

# Análisis de los parámetros físicos sobre el comportamiento de la presión de poro

## Analysis of the physical parameters on behavior of pore pressure

E. Arcos-Hernández <sup>a,\*</sup>, M. Peralta Gutiérrez <sup>a</sup>, E. García Trinidad <sup>a</sup>, J.R. García Sánchez <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Tecnológico de Estudios Superiores de Huixquilucan, Tecnológico Nacional de México, 52773, Huixquilucan, Estado de México, México.

### Resumen

En el presente estudio se realiza un análisis de la respuesta dinámica de un suelo poroso inducida por oleaje en condiciones de flujo somero. Para ciertas combinaciones de los parámetros físicos del suelo y del oleaje, la presión de poro tiende a cero. En estas condiciones se puede identificar la profundidad de inestabilidad del suelo. Este fenómeno ha sido estudiado ampliamente en la literatura especializada en variables físicas, siendo un tanto complicado identificar cuáles son las variables dominantes que cambian significativamente la presión de poro y deben considerarse en la construcción de cimentaciones seguras de estructuras oceánicas. Para el análisis y cálculo de las variables dominantes en el suelo marino, se realiza a partir de un modelo matemático adimensional. Los resultados analíticos muestran una buena aproximación con la literatura especializada.

### Palabras Clave:

Oleaje somero, parámetros adimensionales, solución analítica, presión de poro.

### Abstract

In the present study is carried out an analysis of the dynamic response of a porous soil induced by waves in shallow water conditions. For certain combinations of soil and wave physical parameters, the pore pressure tends to zero. Under these conditions, the depth of soil instability can be identified. This phenomenon has been extensively studied in the literature on physical variables, but it is somewhat difficult to identify the dominant variables that significantly change pore pressure and should be considered in the construction of safe foundations for ocean structures. A dimensionless mathematical model is used to analyze and calculate the dominant variables on the seafloor. The analytical results show a good approximation with respect to the specialized literature.

### Keywords:

Shallow flow, dimensionless parameters, analytical solution, pore pressure.

## 1. Introducción

El fenómeno de la interacción del oleaje con el fondo marino ha atraído la atención de ingenieros costeros y geotécnicos en los años recientes. Comprender los mecanismos y procesos del problema de la interacción oleaje-suelo marino es particularmente importante para el diseño de las cimentaciones de estructuras marítimas; cuando éstas se instalan en un ambiente marino, su presencia alterará la hidrodinámica del oleaje en su vecindad. Las condiciones de flujo alrededor de las estructuras, no solo afectan las fuerzas de fluctuación del oleaje, sino también pueden desarrollarse inestabilidades en el suelo del mar, (Christian et al., 1974; Lundgren et al., 1989; Smith & Gordon, 1983).

En décadas pasadas, se han hecho esfuerzos considerables para analizar la interacción oleaje-suelo-estructuras, debido a que muchas estructuras costeras (tales como paredes verticales, marinas, columnas de plataformas petroleras, tuberías que conducen hidrocarburos, rompeolas, entre otras.) han presentado daños por la respuesta del suelo marino inducida por el oleaje y no necesariamente por deficiencias constructivas, fundamentalmente las fallas de las cimentaciones de estructuras

marítimas pueden deberse a dos mecanismos, los cuales se conocen como licuefacción y falla por deslizamiento, ambas fallas son dependientes de la presión de poro (Silvestre & Hsu, 1989).

Cuando el oleaje se propaga en el océano, éstas generan presiones dinámicas significativas sobre el fondo marino. Estos campos de presiones inducen presiones de poro y esfuerzos efectivos en el suelo marino, cuando la presión de poro crece y los esfuerzos efectivos verticales disminuyen, parte del fondo se inestabiliza incluso, podría presentarse la licuefacción, en el caso de que ésta se presentará, las partículas del suelo quedan susceptibles de ser transportadas por las corrientes marinas.

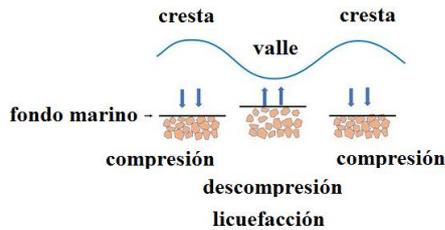
### 1.1. Fenómeno de Licuefacción

El suelo marino es considerado como un medio poroso saturado o casi saturado, (contiene burbujas de aire) donde el sedimento puede ser cohesivo o no cohesivo. Desde una perspectiva formal, la licuefacción puede definirse como el comportamiento de un suelo como un fluido pesado, debido a la pérdida de sus fuerzas estructurales; este fenómeno puede

\*Autor para la correspondencia: emmanuel.a.h@huixquilucan.tecnm.mx

Correo electrónico: emmanuel.a.h@huixquilucan.tecnm.mx (Emmanuel Arcos-Hernández), manuel.p.g@huixquilucan.tecnm.mx (Manuel Peralta Gutiérrez), enrique.g.t@huixquilucan.tecnm.mx (Enrique García trinidad), jose.g.s@huixquilucan.tecnm.mx (José Rafael García Sánchez).

producir deformaciones grandes en el suelo marino y se presenta en el valle del oleaje (Wang et al., 2007), ver Figura 1.

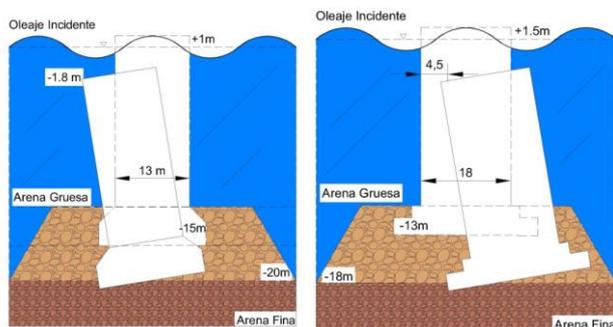


**Figura 1:** Fenómeno de Licuefacción.

Por otro lado, Marcuson (1978) estableció que el principal factor que causa el fenómeno de la licuefacción en el medio granular, se debe al crecimiento excesivo de la presión en el poro ( $P$ ) y la reducción de los esfuerzos cortantes ( $\tau$ ) y efectivos ( $\sigma'_z$ ). Existen dos mecanismos causantes de la acumulación de la presión excesiva en el poro, 1) cargas cíclicas debidas a un evento sísmico y 2) cargas dinámicas oscilantes del oleaje, (Seed & Rahman, 1978; Madsen, 1978).

El estudio del fenómeno de la licuefacción está ligado a la comprensión de los siguientes fenómenos: mecanismos del suelo asumiéndolo seco, el comportamiento del suelo completamente no drenado, saturado, considerando que el agua en el poro es completamente incompresible (No existen burbujas de aire atrapado) y la condición de un suelo casi saturado, sin drenar, tomando en cuenta la compresibilidad del agua en el poro; esta condición se presenta cuando existen burbujas de aire atrapadas.

Para determinar el potencial de licuefacción (competencia entre esfuerzos efectivos normales y la presión del poro), la literatura especializada, sugiere considerar la influencia que tiene la compresibilidad del fluido, del material sólido, la deformación lineal del suelo y la permeabilidad de la matriz porosa en el comportamiento de la presión de poro. La pérdida de resistencia de carga del suelo, debida al tipo de presión que se presenta, puede generar inestabilidades en las cimentaciones de las estructuras marítimas, éstas pueden ser de dos tipos, por asentamiento, Figura 2(a), y por asentamiento y corrimiento, Figura 2(b), los órdenes de magnitud de los desplazamientos en estructuras reales son del orden de metros (Groot et al., 2006).



**Figura 2(a):** Asentamiento

**Figura 2(b):** Corrimiento

En tópicos de licuefacción se han realizado diversos estudios analíticos, numéricos y experimentales de la interacción entre oleaje-estructuras oceánicas-suelo marino, para obtener aproximaciones reales del cálculo de la presión del poro.

## 1.2. Estado del Arte

Los trabajos pioneros en el estudio de los mecanismos que se presentan en materiales sujetos a cargas cíclicas, son la teoría poro-elástica de Biot (1941), y la ecuación de Verruijt (1969). Biot

y Verruijt desarrollaron tres modelos matemáticos que involucran las características del oleaje y del suelo. Los modelos propuestos son: dinámica completa (FD), en este caso las ecuaciones acopladas de flujo y deformación, son formuladas del tal forma, que involucran la aceleración de la masa del suelo y la aceleración relativa del agua en el medio poroso con respecto a la masa del suelo; el segundo se conoce como parcialmente dinámico (U-P), las ecuaciones acopladas de flujo y deformación consideran la aceleración de la masa del suelo pero no la aceleración relativa del agua en el poro y el tercero es el modelo casi estático (QS), en el cual los términos inerciales asociados con la masa del suelo y el agua del medio poroso, no son tomados en cuenta.

Desde un punto de vista de la hidráulica marítima, a partir de la de década de los 70's, para caracterizar la inestabilidad de un fondo marino, empezaron a proponerse distintas formulaciones, Yamamoto et al. (1978) y Madsen (1978) usaron teoría lineal del oleaje para estudiar la estabilidad del suelo granular isotrópico, poro-elástico de espesor infinito. Tomando en cuenta la oblicuidad del oleaje incidente, Tsai (1995), propuso una solución analítica para determinar el potencial de licuefacción de un fondo marino permeable y parcialmente saturado de espesor finito.

En la literatura especializada se pueden encontrar diversas propuestas relacionadas con la interacción oleaje-suelo, estos estudios han tratado el fenómeno como un tren de ondas o bien como una onda solitaria. A medida que el oleaje se propaga en una región de flujo somero, el fenómeno pasa a ser altamente no-lineal y la complejidad de su estudio, puede requerir de la dinámica de fluidos computacional y de metodologías experimentales avanzadas. Jeng et al. (2001) desarrollaron un modelo numérico para determinar el efecto que presenta la presión del agua en el medio poroso, considerando los mecanismos oleaje-fondo-rompeolas y demostraron que la máxima presión de poro se presenta alrededor de las estructuras de mitigación de oleaje y depende del periodo del oleaje, profundidad del agua y el grado de saturación del suelo. En paralelo Jeng y Cha (2003) determinaron una nueva relación de dispersión, para apreciar la influencia que presentan las propiedades del fondo en la longitud y amplitud del oleaje. A su vez, Lee y Lan (2002) obtuvieron una solución analítica de la propagación de ondas periódicas sobre un fondo marino poro-elástico con profundidad infinita y usaron el modelo dinámico (u-p) en la región del medio granular, para estimar el campo de presión del agua en el poro, considerando la elasticidad y permeabilidad del medio poroso. Posteriormente Liu y Jeng (2007), investigaron los efectos de la longitud y periodo del oleaje, compresibilidad del fluido en el poro, permeabilidad del suelo y rigidez del medio poroso, en la respuesta del suelo marino, los resultados fueron comparados con tres criterios distintos de licuefacción momentánea. Liu et al. (2007), presentaron una solución analítica y numérica para describir el flujo de filtración inducido por ondas largas que se propagan a través de un fondo marino permeable y parcialmente saturado y concluyeron que el potencial de licuefacción es mucho más grande para flujos poco saturados. Con base en la solución numérica que propusieron, demostraron que un flujo con un mayor grado de saturación del suelo, induce un mayor amortiguamiento del oleaje. Posteriormente, Ulker et al. (2009) compararon las distintas formulaciones poro-elásticas y concluyeron que la formulación (QS) puede ser empleada en su mayoría en suelos de arcilla (barro) y no proporciona resultados significativos cuando se tienen periodos de oleaje muy pequeños además muestran que para suelos limosos (arena fina) con periodos de oleaje menores de 10 s, la formulación (PD) es suficiente y para suelos arenosos la formulación adecuada depende de la permeabilidad del suelo marino y periodo del oleaje, por otro lado cuando el suelo se compone de grava, la permeabilidad es grande y por lo tanto se debe utilizar la formulación (FD).

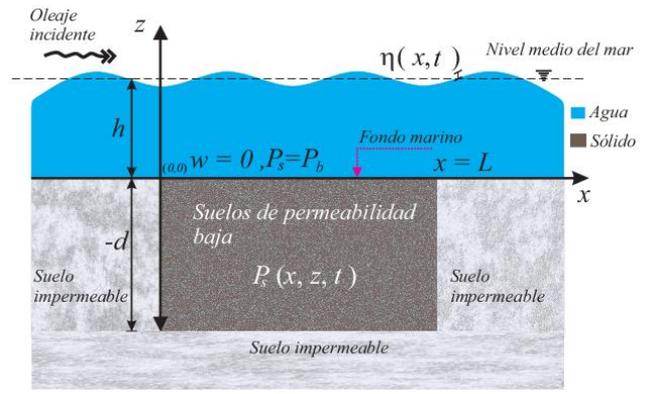
Las arenas finas son más vulnerables a la licuefacción y con mayor presencia en el fondo del mar, la compresión de los mecanismos del suelo es de interés para algunos autores como, Arcos et al. (2016) identificaron los valores característicos de la presión de poro, desplazamientos horizontales y verticales del suelo, identificaron que los desplazamientos verticales son de mayor orden que los desplazamientos horizontales en aguas someras. Por otro lado, Arcos et al. (2017) determinaron la profundidad máxima de licuefacción estableciendo el modelo matemático como uno de los problemas que rigen los valores considerando el efecto de oleaje moderado.

Recientemente, Chang et al. (2022) determinaron la evolución espacio-tiempo del exceso de la presión de poro en un fondo marino compuesto de arenas finas considerando el efecto dinámico de un oleaje progresivo. Posteriormente, Jie et al. (2023) identificaron que una de las principales causas de la amplificación de la presión de poro es debido al efecto dinámico causado por la interacción entre oleaje y corrientes marinas, también comprobaron la validez de los criterios de licuefacción. Por otro lado, Yueyin et al. (2024) desarrollaron un método robusto conocido como método empírico Kriging Bayesiano que presenta mayor precisión comparado con los modelos existentes.

Actualmente el problema de licuefacción en lechos marinos sigue siendo un reto para la ingeniería marítima, analizar y comprender los mecanismos de licuefacción son fundamentos para el análisis y desarrollo de la ingeniería marítima. En el presente estudio se desarrolla un análisis adimensional de un suelo marino compuesto de arenas finas. El estudio teórico tiene como finalidad la comprensión de los mecanismos de licuefacción de los desplazamientos horizontales, verticales y la presión de poro, que se deben tomar en cuenta en los modelos existentes, en función de los parámetros adimensionales que incluyen las combinaciones de las propiedades físicas del oleaje: frecuencia, longitud de onda, profundidad del agua, peso específico del agua y propiedades del fondo marino: permeabilidad, porosidad, peso específico del suelo, compresibilidad, modulo de rigidez.

## 2. Desarrollo analítico

El modelo físico se muestra en la Figura 3, donde el eje  $z$  es positivo en el sentido vertical, con origen en la interfaz oleaje-medio poroso y el eje horizontal  $x$  es positivo hacia la derecha, se considera que el oleaje incidente corresponde a ondas largas lineales de longitud  $\lambda$  y amplitud  $A_I$  y se propaga de izquierda a derecha sobre un suelo poroso de profundidad semi-infinita. La profundidad media y uniforme del agua es  $h$ . En el modelo físico, el medio poroso y el suelo impermeable se identifican por regiones gris granular y grises sólidos, respectivamente. Se asume que el suelo poroso es un medio poroso deformable y que está compuesto de una mezcla de tres fases. Una fase sólida formada por el medio granular, una fase líquida que ocupa la mayor parte de la porción del espacio poroso y una fase gaseosa que a veces ocupa una pequeña porción del espacio poroso. El medio granular y el fluido en el poro (incluyendo tanto el líquido como el gas) pueden considerarse juntos como un medio compresible.



**Figura 3:** Diagrama físico del modelo matemático

Considerando que material del suelo es isotrópico, las deformaciones volumétricas son pequeñas existiendo linealidad entre esfuerzo y deformación, el agua puede contener aire atrapado y el flujo que atraviesa el medio poroso obedece a la ley de Darcy.

Para el presente análisis se utiliza la teoría de consolidación de (Biot, 1941)

$$G\nabla^2 u_s + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = -\frac{\partial P_s}{\partial x} \quad (1)$$

$$G\nabla^2 w_s + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} = -\frac{\partial P_s}{\partial z} \quad (2)$$

$$k_s \nabla^2 P_s - \gamma_w n \beta \frac{\partial P_s}{\partial t} = \gamma_w \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} \quad (3)$$

Donde  $G$  es el módulo de corte del suelo,  $u_s$  y  $w_s$  son los desplazamientos horizontales y verticales del suelo respectivamente,  $\nu$  es la razón de Poisson,  $\varepsilon_s$  de la deformación volumétrica,  $P_s$  es la presión de poro,  $k_s$  es la permeabilidad del suelo,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $n$  es la porosidad,  $\beta$  es la compresibilidad del agua en los poros y  $t$  es el tiempo.

Las ecuaciones (1)-(3) tienen las siguientes condiciones de frontera;

$$\sigma'_z = 0, \quad P_s = P_b, \quad \text{en } z = 0 \quad (4)$$

$$P_s = 0, \quad u_s = 0, \quad w_s = 0 \quad \text{en } z = -d. \quad (5)$$

Usando las variables características determinadas por Arcos et al. (2016) las ecuaciones (1)-(5) se transforman en su forma dimensional de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 \bar{P}_s}{\partial \bar{z}^2} - \beta_0 \alpha \frac{\partial \bar{P}_s}{\partial \bar{\tau}} = \beta_0^2 \Gamma \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} \left[ \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial \bar{x}} \right] + \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} \left[ \frac{\partial \bar{w}_s}{\partial \bar{x}} \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_s}{\partial \bar{z}^2} = -\frac{\partial \bar{P}_s}{\partial \bar{x}}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{w}_s}{\partial \bar{z}^2} + \beta_0^2 \Gamma \Psi \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial \bar{x}} \right] + \Psi \frac{\partial^2 \bar{w}_s}{\partial \bar{z}^2} + \beta_0^{3/2} \Gamma = -\beta_0 \Gamma \frac{\partial \bar{P}_s}{\partial \bar{z}}, \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}'_z = 0, \quad \bar{\tau}_{\bar{x}\bar{z}} = 0, \quad \bar{P}_s = 1 \quad \text{en } \bar{z} = 0 \quad (9)$$

$$\bar{P}_s = 0, \quad \bar{u}_s = 0, \quad \bar{w}_s = 0 \quad \text{en } \bar{z} = -1 \quad (10)$$

La aproximación de Biot se puede reducir a un problema de valores en la frontera asumiendo que las variables tengan una oscilación armónica, con frecuencia igual a la del oleaje, las ecuaciones de gobierno transitorias del suelo marino pueden plantearse como un problema de valores en la frontera lineal.

Yamamoto et al. (1978) propuso que los desplazamientos horizontales y verticales y presión de poro pueden establecerse como una función en  $\bar{z}$ ,

$$\bar{u}_s = Re\{\hat{u}_s(\bar{z})exp[i(2\pi\bar{x} + \bar{\tau})]\} \quad (11)$$

$$\bar{w}_s = Re\{\hat{w}_s(\bar{z})exp[i(2\pi\bar{x} + \bar{\tau})]\} \quad (12)$$

$$\bar{P}_s = Re\{\hat{P}_s(\bar{z})exp[i(2\pi\bar{x} + \bar{\tau})]\} \quad (13)$$

Sustituyendo los términos (11)-(13) en las ecuaciones (6)-(10) y realizando las respectivas combinaciones obtenemos la siguiente ecuación de gobierno

$$\frac{d^4 \hat{P}_s}{d\bar{z}^4} + i\beta_0 \frac{[\Gamma - \psi\alpha - \alpha]}{[1 + \psi]} \frac{d^2 \hat{P}_s}{d\bar{z}^2} - 4\pi^2 2i\beta_0^2 \frac{\Gamma}{[1 + \Gamma]} \hat{P}_s = 0. \quad (14)$$

Con sus respectivas condiciones de frontera:

$$\hat{P}_s = 1 \quad \text{en} \quad \bar{z} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{d\hat{P}_s}{d\bar{z}} = 0 \quad \text{en} \quad \bar{z} = 0 \quad (16)$$

$$\hat{P}_s = 0 \quad \text{en} \quad \bar{z} = -1 \quad (17)$$

$$\frac{d\hat{P}_s}{d\bar{z}} = 0 \quad \text{en} \quad \bar{z} = -1. \quad (18)$$

La ecuación (13) se aproxima a la ecuación diferencial descrita por Polyanin y Zaitsev (2002) obteniéndose la solución de la ecuación (13) como sigue

$$\hat{P}_s = c_1 exp [(-a)^{1/2} \bar{z}] + c_2 exp[-(-a)^{1/2} \bar{z}] + c_3 cos[b^{1/2} \bar{z}] + c_4 Sen[b^{1/2} \bar{z}] \quad (19)$$

Donde:

$$a = \frac{-8\beta_0\pi^2}{(1-\mu) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16\pi^2\mu}{i\alpha(1-\mu)^2}}\right)}, \quad b = \frac{i\beta_0\alpha(1-\mu) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16\pi^2\mu}{i\alpha(1-\mu)^2}}\right)}{2\mu} \quad (20)$$

$$\mu = nG\beta \left(1 + \frac{1}{(1-2\nu)}\right). \quad (21)$$

Las constantes de integración  $c_1, c_2, c_3$  y  $c_4$  se obtienen sustituyendo las condiciones de frontera (15)-(18) en la ecuación de gobierno (19)

### 3. Resultados y discusión

En la Figura 4, se muestra la comparación de la solución analítica adimensional de Yamamoto (1978), que corresponde a la relación (22) y la presente solución (19)

$$P_s = \frac{\rho gh}{(\gamma_s - \gamma_w)L} e^{\left(\frac{-2\pi L}{\lambda}\right)z}. \quad (22)$$

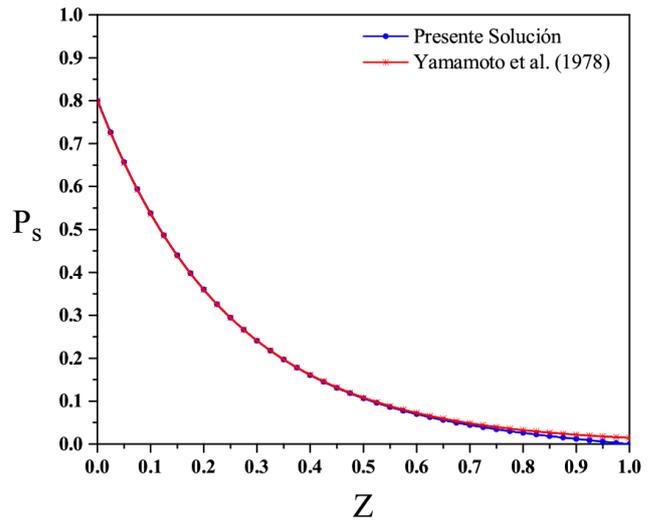


Figura 4: Validación de la solución analítica

En la misma gráfica se observa una buena aproximación entre los resultados de Yamamoto et al. (1978) y la presente solución.

Una de las principales aportaciones del trabajo es identificar los parámetros dominantes en la perturbación de la presión de poro. En la Figura 5, se muestra el efecto que tiene el tirante de agua del océano  $h$ , sobre la presión de poro  $\hat{P}_s$  a lo largo de la profundidad del medio poroso  $\bar{Z}$ . En la misma figura se observa que conforme aumenta la profundidad del agua también aumenta la presión de poro, por ejemplo, para profundidades de  $h = 40$  m, se tiene una presión de poro adimensional de  $\hat{P}_s = 0.8$  y para valores de  $h = 10$  m se tiene una presión de poro  $\hat{P}_s = 0.2$ . en la superficie del fondo marino donde  $\bar{Z} = 0$ , se observa que conforme aumenta la profundidad del suelo la presión de poro  $\hat{P}_s$  tiende a cero.

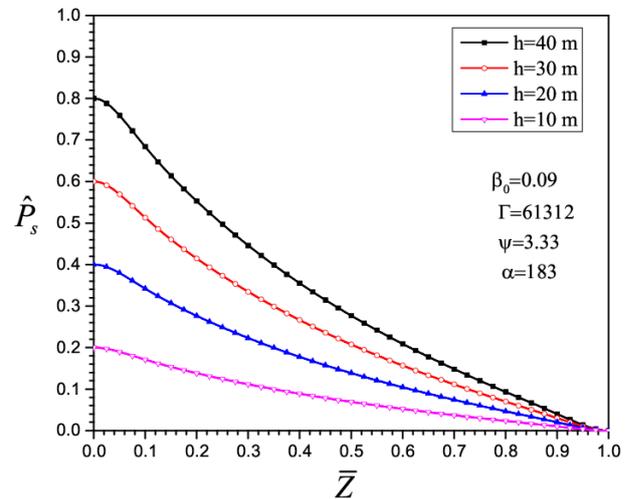
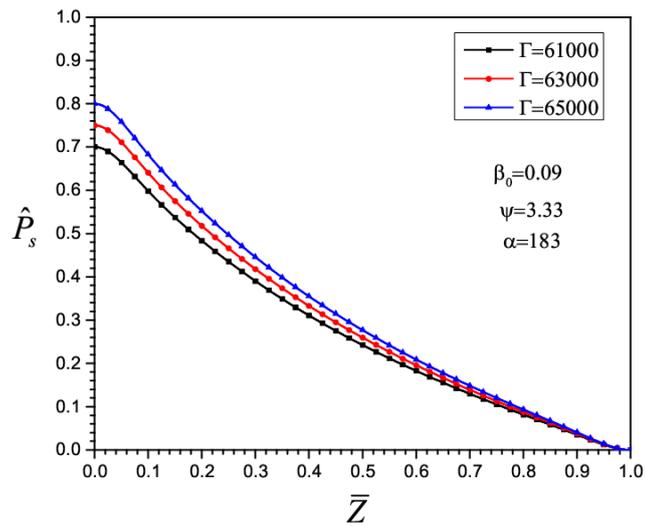


Figura 5: Efecto de la profundidad  $h$  del tirante del agua.

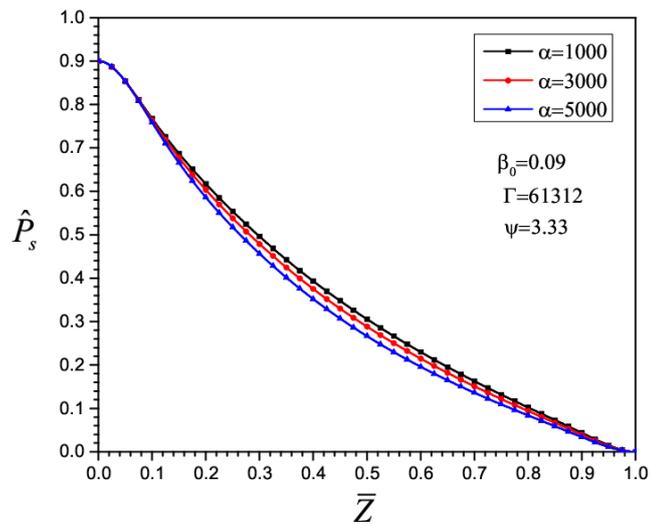
Por otro lado, en la Figura 6, se muestra el efecto que tiene el parámetro  $\Gamma = \omega\gamma_w\lambda^2/Gk_s$  sobre el comportamiento de la presión de poro  $\hat{P}_s$ . En los resultados se observa que para valores en aumento del parámetro  $\Gamma$  la presión de poro crece, esto se debe a varias posibilidades como son: la presión de poro crece si la permeabilidad  $k_s$  es muy pequeña de tal forma que existe una mayor concentración de presión entre los poros, otra posibilidad es que se presente un oleaje con una mayor disposición de energía

donde las longitudes de ondas  $\lambda$  son grandes y mayor frecuencia  $\omega$  como es el caso de un tren de ondas.



**Figura 6:** Efecto del parámetro  $\Gamma$  en la presión de poro.

ó si el módulo de resistencia al corte  $G$  decrece como es el caso de las arenas sueltas que son más vulnerables a la licuefacción.



**Figura 7:** Efecto del parámetro  $\alpha$  en la presión de poro.

En la figura 7. Se observa la influencia del parámetro  $\alpha = \gamma_w n \beta \omega \lambda^2 / k_s$  en el comportamiento de la presión de poro  $\hat{P}_s$ . En la misma figura se muestra que para valores de  $\alpha$  en decremento la presión de poro  $\hat{P}_s$  crece, esto se debe a ciertas condiciones del oleaje y del suelo marino, es decir si la compresibilidad  $\beta$ , frecuencia  $\omega$ , longitud del oleaje  $\lambda$  y porosidad  $n$  crecen o si la permeabilidad  $k_s$  del suelo marino decrece. En la misma Figura se comprueba que unos de los parámetros importantes en el incremento de la presión de poro es la porosidad. Las arenas finas tienen porosidad pequeña y por lo tanto son más vulnerables a licuar comparadas con gravas donde la porosidad es mayor y se presenta una mayor disipación de energía del fluido filtrado.

#### 4. Conclusiones

En el presente estudio, se determinó una solución analítica del modelo matemático adimensional cuasi-estático (QS), ecuaciones (6)-(8) para determinar la presión de poro a lo largo del suelo marino. Los resultados indican que el comportamiento de la presión de poro es una función de parámetros que agrupan las propiedades del oleaje y el suelo marino. Con base al resultado analítico obtenido se concluye lo siguiente:

La propagación de la presión de poro es fuertemente afectada por la variable  $h$ . Esto es porque la longitud de onda depende de la celeridad, la cual es una función de la profundidad del agua, es decir conforme aumenta la longitud de onda, crece la profundidad del agua y se tiene una mayor carga hidrostática en la interfaz oleaje-suelo marino.

El parámetro  $\Gamma$  y el parámetro  $\alpha$  también tiene un efecto considerable en la distribución de la presión de poro, ya que son parámetros que agrupan la permeabilidad del suelo  $k_s$ , la longitud de onda  $\lambda$ , el módulo de corte  $G$ , la porosidad  $n$  y la frecuencia del oleaje  $\omega$ .

Con base en el análisis paramétrico se comprobó que las arenas sueltas y finas son más vulnerables a la licuefacción comparadas con gravas.

La presente solución puede ser utilizada en primera aproximación para comprender los mecanismos de licuefacción, además de identificar las variables físicas dominantes en la interacción entre oleaje y suelo marino y que se deben de tomar en cuenta en el diseño de cimentaciones de estructuras someras situadas en arenas finas parcialmente saturadas.

#### Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al valioso apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Agradecemos profundamente su respaldo, el cual demuestra su compromiso con el fomento de la ciencia y la innovación.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### Referencias

- Arcos, E., Bautista, E., & Mendez, F. (2016). Scaling Analysis for the Liquefaction Phenomena Induced by Water Waves. *OMAE2016-54535*, V007T06A034; 8 pages. <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-54535>
- Arcos, E., Bautista, E., & Mendez, F. (2017). Dynamic response of a poroelastic soil to the action of long water waves: Determination of the maximum liquefaction depth as an eigenvalue problem. *Applied Ocean Research* 67, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.010>
- Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal Applied Physics*, 12(155), 155-164. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1712886>
- Chang, F. L., Yifa, W., Fu-Ping, G., & Li-Jing, Y. (2022). Spatiotemporal evolution of excess pore pressures in a silty seabed under progressive

- waves during residual liquefaction. *Applied Ocean Research*, 129, 103401. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103401>
- Christian, J. T., Taylor, P. K., Yen, J. K. C., & Erali, D. R. (1974). Large diameter underwater pipeline for nuclear power plant designed against soil liquefaction. *Proceeding of Offshore Technology Conference*, 597-606. <https://doi.org/10.4043/2094-MS>
- Groot, M. B., Kudella, M., Meijers, P., & Oumeraci, H. (2006). Liquefaction phenomena underneath marine gravity structures subjected to wave loads. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 132(4), 325-335. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(325))
- Jeng, D. S., Barry, D. A., & Li, L. (2001). Water wave-driven seepage in marine sediments. *Journal Advanced in Water Resources*, 24(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00036-1)
- Jeng, D. S., & Cha, D. H. (2003). Effects of dynamic soil behavior and wave nonlinearity on the wave-induced pore pressure and effective stresses in porous seabed. *Ocean Engineering*, 30(16), 2064-2089. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(03\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00070-2)
- Jie, L., Jeng, D. S., Hongyi, Z., Yuan, G., Jungwei, L., & Yakung, G. (2023). Recent advances of seabed liquefaction around the vicinity of marine structures. *Ocean Engineering*, 280, 114660. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114660>
- Lee, T. C., Tsai, C. P., & Jeng, D. S. (2002). Ocean waves propagating over a porous seabed of finite thickness. *Ocean Engineering*, 29(12), 1577-1601. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00078-6)
- Liu, H., & Jeng, D. S. (2007). A semi-analytical for random wave-induced soil response and seabed liquefaction in marine sediments. *J. Ocean Engineering*, 34(8), 1211-1224. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(03\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00070-2)
- Liu, P. L. F., Park, Y. S., & Lara, J. L. (2007). Long-wave-induced flows in an unsaturated permeable seabed. *Journal of Fluid Mechanics*, 586, 323-345. <https://doi.org/10.1017/S0022112007007057>
- Lundgren, H., Lindhardt, J. H. C., & Romold, C. J. (1989). Stability of breakwaters on porous foundation. *Proceeding of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 451-454.
- Madsen, O. S. (1978). Wave-induced pore pressures and effective stress in a porous bed. *Géotechnique*, 28(4), 377-393. <https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.4.377>
- Marcuson, W. F. (1978). Definition of terms related to liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(9), 1197-1200. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000688>
- Polyanin, A. D., & Zaitsev, V. F. (2002). *Handbook of exact solutions for ordinary differential equations*, Chapman and Hall.
- Seed, H. B., & Rahman, M. S. (1978). Wave-induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soils. *Marine Geotechnology*, 3(2), 123-150. <https://doi.org/10.1080/10641197809379798>
- Silvester, R., & Hsu, J. R. C. (1989). Sines revisited. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(3), 327-344. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:3\(327\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:3(327))
- Smith, A. W., & Gordon, A. D. (1983). Large breakwater toe failures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 109(2), 253-255. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1983\)109:2\(253\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:2(253))
- Tsai, C. P. (1995). Wave-induced liquefaction potential in a porous seabed in front of a breakwater. *Ocean Engineering*, 22(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(94\)00042-5](https://doi.org/10.1016/0029-8018(94)00042-5)
- Ulker, M. B. C., Rahman, M. S., & Jeng, D. S. (2009). Wave-induced response of seabed : Various formulations and their applicability. *Applied Ocean Research*, 31(1), 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2009.03.003>
- Verruijt, A. (1969). *Elastic storage of aquifers. In flow through porous media*. Academic Press.
- Wang, J. G., Karim, M. R., & Lin, P. Z. (2007). Analysis of seabed instability using element free Galerkin method. *Ocean Eng*, 34(2), 247-260. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.01.004>
- Yamamoto, T. H. L., Sellmeijer, E. V. (1978). On the response of a poro-elastic bed to water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 87, 193-206. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112078003006>
- Yuegin, W., Xingsen, G., Jinkun, L., Fang, H., Hong, Z., Han, G., & Xiaolei, L. (2024). A methodology for susceptibility assessment of wave-induced seabed liquefaction in silt-dominated nearshore environments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1-25. <https://doi.org/10.3390/jmse12050785>