

# Optimización de Medios Porosos en Bancos de Olas para Reducir la Reflexión del Oleaje mediante Simulación Numérica

Miguel Rosas-Villalobos<sup>1</sup>, Fabián Pierart-Vásquez<sup>2</sup>, Joaquín Fernández-Varas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: miguel.rosas2001@alumnos.ubiobio.cl

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: fpierart@ubiobio.cl

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: jofernandez@ubiobio.cl

## Resumen

Este estudio se centra en analizar la interacción del oleaje con medios porosos utilizados como barreras permeables para reducir la reflexión del oleaje. Se empleó el método de Navier-Stokes acoplado con Darcy-Forchheimer mediante el software OpenFOAM para simular y evaluar este comportamiento considerando dos barreras porosas. Los resultados destacan que las barreras permeables logran reducir efectivamente la reflexión del oleaje, especialmente cuando se ajusta correctamente la distancia entre las barreras. Además, se observa que el comportamiento del coeficiente de reflexión es cíclico en función del distanciamiento entre barreras, por lo que es importante considerar configuraciones específicas dependiendo del tipo de oleaje para maximizar el rendimiento de estas soluciones de disipación de energía en aplicaciones de ingeniería costera.

**Palabras clave:** oleaje; medio poroso; dinámica de fluidos computacional

## Abstract

This study focuses on analyzing the interaction of waves with porous media used as permeable barriers to reduce wave reflection. The Navier-Stokes method coupled with Darcy-Forchheimer was employed using OpenFOAM software to simulate and evaluate this behavior considering two porous barriers. The results highlight that permeable barriers effectively reduce wave reflection, especially when the distance between the barriers is properly adjusted. Furthermore, it is observed that the behavior of the reflection coefficient is cyclic as a function of the spacing between barriers, making it important to consider specific configurations depending on the type of wave to maximize the performance of these energy dissipation solutions in coastal engineering applications.

**Keywords:** waves; porous media; computational fluid dynamics

## 1. Introducción

Los medios porosos se emplean en diversas aplicaciones debido a sus propiedades de disipación de energía y protección de estructuras. Estos materiales pueden incluir desde rocas y gravas hasta estructuras artificiales como bloques de concreto y barreras textiles, son fundamentales para mitigar los efectos de la energía cinética del oleaje. En particular, el estudio de la interacción del oleaje con medios porosos es crucial debido a su relevancia en la ingeniería costera y la protección de infraestructuras, como plataformas petroleras, que deben resistir condiciones marítimas adversas o zonas costeras

que requieren soluciones eficaces contra la erosión [1].

Las metodologías más comunes para analizar la interacción entre medios porosos con fluidos incluyen a las ecuaciones de Boussinesq [2], que son útiles para describir la propagación de ondas en aguas poco profundas y han sido aplicadas extensamente en el estudio de la interacción de oleaje con estructuras costeras. El método Lattice-Boltzmann [3], por otro lado, ofrece una alternativa numérica potente para la simulación de fluidos en medios porosos, permitiendo un análisis detallado de las interacciones a nivel microscópico y proporcionando valiosa información para el diseño de nuevas solucio-

nes. Otro enfoque, el cual es el utilizado en el presente trabajo, es el modelo acoplado de Navier-Stokes con Darcy-Forchheimer, que permite simular la dinámica de fluidos dentro de medios porosos, incorporando efectos complejos como la resistencia adicional y la absorción de energía [4]. Este modelo ha demostrado su eficacia en una variedad de aplicaciones prácticas, como en la simulación de barreras de protección, donde se ha observado una reducción significativa en la energía del oleaje, contribuyendo a la estabilidad de las estructuras [5].

En este trabajo, nos enfocamos en entender el comportamiento del oleaje en contacto con medios porosos que actúan como barreras permeables, minimizando la reflexión del oleaje y mejorando la estabilidad estructural. Estudios previos han analizado diversas configuraciones, incluyendo paredes cilíndricas sumergidas [6; 7; 8], que se utilizan comúnmente en la protección de muelles y puertos, así como barreras completamente sumergidas [9; 10; 11; 12], que son eficaces para la protección de arrecifes artificiales y otras infraestructuras subacuáticas. Además, las estructuras porosas rompientes [13; 14; 15; 16] son esenciales para reducir la energía de las olas y proteger las playas de la erosión. Las barreras verticales parcialmente sumergidas, tanto las que tocan fondo [17; 18] como las que no lo hacen [19; 20; 21; 22], han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de reducir la energía del oleaje y minimizar la reflexión, protegiendo de manera efectiva las zonas costeras y las infraestructuras marinas.

En relación a los estudios enfocados en la influencia de las características de los medios porosos múltiples en los coeficientes de reflexión y transmisión. Venkateswarlu & Karmakar [23] utilizaron el método de expansión de funciones propias para investigar la interacción de las olas con bloques porosos de espesores y espaciamentos finitos. Sus resultados muestran que la efectividad en la disipación de olas mejora con el aumento del número de estructuras porosas y que las regiones confinadas son efectivas para la contención de olas oblicuas. Chanda & Nandan [24], a partir de los métodos de expansión de funciones propias y de mínimos cuadrados, calculan los coeficientes de reflexión, transmisión y pérdida de energía. Sus resultados muestran que el aumento de la porosidad de las placas y el lecho marino mejora la disipación de energía y que la interferencia constructiva y destructiva de las olas contribuye a la variación oscilatoria de los coeficientes. Barman & Nandan [25] investigaron la dispersión y atrapamiento de olas superficiales oblicuas debido a un rompeolas poroso compuesto colocado sobre un bloque elevado en un fluido de dos capas. Utilizando la teoría linealizada de olas y la expansión de funciones propias, se analizan los coeficientes de reflexión y transmisión, así como las cargas de las olas sobre el rompeolas.

Sin embargo, no se hallaron trabajos que hayan utilizado el modelo acoplado de Navier-Stokes con Darcy-Forchheimer para la investigación de la influencia de una

barrera vertical adicional y el estudio del efecto que tiene el distanciamiento entre las barreras en los coeficientes de reflexión del oleaje, siendo estas las principales novedades del presente trabajo.

## 2. Método(s), metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo la simulación numérica de la interacción del oleaje con medios porosos. El enfoque se basa en la implementación de un modelo numérico que acopla las ecuaciones de Navier-Stokes con las ecuaciones de Darcy-Forchheimer. Los componentes clave del modelo numérico incluyen la ecuación de continuidad, las ecuaciones de momentum, las fuerzas de resistencia en medios porosos y la fuerza en la interfaz. Además, se aborda la modelación de la superficie libre utilizando el método VOF (Volume of Fluid), así como la implementación de modelos de turbulencia y oleaje. La sección también describe la geometría de las configuraciones estudiadas, el cálculo del coeficiente de reflexión y los criterios de convergencia empleados para asegurar la validez de los resultados obtenidos.

### 2.1. Modelo numérico

Para la simulación numérica se utilizó la formulación de interIsoFoam de OpenFOAM [26], a continuación se detalla cada aspecto del modelo.

Tomando como punto de inicio la formulación incompresible de la ecuación de Navier-Stokes

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_j x_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

y la ecuación de continuidad,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u_i$  son las componentes de la velocidad,  $p$  es la presión,  $g_j$  las componentes de la gravedad,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $t$  el tiempo y  $x_i$  las componentes espaciales [20]. Luego Jensen a partir de [27] introduce  $\langle \bar{u} \rangle = n \langle \bar{u} \rangle^f$ , donde  $\langle \rangle$  hace referencia al promedio volumétrico superficial en todo el volumen de control y  $\langle \rangle^f$  denota el promedio volumétrico intrínseco en solo el volumen del poro.

#### 2.1.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad asegura la conservación de masa en el fluido y se implementa para mantener un flujo estable y consistente a lo largo del dominio de simulación:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

donde  $\langle \bar{u}_i \rangle$  es el promedio volumétrico de la velocidad sobre todo el volumen de control, incluyendo la parte sólida en el medio poroso.

### 2.1.2. Ecuación de momentum

Las ecuaciones de momentum, derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes, son fundamentales para describir el movimiento del fluido y la interacción con los medios porosos. Estas ecuaciones consideran tanto las fuerzas internas como externas que actúan sobre el fluido.

$$(1 + C_m) \frac{\partial}{\partial t} \frac{\rho \langle \bar{u}_i \rangle}{n} + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\rho \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{n} = - \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle^f}{\partial x_i} + g_j x_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \right) + F_i + F_s \quad (4)$$

donde  $F_i$  es la fuerza de resistencia del medio poroso y  $F_s$  es la fuerza asociada a la tensión superficial.  $C_m$  es un coeficiente de masa que se detalla más adelante.

### 2.1.3. Fuerzas de resistencia en el medio poroso

Se modelan las fuerzas de resistencia que actúan dentro de los medios porosos utilizando las ecuaciones de Darcy-Forchheimer, las cuales consideran tanto la resistencia viscosa como la resistencia inercial del flujo a través del medio poroso.

$$F_i = a \rho \langle \bar{u}_i \rangle + b \rho \sqrt{\langle \bar{u}_j \rangle \langle \bar{u}_j \rangle} \langle \bar{u}_i \rangle \quad (5)$$

Los coeficientes  $a$  y  $b$  se asocian a la resistencia viscosa dentro del medio poroso. Su más utilizada definición fue propuesta por Van Gent en [4], desarrollándolos como:

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\mu}{\rho d_{50}^2} \quad (6)$$

y

$$b = \beta \left( 1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d_{50}} \quad (7)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes empíricos propios del medio poroso,  $d_{50}$  es el diámetro promedio de grano y  $n$  es la porosidad.  $KC$  es el número de Keulegan-Carpenter dado por

$$KC = \frac{u_m T}{n d_{50}} \quad (8)$$

donde  $u_m$  es la velocidad máxima de interacción y  $T$  el periodo del oleaje. De la interacción transiente entre el fluido y los poros surge el coeficiente de masa  $C_m$ , definido como:

$$C_m = \gamma_p \frac{1-n}{n} \quad (9)$$

con  $\gamma_p$  un coeficiente empírico, toma el valor de 0.34.

Para este caso de estudio se tomaron los valores de caracterización obtenidos por [20] y se ajustó el número de Keulegan-Carpenter considerando las condiciones de oleaje que se detallan más adelante. Un resumen de los parámetros se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del medio poroso.

Parámetro	Valor
$\alpha$	500
$\beta$	2
$n$	0.5
$d_{50}$	0.0159 m
$KC$	68.68

Fuente: elaboración propia.

### 2.1.4. Tensión superficial

La fuerza asociada a la tensión superficial  $F_s$ , es una manifestación de las fuerzas intermoleculares en la interfaz de dos fases [28]. Se describe matemáticamente como:

$$F_s = \gamma_s \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (10)$$

donde  $\gamma_s$  es el coeficiente de tensión superficial,  $\kappa$  es la curvatura de la interfaz, definida como:

$$\kappa = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (11)$$

indicando cómo cambia la orientación de la interfaz en el espacio [29]. En este estudio se utilizó  $\gamma_s = 0.07199$  N/m.

### 2.1.5. Superficie libre VOF

El modelo utilizado para seguir la superficie libre es Volume of Fluid (VOF) [20]. La ecuación principal en su forma de volumen promedio es:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_i} (\langle \bar{u}_j \rangle \alpha) + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_i} (\langle \bar{u}_i^r \rangle \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (12)$$

donde  $\langle \bar{u}_i^r \rangle$  es la velocidad relativa entre el agua y el aire,  $\alpha$  es la fracción de volumen de agua y permite diferenciar en qué fase se encuentra una celda del volumen, esta se define como sigue:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{celda de agua} \\ 0 & \text{celda de aire} \\ (0, 1) & \text{interfaz} \end{cases} \quad (13)$$

En esta investigación se extrajo la interfaz tomando  $\alpha = 0.5$ .

### 2.1.6. Modelo de turbulencia

Puesto que las pérdidas por turbulencia son absorbidas por los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  [20]. Se tomó como primer acercamiento un modelo laminar.

### 2.1.7. Modelo de oleaje

Siguiendo [30] para seleccionar el modelo de oleaje adecuado, se empleó el número de Ursell, definido como:

$$N_{\text{Ursell}} = \frac{H \lambda^2}{h^3} \quad (14)$$

donde  $H$  es la altura de la ola,  $\lambda$  la longitud de onda y  $h$  la profundidad del agua. A partir del análisis del número

de Ursell, se determinó que el modelo más adecuado es el de Stokes II. Definido en OpenFOAM como

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \phi) + k \frac{H^2}{4} \frac{3 - \sigma^2}{4\sigma^3} \cos(2(kx - \omega t + \phi)) \quad (15)$$

Los parámetros de este oleaje en particular se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del oleaje.

Parámetro	Valor
$H$	0.019 m
$\omega$	1.42 Hz
$\lambda$	0.7548 m
$\phi$	4.71 rad

Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Geometría

El estudio se enfoca en un banco de olas bidimensional con una longitud de 6 metros y una altura de 0.4 metros, donde se evalúa la interacción del oleaje con medios porosos para reducir la reflexión. La configuración incluye una sección inicial de 4 metros sin medio poroso para permitir el desarrollo del oleaje.

En el diseño, un medio poroso se mantiene fijo, mientras que se varía la posición del segundo respecto al primero una distancia  $a$  en cada simulación para analizar cómo afecta al coeficiente de reflexión. La altura y el espesor del medio poroso se mantienen constantes en todas las simulaciones. Un esquema de esta configuración se muestra en la Figura 1.

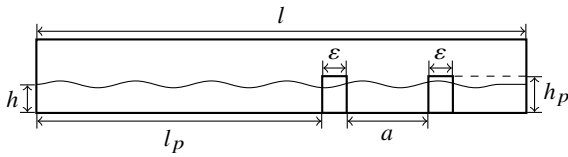


Figura 1: Esquema del banco de olas y posición de los medios porosos. Fuente: elaboración propia.

Las medidas relevantes del banco de olas se resumen en la Tabla 3, donde se detallan las dimensiones específicas de la longitud total ( $l$ ), la sección sin medio poroso ( $l_p$ ), la altura de la superficie libre ( $h$ ), así como la altura ( $h_p$ ) y el espesor ( $\varepsilon$ ) del medio poroso.

## 2.3. Configuración del caso

Para la configuración del caso se utilizó como base el código liberado por [20] y fue adaptado para las necesidades de este estudio.

Tabla 3: Medidas del banco de olas.

Medida	Valor
$l$	6 m
$l_p$	4 m
$h$	0.3 m
$h_p$	0.35 m
$\varepsilon$	0.1 m

Fuente: elaboración propia.

### 2.3.1. Condiciones de borde

A continuación se detallan las condiciones de borde elegidas para la simulación, tomando como referencia la Figura 1.

- **Inlet:** Esta corresponde a la pared izquierda del banco. Utiliza el tipo "waveVelocity" con un valor uniforme de (0 0 0), indicando la velocidad de entrada de la onda.
- **RightWall y LowerWall:** Estas corresponden a la pared derecha y el fondo del banco. Utilizan el tipo "slip", que permite el deslizamiento del fluido sin fricción en estas paredes.
- **Atmosphere:** Esta corresponde a la pared superior del banco. Usa el tipo "pressureInletOutletVelocity" con un valor uniforme de (0 0 0), gestionando la velocidad en función de la presión en la entrada y salida.
- **Sides:** Estas son la pared delantera y trasera del banco. Están definidas como "empty", lo que indica que no hay flujo a través de estas superficies, esto permite una simulación en dos dimensiones.

### 2.3.2. Esquemas de solución

Se utilizan métodos específicos como Euler para derivadas temporales, Gauss lineal para gradientes y laplacianos con corrección, y Gauss con diversas interpolaciones para términos de divergencia: limitado lineal para el flujo de cantidad de movimiento, van Leer para la fracción de volumen y lineal para términos de difusión de momento. La interpolación es lineal, los gradientes normales son ortogonales y se especifican los flujos necesarios para ciertas variables.

## 2.4. Cálculo coeficiente de reflexión

Como parámetro de comparación en este estudio se utilizó el coeficiente de reflexión definido como,

$$Kr = \frac{H_i}{H_r} \quad (16)$$

donde  $H_i$  es la altura del oleaje incidente a la zona de medios porosos y  $H_r$  la fracción de la altura de ola reflejada. Para la obtención de estos parámetros se utilizó la metodología de Mansard & Funke [31] por medio de la implementación dada por Zhi [32], la cual se basa en un método de 3 puntos de medición que ocupa un análisis de mínimos cuadrados para la descomposición

del espectro de las mediciones de las alturas de olas en espectros de ondas incidentes y reflejadas.

#### 2.4.1. Puntos de medición

De [31] se siguió la recomendación para seleccionar el espaciado entre mediciones.

- Distancia entre el primer y segundo sensor:

$$X_{12} = \frac{\lambda}{10}$$

- Distancia entre el primer y tercer sensor:

$$\frac{\lambda}{6} < X_{13} < \frac{\lambda}{3} \quad \text{con} \quad X_{13} \neq \frac{\lambda}{10} \wedge X_{13} \neq \frac{3\lambda}{10}$$

- Realizar la primera medición a al menos una longitud de onda del generador de olas y la tercera medición a una longitud de onda antes del primer medio poroso.

Con lo anterior, se fijó el primer sensor numérico a 2 metros del inicio del banco de olas, el segundo a  $\lambda/10$  del primero y el tercero a  $\lambda/5$  del primero.

#### 2.4.2. Método de cálculo

Como se mencionó anteriormente, se implementó la metodología desarrollada por Mansard & Funke en [31] para el cálculo de los coeficientes de reflexión en cada caso. Este proceso considera la obtención de los componentes espectrales de las ondas incidentes y reflejadas por medio del siguiente análisis:

- Cálculo de la amplitud espectral por el análisis de densidad autoespectral para cada medición
- Obtención de la fase espectral por medio de la densidad espectral cruzada entre las distintas mediciones
- Obtención de los componentes de amplitud espectral de las ondas incidentes y reflejadas por medio de la metodología mostrada en [31].

Para mayor detalle del proceso revisar [31]. El código utilizado fue realizado y validado por [32] e implementado en [33].

### 2.5. Convergencia

A continuación se detalla los criterios utilizados para establecer convergencia de la superficie libre y el coeficiente de reflexión.

#### 2.5.1. Mallado

Basándose en la geometría de estudio, se seleccionó un mallado hexaédrico con un tamaño global de malla de  $lc_i$ . Además, se aplicó un refinamiento de malla, reduciendo su tamaño en un factor de 2.5, resultando en una variación de  $\pm 0.06$  metros desde la superficie libre. En la Tabla 4 se presentan las características de las mallas evaluadas.

Tabla 4: Características del mallado.

Malla	$\Delta x$	Elementos
$lc_1$	25 mm	27104
$lc_2$	20 mm	41072
$lc_3$	10 mm	149296
$lc_4$	9 mm	187600
$lc_5$	7 mm	302720
$lc_6$	5 mm	576960

Fuente: elaboración propia.

#### 2.5.2. Superficie libre

Para el estudio de la convergencia de la superficie libre se tomó como referencia la posición del primer sensor numérico, a 2 metros del inicio del tanque. La Tabla 5 muestra las diferencias relativas ( $\Delta_{ij}$ ) punto a punto promedio entre todos los conjuntos de datos. Las diferencias son generalmente pequeñas, indicando una buena convergencia.

Tabla 5: Diferencias relativas entre superficies libres.

Conjuntos	$\Delta_{ij}$ (%)	Conjuntos	$\Delta_{ij}$ (%)
$lc_1$ a $lc_2$	0.33	$lc_3$ a $lc_4$	0.56
$lc_1$ a $lc_3$	0.59	$lc_3$ a $lc_5$	0.71
$lc_1$ a $lc_4$	1.13	$lc_3$ a $lc_6$	0.33
$lc_1$ a $lc_5$	1.27	$lc_4$ a $lc_5$	0.21
$lc_1$ a $lc_6$	0.89	$lc_4$ a $lc_6$	0.30
$lc_2$ a $lc_3$	0.33	$lc_5$ a $lc_6$	0.41
$lc_2$ a $lc_4$	0.80		
$lc_2$ a $lc_5$	0.95		
$lc_2$ a $lc_6$	0.60		

Fuente: elaboración propia.

Las diferencias relativas pequeñas (menores al 1 %) observadas entre la mayoría de los conjuntos de datos sugieren que los resultados se están estabilizando, lo que es un indicio de convergencia. En particular, se observa que las diferencias entre los conjuntos de datos más refinados ( $lc_4$ ,  $lc_5$  y  $lc_6$ ) son especialmente pequeñas. Por ejemplo, las diferencias relativas entre  $lc_4$  y  $lc_5$  (0.21 %) y entre  $lc_4$  y  $lc_6$  (0.30 %) son menores que las observadas entre otros conjuntos de datos consecutivos. Esto indica estabilidad y convergencia en las simulaciones de malla más refinada.

En la Figura 4 se puede observar las superficies libres para cada valor de  $lc$  en un intervalo de 5 segundos.

#### 2.5.3. Coeficiente de reflexión

Al inicio,  $Kr$  experimentó un aumento considerable, de 0.0355 entre  $lc_1$  y  $lc_2$ . A medida que  $lc$  aumenta, las diferencias disminuyen, indicando una tendencia hacia la estabilización. Las fluctuaciones menores a partir de  $lc_4$  sugieren la convergencia, aunque no de manera completamente uniforme. En la Figura 2 se puede apreciar esta tendencia.

Luego se analizó cuanto tiempo era necesario si-

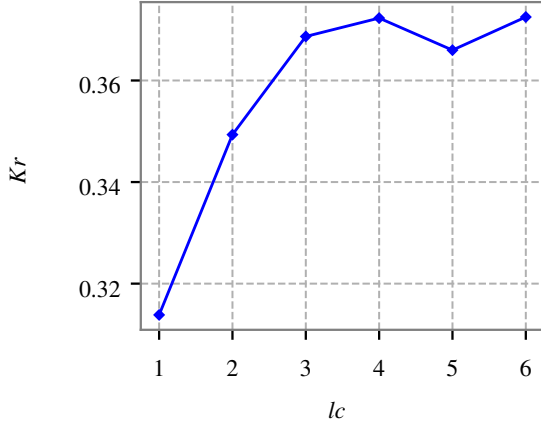


Figura 2: Gráfico de convergencia de  $Kr$  al variar mallado. Fuente: elaboración propia.

mular para lograr una convergencia en el coeficiente de reflexión. La gráfica de  $Kr$  vs. tiempo muestra que  $Kr$  inicialmente presenta algunas oscilaciones, pero tiende a estabilizarse conforme el tiempo avanza. Las diferencias entre valores consecutivos de  $Kr$  disminuyen y fluctúan alrededor de valores cercanos a cero. Esto indica que las variaciones en  $Kr$  se reducen con el tiempo, mostrando una tendencia clara hacia la estabilización. En resumen, la disminución de las fluctuaciones y la convergencia de  $\Delta Kr$  hacia cero justifican la conclusión de que  $Kr$  tiende a estabilizarse a medida que el tiempo avanza.

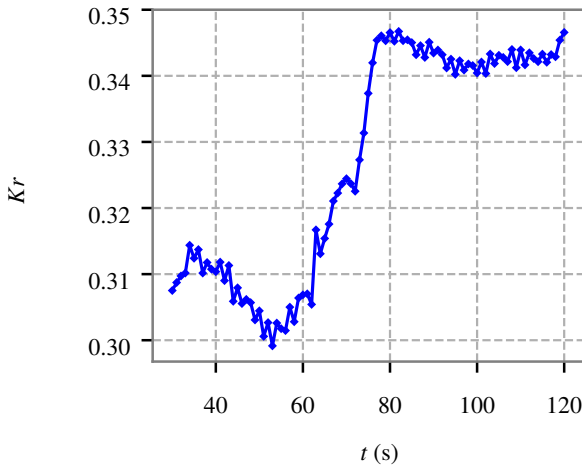


Figura 3: Gráfico de convergencia de  $Kr$  en el tiempo. Fuente: elaboración propia.

Basándose en lo expuesto anteriormente, se seleccionó  $lc_4$  como tamaño de malla y un tiempo de simulación de 90 segundos.

### 3. Resultados

En esta sección se presentan los análisis referente a como afecta el distanciamiento entre las paredes porosas al

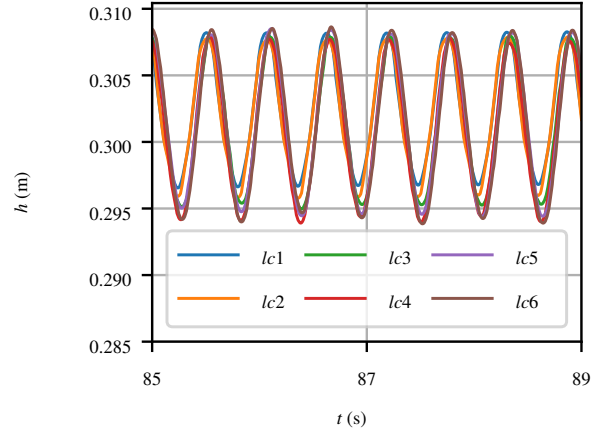


Figura 4: Gráfico de convergencia de superficie libre. Fuente: elaboración propia.

coeficiente de reflexión y la vorticidad.

Se tomaron 4 casos extremos para realizar los análisis, estos se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6: Casos analizados mediante contornos y streamlines.

Caso	$a$	$Kr$
$C_1$	0.3 m	44.07 %
$C_2$	1.8 m	43.42 %
$C_3$	0.429 m	27.65 %
$C_4$	1.775 m	28.07 %

Fuente: elaboración propia.

#### 3.1. Variación de $Kr$

Para analizar la influencia del distanciamiento entre los dos medios porosos  $a$  en el coeficiente de reflexión  $Kr$ , se obtiene este parámetro para distintos valores de  $a/\lambda$  en un rango de 0 a 2.5. Estos resultados se muestran en Figura 5. En dicha figura se agrega una interpolación definida por (17), como se puede ver el comportamiento del coeficiente  $Kr$  es periódico con un periodo de  $0.5a/\lambda$ . Esto implica que para cada incremento en  $a$  igual a la mitad de la longitud de onda  $\lambda$ , se obtiene un mínimo. En términos prácticos, cada vez que la distancia  $a$  entre las placas es un múltiplo de aproximadamente la mitad de la longitud de onda  $\lambda$ , se observa un mínimo coeficiente de reflexión.

$$Kr(a/\lambda) = \left| 0.1689 \cos \left( 6.3 \frac{a}{\lambda} + 0.9 \right) \right| + 0.2718 \quad (17)$$

Este comportamiento oscilatorio es similar al obtenido por [24] y [25] para múltiples paredes.

#### 3.2. Variación de la vorticidad

Para interpretar el comportamiento de  $Kr$  mostrado en la Figura 5, se grafica la variación de vorticidad para dos casos donde el coeficiente es máximo  $C_1$  y  $C_3$  y dos

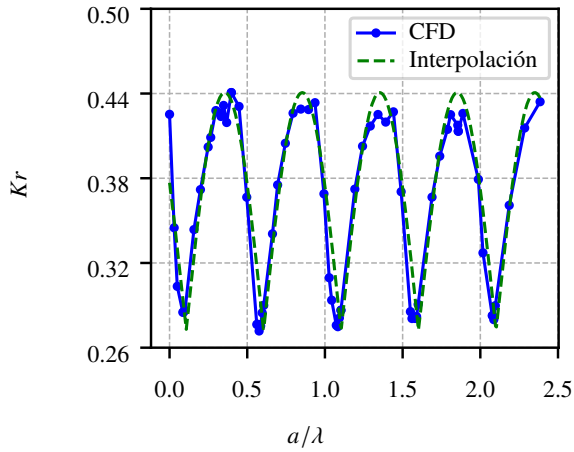


Figura 5: Gráfico de  $Kr$  al variar  $a$ . Fuente: elaboración propia.

casos donde el coeficiente es mínimo,  $C_2$  y  $C_4$ . Estos se muestran en 3 instantes de tiempo 60s, 70s y 80s. Esto se puede visualizar en Figura 6.

Es posible ver que la mayor disipación de energía debido a la generación de vórtices se produce antes de la primera placa porosa, lo que implica que si la función del sistema es disipar energía, esta placa debería tener una mayor permeabilidad. Esto para evitar turbulencias excesivas cerca de la zona de ensayo. Además, se puede concluir que como base todos tendrán un efecto de reflexión igual por el efecto de la primera placa. Luego, la influencia del distanciamiento, solo se puede apreciar al visualizar la disipación entre placas, para esto se realiza un zoom al caso  $C_1$  y  $C_3$  y se vuelve a calcular el criterio  $Q$  que mide la vorticidad en un rango entre 0 y 0.5 para evaluar mejor la generación de vórtices en esa zona, esto se visualiza en Figura 7.

De estos resultados es posible comprobar que para el caso  $C_1$  hay menos generación de vórtices que en el caso  $C_3$  y, por lo tanto, el coeficiente de reflexión será menor en el caso en que la energía se disipe de mejor manera en este caso para  $C_3$ . Este comportamiento es cíclico y concordante con lo encontrado por [23], donde se menciona que este efecto puede ser producido por interferencias constructivas o destructivas entre las olas incidentes y las reflejadas entre medios porosos, provocando efectos resonantes en el caso de interferencias constructivas que disminuyen el coeficiente de reflexión. También se observa que los vórtices para el caso de menor reflexión se generan en las partes inferiores del tanque, facilitando la recirculación entre medios porosos.

#### 4. Conclusiones

En conclusión, este estudio ha demostrado la efectividad del uso de medios porosos como barreras permeables para mitigar la reflexión del oleaje. Las simulaciones realizadas con Navier-Stokes acoplado con Darcy-Forchheimer en OpenFOAM proporcionaron valiosos

resultados para optimizar el diseño de estas barreras. Los hallazgos indican que ajustar el espaciado entre las barreras puede mejorar significativamente su rendimiento en la reducción de la reflexión del oleaje, debido a que dependiendo de las características de la onda, se podrían generar interferencias constructivas o destructivas entre las barreras provocando el efecto deseado basándose en una buena selección de esta distancia.

Además, se ha observado que el comportamiento del coeficiente de reflexión es cíclico en función del distanciamiento entre barreras, lo que sugiere la importancia de considerar configuraciones específicas basadas en el tipo de oleaje para maximizar la eficiencia de estas soluciones de disipación de energía en aplicaciones de ingeniería costera. Este comportamiento cíclico también representa una oportunidad para ser aprovechado en bancos pequeños mediante la adición de más paredes, lo cual podría incrementar la efectividad de la mitigación del oleaje.

Una limitación significativa del presente estudio es que se ha trabajado exclusivamente con oleaje regular, lo que simplifica las condiciones de simulación, pero no refleja completamente la complejidad de los entornos marinos reales. En escenarios naturales, el oleaje es frecuentemente irregular y puede presentar variaciones significativas en el tiempo, tanto en términos de altura como de periodo. Para abordar esta limitación, futuras investigaciones deberían enfocarse en la simulación de oleajes no regulares o regulares variables en el tiempo. Esto implicaría desarrollar y validar modelos numéricos más avanzados que puedan capturar la dinámica compleja y fluctuante del oleaje real, proporcionando así una mejor comprensión de cómo las barreras porosas se comportan bajo condiciones más representativas.

Como trabajo futuro, se debe enfocar en investigar cómo las características del medio poroso, como la porosidad y la permeabilidad, interactúan con diferentes condiciones de oleaje. Comprender estas interacciones será crucial para refinar los criterios de diseño de las barreras permeables y asegurar su rendimiento óptimo en diversas condiciones costeras. Además, explorar otras técnicas de modelado y realizar validaciones experimentales podría proporcionar resultados más completos sobre la aplicación práctica de estas soluciones en la ingeniería costera.



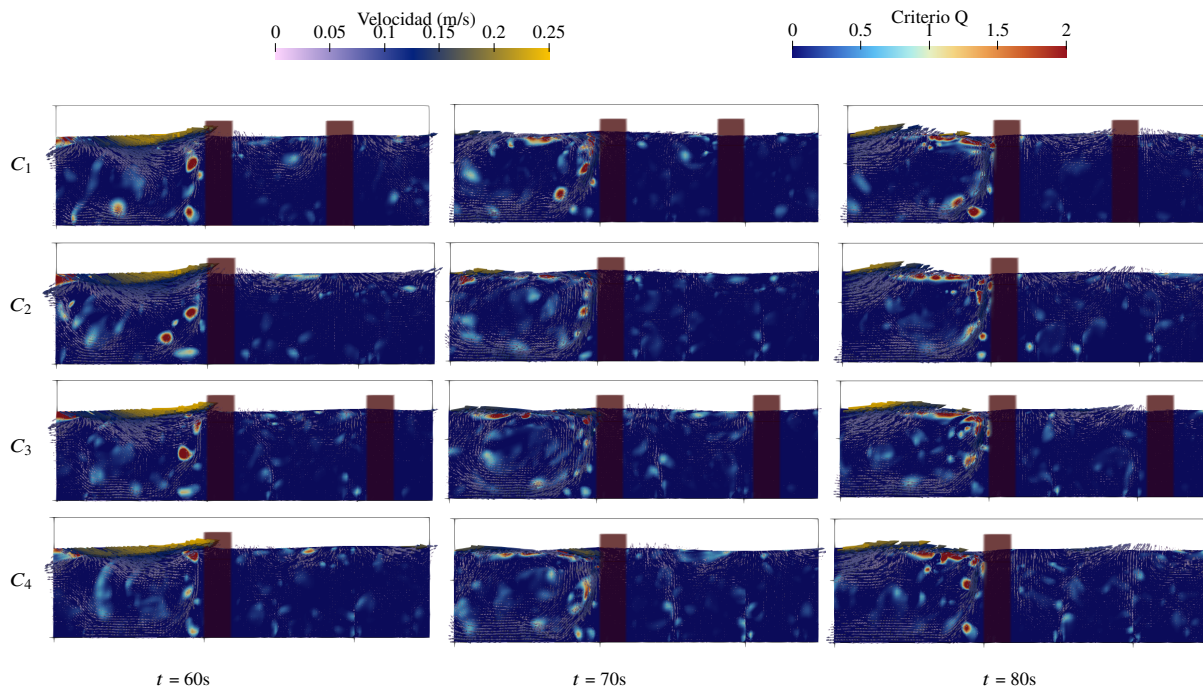


Figura 6: Gráfico de contornos y direcciones de velocidad al variar  $a$ . Fuente: elaboración propia.

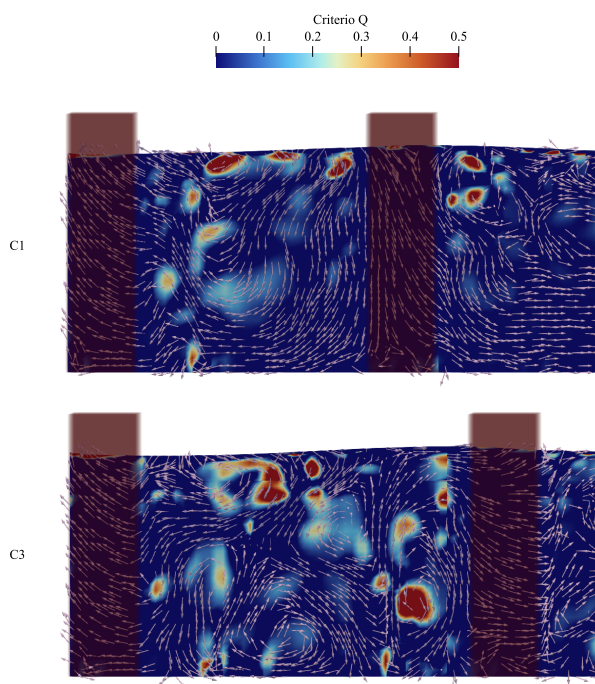


Figura 7: Zoom criterio Q, casos  $C_1$  y  $C_3$  para un tiempo de 90 s.

## Referencias

- [1] B. Elsharnouby, A. Soliman, M. Elnaggar, and M. Elshahat, "Study of environment friendly porous suspended breakwater for the Egyptian Northwestern Coast," *Ocean engineering*, vol. 48, pp. 47–58, 7 2012.
- [2] V. N. Vu, C. Lee, and T.-H. Jung, "Extended Boussinesq equations for waves in porous media," *Coastal engineering*, vol. 139, pp. 85–97, 9 2018.
- [3] E. Xing, Q. Zhang, G. Liu, J. Zhang, and C. Ji, "A three-dimensional model of wave interactions with permeable structures using the lattice Boltzmann method," *Applied mathematical modelling*, vol. 104, pp. 67–95, 4 2022.
- [4] M. Gent, "Porous flow through rubble-mound material," *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-asce - J WATERW PORT COAST OC-ASCE*, vol. 121, 05 1995.
- [5] P. L.-f. Liu, P. Lin, K.-A. Chang, and T. Sakakiyama, "Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures," *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, vol. 125, pp. 322–330, 11 1999.
- [6] Z. Zhai, S. Zheng, and D. Wan, "Interaction between solitary waves and a combined structure of two concentric asymmetric porous arc walls," *Physics of fluids*, vol. 34, 4 2022.
- [7] Z. Zhai, W. Zhao, D. Wan, and D. Liu, "Interaction of solitary wave with a concentric structure with multiple porous outer walls," *Ocean engineering*, vol. 260, p. 111887, 9 2022.
- [8] Z. Zhong and K. Wang, "Solitary wave interaction with a concentric porous cylinder system," *Ocean engineering*, vol. 33, pp. 927–949, 5 2006.
- [9] K. Zhu, R. Jiang, Z. Sun, H. Qin, Z. Cheng, Y. Wang, and E. Zhao, "Numerical study on the effects of the multiple porous medium breakwaters on the propagation of the solitary wave," *Journal of marine science and engineering*, vol. 11, p. 565, 3 2023.
- [10] Y.-T. Wu, C.-L. Yeh, and S.-C. Hsiao, "Three-dimensional numerical simulation on the interaction of solitary waves and porous breakwaters," *Coastal engineering*, vol. 85, pp. 12–29, 3 2014.
- [11] G. Ma, F. Shi, S.-C. Hsiao, and Y.-T. Wu, "Non-hydrostatic modeling of wave interactions with porous structures," *Coastal engineering*, vol. 91, pp. 84–98, 9 2014.
- [12] W. Sun, K. Qu, S. Kraatz, B. Deng, and C. Jiang, "Numerical investigation on performance of submerged porous breakwater to mitigate hydrodynamic loads of coastal



- bridge deck under solitary wave,” *Ocean engineering*, vol. 213, p. 107660, 10 2020.
- [13] E. Jafari, M. M. Namin, and P. Badiei, “Numerical simulation of wave interaction with porous structures,” *Applied ocean research*, vol. 108, p. 102522, 3 2021.
  - [14] D. He, Y. Ma, G. Dong, and M. Perlin, “A numerical investigation of wave and current fields along bathymetry with porous media,” *Ocean engineering*, vol. 244, p. 110333, 1 2022.
  - [15] A. Sasikumar, A. Kamath, and H. Bihs, “Modeling porous coastal structures using a level set method based VRANS-solver on staggered grids,” *Coastal engineering journal/Coastal engineering journal.*, vol. 62, pp. 198–216, 3 2020.
  - [16] S. Booshi and M. J. Ketabdari, “Modeling of solitary wave interaction with emerged porous breakwater using PLIC-VOF method,” *Ocean engineering*, vol. 241, p. 110041, 12 2021.
  - [17] Y. Miao and K.-H. Wang, “Approximate analytical solutions for a solitary wave interacting with a partially submerged porous wall,” *Ocean engineering*, vol. 181, pp. 227–239, 6 2019.
  - [18] A. Sasmal and S. De, “Mitigation of wave force and dissipation of energy by multiple arbitrary porous barriers,” *Waves in random and complex media*, vol. 34, pp. 523–546, 4 2021.
  - [19] P. Lin and S. A. Karunarathna, “Numerical Study of Solitary Wave Interaction with Porous Breakwaters,” *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, vol. 133, pp. 352–363, 9 2007.
  - [20] B. Jensen, N. G. Jacobsen, and E. D. Christensen, “Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures,” *Coastal Engineering*, vol. 84, pp. 56–72, 2014.
  - [21] K. Fang, M. Huang, G. Chen, J. Wu, H. Wu, and T. Jiang, “Boussinesq Simulation of Coastal Wave Interaction with Bottom-Mounted Porous Structures,” *Journal of marine science and engineering*, vol. 10, p. 1367, 9 2022.
  - [22] I. Magdalena, S. R. Pudjaprasetya, and L. H. Wiryan-to, “Wave Interaction with an Emerged Porous Media,” *Advances in applied mathematics and mechanics*, vol. 6, pp. 680–692, 10 2014.
  - [23] V. Venkateswarlu and D. Karmakar, “Numerical investigation on the wave dissipating performance due to multiple porous structures,” *ISH journal of hydraulic engineering/The Indian journal of hydraulic engineering*, vol. 27, pp. 202–219, 5 2019.
  - [24] A. Chanda and S. N. Bora, “Effect of a porous sea-bed on water wave scattering by two thin vertical submerged porous plates,” *European journal of mechanics. B, Fluids*, vol. 84, pp. 250–261, 11 2020.
  - [25] K. K. Barman and S. N. Bora, “Scattering and trapping of water waves by a composite breakwater placed on an elevated bottom in a two-layer fluid flowing over a porous sea-bed,” *Applied ocean research*, vol. 113, p. 102544, 8 2021.
  - [26] J. Roenby, H. Bredmose, and H. Jasak, “A computational method for sharp interface advection,” *Royal Society open science*, vol. 3, p. 160405, 11 2016.
  - [27] M. Del Jesus, J. L. Lara, and I. J. Losada, “Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures,” *Coastal engineering*, vol. 64, pp. 57–72, 6 2012.
  - [28] N. D. Katopodes, *Air-Water Interface*. 1 2019.
  - [29] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach, “A continuum method for modeling surface tension,” *Journal of computational physics*, vol. 100, pp. 335–354, 6 1992.
  - [30] L. H. Holthuijsen, *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2 2010.
  - [31] E. Mansard and E. Funke, “The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method,” *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, p. 8, Jan. 1980.
  - [32] Y. Zhi, *An Extended Least Squares Method to Separate the Incident and Reflected Wave Fields for Long-Crested and Short-Crested Waves*. PhD thesis, Texas A M University, 2018. Available electronically from <https://hdl.handle.net/1969.1/173501>.
  - [33] R. Muñoz, F. G. Pierart, and J. Fernández, “Experimental comparison of wave interaction with porous media,” in *2023 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, pp. 1–6, 2023.