



Hidrodinámica de Partículas Suavizadas como herramienta para mitigar daños estructurales debido a la interacción fluido-estructura

Lamberto Díaz-Damacillo*

Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A). Av. San Pablo 420, Colonia Nueva el Rosario, 02128, Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

**Autor de correspondencia
diaz.lamberto@gmail.com*

Resumen

Se realizaron simulaciones computacionales, usando el método de hidrodinámica de partículas suavizadas, de la interacción de un flujo de fluido y una estructura sólida: similar a un puente y a un edificio de viviendas, con el objetivo de mostrar que el uso de la técnica de dinámica de fluidos computacional es una herramienta útil para evaluar los esfuerzos que experimenta la estructura durante la interacción fluido-estructura. Se consideraron dos casos de estudio arbitrarios donde se obtuvieron los campos de velocidad y de esfuerzos para mostrar qué zonas experimentan mayor esfuerzo que el resto de la infraestructura, de esta manera obtener un soporte técnico numérico-gráfico, para recomendar reforzar estructuralmente esas zonas o modificar el diseño estructural, con la intención de mitigar posibles daños estructurales provocados principalmente por el flujo de fluidos derivados de fenómenos hidrometeorológicos o tsunamis.

Palabras clave: Hidrodinámica de Partículas Suavizadas, Dinámica de Fluidos Computacional, Interacción fluido-sólido, Riesgos hidrometeorológicos

Información del Artículo

Cómo citar el artículo:

Díaz-Damacillo, L. (2024). Hidrodinámica de Partículas Suavizadas como herramienta para mitigar daños estructurales debido a la interacción fluido-estructura. *Tlamati Sabiduría*, 20, 33-44.

Editores Invitados: Dr. Iván Gallardo-Bernal



Abstract

Computational simulations were performed using the smoothed particle hydrodynamics method to study the interaction between a fluid flow and a solid structure, resembling a bridge and a residential building. The aim was to demonstrate that the use of computational fluid dynamics technique is a valuable tool for evaluating the stresses experienced by the structure during fluid-structure interaction. Two arbitrary case studies were considered where velocity and stress fields were obtained to illustrate which areas experience greater stress than the rest of the infrastructure. This provided numerical-graphical technical support to recommend structural reinforcement or modification of the structural design, intending to mitigate potential structural damage primarily caused by fluid flow derived from hydrometeorological phenomena or tsunamis.

Keywords: Smoothed Particle Hydrodynamics, Computational Fluid Dynamics, Fluid-solid interaction, Hydrometeorological risks.

Introducción

México es un país en el cual, por su ubicación geográfica en el planeta, tienen lugar eventos hidrometeorológicos recurrentes durante todo el verano e inicios del otoño. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el año 2022 reportó 17 ciclones tropicales que se desarrollaron en el océano Pacífico y 17 en el océano Atlántico, mientras que en el 2023 se reportan 20 ciclones tropicales en el Océano Pacífico y 22 en el océano Atlántico (SMN, s.f.). Dichos eventos se caracterizan por su potencial como riesgo hidrometeorológico que afecta a la población en general, principalmente por fuertes vientos, inundaciones, desbordamientos de ríos, inestabilidad de laderas y deslaves. En 2013, México vivió un efecto combinado derivado de dos huracanes (CENAPRED, 2020), por un lado, Ingrid, en el golfo de México, y Manuel, en el océano Pacífico. En ese año, uno de los estados más afectados fue el de Guerrero y con mayor índice de marginación. El 25 de octubre de 2023, el huracán Otis golpea al estado de Guerrero, en Acapulco, como huracán categoría 5, la máxima en la escala Saffir-Simpson, generando fuertes daños a la infraestructura de la ciudad y poblados circunvecinos.

Sin duda, no se pueden evitar este tipo de fenómenos naturales, se puede mitigar los daños materiales a través de fomentar una cultura de prevención que relacione el diseño estructural adecuado para que obras civiles de ingeniería,

como puentes o edificios, no colapsen fácilmente cuando sean golpeados por un torrente. En el estado de Guerrero, es común tener ríos que atraviesan alguna población y puentes que conectan ambos lados de la población. Durante la temporada de ciclones es recurrente la crecida de ríos y el riesgo de desbordamiento, teniendo así un peligro latente donde el flujo del río puede golpear a la estructura ingenieril y dañarla gravemente hasta su colapso. En 2013, el caudal de río Ajolotero en Chilapa de Álvarez, Guerrero, presentó una crecida que se desbordó afectando un gran número de viviendas y el colapso del puente que se encontraba sobre la avenida Revolución, conectando la zona norte del poblado con el centro de dicha ciudad. La construcción de un puente es relativo a las necesidades que va a satisfacer, destacando principalmente su diseño para soportar cargas perpendiculares al suelo, pero se descuida típicamente el diseño para soportar fuertes corrientes fluviales, que normalmente golpean de forma lateral al puente.

Se calcula que aproximadamente el 60% de los fallos en puentes están vinculados con cuestiones hidráulicas, siendo la socavación la causa principal (Almonte-Pilco y De la Cruz-Vega, 2022). Uno de los componentes más críticos en la construcción de un puente es el pilar, el cual se diseña específicamente para soportar el peso de la estructura y típicamente se ubica en el lecho del río. Una estrategia efectiva para mitigar los efectos de la socavación es tener en cuenta la forma y el diseño del pilar (Setyandito *et al.*,

2020). Estos autores realizaron simulaciones numéricas de la velocidad del flujo alrededor de tres modelos de estribo y el proceso de transporte de sedimentos. Encontraron que la forma del pilar afecta la velocidad del flujo alrededor del pilar. En otras palabras, el diseño estructural en puentes y edificios debe optimizar la forma geométrica de la infraestructura, buscando siempre una forma más aerodinámica, así mejorar la eficiencia y la seguridad del sistema durante la interacción fluido-estructura.

La interacción fluido-estructura es un tema de gran relevancia en diversos ámbitos, como el diseño mecánico, costero y otros campos de la vida cotidiana (Yang y Shao, 2020). Implica cambios en las superficies libres y un acoplamiento significativo entre cuerpos fluidos y sólidos. Numerosos trabajos se han llevado a cabo en este campo mediante enfoques teóricos, de simulación numérica y experimentales. Sin embargo, en las últimas décadas, los métodos de simulación numérica han ganado protagonismo en la resolución de problemas relacionados con la interacción fluido-estructura.

Recientemente, Majtan *et al.* (2023) realizaron un estudio numérico de la respuesta estructural de un puente de arco de mampostería sometido a un flujo de inundación e impacto de escombros. Reportan la distribución máxima de esfuerzos sobre la estructura, donde se observa de manera gráfica qué zonas presentan mayor esfuerzo. Sus resultados pueden conducir a mejores estrategias de gestión de puentes para garantizar que estas estructuras sigan funcionando en servicio.

Por otro lado, en ciudades costeras la interacción fluido-estructura se presenta entre la interacción del oleaje con estructuras civiles aledañas, inclusive si la ciudad se encuentra en una zona de alta sismicidad, y es probable la formación de tsunamis que afecten la zona costera. Las observaciones de tsunamis anteriores a menudo revelan variaciones en el daño y la capacidad de supervivencia de estructuras similares impactadas (Pringgana *et al.*, 2021). Es decir, una estructura civil tendrá una respuesta diferente ante el impacto de un tsunami en función de la orientación y disposición de la estructura.

En este trabajo se pretende mostrar la utilidad del método de Hidrodinámica de Partículas

Suavizadas (SPH por sus siglas en inglés), que es una de muchas técnicas para realizar Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) para estudiar el flujo de fluidos a través de estructuras ingenieriles como puentes, viviendas y edificios, permitiendo evaluar el diseño estructural sometido a esfuerzos provocados por corrientes fluviales que golpean a la estructura, con la intención de mitigar posibles daños estructurales provocados principalmente por el flujo de fluidos derivados de fenómenos hidrometeorológicos y tsunamis.

Metodología

A mediados del siglo XX, comienzan las contribuciones que trascienden en el estudio de la dinámica de fluidos, a través del uso de computadoras, el cual resuelven de forma numérica las ecuaciones que gobiernan los fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes. Los avances de esta metodología están fuertemente ligados con los avances tecnológicos computacionales. Actualmente, existen un gran número de métodos numéricos enfocados en resolver las ecuaciones que gobiernan a los fluidos (Wikipedia, 2024). El método SPH es uno de muchos métodos que se usan hoy en día para llevar a cabo simulaciones computacionales de dinámica de fluidos, es decir, usar SPH es una forma de realizar CFD. El método SPH (Lucy, 1977, Gingold y Monaghan, 1977) presenta ventajas únicas sobre otros métodos numéricos más tradicionales para el modelado de flujo de fluidos y la interacción fluido-sólido, debido a su capacidad inherente para manejar fronteras complejas, e incorporar nuevos efectos físicos de una manera relativamente simple. En este trabajo se utilizó el código libre DualSPHysics (Domínguez *et al.*, 2021), el cual está construido con base en el método SPH, con la finalidad de abordar problemas de ingeniería de la vida real, donde ha destacado por su eficiencia y confiabilidad.

Generalidades del método SPH

El método SPH es un esquema completamente lagrangiano en el que el fluido se puede dividir en partículas distribuidas arbitrariamente (Monaghan, 2005). La solución numérica se

obtiene sin la necesidad de usar algún tipo de malla computacional, porque todas las funciones y sus derivadas en el espacio continuo se aproximan mediante interpolaciones integrales utilizando una función *kernel* (o de suavizado). Cada partícula del dominio puede asociarse con un objeto físico discreto o puede representar una parte macroscópica del continuo. Mientras que a las partículas individuales se les permite transportar masa, momento, energía térmica y, en general, cualquier otra propiedad hidrodinámica, otro elemento clave de SPH es la llamada aproximación de partículas, en las que la interpolación integral se reemplaza por una interpolación sumatoria. Por lo tanto, el valor suavizado de cualquier función de campo, $f(\mathbf{x}, t)$, en la posición x_i de la partícula i y el tiempo t se puede calcular como

$$f_i = f(x_i, t) = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} f_j W_{ij}, \quad (1)$$

donde m_j y ρ_j son la masa y la densidad de la partícula vecina j , $f_j = f(x_j, t)$, $W_{ij} = W(|x_i - x_j|, h)$ es la función *kernel* de interpolación, h es la longitud de suavizado, y la suma se aplica a los n vecinos cercanos de la partícula i , incluido el mismo para el cual $j = i$, dentro de un radio de suavizado kh , donde k es un coeficiente entero asociado con la función *kernel*. Por lo tanto, la longitud h define el dominio de soporte de la partícula i sobre el cual el *kernel* no desaparece. La Figura 1, muestra la interpretación gráfica 3D del método SPH. Nótese que la línea azul discontinua muestra las partículas vecinas j de la partícula i que son consideradas en la sumatoria, el resto representan partículas que se encuentran fuera de longitud kh del *kernel* y por lo tanto no se consideran en la sumatoria.

Haciendo $f = \rho$ en la ecuación (1), la densidad ρ de la partícula i se puede escribir como:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^n m_j W_{ij}, \quad (2)$$

donde la masa se conserva exactamente.

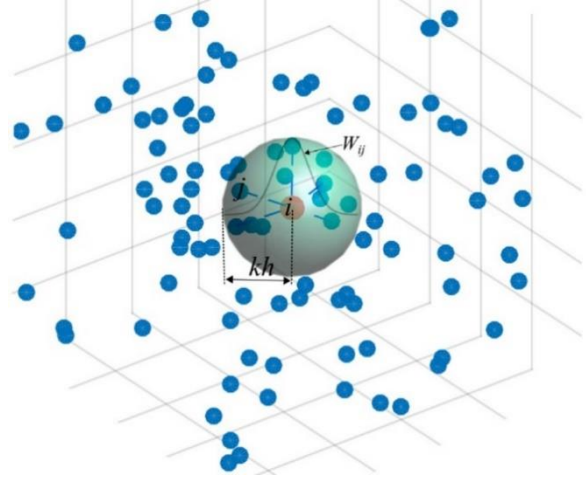


Figura 1. Esquema en un espacio 3D del método SPH que representa la interacción entre partículas a través de la función kernel.

Así mismo, se pueden expresar las derivadas espaciales de cualquier función como:

$$\nabla \cdot f_i = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} (f_j - f_i) \cdot \nabla W_{ij}. \quad (3)$$

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones que describen el flujo de fluido están dadas por las ecuaciones de continuidad (conservación de masa) y *momentum* (cantidad de movimiento), en la perspectiva lagrangiana se expresan, respectivamente, como:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (4)$$

y

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot [\rho \nu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^t)] + \mathbf{g}, \quad (5)$$

donde d/dt es la derivada material temporal, ρ es la densidad del fluido, \mathbf{v} es el vector velocidad, p es la presión, ν es la viscosidad cinemática, el superíndice t indica la transposición y \mathbf{g} es la aceleración debido a la gravedad. La presión

dinámica está relacionada con la densidad mediante la ecuación de estado de Murnaghan-Tait (Becker y Teschner *et al.*, 2007):

$$p = p_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (6)$$

donde $\gamma = 7$, $p_0 = c_0^2 \rho_0 / \gamma$, ρ_0 es la densidad de referencia y c_0 es la rapidez del sonido.

Las ecuaciones (4) y (5) se resuelven en 3 dimensiones utilizando la última versión actualizada del código DualSPHysics, que se basa en el método SPH. La discretización SPH de las ecuaciones gobernantes se obtiene dividiendo el dominio del sistema en N subdominios, cada uno de los cuales contiene una partícula lagrangiana (Monaghan, 2005). En este marco de referencia y metodología SPH, las ecuaciones (4) y (5) toman la siguiente forma:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = -\rho_a \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_b} (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \nabla_a W_{ab}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} &= -\frac{1}{\rho_a} \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_b} (p_a - p_b) \nabla_a W_{ab} \\ &+ 4\nu \sum_{b=1}^n m_b \frac{\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b}{\rho_a + \rho_b} \frac{(\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b) \cdot \nabla_a W_{ab}}{|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|^2 + \epsilon^2} \\ &+ \mathbf{g}, \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\epsilon = 0.1h$ siempre que la distancia entre las partículas a y b sea cercana a cero. Para mejorar las propiedades de convergencia de SPH, se utilizó una función Wendland C^2 (Dehnen y Aly, 2012) de la forma:

$$W(q, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2} \right)^4 (2q + 1) \quad (9)$$

para $0 \leq q \leq 2$,

donde $\alpha_D = 7/(4\pi h^2)$ en 2 dimensiones y $21/(16\pi h^3)$ en tres dimensiones y $q = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/h$.

La integración de las ecuaciones (7) y (8) se realiza utilizando el integrador *symplectic* proporcionado por DualSPHysics, que garantiza

una precisión de segundo orden y un acoplamiento numérico de las ecuaciones SPH cuando la densidad, la velocidad y la posición de las partículas avanzan desde el tiempo t^n a $t^{n+1} = t^n + \Delta t$.

Caso 1: Flujo de fluido a través de una estructura similar a un puente

Las técnicas de CFD se han aplicado de forma satisfactoria para la solución de diversos problemas ingenieriles y de la vida cotidiana. En este caso se expone la utilidad de una simulación numérica asistida por computadora para visualizar los posibles riesgos a la infraestructura de un puente que se somete a una corriente de agua que la golpea y atraviesa.

El modelo 3D utilizado para este estudio numérico se muestra en la Figura 2. Para la construcción del modelo tridimensional se utilizó el software FreeCAD, el cual es un modelador 3D paramétrico de código abierto creado principalmente para diseñar objetos de la vida real de cualquier tamaño.

El modelo 3D del canal y del puente consisten en una geometría arbitraria que busca ejemplificar el uso del CFD como herramienta para analizar el campo de esfuerzos que se presentan sobre la estructura de cualquier modelo similar. El modelo tridimensional se importó desde el código DualSPHysics, donde es posible cargar cualquier modelo 3D en formato .stl, .vtk o .ply.

Desde el código DualSPHysics, se manipuló el modelo 3D para llenar el sistema con agua hasta alcanzar una altura que cubrió a la mitad de la altura del puente. Posteriormente, se impuso una aceleración longitudinal al canal (en dirección y) para iniciar el flujo de agua, estableciendo condiciones periódicas en los límites del canal, es decir el flujo que sale del canal es el mismo flujo que entra, con las mismas condiciones de densidad, velocidad y presión que tenía en la salida. La condición inicial del sistema de estudio se muestra en la Figura 3.

El sistema de la Figura 3, resulta de una discretización del dominio en partículas SPH, obteniendo 88,950 partículas de fluido y 41,515 partículas sólida. La simulación en DualSPHysics se ejecutó en una computadora

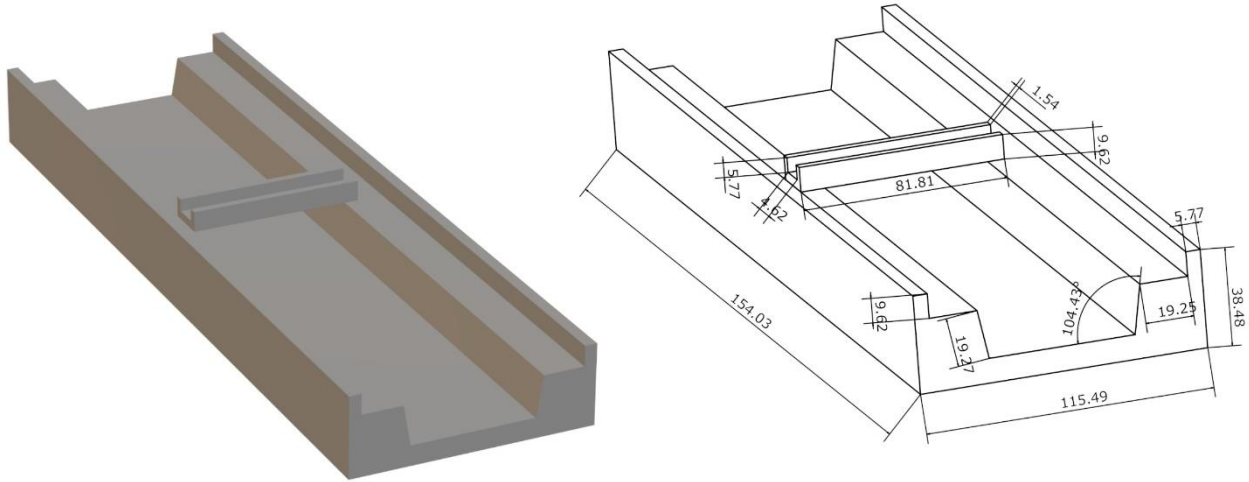


Figura 2. Modelo 3D de un canal de agua con un puente que la atraviesa de forma transversal (izquierda). Medidas del sistema dadas en unidades $\times 10^{-1}\text{m}$ (derecha).

portátil Dell Inc., Precision 7520 y equipado con una tarjeta gráfica NVIDIA Quadro M2200, este último necesario para utilizar la versión en paralelo CPU/GPU del DualSPHysics. Se realizó una simulación de los primeros 2.5 segundos de la evolución del flujo, lo que la computadora le tomó 1.16 horas de tiempo de cómputo. Dicha ejecución se realizó con la finalidad de ejemplificar la interacción del fluido con la estructura sólida y obtener el campo de esfuerzos sobre el modelo 3D. Simulaciones equivalentes pueden llevarse a cabo con mayor resolución (mayor número de partículas) y mayor tiempo de

evolución del flujo, para ello se recomienda el uso de supercomputadoras donde el DualSPHysics puede ejecutarse perfectamente.

Caso 2: Impacto de una masa de fluido sobre una estructura similar a un edificio de viviendas

El modelo 3D utilizado para este caso se muestra en la Figura 4. Para la construcción del modelo tridimensional se utilizó el software Blender, el cual es un programa de código abierto dedicado al modelado, iluminación, renderizado, la animación y creación de gráficos 3D.

Las simulaciones se ejecutaron en el mismo equipo descrito en el caso 1. La condición inicial de este caso se muestra en la Figura 5. Donde se observa del lado derecho del sistema se ubica la estructura sólida conformada por 5737 partículas SPH, y del lado izquierdo la masa de fluido con una forma inicial de un paralelepípedo conformada por 30285 partículas SPH, que por acción de la fuerza de gravedad y las condiciones de borde tenderá a moverse hacia el edificio impactándose contra él.



Figura 3. Condición inicial de la simulación computacional, en azul se muestran el canal y el puente que representan un material sólido homogéneo, en rojo el fluido que representa el agua.

Resultados

Como en cualquier estudio de flujo de fluidos, el campo de velocidades es indispensable para analizar el sistema de estudio. En nuestros casos

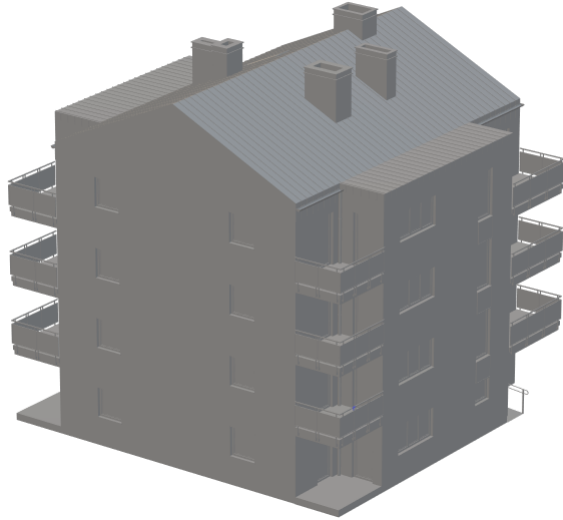


Figura 4. Modelo 3D arbitrario del edificio de viviendas, construido con Blender.

de estudio 1 y 2, el campo de esfuerzos sobre el material sólido, compuesto por el canal y el puente para el caso 1 y el edificio de viviendas para el caso 2, se obtienen a partir del campo de velocidades del flujo de fluido. En el código DualSPHysics se calculan directamente las aceleraciones de cada partícula de fluido, dadas

por la ecuación (8), este cálculo se realiza para un rango de partículas vecinas a cierta partícula sólida, y a través de hacer la suma de los valores de aceleración de esas partículas se calcula la fuerza, como:

$$\mathbf{F} = m \sum \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} \quad (10)$$

Caso 1

En este caso, el campo de velocidades del canal que atraviesa e interactúa con un medio sólido parecido a un puente se muestra en el Figura 6. Con base en estos resultados, el campo de esfuerzos que experimentan los materiales sólidos se muestra en la Figura 7, en distintos tiempos y vistas de distintas zonas. En la Figura 7(a) se observa el canal con la vista frontal al impacto, en $t = 0.6$ s, se observa que la zona que muestra mayor esfuerzo es la zona baja central del puente, que respecto del tiempo este esfuerzo se distribuye a los laterales tal como se observa en Figura 7(b), que muestra el campo de esfuerzos en $t = 0.8$ s. Es importante notar que en el fondo del canal, debajo del puente también se presentan esfuerzos relativamente mayores respecto de

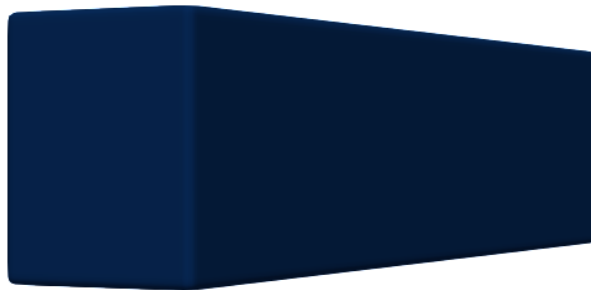
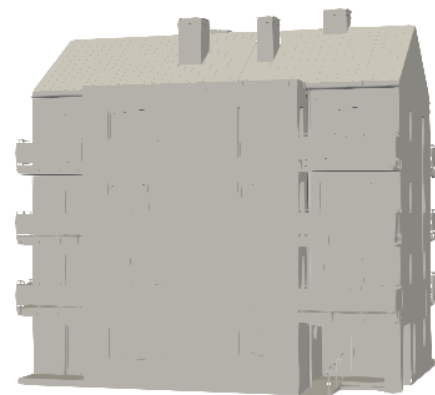


Figura 5. Condición inicial de la simulación computacional, en azul se muestra el canal y el puente que representan un material sólido homogéneo, en rojo el fluido que representa el agua.



distintas zonas del canal, lo que implica que la zona con mayor riesgo de remoción de material por flujo es en dicha zona. La Figura 7(c), muestra también el campo de esfuerzos con vista frontal al impacto, en $t = 2.5$ s, donde se sigue observando que las zonas que presentan mayor esfuerzo son la zona central del puente y la zona al fondo del canal debajo del puente.

Finalmente, en la Figura 7(d), que muestra una vista detrás del puente a un $t = 2.5$ s, no se observa esfuerzos significantes detrás de la estructura, tal como era de esperarse, ya que es la zona donde la corriente de agua no la impacta de frente.

Caso 2

En la Figura 8, se muestra la evolución, en 4 momentos, del impacto entre la masa de fluido y la estructura, la barra de colores indica la velocidad del fluido. En este caso, los resultados se muestran posterior a un renderizado realizado por un complemento extra del código DualSPHysics, con el objetivo de hacer la visualización más atractiva.

En la Figura 9, se presenta el campo de esfuerzos para este caso de estudio. En esta imagen se muestra el momento correspondiente a la Figura 8(c), donde la interacción de la masa de

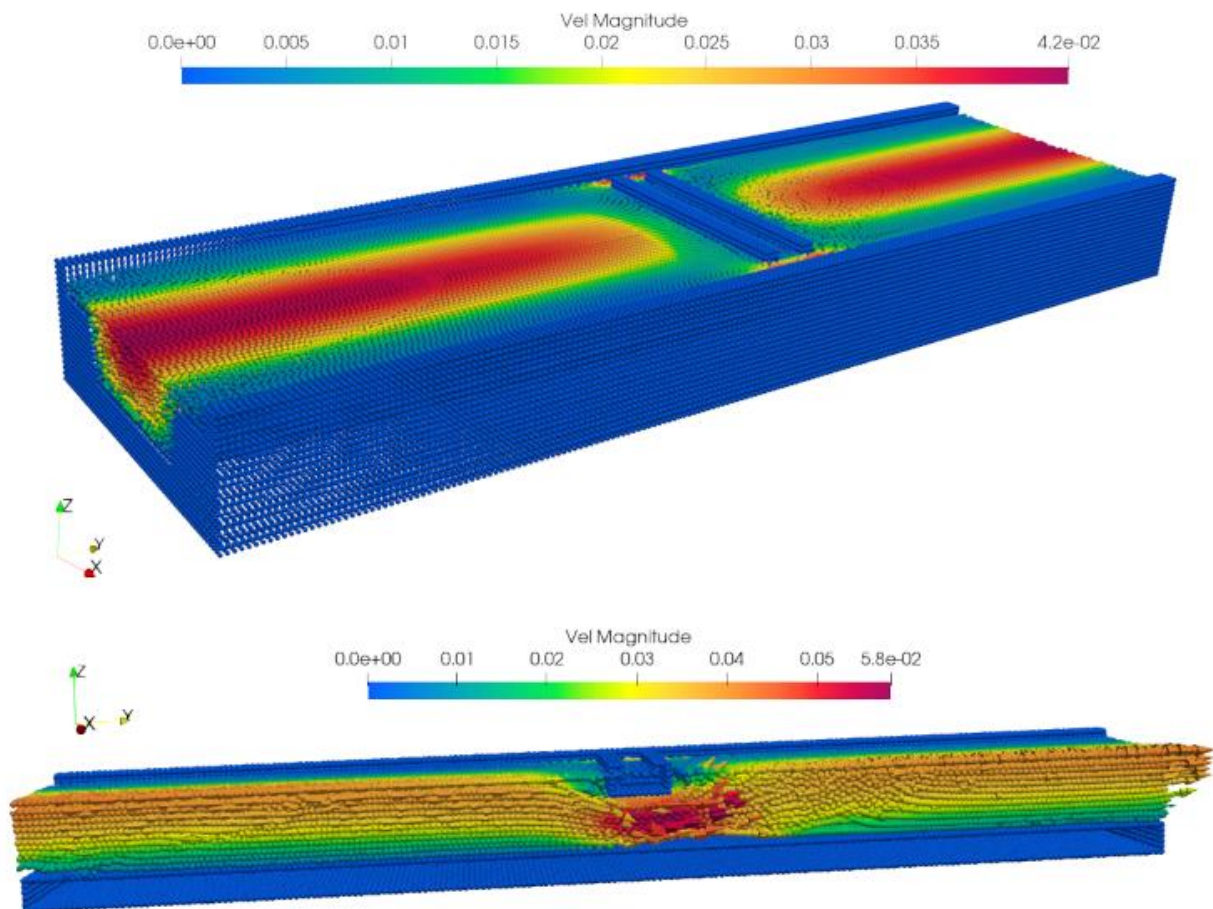


Figura 6. Campo de velocidades del flujo de agua que atraviesa una estructura sólida parecida a la de un puente (arriba). Corte longitudinal a la mitad del ancho del sistema que muestra el campo de velocidades en el interior del canal. Las barras de colores indican la magnitud de la velocidad en m/s.

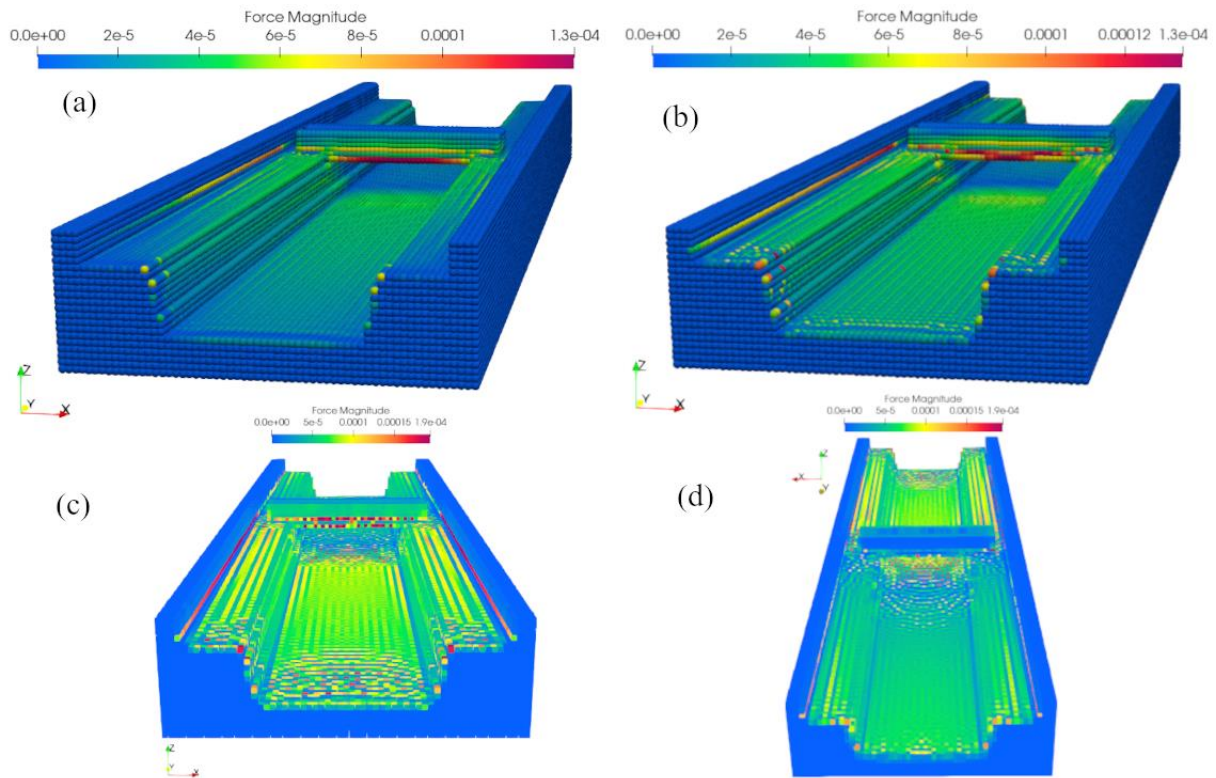


Figura 7. Campo de esfuerzos provocados por el flujo de agua. (a) Campo de esfuerzo a un $t = 0.6$ s. (b) Campo de esfuerzo a un $t = 0.8$ s. (c) Campo de esfuerzo a un $t = 2.5$ s, vista frontal al impacto del flujo al puente. (d) Campo de esfuerzo a un $t = 2.5$ s, vista trasera al impacto del flujo al puente.

agua con la estructura sólida se muestra a la izquierda de la figura, mientras que el campo de esfuerzos que experimenta el edificio se coloca en el lado derecho de la figura para facilitar su análisis, la barra de colores indica la magnitud de la fuerza, evidenciando las zonas más vulnerables.

El código DualSPHysics, puede utilizar cualquier geometría (3D o 2D) sin importar la complejidad geométrica que pueda presentar, por lo tanto, es una herramienta importante para analizar la interacción de un flujo con cualquier estructura ingenieril de interés.

Estos casos de estudio arbitrarios pueden convertirse en casos de estudio específicos a estructuras civiles de interés. Por ejemplo, el estado de Guerrero es una zona de peligro latente por fenómenos hidrometeorológicos, principalmente por desbordamientos de ríos que llegan a

afectar gravemente la infraestructura que se encuentra a su paso, principalmente puentes.

También, por pertenecer a una zona de alta sismicidad, es necesario fortalecer la cultura de prevención por amenaza de tsunamis. Uno de los objetivos de este trabajo es exhortar a los responsables de construcción de dichas obras, en considerar un diseño estructural que permita resistir esfuerzos ocasionados por flujo de fluidos que golpean de forma lateral a un puente u otra obra ingenieril. Que el campo de esfuerzos que resulten de estudios similares a este, permita reforzar esas zonas o de modificar el diseño, de manera que se mitiguen o eliminen los probables daños materiales. El código DualSPHysics tiene la posibilidad de ejecutar simulaciones de impacto de oleaje sobre estructuras de cualquier tamaño, lo que permitirá analizar los posibles

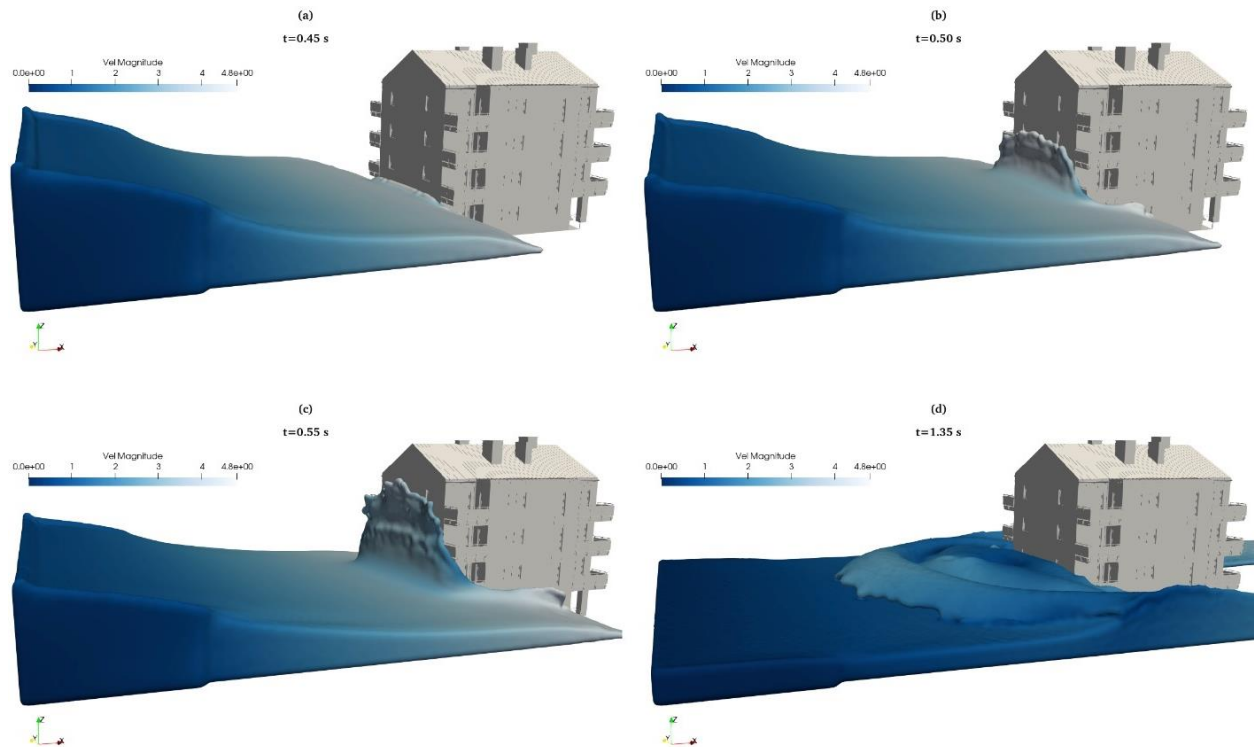


Figura 8. Campo de velocidades por el flujo de la masa de fluido que impacta sobre el edificio de viviendas. Sobre cada imagen se observa la barra de colores que indica la magnitud de la velocidad, así como el instante de tiempo.

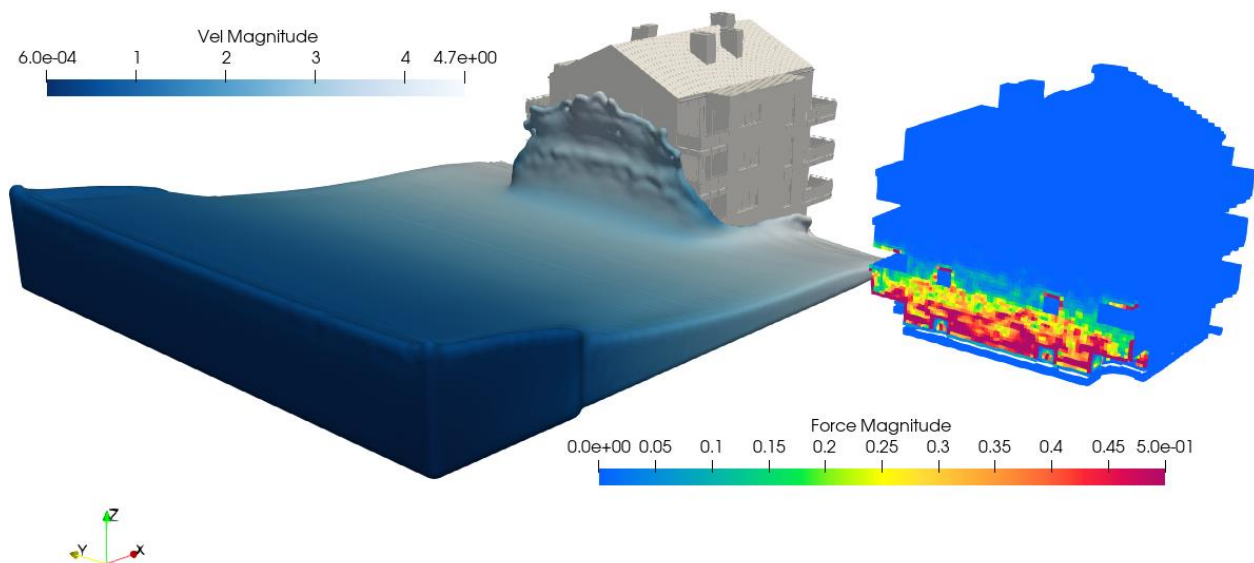


Figura 9. Interacción de una masa de agua con un edificio de viviendas. (Izquierda) Imagen renderizada del choque de la masa de agua contra la estructura sólida, la barra de colores indica la magnitud de la velocidad. (Derecha) Campo de esfuerzos que experimenta la estructura sólida debido al impacto de la masa de agua en el instante que se muestra a su izquierda, la barra de colores indica la magnitud de la fuerza.

riesgos de daños a edificios u otras obras ingenieriles de interés. Se debe buscar fortalecer la cultura de prevención, y el CFD puede ser un aliado para mitigar daños a la infraestructura debido a fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos como un tsunami. Se planea a trabajo futuro retomar algunos casos de estudio de estructuras civiles específicos que existen en las ciudades del estado de Guerrero, y a través de la técnica CFD contribuir a un análisis de diseño estructural que permitirá garantizar que estas estructuras sigan funcionando adecuadamente.

Conclusiones

Se realizaron simulaciones computacionales de dinámica de fluidos utilizando el método SPH, logrando mostrar satisfactoriamente la utilidad del CFD para poner a prueba, previo a la construcción, cualquier diseño estructural bajo una corriente de agua, y así vislumbrar el campo de esfuerzos que experimentará la obra ingenieril. Así se obtiene un soporte técnico para reforzar zonas de la infraestructura que experimentarán mayor esfuerzo, con la posibilidad de prevenir daños estructurales derivados de un mal diseño.

Finalmente, se exhorta a los responsables de construcción de obras ingenieriles que consideren al CFD como aliado para prevenir y mitigar daños a puentes y edificios que pudiesen estar en riesgo latente debido a fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos como un tsunami.

Agradecimientos

Lamberto Díaz Damacillo, agradece al CONAHCYT por el apoyo financiero a través del programa “Estancias Posdoctorales por México” (I1200/320/2022). Becario de investigación postdoctoral comisionado a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Así mismo, agradece a Raúl Alejandro Pachuca Castro del Colegio Carrillo Cárdenas de Chilapa de Álvarez, Guerrero por compartir su experiencia en el uso del software Blender y por la construcción del modelo 3D de la Figura 4.

Referencias

Almonte-Pilco, N., De la Cruz-Vega, S. (2022). Evaluación y diseño de protección frente a la

socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca-Puno. *Llamkasun*, 3,74-78.
<https://doi.org/10.47797/llamkasun.v3i1.85>

Becker, M., Teschner, M. (2007). Weakly compressible SPH for free surface flows. *In: Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Europhysics Symposium on Computer Animation*, San Diego, CA, USA, 2-4 August 2007; Metaxas, D., Popovic, J. (Eds.), 1-8.

[2007_SCA_SPH.pdf](#)

CENAPRED (2020). A 7 años del extraordinario fenómeno hidrometeorológico Ingrid y Manuel. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/a-7-anos-del-extraordinario-fenomeno-hidrometeorologico-ingrid-y-manuel?idiom=es>

Dehnen, W., Aly, H. (2012). Improving convergence in smoothed particle hydrodynamics simulations without pairing instability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1068-1082.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21439.x>

Domínguez, J.M., Fourtakas, G., Altomare, C., Canelas, R.B., Tafuni, A., García-Feal, O., Martínez-Estévez, I., Mokos, A., Vacondio, R., Crespo, A J.C., Rogers, B.D., Stansby, P.K., Gómez-Gesteira, M. (2021). DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*.

<https://doi.org/10.1007/s40571-021-00404-2>

Gingold, R.A., Monaghan, J.J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375-389.

<https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>

Lucy, L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, 82, 1013.

<https://doi.org/10.1086/112164>

Majtan, E., Cunningham, L.S., Rogers, B.D. (2023). Numerical study on the structural response of a masonry arch bridge subject to flood flow and debris impact. *Structures*, 48, 782-797.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.100>

- Monaghan, J.J. (2005). Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*, 68, 1703-1759.
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/r01>
- Pringgana, G., Cunningham, L.S., Rogers, B.D. (2021). Influence of orientation and arrangement of structures on tsunami impact forces: Numerical investigation with smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 147.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000629](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000629)
- Setyandito, O., Alexander Michael, R.D., Juliastuti, Andrew, J.P., Wijayanti, Y. (2020). The effect of bridge abutment shape variation toward flow velocity characteristic. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 426, 012035.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012035>
- SMN (s.f.). Información Histórica. Servicio Meteorológico Nacional.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Wikipedia (2024). Computational fluid dynamics. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Computational_fluid_dynamics&oldid=1197537170
- Yang, Y., Shao, J. (2020). Numerical simulation of fluid–structure interaction with SPH method. *Journal of Engineering (Stevenage, England)*, 2020, 958-965.
<https://doi.org/10.1049/joe.2020.0053>