

Efectos de los sismos en materiales no consolidados: casos reales, conceptos teóricos y modelos analógicos didácticos

EFFECTS OF EARTHQUAKES IN UNCONSOLIDATED TERRAINS: REAL CASES, THEORETICAL CONCEPTS, AND DIDACTIC ANALOG MODELS

José SELLÉS-MARTÍNEZ¹ 

1 - UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES, DPTO. DE GEOLOGÍA, BUENOS AIRES, ARGENTINA.

EMAIL: PEPE@GL.FCEN.UBA.AR

Abstract: Introduction and Objective. This contribution introduces theoretical concepts related to the mechanical behavior of particulate solid materials (both dry and saturated with water) and their most significant differences from the behavior of continuous solid materials and that of fluids. **Methodology.** It describes different school didactic models designed for the visualization and teaching of liquefaction and fluidization phenomena that can affect areas composed of soils, loose or poorly consolidated sediments in case of being affected by seismic waves. **Results.** The phenomenon is socially important due to the fact that collapse of founding material can cause severe damage even in buildings built following the regulations for the prevention of seismic risk in the location area. **Conclusion.** The models and their performance are analyzed in relation to natural situations pointing out their successes and limitations. Other additional complementary activities are suggested.

Resumen: **Introducción y Objetivo.** Esta contribución introduce los conceptos teóricos relacionados con el comportamiento mecánico de materiales sólidos particulados (tanto secos como saturados con agua) y sus diferencias más significativas con el comportamiento de materiales sólidos continuos y el de los materiales fluidos. **Metodología.** Se describen diferentes modelos didácticos escolares diseñados para la visualización y enseñanza de los fenómenos de licuefacción y fluidización que pueden afectar áreas compuestas por suelos, sedimentos sueltos o poco consolidados en caso de ser afectados por ondas sísmicas. **Resultados.** Este fenómeno es socialmente importante debido a que el colapso del material de cimentación puede causar daños severos incluso en edificaciones construidas siguiendo las normas de prevención de riesgo sísmico en la región. **Conclusión.** Se analizan los modelos y su desempeño en relación con situaciones naturales señalando sus aciertos y limitaciones. Se sugieren otras actividades complementarias adicionales.

Introducción

Las contribuciones previas de esta serie de notas sobre los modelos didácticos de uso habitual en la enseñanza de temas referidos a los terremotos, sus causas y sus consecuencias han abordado la naturaleza y características de las ondas sísmicas, su transmisión y sus efectos (Sellés-Martínez, 2005 y 2020a), los errores frecuentes en su interpretación y su representación gráfica (Sellés-Martínez 2020b), y también la tecnología constructiva que permite reducir el riesgo de colapso de las construcciones afectadas (Sellés-Martínez, 2021a). En todos estos casos el análisis se realiza sobre un modelo teórico de generación y propagación de las ondas en un medio continuo (el sustrato rocoso) al cuál se hallan

vinculadas las construcciones que son afectadas. Será objeto del presente trabajo considerar los fundamentos teóricos y ofrecer algunos ejemplos de modelos didácticos asociados a la transmisión de las ondas sísmicas en los sedimentos de pobre o nula consolidación (medios granulados o particulados), cuyo comportamiento puede ser muy diferente del de los materiales continuos y que es sensiblemente afectado, además, por la presencia de agua en la red de poros del material. La Figura 1 ilustra dos situaciones desarrolladas en regiones en las que el subsuelo estaba saturado de agua al momento de la llegada de las ondas y cuyos efectos hubieran sido netamente diferentes de no darse esa circunstancia.

Citation/Citação: Sellés-Martínez, J. (2023). Efectos de los sismos en materiales no consolidados: casos reales, conceptos teóricos y modelos analógicos didácticos. *Terræ Didática*, 19(Publ. Continua), 1-12, e023025. doi: 10.20396/td.v19i00.8673837.



Artigo submetido ao sistema de similaridade

Keywords: Seismic risk, Liquefaction, Fluidization, Pedagogic models.

Palabras clave: Riesgo sísmico, Licuefacción, Fluidización, Modelos didácticos.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 28/06/2023

Revised/Corrigido: 25/08/2023

Accepted/Aceito: 03/10/2023

Editor responsável: Celso Dal Ré Carneiro 

Revisão de idioma (Inglês): Hernani Aquini

Fernandes Chaves 





Figura 1. Efectos de un sismo en un área con suelos de baja consolidación. a) Edificios construidos de acuerdo a la normativa de protección antisísmica colapsan como consecuencia de la (no prevista) licuefacción del sustrato, (16 de Junio de 1964, Niigata, Japón. (Fig. 11.3 en Wang & Manga, 2021). b) Estructuras soterradas huecas (y por lo tanto menos densas que el sedimento que las rodea) son impulsadas hacia arriba como consecuencia de su flotabilidad al producirse la licuefacción. Evento del 11 de Marzo del 2011, Tohoku, Japón. (Fig. 11 en Yamaguchin et al., 2012)

La mecánica desarrollada para estudiar estos materiales se denomina tradicionalmente “mecánica de suelos” en el ámbito ingenieril y ha sido abordada tanto en forma teórica como experimental desde los estudios pioneros realizados por el ingeniero Karl von Terzaghi [1883-1963] hasta el presente. Este enfoque tiene en cuenta que el suelo está compuesto por un conjunto de partículas que pueden tener diferentes formas, tamaños y composiciones y que, además, pueden estar más o menos compactados según la forma en que se han acumulado en ese lugar y los procesos a que puedan haber estado sometidos (soterramiento bajo otras capas de sedimento, levantamiento por erosión del material suprayacente, etc.), procesos que modifican el grado de compactación del material y, fundamentalmente, su porosidad, es decir la cantidad de espacios vacíos que quedan entre los granos. La alta porosidad de los suelos en comparación con las rocas y la relativa libertad de

movimiento de dichos granos, que pueden rotar y desplazarse bajo ciertas condiciones (algo imposible en las rocas ígneas y en las rocas sedimentarias completamente cementadas), son los factores claves en el desarrollo de comportamientos particulares de los suelos ante los esfuerzos y, en el caso que nos ocupa, frente a la acción de la vibración asociada al pasaje de una onda sísmica.

Es así que el impulso sísmico es un peligroso agente de desestabilización de los materiales sueltos acumulados en laderas inestables (con pendientes por encima del ángulo de reposo del material), ya que mientras el material es afectado por la vibración el número de contactos grano a grano disminuye o se desvanece, la cohesión del material se ve seriamente afectada y el material cede por su propio peso. En el caso de macizos rocosos diaclasados por su parte, la vibración aumenta la posibilidad de que los materiales se movilen a favor de las fracturas pre-existentes bajo la acción de la atracción gravitatoria. Un factor de carácter más bien local, pero que puede ser determinante en la generación de daños, es el contenido de agua de los materiales en cuestión, ya que los efectos agravantes pueden expresarse aún en terrenos llanos cuando la superficie freática se encuentra a poca profundidad.

Es importante puntualizar aquí tres efectos que se asocian al pasaje de la onda: el primero es el resultado de la movilización del sustrato por transferencia de energía a los materiales sueltos generándose habitualmente un desplazamiento importante de las partículas que, al no estar ligadas entre sí, en casos extremos pueden incluso proyectarse al aire; el segundo es que el material puede reacomodarse cambiando su volumen y su forma y, naturalmente, desestabilizando todo lo edificado sobre él; finalmente, la presencia de agua en los poros del material puede conducir a la *licuefacción* y, eventualmente, incluso a la *fluidización* del material. Una vez extinguido el impulso sísmico el sistema vuelve al estado de reposo, pero el ordenamiento espacial de las partículas ya no es igual a la inicial. Estas situaciones se describirán en los próximos párrafos y luego se presentarán y analizarán los modelos analógicos de las mismas.

La acción de las ondas sísmicas sobre materiales inconsolidados

Se reúne bajo la denominación “*efecto local*” o “*efecto de sitio*” al conjunto de modificaciones inducidas en el haz de ondas sísmicas que alcanzan un lugar determinado y que es consecuencia de las

características propias de ese lugar. Dichas modificaciones están asociadas tanto al relieve topográfico del lugar como a su composición geológica y pueden afectar la amplitud y frecuencia de las ondas e incluso la duración de las vibraciones. El *efecto topográfico* está vinculado a la forma del relieve y se asocia al diferente patrón de concentración o de dispersión de las ondas en zonas asociadas a valles o a elevaciones, ya que la superficie de contacto entre medios con muy diferentes propiedades mecánicas (suelo y atmósfera) tiene formas (cóncavas en los valles, convexas en las elevaciones) que influyen en las trayectorias y el comportamiento de dichas ondas. El *efecto geológico*, más importante que el topográfico, es consecuencia de las variaciones en las propiedades mecánicas entre los diferentes materiales geológicos y en este caso se distinguen dos tipos de modificaciones: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica en las ondas

La *amplificación geométrica* se asocia fundamentalmente a las variaciones o contraste en la impedancia, parámetro que vincula la densidad del material geológico con la velocidad de las ondas sísmicas en él. En general las impedancias de los materiales no consolidados son menores que las de las rocas, ya que tanto su densidad como la velocidad de las ondas al atravesarlos son mayores en éstas que en aquéllos. Como consecuencia, las amplitudes de los desplazamientos se hacen mayores en los materiales menos consolidados o sueltos, con los consecuentes resultados sobre el equilibrio y la integridad de las estructuras que deben soportar.

Por su parte, la *amplificación dinámica* o *resonancia* vincula la frecuencia natural de vibración del material geológico con la frecuencia de la onda sísmica y el espesor de material geológico en cuestión. La amplificación no es igual para cada tipo de onda y en general resulta en una amplificación de los desplazamientos de las partículas. En la Figura 2 puede apreciarse la diferencia en el registro cuando el sismógrafo está ubicado en terrenos rocosos y cuando lo está en terrenos de baja consolidación.

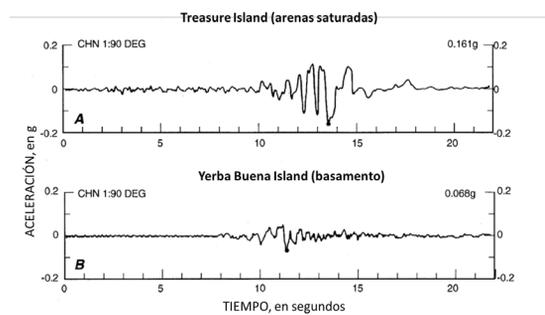


Figura 2. Sismogramas correspondientes a dos estaciones localizadas sobre materiales de diferentes características en el área norte de la península de San Francisco en ocasión del terremoto de Loma Prieta del 17 de octubre de 1989. Puede observarse el aumento en la amplitud de la señal en el sismograma correspondiente al terreno inconsolidado y saturado (Treasure Island) con respecto al correspondiente a la roca firme (Yerba Buena Island). Tomado de la Figura 11 en Power et al. (1998)

Es importante destacar que, durante la transmisión de una onda, el *flujo de energía transmitida*, valor que vincula la velocidad de la onda (Tab. 1), la velocidad de la partícula y la densidad del material, debe mantenerse constante. Como consecuencia de ello, la disminución en la velocidad de la onda y/o en la densidad del material se compensan con el aumento en la velocidad de la partícula, es decir

Tabla 1. Velocidades de las ondas P y S y densidades para diferentes materiales geológicos. Puede verse que, si bien los valores tienen amplios márgenes de variación, muestran mayormente una fuerte diferenciación entre los consolidados y los no consolidados. Datos compilados por el autor a partir de diversas fuentes

Materiales	Velocidad ondas P - km/s	Velocidad ondas S - km/s	Densidad g/cm ³
<i>Continuos</i>			
Granito	4500-6000	2500-3300	2,5-2,7
Basalto	5000-6000	2800-3400	2,7-3,1
Gneiss	4400-5200	2700-3200	2,5-2,7
Caliza/Mármol	3500-6000	2000-3300	2,4-2,7
Arenitas saturadas	2000-3500	800-1800	2,1-2,4
<i>Particulados</i>			
Suelos	300-700	100-300	1,7-2,4
Depósitos carbonaticos	2000-3000	750-1500	2,1-2,6
Depósitos arcillosos saturados	1100-2500	200-800	2,0-2,4
Depósitos arenosos secos	400-1200	100-500	1,5-1,7
Depósitos arenosos saturados	1500-2000	400-600	1,9-2,7
<i>Fluidos</i>			
Agua	3400-3800	-----	1
Aire	330	-----	0,0013

que la misma se acelera y, por lo tanto, adquiere mayor energía cinética, lo que puede permitirle, en casos extremos, vencer la atracción gravitatoria y proyectarse hacia la atmósfera.

En el Tabla 1 se presentan valores típicos de densidad y de velocidad de las ondas sísmicas para diferentes materiales geológicos continuos y particulados y para materiales fluidos (que no transmiten las ondas S) a los fines de su comparación.

Licuefacción y fluidización

No está de más recordar en el inicio de este ítem que, contrariamente a lo que muchas veces se asume intuitivamente, el agua no actúa como lubricante para facilitar el desplazamiento en los planos de falla o entre las partículas de los suelos, sino que su efecto es indirecto y no está vinculado a la mera presencia del líquido, sino a la cantidad del mismo que ocupa los espacios porales y, una vez que se ha alcanzado la saturación, a la presión que el agua ejerce en el seno del sedimento. Si se tiene en cuenta que los castillos de arena se construyen con el material húmedo y que los mismos se desmoronan al secarse la arena, puede rápidamente deducirse que “agua” y “lubricación” no están unívocamente vinculados (la actividad “*Castillos de arena y laderas*” en https://www.earthlearningidea.com/PDF/66_Spanish.pdf es muy ilustrativa al respecto).

Por otra parte, si bien en muchas ocasiones se los emplea indistintamente, los términos *licuefacción* y *fluidización* no significan estrictamente lo mismo (véase por ej. Collinson, 1994 al respecto). La licuefacción define la situación en la cual la presión de fluidos en el seno del sedimento alcanza el valor de la carga que el mismo está soportando, anulando el esfuerzo normal en los contactos entre partículas y, en consecuencia, también la resistencia al desplazamiento relativo inducida por la fricción entre los granos. Como durante el aumento de la presión del agua los esfuerzos tangenciales externos no son anulados pero la resistencia a la cizalla del material se reduce a cero, la deformación tiene lugar con gran facilidad. En el segundo caso, la fluidización se produce cuando el agua adquiere energía suficiente como para mantener las partículas sólidas en suspensión y todo el sistema puede moverse en función del gradiente de presiones.

Si los sedimentos se encuentran en laderas más o menos empinadas, su eventual licuefacción puede, por efecto de la gravedad, facilitar su fluidización y generar deslizamientos y avalanchas.

La necesaria saturación del suelo, es importante señalarlo, puede no ser un rasgo permanente del sitio y producirse, simplemente, como consecuencia de lluvias muy importantes que no dan tiempo a que los suelos drenen toda el agua que reciben, saturándose y fluyendo (aún incluso sin necesidad de un sismo que actúe como disparador). Este fenómeno es característico de las zonas áridas en las que, durante los largos períodos secos, se acumulan grandes cantidades de detritos con pendientes inestables, los que son súbitamente movilizados por las lluvias de las tormentas excepcionales.

La licuefacción del suelo en áreas llanas, de acuerdo con la experiencia existente, se asocia a terremotos de una magnitud igual o superior a 5,5 y actúa hasta profundidades que no exceden los 15m en presencia de niveles freáticos altos que impliquen la saturación completa de un espesor importante de suelo. En González de Vallejo et al. (2002) se detallan los factores que influyen en la potencialidad o susceptibilidad de licuefacción de un suelo y los modos de estimarla. Como es fácil suponer, el peso mismo de las construcciones hace que las mismas tiendan a hundirse y, aun cuando los edificios pudieran haber superado exitosamente el paso de las ondas sísmicas si hubieran estado apoyados en otra clase de sustrato, no pueden sostenerse al producirse la licuefacción y, habitualmente, se hunden en el terreno o, eventualmente, se vuelcan sobre un costado con los consiguientes daños (Fig. 1a). El caso inverso también ocurre, cuando existen soterradas en el subsuelo estructuras que son más livianas que el material que las rodea y al producirse la licuefacción tienden a flotar y, en consecuencia, ascienden hacia la superficie (Fig. 1b).

Análisis de los modelos y actividades didácticas asociadas a los temas expuestos

Se describen a continuación una serie de actividades ordenadas de acuerdo a su complejidad en referencia a la cantidad de factores que intervienen en el proceso. Las actividades 1 y 2 abordan el problema de la diferencia de comportamiento entre los materiales sólidos, líquidos y particulados con respecto a su capacidad para soportar cargas. El caso **c** de la actividad anterior y las actividades 3 y 4 desarrollan el comportamiento de materiales particulados con agua en sus poros.

En caso de ser necesario incorporar conocimiento acerca del significado de términos como *porosidad* y *permeabilidad*, en Sellés-Martínez

(2021b), pueden encontrarse definiciones y experiencias vinculadas a la comprensión de la forma en que el agua es almacenada y se desplaza en los sedimentos.

Debe tenerse en cuenta que cuando se hace referencia a la densidad de los objetos y materiales la misma no es la de la sustancia que compone cada uno de ellos (hierro o cuarzo, por ejemplo) sino la que le corresponde al volumen determinado por la forma del recipiente, su composición y la cantidad y composición del contenido de cada uno de los modelos. Esto es importante dado que, en los casos en que los objetos quedan total o parcialmente sumergidos en un fluido comienza a actuar sobre ellos el Principio de Arquímedes.

Es importante destacar aquí, dado que la observación es válida para todos los modelos, que el paso de la “onda sísmica” por un determinado lugar no es un único impulso (como el golpeteo que se utiliza en las actividades) sino un conjunto de vibraciones que puede llegar a ser muy complejo y cuyos efectos pueden sumarse a lo largo del proceso, potenciando los daños.

En forma similar debe señalarse que el estado tensional de un suelo, aun cuando no exista actividad sísmica, está afectado por el peso de las construcciones que soporta y estos efectos de carga, que actúan además de modo diferente en suelos homogéneos o heterogéneos y en suelos secos, húmedos o saturados, no son reproducibles en los modelos experimentales que se están considerando. El tratamiento de modelos analógicos y digitales de mucha mayor complejidad, asociados a investigaciones en el campo de la ingeniería sísmica y de la mecánica de materiales particulados (caso de los “lechos fluidos” utilizados en la industria química, por ejemplo), escapan a los objetivos de esta contribución, restringida exclusivamente al análisis de algunos modelos didácticos generales.

Actividades que abordan los diferentes comportamientos de los materiales continuos, fluidos y particulados

Actividad 1: ¿Cuál se hunde y cuál no?

Descripción: La experiencia se propone que los estudiantes vean cuán importante es el comportamiento mecánico del sustrato en su relación con los efectos que el pasaje de las ondas sísmicas tendrá sobre las estructuras que se asientan en él. Para ello se compara el comportamiento de pequeños mode-

los idénticos localizados en tres sistemas diferentes. En el primer caso tres objetos de idéntica forma y volumen, pero con diferentes densidades, se apoyan sobre un sustrato continuo y rígido (caso 1.1). En el segundo caso se trata de los mismos objetos apoyados sobre la superficie del agua (caso 1.2). En el tercer caso los objetos son apoyados sobre un material particulado, en este caso arena (caso 1.3).

Materiales y metodología

La experiencia es sencilla de montar salvo en el caso en que se intenta lograr el elemento con densidad equivalente al agua. Las dificultades, en este caso, estriban en lograr la densidad equivalente y equilibrar el objeto. En la experiencia diseñada por el autor se trabajó con envases de hojalata de tamaño reducido (diámetro aproximado de 5cm) y se utilizó uno vacío para la densidad menor al agua, uno que simplemente se llenó de agua y al que el peso propio de la hojalata le brindaba una densidad mayor y, para el caso de la densidad igual a la del agua, se combinó la utilización de un trozo de poliestireno expandido (“Telgopor”) adherido al fondo, para darle flotabilidad positiva y se lo llenó de agua. A continuación, para aumentar su densidad y lograr que comenzara a hundirse, fue agregándose (imuy lentamente!) arena hasta que el recipiente quedó sumergido, pero sin descender hasta el fondo. En los casos 1.1 y 1.3, con el objetivo de exagerar las diferencias de densidad entre los objetos, se dejó vacío uno de los recipientes, el segundo se llenó con arena hasta más o menos la mitad y el tercero se llenó con tornillos de hierro.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: Caso 1.1. Dada la rigidez del sustrato, los objetos colocados sobre el mismo (Fig. 3) se deslizan ligeramente de un lado al otro al sacudir el sistema

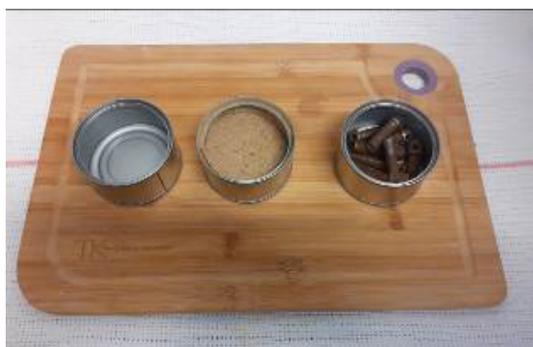


Figura 3. Comportamiento para el caso 1.1. Cuando se produce la agitación, los objetos colocados sobre una base rígida se desplazan sobre ella, pero permanecen en la superficie

simulando el pasaje de las ondas sísmicas, pero todos permanecen sobre en la superficie del sustrato.

Caso 1.2. El objeto más liviano que el agua (densidad menor que 1 g/cm^3), flota y el que es más denso que ella se hunde hasta apoyarse en el fondo. El objeto cuya densidad es igual a la del líquido permanece estable a la profundidad que elijamos dejarlo. Todos ellos se sacudirán, pero ninguno de los tres cambiará mayormente de posición frente a las sacudidas impuestas. En la Figura 4 pueden observarse las posiciones relativas de los tres objetos con respecto a la superficie del agua.

Caso 1.3. Este es el más complejo y por lo tanto el más interesante desde el punto de vista del aprendizaje de conceptos que, de algún modo, resultan contra-intuitivos, ya que el comportamiento es diferente si el material se mantiene en reposo o si se lo sacude. Mientras el sustrato está en reposo, todos los objetos permanecen en la superficie, cuando se lo sacude adoptan comportamientos diferentes. El más denso se hundirá y los más livianos quedarán en la superficie, aunque modificarán su posición hundiéndose más o menos de acuerdo a su densidad. La asimetría en la distribución de los materiales pesados en su interior hace que, además de hundirse, el objeto más pesado se vuelque ligeramente sobre un costado (Fig. 5).

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La compactación inducida por la agitación de las partículas y su rotación y reacomodamiento son reproducidos con fidelidad. Los efectos del mayor peso de los objetos sobre la profundidad de hundimiento también pueden verse claramente, así como los efectos de la falta de homogeneidad en la distribución de la masa, que conducen a volcamientos.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Naturalmente que si se hubiera tratado de objetos de mucha mayor altura que los utilizados, los mismos hubieran podido tumbarse completamente, tal como ocurre en los casos en que lo que se quiere demostrar es que los edificios pueden desmoronarse al paso de las ondas sísmicas del mismo modo que en las experiencias analizadas en Sellés-Martínez (2020b), pero no siendo este el objetivo de la experiencia, se ha privilegiado la observación de las diferencias de comportamiento en cada caso mediante el uso de modelos exactamente iguales que se comportan de modo diferente en diferentes situaciones pero que en ningún caso se tumban completamente o sufren daños estructurales, fenómenos que muchas veces se dan en forma conjunta en la realidad.

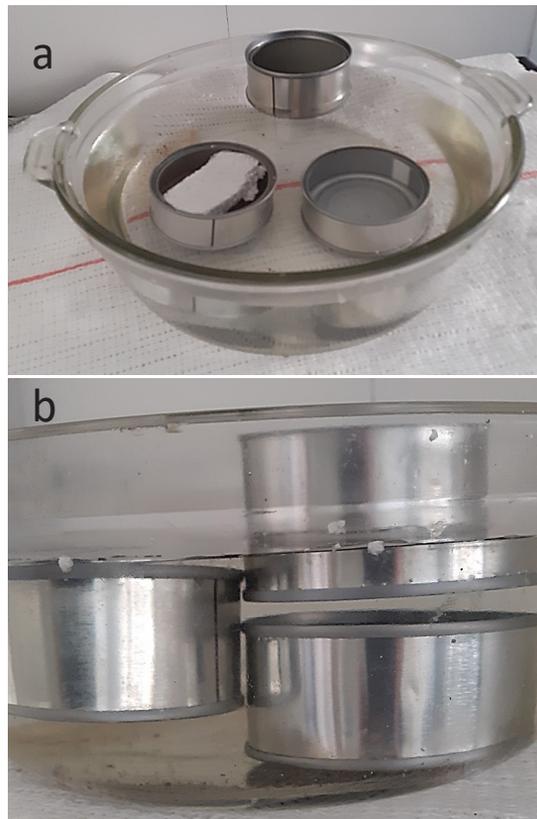


Figura 4. Comportamiento para el caso 1.2. Vista superior (a) y lateral (b) de los tres objetos con densidades menor, igual y mayor que el agua y las posiciones relativas que los mismos ocupan al ser colocados sobre el agua. El primero flota, el segundo queda suspendido y el tercero se apoya en el fondo. El pasaje de las ondas (pequeñas sacudidas impuestas al modelo) no produce cambios sustanciales en su posición relativa

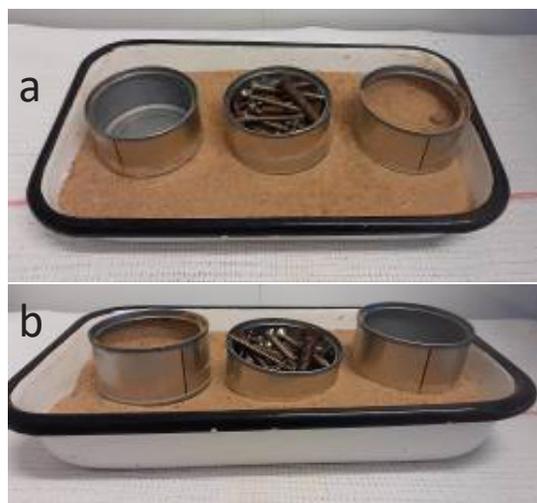


Fig. 5. Comportamiento para el caso 1.3. a. Estado inicial. b. Luego de las sacudidas los recipientes más livianos permanecen en la superficie o se asientan ligeramente mientras el más pesado (centro) se hunde y se ladea

Actividades que modelan la licuefacción

Como se ha señalado, se denomina licuefacción al fenómeno por el cual las partículas de un sedimento saturado de agua pierden el contacto entre ellas y, por un breve lapso, pueden moverse libremente, rotando y reacomodándose. Como resultado de ello y una vez ocurrido el proceso, el material clástico vuelve a asentarse y el agua que no puede ser almacenado en el nuevo entramado poral (de menor volumen que el anterior) sobreyace a la capa de sedimento saturado o, en el caso de niveles soterrados, escapa a través de fracturas que pudieran estar presentes en el nivel impermeable que posibilitó el confinamiento del agua y la conservación de la alta porosidad, anómala para la profundidad en cuestión, facilitando la compactación a valores normales para ese material y esa profundidad. La Figura 6 ilustra esquemáticamente la situación.

Actividad 2: La presencia del agua almacenada en los poros del suelo cambia un poco las cosas...

Descripción: La experiencia demuestra que las sacudidas sísmicas en un suelo saturado pueden, al igual que en el caso del material seco, inducir la compactación del mismo, siendo la diferencia a destacar entre uno y otro caso que, como consecuencia del fenómeno de compactación (y estando en esta experiencia los poros ocupados por agua en lugar de aire) el agua en exceso (resultante de la disminución de la porosidad del material) inundará la superficie del modelo.

Materiales y metodología: El armado de esta actividad es similar al caso 1.3 de la actividad 1 y los resultados se muestran en la Figura 7. El agua debe agregarse muy lentamente sobre uno de los bordes del material para permitir que se distribuya homogéneamente sin perturbarlo y sin inundar la superficie.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La experiencia demuestra el diferente comportamiento de los modelos según su densidad en forma adecuada y el efecto de reducción del volumen poral y expulsión del agua en exceso.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Los resultados que se obtienen son muy similares a los que se obtienen en el caso 1.3 de la actividad 1, ya que el efecto del agua, en un modelo de estas dimensiones, no alcanza a ser muy diferenciable del resultado que se obtiene con el modelo seco. En la naturaleza, los espesores sedimentarios son mucho mayores y los volúmenes de agua almacenados lo

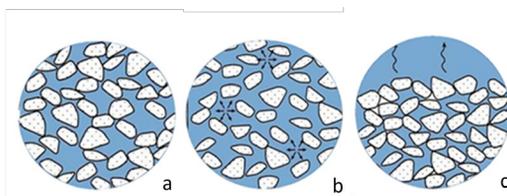


Figura 6. Efecto del pasaje de la onda sísmica en un sedimento saturado. a. El sedimento en reposo; el agua ocupa los espacios porales generados por el empaquetamiento suelto de las partículas. b. La sacudida sísmica produce el desplazamiento relativo de las partículas y la destrucción del esqueleto clástico, con la consecuente transferencia del peso de la sobrecarga al agua intersticial y aumento brusco de su presión. c. El agua en exceso queda por encima del material redepositado y, eventualmente, migra hacia la superficie a favor del gradiente de presiones ya sea por el entramado de poros de las capas suprayacentes como por las fracturas que hayan podido abrirse en el suelo como consecuencia del sismo

son también. Como consecuencia de la dificultad para evacuar el agua en exceso por los delgados y tortuosos caminos porales del suelo con la velocidad necesaria para disipar la presión en exceso, el efecto generado es equivalente al de un “tapón impermeable” que impide el ascenso del agua y la disipación de la presión, por lo que esta última, a medida que nuevos impulsos facilitan el progreso de la compactación, aumenta. Esta parte del proceso no es reproducible con este tipo de modelos.

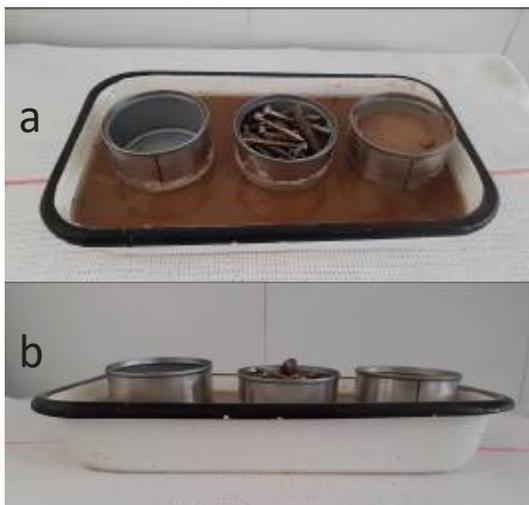


Figura 7. En a puede observarse como el agua que estaba contenida en los poros de la arena al preparar la experiencia se ha desplazado hacia la superficie como consecuencia de la compactación inducida por el golpeteo y como el recipiente más pesado se ha hundido y volcado ligeramente. La imagen b permite apreciar con algo más de precisión la diferencia de nivel entre el recipiente vacío y los más pesados

Actividad 3. Los sedimentos saturados son más sensibles a las perturbaciones sísmicas que si están secos

Descripción: La experiencia explora la relación existente entre la capacidad de un suelo para sostener una carga, la presencia de fluidos en el mismo y la acción de las ondas sísmicas. Como se ha señalado más arriba el incremento brusco en la presión del fluido reduce la capacidad de sostén del material y, bajo el mismo peso que antes, el suelo cede y la construcción se hunde o, peor aún, se desploma. El aumento en la presión se produce por la adición de un impulso energético, como es el caso de un suelo saturado que es afectado por la llegada de las ondas sísmicas que, en el caso de la actividad, es simulado por el golpeteo sobre el borde de la bandeja que contiene la arena saturada.

Materiales y metodología: En el sitio ELI (*Earth Learning Idea*) puede descargarse la propuesta denominada *Movimiento sísmico: ¿Se derrumbará mi casa?* (<https://www.earthlearningidea.com/PDF/Spanish2.pdf>). La misma es sencilla de montar y requiere solamente un recipiente de fondo plano, amplio y medianamente profundo (del tipo de una fuente para horno), algo de arena, una placa delgada de madera o cartón de no más de 10 cm de lado, unos bloques que simularán los edificios y una jarra de agua. Se coloca una capa de arena en la fuente y se apoya sobre ésta la placa de madera. Se agrega el resto de la arena hasta que tapa completamente la placa, haciéndola invisible a simple vista. Se colocan las maquetas que simulan los edificios teniendo cuidado de que algunas descansen sobre la placa de madera y otras, fuera de ella, apoyen sólo en arena. Se vierte agua lenta y cuidadosamente hasta saturar el sedimento, pero sin inundar el sistema, y luego se imprime una serie de pequeñas sacudidas a la fuente golpeándola lateralmente. Se verá que el objeto que se apoya en la tabla permanece estable mientras el otro colapsa.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: Existe una relación directa entre el proceso de licuefacción del suelo en la maqueta y los que ocurren en la realidad en aquellas circunstancias en las que las ondas sísmicas alcanzan áreas de suelos saturados (ya sea por la presencia de capas de agua subterráneas o por la acción de lluvias recientes). La presencia de una tabla rígida en la maqueta equivaldría, en la realidad, a la existencia de un sustrato rocoso sobre el que apoyan los cimientos de la construcción.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La posibilidad de que los suelos y materiales mal consolidados saturados de agua sean afectados por el fenómeno de licuefacción al recibir un impulso energético, por una parte y, por la otra la imposibilidad de que los materiales continuos sean afectados por el mismo son reproducidos con fidelidad.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Como ocurre en todo modelo analógico sencillo, no todos los factores que actúan en la realidad pueden ser incorporados simultáneamente y los factores de escala limitan su alcance. En la naturaleza, y dependiendo de la intensidad del sismo, los edificios construidos sobre el terreno firme también podrían ser afectados por el sismo, tal como se ha visto en otras actividades analizadas por el autor (Sellés-Martínez, 2020b).

Actividades que modelan la fluidización

Una vez producido el proceso de licuefacción el sistema puede re-estabilizarse luego del paso de las ondas en una nueva situación que, como muestran los modelos analizados previamente conlleva por una parte la compactación del material sedimentario y por el otro la liberación del exceso de agua generado por la reducción del volumen poral asociado a la rotación y acomodamiento de las partículas a favor de la acción del impulso sísmico. Pero, puede ocurrir que la energía disponible en el sistema al momento de producirse la desestabilización sea tan alta como para permitir que el agua se desplace con suficiente energía como para arrastrar con ella las partículas. Este es el fenómeno que se describe con el término “fluidización” del suelo o, en general, de cualquier material particulado. Si los materiales están localizados en terrenos con una cierta pendiente, al producirse la licuefacción se reduce el ángulo de reposo del material suelto con respecto al correspondiente al material seco y la acción misma de la gravedad puede poner en movimiento y desplazar ladera abajo grandes volúmenes de material, con el consiguiente daño tanto a las obras que estaban construidas sobre él como las que pueda encontrar en su camino. Cuando la licuefacción se produce en capas subterráneas, ya sea en el acuífero libre (capa freática) o incluso en horizontes acuíferos confinados (que contienen agua pero están rodeados por materiales impermeables) la presión del agua puede forzar la apertura de grietas y movilizar el material en función del gradiente de presiones, produciendo diques y filo-

nes capas similares a los de origen volcánico pero que afectan áreas más reducidas y se producen en general mucho más cerca de la superficie. La presencia de volcanes de barro activos en el presente está muy profusamente documentada a diversas escalas y en diferentes ambientes y existen también evidencias geológicas de su existencia en el pasado. La Figura 8 ilustra un ejemplo correspondiente a la fluidización de materiales por la presencia de agua y el aumento de la presión asociado a la generación de metano en el subsuelo. Las arcillas se desplazan por grietas hacia la superficie y generan pequeños volcanes de barro.



Figura 8. Un pequeño volcán de barro activo en la Reserva Natural de Salse de Nirano (Módena, Italia). Fotografía del autor

Actividad 4: Pasarse del límite genera problemas...

Descripción: La parte 4.1 de la actividad aborda el caso de los materiales que se desplazan masivamente como consecuencia de que la pendiente aumenta hasta superar un valor límite a partir del cual la acción gravitatoria supera la resistencia del material a desplazarse. La parte 4.2 encara el caso de la desestabilización de materiales particulados que, si bien se encontraban estables en estado seco, modifican sus propiedades al saturarse de agua y se deslizan pendiente abajo.

Materiales y metodología: El modelo utiliza un recipiente extenso y no demasiado profundo en el que se coloca una capa de arena cuyo espesor no necesita ser mayor de 2 o 3 mm ya que el efecto es independiente del espesor (Fig. 9a). Se utiliza un rociador o similar para humedecer y saturar de agua la arena sin perturbar la continuidad de la capa. Se modelan sucesivamente tres situaciones. En la

primera se inclina el modelo con la capa de arena seca hasta que esta se desliza pendiente abajo; en la segunda se parte de una situación de equilibrio muy próxima al punto crítico del caso anterior y, en esa posición, se va humedeciendo el material hasta que la saturación en agua hace que la capa fluya; la tercera simulación parte de la misma situación que la anterior, pero con el material ya casi saturado pero aún inmóvil, se golpea suave pero repetidamente el recipiente para ver como el mismo se desestabiliza y desploma ladera abajo. En todos los casos, si se desea, pueden adicionarse pequeños objetos que simulen la presencia de edificaciones para ver cómo los mismos se desestabilizan e incluso pueden ser incorporados al flujo al producirse el movimiento.

Parte 4.1. El recipiente, con el material seco, va inclinándose lentamente elevando uno de sus lados hasta que se percibe que la capa de arena comienza a moverse pendiente abajo debido a la acción de la componente gravitatoria paralela a la base del recipiente (la componente era igual a cero cuando el

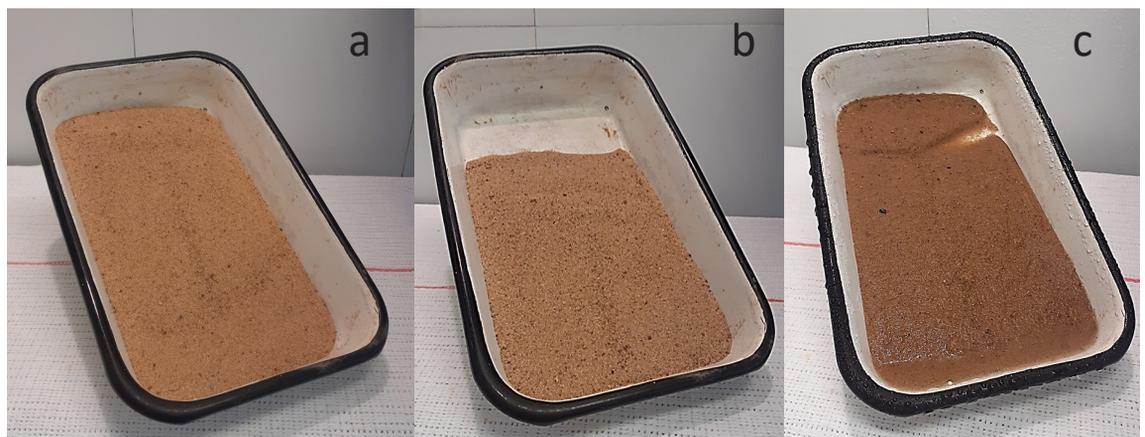


Figura 9. Deslizamiento de los materiales sueltos por efecto de la pendiente. a) El modelo se encuentra con una inclinación próxima al límite; una vez superado este se produce el deslizamiento que muestra la figura b. Desde el punto de partida a y al saturar el material con agua utilizando un rociador, se produce el colapso de la capa de arena con un ángulo de inclinación inferior al necesario en el caso b, cuando el material se encuentra seco

recipiente se encontraba horizontal). Se toma registro del ángulo de inclinación del recipiente al momento de comenzar el desplazamiento de la capa de arena (Fig. 9b). Nótese que cuando el material toma forma de cuña y genera una pendiente menor el desplazamiento se interrumpe y debe aumentarse la inclinación del sistema para recuperar el movimiento del material particulado.

Parte 4.2. Se recompone la capa de arena y se coloca en el recipiente lleno de arena seca en una posición inclinada, cercana al ángulo registrado en la parte 1 de la actividad, pero en la cual el material no fluye aún por su propio peso. Con la ayuda del rociador va humedeciéndose el material hasta que el mismo se satura, pierde su estabilidad y la capa de arena colapsa deslizándose hacia abajo (Fig. 9c).

Parte 4.3. La experiencia retoma la posición de partida de b y puede realizarse simplemente drenando algo del agua contenida en el recipiente luego de ese paso, para que vuelva a estar muy húmeda sin estar saturada, y una vez apoyado el recipiente en la posición requerida, se lo golpea suave pero reiteradamente hasta provocar el desmoronamiento de la capa de arena, siendo el resultado similar al anterior, pero sin que el material reacomodado expulse tanta agua como en el caso anterior.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: En el caso 4.2 debe tenerse en cuenta que el agua que satura el material particulado ejerce una presión que está directamente relacionada con la diferencia de altura entre la cima de la ladera (o el punto en el cual comienza la capa de materiales particulados) y un punto cualquiera que se quiera analizar. Esa presión de tipo hidrostático actúa en contra de la estabilidad del sistema aún en ausencia del impulso sísmico.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: El modelo reproduce con suficiente fidelidad el fenómeno de deslizamiento cuando la pendiente del material particulado supera el ángulo de reposo que le corresponde. Lo mismo ocurre en el caso del material húmedo saturado de agua.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: No se encuentran limitaciones importantes a la aplicación del modelo a los fines de representar la influencia de la pendiente en su estabilidad en el caso de materiales secos o saturados.

Actividad 5: La presión del agua agrava el problema

Descripción: En el caso anterior la fluidización es disparada por la componente gravitatoria que actúa paralelamente a la pendiente, pero en algunos casos,

cuando el proceso involucra agua a presión, es esta la que desencadena la fluidización del sistema y el arrastre de las partículas. Como consecuencia de ello el material fluido puede desplazarse a través de las grietas abiertas en el suelo y generar surgentes de fango en la superficie, desplazando volúmenes importantes de material desde el subsuelo a la superficie y provocando colapsos parciales del terreno. Naturalmente esta situación genera movimientos en el suelo y subsuelo con hundimiento y vuelco de bloques del terreno que afectan a las construcciones que descansan sobre ellos. Esta actividad corresponde a la propuesta ELI *Peligro – ¡Arenas movedizas! ¿Por qué algunas rocas ceden cuando llueve mucho?*, accesible en https://www.earthlearningidea.com/PDF/117_Spanish.pdf.

Materiales y metodología: Para el desarrollo en su modalidad más sencilla hacen falta un trozo de tubo de goma, un embudo transparente, algo de arena, un soporte para el embudo y un objeto que simula la construcción asentada sobre el terreno, los que se disponen del modo que se señala en la propuesta citada. Al conectar el tubo de goma a una canilla y abrir esta (¡muy lentamente!) el agua circula desde abajo hacia arriba a través de los granos de arena, a los que transfiere parte de su energía permitiéndoles moverse y rotar, lo que facilita, dada la diferencia de peso entre la arena y el objeto que representa la construcción, la desestabilización de este y su hundimiento.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: La experiencia se propone reproducir la influencia de la presión del agua subterránea (presión que existe tanto en los acuíferos libres como confinados) y el efecto que tiene sobre la estabilidad de las construcciones. La energía transmitida por el flujo de agua a las partículas del suelo desestabiliza este, que se licúa y fluidiza, induciendo el colapso de las construcciones. El flujo del agua subterránea puede producirse tanto por efecto del colapso de tuberías subterráneas en zonas que son afectadas por un sismo (de mayor gravedad aún si las tuberías se encuentran colmadas por la coincidencia de episodios de tormenta) como en aquellos casos en que los desplazamientos vinculados a fallas rompen y desplazan niveles impermeables que mantenían aislados acuíferos con presiones anómalas de agua, dando origen a fenómenos de surgencia similares a los pozos artesianos a través de las zonas de fractura.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La transferencia de energía del agua a las partículas, que son rápidamente movilizadas y la pérdida de

sustento de las construcciones por fluidización del suelo son adecuadamente visualizadas.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: La velocidad de flujo del agua es sensiblemente mayor de la que puede esperarse en casos reales.

Un resultado inesperado, sorprendente e interesante

Experimentando en busca de una forma sencilla de inducir el flujo del agua a través del sedimento se intentó hacerlo forzando el aumento de presión soplando (con fuerza, del mismo modo en que se infla un globo) a través de un tubo de plástico hincado en la arena saturada. El resultado fue sorprendente: se abrió una cavidad en el seno del material. La cavidad, llena del aire insuflado, colapsó en el momento en que se retiró el tubo al ascender el aire por el espacio ocupado previamente ocupado por el tubo. En la Figura 10 se observan las tres etapas señaladas. La apertura de la cavidad puede interpretarse como una situación inestable provocada por el hecho de que la presión inducida por el soplido no se disipa a la misma velocidad con que se acumula. Ello sería consecuencia de la (relativamente) reducida porosidad del material y de la presencia del agua que satura el sistema. Si bien parecerían estar dadas las condiciones para que el aire, el más liviano de los componentes del sistema se desplace hacia arriba, la tortuosidad de los recorridos y la existencia de fenómenos de adherencia y tensión en el agua que llena los poros,

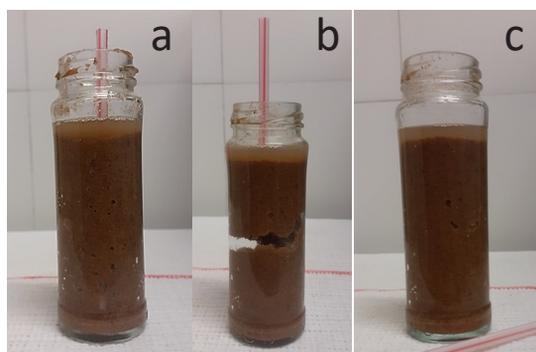


Figura 10. La arena saturada y poco compactada en el recipiente (a), se separa y da lugar a la formación de una cavidad llena de aire cuando se sopla con fuerza a través del tubo plástico (b). La cavidad colapsa cuando el aire escapa a la superficie a través del espacio que va creándose al retirar el tubo plástico. Nótese que en b el borde del agua alcanza el cuello del frasco como resultado de la creación de la cavidad y luego en c, al desaparecer esta, desciende a su posición original

dificultan notablemente su movimiento y permiten el aumento de la presión, la que llega a equilibrar y superar el peso de la capa sobreyacente, elevándola para generar la cavidad. Es importante señalar que el proceso de soplado es continuo y con fuerza, de lo contrario la presión no aumentará lo suficiente. Puede reflexionarse acerca de las posibilidades de que, en los sistemas naturales, puedan darse situaciones semejantes y, en este caso, podría pensarse en la apertura de discontinuidades y su relleno y formación de venas en caso de que los fluidos (líquidos o gaseosos) que circulan por esas discontinuidades contengan iones que puedan cristalizar para formar, por ejemplo, venas de calcita o de bitumen.

Consideraciones finales

Cuando se desea comparar comportamientos frente a un determinado agente (en el caso de esta contribución el impulso energético proporcionado por el golpeteo), es importante homogeneizar todos aquellos elementos que no sean claves para la experiencia para, de este modo, evitar que los mismos puedan distorsionar la percepción de los resultados. Es por ello, por ejemplo, que los recipientes utilizados en actividades como la 1 y la 2 tienen todos la misma forma y tamaño; de este modo es fácil asegurarse que la diferencia en el comportamiento estará exclusivamente asociada a los cambios en su densidad como objetos, la que será consecuencia exclusiva de los diferentes rellenos utilizados.

Las propuestas presentadas pueden ser complementadas con otras de acuerdo a la disponibilidad de tiempo o el interés de los estudiantes en el tema:

La actividad “*Jelly/biscuit modelling of how earthquake waves amplify and devastate. Demonstrating how seismic shaking depends on local geology*” resulta aplicable cuando se desea enfatizar como la composición del suelo (una característica local) modifica los efectos de un sismo sobre las construcciones del lugar. El enlace correspondiente es: https://www.earthlearningidea.com/PDF/273_Seismic_site_amplification.pdf.

La actividad “*Landslide danger – and climate change Case studies of how landslides work and the likely effects of climate change*” proporciona información adicional acerca de las causas de la desestabilización de las laderas. El enlace correspondiente es: https://www.earthlearningidea.com/PDF/Net_zero_Landslide_danger.pdf.

La actividad “*Failing slopes Modelling how rock cliffs and slopes can collapse*” muestra dife-

rentes situaciones de pendientes naturales en las que la estructura de la roca facilita el deslizamiento de bloques a favor de la gravedad (aún sin ayuda del impulso sísmico) y propone una actividad para estimar el ángulo de reposo correspondiente a diferentes situaciones. La parte **a** de la propuesta de la actividad 5 en este trabajo está inspirada en esta. El enlace correspondiente es: https://www.earthlearningidea.com/PDF/210_Slope_failure.pdf

Los lectores que deseen profundizar en el estado del arte con referencia a la influencia del agua en los eventos sísmicos y las estructuras generadas por sismos reales en áreas con sustratos inconsolidados pueden consultar Wang & Manga (2021), Clement et al. (2018) y Power et al. (1998) y las referencias

Taxonomia CRediT: • Contribuição do autor: Conceitualização; Administração do projeto; Recursos; Supervisão; Curadoria de dados; Análise formal; Investigação; Metodologia; Validação; Visualização; Escrita – rascunho original; Escrita – revisão & edição – José Sellés-Martínez. • Conflitos de interesse: O autor certifica que não tem interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito. • Aprovação ética: Não aplicável. • Disponibilidade de dados e material: Disponível no próprio texto. • Reconhecimentos: Consignam-se agradecimentos à equipe responsável e colaboradores de *Earth Learning Idea* por sua desinteressada contribuição à melhoria do ensino de Ciências da Terra e aos editores e avaliadores de *Terræ Didactica* pelas sugestões e correções. • Financiamento: Não aplicável.

Referencias

- Clément, C., Toussaint, R., Stojanova, M., & Aharonov, A. (2018). Sinking during earthquakes: critical acceleration criteria control drained soil liquefaction. *Physical Review E, American Physical Society (APS)*, 97(2), pp.022905. HAL Id: hal-01715092.
- Collinson, J. (1984). Sedimentary deformational structures. In: Maltman, A. (Ed.). (1984). *The Geological Deformation of Sediments*. Springer. p. 95-125. (Chapter 4). doi: 10.1007/978-94-011-0731-0.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall. 715p. URL: https://www.academia.edu/50773034/INGENIERIA_GEOLOGICA_GONZALES_DE_VALLEJO. Acceso 01.10.2023.
- Maltman, A. (1994). *The geological deformation of sediments*. Springer. 362p. doi: 10.1007/978-94-011-0731-0.
- Power, M. S., Egan, J. A., Shewbridge, S. E., deBecker, J., & Faris, J. R. (1998). Strong ground motion and ground failure. analysis of liquefaction-induced damage on Treasure Island. In: Holzer, T. L. (1998). *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989: Liquefaction*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1551-B. p. 87-119. URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/pp1551/pp1551b/pp1551b.pdf>. Acceso 01.10.2023.
- Sellés-Martínez, J. (2005). ¿Qué nos cuentan las ondas sísmicas? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(1), 20-36. URL: <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/89020/133472%20>. Acceso 01.10.2023.
- Sellés-Martínez, J. (2020a). Desarrollo de habilidades de análisis crítico basadas en la identificación de errores en los diagramas asociados a los efectos de las ondas sísmicas. *Terræ Didactica*, 16(Publ. Continua), 1-10. doi: 10.20396/td.v16i0.8660373.
- Sellés-Martínez, J. (2020b). Aciertos y falencias de los modelos analógicos asociados a terremotos usados en la enseñanza. *Terræ Didactica*, 16(Publ. Continua), 1-11. doi: 10.20396/td.v16i0.8658592.
- Sellés-Martínez, J., (2021a). Construcciones antisísmicas y sismorresistentes. Principios de funcionamiento y análisis de los modelos usados en enseñanza. *Terræ Didactica*, 17(Publ. Continua), 1-15. doi: 10.20396/td.v17i00.8665273.
- Sellés-Martínez, J., (2021b). Aprendizaje experimental de las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos. *Terræ Didactica*, 17(Publ. Continua), 1-9. doi: 10.20396/td.v17i00.8663891.
- Wang, CY. & M. Manga (2021). Liquefaction. In: *Water and Earthquakes*. Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer: Cham. p. 301-321. doi: 10.1007/978-3-030-64308-9_11.
- Yamaguchin, A., Mori, T., Kazama, M., & Yoshida, N. (2012). Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Soils and Foundations*, 52(5). p. 811-829. Doi: 10.1016/j.sandf.2012.11.005.

Agradecimientos

El autor agradece al equipo responsable y colaboradores de *Earth Learning Idea* por su desinteresada contribución al mejoramiento de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra y a los editores y árbitros de *Terræ Didactica* por sus sugerencias y correcciones.