxígeno (O) con fuertes enlaces atómicos. Los minerales silicatos más comunes incluyen cuarzo, feldespato, piroxenos, micas, anfíboles y olivinos, con predominio del cuarzo y feldespato. Estos minerales, además de la presencia del silicio (Si) y el oxígeno (O) como principales componentes, tienen una composición química similar a la del calcio (Ca), sodio (Na), hierro (Fe), aluminio (Al) y potasio (K) [3]. En los casos en que el mineral base es el dióxido de silicio (SiO₂), también conocido como cuarzo o sílice, estas arenas suelen denominarse arenas de sílice.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron comparados con resultados de investigaciones sobre arenas del mismo origen de Estados Unidos, probadas bajo condiciones similares. Para tal fin se realizó una extensa revisión de literatura y se seleccionaron estudios que utilizaron la misma metodología de prueba (i.e., ensayos triaxiales cíclicos no drenados consolidados isotrópamente), y que usaron esfuerzos de consolidación y densidades relativas similares a los empleados para la arena de Aguablanca. También se incluyeron en la comparación los resultados obtenidos por uno de los autores para una arena calcárea de Puerto Rico [6], con el fin de observar la incidencia del origen de los suelos en la resistencia a licuación.

Se obtuvo información de investigaciones realizadas sobre la arena estándar de sílice de Ottawa, la arena estándar de sílice de Monterey, la arena de sílice de Yatesville, las tres en Estados Unidos, y sobre la arena calcárea de Cabo Rojo en Puerto Rico.

La Tabla 1 presenta un resumen de las principales propiedades índice de las arenas seleccionadas para la comparación, y la Figura 1 ilustra sus curvas de distribución granulométrica. Las curvas de resistencia cíclica son presentadas 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 la arena terrígena de Aguablanca usada en esta investigación.

Las arenas comparadas tuvieron distribuciones granulométricas mal gradadas, tamaños máximos entre 0.60 mm y 6.35 mm (tamices No 30 y 1/4”), gravedades

específicas (G_s) entre 2.65 y 2.84, relaciones de vacíos mínimas (e_{\min}) entre 0.50 y 1.51, y relaciones de vacíos máximas (e_{\max}) entre 0.78 y 2.07. Las muestras fueron probadas con densidades relativas (D_r) promedio entre 43% y 70%, y consolidadas isotrópamente bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa.

Tabla 1. Resumen de algunos estudios previos de licuación de arenas con ensayos triaxiales cíclicos

Arena	C_u	D_r %	e_{\min} e_{\max}	G_s	σ'_{3con} kPa
Ottawa 20-30 [4]	1.2	50 64	0.50 0.78	2.65	100
Monterey 0/30 [5]	1.5	4364	0.63 0.82	2.65	100
Yatesville [5]	2.4	69	0.65 0.97	2.72	100
Cabo Rojo [6]	1.8	4564	1.51 2.07	2.84	100
Agua Blanca	2.4	5070	0.72 1.29	2.72	100

C_u : Coeficiente de uniformidad del suelo

En la Figura 1 se puede observar que la arena de Aguablanca tiene una distribución granulométrica bastante fina, y presenta el mayor contenido de finos de las arenas comparadas.

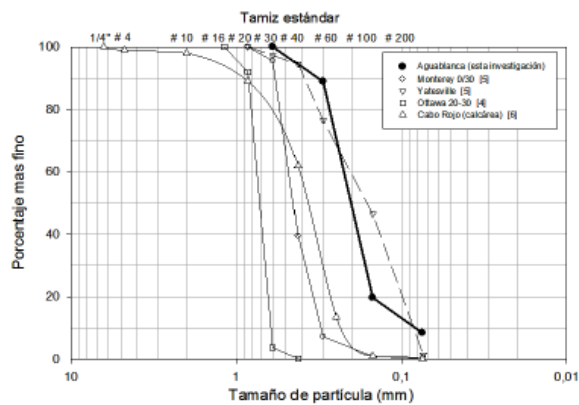


Figura 1. Distribución granulométrica de algunos estudios previos de licuación

4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

4.1. Descripción de la arena de Aguablanca

La arena usada en esta investigación fue extraída de un pequeño canal ubicado en la Planta de Potabilización

de Agua de Puerto Mallarino, ubicada sobre la llanura aluvial del río Cauca, al nororiente de Santiago de Cali. La arena de Aguablanca es pobremente gradada, con granos finos angulares de rugosidad media y de color marrón claro. Las muestras fueron extraídas a una profundidad entre 6 m y 7 m, y el nivel freático en el momento de la exploración se encontraba a 5 m de profundidad.

4.2. Caracterización mineralógica

Con el fin de conocer la composición, forma y distribución de los minerales de la arena de Aguablanca, se tomaron micrografías mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) con espectrometría de rayos X por energía dispersiva (EDS).

La Figura 2 ilustra las micrografías tomadas, en las cuales se puede observar la angularidad de sus granos con aristas pronunciadas, y su rugosidad media. En la Tabla 2 se indican los principales minerales encontrados a partir de la caracterización química, para tres rangos diferentes de tamaño evaluados, Pasa #16 - Retiene #40, Pasa #40 - Retiene #100, y Pasa # 100 (1.19-0.425 mm; 0.425-0.15 mm; menor que 0.15 mm, respectivamente). En esta tabla se puede observar que las muestras ensayadas contienen los minerales esperados para sedimentos terrígenos, al igual que el predominio del oxígeno (O) y el Silicio (Si).

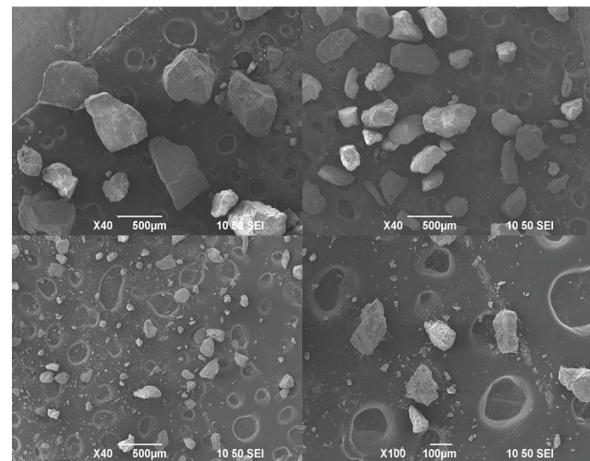


Figura 2. Micrografías para la arena de Aguablanca

Según el análisis mineralógico resumido en la Tabla 2, se confirma el origen terrígeno de la arena de Aguablanca, con cuarzo (SiO_2) como su mineral base,

debido al contenido predominante de silicio (Si) y oxígeno (O).

Tabla 2. Composición química de la arena de Aguablanca

Distribución mineralógica promedio (%)	Rango de tamaño		
	Pasa #16 Ret. #40	Pasa #40 Ret. #100	Pasa #100
Oxígeno (O)	43	41	41
Sodio (Na)	0	3	2
Magnesio (Mg)	1	3	1
Aluminio (Al)	10	12	10
Silicio (Si)	28	27	26
Potasio (K)	1	0	1
Hierro (Fe)	14	11	19
Calcio (Ca)	3	3	0
<i>TOTAL</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

4.3. Determinación de propiedades índice

Se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica de sólidos y pesos unitarios máximos (g_{max}) y mínimos (g_{min}), según las normas técnicas internacionales. La Tabla 3 resume las principales propiedades índice de la arena de Aguablanca y la Figura 3 ilustra la distribución de tamaño de sus granos.

Tabla 3. Principales propiedades índice para la arena de Aguablanca

Parámetro	Arena Agua Blanca	Norma ASTM
D_{10} (mm)	0.09	
D_{30} (mm)	0.16	
D_{50} (mm)	0.20	ASTM D422-
D_{60} (mm)	0.22	63 [7]
C_u	2.44	
C_c	1.29	
G_s	2.72	ASTM D854 [8]
g_{min} (kN/m ³)	11.91	ASTM D4254 [9]
e_{max}	1.29	
g_{max} (kN/m ³)	15.870.72	ASTM D4253 [10]
e_{min}		

C_c : Coeficiente de gradación o curvatura del suelo

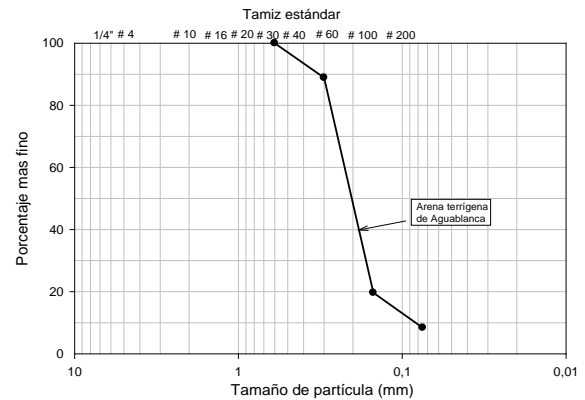


Figura 3. Distribución granulométrica para la arena de Aguablanca

4.4. Ensayos triaxiales cíclicos

La resistencia a licuación de la arena de Aguablanca fue evaluada mediante ensayos triaxiales cíclicos no drenados bajo esfuerzo controlado, de acuerdo a la metodología de la Norma ASTM-D5311 [11]. Las muestras tuvieron una altura y un diámetro promedio de 143 mm y 71.5 mm respectivamente.

Las muestras fueron preparadas usando el método de apisonamiento húmedo (“moist tamping”), en el cual se compactan 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 método de sub-compactación [12]. En este método la densidad inicial de las capas inferiores es 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 en un rango de humedades entre 7 y 9%

Las densidades relativas (D_r) al final de la preparación de la muestra variaron entre 35% y 62%. Luego las muestras fueron saturadas y consolidadas isotrópamente bajo dos niveles diferentes de esfuerzos efectivos (50 kPa y 100 kPa), lo que ocasionó que los especímenes experimentaran un incremento en las densidades relativas hasta valores entre el 44% y el 72%.

Después de haber consolidado las muestras, se esperó un tiempo de estabilización de 30 minutos antes de la aplicación de la carga cíclica. La fase cíclica se realizó bajo esfuerzo sinusoidal controlado, con una

frecuencia de aplicación de la carga (f) de 1 Hz, sin permitir el drenaje de la muestra. En la siguiente sección se presentan más detalles de la fase cíclica y de los ensayos triaxiales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección presenta el resumen y discusión de los resultados de la evaluación de la resistencia a licuación de la arena terrígena de Aguablanca a partir de ensayos triaxiales cíclicos, así como su comparación con resultados de otras arenas terrígenas de Estados Unidos, y con una arena calcárea de Puerto Rico. La Figura 4 presenta los resultados de un ensayo triaxial cíclico no drenado, bajo esfuerzo controlado, realizado sobre una muestra de la arena de Aguablanca consolidada isotrópamente bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa,

y con $D_r = 67\%$. Esta figura muestra tres gráficas, las cuales ilustran el esfuerzo desviador aplicado, el exceso de presión de poros y la deformación axial, a través del ensayo. En esta clase de ensayos, se aplica un esfuerzo desviador constante sinusoidal en ciclos positivos y negativos sin permitir el drenaje de la muestra, por lo cual el esfuerzo efectivo de consolidación, se vuelve un esfuerzo total durante la etapa de corte cíclico. En la Figura 4 se puede observar el incremento drástico en la deformación axial, cuando el exceso de presión de poros se aproxima al esfuerzo efectivo de consolidación (i.e., cuando ocurre el fenómeno de licuación). Debe resaltarse que en algunos casos, cuando los esfuerzos desviadores aplicados no son lo suficientemente grandes para generar licuación, ni el exceso de presión de poros iguala el esfuerzo efectivo de consolidación, ni la deformación axial crece de manera drástica.

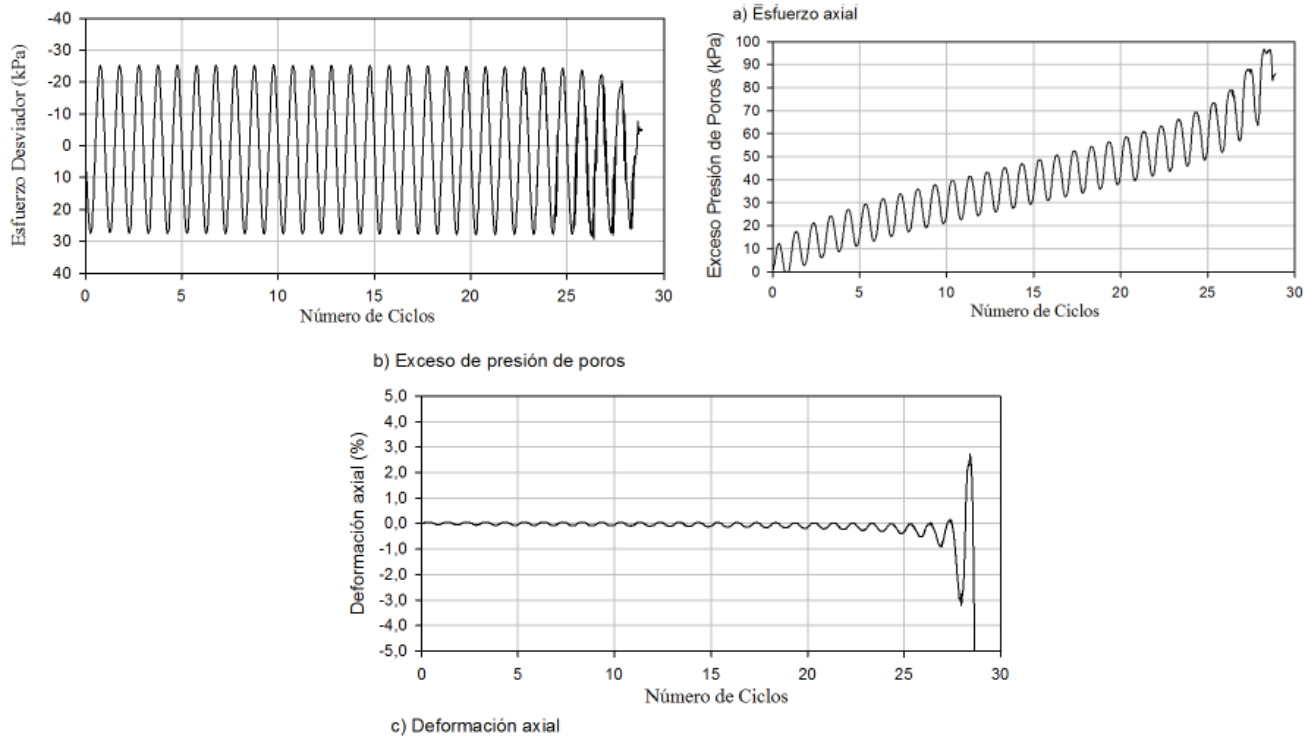


Figura 4. Resultados de un ensayo triaxial cíclico no drenado sobre la arena de Aguablanca

5.1. Curvas de resistencia cíclica (CRR_{TX})

Los resultados de esta investigación son presentados mediante curvas de relación de esfuerzo cíclico (CSR), como una función del número de ciclos de esfuerzo necesarios para producir licuación. La relación de esfuerzo cíclico (CSR) fue definida por Seed and Lee (1966) [13], como el cociente entre el esfuerzo cortante

generado por un sismo o vibración (τ) y el esfuerzo vertical efectivo (σ'_{vo}).

Debido a que las curvas obtenidas a partir de ensayos triaxiales cíclicos indican la resistencia a licuación del suelo, estas curvas se denominan curvas de resistencia cíclica (CRR_{TX}), para diferenciarlas de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) generada por el sismo o

vibración. El subíndice (_{TX}) es para indicar que las curvas de resistencia se obtuvieron a partir de ensayos triaxiales cíclicos. La relación de esfuerzo cíclico en los ensayos usados en esta investigación está definida por la relación entre el esfuerzo cortante (t) y el esfuerzo efectivo de consolidación de la muestra (σ'_{3cons}), antes de la aplicación del esfuerzo cíclico. Para esfuerzos de consolidación isotrópica, como los usados en esta investigación, el esfuerzo cortante (τ) sobre el plano de interés es igual a la mitad del esfuerzo desviador aplicado (σ_d), y por consiguiente la CRR_{TX} se expresa como se indica en la Ecuación 1:

$$CRR_{TX} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_{3cons}}$$

Donde:

CRR_{TX} : relación de resistencia cíclica en el ensayo triaxial

σ_d : esfuerzo desviador aplicado

σ'_{3cons} : esfuerzo efectivo de consolidación

En esta investigación se realizaron entre cuatro y siete ensayos triaxiales cíclicos, para construir cada curva de resistencia cíclica representativa de una densidad relativa y un esfuerzo efectivo de consolidación. En cada ensayo se usaron diferentes niveles de esfuerzo cíclico y se registró el número de ciclos necesario para producir licuación. El criterio de licuación utilizado fue el de licuación inicial [13], definido como la condición para la cual el esfuerzo efectivo es igual a cero (i.e., el exceso de presión de poros (ΔU) es igual al esfuerzo efectivo bajo el cual se consolida la muestra (σ'_{3cons})). Los ensayos programados permitieron obtener curvas de resistencia cíclica para diferentes densidades relativas y esfuerzos efectivos de consolidación.

La Figura 5 ilustra las cuatro curvas de resistencia cíclica obtenidas en esta investigación para la arena de Aguablanca. Las densidades relativas reportadas en esta investigación, corresponden a la densidad de las muestras después de la etapa de consolidación, justo antes de la fase cíclica.

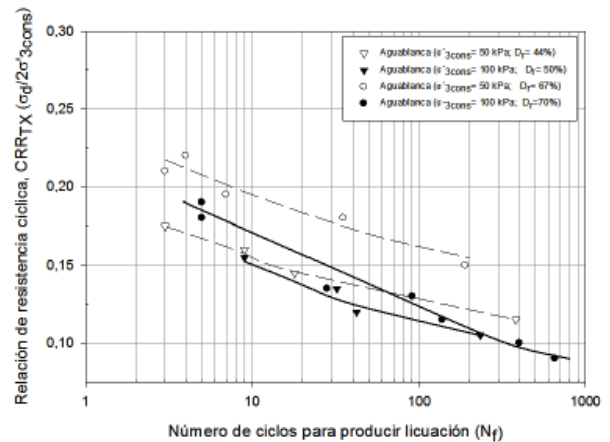


Figura 5. Curvas de resistencia cíclica para la arena de Aguablanca

5.2. Influencia del esfuerzo efectivo de consolidación en la resistencia a licuación

El esfuerzo efectivo de consolidación isotrópica en los ensayos triaxiales, que puede representar el esfuerzo efectivo al que está sometido el suelo en el campo, influye directamente en la resistencia a licuación de las arenas. Las Figuras 6 y 7 presentan curvas de resistencia cíclica para muestras en estado medio ($D_r = 44\% - 50\%$) y en estado medio denso ($D_r = 67\% - 70\%$). En cada figura se compara la resistencia a licuación de muestras con densidades relativas muy cercanas, consolidadas bajo dos esfuerzos efectivos diferentes.

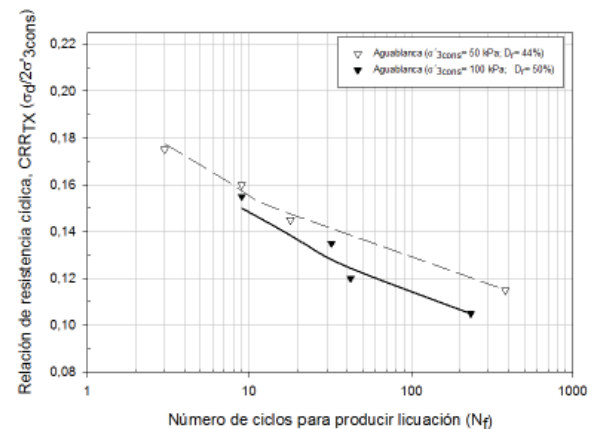


Figura 6. Comparación de curvas de resistencia cíclica en estado medio ($D_r = 44-50\%$)

En las Figuras 6 y 7 se puede observar que para densidades relativas próximas, la resistencia a licuación disminuye cuando se aumenta el esfuerzo efectivo de

consolidación. Debe resaltarse que para densidades relativas cercanas, incrementar el esfuerzo efectivo de consolidación, representa alejarse hacia la derecha o hacia arriba de la línea de estado crítico, lo que significa aumentar la susceptibilidad a licuación, debido al incremento en el valor del parámetro de estado (Y) definido por Been & Jefferies (1985) [14]. El incremento en el el parámetro de estado, implica tener un comportamiento más contráctil, o incluso pasar de un comportamiento dilatante a un comportamiento contráctil, por lo cual se disminuye la resistencia a licuación [15].

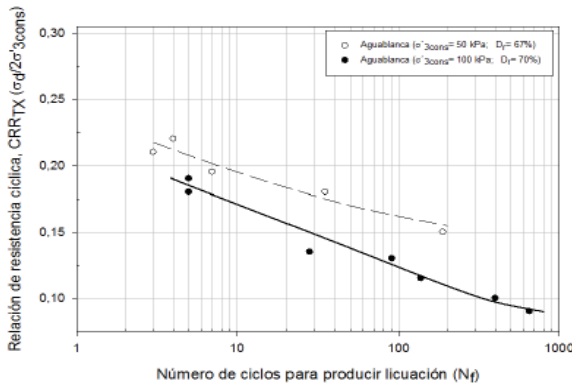


Figura 7. Comparación de curvas de resistencia cíclica en estado medio denso ($Dr= 67-70\%$)

5.3. Comparación de curvas CRR_{Tx} para la arena de Aguablanca con otras arenas

La resistencia a licuación de la arena de Aguablanca se comparó con investigaciones realizadas sobre arenas terrígenas de Estados Unidos y sobre una arena calcárea de Puerto Rico. La comparación se realizó para dos grupos de densidades diferentes, ambos consolidados bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa: i) muestras con densidades relativas entre 43% y 50%; y ii) muestras con densidades relativas entre 64% y 70%.

La Figura 8 ilustra curvas de comparación de resistencia cíclica para muestras en estado medio con densidades relativas entre 43% y 50% y consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa. Se comparan los resultados de la arena de Aguablanca con los de dos arenas terrígenas de Estados Unidos, y una arena calcárea de Puerto Rico. En la Figura 8 se puede observar la amplia variación en la resistencia a licuación de las arenas comparadas. También se

evidencia que la arena de Aguablanca tuvo menor resistencia a licuación que las otras arenas, para esta condición similar de ensayo.

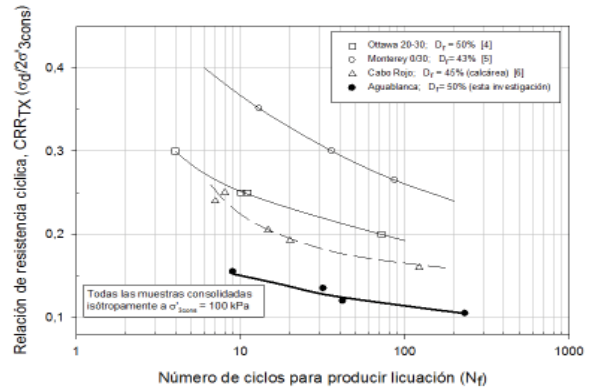


Figura 8. Comparación de curvas de resistencia cíclica, ($\sigma'3cons= 100\text{ kPa}$; $Dr= 43-50\%$)

La Figura 9 ilustra una comparación de curvas de resistencia cíclica para muestras en estado medio denso con densidades relativas entre 64% y 70%, consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa. La arena de Aguablanca fue comparada con tres arenas terrígenas de Estados Unidos y con una arena calcárea de Puerto Rico. En la Figura 9 también se puede observar la amplia variación en la resistencia a licuación de las arenas comparadas. En esta figura es más evidente la baja resistencia a licuación de la arena de Aguablanca.

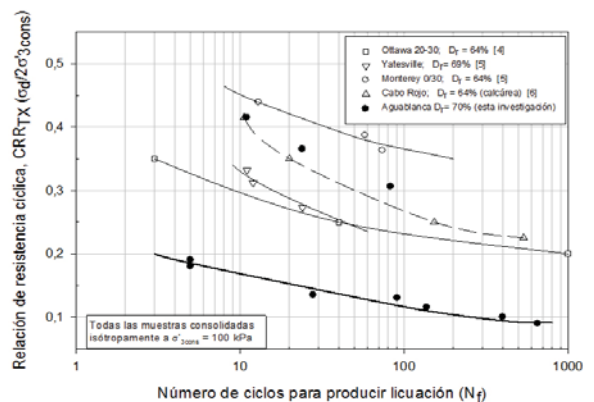


Figura 9. Comparación de curvas de resistencia cíclica, ($\sigma'3cons= 100\text{ kPa}$; $Dr= 64-70\%$)

En las Figuras 8 y 9 se puede observar la baja resistencia a licuación de la arena de Aguablanca comparada con

otras arenas del mismo origen terrígeno y de origen calcáreo, cuando son ensayadas bajo condiciones de densidad relativa y esfuerzo efectivo de consolidación similares. En estas figuras se evidencia que la arena de Aguablanca tuvo relaciones de resistencia cíclica hasta de más de tres veces menores que las de las otras arenas comparadas, para el mismo número de ciclos de esfuerzo.

5.4. Comparación de la generación de excesos de presión de poros de la arena de Aguablanca con el rango propuesto por Seed et al. (1975) [16]

Durante la fase cíclica del ensayo triaxial, 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.

Seed et al. (1975) [16] reportaron un rango típico que permite estimar la generación de excesos de presión de poros debido a carga cíclica, en arenas limpias de sílice. A pesar de que la arena de Aguablanca no se encuentra totalmente limpia (contenido de finos=8%), se comparó la tendencia en generación de excesos de presión de poros con el rango de Seed et al. (1975), sugerido a partir de resultados sobre arenas del mismo origen terrígeno. 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. [16].

La Figura 10 compara los resultados obtenidos para dos muestras de la arena terrígena de Aguablanca con el rango propuesto por Seed et al. [16]. Se presentan los resultados para muestras en estados medio y medio-denso ($D_r=50\%$ y 67% respectivamente). Las muestras comparadas fueron ambas consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa, y se utilizó la misma relación de esfuerzo cíclico, $CSR=0.135$. En esta figura, el eje de las ordenadas representa el exceso de presión de poros residual (ΔU_{res}), normalizado respecto al esfuerzo efectivo de consolidación (σ'_{3cons}). 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 al final de cada

ciclo de carga [13]. El eje de las abscisas indica el número de ciclos a lo largo del ensayo, normalizado respecto al número de ciclos requeridos para producir licuación (i.e., N/N_p).

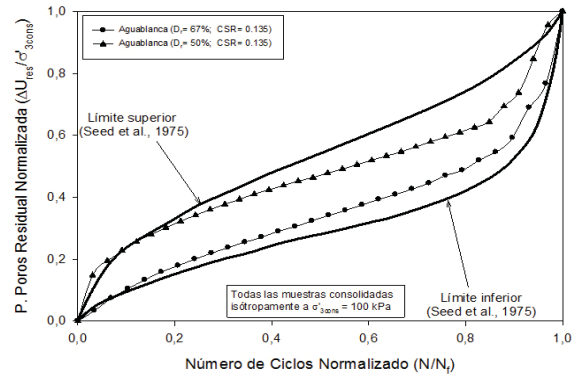


Figura 10. Comparación de generación de excesos de presión de poros con el rango de Seed et al. (1975), ($\sigma'_{3cons}=100$ kPa, $CSR=0.135$, $D_r=50$ y 67% .)

En la Figura 10 se puede observar que las dos muestras comparadas de la Arena de Aguablanca siguen la tendencia y se encuentran dentro del rango propuesto por Seed et al. (1975) para arenas limpias de sílice. Debe resaltarse que arenas de otro origen (e.g., de origen calcáreo) tienen un comportamiento diferente en la generación de excesos de presión de poros, mostrando fluctuaciones marcadas entre ciclos de carga, lo que conlleva a cierta relajación de los excesos de presión de poros entre ciclos de carga, y que hace que su comportamiento a licuación varíe considerablemente con respecto a las arenas terrígenas, como lo indicado por Sandoval (2012) [6].

6. CONCLUSIONES

La arena terrígena de Aguablanca presentó una resistencia a licuación considerablemente menor que la de las otras arenas con las que fue comparada, para condiciones de densidad relativa y esfuerzos efectivos de consolidación similares. Tanto para muestras en un estado medio ($D_r=43\% - 50\%$), como para muestras en un estado medio-denso ($D_r=64\% - 70\%$), y consolidadas bajo un esfuerzo efectivo de 100 kPa, la arena de Aguablanca tuvo una relación de resistencia cíclica de hasta más de tres veces menor que otras arenas del mismo origen terrígeno o de origen calcáreo, para el mismo número de ciclos de esfuerzo cíclico.

La baja resistencia a licuación evidenciada en las curvas de resistencia cíclica, permite inferir que usar los métodos aproximados para el análisis de resistencia a licuación de la arena de Aguablanca, los cuales son basados en resultados empíricos sobre arenas terrígenas de otros lugares del mundo, puede ser poco conservador y podría ponerse en riesgo la seguridad de las edificaciones construidas sobre esta arena.

Las dos curvas de generación de excesos de presión de poros de la arena de Aguablanca, caen dentro de la banda propuesta por Seed et al (1975) para arenas limpias de sílice. Este comportamiento similar al presentado por arenas limpias de sílice, permite inferir de manera preliminar que el contenido de finos del 8% de la arenas de Aguablanca, no afecta el drenaje de la muestra ni influye en la generación de los excesos de presión de poros, en comparación con el comportamiento que presentan las arenas limpias.

La baja resistencia a licuación de la arena de Aguablanca podría ser debida al mayor contenido de finos no plásticos comparado con las otras arenas estudiadas. Esto podría coincidir con lo expresado por algunos autores, e.g., [18] [19], entre otros, quienes han afirmado que la resistencia a licuación disminuye a medida que aumenta el contenido de finos no plásticos, debido a que se aumenta la compresibilidad de la estructura del suelo. No obstante, no hay un común acuerdo entre la comunidad científica respecto de la incidencia de finos no plásticos en la resistencia a licuación, y es necesario un estudio más detallado sobre la arena de Aguablanca, con el fin de evaluar la variación en la compresibilidad y en la resistencia a licuación de la estructura del suelo, a medida que se varía el contenido de finos no plásticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle, por haber dispuesto del personal y equipos del Laboratorio de Suelos y Pavimentos para los ensayos geotécnicos, y al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido por los servicios prestados para la caracterización mineralógica. También se reconoce el apoyo financiero brindado al estudiante de pregrado, a través del Grupo de Investigación G-7 y de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad.

REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] Alarcón, A., García, J. and Díaz, F., Comportamiento dinámico de depósitos aluviales en Colombia, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, Vol. 6 (2), pp. 215-233, 2006.
- [3] Terrigenous Sediment and Rocks. Available:<http://geology.uprm.edu/Morelock/terrigenous.htm>. [Citado 25 de enero de 2013].
- [4] Erten, D., Effect of Fine Content of Liquefaction Potential of Sands [Ph.D. Thesis]. New Brunswick, NJ: The State University of New Jersey, 1994.
- [5] Polito, P. P. and Martin, J.R., Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 127 (5), pp. 408-415, 2001.
- [6] Sandoval, E., Resistencia a licuación de arenas calcáreas, *DYNA*, No. 173-I, pp. 32-40, 2012.
- [7] ASTM International. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Standard ASTM D 422-63, 2007.
- [8] ASTM International. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, Standard ASTM D 854, 2010.
- [9] ASTM International. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, Standard ASTM D 4254, 2006.
- [10] ASTM International. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, Standard ASTM D 4253, 2006.
- [11] ASTM International. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, Standard ASTM D 5311, 2011.
- [12] Ladd, R. S., Preparing test specimens using undercompaction, *Geotech. Test. J.*, Vol. 1 (1), pp. 16-23, 1976.
- [13] 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.

- [14] Been, K. and Jefferies, M.G., A state parameter for sands, *Geotech.*, Vol. 35 (2), pp. 99-112, 1985.
- [15] Sandoval, E. A. and Pando, M.A., Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands, *Earth Science Res. J.*, Vol. 16 (1), pp. 55-63, 2012.
- [16] 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.
- [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] Lade, P. V. and Yamamuro, J.A., Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands, *Canad. Geotech. J.*, Vol. 34 (6), pp. 918-928, 1997.
- [19] Yilmaz, Y., Mollamahmutoglu, M., Ozaydin, V. and Kayabali, K., Experimental investigation of the effects of grading characteristics on the liquefaction resistance of various graded sands, *Eng. Geology.*, Vol. 100, pp. 91-100, 2008.