

Analysis and experimental validation of soils liquefaction through granulometric study

Valentina Cano-Franco, Karen Daniela Medina-Mosquera, Juan Felipe Restrepo-Escobar, Francisco J. Vélez-Hoyos & Victor H. Aristizabal-Tique

Facultad de ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia. valentina.cano@campusucc.edu.co, karen.medinam@campusucc.edu.co, juan.restrepoe@campusucc.edu.co, francisco.velezh@campusucc.edu.co, victor.aristizabal@campusucc.edu.co

Received: October 9th, 2022. Received in revised form: February 9th, 2023. Accepted: March 6th, 2023

Abstract

Liquefaction phenomenon is a problem related to soil conditions that can entail a high risk for civil infrastructure and people, and therefore requires an adequate understanding of its causes. The present work analyzes the influence of the granulometry of the soil material on the occurrence of liquefaction. For this purpose, a laboratory assembly of a block structure supported on different types of soils, which is subjected to controlled seismic movement by means of an electromechanical platform, was developed. The results show that medium sands contribute to the presence of the phenomenon, while fines and gravels act as mitigators. In addition, classification criteria were defined to determine the liquefaction levels and the affectations presented by the structure due to the phenomenon.

Keywords: soil liquefaction; soil granulometry; sand; earthquake; soil prototype.

Análisis y validación experimental de licuefacción de suelos mediante estudio granulométrico

Resumen

El fenómeno de la licuefacción es una problemática vinculada a las condiciones del suelo que puede conllevar un alto riesgo para la infraestructura civil y las personas, por lo cual demanda un adecuado entendimiento de sus causas. En el presente trabajo se analiza la influencia de la granulometría del material del suelo con la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. Para tal fin, se desarrolló un montaje en laboratorio de una estructura de bloques soportado en diferentes tipos de suelos, el cual es sometido a movimiento sísmico controlado por medio de una plataforma electromecánica. Los resultados muestran que las arenas medias contribuyen a la presencia del fenómeno, mientras que los finos y las gravas actúan como mitigadores. Además, se definieron los criterios de clasificación para determinar los niveles de licuefacción y las afectaciones que presentó la estructura debido al fenómeno.

Palabras clave: licuefacción de suelos; granulometría de suelos; arenas; sismo; prototipo de suelos.

1 Introducción

La licuefacción de suelos es un fenómeno que puede presentarse ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, donde el suelo pierde la resistencia al corte y pasa a comportarse como un líquido, y cuyo riesgo de ocurrencia se incrementa en presencia de niveles freáticos superficiales, suelos fino-arenosos, mal gradados, mal drenados [1,2], y de forma general, ante una condición de suelos saturados y poco consolidados [3].

Entre los eventos documentados, donde se ha evidenciado la ocurrencia de este fenómeno, se pueden mencionar el terremoto de la ciudad de Niigata (Japón) en 1964, donde un sismo de magnitud 7.6 indujo la licuefacción de suelos en gran parte de la ciudad, causando daños estructurales y volcamientos de edificios, con numerosas pérdidas humanas [4]. El del río Atrato en la región del Urabá Antioqueño (Colombia) en 1992, en el que un sismo de magnitud 6.6 ocasionó la licuefacción de suelos en las orillas del río, provocando grandes deslizamientos y afectaciones civiles en la zona [5].

How to cite: Cano-Franco, V., Medina-Mosquera, K.D., Restrepo-Escobar, J.F., Vélez-Hoyos, F.J. and Aristizabal-Tique, V.H., Análisis y validación experimental de licuefacción de suelos mediante estudio granulométrico. DYNA, 90(225), pp. 164-171, January - March, 2023.

En consideración al riesgo vinculado a este fenómeno, se han desarrollado diferentes metodologías y ensayos, tanto in situ como en laboratorio, para la evaluación del riesgo o potencial de licuefacción por medio de estudios del suelo, dentro de los que se destacan el método simplificado de Seed & Idriss, basado en los ensayos SPT (Ensayo de penetración estándar), y los análisis basados en pruebas como CPT (Ensayo de penetración de cono), BPT (Prueba de penetración de Becker) y Vs (Velocidad de onda de corte), como los más usados en campo [6]. De otro lado, se destacan propuestas más modernas que las mencionadas anteriormente como la de Hocking, quien desarrolló un método para medir el potencial de licuefacción en suelos saturados y su prevención a través de electro-osmosis, donde se proporciona una sonda de auto-perforación con diferentes cámaras de expansión y contracción, midiendo finalmente la presión manométrica del agua intersticial y de allí la tendencia a la licuefacción del suelo [7].

Entre los estudios de potencial de licuefacción basados en SPT se encuentran trabajos como el de Alfaro, quien realizó comparaciones de zonas con más susceptibilidad a presentar el fenómeno en la ciudad de Concepción (Chile), basándose en la información de más de 200 sondeos, segmentando las áreas de igual tipo de suelo, e implementando el método de Seed and Idriss para determinar el potencial de licuefacción en suelos arenosos [8]. Sadud desarrolló 15 mapas de susceptibilidad a la licuefacción en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra (Bolivia), basado en 172 sondeos, calculando la relación de resistencia cíclica (CRR), la relación de esfuerzo cíclico (CSR) y el índice de potencial de licuefacción (LPI), concluyendo que con un terremoto de magnitud de momento sísmico $M_w = 6$ y una aceleración máxima $a_{max} = 0.15 g$, se tendría una licuefacción moderada en el 1% de la superficie de la ciudad; y con $M_w = 8.5$ y $a_{max} = 0.5 g$ una licuefacción del 97% de los suelos del área total de la ciudad [9]. Barrenechea y Rojas evaluaron 3 zonas del distrito de San José (Perú), donde por medio de perforaciones, ensayos de granulometría y límites de consistencia, establecieron las zonas con mayor propensión a presentar licuefacción en el suelo [10]. Cordero y Torre, estimaron el potencial en 12 puntos en la ciudad de Guayaquil (Ecuador), además de apreciar los estratos susceptibles a licuarse, al comparar los resultados arrojados por el método de Seed and Idriss con SPT con los valores del límite líquido vs índice plástico [11].

Algunos trabajos basados en los ensayos de CPT, BPT o Vs incluyen el de Cordis, quien evaluó el potencial en 20 puntos del Golfo de Esmirna (Turquía) mediante la ejecución de 5 CPTs en cada punto, además de establecer la resistencia y las características de drenaje de cada suelo [12]. Ordóñez realizó 27 perforaciones mediante el SPT y 26 sondeos por medio del CPT en el sector de Tarqui en la ciudad de Manta (Ecuador), evaluando el potencial en la zona, además de estimar los asentamientos verticales, los desplazamientos laterales y la severidad de los daños causados por la licuefacción en el terreno [13]. Guerrero evaluó el potencial en las ciudades de Concepción y La Serena (Chile) mediante CPT, Vs y SPT, para realizar un análisis comparativo entre metodologías [14]. Cubides llevó a cabo ensayos geofísicos, CPT, Vs, SPT y de laboratorio en 150 puntos del municipio de Apartadó (Colombia), donde finalmente lograron una

zonificación de Apartadó a partir del potencial de licuación y de la magnitud de asentamientos esperados [15].

Entre los trabajos que evalúan el potencial de licuefacción en laboratorio, en primer lugar se consideran los basados en ensayos triaxiales cíclicos no drenados (TCND) desde los cuales se estima la resistencia a la licuefacción (liquefaction strength), entre los que se encuentra el de Hatanaka et al. quienes ejecutaron ensayos TCND en muestras de gravas inalteradas obtenidas de un relleno artificial de aproximadamente 20 metros de espesor que se licuó durante el terremoto de Hyogo-Ken Nanbu de 1995 en Port Island (Japón), la cual es una isla artificial, donde los resultados indicaron que este relleno tiene una baja resistencia a la licuefacción a pesar de tener un tamaño de partícula grande [16]. Sandoval realizó 31 ensayos TCND en arenas calcáreas del municipio de Cabo Rojo (Puerto Rico) para analizar la resistencia a la licuefacción de estas, haciendo una caracterización mineralógica para comparar los resultados con investigaciones realizadas sobre otras arenas calcáreas del mundo, encontrando que esta arena presenta mayor resistencia a la licuefacción respecto a la mayoría de las arenas comparadas [17]. Muñoz realizó diferentes ensayos a tres muestras de la ciudad de Santiago (Chile), entre los que se encuentra los TCND, de granulometría, índice de vacíos, gravedad específica, obteniendo la respuesta mecánica, el comportamiento ante confinamientos efectivos y corte estático de estos suelos [18]. Sandoval et al. realizaron 20 ensayos TCND para arenas terrígenas en la ciudad de Cali (Colombia), generando una caracterización mineralógica y una comparación con investigaciones ya existentes, donde determinaron una baja resistencia a la licuefacción para las muestras estudiadas [19]. Torres analizó 20 muestras de arenas del municipio de Paipa (Colombia), determinando los factores fundamentales para evaluar el comportamiento por flujo, la caracterización dinámica del material y los parámetros principales que llevan a la muestra a un estado de esfuerzos críticos, encontrando finalmente una considerable resistencia a la licuefacción [20]. Jiménez estudió el potencial para las arenas del municipio de Guamo (Colombia), para analizar su comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de carga monotónica y la susceptibilidad a presentar el fenómeno de licuefacción, encontrando que este solo puede presentarse cuando el material está saturado y que es importante reducir al máximo el aire para evitar afectaciones en la muestra, ya que este reduce la trayectoria contractante, que se identificó como la principal causa para que se presente la licuefacción [21].

A nivel de laboratorio se pueden mencionar trabajos que emplean ensayos realizados con prototipos excitados por medio de mesas vibratorias, y dentro de ellos se encuentra el de Hakam et al. quienes estudiaron el potencial de licuefacción y las propiedades físicas en los suelos arenosos, evidenciando que la relación existente entre la densidad y el tamaño de las partículas permite evaluar el potencial en depósitos de arena [22]. Mendoza realizó ensayos de granulometría para seis combinaciones de dos tipos de arenas, extraídas de la playa de Esterillos y la ciudad de Guápiles (Costa Rica), por medio de un prototipo a escala reducida excitado por una plataforma vibratoria, determinando cualitativamente la presencia del fenómeno

con respecto al proceso granulométrico (Mal, medianamente y bien gradado) [23]. Ochoa et al. realizaron ensayos para dos muestras en la ciudad de Lima (Perú), con el fin de validar la presencia del fenómeno. Además, se logró observar el comportamiento del flujo ascendente y de la estructura implementada [24].

Teniendo presente lo anterior y que de los estudios de suelos se puede disponer de los análisis granulométricos, resulta pertinente explorar la dependencia de la licuefacción con los parámetros asociados a las propiedades granulométricas del suelo [23]. Para tal fin, en este trabajo se plantea la evaluación de diversos diseños de mezclas de diferentes materiales para lograr varias gradaciones para representar varios tipos de suelos, con el fin de analizar el comportamiento de estas ante condiciones dinámicas (excitaciones sísmicas inducidas), por medio de un prototipo miniatura de laboratorio que permita evidenciar la presencia del fenómeno de licuefacción en los suelos estudiados.

2 Materiales y método

a. Toma de muestras

Para la selección de las muestras de suelo se tomó en consideración la presencia de diferentes tamaños de partículas, además de poder realizar diferentes diseños de mezclas para conseguir materiales de diversas gradaciones que fueron empleadas como suelo en el montaje experimental del prototipo miniatura (ver FIG. 2). Todo esto con el fin de poder lograr un contraste significativo entre los efectos de licuefacción inducidos según la curva granulométrica del suelo.

A continuación, se describe de donde se tomaron las 3 muestras de suelo: la primera (Arena río), proveniente del departamento de Córdoba (Colombia) del río Arroyo Grande, en el punto ubicado en 8°44'24.12"N, 75°42'48.07"W, el cual está a 36 km de Montería capital del departamento de Córdoba. La segunda (Arena playa), fue tomada de la playa del municipio de Arboletes (Colombia), en el punto ubicado en 8°51'20.52"N, 76°25'35.49"W, el cual se encuentra a una distancia de 505 km de Medellín en el noroeste del departamento de Antioquia. La tercera (Arena mampostería), fue una muestra de arena de mampostería, tomada de un depósito ubicado en la ciudad de Medellín (Colombia).

b. Ensayo granulométrico y diseño de mezclas

Se llevaron a cabo los ensayos granulométricos de las mezclas mostradas en la Fig. 1, según la norma ASTM D-422 (American Society for Testing and Materials) [25], donde el diseño correspondiente de cada muestra se define en la Tabla 1.

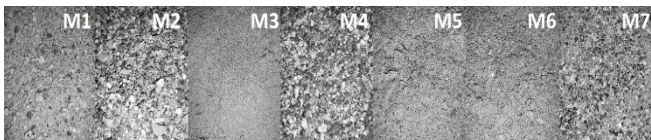


Figura 1. Mezclas usadas como suelo en el montaje experimental del prototipo miniatura.

Fuente: Los autores.

Tabla 1.

Diseño de mezclas usadas como suelo en el montaje experimental del prototipo miniatura.

Mezcla	Cantidades (%)		
	Arena mampostería	Arena río	Arena playa
M1	100	-	-
M2	-	100	-
M3	-	-	100
M4	50	50	-
M5	-	50	50
M6	50	-	50
M7	33.33	33.33	33.33

Fuente: Los autores.

c. Prueba dinámica

1) Montaje experimental

En la FIG. 2 se muestra el montaje experimental del prototipo miniatura, que se compone de 30 cubos de estuco de 4.5x4.5x4.5 cm, ubicado sobre la plataforma de movimiento sísmico que consiste en un generador de ondas programado con una señal senoidal de amplitud constante y frecuencia que varía linealmente con el tiempo. Esta actúa como señal sísmica para la plataforma (ver Figs. 3 y 4), donde la frecuencia barre de 1 a 10 Hz durante 200 s, con una aceleración pico-pico de 2 g ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$). La señal es enviada desde el generador de ondas al amplificador para controlar y alimentar la plataforma electromecánica (mesa sísmica), a la cual se le adapta una base de madera para

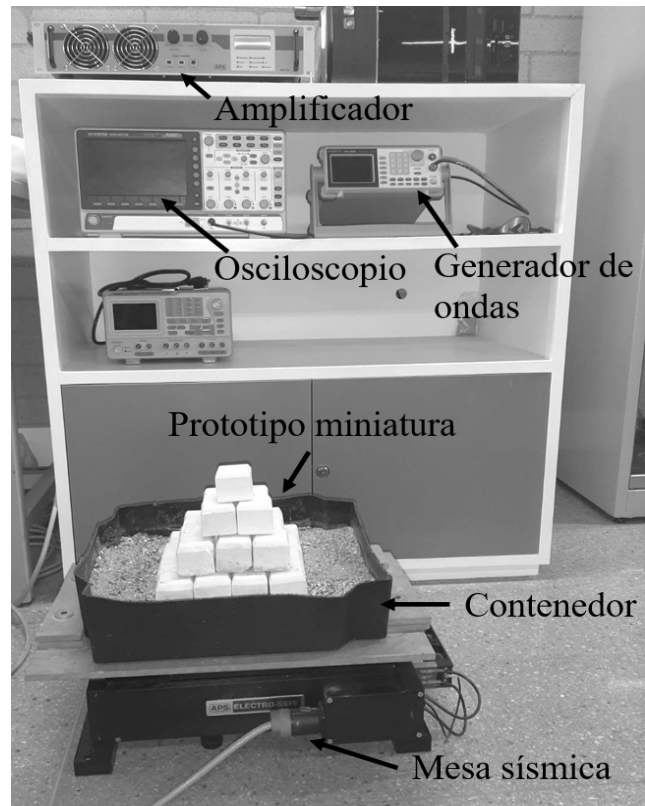


Figura 2. Montaje experimental del prototipo miniatura.

Fuente: Los autores.

encajar el contenedor de 44x30 cm de base y 23 cm de profundidad, en el cual se aloja las mezclas que se usan como suelo para la estructura. Además, se cuenta con un osciloscopio que recibe la señal de un acelerómetro que se encuentra en la parte móvil de la mesa sísmica que permite medir la aceleración que aplica la plataforma al prototipo.

En el contenedor se vertió cada muestra, se niveló y se compactó. Luego, se ubicó el prototipo miniatura en forma de pirámide en el centro, para posteriormente iniciar el proceso de saturación con agua de manera controlada asegurando un nivel freático superficial, y finalmente, someter el prototipo a una excitación sísmica por medio de la mesa, con el propósito de licuar la muestra del suelo bajo estudio.

Se usó un prototipo miniatura compuesto por cubos debido a que este permite evidenciar de una forma práctica y más fácilmente los desplazamientos y asentamientos diferenciales que se producen a causa del nivel de licuación del suelo, los cuales fueron obtenidos por medio de la diferencia de 2 puntos, utilizando el asentamiento mayor y menor generado después de la excitación sísmica, tomando como referencia el nivel del suelo.

2) Señal de excitación sísmica

La aceleración a con la que se excitó la plataforma sísmica está dada por una función sinusoidal de la forma:

$$a = \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

donde $f = 9t/200 + 1$ es la frecuencia de la señal, la cual crece linealmente con el tiempo t , tal como se muestra en la FIG. 3.

En la FIG. 4 se muestran los primeros 20 segundos de los 200 segundos que dura la señal sísmica de excitación que está dada por la ecuación 1, donde se puede observar que es una señal de amplitud constante y no periódica que va incrementando su frecuencia de oscilación a medida que pasa el tiempo, es decir, se va comprimiendo con el tiempo. Esta señal fue seleccionada debido a que su forma permite la presencia de un grupo deseado de frecuencias en el movimiento del prototipo, y que tales frecuencias tengan aproximadamente la misma energía, tal como se puede observar en el espectro de potencia mostrado en la FIG. 5, que fue calculado por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform).

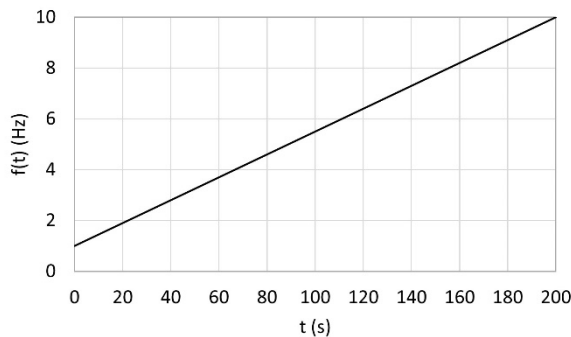


Figura 3. Frecuencia en función del tiempo. Fuente: Los autores.

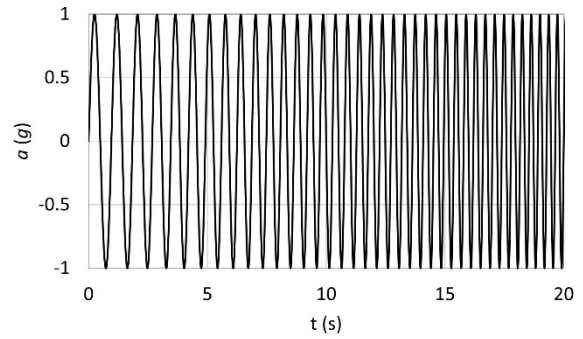


Figura 4. Sismograma senoidal de amplitud constante y frecuencia variable. Aquí se muestra los primeros 20 s. de la señal de 200 s. Fuente: Los autores.

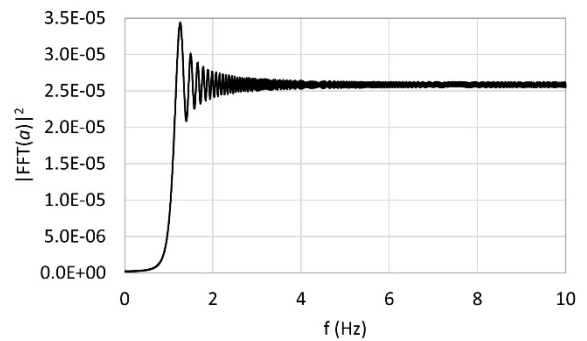


Figura 5. Espectro de Fourier del sismograma mostrado en la Figura 4. Fuente: Los autores.

d. Criterios de clasificación

Los datos recolectados y organizados, tanto en tablas y gráficas como en registros fotográficos y de video, se analizaron y compararon las afectaciones presentadas en cada prueba experimental, permitiendo así definir los niveles de licuefacción como:

No licuable: No se presenta el fenómeno ni se generan asentamientos en la base del prototipo miniatura, no se evidencian daños estructurales, ni colapso de la estructura miniatura.

Parcialmente licuable: Presencia del fenómeno, asentamientos en la base del prototipo y daños estructurales leves, no hay colapsos de la estructura miniatura.

Licuable: Presencia del fenómeno, asentamientos diferenciales en la base y colapso total de la estructura miniatura.

3 Resultados y discusión

La FIG. 6 muestra las curvas granulométricas obtenidas para cada una de las mezclas definidas en la Tabla 1, donde se identifica el nivel de licuefacción y la ubicación de cada una de las curvas en los rangos de clasificación definidos por Tsuchida, quien define unos rangos de potencial de licuefacción de acuerdo a la granulometría del suelo, es decir, define curvas límite de distribución de tamaño de partículas

[26]. De acuerdo con este criterio, los materiales con tamaño promedio de partículas (D_{50} : diámetro por el que pasa el 50% en peso del material) entre 0.075mm (malla #200) y 0.85mm (malla #20) son los más susceptibles a licuarse (muy fácilmente licuables), mientras que los materiales con tamaños promedios entre 0.02mm y 0.075mm (zona izquierda en la FIG. 6), 0.85mm y 3.0mm (zona derecha en la FIG. 6) son un poco más difíciles de licuar (fácilmente licuables). Además, se puede observar en la FIG. 6 que las curvas que definen los límites de las zonas indica que los materiales deben tener coeficientes de uniformidad (Cu) bajos, más no necesariamente los coeficientes de curvatura (Cc), que para el caso de la FIG. 6, estos límites tienen aproximadamente un $Cu = 2.0$ y $Cc = 1.0$.

Entonces, con base en los resultados de las 7 mezclas estudiadas, por un lado, en la FIG. 6 se puede observar que gran parte de las curvas en rojo-triángulo y en amarillo-círculo ingresan al rango de suelos muy fácilmente licuables, mientras que gran parte de las curvas en verde-cuadro están en el rango fácilmente licuables. Por consiguiente, de acuerdo con este criterio y en base a los rangos de granulometría representativos de cada mezcla, se podría concluir que todas las mezclas son susceptibles de licuefacción bajo ciertas circunstancias. Pero, por otro lado, de la Tabla 2 se puede ver que M2 y M4 no se licuaron pese a que transcurrió los 200 segundos de la excitación sísmica en la mesa. Además, M3 y M7 les tomó más tiempo para licuarse en comparación a las otras mezclas que también se licuaron, pero más rápido, entonces se puede decir que M2 y M4 no son licuables, M3 y M7 son fácilmente licuables y, M1, M5 y M6 son muy fácilmente licuables.

Nótese que las curvas rojas-triángulo tienen en común un alto porcentaje de arenas medias, mientras que la curva amarilla-círculo contiene un mayor porcentaje de arenas finas y limos, y las curvas verdes-cuadro contienen altos porcentajes de gravas, por lo que se infiere que un alto porcentaje de arenas medias genera un suelo más susceptible a la licuefacción, lo que es consistente puesto que estas son arenas de menor cohesión.

Los números arriba de cada curva en la FIG. 6, representan el orden en el tiempo en el cual se licuaron las mezclas, es decir, el 1 indica que la mezcla M5 se licuó primero y el 5 que M3 fue el último. Es importante resaltar que la curva amarilla-círculo indica que en estos casos se presentó más resistencia para licuarse que el correspondiente a las curvas rojas-triángulo, mientras que las verdes-cuadro no se licuaron, tal como se muestra en la Tabla 2. Esta resistencia se debe principalmente a la presencia de arenas medias, es decir, a mayor porcentaje de arenas medias el suelo se fatiga más rápido (más licuable), confirmando nuevamente lo mencionado anteriormente.

En la FIG. 7 se muestran algunos momentos claves de la prueba dinámica de M7, la cual presentó el fenómeno de licuefacción a los 9 segundos de iniciar la excitación sísmica, y un asentamiento diferencial no uniforme que generó un colapso total del prototipo. En la primera fila de la FIG. 8, se presenta la condición final del prototipo miniatura después de la excitación sísmica, y se puede observar una expulsión de finos en M2, M5, M6 y M7 debido a la presión de poros; mientras que en la segunda fila se muestran las huellas obtenidas por los asentamientos (diferenciales y uniformes) generados por el prototipo en cada mezcla. En [27] se puede ver un video acerca de las pruebas dinámicas de cada mezcla.

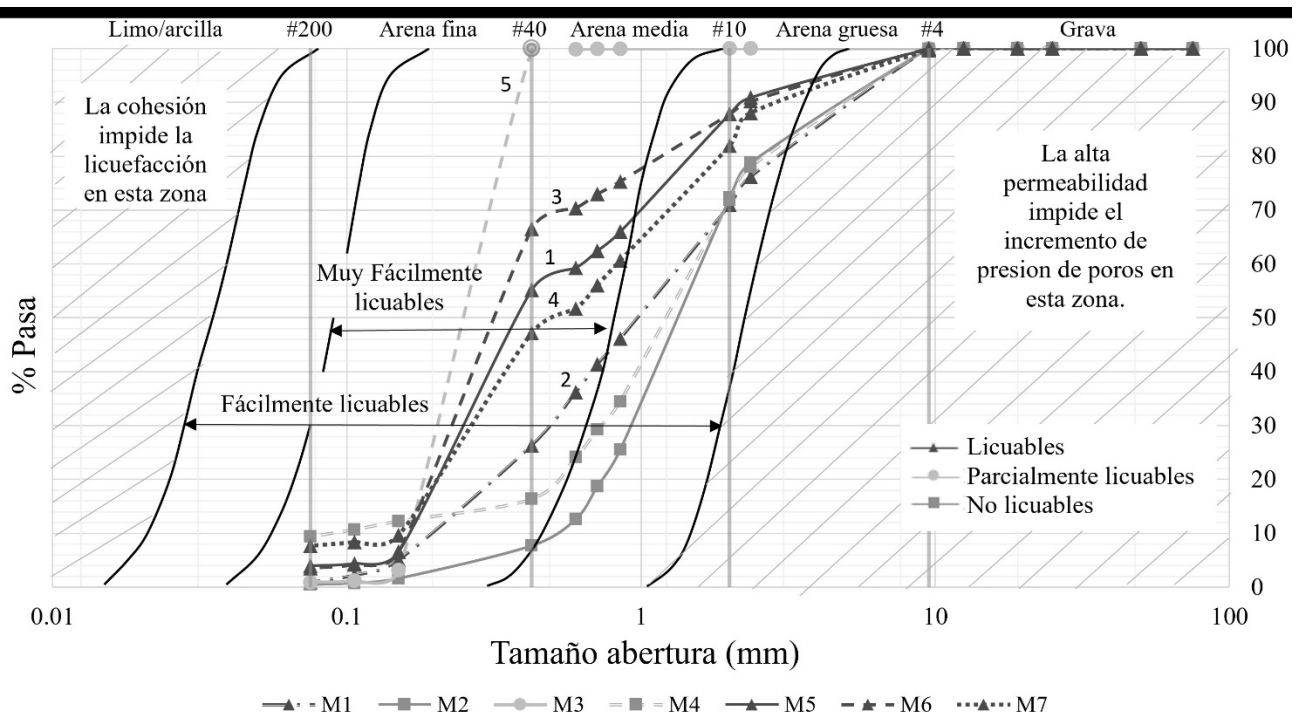


Figura 6. Curvas granulométricas.
Fuente: Los autores.

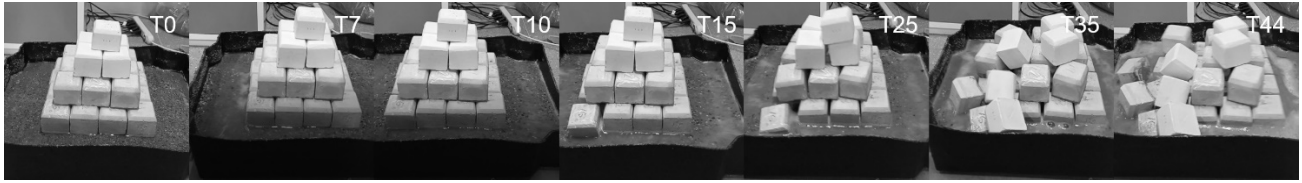


Figura 7. Algunas instantáneas de momentos clave del comportamiento de M7 ante la prueba dinámica.
Fuente: Los autores.

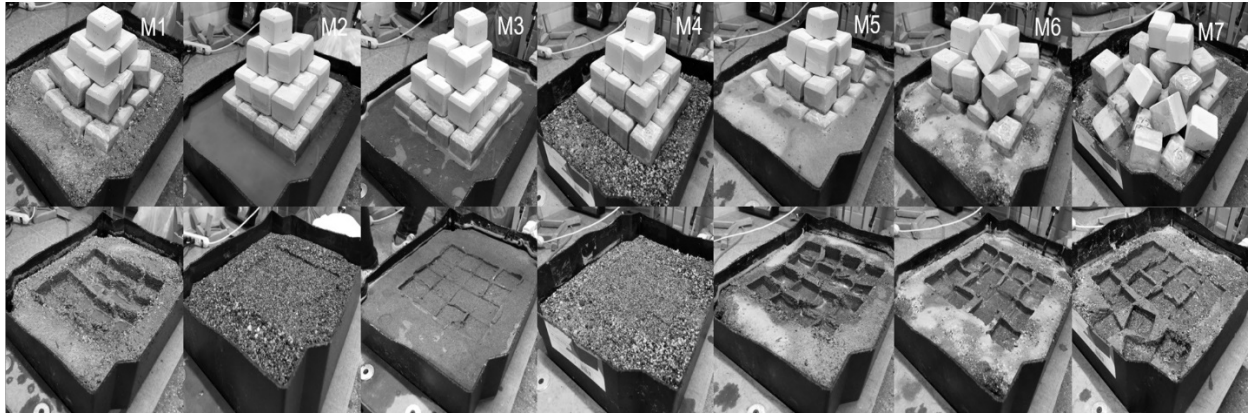


Figura 8. Estructura después de la excitación sísmica. Se puede ver un video de las pruebas dinámica de cada mezcla en la ref. [27].
Fuente: Los autores.

Tabla 2.
Evaluación de comportamiento y daños.

Mezclas	Asentamiento máximo de la estructura (cm) *	Tiempo en donde se presentó el fenómeno (s)	Coefficiente de uniformidad Cu	Coefficiente de curvatura Cc	Grado de licuefacción	Evaluación de daños
M1	2.5	2	7.17	0.89	Licuable	Daños estructurales y asentamientos diferenciales
M2	0.5	-	3.20	1.07	No licuable	-
M3	1.5	15	1.71	0.90	Parcialmente licuable	Daños estructurales y asentamientos diferenciales
M4	0.3	-	17.27	3.94	No licuable	-
M5	3	1	3.86	0.61	Licuable	Daños estructurales y asentamientos diferenciales
M6	2.5	4	2.38	0.84	Licuable	Colapso del prototipo y asentamientos diferenciales
M7	3	9	5.48	0.55	Licuable	Colapso del prototipo y asentamientos diferenciales

*Asentamiento máximo medido respecto a la superficie del suelo
Fuente: Los autores.

En la Tabla 2 se muestra la evaluación de los daños presentados en las pruebas dinámicas, los asentamientos máximos generados en las huellas, los tiempos en los que se presentó la falla de las mezclas (licuefacción del suelo), los grados de licuefacción y los daños evidenciados. Además, se presentaron dos tipos de asentamientos: el primero, se presentó un asentamiento uniforme en M1 de 1.7 cm y en M5 de 1.8 cm, de tipo “paraboloide”, lo cual era esperado puesto que la pirámide

concentra el peso en su centro, permitiendo en últimas que el prototipo miniatura quedara en pie. El segundo, se presentó un asentamiento diferencial (no uniforme) máximo en M6 de 1.9 cm y M7 de 2.7 cm, probablemente debido a la heterogeneidad de la mezcla, generando un colapso total del prototipo miniatura, tal como se muestra en la FIG. 9, donde en los círculos-rojo los asentamientos fueron del orden de 3 cm, mientras en los círculos-azules con cruz de 0.3 cm

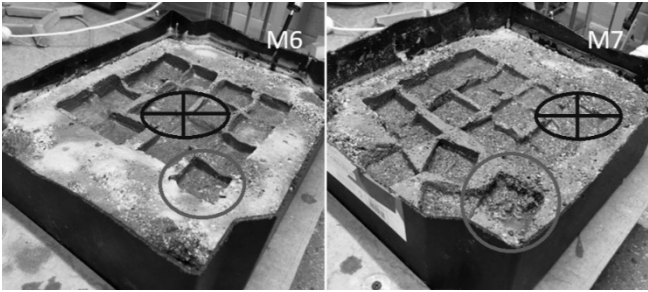


Figura 9. Huella dejada por la estructura de pirámide miniatura después de la excitación sísmica, donde se evidencia los asentamientos diferenciales. Fuente: Los autores.

1 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se validó la dependencia de la licuefacción de suelos con los parámetros asociados a la curva granulométrica, usando diferentes gradaciones de material, por medio de un prototipo miniatura sometido a movimiento sísmico a través de una plataforma electromecánica.

Se observó que el contenido de arenas medias tiene una incidencia directa en el potencial de licuefacción de los suelos, como se evidenció en las mezclas M1, M5, M6 y M7, mientras que el contenido de arenas finas y grava mitigan el fenómeno. Además, la curva granulométrica muestra un indicio del potencial de licuefacción debido a que este ensayo permite conocer el contenido de arenas medias que puede poseer un suelo. Más aún, de la Tabla 2 se puede intuir que el coeficiente de curvatura (C_c) podría ser clave para tener algún indicio de que el suelo sea difícil de licuar, particularmente en este trabajo, las mezclas con un $C_c > 1$ no se licuaron, y otros con un C_c levemente inferior a 1, presentaron más resistencia a licuarse, es decir, les tomó más tiempo.

Por otro lado, se evidenció que el tipo de asentamiento, si es uniforme o no (diferencial), es un factor crítico en la estabilidad de las estructuras, debido a que cuando estos no son uniformes aumenta el riesgo de colapso total. Lo anterior era de esperarse puesto que los suelos normalmente presentan una heterogeneidad espacial, mientras que un asentamiento uniforme posee un menor riesgo de colapso total [28].

Para el mejoramiento del suelo y mitigar la licuefacción se tienen diferentes métodos como: realizar perforaciones en el suelo para inyectar lechadas altamente expansivas de forma que los vacíos se llenen y se compacten [29], inyectar polímero expansivo para disminuir los asentamientos excesivos [30], implementar columnas de rocas conformadas por escoria, grava gruesa y roca triturada [31].

Para trabajos futuros se recomienda ejecutar pruebas dinámicas a una escala proporcional con señales de sismos reales; y hacer mezclas de suelos implementando algunas de las técnicas de mejoramiento de suelo mencionadas en el párrafo anterior, y evaluar de esta manera los diferentes comportamientos, además de implementar otro tipo de estructuras como pórticos, cerchas, puentes, entre otros.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad Cooperativa de Colombia mediante el proyecto con código INV3241. Agradecimientos también al Semillero

de monitoreo estructural de la Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, campus Medellín.

Referencias

- [1] Jefferies, M. and Been, K., Soil Liquefaction: a critical state approach. 2nd ed. CRC Press, London, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19114>.
- [2] Seed, R.B., Çetin, K.Ö., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., et al., Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. 26th Annual. ASCE Los Angeles Geotech. Spring Semin., Long Beach, California: 2003, pp. 1–71.
- [3] Maskrey, A., Navegando entre brumas: la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis del riesgo en América Latina. Colombia: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La Red, Colombia, 1998.
- [4] Ueda, T., Kato, A., Ogata, Y. and Yamaya, L., Spatial variations in seismicity characteristics in and around the source region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan. Earth, Planets and Space, 73(1), pp. 40, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01325-9>.
- [5] Servicio geológico Colombiano -SGC-, Sismicidad histórica de Colombia: Sismo de 1992/10/18, [en línea]. 1992. Disponible en: <https://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irAlInfoDetallada&idSismo=69> (accessed September 14, 2022).
- [6] Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., et al., Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF, Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), pp. 817–833, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817)).
- [7] Hocking, G., In situ method for determining soil liquefaction tendency and its prevention by electro-osmosis. WO2003027716A1, 2003.
- [8] Alfaro-Villagrán, F.A., Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción. Trabajo de fin de grado, Universidad del Bio Bio, Concepción, Chile, 2013.
- [9] Sadud, F., Mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia. Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y Al Ambiente, (44), pp. 1–14, 2020.
- [10] Barrenechea-Mantilla, B. and Rojas-Isern, T.L., Potencial de licuefacción en el distrito de San Jose. Trabajo de fin de grado, Universidad Señor de Sipan, Chiclayo, Perú, 2017.
- [11] Cordero-Placencia, M.B. and Torre-otomayor, M., Análisis del potencial de licuefacción en la Ptar las esclusas, Guasmo sur-Guayaquil. Trabajo de fin de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [12] Cordis, Evaluación de la licuefacción de suelos limosos mediante pruebas de campo. Cordis, 2013.
- [13] Ordoñez-Rendón, J.D., Evaluación del potencial de licuefacción de suelos en Tarqui, Ecuador. Trabajo de fin de grado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo, Samborondón, Ecuador, 2017.
- [14] Guerrero-Castro, N.J., Análisis comparativo de metodologías de evaluación de la licuación de suelos y recomendaciones para su aplicación en Chile, para las mediciones in situ SPT, CPT Y Vs. Trabajo de fin de grado, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19634.96963>.
- [15] Cubides-Cruz, A., Zonificación a partir del potencial de licuación de la zona urbana del municipio de Apartadó, Antioquia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [16] Hatanaka, M., Uchida, A. and Ohara, J., Liquefaction characteristics of a gravelly fill liquefied during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake. Soils and Foundations, 37(3), pp. 107–115, 1997. DOI: https://doi.org/10.3208/sandf.37.3_107.
- [17] Sandoval-Vallejo, E., Resistencia a licuación de arenas calcáreas. DYNA (Colombia), 79(173), pp. 32–40, 2012.
- [18] Muñoz-Riquelme, S.I., Análisis del comportamiento cíclico de arenas de relaves bajo diferentes condiciones iniciales de carga. Trabajo de fin de grado, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2017.

- [19] Sandoval-Vallejo, E., Campaña-Díaz, W. and Cruz-Escobar, A., Resistencia a licuación de la arena terrígena de Aguablanca en Santiago de Cali. *DYNA (Colombia)*, 80(181), pp. 126–135, 2013.
- [20] Torres-Rincón, A.L., Determinación del comportamiento de licuación por flujo de la arena del depósito cuaternario del municipio de Paipa mediante ensayos triaxiales no drenados. V Congr. Int. Ing. Civ., 2014, pp. 1–15.
- [21] Jiménez-Jiménez, O.J., Análisis del comportamiento de licuación por flujo en la arena del Guamo. MSc. Thesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2011.
- [22] Hakam, A., Ismail, F.A. and Fauzan, F., Liquefaction potential assessment based on laboratory test. *International Journal of Geomate*, 11(26), pp. 2553–2557, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21660/2016.26.5253>.
- [23] Mendoza-Herrera, J., Influencia de la granulometría en la licuación de arenas. Trabajo de fin de grado, Universidad de Costa Rica, Montes De Oca, Costa Rica, 2013.
- [24] Ochoa-Averos, S., Bizarreta-Ortega, J.C. and Quevedo, L., Aparato didáctico para experimentos de licuación de suelos. XXVII Congr. Nac. Ing. Civ., Lima, Peru: 2018. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4027968>.
- [25] American Society for Testing and Materials -ASTM-, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM D422-63 (1998), 1998.
- [26] Daoud, S., Said, I., Ennour, S. and Bouassida, M., Evaluation of liquefaction potential of New Caledonian nickel ores. *Sustain. Civ. Infrastructures*, Springer, Cham; 2018, pp. 149–161. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61902-6_13.
- [27] Cano-Franco, V., Medina-Mosquera, K.D., Restrepo-Escobar, J.F., Vélez-Hoyos, F.J. and Aristizabal-Tique, V.H., Video: análisis y validación del fenómeno de licuefacción en suelos mediante estudio granulométrico, [online]. [accessed: September 22th, 2022]. 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=jAqsYVvGJ5U>.
- [28] Stuedlein, A.W. and Bong, T., Effect of spatial variability on static and liquefaction-induced differential settlements. *Geo-Risk* 2017, Reston, VA, 2017, pp. 31–51. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784480694.003>.
- [29] Erdemgil, M.E., Method for reducing the liquefaction potential of foundation soils. US7290962B2, 2006.
- [30] Prabhakaran, A., Kim, K., Orang, M.J., Qiu, Z., Ebeido, A., Zayed, M., et al., Polymer Injection and liquefaction-induced foundation settlement: a shake table test investigation. *Geo-Congress 2020*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 2020, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482810.001>.
- [31] Norma Colombiana de Diseño Sismo Resistente (NSR-10). Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010.
- V. Cano-Franco**, obtuvo su grado en Ingeniería Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, campus Medellín (2022). En la actualidad es ingeniera residente en HHS ingenieros SAS, Medellín, Colombia. Sus áreas de interés son las estructuras, materiales y suelos. ORCID: 0000-0002-6300-7723
- K.D. Medina-Mosquera**, obtuvo su grado en Ingeniería Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, campus Medellín (2022). Sus áreas de interés son las estructuras, materiales y suelos. ORCID: 0000-0002-0907-6744
- J.F. Restrepo-Escobar**, obtuvo su grado en Ingeniería Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, campus Medellín (2022). En la actualidad es ingeniero residente en Ser-proyectos SAS, Medellín, Colombia. Sus áreas de interés son las estructuras, materiales y suelos. ORCID: 0000-0001-9381-4254
- F.J. Vélez-Hoyos**, es profesor-investigador de la Universidad Cooperativa de Colombia desde el 2013, candidato a doctor en ingeniería en la línea de Modelamiento Computacional. Mac. en Ciencias-Física (2008) e Ingeniero Físico (2004) de la universidad Nacional de Colombia. Miembro del grupo de investigación TERMOMECC de la Universidad Cooperativa de Colombia. Áreas de trabajo: Modelamiento Computacional en ciencia e Ingeniería, Física aplicada, Óptica, Ondas, Instrumentación y Sensores. Su investigación actual se enmarca en las líneas de investigación en Energías, agua y medio ambiente, y Estructuras, materiales y suelos. ORCID: 0000-0002-4267-042X
- V.H. Aristizabal-Tique**, obtuvo su grado en Ingeniería Física de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (2004) y realizó una Maestría en Ciencias-Física (2008) de la misma universidad. Actualmente es candidato a doctor en Ingeniería de la Universidad EAFIT. Es profesor-investigador de tiempo completo y miembro del grupo de investigación TERMOMECC de la Universidad Cooperativa de Colombia. Su trabajo se ha centrado en simulación electromagnética computacional, modelado y simulación de ondas elásticas, redes de comunicaciones y de sensores de fibra óptica, monitoreo y simulación estructural y de suelos. Recientemente, ha venido trabajando aprendizaje profundo con redes neuronales, uso de vehículos no tripulados y sistemas de información geográfica en diferentes contextos, especialmente, en el área civil y de agricultura. ORCID: 0000-0002-7880-5883