

Influencia de la granulometría en la licuación de arenas

Janyz Mendoza Herrera

Universidad de Costa Rica

Correo electrónico: janyz.mendoza@outlook.com

Resumen

Se determina la influencia de la granulometría en la licuación de arenas, mediante la realización de ensayos a escala reducida, variando gradaciones de arenas sueltas y saturadas. Se ejecutaron ensayos a escala reducida, utilizando una mesa vibratoria, la cual simulaba las ondas de un sismo. Tras la aplicación de vibración se observó si el modelo de ensayo sufrió licuación, para luego determinar cualitativamente el efecto granulométrico (mal, medianamente y bien gradado) sobre la licuación. Se concluyó que las arenas sueltas bien gradadas atenúan el fenómeno de licuación; mientras que las arenas sueltas, uniformes y finas son potencialmente licuables. Por otro lado las arenas sueltas medianamente gradadas, aminoraron el fenómeno de licuación.

Palabras claves: GRANULOMETRÍA, ARENAS, LICUACIÓN, SISMOS, ESCALA REDUCIDA

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se determina la influencia de la granulometría de arenas en el fenómeno de licuación, mediante la realización de ensayos a escala reducida. Debido a que las metodologías existentes se basan en un rango amplio en la influencia granulométrica, es importante conocer el efecto que se produce en una arena bien, medianamente o mal gradada sobre la susceptibilidad de un suelo a la licuación.

Costa Rica es un país con altos niveles de amenaza sísmica y posee zonas cuya geología muestra depósitos de arenas saturadas susceptibles a la licuación, sobre las cuales es necesario desarrollar asentamientos humanos y estructuras industriales. Por lo tanto es importante realizar investigaciones que brinden información de los suelos arenosos, los cuales son más propensos a comportarse como líquidos viscosos debido a la pérdida de resistencia al corte durante un sismo. En nuestro país se han desarrollado investigaciones sobre el fenómeno de licuación, las cuales están dirigidas principalmente a la zonificación del potencial de este fenómeno (Hernández, 2010). A partir de lo ocurrido en Limón en 1991, ingenieros geotecnistas nacionales se preocuparon por estudiar este fenómeno. Laporte, G. (1995), realizó una investigación de las metodologías analíticas y empíricas para la evaluación de licuación; Hafström, P. y Skogsberg, J. (1994), determinaron el factor de seguridad contra licuación con el método de Seed e Idriss, para diferentes sitios donde ocurrió licuación en el terremoto de Limón.

METODOLOGÍA

La metodología seguida para la elaboración del proyecto propuesto consta de tres fases que se detallan a continuación:

Fase teórica: En esta fase se realizó todo lo relacionado con la consulta bibliográfica, las respectivas investigaciones teóricas respecto al tema y al objetivo que se debe cumplir. Se investigó la influencia granulométrica en la licuación de arenas, además de la aplicación del análisis de granulometría en otras prácticas de la ingeniería civil.

Fase experimental: La fase del desarrollo experimental del trabajo inició cuando se procedió a seleccionar los materiales a ser ensayados. Una vez seleccionados los materiales, se procedió a la búsqueda y recolección de los materiales. Se utilizó arena de playa de Esterillos, Puntarenas, y arena de río de Guápiles, Limón. Para obtener diferentes variaciones de gradaciones, se mezclaron las arenas recolectadas en el laboratorio, mediante distintos porcentajes de arena de río y playa, para lograr notar la influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Para ello se realizaron en primera instancia ensayos granulométricos a las arenas recolectadas.

Una vez que los materiales fueron seleccionados y mezclados, se procedió a realizar ensayos de laboratorio para caracterizar las arenas en estudio. Las pruebas realizadas fueron: análisis granulométrico, gravedad específica y peso volumétrico. Se construyeron las respectivas curvas granulométricas para verificar que se obtuvieran diferentes gradaciones, tanto de las arenas recolectadas como de las combinaciones realizadas.

Una vez que los materiales estuvieron caracterizados, se procedió a la construcción y ejecución de los ensayos a escala reducida. Los elementos constituyentes del modelo a escala reducida fueron los siguientes: arenas con diferentes granulometrías; equipo de vibración; caja para ensayos; sobrecarga en el terreno.

El equipo de vibración utilizado en el proyecto, se encontró en las instalaciones del Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, Lanamme_UCR. El dispositivo de la mesa vibratoria genera una señal sinusoidal, y su vibrador trabajó a 3600 vibraciones por minuto. La amplitud de vibración fue ampliada y reducida por medio de un reóstato.

La caja de ensayos utilizada en el modelo reducido, está conformada por láminas de hierro cortadas y torneadas, formando una caja rígida con de dimensiones 40cm x 40 cm x 35 cm. Para simular el efecto de una estructura en el terreno se construyó una pirámide conformada por bloques de cemento de 5 cm de lado.

Una vez listo los elementos que conformaban el modelo, se introdujo la vibración mediante la mesa vibratoria. Después se observó si ocurría el fenómeno de licuación para cada material ensayado con distintas gradaciones, seguidamente se realizó lecturas de asentamientos producidos en cada sector del modelo, y se determinó el efecto o nivel de daño generado por la

licuación. Posteriormente se identificó si la granulometrías de la arena: mal, medianamente, o bien gradada, produjo o no licuación en los ensayos.

Fase de análisis: Se analizaron y compararon los resultados obtenidos, respecto a sus características granulométricas. Con el análisis y la comparación de resultados se proporcionan conclusiones y recomendaciones respecto a cómo influyó la granulometría de diferentes arenas en el fenómeno de licuación; esto mediante la utilización de los modelos a escala reducida para determinar dicho fenómeno.

EL FENÓMENO DE LICUACIÓN EN ARENAS

La licuación o licuefacción se produce cuando depósitos constituidos por materiales como arcillas saturadas muy sensibles, arenas secas sueltas y arenas saturadas (sobre todo las de baja compacidad), son afectados por el paso de ondas sísmicas, produciendo una pérdida de la resistencia al corte; comportándose así como si fuera un líquido viscoso.

Durante el paso de las ondas sísmicas, que resultan ser una fuerza cíclica sin drenaje, las arenas sueltas afectadas por el movimiento disminuyen su volumen y se produce un aumento rápido en la presión de poro. Esto a su vez produce una disminución de la resistencia al corte, lo que da origen a una reducción de la tensión efectiva (ver Figura 1).

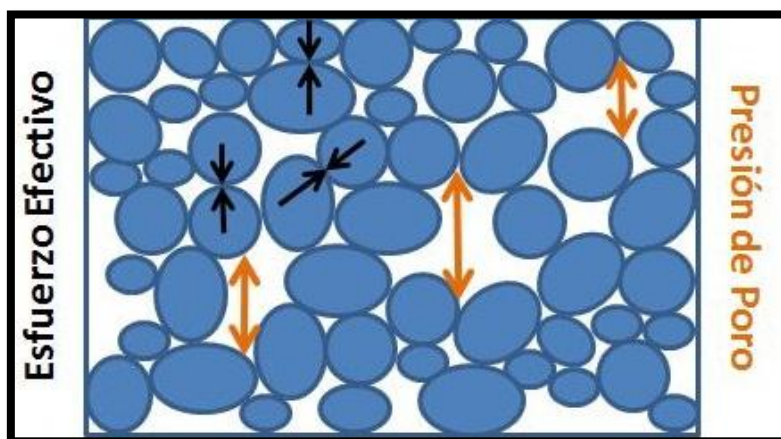


Figura1: Representación de los granos de suelo durante el fenómeno de licuación, las flechas naranjas indican el aumento de la presión de poro, y a su vez la flechas negras indican la reducción de la tensión efectiva.

Fuente: http://geopetroleo.com/983912_Geopresiones.html, modificado por Mendoza, (2012)

FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA Y DESARROLLO DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN

Existen factores importantes que están relacionados con los criterios para determinar la susceptibilidad de que un suelo se licue. Entre los principales factores que modifican y condicionan las características de licuación de suelos, el Código de Cimentaciones de Costa Rica menciona los siguientes:

Características del sismo: la posibilidad de ocurrencia de licuación o susceptibilidad de un depósito de suelo depende de los esfuerzos cortantes inducidos por el sismo, los cuales son proporcionales a las aceleraciones.

Densidad o compacidad relativa: La susceptibilidad a la licuación es menor cuanto mayor sea la compacidad relativa.

Granulometría: Las arenas son más susceptibles a la licuación cuanto más finas y uniformes.

Estratigrafía del depósito: La posibilidad de ocurrencia de la licuación es mayor cuanto menos estratificado es el suelo.

Estructura interna del suelo: Cuanto más estable por su granulometría, compacidad y forma de granos, menor la susceptibilidad a la licuación.

Plasticidad: La susceptibilidad a la licuación es menor entre mayor sea el contenido de finos plásticos.

Permeabilidad: La susceptibilidad a la licuación de un depósito es menor cuanto mayor sea su permeabilidad.

Grado de saturación: La susceptibilidad a la licuación de un suelo granular aumenta con el grado de saturación.

EFECTO DE LA GRADACIÓN SEGÚN INVESTIGACIONES DE CHANG (1987) Y KOESTER (1993)

Nien-Yiu Chang (1987), profesor de la Universidad de Colorado en Denver, realizó un reporte preliminar sobre el potencial de licuación de suelos de grano fino, en donde se indagaba el efecto de gradación de los suelos.

Según el reporte, se señala que en un estudio de susceptibilidad de licuefacción por parte de Lee y Fitton (1969) probaron arenas limpias uniformes, con tamaño de grano promedio que oscila de 0,1 a 13,4 mm y un coeficiente de uniformidad de alrededor de 1,5. También se ensayaron algunos suelos limosos.

Chang y Ko (1982) concluyen que el potencial de licuación de arenas limpias, se ve fuertemente afectado por sus características de gradación, y que el tamaño medio de grano impone un efecto mucho más fuerte que el coeficiente de uniformidad. La resistencia a la licuefacción disminuye al disminuir el tamaño de grano medio. Las arenas uniformes finas resultaron ser más vulnerables a la licuación.

La investigación de Koester, concluye que la presencia de finos de baja plasticidad no proporciona necesariamente una mayor resistencia a la licuación, y respecto al efecto de gradación de las arenas, concluye que la resistencia cíclica triaxial de especímenes bien graduado disminuyen a un valor de límite inferior, cuando se añaden finos de baja plasticidad hasta aproximadamente el 20%.

ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA (USO DE MESAS VIBRATORIAS)

Para simular el efecto de un sismo en una estructura, se cuenta con técnicas experimentales y complementarias, como el uso de mesas vibratorias. Una mesa vibratoria cuenta con una plataforma que imita un sismo o terremoto, produciendo vibraciones en uno, dos y hasta tres dimensiones.

El uso de máquinas o mesas vibratorias en las investigaciones de la ingeniería sísmica, empieza a finales del siglo XIX. La primera mesa vibratoria conocida, se construyó en Japón, y era impulsada por la fuerza de la mano, el modelo fue experimentado por el profesor Omori, de la Universidad de Tokio, quien colaboró con el profesor John Milne, para simular el comportamiento de los objetos en los terremotos reales, produciendo artificialmente la agitación de los modelos. En la Figura 2 se puede observar el prototipo de la máquina vibradora, el modelo conformado por un vagón sobre rieles, que producía un movimiento oscilatorio, a través de una rueda conectada por una manivela excéntrica.

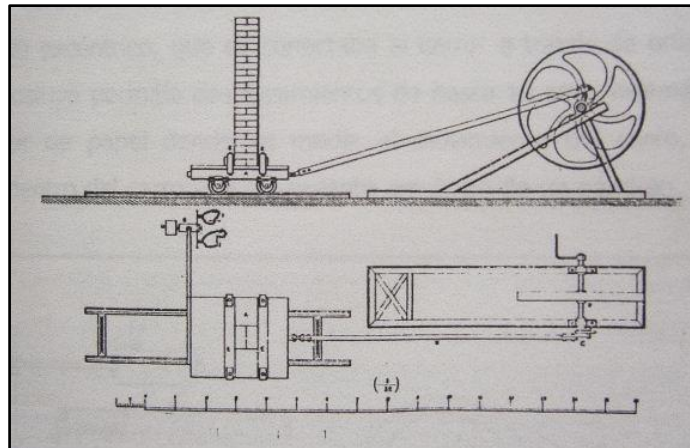


Figura 2: Diagrama de mesa vibratoria de Milne, (1890)

Fuente: Adaptado de Severn, (2010)

Las mesas vibratorias se desarrollaron con gran éxito con la llegada de las computadoras, se tuvo el control de aparatos de accionamiento electrohidráulico, el procesamiento de los registros sísmicos reales y artificiales, y la adquisición de datos y análisis.

En la actualidad existen mesas vibratorias de todos los tamaños, las cuales son utilizadas para distintos propósitos, pero no cabe duda que con el desarrollo de las mesas vibratorias en el campo de la ingeniería sísmica, se ha obtenido resultados experimentales de gran importancia, logrando representar movimientos sísmicos con gran veracidad, además de interpretar el comportamiento dinámico de los suelos.

La mesa vibratoria más grande del mundo, se encuentra instalada en la ciudad de Miki, Japón, y es conocida como E-Defense, contiene una plataforma de 15 x 20 metros, en la cual cabe un edificio de cinco pisos de altura, y es capaz de mover una estructura de 1200 toneladas, en la Figura 3 se puede observar el gran tamaño de la mesa vibratoria.



Figura 3: Mesa vibratoria “*E-Defense*” instalada en Japón, lista para ensayar una casa a gran escala.

Fuente: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, (2006)

DEFINICIÓN DE MODELO DE ENSAYO A ESCALA REDUCIDA

Los elementos determinados para el modelo a escala reducida en estudio son: arenas limpias con diferentes granulometrías, equipo de vibración, caja de ensayos, sobrecarga. Estos cuatro elementos unidos son los responsables de generar el modelo a escala reducida para evaluar la influencia de la granulometría en el fenómeno de licuación (ver Figura 4).

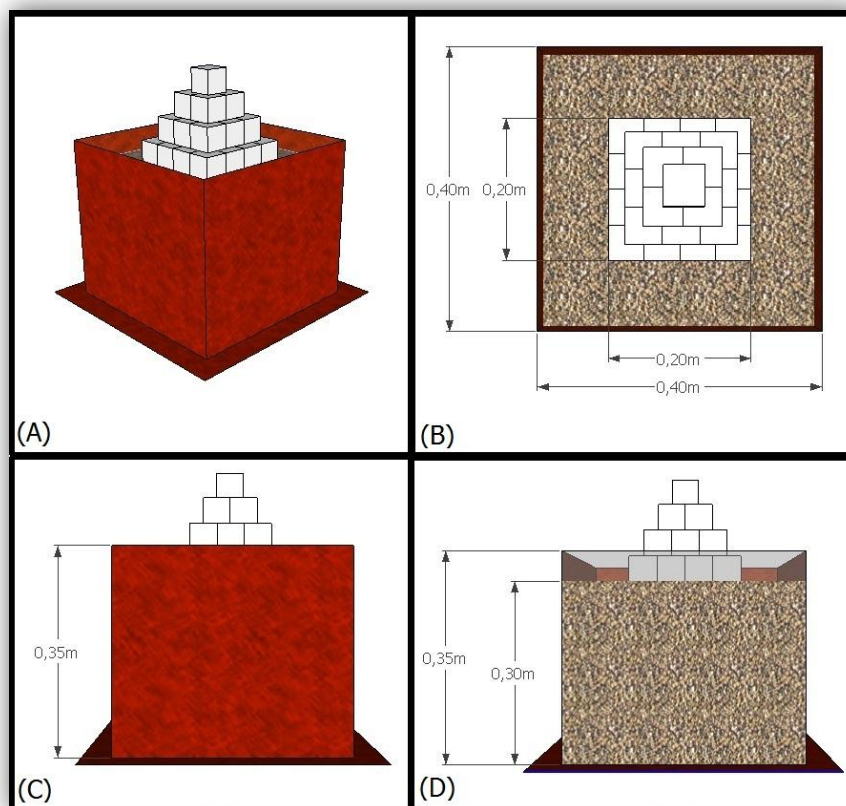


Figura 4: Diseño de modelo de ensayo, (A) vista isométrica, (B) vista superior, (C) vista en plana y (D) vista del interior

SUELOS ENSAYADOS

El suelo ensayado fundamentalmente está constituido por arenas sueltas, ya que el estudio se basa en determinar la influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Como primer espécimen se seleccionó arena de playa ya que generalmente su gradación es mala, y por otro lado se escogió arena de río, ya que su granulometría suele ser bien gradada. Teniendo los dos extremos de gradaciones se mezclaron en diferentes proporciones las arenas seleccionadas para obtener diferentes granulometrías, y así obtener gradaciones buenas, medias y malas. La arena de playa utilizada es de la localidad de Esterillos y la arena de río proveniente de Guápiles.

En el Cuadro 1 se presentan las propiedades de las arenas de río y playa ensayadas, en dicho cuadro se puede observar los resultados de Límites de Atterberg, los cuales concluyen que el porcentaje de finos pasando la malla N° 200 son no plásticos (NP).

Cuadro 1: Propiedades físicas de las arenas patrón ensayadas

Tipo de arena	γ_d^{min} (Kg/m ³)	LL	IP	% Pas. Malla N° 200	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	Clasificación
Arena de playa	1364	NP	NP	1,3	0,13	1,5	0,8	SP
Arena de río	1632	NP	NP	0,2	1,26	6,1	1	SW

COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Existen métodos conocidos para conseguir los resultados deseados de un material, en este proyecto se utilizó el método de tanteo, y el método gráfico conocido como “*método de la araña*”, los cuales fueron utilizados para lograr obtener curvas granulométricas con distintas gradaciones. En el Cuadro 2 se presentan las proporciones utilizadas, y su respectivo método aplicado para las combinaciones realizadas en los ensayos a escala reducida.

Cuadro 2: Porcentajes a utilizar en las combinaciones de arenas de los ensayos a escala reducida

Combinación	Porcentajes		Método aplicado para la combinación
	Porcentaje arena de río	Porcentaje arena de playa	
1	50%	50%	Método de tanteos
2	30%	70%	Método de la araña
3	75%	25%	Método de la araña
4	15%	85%	Método de la araña

RESULTADOS DE ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PESO VOLUMÉTRICO

Cuadro 3: Resultados de ensayos de gravedad específica (ASTM D 854-10)

Descripción	Arenas limpias		Combinaciones			
	Arena Río	Arena Playa	Comb. 50/50	Comb. 30/70	Comb. 75/25	Comb. 15/85
Gs=gravedad específica Suelo	2,74	2,80	2,77	2,79	2,77	2,79

Cuadro 4: Resultados de peso volumétrico

Ensayo	Peso Volumétrico (Kg/m ³)
Arena de Río	1632
Arena de Playa	1364
Combinación 50/50	1677
Combinación 30/70	1459
Combinación 75/25	1693
Combinación 15/85	1466

RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS

El análisis granulométrico se realizó tanto a las arenas de río y playa en estado limpio (poco a nada de finos), como en sus respectivas combinaciones. En la Figura 5 observamos la buena gradación de la arena de río, mientras que la arena de playa tiene una curva recta, lo cual representa una mala gradación.

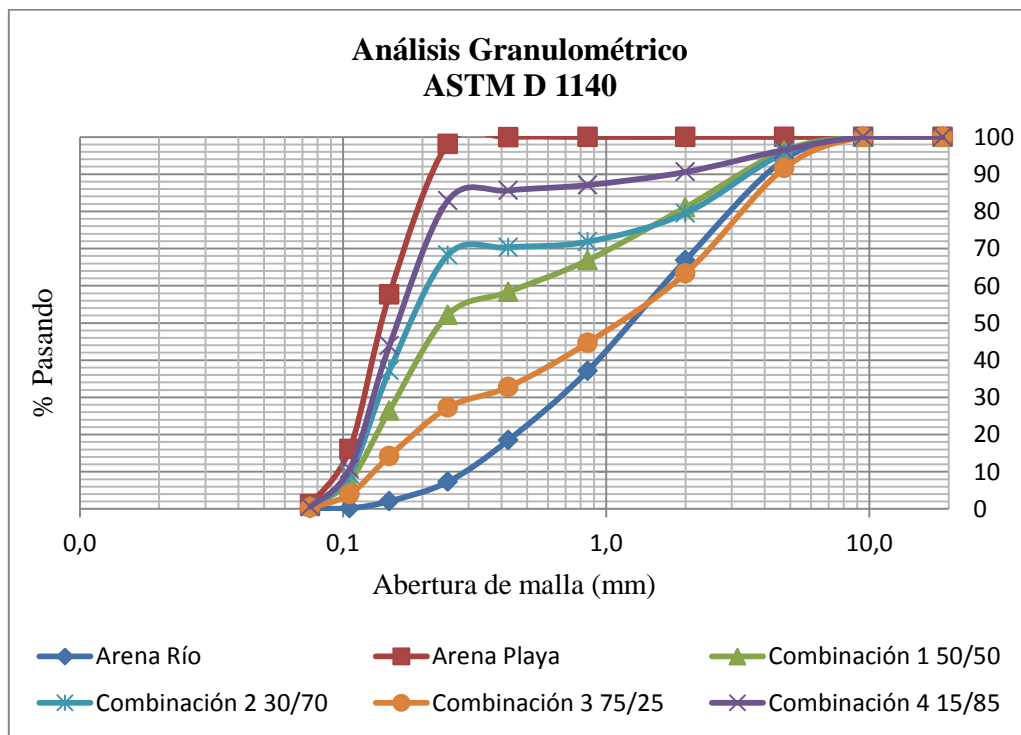


Figura 5: Curvas granulométricas a ser utilizadas en los ensayos a escala reducida

EQUIPO DE VIBRACIÓN UTILAZADO EN LOS ENSAYOS

El equipo de vibración está compuesto por una mesa vibratoria de impacto amortiguada con capacidad de carga de 136,1 Kg, generalmente este tipo de mesas se utiliza para vibrar los moldes de vigas, moldes de cilindro, productos de concreto y muestras de suelo.

La mesa en sí está compuesta por tres partes forjadas de acero, la parte superior es la cubierta o plataforma de la mesa con dimensiones de 50,8 cm x 50,8cm, en este segmento se coloca el componente a ser vibrado. Debajo de la cubierta, se encuentra el marco que la sujeta mediante apoyos de caucho, y en su parte inferior contiene un moto-vibrador electromagnético. Este vibrador es una masa centrífuga excéntrica que gira y genera una fuerza de excitación, la cual hace que oscile la mesa y el molde que se encuentra sobre ella. El equipo está empotrado en una base de concreto rígido mediante apoyos, por lo tanto este empotramiento impide que la mesa propague ondas vibratorias hacia otros elementos, regulando así la energía de vibración exclusivamente hacia la mesa. La mesa está apoyada de tal modo que la superficie principal presenta un grado de libertad (eje X), por lo tanto su movimiento esta dado en un plano básicamente horizontal.

En la Figura 6 se muestra la mesa vibratoria utilizada para los ensayos a escala reducida y la cual se encuentra en las instalaciones LanammeUCR.



Figura 6: Equipo vibratorio del LanammeUCR

CAJA DE ENSAYOS Y SIMULACIÓN DE SOBRECARGA

Para lograr mantener un estrato de suelo que pueda sufrir licuación, se cuenta con una caja metálica impermeable, que fue construida para la realización de los ensayos a escala reducida. La caja de ensayos fue construida por láminas de hierro de 2,38 mm de espesor, cortadas de

forma rectangular y torneadas de forma recta. En la Figura 4, se muestran las dimensiones de la caja utilizada para los ensayos a escala reducida. Contiene un fondo que sobresale 5 cm a cada lado, lo cual permite que sea sujeta mediante prensas en caso de movimientos extremos que pueden desplazar la mesa de manera considerable. Las paredes de la caja suministran el confinamiento adecuado al estrato de suelo ya que son totalmente rígidas, por lo cual no se presentan deformaciones.

La sobrecarga del modelo a escala reducida, está representada por una pirámide hecha a base de bloques de cemento de 5 cm de lado. Esta sobrecarga recrea una estructura colocada sobre un suelo que pueda sufrir licuación. La base tiene un área de $0,04 \text{ m}^2$ colocada en el centro del modelo, conformada así por 16 bloques de cemento, utilizando en total 30 bloques distribuidos en cuatro pisos, llegando hasta una altura de 20 cm. Se utilizaron dos tipos de bloques de cemento, debido a la disponibilidad en el laboratorio, para la base (primer piso) se utilizaron 16 bloques con un peso aproximado de 275 g cada uno, mientras que para el resto de los pisos se utilizaron 14 bloques con un peso de 240 g cada uno. En total se utilizaron 30 bloques que transmitían un peso aproximado de 7760 g.

GUÍA DE EJECUCIÓN DE ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA EN ARENAS

Se describe a continuación los pasos a realizar para la ejecución de cada ensayo a escala reducida:

1. Para la realización de los ensayos en los cuales se necesita combinar arena de río y arena de playa, se deberá pesar las cantidades de arenas según las proporciones del ensayo a ser ejecutado en base a 100 Kg, para esto se utilizan cubetas, para pesar y separar el material por ser mezclado.
2. Mezclar las arenas dosificadas en una bandeja grande, asegurándose de unir lo más perfectamente posible los materiales mezclados hasta notar uniformidad en toda la muestra de suelo. Esto se logra con la ayuda de un elemento que disperse el material como por ejemplo un palo de escoba o un cono de tránsito (ver Figura 7).
3. Seguidamente se coloca la caja de ensayo en una base firme, colocando una manguera que llegue hasta el fondo para poder saturar el material, comenzar a llenar hasta la tercera parte de la altura de la caja, depositando el material lo más sueltamente posible.
4. Proceder a abrir el grifo por el cual la manguera está conectada, el flujo de agua deberá salir de poco a poco, por lo tanto antes de llenar la caja probar el caudal con el cual sale el agua de la manguera. Si el caudal es muy vigoroso crea un hueco en el centro del material depositado, lo cual representa inconsistencia en el estrato a ser ensayado. Llenar el tercio de muestra hasta que se haya saturado toda la muestra de suelo.



Figura 7: Mezcla de arena de playa (A) con arena de Río (B), para obtener una mezcla de proporción 50/50 (C)

5. Continuar llenando la caja de ensayo con las arenas hasta el segundo tercio, y volver a pasar agua a través de la manguera, y saturar el material.



Figura 8: Depositación y saturación del material ensayado

6. Al llegar al último tercio se procede a calcular el peso volumétrico del material depositado, para ello se coloca sobre la arena suelta y seca una cápsula con bordes rectos con su volumen previamente calculado al igual que su peso. Se continua llenando la caja, hasta cubrir la cápsula (ver Figura 9), con una regla enrasar el material, de manera tal que el mismo quede perfectamente moldeado en la cápsula. Proceder a pesar la cápsula con el material dentro. Realizar los cálculos para determinar el peso volumétrico (γ_d) del suelo depositado en la caja de ensayo. Antes de continuar llenando la caja, eliminar cuidadosamente el exceso de suelo seco que queda debido al enrasado de la cápsula, proceder a llenar la caja hasta la altura final de 30 cm y saturar hasta que el nivel freático quede aproximadamente de medio a un centímetro por encima del material.
7. Retirar la manguera con mucho cuidado de no provocar diferencias en el estrato por vibrar.
8. Proceder a pesar el modelo de ensayo cuidadosamente de no pre-vibrar el material, verificar que se cumple con un peso máximo que pueda ser soportado por la mesa vibratoria.



Figura 9: Proceso para determinar el peso volumétrico de las muestras ensayadas a escala reducida.

9. Seguidamente trasladar la caja y situar el modelo sobre la mesa vibratoria, colocar la sobrecarga en el centro de la superficie cuidando de no ejercer presión sobre la masa de suelo saturada, acomodar 16 bloques de cemento como base, en el segundo nivel colocar nueve bloques, en el tercero nivel colocar cuatro bloques y por último un solo bloque en la cúspide (ver Figura 10).

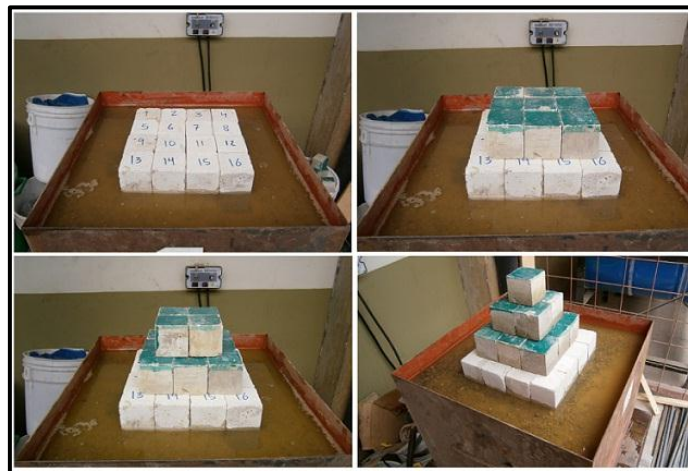


Figura 10: Colocación de bloques de cemento (simulación de sobrecarga)

10. Encender el reóstato de la mesa vibratoria, y llevar la frecuencia de uno hasta el máximo deseado, mantenerla durante un período de tiempo determinado, para el caso del modelo utilizado mantener la frecuencia por un tiempo de 20 segundos, este mismo período y frecuencia se utiliza para todos los modelos ensayados.
11. Al cumplir los 20 segundos, apagar el reóstato, y proceder a realizar lecturas de asentamientos importantes de todos los lados del modelo, observar si ocurre desplome de la simulación de sobrecarga debido al fenómeno de licuación, así mismo describir si los daños producidos son de carácter severo, considerable o despreciable.

RESULTADOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA

Ensayo con arena de río al 100%

El término 100%, se refiere al agregado sin modificaciones de sus propiedades, se encuentra tal y como fue extraído del río o playa, en nuestro caso lo identificamos como 100% arena de río o 100% arena de playa, cuando estos no han sido mezclados entre sí.

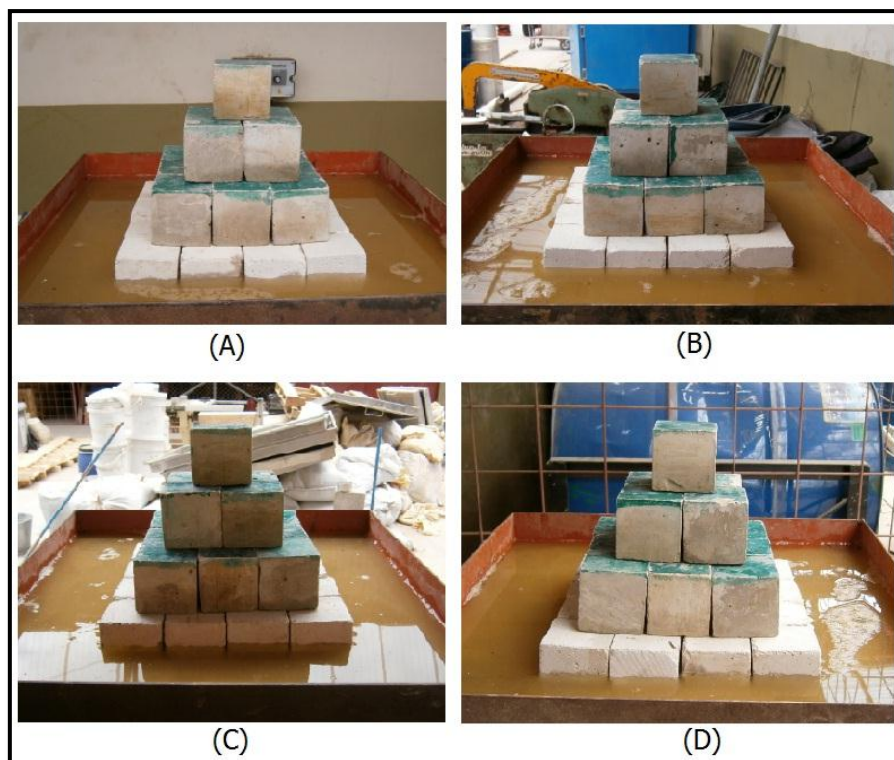


Figura 11: Resultado del modelo a escala con arena de río 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 5: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de río al 100%

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Bien gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	0,6 cm
Presencia de licuación	No
Determinación de daños	Leves
*Evaluación de daños	Daños no estructurales

Ensayo con arena de playa al 100%

Al igual que la explicación del término 100% dado para la arena de río, se aplica con la arena de playa. Así para el segundo ensayo a escala reducida se utilizó arena de playa de Esterillos en estado seco y suelto que luego fue saturado.

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

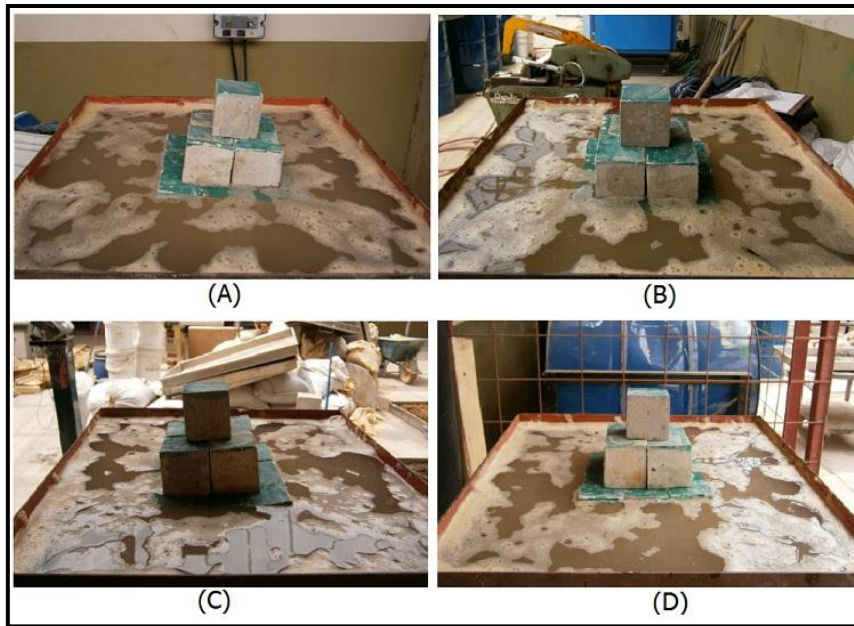


Figura 12: Resultado del modelo a escala con arena de playa 100%. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 6: Resultados del ensayo a escala reducida con arena de playa al 100%

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Mal gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	6,8 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves, colapso estructural
*Evaluación de daños	Incapacidad de la estructura a seguir cumpliendo con la función para la que fue diseñada, alta probabilidad de pérdidas humanas

Ensayo combinación 50% arena de río con 50% arena de playa

Una vez realizado los ensayos a las arenas de río y playa en estado 100%, es decir sin sufrir modificaciones, se procede con los ensayos utilizando combinaciones de arenas. Es así que la ejecución para este ensayo a escala reducida se utiliza la combinación número uno de arenas, la cual consta de 50% arena de río de Guápiles, y 50% arena de playa de Esterillos, porcentajes calculados en estado de peso seco.

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

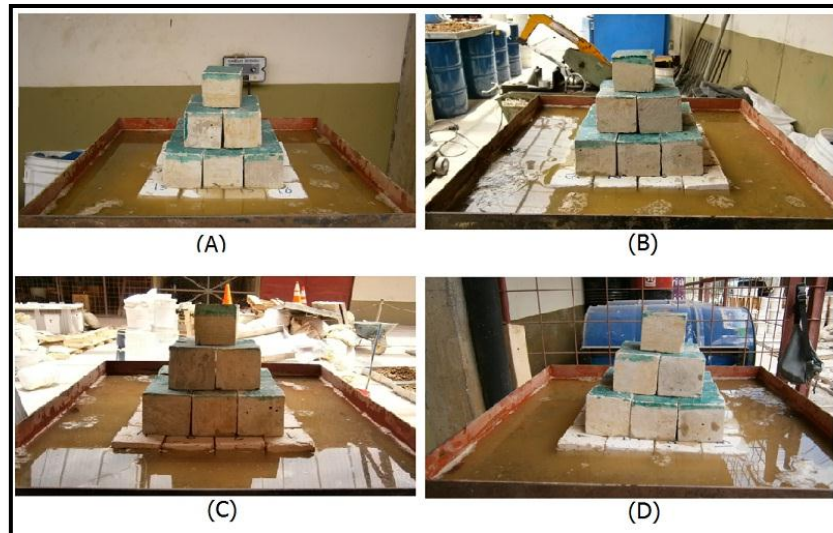


Figura 13: Resultado del modelo a escala combinación 50/50. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 7: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 50/50

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Medianamente gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,0 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Severos
*Evaluación de daños	Daños severos en cimentaciones y elementos no estructurales

Ensayo combinación 30% arena de río con 70% arena de playa

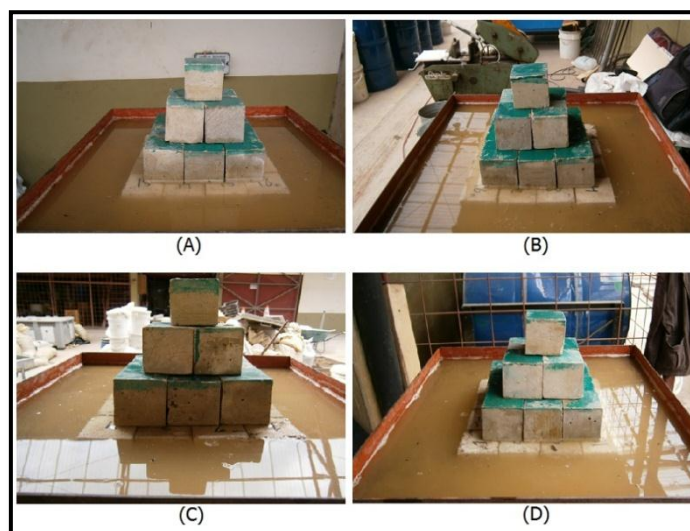


Figura 14: Resultado del modelo a escala combinación 30/70. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

Cuadro 8: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 30/70

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Medianamente gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,5 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves
*Evaluación de daños	Colapso de la cimentación, daños graves en elementos no estructurales

Ensayo combinación 75% arena de río con 25% arena de playa

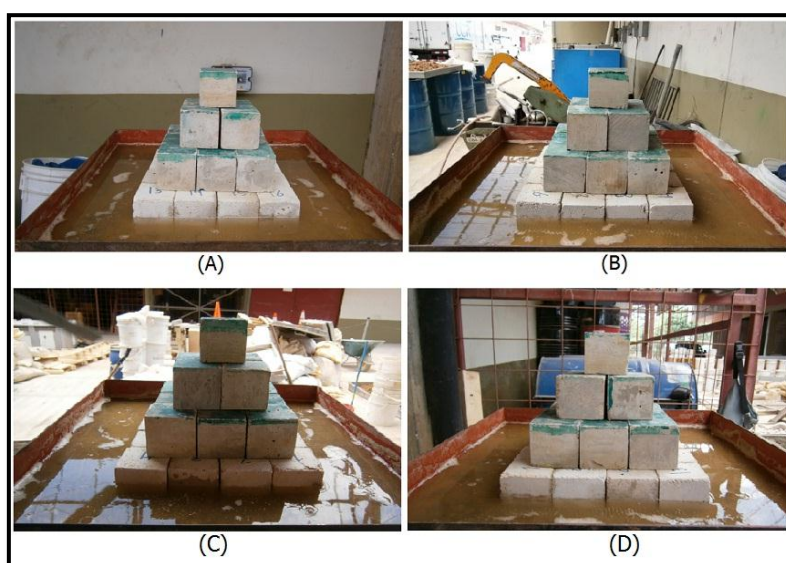


Figura 15: Resultado del modelo a escala combinación 75/25. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 9: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 75/25

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Bien gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	0,3 cm
Presencia de licuación	No
Determinación de daños	Leves
*Evaluación de daños	Daños no estructurales

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

Ensayo combinación 15% arena de río con 85% arena de playa

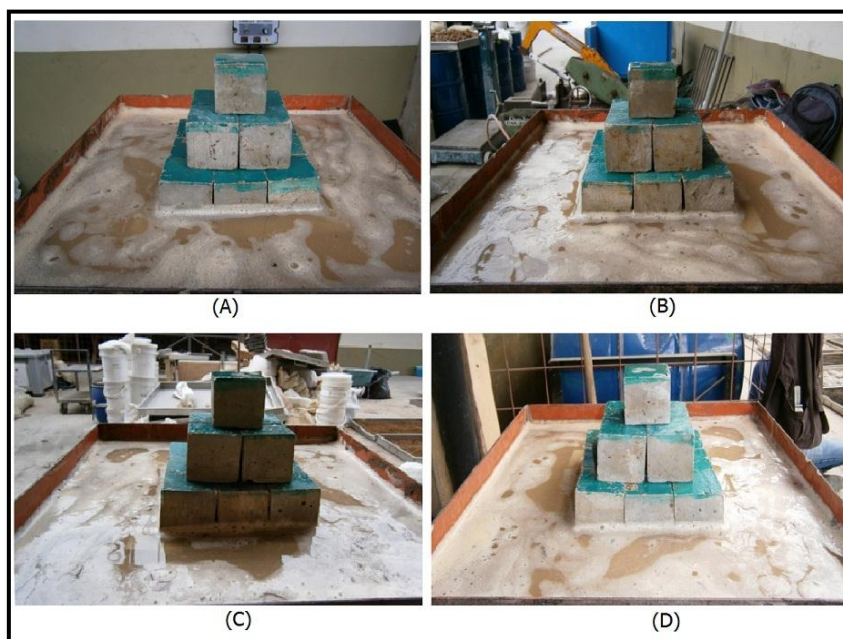


Figura 16: Resultado del modelo a escala combinación 15/85. (A) Fachada norte, (B) fachada este, (C) fachada sur, (D) fachada oeste

Cuadro 10: Resultados del ensayo a escala reducida combinación 15/85

Parámetro	Resultados
Tiempo de vibración	20 s
Sobrecarga en el modelo	0,19 t/m ²
Criterio de gradación de la arena	Mal gradada
Asentamiento máximo observado en el modelo	4,8 cm
Presencia de licuación	Si
Determinación de daños	Graves
*Evaluación de daños	Colapso de la cimentación, daños graves en elementos no estructurales

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA EN LA LICUACIÓN DE ARENAS

Es conocido que el análisis de granulometría es útil en la determinación de la susceptibilidad de licuación. El Código de Cimentaciones de Costa Rica presenta rangos granulométricos con posibilidad de licuación para suelos mal gradados. Además indica que las arenas cuanto más finas y uniformes son más susceptibles a la licuación. En la Figura 17 se observan las curvas granulométricas de las arenas ensayadas en el presente proyecto. Al compararlas con los rangos propuestos por el C.C.C.R se puede apreciar que las arenas ensayadas caen dentro del rango muy fácilmente licuable; sin embargo, las distintas gradaciones de las arenas, implican diferentes comportamientos ante el fenómeno de licuación, como se explica más adelante.

*La evaluación de daños es a criterio del autor, según lo observado en el modelo.

En la Figura 17 se presentan las tres gradaciones en estudio identificadas con colores representativos. Se parte de la curva inferior que representa la granulometría de la arena de río 100% identificada de color verde, hasta llegar a la curva superior que está constituida por la granulometría de la arena de playa 100% mostrada en la Figura 17 con color rojo; mientras que en el centro se encuentran las curvas de los modelos con estratos de suelos combinados.

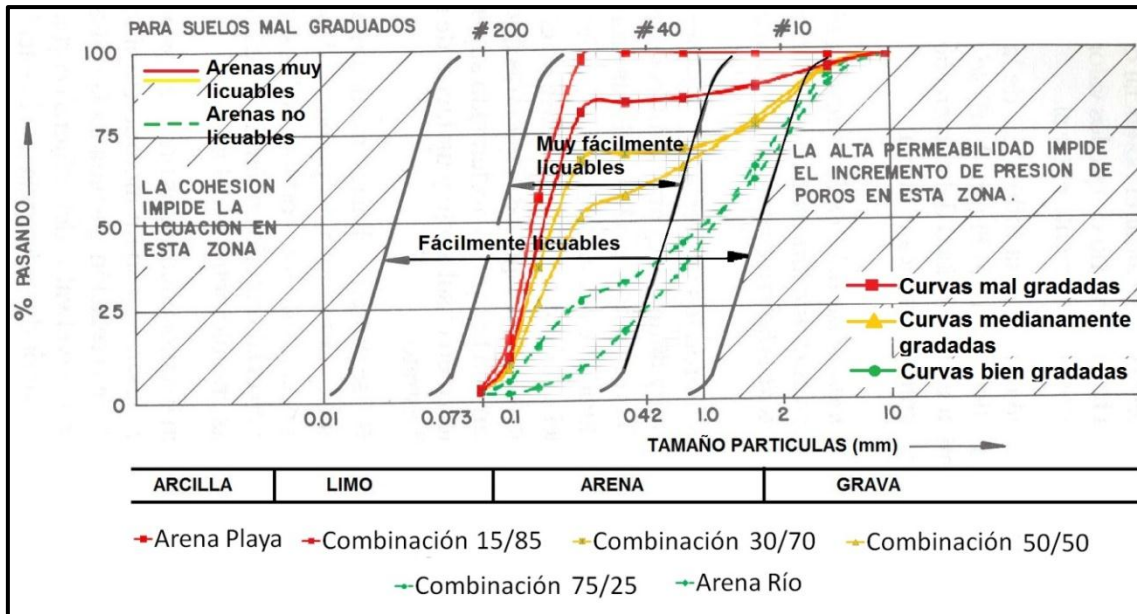


Figura 17: Comparación de curvas granulométricas de los modelos ensayados con los rangos establecidos por el C.C.C.R

CONCLUSIONES

- ✓ Se realizaron ensayos a escala reducida en mesa vibratoria, utilizando distintas gradaciones de arenas sueltas y saturadas, logrando apreciar el fenómeno de licuación en cuatro de los seis ensayos ejecutados; el fenómeno se presentó en las arenas sueltas con mala gradación y las medianamente graduadas.
- ✓ Se comprobó la influencia de la granulometría en la licuación de arenas mediante ensayos a escala reducida, logrando demostrar que las arenas sueltas bien graduadas atenúan el fenómeno de licuación; mientras que las arenas sueltas, uniformes y finas son potencialmente licuables. Por otro lado las arenas sueltas medianamente graduadas, aminoran el efecto de licuación, reduciendo los daños causados por dicho fenómeno, sin embargo también se consideran potencialmente licuables.
- ✓ Los finos (porcentaje pasando la malla N° 200) de las arenas en estudio, correspondían a finos no plásticos, por lo que los mismos finos no afectaron sobre los resultados de licuación en los modelos de ensayos a escala reducida.

- ✓ La falta de equipo adecuado para medir aceleraciones, frecuencias, deformaciones y desplazamientos, limitan los resultados de esta investigación. Por tal motivo los resultados obtenidos en los modelos son de índole cualitativos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Si bien los resultados obtenidos durante la investigación fueron satisfactorios, se recomienda introducir nuevos elementos, que pueden sustentar y dar mayor validez a los resultados de ensayos a escala reducida. De esta manera se recomienda, la utilización de medidores de frecuencias y de mediciones de deformaciones en los ensayos a escala reducida. Además sería útil la instalación de un sistema de adquisición de datos que permita obtener respuestas de los modelos respecto al efecto dinámico.
- ✓ Se recomienda el uso de mesas vibratorias de mayor tamaño, para que la construcción de modelos a escala no presenten restricciones de peso, y se pueda analizar de mejor manera el comportamiento de los suelos en estudio.
- ✓ Sería importante realizar pruebas *in situ* a las muestras ejecutadas en ensayos a escala reducida, como por ejemplo la prueba SPT, y realizar una comparación de la susceptibilidad a la licuación, con las metodologías propuestas por el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Asociación Costarricense Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (2^{da} edición). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
2. Chang, N.Y., & ko, H.Y. (1982). Dynamic properties of clays under general three-dimensional stresses [Versión electrónica]. Final Report to the National Science Foundation under Grant No. PRF 79-00718.
3. Chang, N.Y. (1987). Liquefaction susceptibility of fine-grained soils preliminary study report [Versión electrónica]. Department of Civil and Urban Engineering University of Colorado at Denver, 4, 9-18.
4. Consortium of Universties for Research in Earthquake Engineering (1997). Historic Developments in the Evolution of Earthquake Engineering [Versión electrónica]. Adapted from the 1998 CUREE Calendar, 2.
5. Geopetrolio.com (2012). Geopresiones. Extraído el 23 de octubre, 2011, http://geopetroleo.com/983912_Geopresiones.html
6. Hernández, I. (2010). Influencia del porcentaje de finos en el fenómeno de licuación de arenas. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

7. Humboldt, (2012). Catálogo digital Humboldt. Extraído el 28 de noviembre de 2012, de <http://humboltdemexico.com/datos/webs/humcat-esp/69.pdf>
8. Koester, J.P. (1993). Effects of fines type and content on liquefaction potential of low to medium plasticity fine grained soils. U.S. Central United States Earthquake Consortium (CUSEC), 67-75. Extraído el 14 de diciembre, 2012, de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/eng/doc6586/doc6586-contenido.pdf>
9. Mendoza, J. (2013). Influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
10. Severn, R.T. (2010). The development of shaking tables – a historical note [Versión electrónica]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 195-213.