



Trabajo Final de Master "Master en Ingeniería Energética" 2017-2018

Simulación numérica de la formación de olas estacionarias en tanques de agua

Javier Contreras Espada, Jesús Fernandez Oro
Universidad de Oviedo
Departamento de Energía
Área de Mecánica de Fluidos
Edificio Departamental Este (Gijón)
Correo-e: javice87@hotmail.com

Abstract. *A number of regional coastal hotspots have naturally breaking surf waves, but wave heights and breaking processes depend on various boundary conditions like seabed geometry, beach formation and swell direction. Since the optimum combination of these conditions is rare in time and place, the formation of surfable waves cannot be guaranteed. In addition, the sport's popularity is currently rising even in inland regions, and with it the interest in generating artificial surf waves in rivers or technical constructions to provide surfable waves at any time and place. The objective of this research is finding out the optimum geometry and boundary conditions for this two cases. In the first case, the fluid particle moves in vertical and longitudinal direction, which generates a hydraulic jump that allows surfing activity. In the second case the fluid particle moves in all directions and the objective is the generation of a tube. The modeling of waves in a pool is accomplished using the VOF method. The research concludes with the simulation of two different artificial wave profiles that present good surfing conditions.*

Keywords: Artificial stationary surf wave, breaking wave, numerical model, Wave CFD, wave tube generation, VOF

1 Introducción

Durante muchos años, la rotura de olas ha sido foco de atención de la investigación hidráulica ya sea sobre la hidráulica de la ola (e.g. Le Mehauté and Koh 1967, Marchal 1988) como sobre el desarrollo de códigos numéricos (e.g. Arts 1994, Shao 2006, Cienfuegos et al. 2010). Hay muchas zonas de costa donde la rotura de olas es un fenómeno natural y otras donde se ha alterado ligeramente el medio para variar la formación de ola. Cada día más y más gente se aficiona a uno de los deportes acuáticos de mayor práctica en el mundo, el surf. La práctica de este deporte viene supeditada a las condiciones de las que se dispone. Hay zonas de costa que presentan olas ideales para esta práctica deportiva, como pueden ser Pipeline (Hawaii) o Bells Beach (Australia). También tenemos olas de reconocido prestigio mundial en

España como son Rodiles (Asturias) o Mundaka (País Vasco). No siempre se tienen las mejores condiciones para la práctica de surf ya que depende de muchos factores como son, la altura de la ola, la rotura, la inclinación, mareas o periodo, entre otras. A eso hay que sumarle que no todas las localizaciones geográficas disponen de una zona de costa con olas a una distancia que merezca la pena recorrer. Es por ello que desde hace años se estudia cómo crear olas artificiales estacionarias que pudieran satisfacer esa necesidad de práctica deportiva en zonas de difícil acceso o es instalaciones preparadas para el aprendizaje o perfeccionamiento.

Hornung y Killen (1976) crearon en su laboratorio una ola estacionaria que le permitió estudiar las diferentes formas de tabla de surf. Ravazzini (2009) desarrolló una ola por medio de un modelo numérico. En ambos casos se creó la ola por medio de la



colocación de un obstáculo ubicado en un canal que permitía redirigir el fluido. La idea es generar un resalto hidráulico desde un flujo subcrítico a supercrítico, el cual se redirige a través del obstáculo aguas abajo a una zona de flujo subcrítico. El modelo numérico no es tan fiable como el ensayo experimental, pero con el tiempo la tecnología a avanzado lo suficiente como para dar una versión más que aceptable del diseño final. Permite estudiar no solo la evolución del fluido, sino sus fuerzas, caudal, espesor, y de esta manera poder tener una versión muy fiable del diseño final que se deberá realizar en una instalación.

del llamado tubo, lo que genera una ola de características similares a las que se pueden encontrar en una zona costera.



Figura 1 - Ola estacionaria en el Río Eisbach en Munich



Figura 2 - Ola estacionaria artificial de la empresa CityWave, Alemania

En la Figura 1 y 2 se observa la generación de dicho resalto hidráulico sobre el que se puede realizar la práctica de surf. En este caso partícula del fluido podríamos considerar que solo se mueve en dos direcciones (vertical y longitudinal) al contrario que en la ola de la Figura 3, donde vemos una instalación que crea una ola artificial por medio de impulsar agua sobre una obstáculo. El fluido en dicha instalación se mueve en todas direcciones permitiendo la formación



Figura 3 - Ola artificial estacionaria formando tubo

2 Diseño y preparación de la Simulación

2.1 Diseño de los modelos de estudio

La primera geometría representa un canal con un obstáculo a mitad y una abertura a modo de desagüe en el lateral. El obstáculo es totalmente perpendicular al canal lo que hace que el fluido se comporte como de manera muy parecida al Río Eisbach de Munich, donde se forma un resalto hidráulico que permite a quien lo desea, la práctica de surf (Figura 1). El resultado sería una geometría parecida a la de la Figura 2.

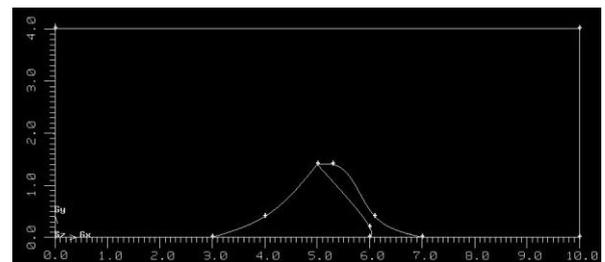


Figura 4 - Vista x-y de la Geometría 1

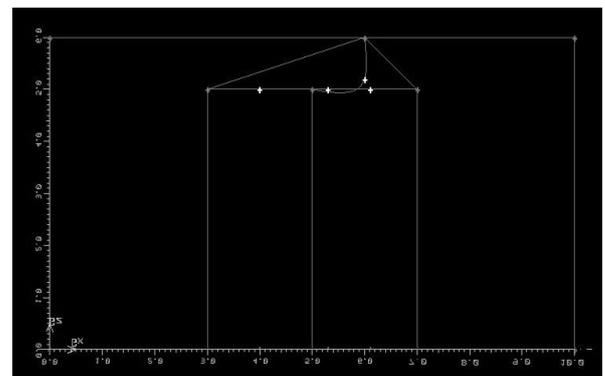


Figura 5 - Vista x-z de la Geometría 1

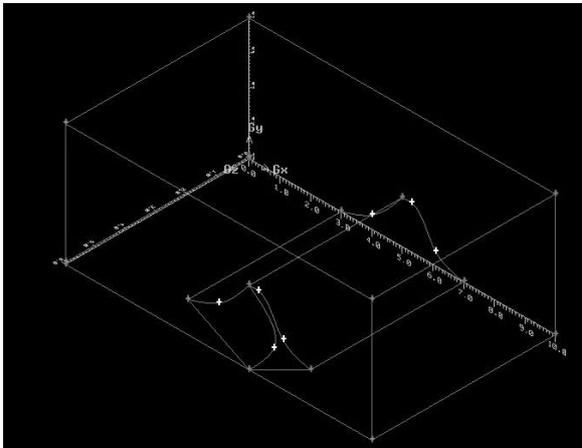


Figura 6 - Vista isométrica de la Geometría 1

El canal de estudio de la geometría 1 tiene una longitud de 10 metros, una anchura de 6 metros y una altura de 4 metros (Figura 6). Desde $x=3$ hasta $x=7$ hay un obstáculo que crece siguiendo una curva hasta llegar a su altura máxima de 1,4 metros en el punto $x=5$ (Figura 4). Este obstáculo no abarca la anchura total del canal pues solo estará de $z=0$ a $z=5$, dejando así 1 metro a modo de desagüe para evitar la posible acumulación de agua.

La segunda geometría posee también un obstáculo, pero este no presenta simetría de ningún tipo. El obstáculo cruza en diagonal el canal y tiene forma de cresta. La curvatura de dicha cresta es más pronunciada que en el caso anterior de forma que pueda formar “el tubo” de la ola a simular (Figura 3).

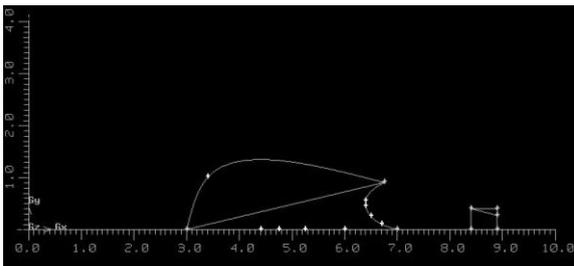


Figura 7 - Vista x-y de la Geometría 2

El canal de estudio de la geometría 2 tiene una longitud de 8.9 metros y una anchura y altura irregulares (Figura 7).

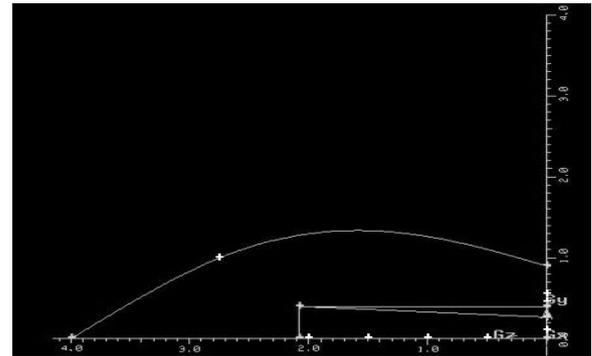


Figura 8 - Vista y-z de la Geometría 2

El obstáculo que formará la ola tiene 1'3 metros de altura en su punto máximo. Comienza en $x=7$ y la curva finaliza en $x=3$. En el primer contacto del flujo con el obstáculo se produce en $z=0$ metros y el último punto se da en $z=4$ metros (Figura 9).

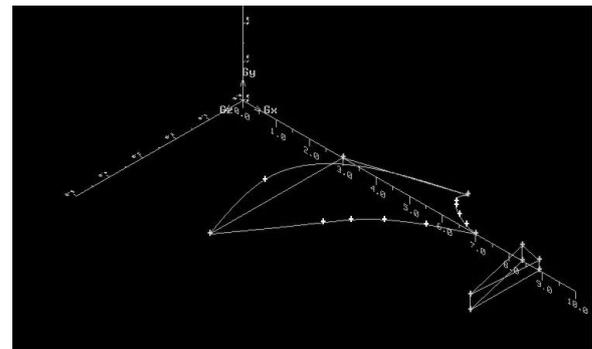


Figura 9 - Vista isométrica de la Geometría 2

La zona de entrada de agua posee cierta inclinación con respecto al eje z (Figura 9), midiendo algo más de 2 metros de largo por 0,4 metros de alto.

2.2 Modelo numérico

El software Fluent 6.3.26 ha sido el elegido para la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes. El modelo numérico a usar está basado en el método Volume-of-fluid (VOF) que permite simular superficies libres de un fluido (Hirt and Nichols 1981).

El modelo a usar para la resolución es el modelo Volume-of-Fluids (VOF). En este caso es el más adecuado puesto que está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interfaz entre los fluidos es de interés

La formulación VOF en Fluent se usa generalmente para el cálculo de una solución en función del tiempo, aunque como en este caso, también puede realizarse un cálculo en estado estacionario. El cálculo en estado estacionario será interesante tan solo cuando la



solución sea independiente de las condiciones iniciales y cuando hay condiciones de contorno de entrada de flujo diferente para cada una de las fases. Esta formulación se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no son interpenetrantes. Para cada fase adicional que se agrega al modelo, se introduce una nueva variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones en volumen de todas las fases suman la unidad. Los campos para todas las variables y las propiedades son compartidos por las fases y representan valores de volumen promediado, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases que sea conocido en cada ubicación. Por lo tanto las variables y propiedades en cualquier celda dada son o bien puramente representativo de una de las fases, o el representante de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de fracción de volumen. En otras palabras, si la fracción de volumen del fluido q^{th} en la celda se denota como S_q , entonces las tres condiciones siguientes son posibles:

$S_q = 0$; la celda está vacía del fluido q^{th}

$S_q = 1$; la celda está llena del fluido q^{th}

$0 < S_q < 1$; la celda contiene la interfaz entre el fluido q^{th} y el resto de fluidos.

En función del valor local de S_q las propiedades y valores apropiados serán asignados a cada volumen de control dentro del dominio.

Ecuación de la fracción volumétrica

El seguimiento de la interfaz (s) entre las fases se lleva a cabo por la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una (o más) de las fases. Para la fase de q^{th} esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (S_q \rho_q) + \nabla \cdot (S_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\sigma_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

[Ec. 1]

donde \dot{m}_{qp} es la masa transferida desde la fase q a la fase p y \dot{m}_{pq} es la masa transferida desde la fase p a la fase q .

Por defecto el término S_{σ_q} de la ecuación es cero, pero se puede definir una constante o introducir una función definida por el usuario.

La ecuación de la fracción de volumen no se resolverá para la fase primaria; la fracción de

volumen de la fase primaria se calcula en base a la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n \sigma_q = 1$$

[Ec. 2]

La fracción ecuación de volumen puede ser resuelto, ya sea a través de discretización implícito o explícito.

Solver y esquema implícito

Para la resolución de la simulación se ha usado un Solver basado en la Presión. En este caso, la velocidad es calculada resolviendo una ecuación de presión, que deriva de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. El proceso incluye iteraciones hasta que la solución converja. Además, El modelo VOF no está disponible con el solver basado en la densidad.

Independientemente del método que se emplee para resolver las ecuaciones de gobierno discretizadas, estas deben ser linealizadas para obtener un sistema de ecuaciones para las variables dependientes en cada celda del dominio computacional. Entonces, el sistema de ecuaciones linealizadas es resuelto para obtener los valores de dichas variables dependientes. Dependiendo de la forma en que se linealizen las ecuaciones las ecuaciones, se puede obtener una formulación implícita o explícita del problema.

En este caso se ha trabajado con una formulación implícita, donde, para una variable del problema, el valor desconocido de esta en cada es calculado usando una relación que incluye los valores conocidos de la variable en otras celdas (los cuales no son conocidos a priori). Por tanto, cada incógnita aparecerá en más de una ecuación del sistema, y esas ecuaciones deben ser resueltas simultáneamente para obtener el valor de todas las incógnitas. El gradiente usado para la resolución es Green-Gauss basado en las celdas.

Cuando se utiliza el esquema Implicit para una discretización temporal, Fluent utiliza esquemas estándar de interpolación de diferencias finitas, QUICK, Second Order Upwind y First Order Upwind, y Modified HRIC para obtener los flujos de cara para todas las células, incluidas las que cerca de la interfaz.



$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V$$

[Ec. 3]

Dado que esta ecuación requiere los valores de fracción de volumen en el paso de tiempo actual (en lugar de en el paso anterior, como para el esquema explícito), se resuelve iterativamente una ecuación de transporte escalar estándar para cada una de las fracciones de volumen de la fase secundaria en cada paso de tiempo.

El esquema implícito se puede utilizar para ambos cálculos dependientes del tiempo y de estado estacionario.

Para la discretización de Momentum, Volume Fraction, Turbulent Kinetic Energy y Turbulent Dissipation Rate se ha usado un esquema Second Order Upwind donde los valores de las variables en las caras de las celdas se obtienen empleando una reconstrucción lineal multidimensional. La discretización de la Presión se realiza mediante el esquema Body Forced Weighted, que calcula el valor de la presión en la cara asumiendo que el gradiente de la diferencia entre presión y la fuerza ejercida sobre el cuerpo es constante.

El acoplamiento presión-velocidad se consigue usando el algoritmo de acoplamiento presión-velocidad SIMPLE. El algoritmo SIMPLE emplea una relación entre la velocidad y la correlación de la presión para hacer que se cumpla la conservación de la masa y obtener el campo de presiones.

Para el algoritmo SIMPLE es recomendable, y así se hizo, reducir el factor de relajación del Momentum. En este caso se fijó en 0,25. El resto de factores se dejaron con sus valores preestablecidos.

En cuanto al modelo de turbulencia el caso que estamos planteando transcurre bajo condiciones de flujo turbulento por lo que se ha empleado un modelo k-ε de dos ecuaciones.

Propiedades de los fluidos

Las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte se determinan por la presencia de componentes de las fases en cada volumen de control. En un sistema de dos fases, por ejemplo, si las fases están representadas por los subíndices 1 y 2, y si está siendo rastreado la fracción de volumen de la segunda de ellas, la densidad en cada celda está dada por:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1$$

[Ec. 4]

En general para un sistema de n-fases, la fracción de volumen promediada toma la siguiente forma:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q$$

[Ec. 5]

Todas las demás propiedades se calculan de esa manera.

Ecuación de momento.

Una sola ecuación de Momentum se resuelve en todo el dominio, y el campo de velocidad resultante se comparte entre las fases. La ecuación, se muestra a continuación, es dependiente de las fracciones en volumen de todas las fases a través de las propiedades ρ y μ.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Una limitación es que en los casos en los que existen grandes diferencias de velocidad entre las fases, la exactitud de las velocidades calculadas cerca de la interfaz puede verse afectada negativamente.

Hay que tener en cuenta que si el ratio de la viscosidad es más de 1000, esto puede llevar a dificultades de convergencia. El esquema de la captura de interfaz de compresión para mallas arbitrarias (CICSAM) es adecuado para flujos con altas proporciones de viscosidades entre las fases, resolviendo así el problema de la mala convergencia.

2.3 Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno son condiciones aplicadas en los límites o frontera del dominio computacional, son necesarias para poder cerrar el sistema de ecuaciones de gobierno y resolver el problema en cuestión.

Para este caso se ha definido la velocidad de entrada como 10 m/s para la geometría 1 y 9 m/s para la geometría 2. En la entrada se ha definido en ambos caso un 100% de entrada de agua al igual que en la salida se establece que puede salir agua pero no entrar estableciendo el **Backflow Volume Fraction**



como 1 para el aire, o sea 0 para el agua. También se ha fijado la fracción de volumen de aire como 1 al inicializar para partir de un punto de cero agua en la zona de estudio.

Las zonas de pared, que son todas las que no representan entrada o salida de agua quedan dejadas con valores por defecto a excepción de la rugosidad que se establece en una micra.

2.4 Función personalizada, criterios de convergencia y monitores.

Mientras resuelve las ecuaciones de forma iterativa, se ha ordenado a FLUENT que muestre en pantalla un valor de residuo asociado a cada ecuación de gobierno del flujo así se ve si la solución actual cumple las ecuaciones de gobierno discretizadas. También creamos una función que sea el producto de la componente y de la velocidad por la densidad del agua y por la fracción de volumen del agua.

Después se ha activado una ventana de monitorización fijando el valor 1 en Surface Monitors. Se ha establecido Plot y Print para ir viéndolo on-line cada Iteración y definido que queremos monitorizar la función que se ha creado para calcular el flujo de salida sobre la **Surface salida**.

Con esto se puede controlar en que momento la simulación alcanza un equilibrio definitivo entre el flujo de entrada y el de salida.

De esta forma el modelo está preparado para iterar y resolver la simulación.

3 Resultados

3.1 Geometría 1

En primer lugar se realizó una primera simulación en 2D sobre la misma geometría para obtener una idea de la evolución del fluido y de las velocidades del mismo sobre las que se debía trabajar. Una vez que se obtuvo un resultado positivo se comenzaron las simulaciones en 3D. El modelo a simular hay un total de 389688 celdas. El tamaño de arista de cada celda es de 15 cm.

Aun partiendo de la información obtenida con la simulación previa en 2D, se realizaron varias simulaciones con diferentes velocidades de flujo y diferentes diseños del obstáculo intermedio. Finalmente se logró encontrar la velocidad y geometría óptimas.

En la gráfica que representa la función de flujo antes introducida (Figura 10), se puede ver como en torno a

las 750 iteraciones el agua alcanza la zona de salida pero la evacuación de agua supera con creces la cantidad de agua entrante puesto que llega casi a 5 metros cúbicos, superando en casi un 50% la cantidad de agua que entra, esto se debe a que en un primer momento el fluido debido a la resistencia que ejerce sobre él el obstáculo, se acumula ligeramente y cuando por fin supera el obstáculo hay una cantidad superior a la normal de agua que liberar, pero finalmente el flujo saliente se estabiliza en torno a 3,5 metros cúbicos de agua por segundo, que coincide con la cantidad de agua entrante al canal.

Esto nos indica que después de alrededor de 4000 iteraciones, la simulación ha llegado a un punto estacionario.

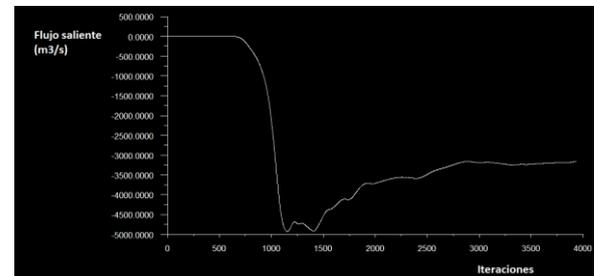


Figura 10 - Evolución flujo saliente

También se puede observar la evolución del residuo de la continuidad (Figura 11).

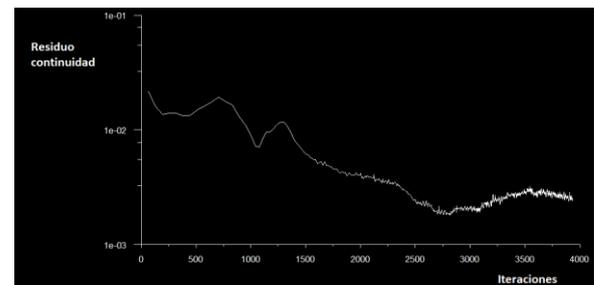


Figura 11 - Evolución Residuo de la continuidad

Visto esto, ya se pueden analizar los resultados de la simulación, donde se aprecia claramente (Figura 12) como el fluido sobrepasa sin problema el obstáculo, pero al mismo tiempo nos desborda con demasiada fuerza no desprendiéndose demasiado de la superficie de la geometría.

Además se aprecia claramente como no se acumula demasiada agua en la primera parte del canal, lo que dificultaría la correcta práctica deportiva del surf.

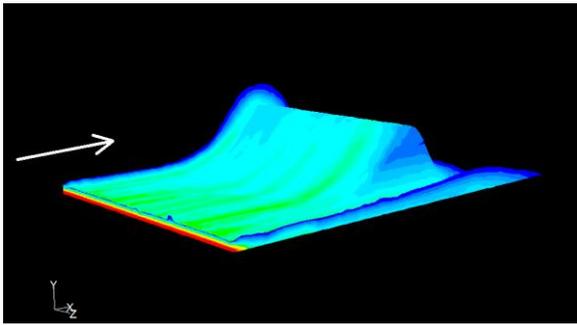


Figura 12 - CFD de la Geometría 1

De cara a un estudio experimental podría reducirse la cantidad de agua. Es a tener en cuenta que en la simulación el 100% del fluido saliente es agua. A nivel experimental podría reducirse tanto la cantidad de agua como el porcentaje del mismo, lo que permitiría un ahorro energético en cuando a las bombas necesarias para el aporte de caudal.

3.1 Geometría 2

En el caso de la segunda geometría se ha trabajado buscando la formación de una ola con unas características óptimas. Esto implica no solo diseñar una geometría y obtener un caudal que permita la correcta práctica de surf sino lograr la formación de una ola que genere un tubo que asemeje el que se forma en la naturaleza.

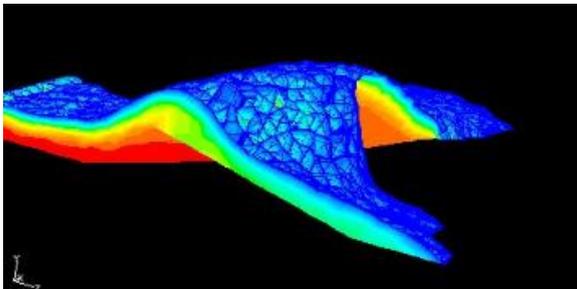


Figura 13 - Desbordamiento del flujo sobre la cresta

En la Figura 13 se observa como la geometría del obstáculo utilizado no posee las características necesarias para la correcta formación de la ola, y con una velocidad de flujo no lo suficientemente alta como para generar un tubo, ya provoca un desbordamiento claramente visible en la imagen. Esta geometría es de las primeras que se realizó. Más adelante se puede ver los resultados de la geometría definitiva para diferentes velocidades de flujo a la entrada. A continuación se puede ver un resumen de las simulaciones realizadas con la geometría definitiva en donde se ve el resultado de la simulación no solo con la velocidad óptima, sino también con un estancamiento provocado por falta de velocidad y un desbordamiento debido a un exceso.

Estancamiento

Para esta simulación se estableció en las condiciones de contorno una velocidad de flujo de entrada de 4 m/s. En la Figura 14 se observa la evolución del flujo de salida. Así mismo en la Figura 15 se observa la evolución del residuo de la simulación. Para la realización de esta simulación se realizó un mallado con 285314 celdas y 15 cm de arista.

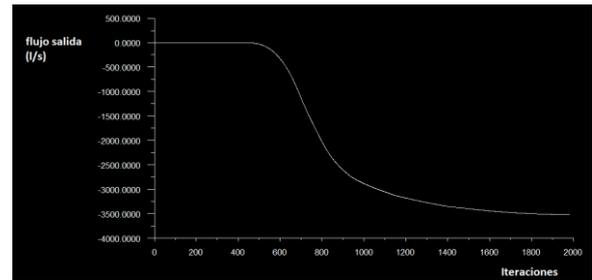


Figura 14 - Evolución flujo de salida en la Geometría 2 con $v = 4$ m/s

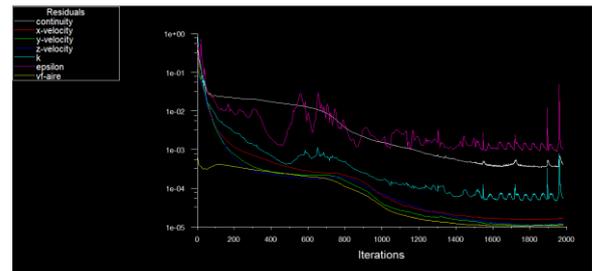


Figura 15 - Evolución del residuo de la Simulación de la Geometría 2 con $v = 4$ m/s

Una vez alcanzado un punto estacionario se puede ver como cuando el sistema alcanza el equilibrio (Figura16) no se ha logrado formar una ola tal y como se deseaba. En su lugar se percibe un resalto hidráulico al borde del obstáculo, dibujado en verde en la imagen. La velocidad es claramente insuficiente y quedó descartada.

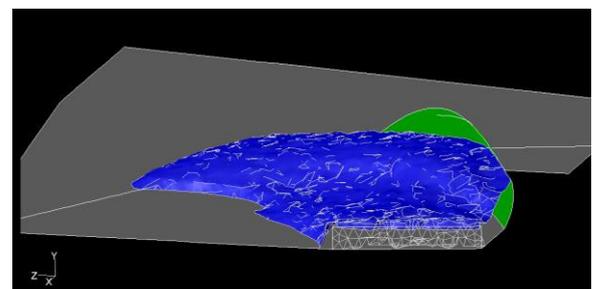


Figura 16 - Estancamiento de agua ante el obstáculo



Desbordamiento

En las Figuras 17 y 18 se observa con claridad el residuo de la simulación y la evolución del flujo de salida de la misma. Al cabo de las 2000 iteraciones aproximadamente se consideró el flujo como estacionario y se procedió a analizar la simulación.

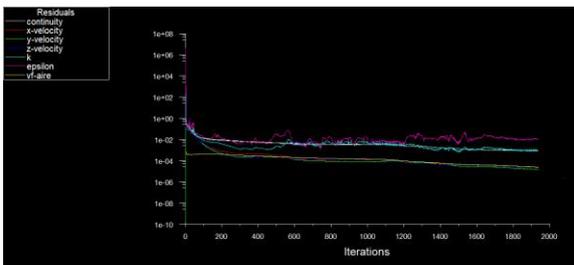


Figura 17 - Evolución del residuo Simulación de la Geometría 2 con $v = 14$ m/s

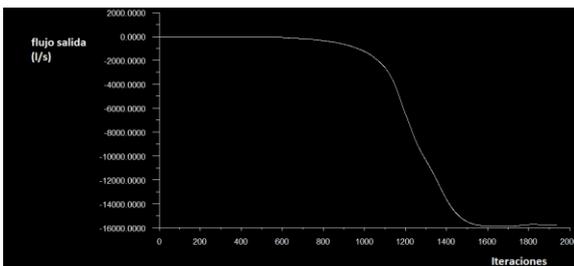


Figura 18 - Evolución flujo de salida en la Geometría 2 con $v = 14$ m/s

En la Figura 19 se ve con claridad como el flujo de agua sale disparado más allá del obstáculo. Claramente la velocidad es excesiva y se descartó puesto que no produce la geometría de ola deseada.

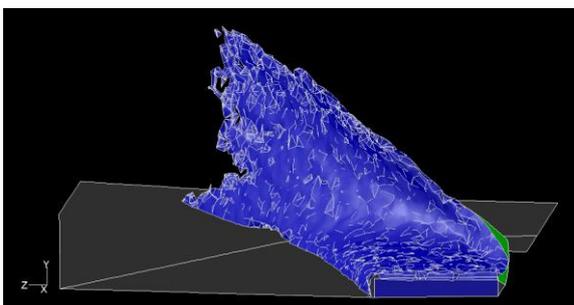


Figura 19 - Resultado de la simulación de la Geometría 2 con $v = 14$ m/s

Para la realización de esta simulación se amplió el escenario dándole algunos metros más de altura puesto que el fluido alcanzaba la parte superior debido a la velocidad que tiene. Es por ello que el número de celdas, que es 366737, creció con respecto al caso anterior. Para que no creciera demasiado y

facilitara los tiempos destinados a simular se amplió el tamaño de arista a 20 cm.

Caso con velocidad óptima

En este caso, una vez que se comprobó que la velocidad era la adecuada se realizó un mallado más fino, el número total de celdas es de 2201584 con un tamaño de arista de 8 cm.

En el caso de un flujo de entrada a 9 m/s se obtuvieron muy buenos resultados. En primer lugar, la evolución de la evacuación del agua (Figura 20) sigue una tendencia bastante suave, lo que tratándose de este tipo olas, es un gran logro.. En este caso el fluido rompe de manera que alcanza con suavidad la zona de descarga. Eso evitará problemas de acumulación de agua en el tanque. También es cierto que solo interesa la situación asintótica final ya que la "evolución" intermedia es matemática, pero con la solución final tan buena que tiene, cabe pensar que esa progresión se acerca a la realidad.

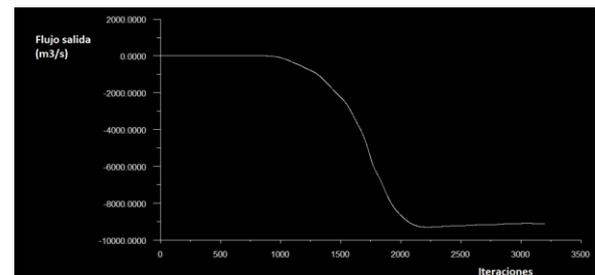


Figura 20 - Evolución del flujo de salida en la Geometría 2 con $v = 9$ m/s

También se observa en la Figura 21 como la evolución del residuo ha sido muy suave por lo que la Simulación se ha realizado correctamente y sin ningún tipo de problema.

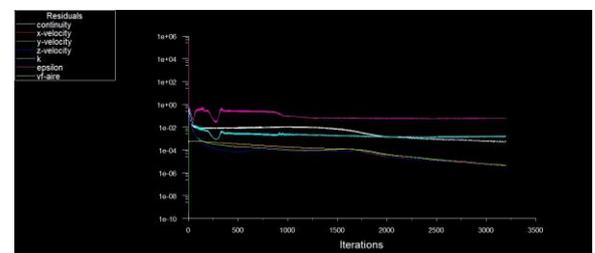


Figura 21 - Evolución residuos de la Simulación de la Geometría 2 con $v = 9$ m/s

Tal y como se comentaba antes, el fluido llega a su destino de una forma bastante "suave" y esto se puede observar con claridad en la Figura 22 donde vemos que no hay puntos de extrema turbulencia. Las únicas zonas donde podemos considerar que la turbulencia es algo mayor es en la salida y justo en el



fin del obstáculo, si bien es cierto que también se aprecia un aumento de turbulencia en la caída de la ola, pero esa zona no es demasiado relevante para este estudio.

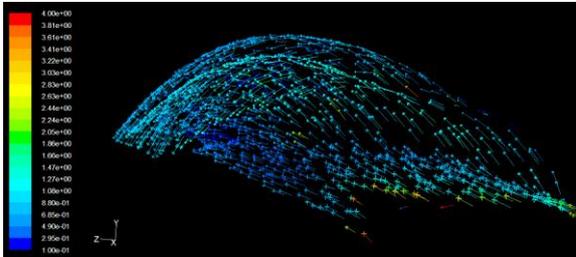


Figura 22 - Vectores de la evolución de la turbulencia en la ola.

El mayor problema que se presentó una vez realizadas las simulaciones fue que el flujo de agua no recorriera correctamente la cresta formando finalmente un tubo de determinadas características..

El flujo requiere de suficiente velocidad para poder formar el tubo, pero sin la geometría de cresta adecuada, corremos el riesgo de que se produzca un desbordamiento como ya se ha visto anteriormente.

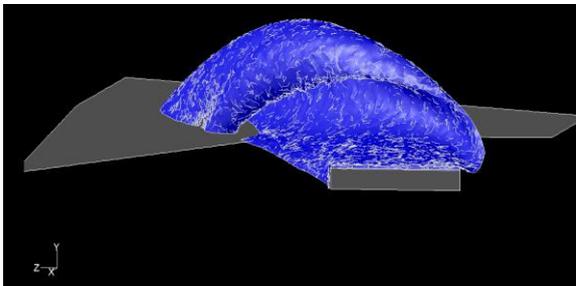


Figura 23 - Resultado estacionario Geometría 2 con $v = 9 \text{ m/s}$

Finalmente se obtuvo el resultado deseado. En las Figuras 23 y 24 se aprecia claramente que no hay ningún tipo de desbordamiento de agua. El tubo formado posee aparentemente buenas características, habiéndose logrado que recorra toda la longitud del obstáculo. Esto supone más de 4 metros de tubo con 1 metro de ancho en su parte inicial.

El caudal de entrada es de aproximadamente 9 metros cúbicos por segundo de agua. A priori es excesivo, pero al igual que en la geometría anterior, es a tener en cuenta que el 100% de la entrada es agua. Claramente ese porcentaje puede reducirse considerablemente.

Además, se ha dispuesto un grosor de agua en la entrada, de cuarenta centímetros. Esto podría reducirse hasta los 5 centímetros. Con 5 centímetros

de grosor por dos metros de largo y teniendo en cuenta que la entrada no tiene un 100% de agua, el consumo de agua bajaría de 0,5 metros cúbicos por segundo.

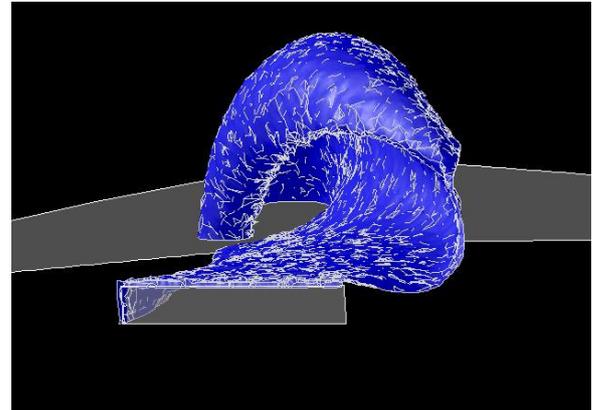


Figura 24 - Imagen del tubo generado por la ola

En la Figura 25 se puede comprobar mediante la silueta que forma el fluido con el suelo de la zona de estudio, que el tubo llega hasta el final. Se ve la silueta generada por el agua al contacto con la pared inferior, demostrándose de esta forma como el tubo formado perdura a lo largo de todo el recorrido.

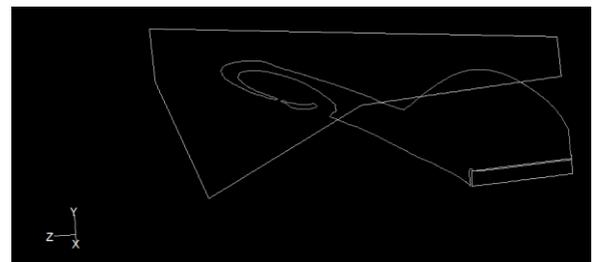


Figura 25 - Silueta del tubo generado por la ola sobre el suelo

En último lugar en la Figura 26 se observa la evolución del fluido en una secuencia de imágenes perpendiculares a la dirección inicial del flujo. Se ha tomado una imagen cada metro y en ella se ve la evolución del agua a partir de un 30% de agua. Se realizó de esta forma porque se consideró que menos de un 30% de agua no es relevante energéticamente para la práctica de surf y por ello esta es la ola a tener en cuenta a la hora del desarrollo de la práctica deportiva.

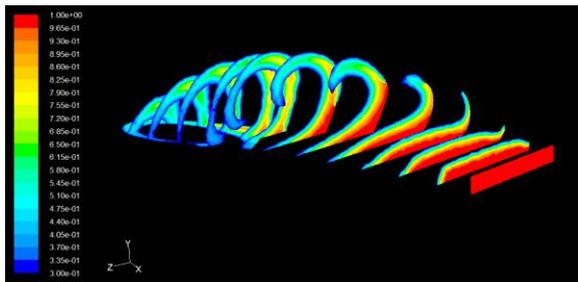


Figura 26 - Evolución secuencial del flujo de agua.

A modo de continuación de proyecto cabría decir que la intención de esta simulación es la de lograr una geometría del obstáculo y una velocidad de flujo óptimas a nivel teórico para luego facilitar el trabajo experimental sin el cual no se puede asegurar al 100% la fiabilidad de esta instalación. Pese a ello, los resultados obtenidos son muy prometedores

4 Conclusión

Se han generado dos resaltos hidráulicos por medio de la resistencia al flujo ejercida por un obstáculo interpuesto a mitad del canal de estudio. En este primer estudio para una entrada de 100% de agua se ha considerado que para la correcta práctica del surf se requiere de una velocidad del flujo de 10 m/s para la primera geometría estudiada y de 9 m/s para la segunda. Para velocidades inferiores, en el primero de los casos no se evacuaría correctamente el agua y la sección de canal previa al obstáculo, se anega de agua. En el caso de tener una velocidad demasiado alta, el agua sobrepasaría el obstáculo con demasiada velocidad y dificultaría la correcta evacuación del agua. En cuanto a la segunda geometría, para velocidades inferiores a la antes mencionada, el flujo de agua no llegaría a formar un tubo sino que se crea una zona de alta turbulencia que no permitiría la práctica deportiva de surf. En caso de exceder demasiado dicha velocidad, se daría un desbordamiento por la parte superior del obstáculo lo que no permitiría la formación del tubo.

La solución encontrada debe ser contrastada con una serie de pruebas experimentales para lograr la versión óptima demostrada experimentalmente. Además dado que la finalidad es la incorporación de este tipo de instalaciones a centros de entretenimiento acuático y escuelas de deportes acuáticos, se deberá hacer un estudio de viabilidad económica.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Doctor Jesús Fernández Oro por aceptar llevar la dirección de este proyecto y por toda la ayuda prestada. Así mismo agradecer al Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica

de Cartagena y en especial al Doctor Juan Pedro Solano Fernández por su colaboración y tiempo.

Referencias

- [1] Antunes do Carmo, J.S., Neves, M.G., Voorde, M. ten (2011). Designing a multifunctional artificial reef: studies on the influence of parameters with most influence in the vertical plane. *J. Coast Conserv.* 15(1), 99–112.
- [2] Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE*, 466–479.
- [3] Cáceres, I., Trung, L.H., Ettinger, von H.D., Reniers, A., Uijttewaal, W. (2010). Wave and flow response to an artificial surf reef: laboratory measurements. *J. Hydraulic Eng.* 136(5), 299–310.
- [4] Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comp. Phys.* 39(1), 201–225.
- [5] Horko, M. (2007). CFD Optimisation of an oscillating water Column Wave Energy Converter. The University of Western Australia. 26–68.
- [6] Le Mehauté, B., Koh, R.C.Y. (1967). On the breaking of waves arriving at an angle to the shore. *J. Hydraulic Res.* 5(1), 67–88.
- [7] Lupieri, G., Contento, G. (2015). Numerical simulations of 2-D steady and unsteady breaking waves. *Ocean Engineering*, 298–316.
- [8] Marchal, J.L.J. (1988). Physical approach of propagation phenomena and action of regular and breaking waves. *J. Hydraulic Res.* 26(1), 159–178.
- [9] Oertel, M., Mönkemöller, J., Schlenkhoff, A. (2012). Artificial stationary breaking surf waves in a physical and numerical model. *J. Hydraulic Res.* 50(3), 338–343.
- [10] Ravazzini, C. (2009). Development of a numerical calculation on a surf-wave (hybrid model). *Proc. Meeting Young Scientists of Hydraulic Institutes, Lausanne*, 187–192.
- [11] Shao, S. (2006). Simulation of breaking wave by SPH method coupled with k-ε-model. *J. Hydraulic Res.* 44(3), 338–349.



- [12] Voorde, M. ten, Antunes do Carmo, J.S., Neves, M.G. (2009). Designing a preliminary multifunctional artificial reef to protect the Portuguese Coast. *J. Coastal Res.* 251, 69–79.
- [13] Zamora, M., Solano, J.P., Herrero, R. (2016) Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio. *UPCT* 46-86