

**XXVII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL  
LIMA, PERÚ, 23 al 27 DE ABRIL DEL 2018**

**APARATO DIDÁCTICO PARA EXPERIMENTOS DE LICUACIÓN DE  
SUELOS**

***Sara del Rocío Ochoa Averos<sup>1</sup>, Julio César Bizarreta Ortega<sup>2</sup>, Luz Quevedo Sosa<sup>3</sup>***

*<sup>1</sup>Universidad de Integración Latinoamericana (UNILA), Brasil,*

*<sup>1</sup>sara.averos@aluno.unila.edu.br, <sup>2</sup>julio.ortega@unila.edu.br, <sup>3</sup>luz.sosa@aluno.unila.edu.br*

**RESUMEN:**

Los modelos físicos de licuación de suelos facilitan la comprensión de los estudiantes de ingeniería dado la dificultad de estudios insitu del fenómeno. Los fenómenos geotécnicos como la licuación, pueden ser representados a través de dichos modelos. En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de una mesa vibradora, de bajo costo y fácil ejecución, y su aplicación en experimentos de licuación de suelos en pequeña escala. Para generar las vibraciones en la mesa fue necesario colocar un tornillo como contrapeso, de forma que el eje de rotación tenga excentricidad. El nivel de vibraciones fue controlado por el programa *Vibrometer*. Finalmente, para analizar los efectos del modelo didáctico se realizó un experimento de licuación, con dos características de suelo diferentes: el primero corresponde a un depósito de arena uniforme saturada y el segundo a un depósito formado por una camada de arcilla sobre una camada de arena saturada.

**ABSTRACT:**

Physical models facilitate understanding of engineering students due to the difficulty of in situ study. Geotechnical phenomena such as liquefaction can be represented through these models. This paper presents the methodology used for the development of a vibrating table, low cost and easy execution, which resembles the phenomenon of liquefaction on a small scale. To generate the vibrations in the table it was necessary to place a screw as a counterweight, so that the axis of rotation has eccentricity. The level of vibrations was controlled by the *Vibrometer*. Finally, to analyze the effects of the didactic model, a liquefaction experiment was carried out, with two different soil characteristics: the first corresponds to a deposit of uniform saturated sand and the second to a deposit formed by a layer of clay on a litter of sand saturated.

**PALABRAS CLAVES:**

Licuación de suelos, mesa vibradora, modelo didáctico, equipo de bajo costo.

## INTRODUCCIÓN

La licuación de suelos por lo general sucede en suelos de características friccionantes (arenas, limos y gravas) en un estado suelto o próximo al mismo, sometidos a cargas dinámicas como el sismo, debido al corto intervalo de aplicación de estas cargas (de orden de fracciones de segundo), por la acción dinámica el drenaje del agua es restringido, generando así el aumento de las poro-presiones y disminuyendo el esfuerzo efectivo hasta un valor considerable para que la resistencia al corte se aproxime a cero, y el material tenga un comportamiento próximo a un líquido viscoso (Bizarreta 2017). En la Figura 1, se representa el fenómeno de licuación, donde las flechas anaranjadas representan el aumento de la presión de los poros y las flechas negras indican la disminución de la tensión efectiva.

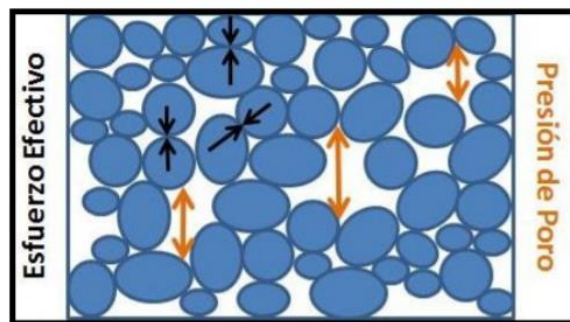


Figura 1. Fenómeno de licuación en los poros del suelo (Mendoza, 2013).

Con el objetivo de evitar dichos inconvenientes es necesario que los estudiantes de ingeniería conozcan acerca del fenómeno de licuación. El ensayo puede ser realizado a través de una mesa vibratoria, que imita un sismo o terremoto, generando vibraciones en varios niveles. Para este análisis son utilizados diferentes tipos de suelos.

El fenómeno de licuación de suelos en los últimos años ha generado problemas a diferentes estructuras civiles como edificios, puentes y muros. La mayoría de problemas están asociados a sismos de mediana y elevada magnitud, sobre suelos de tipo limo y arena en el estado saturado o próximo al mismo (Holzer, 2010). El estudio del fenómeno *in situ* es muy difícil de ser observado, sin embargo, en el laboratorio es posible visualizar el fenómeno utilizando modelos físicos basados en una mesa vibradora acoplada a un recipiente con suelo.

La mesa vibradora consiste básicamente en una plataforma móvil. Según Milne (1890) citado por Servén (2010), la primera mesa vibratoria conocida fue construida en Japón por el Profesor Otori y sus colaboradores en la Universidad de Tokio, con el objetivo de simular el comportamiento de los objetos en los terremotos reales, este equipo operado manualmente estaba formado por un vagón sobre rieles conectado a una rueda por una manivela excéntrica. Posteriormente la forma manual fue sustituida por los motores eléctricos. Diversas mesas vibratorias asociadas a experimentos de licuación de suelos son encontradas en videos de índole educativos en internet. Algunos de estos utilizan materiales alternativos o en otros se indica el principio utilizado para su ejecución.

Para el desarrollo de la mesa vibradora de este trabajo, fue utilizada con ideas basadas en los modelos desarrollados por Andrade (2016), el Centro de Sensibilización y aprendizaje sobre terremotos y Tsunamis (CESATT-CISMID 2016), y Awaji (2015). El primer modelo utiliza un sistema mecánico compuesto de masas y amortiguadores (Figura 2a), un motor de 1cv en el centro de la mesa con una pieza de hierro fuera del eje del motor (Figura 2b). El modelo desarrollado por el CESATT-CISMID consiste en una mesa apoyada en cuatro resortes y vibrada por un motor eléctrico.

El experimento de licuación con este modelo fue realizado en un recipiente plástico no transparente cuya base es mucho mayor que la altura del mismo, en el interior del recipiente es colocada arena suelta saturada y una estructura superficial, como se muestra en la Figura 4. El modelo Awaji (2015) fue un experimento de licuación de suelos llevado a cabo en el stand de la Asociación Metropolitana de Estudios Geológicos de Tokio, por motivo de una feria de prevención de Desastres en año 2015, se trata de un experimento que utiliza arena fina saturada, en el cual el autor utiliza tres tipos de maquetas, que representan a diferentes tipos de cimentaciones (corridas, placas y pilotes). Además, se colocan esferas de tecnopor en el interior del suelo licuable. Al iniciar el ensayo, el movimiento horizontal genera flujo de agua hacia la superficie, y simultáneamente la edificación se sumerge mientras la esfera de tecnopor emerge, véase estos detalles en la Figura 4.



Figura 2. Mesa vibratoria casera con llantas, a) sistema de llantas-amortiguadores, b) Motor con excentricidad. (Andrade, 2016).



Figura 3. Mesa vibratória con resortes (CESATT-CISMID, 2016).



a) Tres tipos de cimentación diferente

b) Durante el proceso de licuación

Figura 4. Mesa vibratoria con un grado de libertad (Awaji, 2015).

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

### Diseño

La idea principal de la mesa vibratoria a desarrollarse está en cuatro pelotas de plástico pegada a una tabla rectangular fina y leve, la vibración será dada por un motor excéntrico colocado en la parte central e inferior de la mesa y protegido por una madera, como se muestra en la Figura 5. El motor excéntrico genera las vibraciones y las pelotas el amortiguamiento, la tabla de madera debe soportar un recipiente con suelo y agua de 1 kilogramo como máximo. La madera de protección entre la tabla rectangular y el motor evita la fricción entre ambos. Las dimensiones finales de la tabla fue de 57 x 33 cm x 1cm.

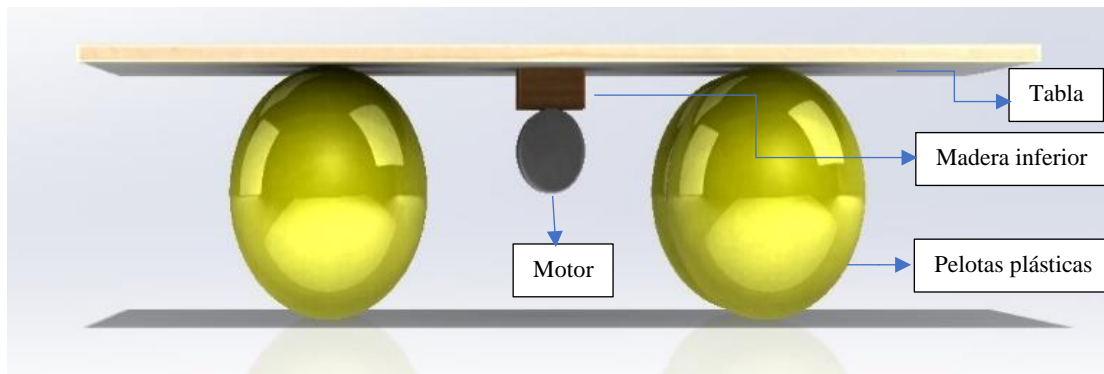


Figura 5. Diseño de mesa vibratoria usando pelotas de plástico como amortiguador.

### Detalles constructivos

La tabla rectangular consistió de dos tablas de 0,5cm de espesor pegadas y aseguradas con brida de nylon. El motor utilizado fue de una licuadora, eso incluye el sistema de encendido e apagado y el sistema de cambio de velocidades de rotación. La fijación del motor y la madera de protección de 12 x 6 cm fueron realizadas con brida nylon. Para generar la excentricidad de las revoluciones e el eje fueron ensayado diferentes pesos, finalmente fue adoptado como adecuado un tornillo con contrapeso. Detalles de este sistema son mostrados en la Figura 6.



a) Vista superior

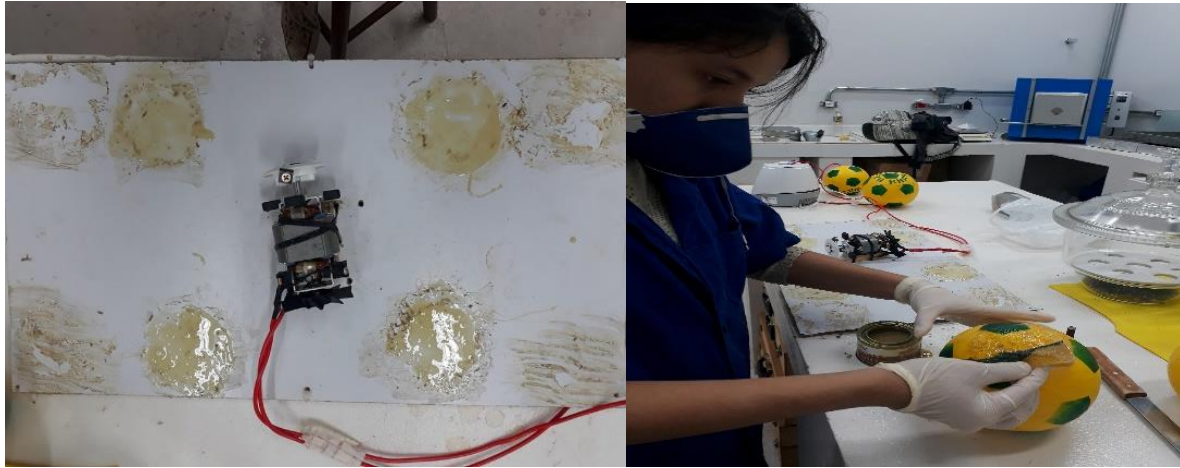
b) Vista lateral

Figura 6. Motor centralizado.

Para sostener el sistema mesa-tabla y amortiguar fueron colocadas 4 pelotas plásticas en dos columnas, a una distancia de 12.5cm desde el eje del motor hasta el centro de las pelotas. Estas fueron adheridas con pegamento especial, para esto se colocó pegamento durante 13 minutos tanto en la tabla como en un borde de las pelotas utilizando una esponja, posteriormente se juntó ambas superficies. Detalles del sistema de pegamento entre las pelotas y la mesa en la Figura 7.

Los cables de la licuadora desmontada fueron aumentados de longitud usando una extensión de los cables, con el objetivo de evitar el contacto con el sistema motor-tabla y facilitar el manejo del encendido y las velocidades de las revoluciones de eje del motor. El sistema de la mesa vibratoria final se muestra en la Figura 7.

El nivel de vibraciones fue controlado por un sensor de vibraciones, usando el programa *Vibrometer* – celular, por ese motivo el celular fue adherido a la tabla, como se muestra en la Figura 8. Las vibraciones de la tabla son transmitidas a un recipiente plástico transparente que contiene en su interior el suelo a analizar. Fue verificado que el recipiente que mejor se comporta es aquel cuya altura sea como mínimo dos veces su base, así el nivel de material alcanza hasta 2,5 veces la base, todo esto con el objetivo de visualizar el flujo vertical del agua producido por el fenómeno de licuación de suelos.



a) Vista superior

b) Preparación del pegamento

Figura 7. Montaje del sistema pelotas bajo la mesa



Figura 8. Mesa vibratoria y equipo en su estado final

## EXPERIMENTOS

### Experimento 1 – simulación de licuación de un depósito de arena muy suelta

Este experimento muestra el efecto de la licuación de un depósito de arena suelta saturada uniforme. La arena fue tamizada, y se seleccionó la que pasa en el tamiz N° 30 y se queda en el tamiz N° 50. La arena seleccionada fue colocada en un recipiente plástico transparente de 600ml, con la siguiente metodología. Se colocó arena suelta y se saturó la misma hasta los 300ml, donde se colocó la primera esfera de tecnopor, se rellenó hasta los 400ml para colocar la segunda esfera, se continuó colocando arena suelta y saturando hasta los 500 ml donde se depositó la última esfera y se rellenó de arena suelta con el nivel de saturación casi en la superficie hasta los 600ml, como se muestra en la Figura 9. Se observó un exceso de agua en la superficie, la misma que fue retirada con papel absorbente, de forma que el nivel de agua quede debajo del nivel superficial. Fue colocada un sobrepeso de acero que puede representar una edificación. Se asegura el envase con cinta adhesiva, la misma que será utilizada para adherir el celular a la mesa, lado izquierdo del envase.



a) Vista superior

b) Vista frontal

Figura 9. Ubicación de las esferas de poliestireno.

Al tener la muestra lista, se enciende el equipo y simultáneamente se inicia el programa para registrar las vibraciones del celular, principalmente las aceleraciones. Al iniciar la vibración se observa el hundimiento inmediato de la pieza metálica y el ascenso a la superficie de las 3 esferas de poliestireno. También fue observado que las velocidades de ascenso de las esferas de tecnopor son diferentes y están en relación con la profundidad inicial a la superficie de cada una como se detalla en la Figura 10 y Tabla 1.

**Tabla 1.-** Velocidad de ascensión de las esferas de tecnopor

Punto	Profundidad inicial (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (mm/s)
A	100	2	50
B	200	3	66,7
C	300	4	75

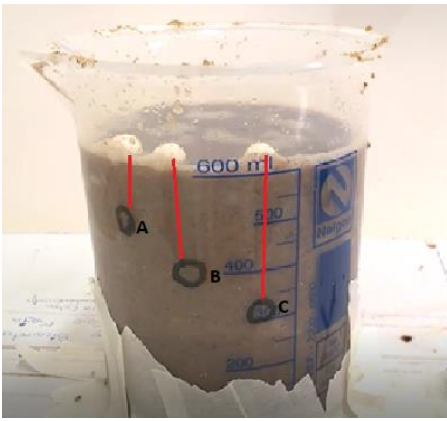


Figura 10. Ascensión de las esferas de tecnopor

En la Figura 11 se muestra el detalle del registro de aceleraciones versus el tiempo de la tabla de madera, dato mostrado como resultado del programa Vibrometer. Únicamente los cuatro primeros segundos corresponde al ensayo y el fenómeno de licuación observado.

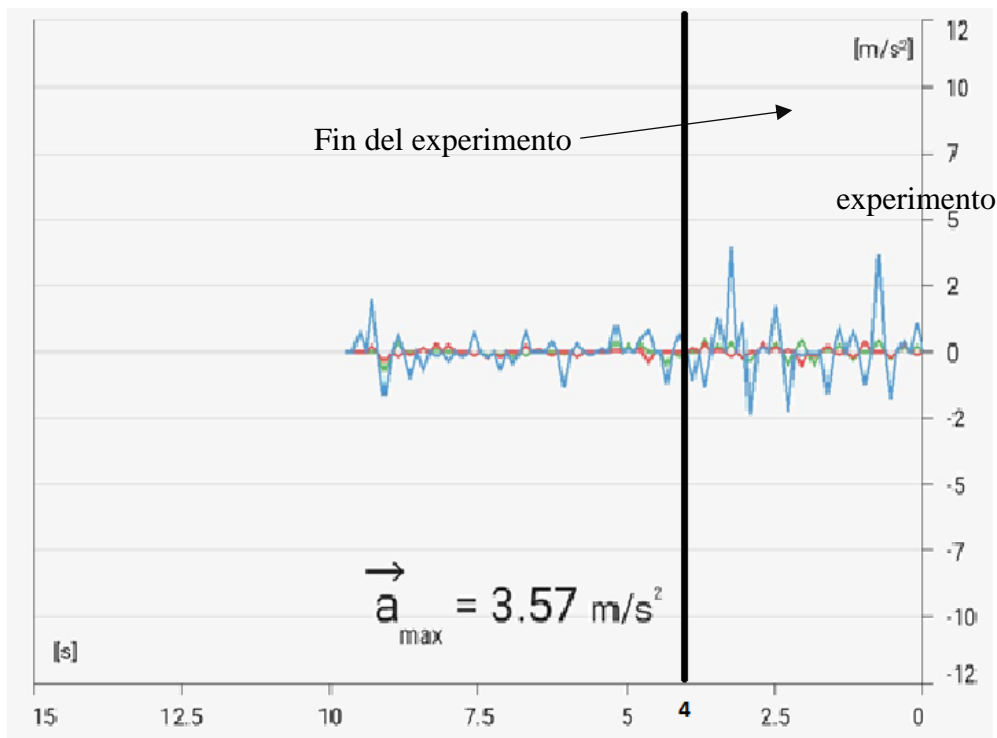


Figura 11. Resultado del programa *Vibrometer*

### Experimento 2 – simulación de licuación de un estrato de arena debajo de otro de arcilla.

En este experimento se muestra el efecto de licuación de un depósito de suelo formado por un estrato superficial de arcilla no saturada sobre una arena saturada uniforme y potencialmente licuable. El nivel de agua está localizado en la interface entre estos dos materiales. Sobre la arcilla superficial y no saturada fue colocado la pieza metálica que representa una cimentación (Figura 12a). Con la vibración fue observado la saturación da arcilla debido al flujo ascendente de agua generado por el efecto de licuación en la arena. El hundimiento de la pieza metálica no es inmediato es lento, véase en la Figura 12b y figura 12c. Al retirar la pieza metálica, después de finalizado la vibración, se observa que el nivel de agua está en la parte inferior del estrato de arcilla (Figura 12d).

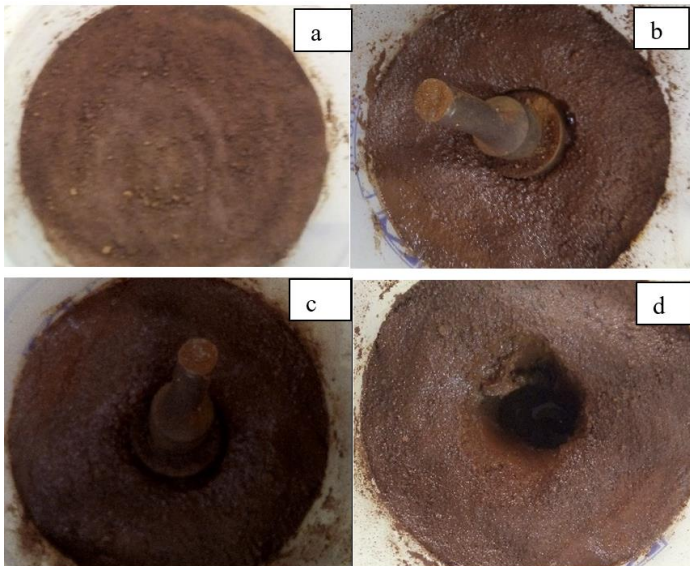


Figura 12. Proceso licuación en un estrato superficial de arcilla sobre un estrato de arena licuable.

## CONCLUSIONES

La visualización del fenómeno de licuación de suelo mediante un recipiente transparente acoplado a una mesa vibradora se mostró adecuado, en especial para observar el movimiento ascendente del flujo con transporte de pequeñas partículas. Para tal finalidad es preciso que la altura del recipiente sea mayor que la base del mismo, esto también favorece los estudios de diferentes tipos de perfiles de suelo, por ejemplo, los perfiles de suelo heterogéneo. El bajo costo de la construcción del equipo lo hace, más accesible y recomendado para ser desarrollados por universidades y colegios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Prof. Ivan Gómez Araujo por las consultas y sugerencias en relación con la dinámica de la estructura, y los técnicos de laboratorio de ingeniería de la UNILA en el soporte para la construcción del equipo.

## REFERENCIAS

- Andrade, W.** (2016). “Mesa vibratória caseira com pneus”. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=-QqIKT\\_3aIE](https://www.youtube.com/watch?v=-QqIKT_3aIE). Acceso: 15 de octubre de 2017.
- Awaji, H.** (2015). 防災展2015～阪神・淡路大震災20年そして未来へ備えよう～液状化実験. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=pZ4kH-BJSL0>. Acceso: 16 de octubre de 2017.
- Bizarreta, J.** (2017). “Notas de clases de Cimentaciones”. Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA), Foz de Iguazú.
- Centro de sensibilización y aprendizaje sobre terremotos y Tsunamis (CESATT CISMID).** (2016). “Fenómeno de Licuación de Suelos”. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=plgfAGmcfA>. Acceso: 15 de octubre de 2017.
- Holzer, T. L., Jayko, A. S., Hauksson, E., Fletcher, J. P., Noce, T. E., Bennett, M. J., ... & Hudnut, K. W.** (2010). “Liquefaction caused by the 2009 Olancha, California (USA), M5.2 earthquake”. *Engineering Geology*, 116(1-2), 184-188. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.009>
- Mendoza, J.** (2013). “Influencia de la granulometría em la licuación de arenas”. *Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <http://hdl.handle.net/10669/30300>
- Severn, R.T.** (2010). “The development of shaking tables – a historical note”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 195-213. <https://doi.org/10.1002/eqe.1015>