



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Simulación CFD bidimensional de buques con el modelo multifásico VOF y el solver de movimiento de sólidos 6DOF

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Óscar Peña Rodríguez

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

CURSO
ACADÉMICO: 2016-2017

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Simulación CFD bidimensional de buques con el modelo multifásico VOF y el solver de movimiento de sólidos 6DOF

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La modelización numérica de un buque en la mar exige captar los fenómenos de superficie libre y la interacción del buque con la mar. En este trabajo se lleva a cabo la resolución de una serie de problemas académicos relacionados con la flotabilidad y estabilidad de buques mediante el uso del modelo multifásico VOF y el solver de movimiento de sólidos 6DOF. Para ello se hace uso del software comercial Ansys Fluent en su versión académica 17.2. Por motivos de coste computacional se han considerado casos bidimensionales con simetría de traslación.

Para la validación de los resultados numéricos de las simulaciones se ha acudido a dos fuentes de datos experimentales. Por una parte se han realizado una serie de experiencias propias en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Aparatos Auxiliares. Para el estudio de la interacción de un objeto flotante con una secuencia de olas se ha acudido a ensayos externos realizados en canal hidrodinámico y recogidos en la bibliografía.

La utilización de la técnica de la malla superpuesta ha facilitado enormemente la preparación de las simulaciones y los resultados numéricos de ellas están en concordancia con los resultados experimentales.

PALABRAS CLAVE

VOF, CFD, Ansys-Fluent, 6DOF

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar al profesor Antonio por la ayuda prestada para la realización de este trabajo y por su entera disponibilidad durante estas semanas de elaboración del trabajo así como por su tutorización a lo largo de estos 5 años a bordo de la Escuela Naval Militar.

En segundo lugar me gustaría agradecer a mi familia su continuo apoyo durante todos estos años.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Imágenes	3
Índice de Tablas	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Estabilidad, seakeeping y maniobrabilidad	8
1.2 Motivación.....	8
1.3 Recursos	9
1.3.1 Introducción a Ansys	9
1.3.2 Descripción del Gunt HM 150.06.....	10
1.4 Objetivos	14
1.5 Estructura de la memoria.....	14
2 Teoría de CFD aplicada a problemas marinos.....	17
2.1.1 Discretización temporal	18
2.1.2 Discretización espacial.....	18
2.2 Estructura CFD	18
2.2.1 Pre-procesado	18
2.2.2 Procesado	19
2.2.3 Post-procesado.....	19
2.3 Modelo multifásico VOF	19
2.4 Movimiento de sólidos 6DOF	20
2.5 Simplificación bidimensional.....	22
3 Antecedentes.....	23
3.1 Desarrollo de la dinámica de fluidos computacional.....	23
3.2 Trabajos y estudios actuales	23
4 Casos bajo estudio.....	33
4.1 Metodología general de trabajo	33
4.1.1 Introducción a los casos bajo estudio.....	33
4.1.2 Ejecución del caso práctico real	33
4.1.3 Simulación numérica	33
4.1.4 Análisis de resultados.....	34
4.2 Trabajos previos.....	34

5 Demostración del efecto de distribución de presiones.....	35
5.1.1 Introducción.....	35
5.1.2 Experiencia real	36
5.1.3 Desarrollo simulación numérica.....	38
6 Cálculo del periodo de balance y traslados de pesos	49
6.1.1 Introducción.....	49
6.1.2 Experiencia real	51
6.1.3 Simulación numérica	53
7 Efecto de superficie libre.....	57
7.1.1 Introducción.....	57
7.1.2 Experiencia real	58
8 Simulación de un generador de olas	63
8.1.1 Introducción.....	63
8.1.2 Simulación numérica	64
9 Conclusiones y líneas futuras	75
9.1 Conclusiones.....	75
9.2 Líneas futuras	75
10 Bibliografía	77

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1-1 Buque con escora permanente [1]	8
Imagen 1-2 Pantalla principal Ansys workbench	9
Imagen 1-3 Pantalla principal Fluent	10
Imagen 1-4 Gunt HM.150.06	10
Imagen 1-5 Cuerpo flotante.....	11
Imagen 1-6 Marcas de calado	11
Imagen 1-7 Peso móvil vertical	12
Imagen 1-8 Regleta graduada.....	12
Imagen 1-9 Peso Horizontal	13
Imagen 1-10 Regleta graduada horizontal	13
Imagen 1-11 Placa base peso vertical	13
Imagen 1-12 Clinómetro	14
Imagen 2-1 Fracción volumétrica bifásica [1].....	20
Imagen 2-2 Movimiento en 6 grados de libertad (6DOF) [1]	21
Imagen 2-3 Representación 2D [3].....	22
Imagen 3-1 Casco del DTMB 5415 [7].....	24
Imagen 3-2 Resultado velocidad 1 [6]	24
Imagen 3-3 Resultado velocidad 2 [6]	24
Imagen 3-4 Coeficiente de presiones velocidad 1 [6].....	25
Imagen 3-5 Coeficiente de presiones velocidad 2 [6].....	25
Imagen 3-6 Ejemplo de simulación 2D+t: flujo bidimensional en diferentes instantes [8].....	26
Imagen 3-7 Casco [8].....	26
Imagen 3-8 Elevación de la superficie libre sobre el casco [8].....	26
Imagen 3-9 Número de Froude 1 [8]	27
Imagen 3-10 Número de Froude 2 [8]	27
Imagen 3-11 Número de Froude 3 [8]	27
Imagen 3-12 Deformación de superficie libre al entrar el cilindro en agua [9]	28
Imagen 3-13 Campo de presiones y vector velocidad del cilindro en su entrada al agua [9]	29
Imagen 3-14 Comparación situación del cilindro en simulación y experimento [9].....	29
Imagen 3-15 Cilindro saliendo del agua [9].....	30
Imagen 3-16 Generador de olas [9]	31
Imagen 3-17 Simulación de interacción fluido-sólido [9]	31

Imagen 3-18 Comparativa de desplazamiento angular entre experiencia y simulación [9]	31
Imagen 4-1 Desmontaje del Gunt HM 150.06	34
Imagen 4-2 Peso conjunto Gunt HM 150.06.....	34
Imagen 5-1 Principio de Arquímedes [3].....	35
Imagen 5-2 Centro de gravedad y centro de carena [3]	36
Imagen 5-3 Instante inicial	37
Imagen 5-4 Calado popa	38
Imagen 5-5 Calado proa	38
Imagen 5-6 Modelado del Gunt HM.150.06 en 3D.....	39
Imagen 5-7 Modelo cuerpo flotante.....	39
Imagen 5-8 Sub-parte "Moving_in"	40
Imagen 5-9 Sub-parte "mc"	40
Imagen 5-10 Sub-parte "Moving_out".....	41
Imagen 5-11 Background	41
Imagen 5-12 Malla background.....	42
Imagen 5-13 Malla metacrilato.....	42
Imagen 5-14 Malla "moving_in"	43
Imagen 5-15 Malla completa cuerpo flotante.....	43
Imagen 5-16 Modelo VOF	44
Imagen 5-17 Malla superpuesta.....	44
Imagen 5-18 Propiedades 6DOF	45
Imagen 5-19 Centro de gravedad.....	45
Imagen 5-20 Instante inicial	46
Imagen 5-21 Transición	46
Imagen 5-22 Punto equilibrio	46
Imagen 5-23 Fuerza eje vertical	47
Imagen 6-1 Buque visto desde popa [3].....	50
Imagen 6-2 Cálculo del ángulo de escora de forma teórica	51
Imagen 6-3 Instante inicial período de balance	52
Imagen 6-4 Traslado vertical.....	52
Imagen 6-5 Traslado transversal.....	52
Imagen 6-6 Escora final traslados.....	53
Imagen 6-7 Traslado horizontal modelo	53
Imagen 6-8 Centro de gravedad con peso trasladado	54
Imagen 6-9 Simulación traslado de pesos.....	54
Imagen 6-10 Escora final	55

Imagen 7-1 Superficie libre [10].....	57
Imagen 7-2 Efecto superficie libre [10]	58
Imagen 7-3 Medida masa disco	59
Imagen 7-4 Medida masa agua	59
Imagen 7-5 Colocación de peso sólido fijo	59
Imagen 7-6 Escora final peso fijo	60
Imagen 7-7 Sustitución del peso fijo por agua	60
Imagen 7-8 Escora final con superficie libre.....	61
Imagen 8-1 Generador de olas.....	63
Imagen 8-2 Generador de olas [12].	64
Imagen 8-3 Modelo del generador de olas	64
Imagen 8-4 Modelo del Background	65
Imagen 8-5 Cuerpo flotante.....	65
Imagen 8-6 Generador de olas.....	66
Imagen 8-7 Mallado cuerpo flotante.....	66
Imagen 8-8 Mallado generador de olas.....	67
Imagen 8-9 Mallado completo del fondo	67
Imagen 8-10 Mallado zona cambio de fase.....	68
Imagen 8-11 Fracción volumétrica de aire.....	68
Imagen 8-12 Malla superpuesta objeto flotante	69
Imagen 8-13 Malla superpuesta generador de olas.....	69
Imagen 8-14 Patrón de movimiento para generar la ola [11].....	69
Imagen 8-15 6DOF en cuerpo flotante y centro de gravedad	70
Imagen 8-16 Movimiento generador de olas.....	70
Imagen 8-17 Simulación olas cuerpo flotante [12].....	71
Imagen 8-18 Movimiento transversal y vertical [12]	72
Imagen 8-19 Instante 5.5 s	72
Imagen 8-20 Instante 6.5 s	73
Imagen 8-21 Instante 7.0 s	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Características del cuerpo flotante	11
Tabla 1-2 Características peso móvil vertical	12
Tabla 1-3 Características regleta graduada vertical	12
Tabla 1-4 Características peso horizontal	13
Tabla 1-5 Características escala horizontal	13
Tabla 1-6 Características placa base	14
Tabla 10-1 Propiedades Gunt HM 150.06	82

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La búsqueda de mejoras de los buques y embarcaciones en cuanto a estabilidad, maniobrabilidad y, en consecuencia, seguridad, ha sido uno de los puntos con mayor influencia en el campo de la ingeniería naval impulsados por la gran cantidad de accidentes y naufragios a lo largo de la historia.

Los buques son contruidos de formas muy variables, las cuales se seleccionan en base a diferentes necesidades como son disponer de la potencia necesaria para adquirir una cierta velocidad, el tipo de buque y su función, sensores y armamento en el caso de los buques de guerra y la estabilidad necesaria que garantice la seguridad tanto de la plataforma como de los tripulantes y posibles pasajeros en la mar. Es por ello que todos los buques de nueva construcción han de cumplir con unos requisitos mínimos de estabilidad definidos por la OMI (Organización Marítima Internacional) como es un certificado de construcción, relativo a compartimentado y estabilidad recogido en el capítulo II del convenio SOLAS (Safety of Life At Sea) en el apartado B y titulado Compartimentado y estabilidad, entre otros sistemas y equipos de salvamento que no están relacionados con la estabilidad. Todos estos certificados y requisitos mínimos que deben cumplir los buques se denominan criterios de estabilidad.

No todos los buques tendrán las mismas exigencias y necesidades, por lo tanto la diferenciación entre los tipos de buques es uno de los temas de mayor relevancia en la construcción de un buque como se ha nombrado anteriormente. En el caso de los buques de guerra dichos criterios, como es evidente, han de ser mucho más restrictivos que un buque civil debido a que están sometidos al riesgo de tener que soportar grandes influencias que afecten a su flotabilidad y a su estabilidad.



Imagen 1-1 Buque con escora permanente [1]

En el pasado todos los cálculos referentes a estabilidad de un buque eran realizados a mano y era necesaria la realización de una experiencia con el propio buque o con un prototipo a escala. Con la evolución de las nuevas tecnologías así como la evolución en el campo de la mecánica de fluidos se han conseguido numerosos códigos y programas de simulación numérica que permiten obtener con mayor rapidez y un menor coste todas las características de estabilidad de un buque. El número de métodos y modelos desarrollados con el paso de los años utilizados para la simulación numérica es muy elevado y algunos de ellos serán nombrados y utilizados en este trabajo.

1.1 Estabilidad, seakeeping y maniobrabilidad

La estabilidad de un buque puede definirse como la capacidad que tiene el mismo para volver a su posición de equilibrio una vez que ha sido separado de dicha posición por acciones de fuerzas externas o internas. El ámbito del estudio de la estabilidad se considera que el buque está parado y que el efecto que produce la fuerza que hace que el buque pierda su posición de equilibrio no es de grandes magnitudes.

En el estudio de la dinámica de los barcos, tradicionalmente ha sido analizado mediante dos teorías principales, maniobrabilidad y *seakeeping*. La maniobrabilidad hace referencia al movimiento del barco sin el efecto externo de la mar, su estudio se realiza en aguas en calma. Por el contrario, el término *seakeeping*, se refiere al estudio del movimiento de un buque a rumbo y velocidad constante mientras que se ve afectado por el efecto de las olas. No obstante ambos campos tienen objetivos comunes: el estudio de la estabilidad y control pero se diferencian ambos términos para realizar estudios diferenciados. Otra diferencia entre ambos términos es el uso de distintos sistemas de referencia para expresar las ecuaciones de movimiento, mientras que en el término de maniobrabilidad las ecuaciones se describen relativas a un sistema fijo al buque. Por otra parte el *seakeeping* el movimiento se describe relativo a un sistema de coordenadas fijo a un buque virtual que mantendría su posición de equilibrio a rumbo y velocidad constante correspondiente a la media del movimiento del buque real.

1.2 Motivación

En la actualidad el análisis del comportamiento de los buques en la mar mediante la simulación numérica cobra una gran importancia debido a la gran precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. Este trabajo se desarrolla con la iniciativa de conseguir una transición que permita enlazar teoría con la práctica en cuanto a términos académicos se refiere, mostrando una solución a diferentes problemas físicos relacionados con problemas de estabilidad en el caso de este trabajo.

1.3 Recursos

1.3.1 Introducción a Ansys

El software de CAE empleado para la resolución de las simulaciones numéricas de los diferentes problemas que se plantean en este TFG es el Ansys Workbench en su versión académica 17.2. Las posibilidades que presenta este programa son muy elevadas ya que acepta archivos compatibles que se hayan realizado con otros softwares. Además cuenta con una interface intuitiva que facilita el trabajo con el software.

El programa cuenta con varios bloques llamados sistemas que dependerán del campo de aplicación en el que se quiera trabajar. Para el desarrollo de este TFG el sistema utilizado es el Fluid Flow en el que se encuentra integrado el Ansys Fluent. Cada sistema genera un diagrama de flujos el cual representa el conjunto de datos del proyecto, conteniendo cada sistema uno o varios componentes llamados celdas, que representan de manera secuencial los pasos para un determinado tipo de análisis. A su vez, el programa permite trabajar a la vez con varios sistemas y combinarlos entre ellos para compartir información o transmitirla de uno a otro. Las celdas principales para un análisis del sistema nombrado anteriormente, las celdas principales son; geometría, malla, preparación de Fluent, solución, y resultados como se puede ver en la siguiente imagen. Con la combinación de todas las celdas se consigue definir características como dimensiones de la geometría, propiedades de los materiales y condiciones de contorno.

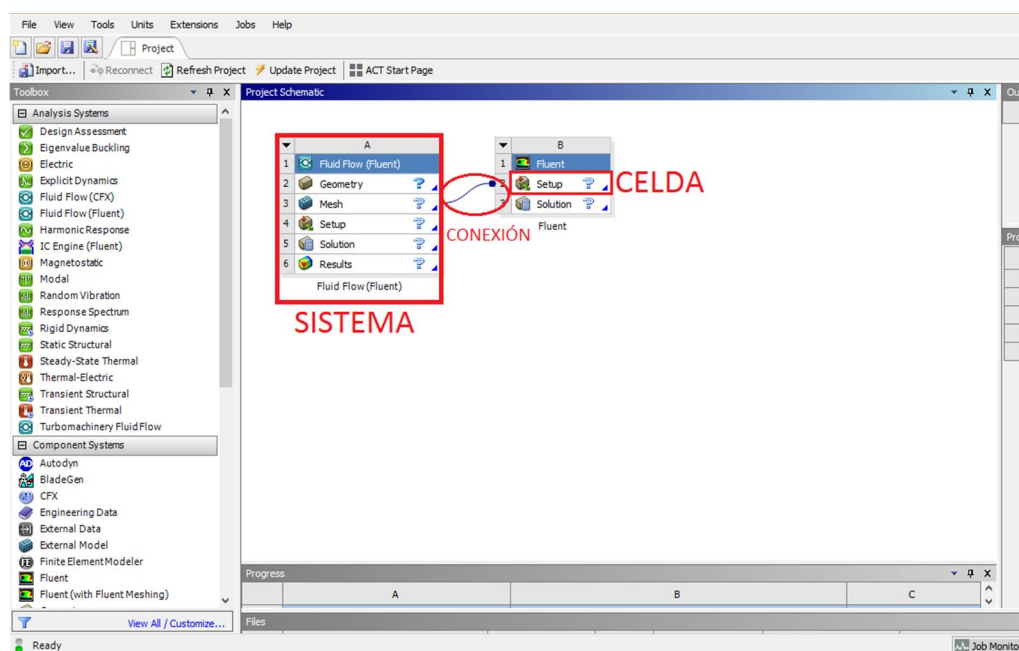


Imagen 1-2 Pantalla principal Ansys workbench

El software Fluent, integrado en el Ansys Workbench, cuenta con un gran número de posibilidades para llevar a cabo las simulaciones. Como se puede ver en la siguiente imagen cuenta con una organización tipo “árbol” en la que se despliegan todas las condiciones y variables a introducir a la simulación tanto antes de realizar el cálculo (Setup), las variables para los cálculos (Solution) y los análisis post-proceso (Results). Los elementos seleccionados para las diferentes simulaciones se explican en más detalles para cada problema a partir del capítulo 4.

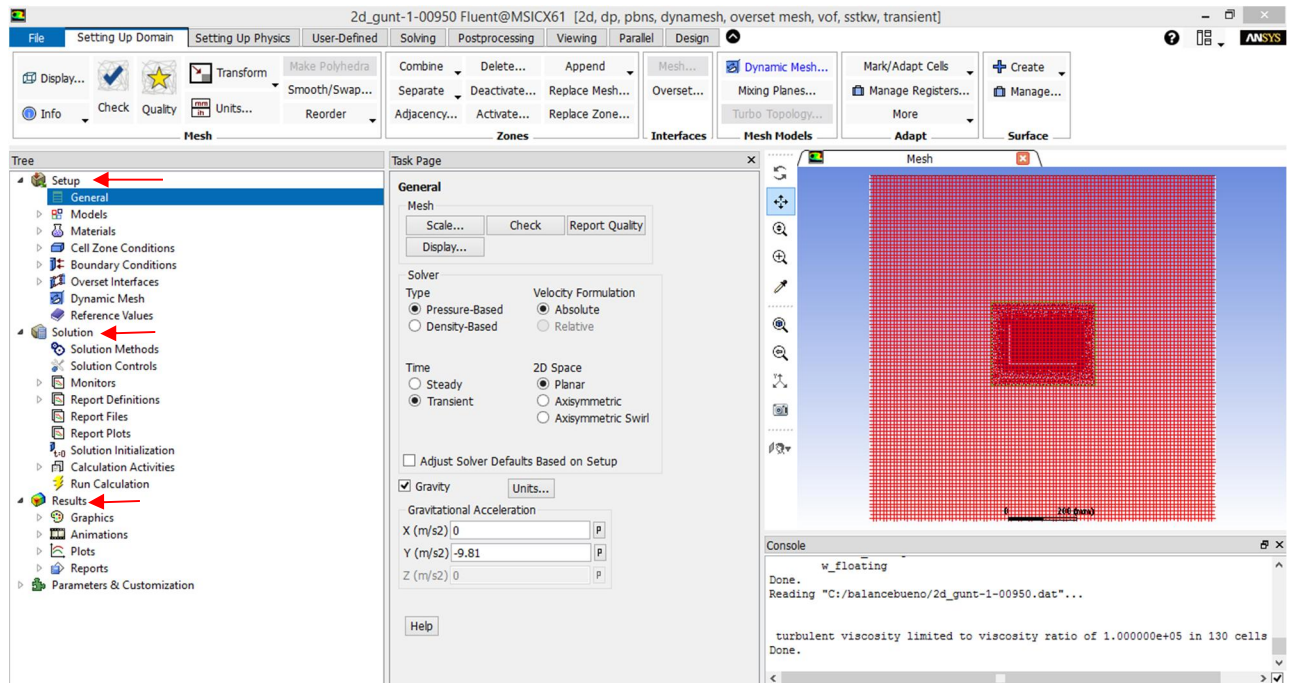


Imagen 1-3 Pantalla principal Fluent

1.3.2 Descripción del Gunt HM 150.06

El objeto empleado en este trabajo tanto para la resolución de las experiencias reales como para las simulaciones numéricas es el Gunt HM 150.06 cuyas propiedades se encuentran en el ANEXO II: PROPIEDADES DEL GUNT HM 150.06 y sus características Se describen a continuación.

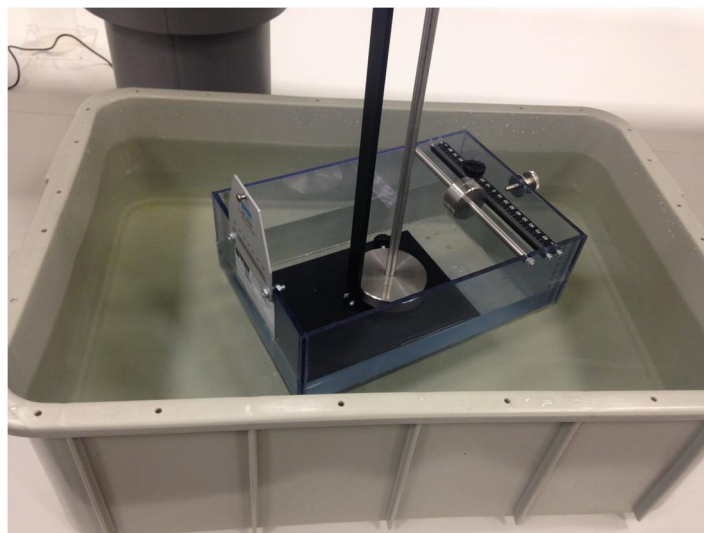


Imagen 1-4 Gunt HM.150.06

• *Cuerpo flotante*

El cuerpo flotante es el elemento principal del Gunt HM 150.06 de forma rectangular que simula el casco de un barco. Está construido de metacrilato y sobre él se sitúan el resto de elementos. En las dos caras que simulan las bandas de babor y estribor de un barco se dispone de una escala graduada para lectura de calados en cada una de ellas.



Imagen 1-5 Cuerpo flotante



Imagen 1-6 Marcas de calado

Eslora	300 mm
Manga	200 mm
Puntal	120 mm
Espesor metacrilato	5 mm
Masa	1.3045 Kg

Tabla 1-1 Características del cuerpo flotante

- *Pesos móviles*

Sobre el cuerpo flotante se montan dos pesos móviles que permiten variar el centro de gravedad del conjunto, uno de apriete vertical que permite simular el efecto de un traslado vertical de pesos y un apriete horizontal de pesos que simula el traslado horizontal. Ambos pesos cuentan con una regleta graduada que permiten medir la distancia que se han trasladado con respecto a su posición inicial y se desplazan sobre dos varillas. La regleta graduada vertical se encuentra fija a una placa que a su vez está fija al fondo del interior del cuerpo flotante. Por otra parte la regleta graduada horizontal se encuentra fija a las caras de babor y estribor del cuerpo flotante.

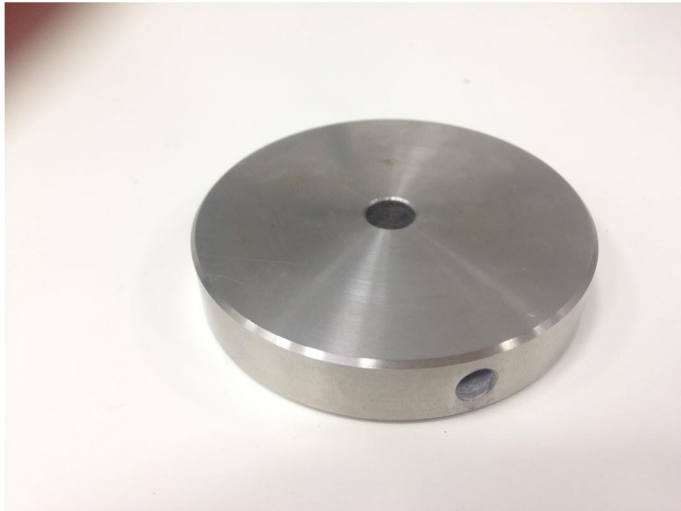


Imagen 1-7 Peso móvil vertical

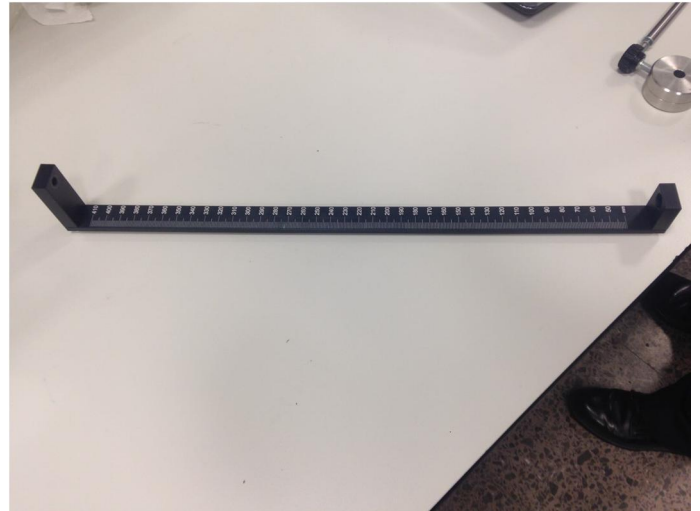


Imagen 1-8 Regleta graduada

Diámetro peso móvil vertical	79 mm
Diámetro agujeros	10 mm
Masa	0.5785 kg

Tabla 1-2 Características peso móvil vertical

Largo	413 mm
Ancho	20 mm
Espesor elemento graduado	5 mm
Altura del tope	10 mm
Largo del tope	52 mm
Altura de la base	10 mm
Largo de la base	30 mm
Masa	0.147 kg

Tabla 1-3 Características regleta graduada vertical



Imagen 1-9 Peso Horizontal



Imagen 1-10 Regleta graduada horizontal

Diámetro	40 mm
Altura	20 mm
Diámetro agujeros	9 mm
Masa	0.196 kg

Tabla 1-4 Características peso horizontal

Largo	190 mm
Ancho	2 mm
Espesor	5 mm
Masas	0.0535 Kg

Tabla 1-5 Características escala horizontal

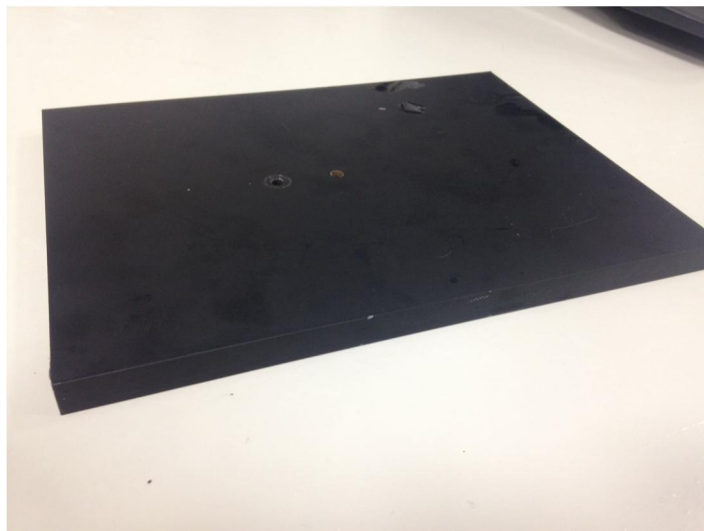


Imagen 1-11 Placa base peso vertical

Largo	200 mm
Ancho	150 mm
Espesor	10 mm
Masa	0.833 kg

Tabla 1-6 Características placa base

- *Clinómetro*

En la parte de que simula la popa del buque se cuenta con un clinómetro que permite medir el ángulo de escora que tiene el conjunto en un determinado instante.



Imagen 1-12 Clinómetro

1.4 Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo son los siguientes:

- El objetivo principal de este trabajo es conseguir simular mediante el software Ansys Fluent diferentes problemas reales relacionados con estabilidad y flotabilidad bidimensionales.
- Como objetivo secundario se intentará resolver los problemas con otra metodología para así comprobar los resultados, ya sea de forma teórica, práctica o ambas.

1.5 Estructura de la memoria

En el apartado Introducción y objetivos, se introduce a la problemática que se pretende resolver en este TFG de una forma general, para continuar con la motivación que ha impulsado a la realización de este trabajo. Se continúa con una descripción de los recursos materiales y softwares utilizados para este trabajo y se finaliza con los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo.

En segundo lugar, en el apartado Teoría de CFD aplicada a problemas marinos se da una explicación del CFD aplicado a problemas de buques interactuando con el agua y la estructura que presenta cualquier cálculo CFD. Se continúa con una explicación del modelo multifásico VOF que es empleado para la resolución de las simulaciones numéricas. Seguidamente se describe el 6DOF que se utilizará en el software de simulación para el movimiento de los sólidos. Y se finaliza con una descripción de la reducción de un problema a 2 dimensiones, ya que las simulaciones serán de este tipo.

En tercer lugar, en el capítulo Antecedentes se hace una reseña histórica de los inicios de CFD, así como de problemas actuales que hayan sido resueltos mediante simulación CFD.

En el apartado Casos bajo estudio se hace una introducción a los casos que se van a estudiar y la metodología general que se pretende seguir para resolver todos ellos. Y los trabajos previos que se han realizado antes de pasar a resolver cada uno de los problemas planteados.

Se continúa con la resolución de cada uno de los casos y la metodología específica que se haya empleado en cada uno así como de la posible problemática que se haya podido encontrar durante la resolución de los mismos.

Para finalizar, en el apartado Conclusiones y líneas futuras se nombran las conclusiones extraídas de la elaboración de este TFG finalizando con la inclusión de posibles líneas futuras que puedan continuar y desarrollar en mayor medida este trabajo.

2 TEORÍA DE CFD APLICADA A PROBLEMAS MARINOS

En los estudios sobre el comportamiento que presenta un buque en la mar y su interacción con la mar es imprescindible conocer las leyes que gobiernan el comportamiento de los fluidos y de qué forma puede afectar al buque. La determinación del comportamiento de un fluido viene definido por las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales y dependientes del tiempo. Las soluciones analíticas para estas ecuaciones solo son posibles para estados de flujos simples. En el caso de regímenes turbulentos es necesario el uso de simulaciones numéricas para conseguir resolver las ecuaciones ya que para estos flujos no existen soluciones analíticas.

Las ecuaciones fundamentales presentes en el comportamiento de un fluido son las relacionadas con las leyes de la conservación de la física: conservación de masa, conservación de la cantidad de movimiento (2ª ley de Newton), y conservación de la energía.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho(v - v_b) n dS &= 0 , \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho v dV + \int_S \rho v(v - v_b) n dS &= \int_S (T - pI) n dS + \int_V \rho b dV , \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho \theta dV + \int_S \rho \theta(v - v_b) n dS &= \int_S \Gamma \nabla \theta n dS + \int_V p b_\theta dV .\end{aligned}$$

Siendo ρ la densidad del fluido, V es el volumen de control generado por una superficie cerrada S , v es el vector velocidad del fluido, v_b es la velocidad de la superficie del volumen de control, t es el tiempo, Γ es el coeficiente de difusión y b_θ es la fuente volumétrica de la conservación de la cantidad de movimiento, p es la presión, b es la fuerza del cuerpo, n es el vector unitario normal a la superficie S y en sentido hacia fuera del cuerpo, I es el tensor unitario y T es la parte viscosa del tensor de fuerza.

CFD (Dinámica de fluidos computacional) es una rama de la mecánica de fluidos cuyo principal objetivo es resolver problemas físicos relacionados con la fluido-dinámica, transferencia de calor o reacciones químicas entre otros. El CFD combina numerosos campos científicos como son las matemáticas, mecánica de fluidos, ingeniería, programación y el cálculo numérico, consiguiendo con

una combinación de todos esos campos un código con el que poder calcular y obtener los resultados de las ecuaciones de flujo.

El código anteriormente nombrado se ejecuta dentro de los diferentes softwares existentes para así conseguir resolver los problemas mediante el cálculo de un ordenador. En la actualidad los avances conseguidos en tecnología y en el desarrollo de ordenadores con una gran capacidad de cálculo así como la evolución de los métodos numéricos han conseguido que la dinámica de fluidos computacional se haya convertido en una herramienta muy práctica y con gran rentabilidad económica para conseguir resolver los diferentes problemas. El CFD constituye un campo muy utilizado actualmente para conseguir proporcionar unos resultados muy fiables con unos costes muy reducidos en comparación con un ensayo con un modelo a escala. Por otra parte, para conseguir una gran precisión en resultados en un periodo de tiempo admisible es indispensable el uso de ordenadores muy potentes, a la vez que buenos softwares. La dinámica de fluidos computacional tiene aplicación en un gran número de campos entre los que se pueden resaltar la hidrodinámica, industria nuclear, automovilística o industria aeroespacial.

Debido a la complejidad de los problemas y las dificultades para resolver las ecuaciones, es necesario conseguir discretizar las ecuaciones diferenciales para el estudio de fluidos en ecuaciones algebraicas. En la dinámica de fluidos computacional se utilizan y resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes o una simplificación de ellas. Para que se puedan obtener los resultados, inicialmente se realiza una discretización temporal y espacial.

2.1.1 Discretización temporal

Las soluciones se calculan en puntos determinados del tiempo (discretos). Esta discretización se lleva a cabo para flujos no estacionarios.

2.1.2 Discretización espacial

La discretización espacial se lleva a cabo tanto para flujos no estacionarios como para flujos estacionarios. Todas las posiciones discretas quedan definidas por la malla numérica, la cual divide el dominio geométrico del problema en varios sub-dominios. Los métodos de discretización más características son el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos.

- Método de diferencias finitas
- Método de volúmenes finitos
- Método de elementos finitos

2.2 Estructura CFD

Todo proceso de dinámica de fluidos computacional sigue una misma estructura básica, con tres elementos primordiales, que son; Pre-procesado, procesamiento y post-procesado.

2.2.1 Pre-procesado

En esta etapa se llevan a cabo la preparación de entrada de datos en un determinado código de resolución. Dichos datos se implementan en un software en varias sub-etapas:

- Definir la geometría;
- Generar un mallado adecuado de los elementos diseñados;

- Concretar los fenómenos físicos que se modelan así como las propiedades físicas del medio;
- Establecimiento de condiciones iniciales y contorno.

2.2.2 Procesado

La etapa del procesado conforma el elemento central del software empleado para la resolución. Los cálculos se efectuarán en el ordenador estando ya implementados en el software los sistemas de ecuaciones necesarios para obtener un determinado resultado con la simulación. El tiempo del proceso de cálculo dependerá de diferentes variables como son las características técnicas del ordenador que efectuará el cálculo como de las características del modelo que se quiere resolver y el nivel de precisión en cálculos que se desea.

2.2.3 Post-procesado

Etapa que permite combinar múltiples datos de los resultados obtenidos en Procesado para analizarlos y llegar a las conclusiones de la simulación. Los visualizadores de datos presentan multitud de posibilidades como la representación de las mallas numérica, campos de velocidad o presiones pudiendo conseguir resultados animados que permitan una buena interpretación del problema y su resolución.

2.3 Modelo multifásico VOF

Para las simulaciones numéricas de la interacción entre un fluido y un sólido hay que conseguir unas características de fluidos lo más próximas posibles a los flujos existentes en la naturaleza y la industria. Los más comunes son los flujos de más de dos fases. En el caso del software empleado para las simulaciones en este TFG, el cual se describe en el apartado 1.3.1 cuenta con varios modelos numéricos, empleándose para la resolución de las simulaciones de este trabajo el VOF (Volume of Fluid) que es un modelo muy común usado para análisis de flujos con superficie libre.

El modelo VOF nos proporciona la posibilidad de modelar dos o más fluidos inmiscibles, resolviendo las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía como un único conjunto. La fracción volumétrica de las diferentes fases existentes se resuelve mediante una ecuación de transporte, con la que se consigue determinar la evolución y posición de las interfaces. Su formulación se basa en suponer que los fluidos que forman parte de problema bajo estudio no están interpenetrados. El principal problema presente en este modelo es el cálculo de las interfases que delimitan a cada una de las fases existentes en el interior del dominio.

Cada una de las fases que se incorpora al modelo incluye su fracción de volumen al elemento de cálculo. Todas estas fracciones de volumen deben sumar 1. Con esto se obtiene que la fracción volumétrica de un determinado fluido en cada una de las celdas puede tener 3 resultados posibles: 0 para la fracción de volumen en las celdas en las que no está presente dicha fase y 1 en la celda que contenga la fase, por lo tanto el valor de la fracción volumétrica varía entre 0 y 1 en las celdas en las que se disponga de una transición entre fases.

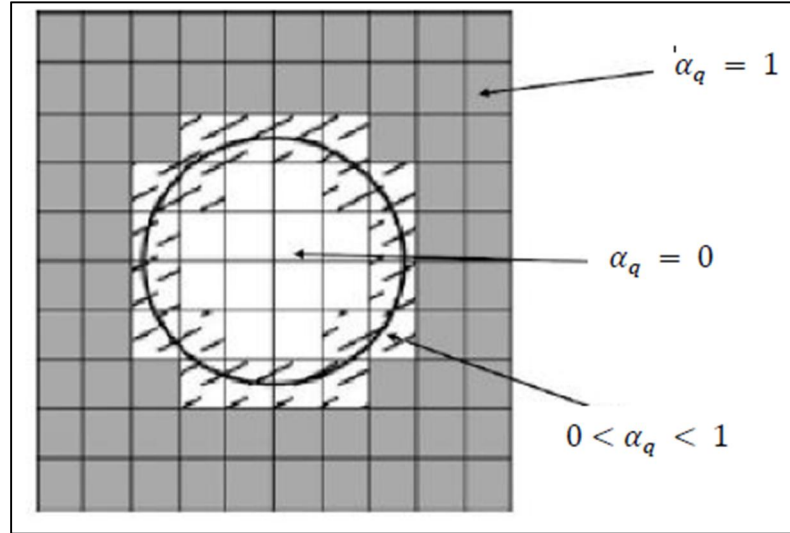


Imagen 2-1 Fracción volumétrica bifásica [1]

En la imagen anterior se puede observar la fracción volumétrica de cada celda, donde α es la nombrada fracción volumétrica y q hace referencia a un determinado tipo fluido. Esta fracción de volumen se calcula haciendo uso de la ecuación de continuidad de fracción volumétrica.

$$\frac{1}{\rho q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q U_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{rq} - \dot{m}_{qr}$$

Siendo $S_{\alpha q}$ un término que representa una fuente de masa, $\dot{m}_{rq}$ es la transferencia de masa de fase q a la fase r y $\dot{m}_{qr}$ es la transferencia de masa de la fase r a la fase q .

2.4 Movimiento de sólidos 6DOF

El término 6DOF; 6 Degrees of Freedom o traducido al español 6 grados de libertad hace referencia a los posibles movimientos que puede efectuar un sólido en función de las fuerzas que actúen sobre él. Dichos movimientos pueden ser de desplazamiento o rotación sobre los tres ejes de coordenadas. Cada eje cuenta con la posibilidad de efectuar un movimiento de desplazamiento y otro de rotación. Los modelos 6DOF son utilizados para la simulación y predicción de los movimientos de un sólido. Estos movimientos en el ámbito naval tienen sus nombres característicos, como se puede ver en la siguiente imagen, y alguno de ellos será empleado en este TFG. Los modelos 6DOF incluyen cualquier factor que afecte al movimiento del buque como la hidrodinámica del buque, su sistema de propulsión y factores externos como son el viento, las olas o las corrientes los cuales afectarán a uno o varios de los movimientos anteriormente nombrados.

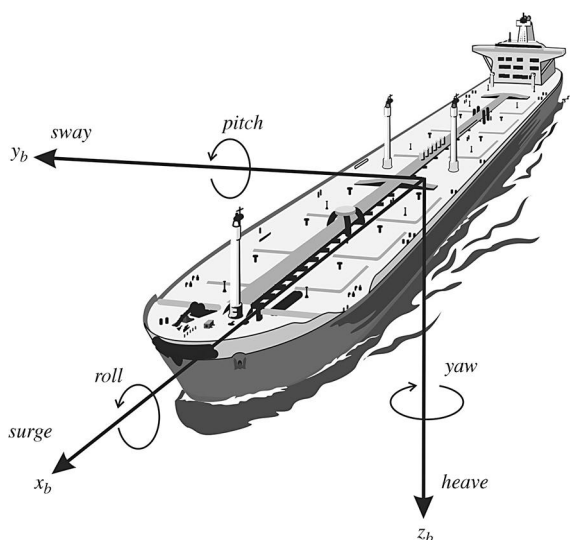


Imagen 2-2 Movimiento en 6 grados de libertad (6DOF) [1]

Donde;

- Surge es el desplazamiento longitudinal que corresponde al buque dando avance o atrás .
- Roll es el movimiento de rotación sobre el eje X que se corresponde con la escora a una y otra banda.
- Sway es el desplazamiento transversal.
- Pitch es el movimiento de rotación sobre el eje Y, que se corresponde con el movimiento de cabezada.
- Heave es el movimiento vertical del buque.
- Yaw es el movimiento de rotación del buque sobre el eje Z que se correspondo con un movimiento de guiñada, siendo este movimiento el necesario para cambios de rumbos.

Las ecuaciones de movimiento de un cuerpo se analizan respecto a un sistema de coordenadas fijo llamado sistema de coordenadas global. Las ecuaciones de movimiento de un sólido rígido en el sistema de coordenadas global se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$\frac{d(m v_c)}{dt} = f$$

$$\frac{d(M_c \times \omega_c)}{dt} = m_c .$$

En las ecuaciones planteadas anteriormente, m es la masa del cuerpo, v_c es el vector velocidad del centro de masas del cuerpo, M_c es el tensor de inercia del cuerpo, ω_c es el vector velocidad angular del cuerpo, f es el vector resultante de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y m_c es el momento de fuerzas que actúa sobre el cuerpo con respecto a su centro de masas. La resultante de las fuerzas se consigue integrando la presión y el esfuerzo cortante ejercido sobre la superficie del cuerpo.

$$f = \int_s (T - pI) n dS + \int_V \rho b dV .$$

En los casos que se van a resolver en este trabajo solamente se considerará la fuerza de la gravedad así que la segunda integral de la ecuación anterior se resume a mg , siendo g el vector de aceleración de la gravedad. Las fuerzas del cuerpo no contribuyen al momento sobre el centro de masas, así que solamente los momentos de presiones y esfuerzos cortantes que actúan sobre el cuerpo necesitan integrarse

$$m_c = \int_s (r - r_c) \times (T - \rho I) n dS .$$

Siendo r_c la posición del vector de un punto en la superficie del cuerpo expresado sobre el sistema global de coordenadas y r_c es la posición del centro de masas del cuerpo.

Cuando el cuerpo gira, el momento de inercia con respecto al sistema global de coordenadas también cambia, así que tienen necesidad actualizar cada instante de tiempo los cambios que experimente el cuerpo.

2.5 Simplificación bidimensional

En este trabajo se llevarán a cabo simulaciones bidimensionales de tal forma que los modelos a analizar serán llevados a cabo en los ejes YZ. Al tener en cuenta esta consideración, los posibles efectos a analizar en este trabajo quedan reducidos a los que se produzcan sobre dichos ejes. Los posibles movimientos para los ejes YZ son la escora, el movimiento vertical del buque y desplazamiento transversal. Todos estos movimientos se pueden visualizar en la siguiente imagen.

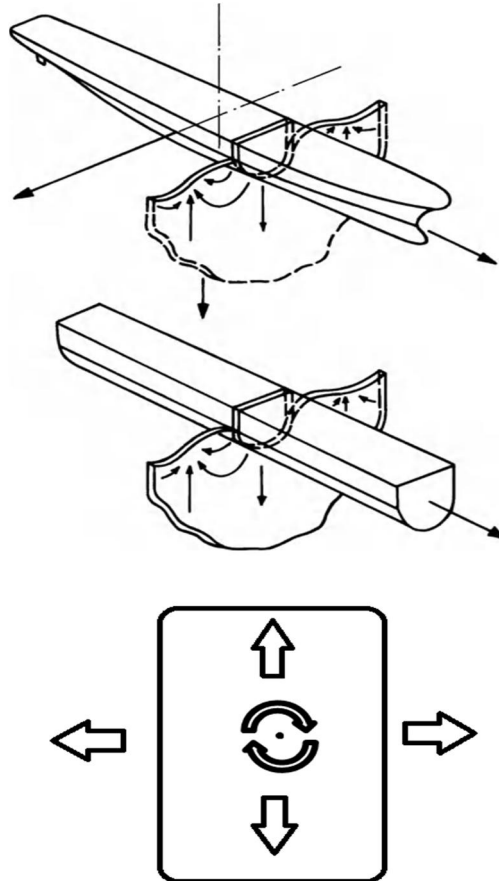


Imagen 2-3 Representación 2D [3]

3 ANTECEDENTES

3.1 Desarrollo de la dinámica de fluidos computacional

Muchos son los estudios y experiencias que se han llevado a cabo en el campo de la simulación numérica en el campo de la dinámica computacional de fluidos a lo largo de los años. La técnica del CFD comienza a ser un método rentable y posible desde la evolución de ordenadores con una buena capacidad de cálculo.

Aunque no es fácil determinar la fecha exacta de los primeros cálculos realizados utilizando técnicas CFD, sí se puede citar al inglés Lewis Fry Richardson (1881-1953) como el precursor de la utilización de dichas técnicas. De hecho, fue el primero en utilizar un modelo numérico para la predicción meteorológica, dividiendo el espacio en celdas y empleando un primitivo método por diferencias finitas. Su propio intento de predecir la evolución de las condiciones meteorológicas durante un período de 8 horas necesitó de 6 semanas de cálculos intensivos que terminaron en fracaso. Todos estos métodos empleados por Richardson en las décadas de 1910 y 1920 pueden considerarse el punto de partida del empleo de CFD. En 1953 M.Kawaguti en Japón, resolvió las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo alrededor de un cilindro para un número de Reynolds de 40 [5].

A partir de finales de la década de 1950 y en toda la década de los 60, el Laboratorio Nacional de Los Álamos (LANL), auspiciado por la NASA, se constituyó en el verdadero impulsor de las técnicas CFD, desarrollando los primeros códigos y dando los primeros pasos en el empleo de computadores. Hoy en día, muchos métodos que se emplean en la actualidad en programas comerciales provienen de aquellos pioneros trabajos. [5]

3.2 Trabajos y estudios actuales

Muchos son los trabajos y estudios relacionados con la simulación numérica desde su creación y su evolución hasta la actualidad. Un caso de interés es el de un artículo publicado por el ingeniero de la Universidad de Alejandría Y.M. Ahmed. En este artículo titulado *Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different Froude numbers*, se realizó una simulación por CFD del flujo turbulento incompresible alrededor de una forma de casco compleja del modelo DTMB 5415 a dos velocidades distintas. La simulación se llevó cabo usando un código de resolución RANSE CFX. La superficie libre se calculó mediante el modelo VOF, el cual es utilizado en este trabajo como modelo multifásico y el modelo turbulento standar k- ϵ . [6]. Los resultados obtenidos se compararon con una experiencia como se puede ver en Imagen 3-2 e Imagen 3-3.

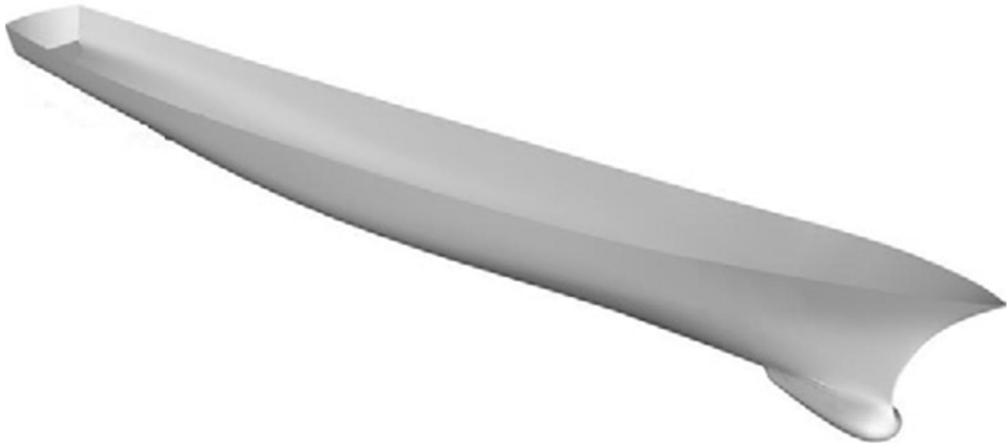


Imagen 3-1 Casco del DTMB 5415 [7]

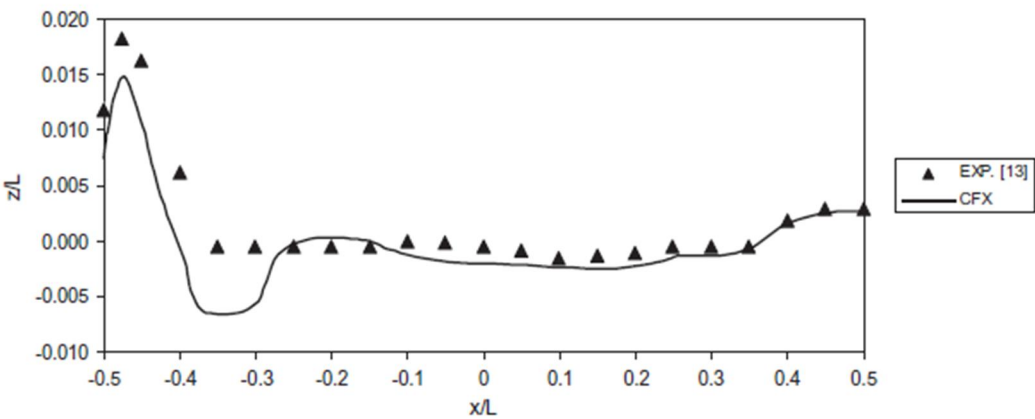


Imagen 3-2 Resultado velocidad 1 [6]

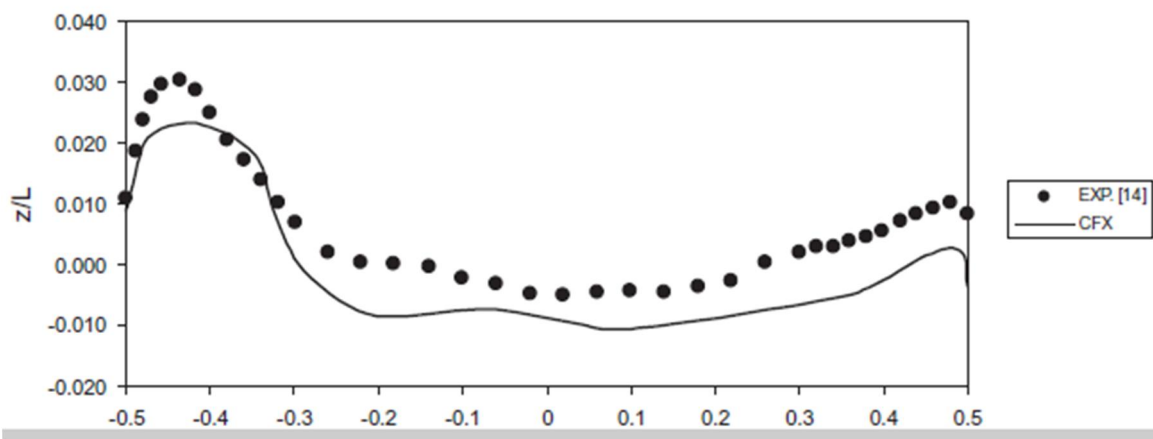


Imagen 3-3 Resultado velocidad 2 [6]

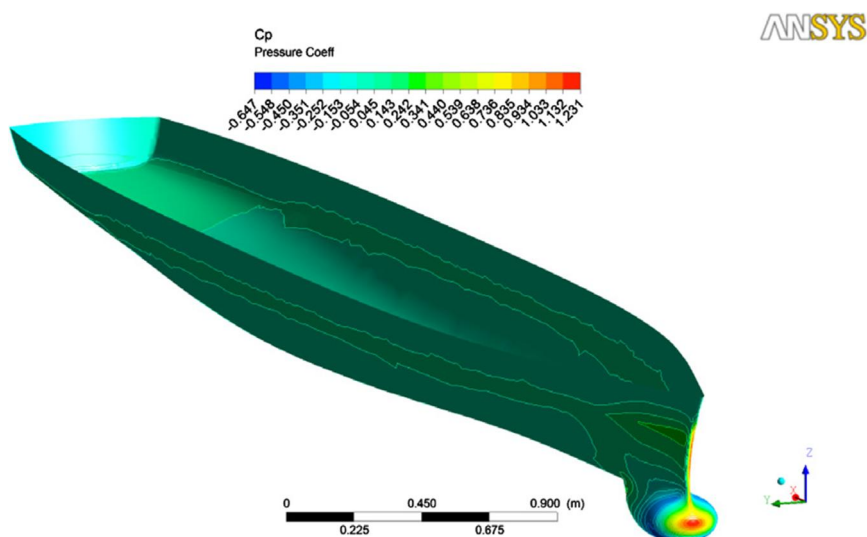


Imagen 3-4 Coeficiente de presiones velocidad 1 [6]

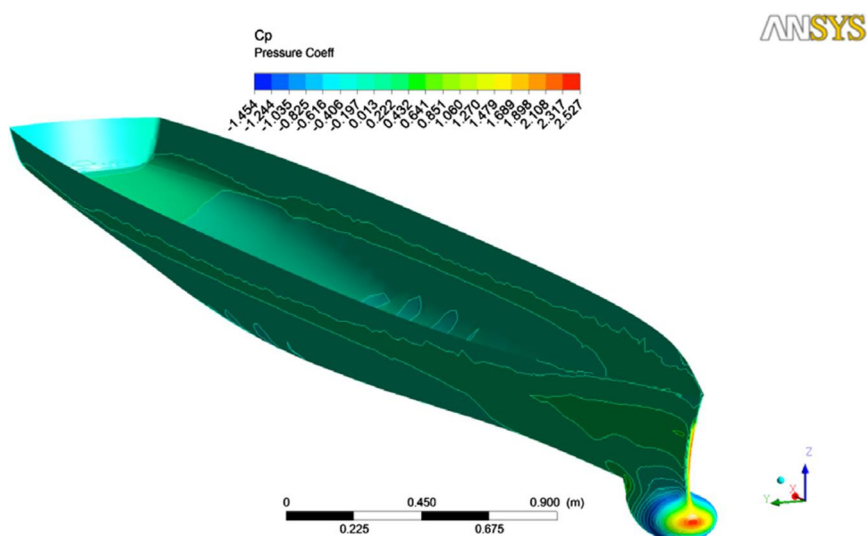


Imagen 3-5 Coeficiente de presiones velocidad 2 [6]

En el año 2004 Yann Andrillon y Bertrand Alessandri, ingenieros del laboratorio de mecánica de fluidos de la Ecole Centrale de Nantes, llevaron a cabo un trabajo cuyo objetivo principal era ser capaces de predecir el flujo de agua a través del paso de un casco de barco. La superficie libre fue simulada por VOF y el código de resolución resolvía las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando un método de volúmenes finitos que se adaptara a las superficies del mallado. Para la obtención de los resultados se empleó el método 2D+T que consiste en generar partiendo de un flujo estable tridimensional al paso de un barco, varios problemas bidimensionales con secciones verticales como se puede ver en la siguiente imagen. [8]

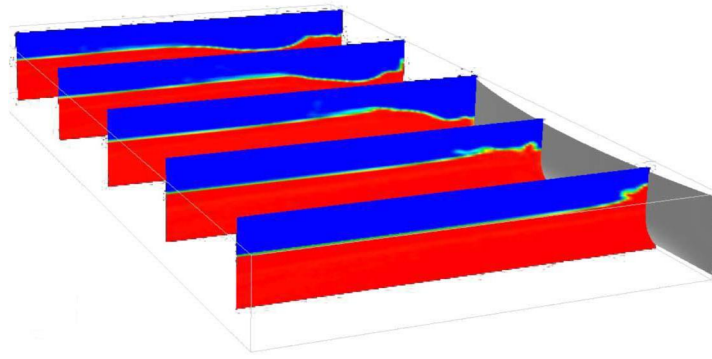


Imagen 3-6 Ejemplo de simulación 2D+t: flujo bidimensional en diferentes instantes [8]

El casco modelado para la experiencia es el que se muestra en Imagen 3-7. Para el paso del casco del barco se calculó con diferentes números de Froude. En la Imagen 3-8 se muestra la superficie libre elevándose sobre el casco para los diferentes números de Froude.

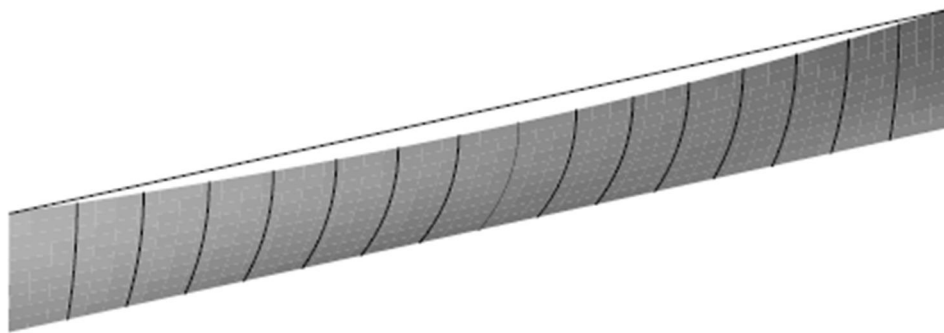


Imagen 3-7 Casco [8]

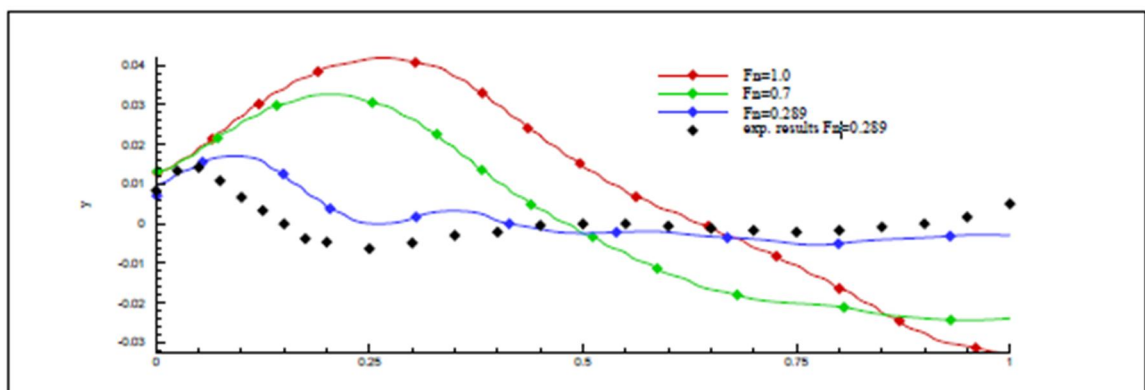


Imagen 3-8 Elevación de la superficie libre sobre el casco [8]

Las siguientes imágenes muestran las olas generadas por el casco al paso de éste por el fluido para los diferentes números de Froude.

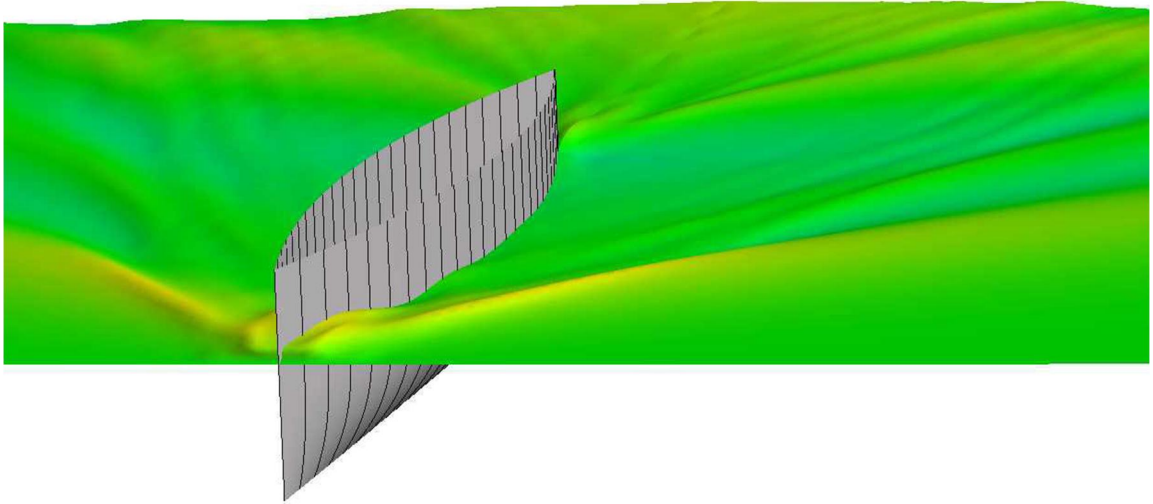


Imagen 3-9 Número de Froude 1 [8]

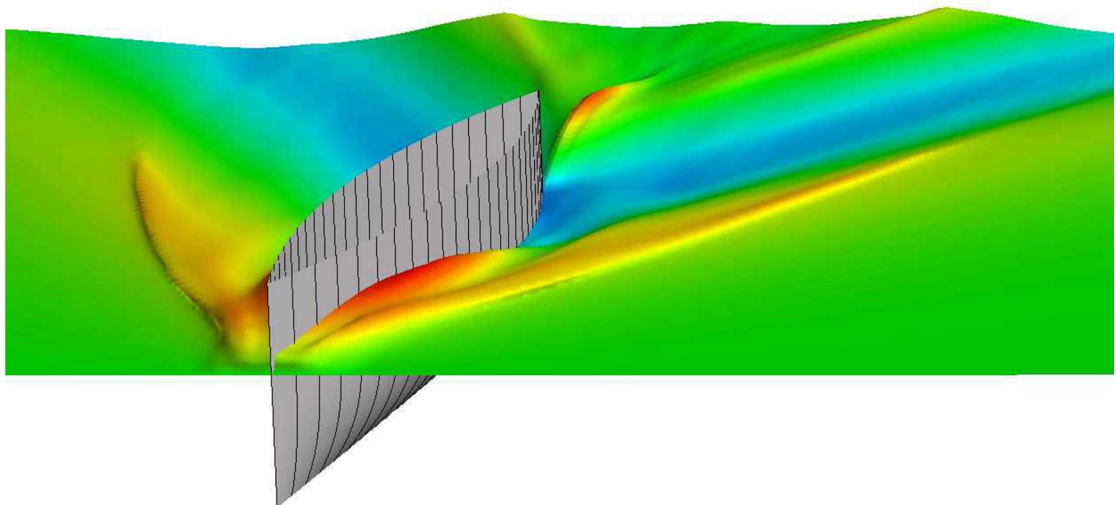


Imagen 3-10 Número de Froude 2 [8]

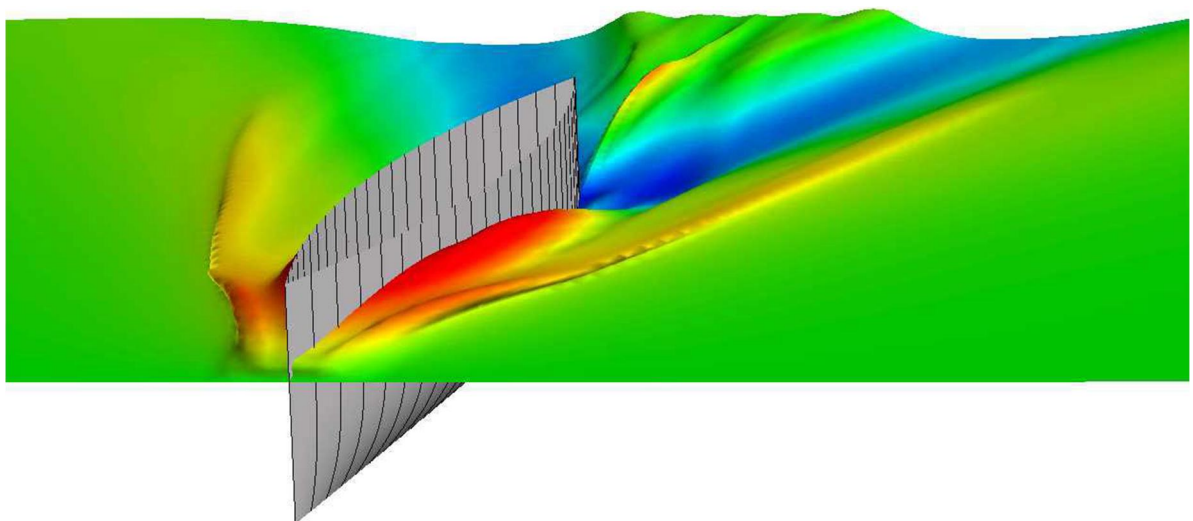


Imagen 3-11 Número de Froude 3 [8]

En 2006 Yan Xiang-Kaeding, en su tesis titulada *Unified Approach to Ship Seakeeping and Maneuvering by a RANSE Method* pretendía mediante un procedimiento computacional predecir el movimiento de cuerpos rígidos flotando sobre fluidos viscosos e influenciados por corrientes y olas. El procedimiento se basó en una serie de soluciones iterativas de las ecuaciones de movimiento de un sólido rígido con el 6DOF, el cual es utilizado también en este trabajo, y mediante el método de resolución RANSE (Averaged Navier-Stokes Equations), describiendo el flujo de un fluido turbulento. El flujo fue analizado por un software comercial de CFD. Este método se usa para calcular el movimiento de los cuerpos/barcos flotantes y afectados por olas, comparando los resultados con experimentos.

En primer lugar realizó la simulación y experiencia de un cilindro entrando en agua, obteniendo como resultados la simulación del movimiento con el vector velocidad del fluido así como el campo de presión (Imagen 3-13) para diferentes instantes de tiempo. En las siguientes imágenes se puede apreciar una comparativa entre la simulación numérica y la experiencia real y de la interacción fluido-sólido.

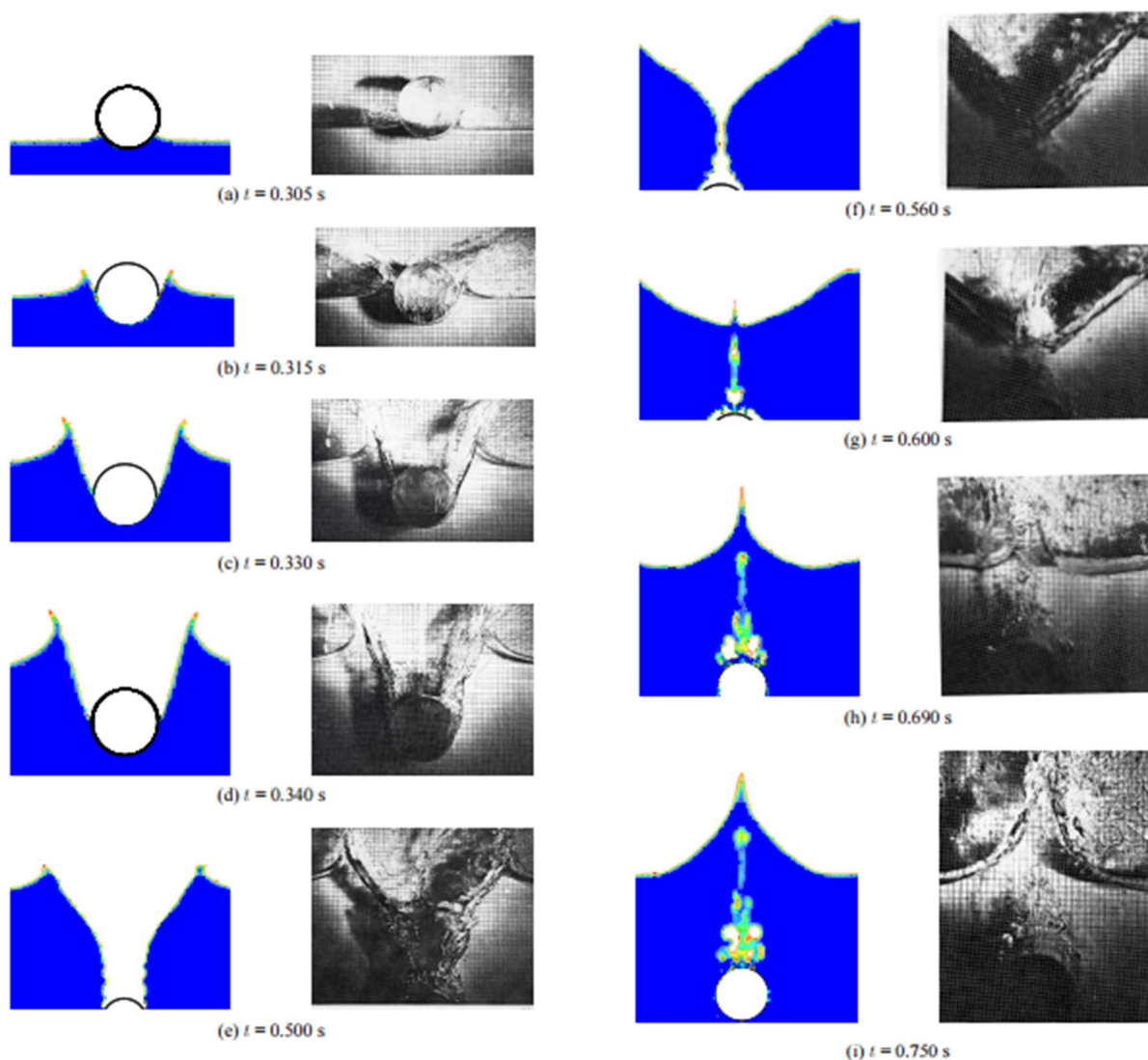


Imagen 3-12 Deformación de superficie libre al entrar el cilindro en agua [9]

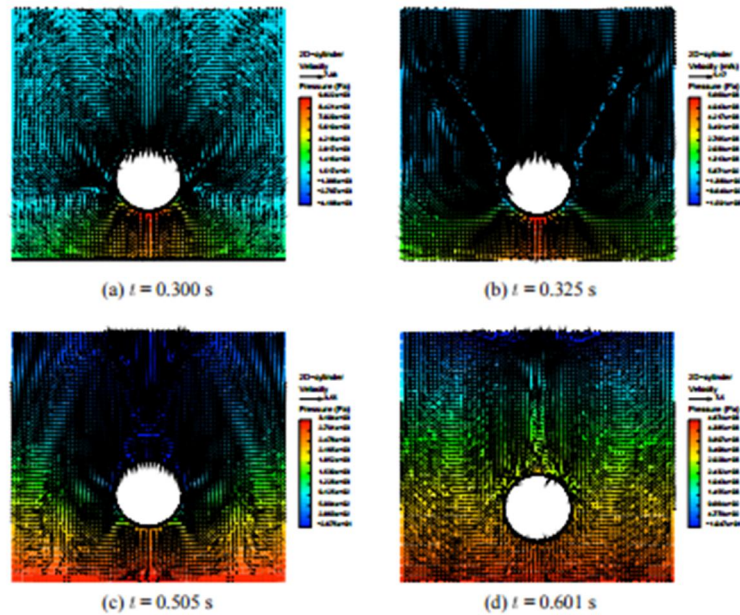


Imagen 3-13 Campo de presiones y vector velocidad del cilindro en su entrada al agua [9]

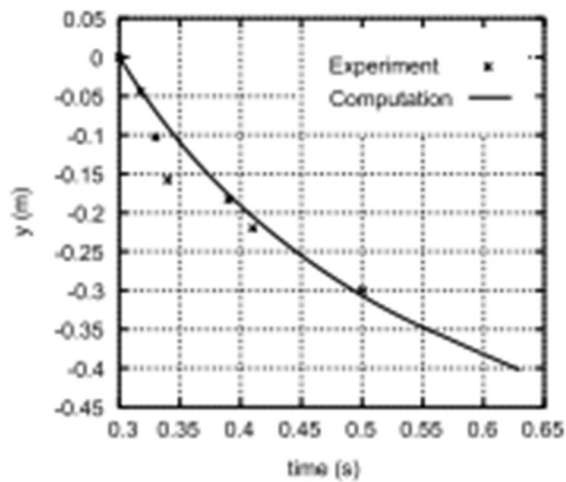


Imagen 3-14 Comparación situación del cilindro en simulación y experimento [9]

El segundo experimento fue el sacar el mismo cilindro del agua a velocidad constante. La simulación numérica obtuvo como resultado una gran precisión a la hora de predecir los efectos que afectarían al cilindro durante su tránsito de salida.

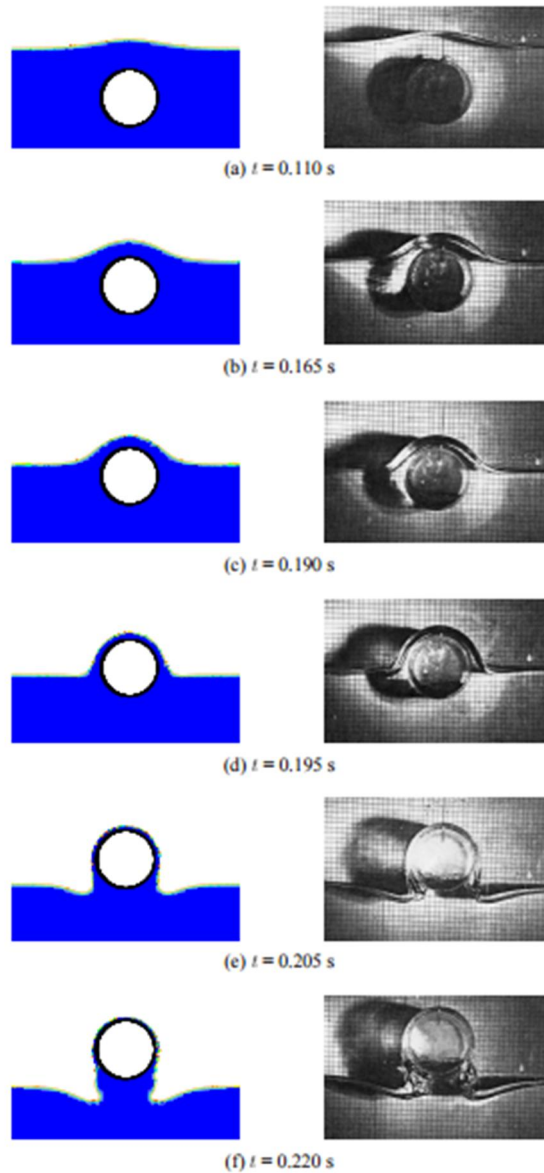


Imagen 3-15 Cilindro saliendo del agua [9]

Una vez demostrado con casos relativamente sencillos pasó a realizar una simulación y experiencia con un generador de olas y un cuerpo flotante. Para ello le impuso en el modelo creado la ley de movimiento del generador de olas experimental.

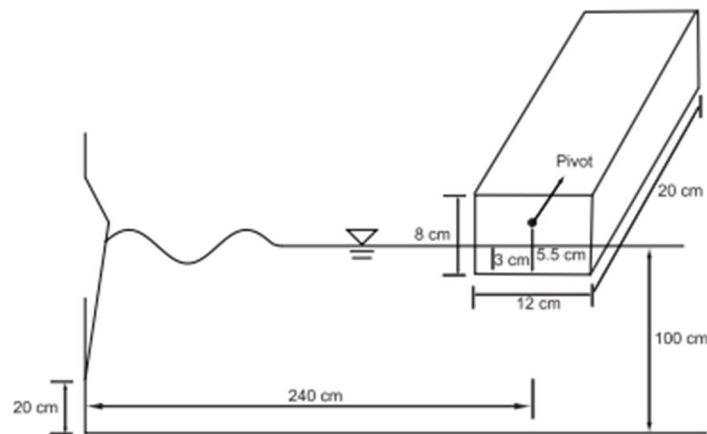


Imagen 3-16 Generador de olas [9]

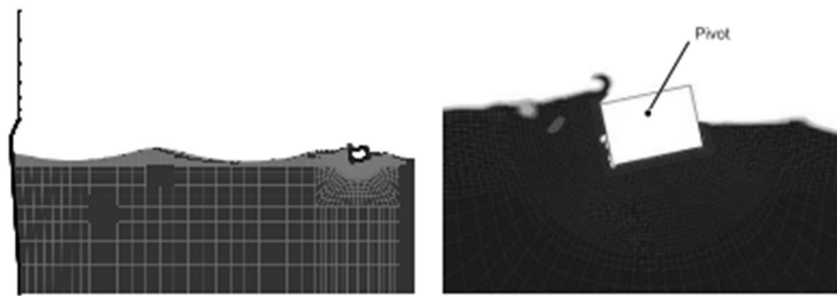


Imagen 3-17 Simulación de interacción fluido-sólido [9]

Las siguientes imágenes muestran una comparativa entre las simulaciones y las experiencias reales. En la de la izquierda se muestra el desplazamiento angular del cuerpo y en la derecha se muestra el mismo dato pero para diferentes tamaños de intervalos de tiempo.

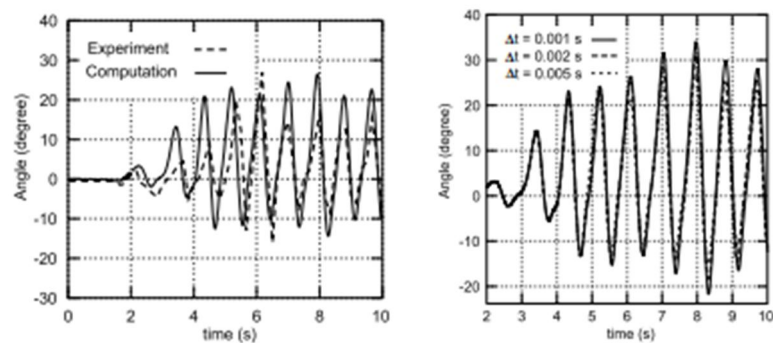


Imagen 3-18 Comparativa de desplazamiento angular entre experiencia y simulación [9]

4 CASOS BAJO ESTUDIO

4.1 Metodología general de trabajo

Para el estudio de los diferentes casos que se realizan en el presente TFG se lleva a cabo una secuencia de procesos hasta la obtención de la simulación con el resultado final.

4.1.1 Introducción a los casos bajo estudio

En este apartado se definirá cuál es la situación real que se quiere analizar, definiendo las variables de todos los elementos que forman parte del problema así como el objetivo que se pretende conseguir al obtener los resultados. Para ello se definen las condiciones originales de cada uno de los casos y una pequeña introducción teórica que facilite una primera impresión de los fundamentos en los que se basa el problema.

4.1.2 Ejecución del caso práctico real

En este apartado se lleva a cabo la experiencia real de los problemas en los que sea viable dicha ejecución, obteniendo con ella unos determinados resultados que posteriormente serán realizados mediante simulación numérica con el software descrito en 1.3.1.. Los elementos empleados en las diferentes experiencias se describirán posteriormente.

4.1.3 Simulación numérica

En el presente punto se pretende conseguir los resultados a los problemas reales mediante cálculos numéricos realizados por un ordenador. Para conseguir dichos resultados, primero se ha de modelar con un programa CAD los objetos bajo estudio, comenzando con modelados en 2D y finalmente con modelados en 3D con los que se obtendrá unos resultados más precisos y próximos a la realidad. Aunque el software empleado para este TFG dispone de un diseñador de modelos, se cuenta con la capacidad de importar los modelos de cualquier otro software de CAD. Una vez realizados los modelos se mallan los diferentes elementos que componen los mismos con un tamaño y tipo de malla que varían en función de la geometría del propio elemento a mallar, de la precisión de los resultados que se quiere obtener y de las limitaciones tanto del equipo en el que se realiza los cálculos como de la versión del software empleado. Al igual que con el modelador, el Workbench cuenta con un software para efectuar los mallados. En tercer lugar, mediante el uso del software Ansys Fluent se le atribuirán una serie de propiedades a las diferentes zonas malladas de los modelos como son las fases de los

fluidos presentes en el problema, características de los materiales, o la implementación del solver 6DOF para el movimiento de sólidos con el que poder actualizar la situación de los sólidos en movimiento y seguir con el cálculo correspondiente.

4.1.4 Análisis de resultados

Una vez realizada la simulación y observados los resultados se comprueban y analizan los mismos comparándolos con los obtenidos en las experiencias reales.

4.2 Trabajos previos

Antes de comenzar tanto con la resolución de las experiencias reales como las simulaciones numéricas en el ordenador, se realizan algunos pasos previos necesarios para poder ejecutar dichas experiencias y simulaciones. En primer lugar, para conseguir un modelo que se comporte de una forma lo más próxima al comportamiento real posible y conocer todas las características del Gunt HM 150.06, un elemento que se empleará en algunas experiencias, se desmontan todos los elementos que lo componen y se toman todas las medidas de sus dimensiones y pesos siendo los valores obtenidos los que se encuentran en la descripción del objeto en el apartado Descripción del Gunt HM 150.06

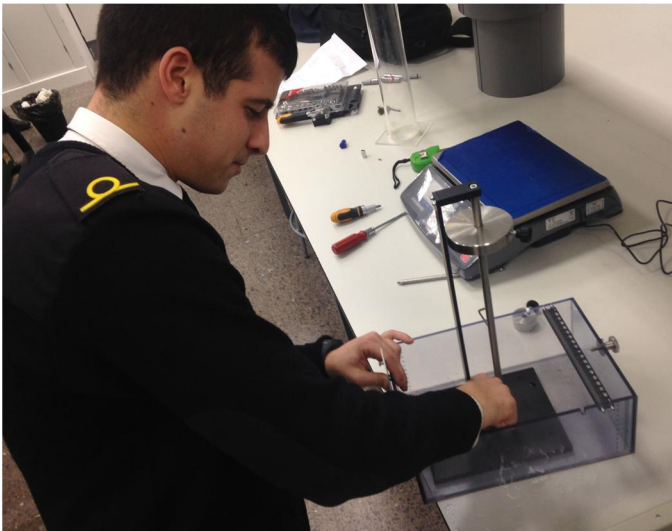


Imagen 4-1 Desmontaje del Gunt HM 150.06

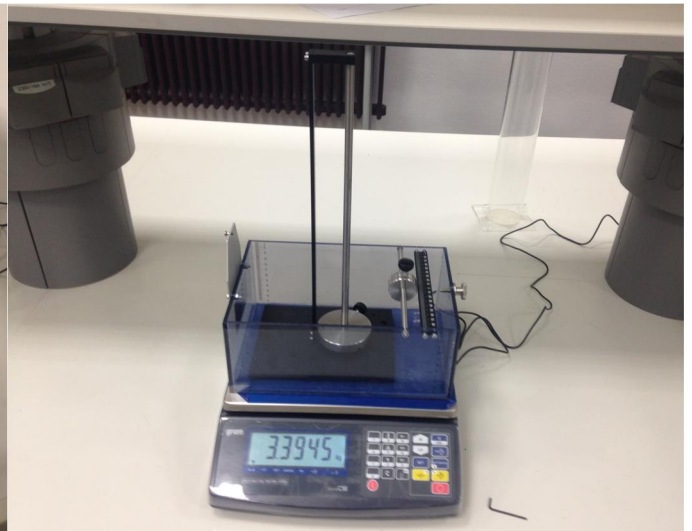


Imagen 4-2 Peso conjunto Gunt HM 150.06

5 DEMOSTRACIÓN DEL EFECTO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

5.1.1 Introducción

Como primer problema a resolver se pretende comprobar el efecto del empuje sobre cuerpos total o parcialmente sumergidos en un fluido. Para ello se diseñará un objeto cuyas dimensiones y características son conocidas y por lo tanto también el comportamiento que se espera de dicho objeto al introducirlo en un determinado fluido. Las tres posibles soluciones de este efecto son:

- Si el peso del cuerpo es mayor que el empuje el cuerpo se hunde.
- Si el peso es igual al empuje el cuerpo se mantiene en equilibrio.
- Si el peso del cuerpo es menor que el empuje, el cuerpo asciende hasta que se igualen ambas fuerzas.

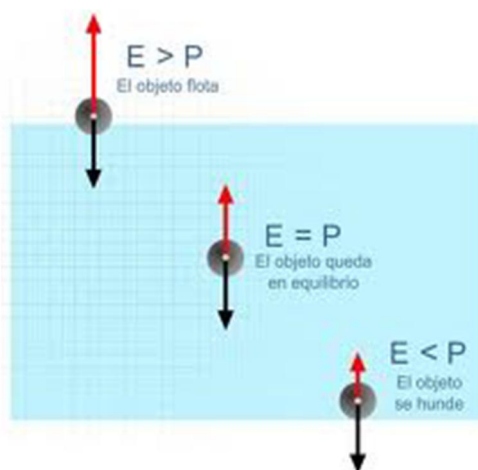


Imagen 5-1 Principio de Arquímedes [3]

5.1.2 Experiencia real

El objeto bajo estudio parte de una situación inicial en la que se encuentra fuera del agua con su parte inferior estando en contacto con la superficie. El objeto se deja caer en un recipiente con el fluido, agua en este caso, hasta que alcanza su posición de equilibrio sobre dicho fluido quedando el objeto flotando en el agua. La situación de equilibrio se alcanzará cuando el peso del cuerpo se iguale a la fuerza de empuje hidrostática (peso de volumen de fluido desplazado) que efectúa el fluido sobre dicho cuerpo y que se aplica en el centro de carena del objeto. Si centro de carena y el centro de gravedad se encuentran sobre la misma vertical el cuerpo estará en equilibrio, ver Imagen 5-2.

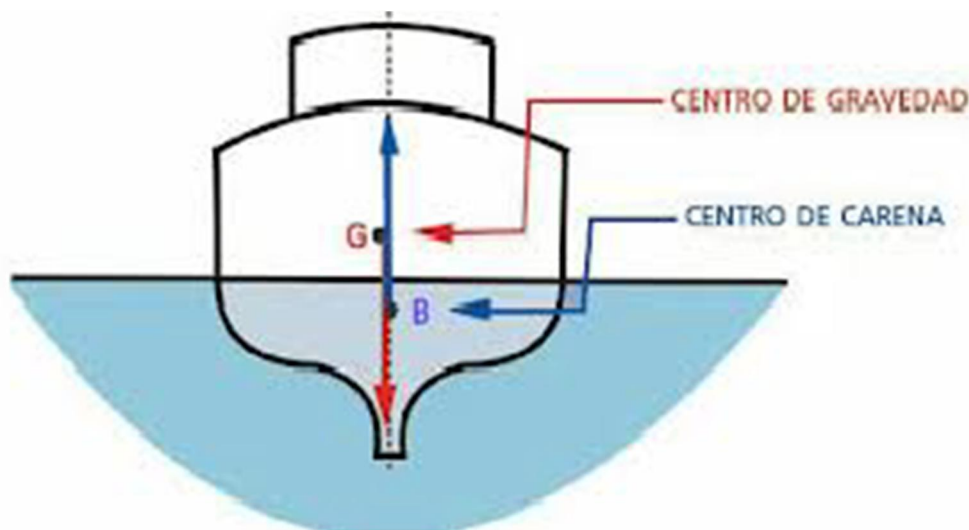


Imagen 5-2 Centro de gravedad y centro de carena [3]

Conocido el peso del cuerpo y conociendo la densidad del agua se puede calcular el volumen del objeto que quedará sumergido una vez el cuerpo alcance la condición de equilibrio quedando flotando en el agua.

$$V_c = \frac{m}{\rho} = m^3$$

Siendo:

m = masa del cuerpo en kilogramos;

ρ = la densidad del agua $= 998 \frac{Kg}{m^3}$

$$V_{c,teorico} = 0.0034 m^3$$

El volumen de carena (volumen sumergido) real se obtiene mediante los calados leídos en las marcas de calado disponibles en el objeto y conociendo la manga y eslora del cuerpo.

$$V_c = B \times L \times C_m$$

Siendo:

B = manga del objeto en metros;

L = eslora del objeto en metros;

C_m = calado medio en metros medido experimentalmente.



Imagen 5-3 Instante inicial

Una vez situado el equipo en el instante inicial se suelta y se espera a que alcance su posición de equilibrio. Con un cronómetro se mide el tiempo que tarda el equipo en alcanzar su posición de equilibrio para así tener una idea del tiempo de simulación que será necesario calcular posteriormente con el software. Una vez se encuentre en su posición de equilibrio se puede calcular el volumen de agua desplazado y, en consecuencia, la fuerza de empuje.

Para calcular el tiempo de estabilización se realiza la experiencia 3 veces y se toma la media de tiempos obteniendo un tiempo de estabilización de 9 segundos.

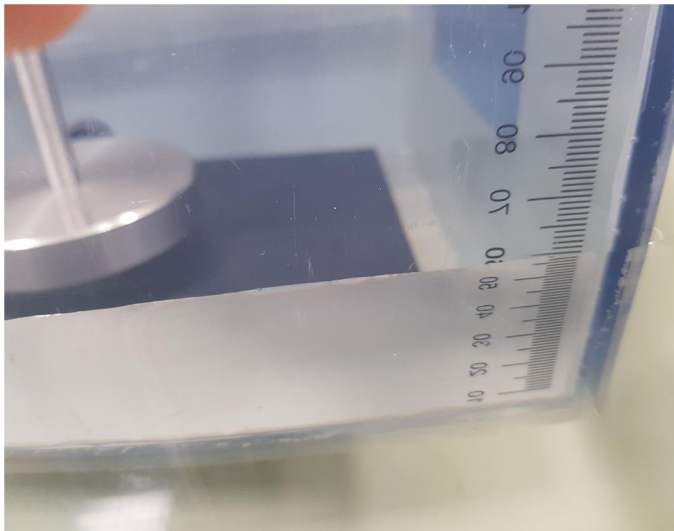


Imagen 5-4 Calado popa

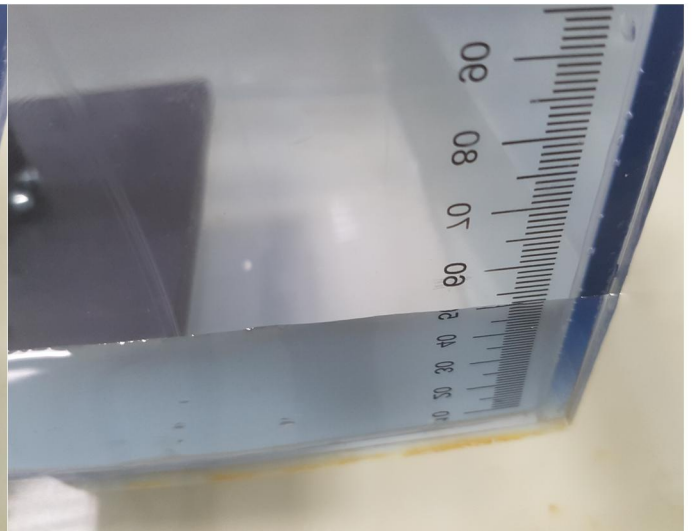


Imagen 5-5 Calado proa

Como se puede que ver en Imagen 5-4 el calado de popa medido es 0.059 m y en Imagen 5-5 se puede ver que el calado de proa es 0.053m. Con la media de estas dos medidas se obtiene el calado medio experimental. $C_{m_{exp}} = 0.0565$. Con la fórmula anteriormente nombrada se calcula el volumen de carena experimental;

$$V_c = 0,2 \times 0,3 \times 0,056 = 0,00336 \text{ m}^3$$

Con el volumen de agua desplazado y con la densidad del agua podemos obtener el valor de la fuerza de empuje que efectúa el agua sobre el centro de carena del Gunt HM.150.06.

$$W = V_{c,exp} \times \rho$$

$$W = 0,0336 \times 998 = 3,353 \text{ kg}$$

Con la masa de agua desplazada se puede calcular la fuerza de empuje siendo $E = 33.189 \text{ N}$

5.1.3 Desarrollo simulación numérica

5.1.3.1 Modelado

Para el desarrollo de la simulación de este problema, en primer lugar se diseña y modela el cuerpo a estudiar, descrito en el apartado 1.3.2, para ello se modelan las diferentes piezas que lo conforman, atribuyéndoles su correspondiente material para así obtener unas características del conjunto similares al objeto real. En segundo lugar se modela el mismo elemento en dos dimensiones y el recipiente que va a contener el fluido sobre el que se realizará la experiencia. Para conseguir el modelo del Gunt HM 150.06 solamente se modelará el cuerpo flotante visto desde la popa o proa y posteriormente en el apartado Análisis CFD se le atribuirán una serie de propiedades para que se tenga las mismas características y se comporte de la misma forma que el objeto completo.

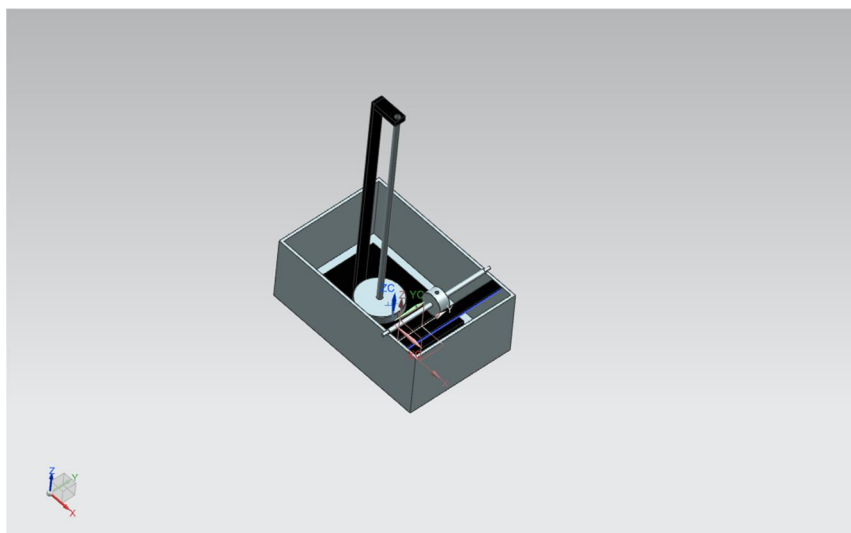


Imagen 5-6 Modelado del Gunt HM.150.06 en 3D

Una vez modelado el objeto completo y obtenidas todas sus características y propiedades, se comienza con el modelado en 2 dimensiones. Este modelado se consigue realizando un corte transversal al modelo en tres dimensiones. Para facilitar el posterior mallado y la ejecución de los cálculos por parte del software Fluent, el modelo de dos dimensiones solamente está formado por el cuerpo flotante al cual se le atribuirán las propiedades del modelo completo como se explicará posteriormente en el apartado 5.1.3.3 Análisis CFD. Este modelo cuenta con dos partes fundamentales:

- El cuerpo flotante (ver Imagen 5-7): formado a su vez por 3 sub - partes necesarias posteriormente a la hora de realizar el mallado y que se encuentran unificadas formando un único modelo con la misma topología. La sub-parte denominada “moving_in” (ver Imagen 5-8) es la parte interior del cuerpo flotante (ver Imagen 5-9). La sub-parte denominada “mc” es el metacrilato que forma el cuerpo flotante. La sub-parte “moving_out” se corresponde con la zona exterior que rodea al cuerpo flotante (ver Imagen 5-10).

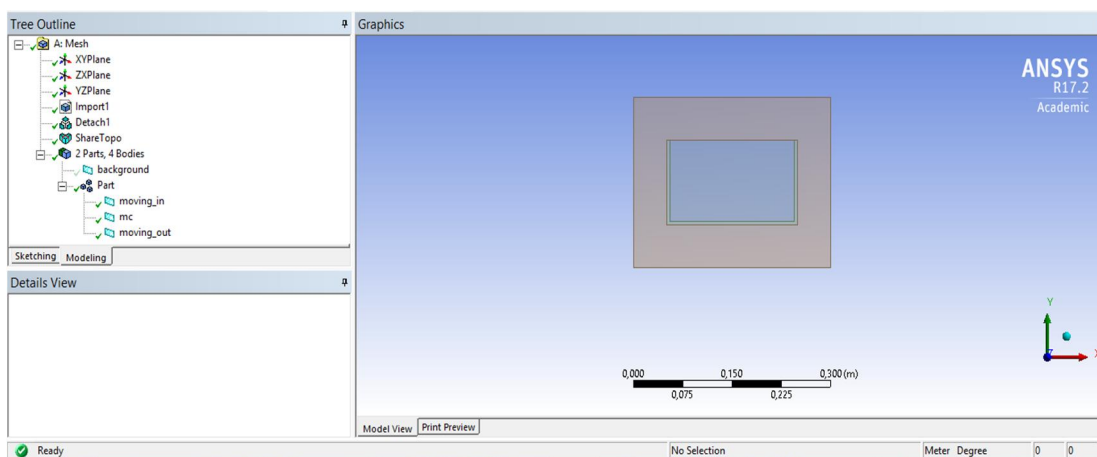


Imagen 5-7 Modelo cuerpo flotante

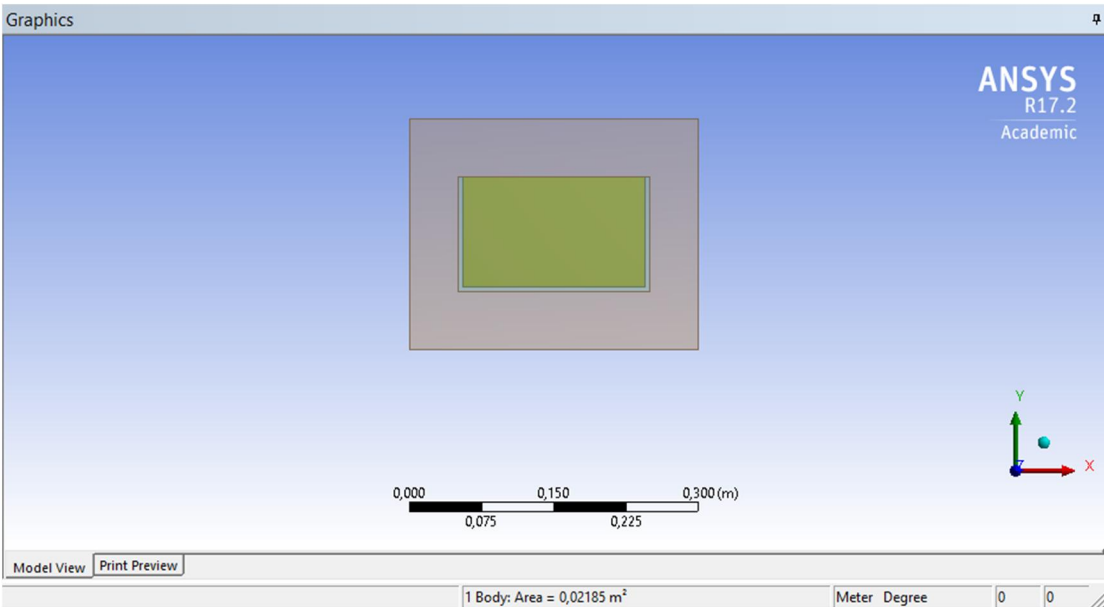


Imagen 5-8 Sub-parte “Moving_in”

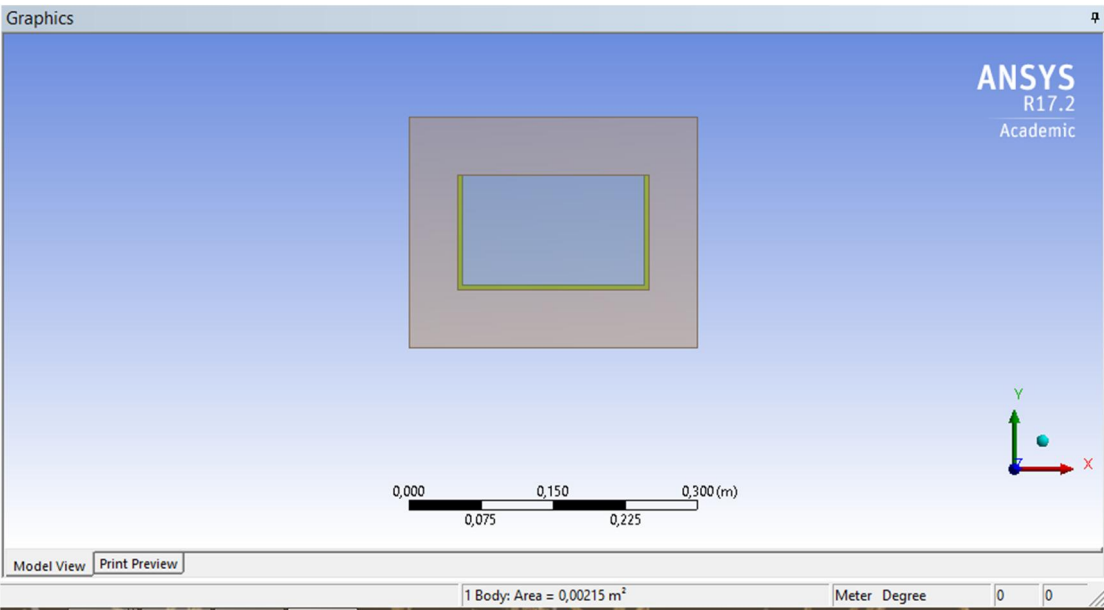


Imagen 5-9 Sub-parte "mc"

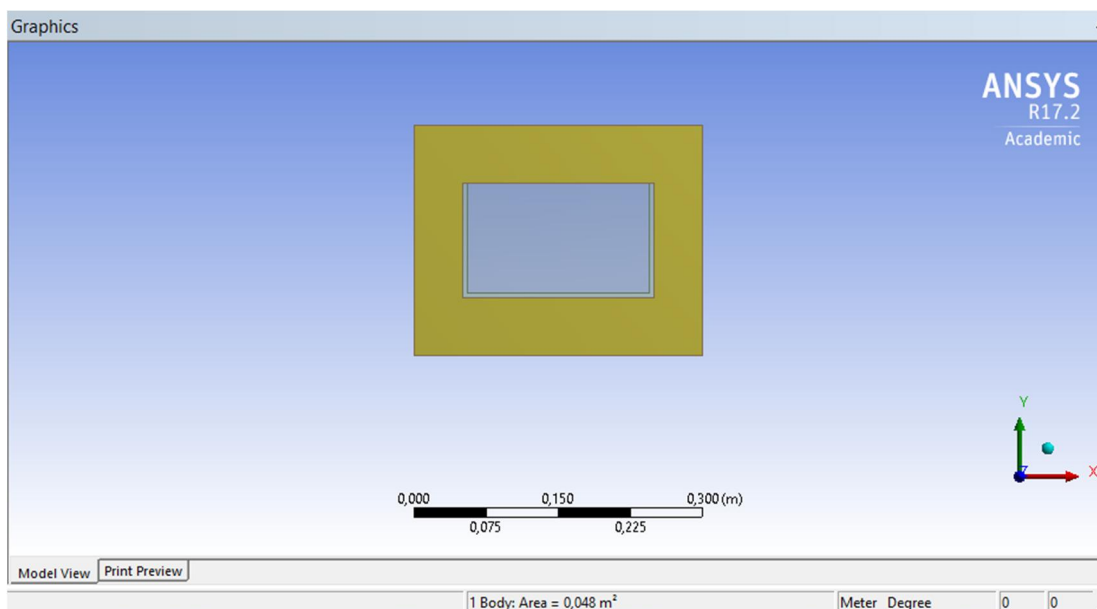


Imagen 5-10 Sub-parte "Moving_out"

- Background: modelo del recipiente que va a contener el agua sobre la que flotará el cuerpo flotante, quedando modelado como se puede apreciar en la siguiente imagen.

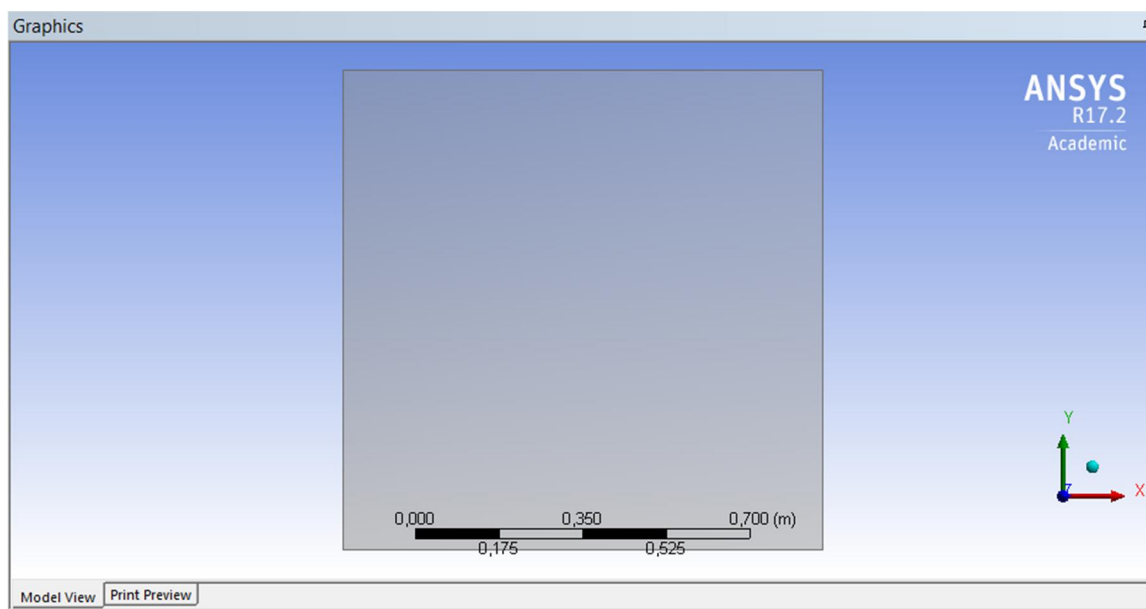


Imagen 5-11 Background

5.1.3.2 Mallado

En segundo lugar, ya con los modelos completos, se mallan de forma adecuada los objetos diseñados. El mallado se efectúa con las características que consigan una buena precisión de cálculos al mismo tiempo que se adaptan a las condiciones y características de los ordenadores en los que se van a realizar los cálculos. En primer lugar se realiza un mallado uniforme con cuadriláteros para el modelo background, como se puede ver en la siguiente imagen.

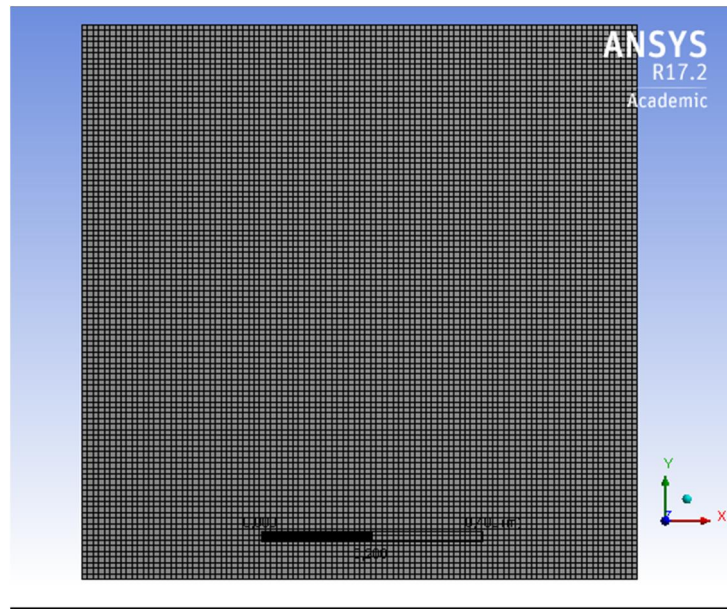


Imagen 5-12 Malla background

En cuanto al mallado de las diferentes sub - partes del conjunto del cuerpo flotante, en primer lugar se malla el metacrilato que forma el cuerpo flotante en sí con una malla uniforme de cuadriláteros, quedando el mallado como se puede ver en Imagen 5-13. El segundo elemento mallado de este conjunto es el “moving_in” que, al igual que el metacrilato, es mallado con una malla uniforme de cuadriláteros (ver Imagen 5-14). Por último se malla la sub – parte “moving_out” con una malla triangular con tamaño variable, comenzando con un tamaño más pequeño que se adapte a la malla del contorno del metacrilato y del “moving_in” y que amplía su tamaño a lo largo del “moving_out” hasta alcanzar el contorno del “moving_out” con un tamaño que se adapte a la malla del “background”, sobre la actuará el “moving_out” (ver Imagen 5-15).

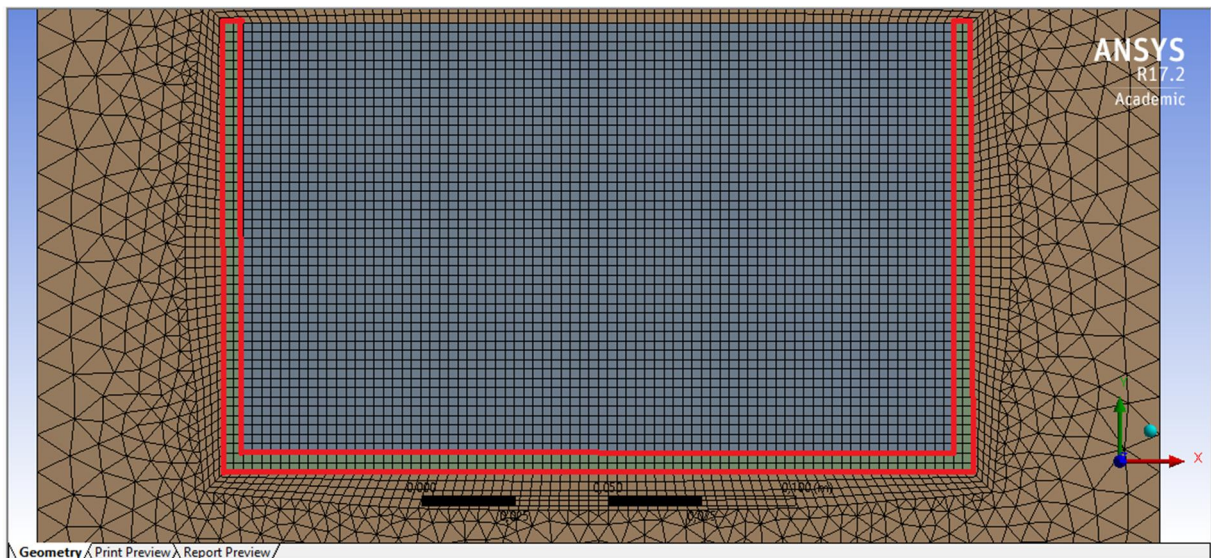


Imagen 5-13 Malla metacrilato

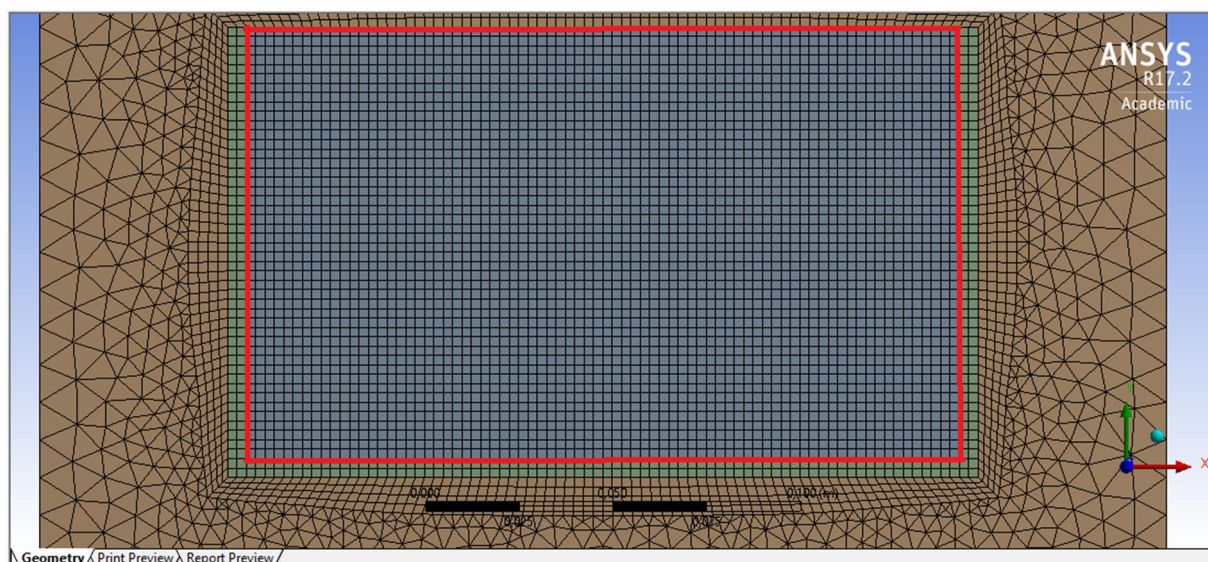


Imagen 5-14 Malla "moving_in"

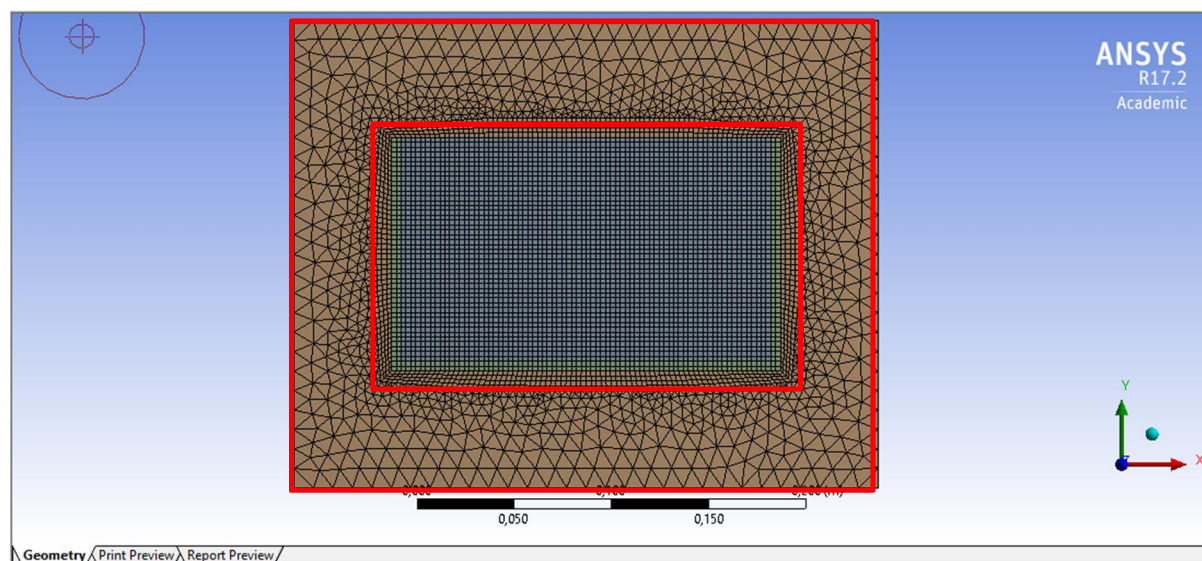


Imagen 5-15 Malla completa cuerpo flotante

5.1.3.3 Análisis CFD

Una vez obtenidos los mallados se prepara un análisis CFD empleando ANSYS Fluent. Para ello se leen desde el ANSYS Fluent los mallados y se seleccionará el tipo de procesamiento, modelos físicos, propiedades de los materiales y condiciones de contorno. Para ello se selecciona el modelo multifásico VOF (ver Imagen 5-16), que permitirá la interacción agua – aire. Para obtener el resultado final se empleará el método de malla superpuesta (ver Imagen 5-17) que consiste en generar una malla para el fondo que contenga las dos fases implicadas (agua y aire) y una malla dinámica que interactuará sobre la primera malla y las celdas de ambas mallas se vayan combinando para obtener los resultados. Con el 6DOF se consigue que, según las propiedades físicas del objeto móvil, el programa calcule en cada instante de tiempo una actualización de la situación en la que se encuentra el objeto a partir de la posición inicial. El software Fluent permite el establecimiento manual tanto de la masa, el centro de masas como la matriz de inercia del modelo, gracias a esto se consigue que, únicamente, modelando el

cuerpo flotante que es el que va a interactuar directamente con el agua, éste se comporte como se comportaría el modelo completo introduciendo manualmente y por lo tanto “forzando” al centro de masas a situarse en una determinada posición y agregando la matriz de inercia se consigue que el modelo actualice su movimiento rigiéndose a éstos parámetros. Para ello se crea un 6DOF con las propiedades presentes en el problema. Como se puede ver en Imagen 5-18 se le atribuyen las propiedades de masa al sólido, una matriz de inercia obtenida del software Siemens NX, cuyas características se encuentran en ANEXO II: PROPIEDADES DEL GUNT HM 150.06 y por último la fuerza de gravedad que es la que originará el movimiento inicial del sólido. Una vez creado el 6DOF con sus propiedades establecidas, se le atribuyen estas propiedades a la malla dinámica y se le determina la posición del centro de gravedad, situándolo en la posición detallada en ANEXO II: PROPIEDADES DEL GUNT HM 150.06(ver Imagen 5-19), teniendo en cuenta que el eje Z del NX se corresponde con el Y en el Fluent y que el eje Y se corresponde con el X debido a la simplificación bidimensional. Por último, una vez definidas todas las variables que intervienen en el problema, se calculan los resultados del problema estableciendo el número de time steps, la duración de cada paso y el número de iteraciones a realizar en cada paso.

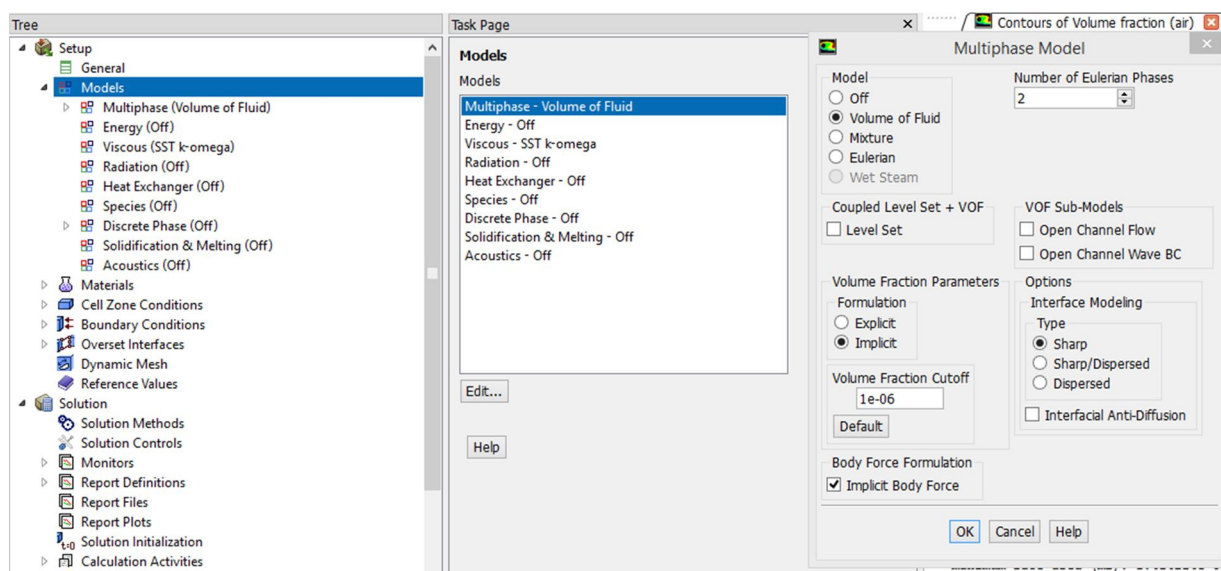


Imagen 5-16 Modelo VOF

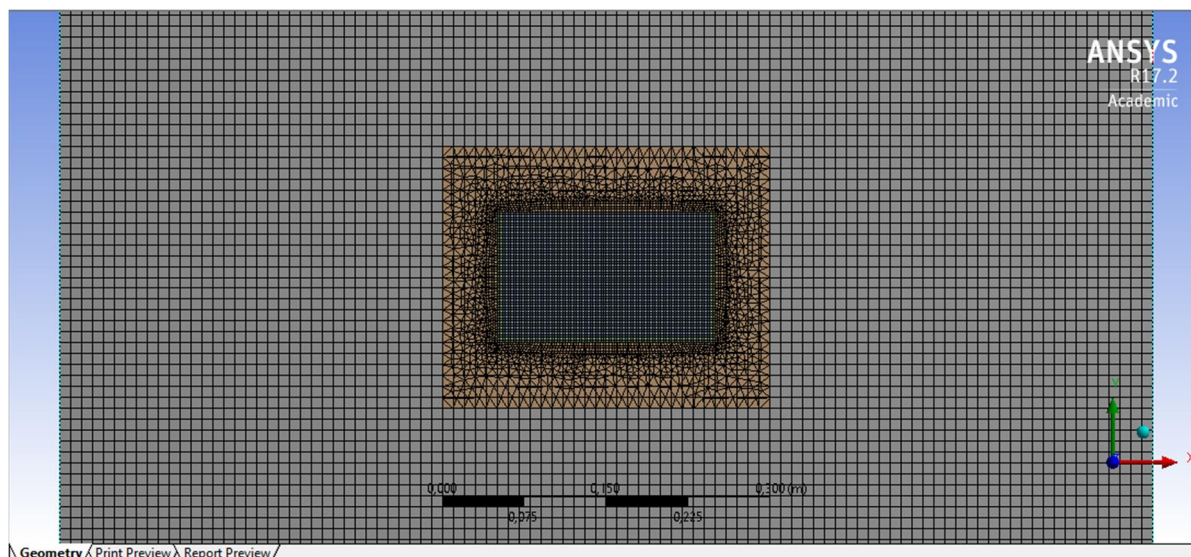


Imagen 5-17 Malla superpuesta

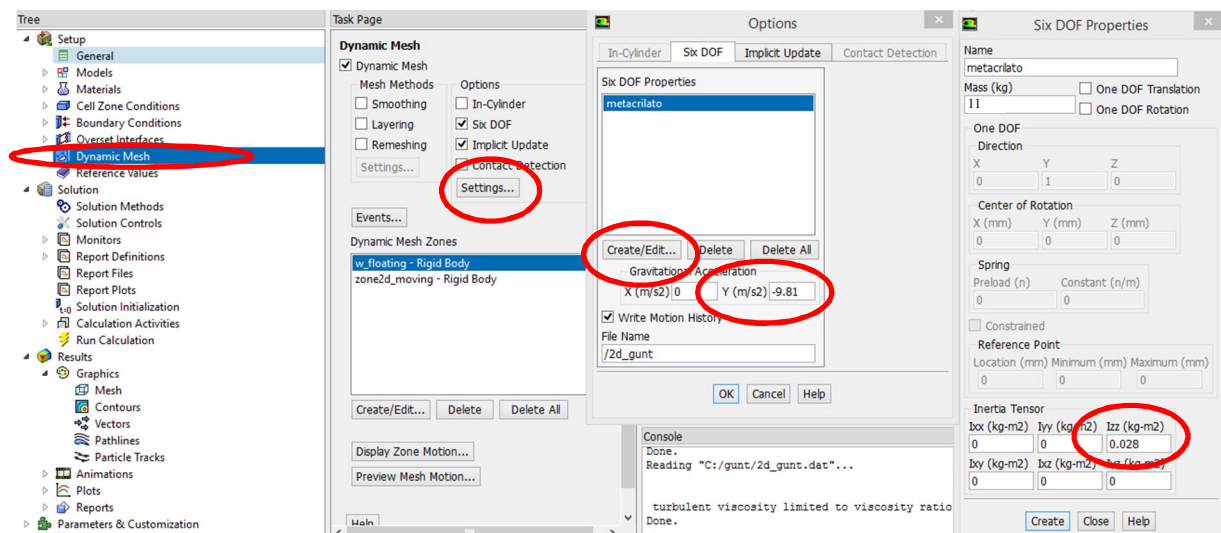


Imagen 5-18 Propiedades 6DOF

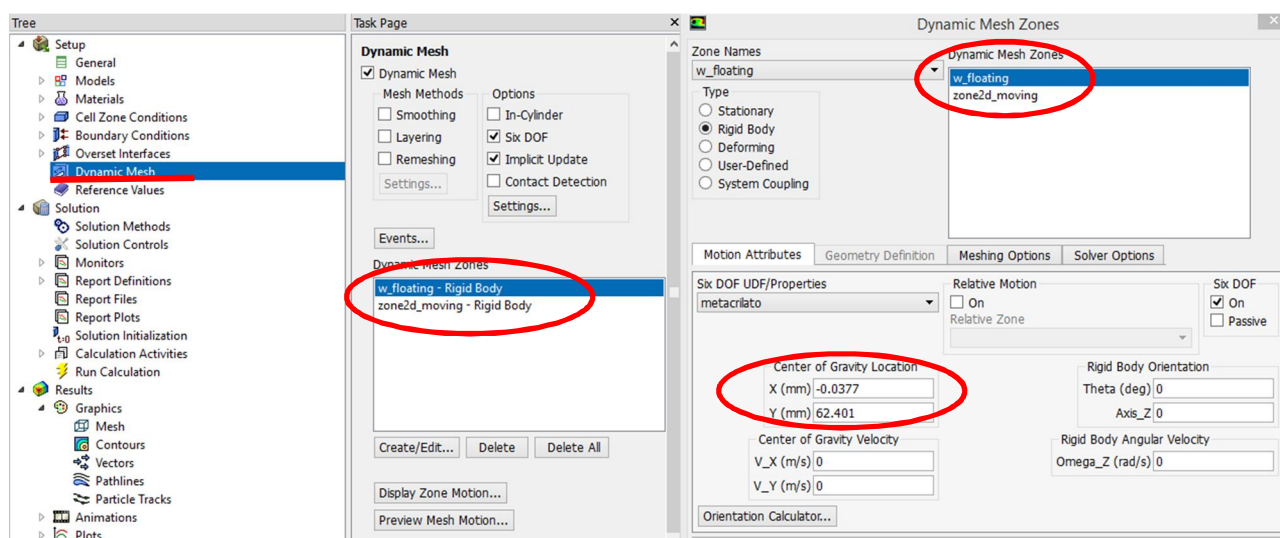


Imagen 5-19 Centro de gravedad

5.1.3.4 Post-procesado

Con los cálculos ya realizados el software proporciona una gran variedad de representación de los resultados como son velocidades, fuerzas, desplazamientos o presiones. Para este problema se obtiene la fuerza hidrostática ejercida por el fluido sobre las paredes del cuerpo flotante para ello se selecciona en el programa que se desea obtener la resultante de las fuerzas en el eje vertical sobre toda la superficie que forma el cuerpo flotante en la componente vertical, ya que como se nombró en el apartado 5.1.1 Introducción, la fuerza de empuje actúa sobre el centro de carena en sentido vertical. Para poder obtener este cálculo es necesario que el cuerpo flotante esté en su posición de equilibrio, para ello el software permite obtener cada cierto instante de tiempo que se le especifique obtener el valor de velocidad en el eje vertical para así comprobar cuando esta velocidad es nula, para cada instante de tiempo seleccionado el software le asocia la velocidad en ese instante y se guarda en un fichero de texto, el cual es empleado para obtener el Gráfico 5-1. Una vez el cuerpo alcanza el

régimen de equilibrio se obtiene la información sobre las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo flotante y se observa si el valor de la misma es el valor de la fuerza es un valor coherente y esperado, como se puede ver en la Imagen 5-23. Además se obtiene el desplazamiento del centro de gravedad para así comprobar que el desplazamiento de éste se corresponde justamente con el calado que se espera, ya que en la posición inicial, el cuerpo flotante se encuentra en contacto con el agua con su parte inferior.

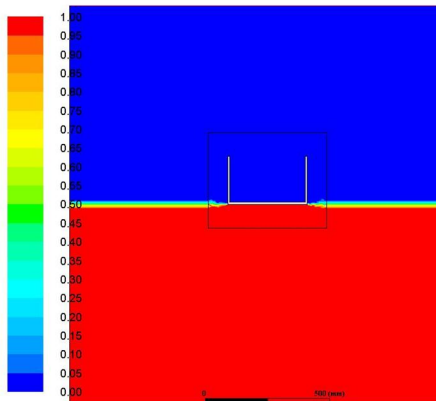


Imagen 5-20 Instante inicial

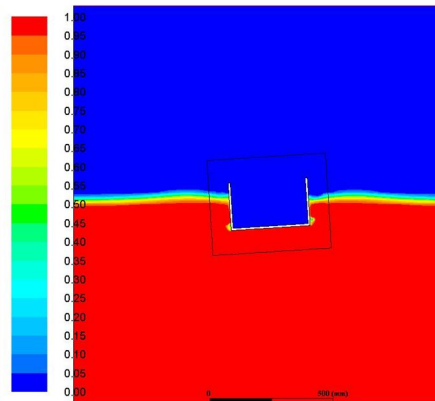


Imagen 5-21 Transición

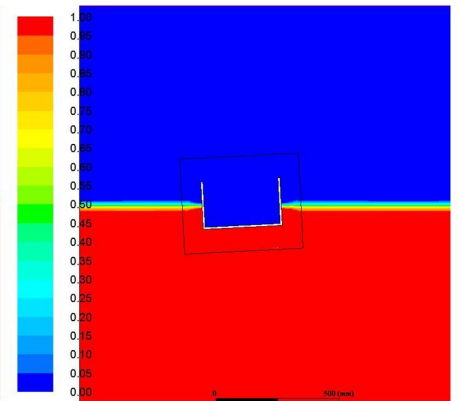


Imagen 5-22 Punto equilibrio

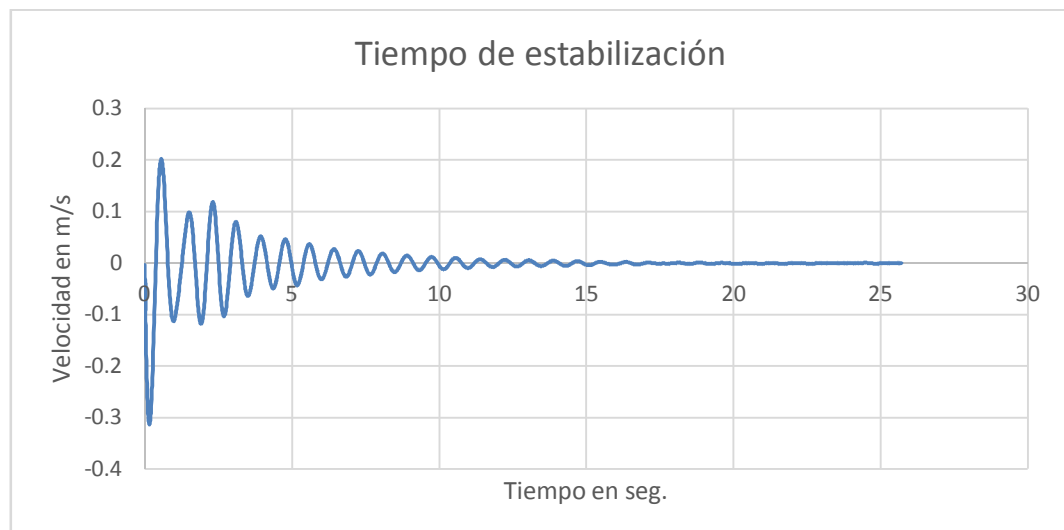
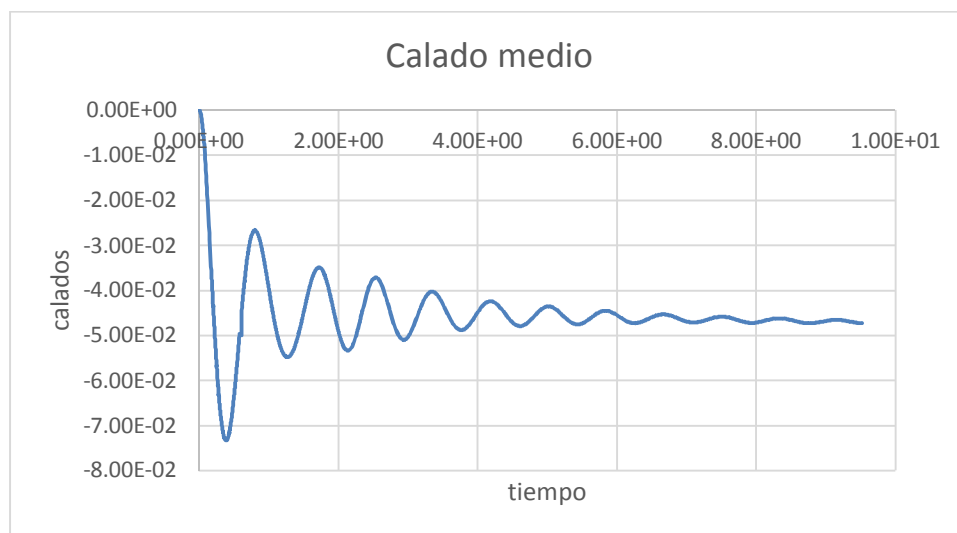


Gráfico 5-1 Tránsito al equilibrio



Forces - Direction Vector (0 1 0)	
	Forces (n)
Zone	Pressure
w_floating	108.07919

Net	108.07919

Imagen 5-23 Fuerza eje vertical

Como se apreciar en los gráficos e imágenes anteriores los resultados obtenidos concuerdan con los esperados. En primer lugar se obtiene un gráfico que muestra el tiempo que tarde en alcanzar el reposo el cuerpo. En segundo lugar se obtiene un gráfico en el que se observa la variación del centro de gravedad y se observa que se mantiene oscilando sobre 0.05 m y el calado medio experimental era de 0.056m, obteniéndose una diferencia de 0.007 m Por último, se obtiene el dato de la fuerza en la vertical y se observa que su valor es de 108.079 N y la teórica esperada es de 33.18 N. Esto es debido a que la simulación se está realizando en 2 dimensiones de tal forma que el software para la resolución de cálculos supone una profundidad de 1m. Es por tanto que la fuerza representada está calculada por unidad de longitud. Como nuestro cuerpo tiene de eslora 0.3 m para obtener la fuerza que realizaría el fluido sobre el cuerpo en 3 dimensiones es necesario multiplicar el valor obtenido x 0.3. Quedando como resultado $0.3 \times 108.079 = 32.42 \text{ N}$ que ya es un valor que se puede contrastar con la experiencia.

6 CÁLCULO DEL PERIODO DE BALANCE Y TRASLADOS DE PESOS

En capítulo se dará una introducción a la experiencia de estabilidad y la utilidad de su realización en los buques y posteriormente se pretende realizar un problema de estabilidad transversal y comparar los resultados de tres formas diferentes. En primer lugar se calculará de forma teórica aplicando los conocimientos adquiridos en la asignatura de Construcciones e instalaciones navales, se medirá experimentalmente el grado de escora y por último se realiza una simulación numérica del caso.

6.1.1 Introducción

En la construcción de un buque el astillero se encarga de realizar los cálculos necesarios para calcular la altura del centro de gravedad sobre la línea base (KG), ver Imagen 6-1. Para ello se tienen cuenta todos los pesos del barco y su situación en el buque. Con los momentos verticales de todos los pesos respecto a la línea base y el desplazamiento total del buque se consigue determinar el valor de KG mediante la siguiente fórmula;

$$KG = \frac{\sum w \times Kg}{W}$$

Siendo:

w= peso de los diferentes elementos del buque;

Kg= la situación del centro de gravedad de los elementos de un buque con respecto a la línea base;

W= el desplazamiento total del buque.

No obstante, este cálculo no se consigue con un resultado exacto ya que el cálculo del centro de gravedad de algunos elementos e instalaciones de a bordo es muy complicado y a media que avanza la construcción del buque, éste se puede ver sometido a diversas modificaciones que afectarán al cálculo del centro de gravedad.

La determinación de la forma lo más exacta y precisa posible de la posición del centro de gravedad es uno de los puntos de mayor trascendencia debido a su gran influencia sobre las

condiciones finales de estabilidad de un buque. Con el fin de obtener este significativo valor de una forma exacta, una vez esté construido un buque, se recurre a la realización de la Experiencia de Estabilidad.

Una de las pruebas realizadas en la experiencia de estabilidad de un buque es el cálculo del período de balance, el cual se puede definir como el tiempo transcurrido al completar un movimiento angular descrito por el buque entre las posiciones extremas de cada banda a partir de la posición de equilibrio. El periodo de balance nos proporciona una idea de lo estable que es el buque en cuanto a estabilidad transversal se refiere, ya que si dicho periodo tiene un valor muy elevado el buque es poco estable, si se tiene un valor medio el buque cuenta con una estabilidad aceptable y si el periodo tiene un valor muy pequeño se tiene un buque con una gran estabilidad. Con este periodo se puede calcular la altura metacéntrica del buque (GM).

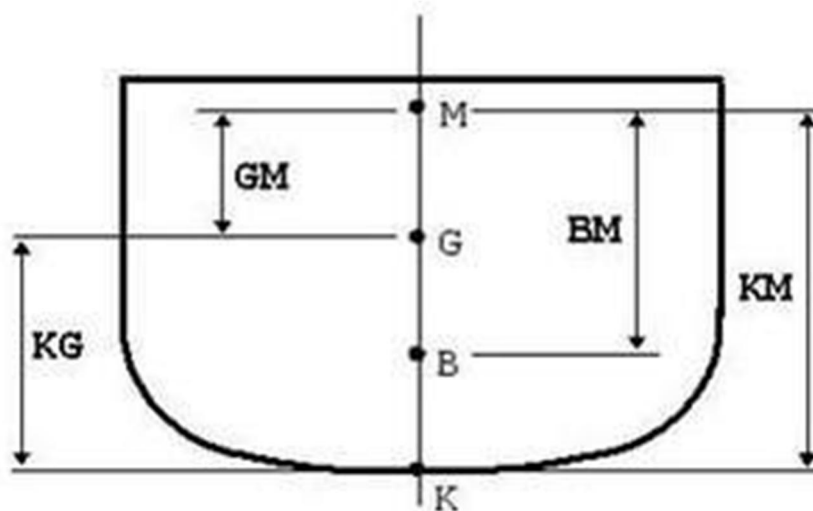


Imagen 6-1 Buque visto desde popa [3]

En primer lugar se pretende estudiar el efecto que tiene la elevación del centro de gravedad debido a un traslado de peso vertical. El período de balance y la altura metacéntrica están relacionados mediante la siguiente fórmula.

$$GM = \left(\frac{f \times B}{T} \right)^2$$

Siendo;

f= factor de corrección

- f= 0.78 si el buque se encuentra al 20% de su carga
- f= 0.75 si el buque se encuentra al 10% de su carga
- f= si el buque se encuentra al 5 % de su carga

B= manga máxima del buque

T= período de balance

La elevación de un peso implicará una reducción de la altura metacéntrica por lo que el periodo debería aumentar.

En la segunda parte de este caso se analizará y se simulará un traslado transversal y otro vertical. Obteniendo como resultado la escora final permanente del buque mediante el uso de tres técnicas



Imagen 6-3 Instante inicial período de balance

Sin elevación de pesos	Con elevación de pesos
$T_{medio} = 1.86 \text{ s}$	2.15 s

Gráfico 6-1 Comparativa períodos de balance

Para la realización de la segunda parte de este caso se realizarán dos traslados uno, transversal de 85 mm a estribo y traslado del peso vertical de 100 mm. Una vez se realicen los traslados y se observa el ángulo de escora en el clinómetro.

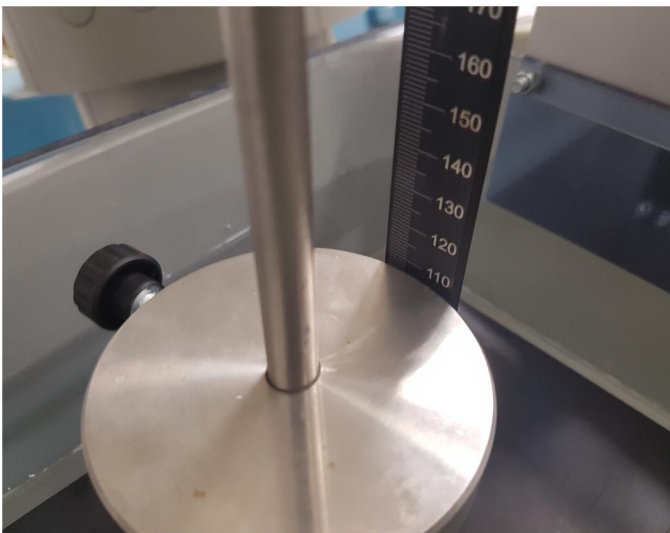


Imagen 6-4 Traslado vertical

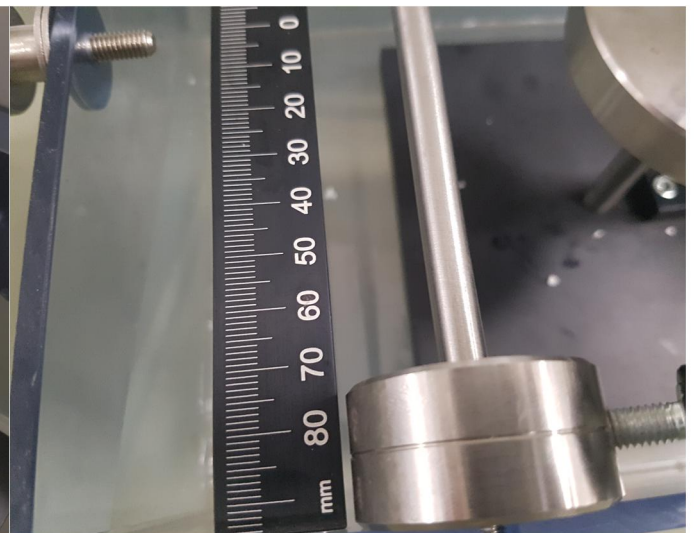


Imagen 6-5 Traslado transversal



Imagen 6-6 Escora final traslados

Como se observa en el clinómetro el ángulo de escora final es de 14° .

6.1.3 Simulación numérica

6.1.3.1 Modelado

El modelo CAD empleado para este apartado es el mismo que se ha utilizado en Demostración del efecto de distribución de presiones. Con la diferencia que se ha calculado su nuevo centro de gravedad. Dicho cálculo se puede efectuar a mano con la fórmula anteriormente nombrada o efectuar dicho traslado de peso en el software de modelado y obtener sus nuevas propiedades.

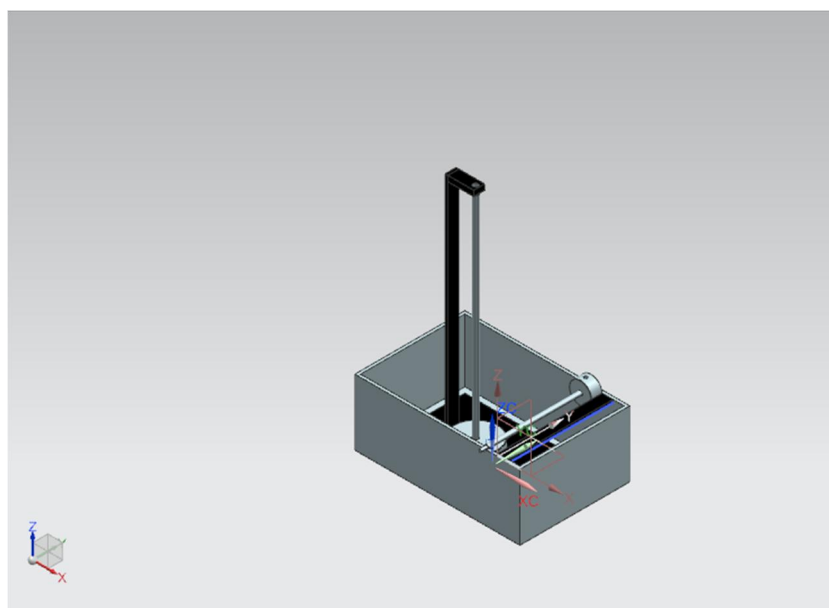


Imagen 6-7 Traslado horizontal modelo

Centro de masas		
Xcbar	=	-4.634021884
Ycbar	=	4.865304790
Zcbar	=	80.284901729

Imagen 6-8 Centro de gravedad con peso trasladado

6.1.3.2 Mallado

Al igual que con el modelado el mallado realizado es el que se ha utilizado en Demostración del efecto de distribución de presiones.

6.1.3.3 Análisis CFD

Debido a problemas encontrados a la hora de realizar los cálculos con el software la simulación del cálculo del período de balance no se ha podido realizar.

Por otra parte, sí se ha realizado la simulación del traslado de pesos vertical y trasversal ya que este es un problema más sencillo, ya que la única consideración que hay que tener es el establecer el centro de gravedad en las coordenadas obtenidas en el software CAD al realizar el traslado en 3 dimensiones y se realizan de nuevo los cálculos para así obtener el grado de escora final.

6.1.3.4 Post-procesado

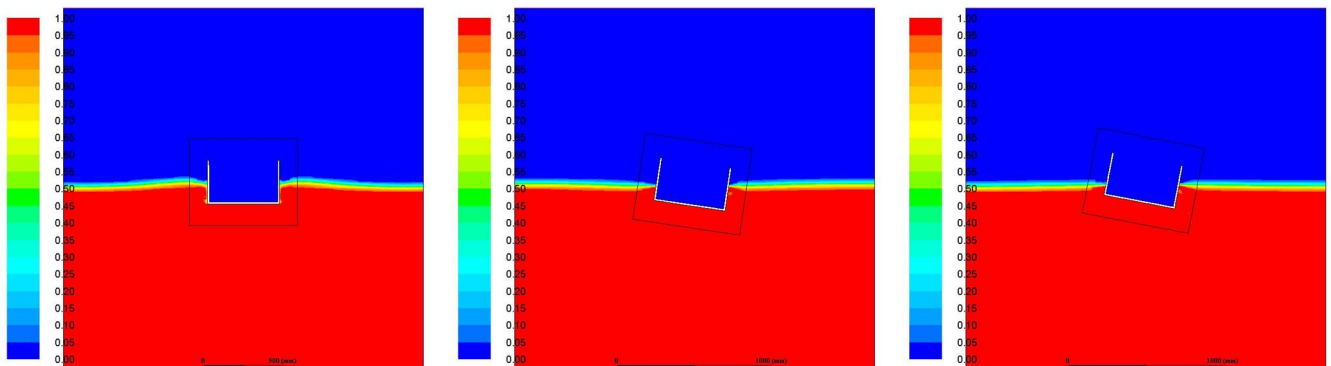


Imagen 6-9 Simulación traslado de pesos

La variación de escora observada en esta simulación se puede observar en la siguiente imagen donde se muestra el ángulo de giro que experimentó el objeto flotante partiendo de ángulo =0 y alcanzándose un ángulo de 12 °. Como se puede comprobar se obtienen 2 grados de diferencia con respecto a la experiencia real.

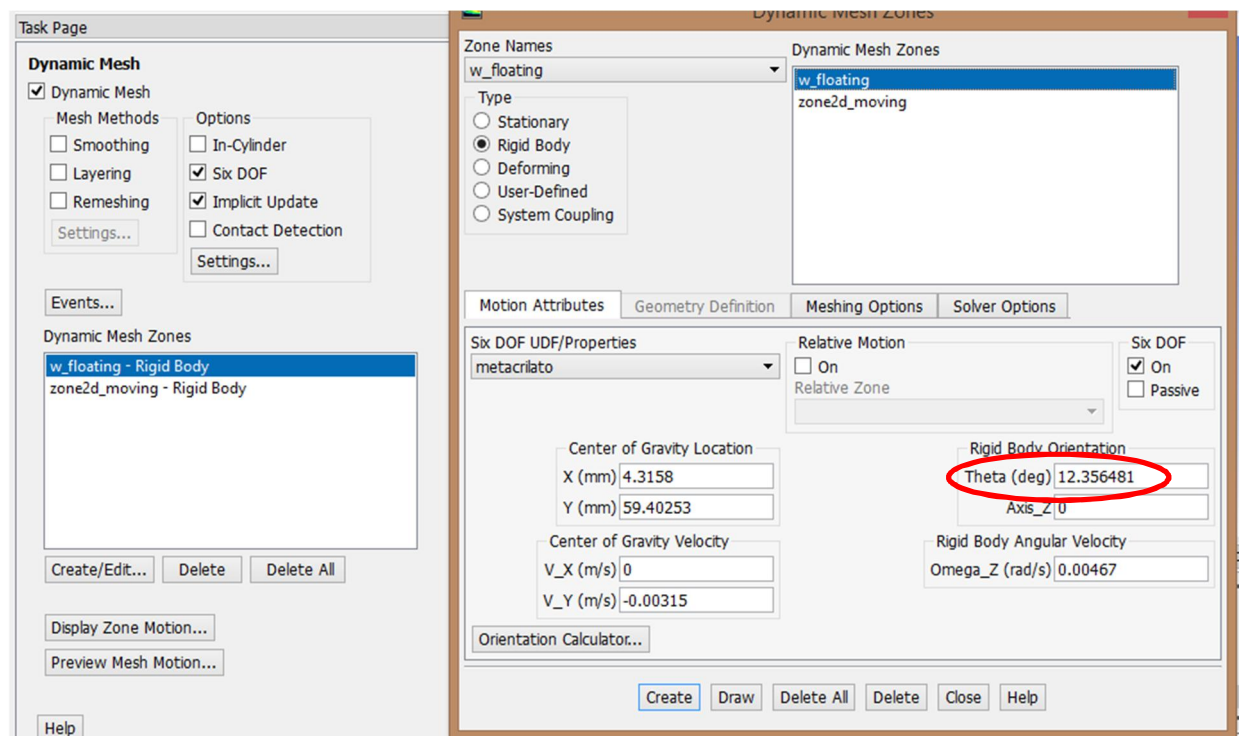


Imagen 6-10 Escora final

7 EFECTO DE SUPERFICIE LIBRE

7.1.1 Introducción

Como se ha nombrado en el apartado 5 conocer la posición del centro de gravedad de un buque es un elemento primordial para el estudio de la estabilidad del mismo. Entre los problemas existentes para el cálculo del centro de gravedad de todos los elementos del buque se encuentra la existencia de pesos líquidos alojados en tanques parcialmente llenos. En estos casos el líquido en su interior queda libre y se desplaza solidario a los movimientos de balance y cabezada de un buque ya que el líquido tiende a mantenerse en horizontal o incluso con la inercia desplazarse aún más hacia donde lo hagan los movimientos de desestabilización del buque, lo que provocará una disminución del brazo de adrizamiento, implicando un empeoramiento de la estabilidad del barco.

Cuando se da éste fenómeno se dice que el líquido tiene superficie libre, a la vez que se le denomina carena líquida.

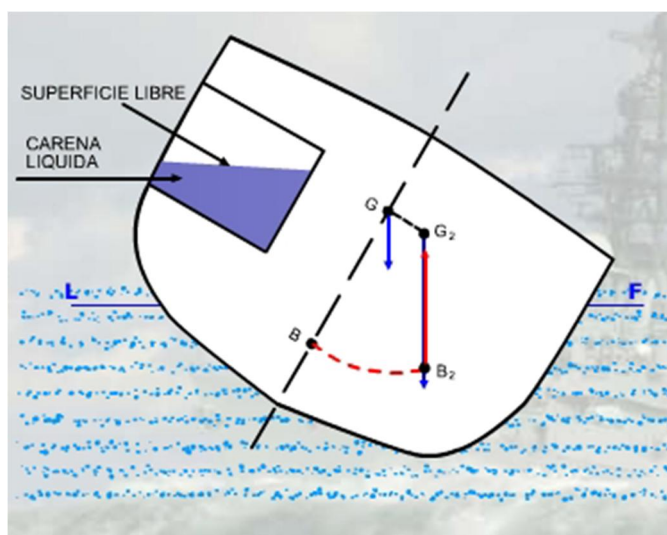


Imagen 7-1 Superficie libre [10]

Los tanques a bordo más comunes que contienen carenas líquidas suelen ser los tanques de combustible y agua, aunque también puede producirse por una avería que implique el embarque de agua en los compartimentos del buque.

El efecto producido por la superficie libre se puede observar en la siguiente imagen.

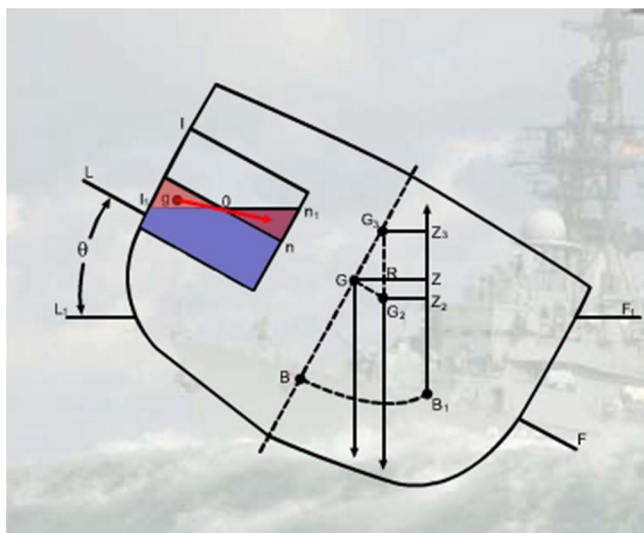


Imagen 7-2 Efecto superficie libre [10]

Al escorar el barco el líquido tenderá a posicionarse como se puede apreciar en la imagen por lo que se genera una “cuña de líquido” hacia la banda de escora lo que provoca un traslado del centro de gravedad del líquido implicando y cambio en el centro de gravedad total del buque.

Para la realización de los cálculos se supone que el desplazamiento del centro de gravedad efectúa una elevación virtual que se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$GG_3 = \frac{I \times \rho'}{V_c \times \rho}$$

Siendo;

GG_3 = elevación virtual del centro de gravedad del buque;

I = momento de inercia del área de la superficie libre en relación a su eje longitudinal;

ρ' = Densidad del líquido contenido en el tanque;

V_c = volumen de carena del buque;

ρ = Densidad del agua en la que flota el buque.

7.1.2 Experiencia real

Para comprobar el efecto de superficie libre se realizará una experiencia que permita compararla con un caso en el que no exista superficie libre. Al igual que el resto de experiencias se hará uso del Gunt HM.150.06, para ello se comparará el efecto que tiene un determinado peso fijo en la estabilidad y posteriormente se sustituirá dicho peso por un compartimento con superficie libre que en su conjunto tenga el mismo peso que el sustituido. Para ello se medirá el ángulo de escora. Como se ha mencionado en el apartado 7.1.1 sobre el efecto de superficie libre, tiene efecto de una elevación virtual del centro de gravedad, lo cual provoca una reducción de la altura metacéntrica. Al reducirse dicha altura el buque perderá estabilidad y se comprobará como afecta el tener esta superficie libre a la escora del buque.

El peso a añadir es un disco de 500 gramos que se hará firme al mástil del Gunt HM 150.06 y luego se retirará el disco y se añadirán 500 gramos de agua dentro del cuerpo flotante.

Para comprobar el efecto de superficie libre, en primer lugar se miden los pesos del agua y del disco.



Imagen 7-3 Medida masa disco



Imagen 7-4 Medida masa agua

En segundo lugar se realiza la misma experiencia pero con dos variables. La primera variable consistirá en realizar un traslado transversal de un peso y se observa el grado de escora final obtenido, habiéndose incluido inicialmente un peso fijo. El peso trasladado es el peso móvil horizontal y se traslada una distancia de 85 mm desde su posición inicial.

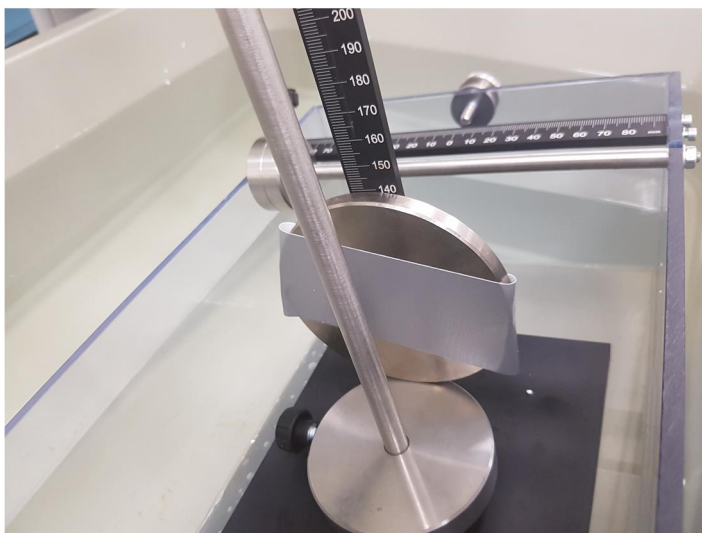


Imagen 7-5 Colocación de peso sólido fijo



Imagen 7-6 Escora final peso fijo

La segunda variable consiste en sustituir el peso fijo y añadir el agua en el cuerpo flotante.

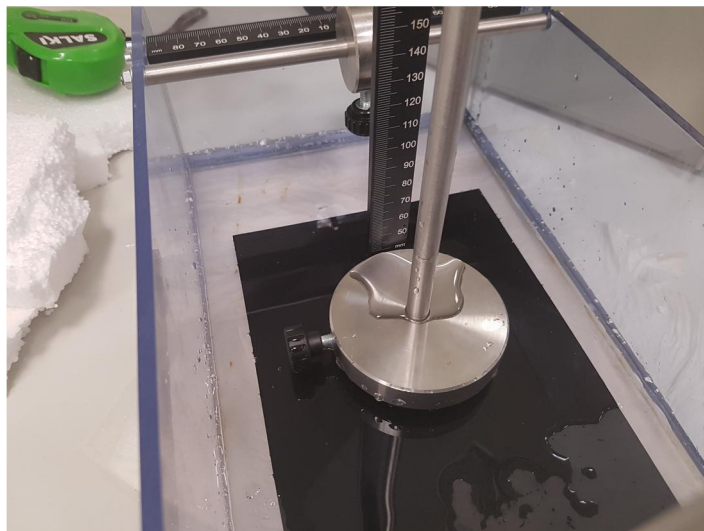


Imagen 7-7 Sustitución del peso fijo por agua

Una vez se encuentra el sólido en su nueva posición de equilibrio inicial se realiza el mismo traslado que en el caso anterior.

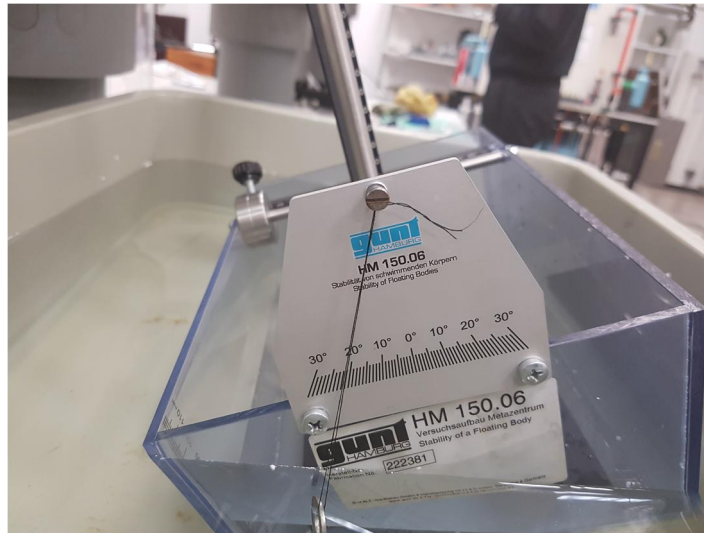
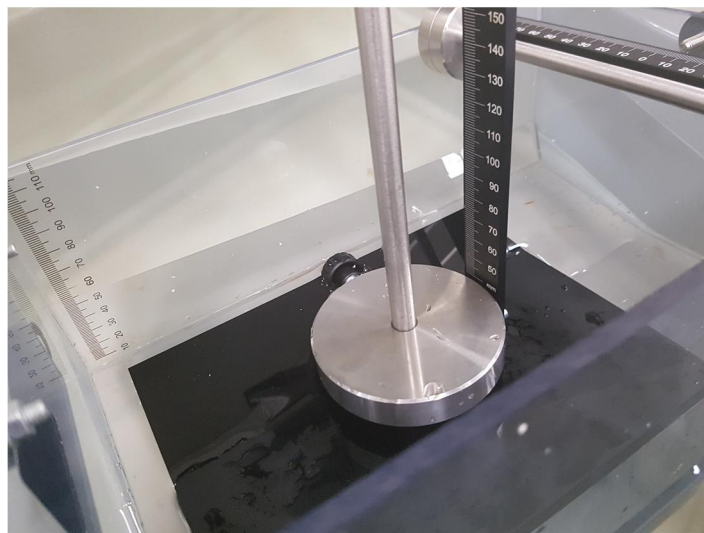


Imagen 7-8 Escora final con superficie libre

Debido a problemas de tiempo esta experiencia no se ha podido demostrar mediante simulación numérica per se ha comprobado experimentalmente el efecto que una superficie libre puede generar en un buque debido a esa variación del centro de gravedad que experimenta el buque como se ha nombrado en el apartado Introducción de este capítulo. En la siguiente imagen se puede apreciar la “cuña” de agua que provocará el desplazamiento del centro de gravedad del conjunto, y que se ha generado al escorar el buque y tener éste superficie libre en su interior.



8 SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE OLAS

8.1.1 Introducción

Como último problema se pretende analizar el comportamiento de un cuerpo flotante cuando éste se ve afectado por un determinado oleaje para así concluir con un problema que valga para demostrar que alcance puede llegar a tener la simulación numérica. Con respecto a los posibles resultados esta prueba pretende comprobar esa interacción del fluido con los sólidos flotantes y conseguir analizar así la flotabilidad así como sus movimientos tanto de traslación como de rotación del sólido flotante.

En este caso solamente se analizará este caso mediante simulación numérica ya que no se dispone de algún equipo que sea capaz de generar una ola controlada para así analizar sus efectos sobre un objeto real como el que se observa en la siguiente imagen. Por el contrario se toman los datos experimentales de ref. [11].



Imagen 8-1 Generador de olas

8.1.2 Simulación numérica

8.1.2.1 Modelado

El conjunto a modelar se ha obtenido de la referencia [12] desde la que se puede descargar la siguiente imagen que muestra las dimensiones del conjunto a modelar.

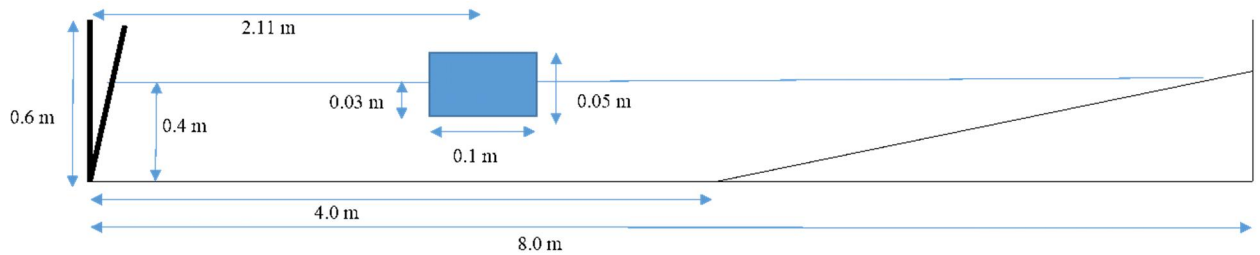


Imagen 8-2 Generador de olas [12].

Al igual que el resto de casos de estudio, el modelo empleado para esta simulación es un modelo en 2 dimensiones que está formado por tres sub – partes.

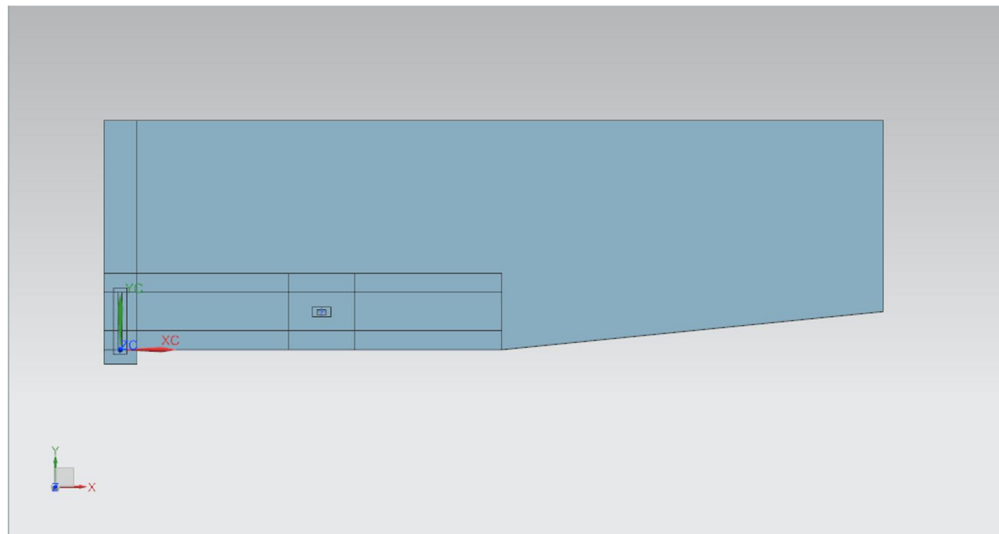


Imagen 8-3 Modelo del generador de olas

Las tres sub – partes que forman este modelo son el modelo del fondo denominado background, el modelo el cuerpo flotante denominado floating y el generador de olas denominado wavemaker.

- Modelo background este modelo es el que va a conformar el fondo de la simulación y que contendrá las fases tanto de agua como de aire que interactuará sobre el cuerpo flotante. Como se puede apreciar en la siguiente imagen el background se encuentra dividido en varias zonas las cuales se utilizarán posteriormente para mallarlas de diferentes formas.

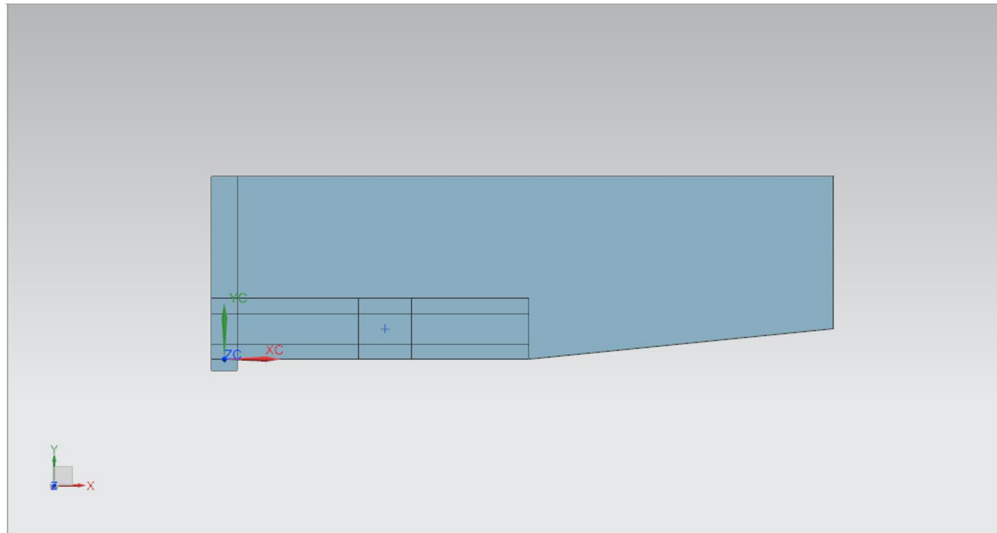


Imagen 8-4 Modelo del Background

- Modelo floating. Este es el modelo del cuerpo flotante el cual interactuará con el agua cuando se empiecen a generar las olas. Como se puede ver en la siguiente imagen el cuerpo flotante también cuenta con una superficie exterior que se ha diseñado por motivos de mallado.

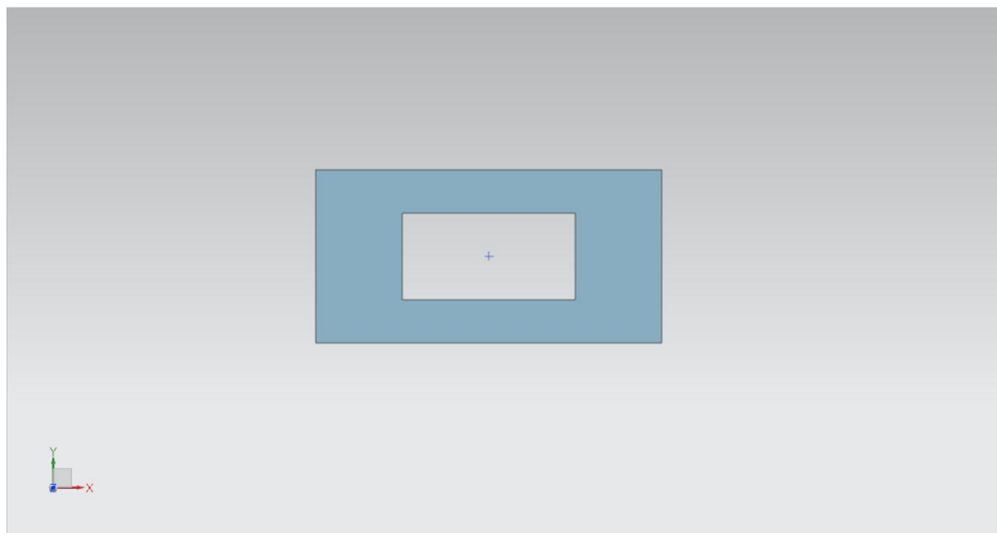


Imagen 8-5 Cuerpo flotante

- Modelo wavemaker: este modelo se corresponde con el generador de olas el cual siguiendo un patrón de movimiento determinado interactuará sobre el agua generándose así las olas. Al igual que en el modelo del cuerpo flotante, la superficie generada alrededor del generador de ola se debe a su posterior uso en el mallado.

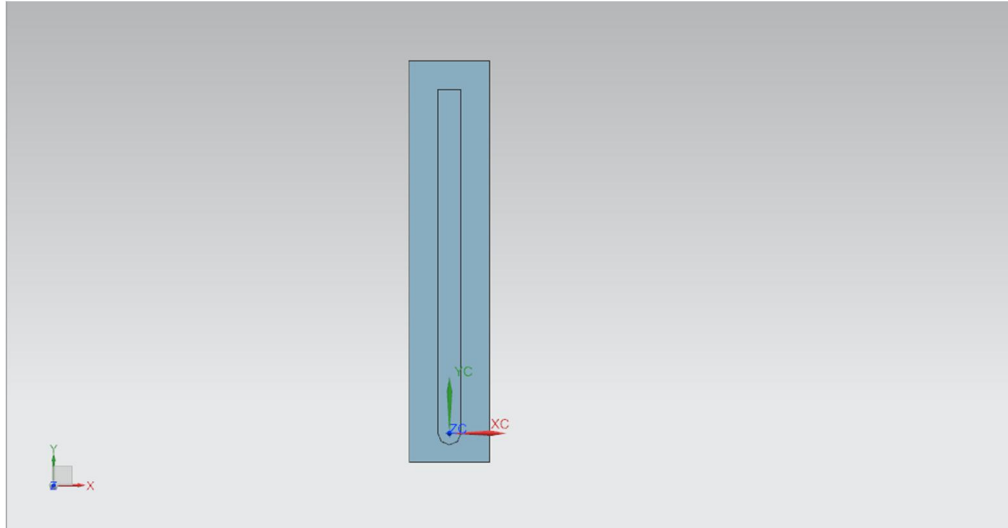


Imagen 8-6 Generador de olas

8.1.2.2 Mallado

Para el mallado se mallarán las zonas exteriores tanto del cuerpo flotante como del generador de olas con una malla con triángulos. Estas zonas actuarán como malla superpuesta para los cálculos como se nombra en el siguiente apartado. Con respecto al mallado del fondo se malla con cuadriláteros la zona en la que estará presente el cambio de fases. Estos cuadriláteros son los que interactuarán con el mallado superpuesto al realizar los cálculos. Fuera de la zona de influencia del agua se ha realizado un mallado triangular con un tamaño más elevado de nodos en las zonas en las que no se pretenden conseguir datos precisos.

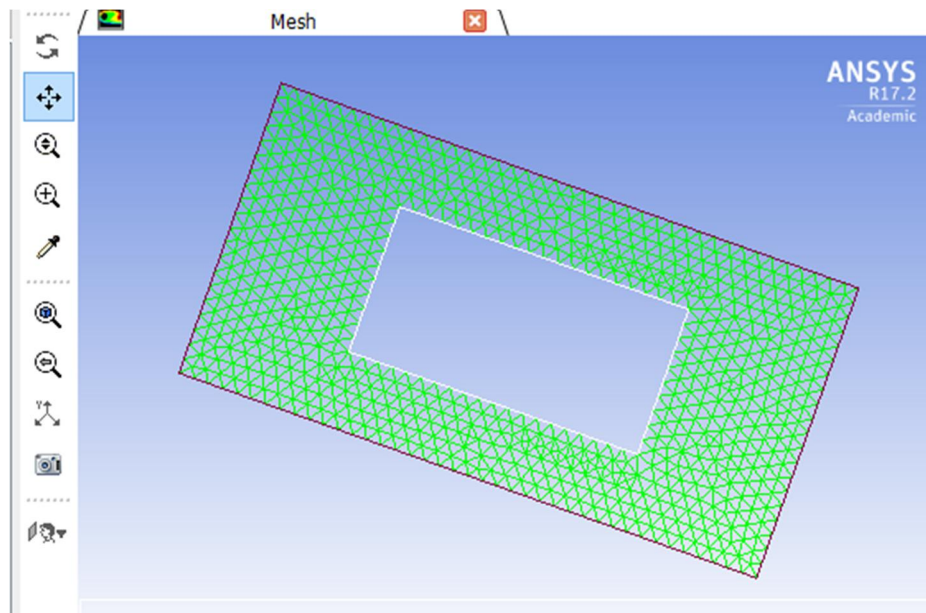


Imagen 8-7 Mallado cuerpo flotante

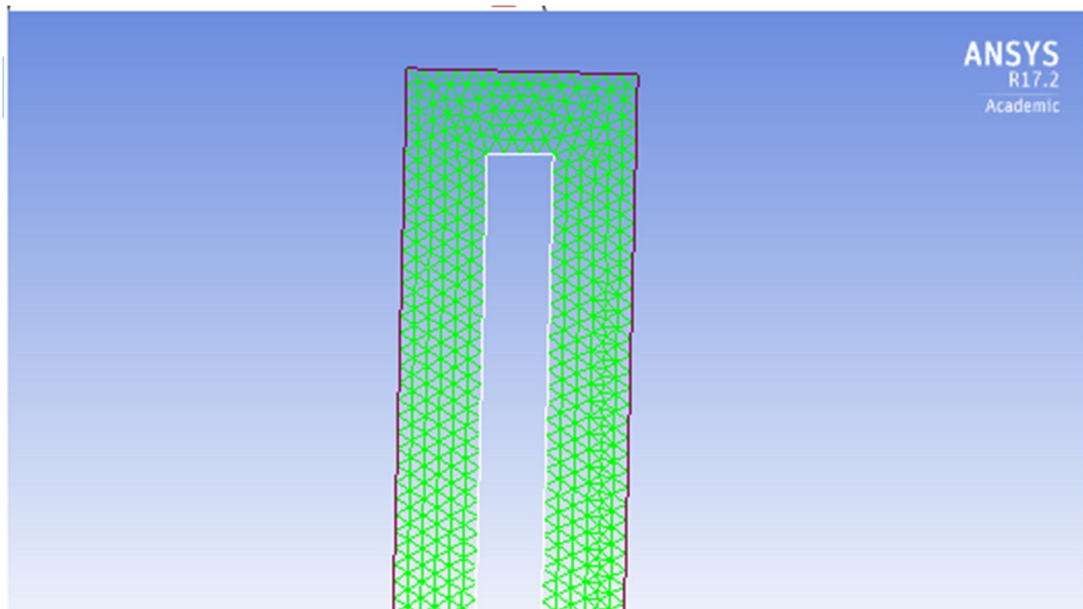


Imagen 8-8 Mallado generador de olas

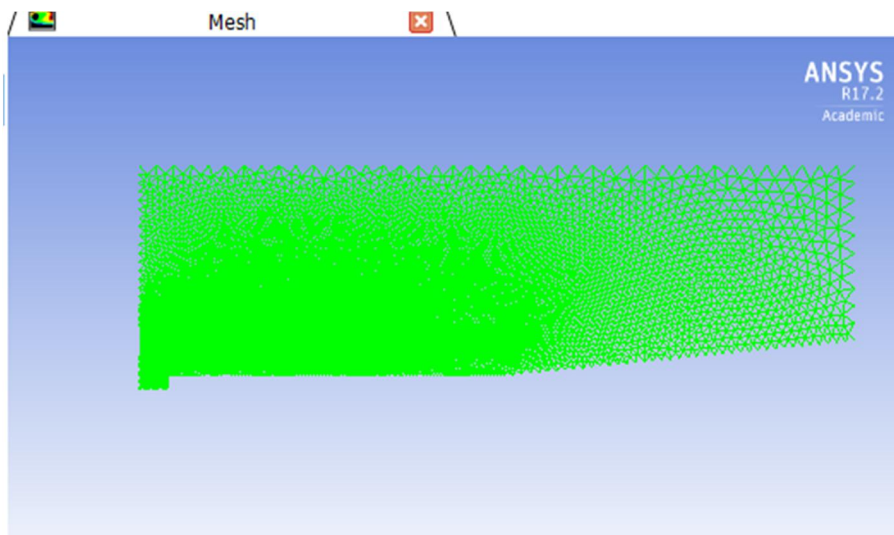


Imagen 8-9 Mallado completo del fondo

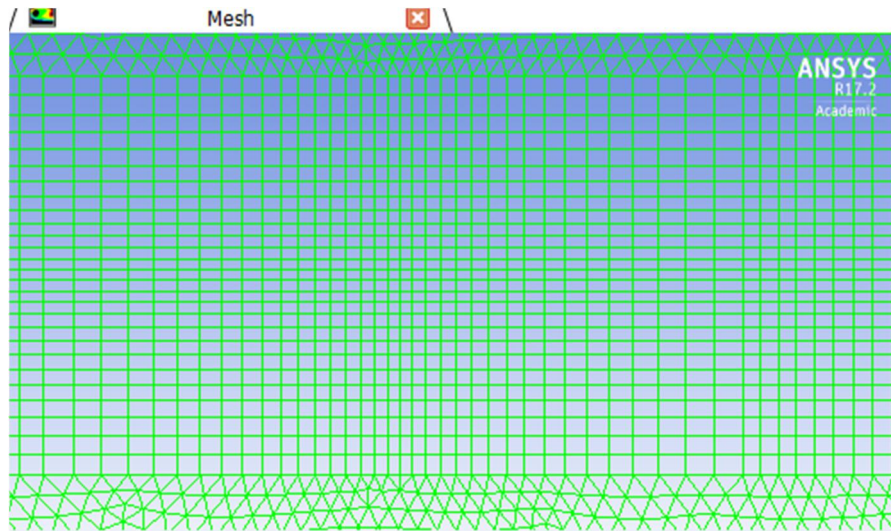


Imagen 8-10 Mallado zona cambio de fase

8.1.2.3 Análisis CFD

Para la resolución de esta simulación numérica se empleará la técnica de malla superpuesta al igual que los problemas anteriormente resueltos. En este caso se establecerá una malla superpuesta que rodee al cuerpo flotante y otra igual para el generador de olas (ver Imagen 8-12 e Imagen 8-13). Para la diferenciación de fases se empleará el modelo VOF.

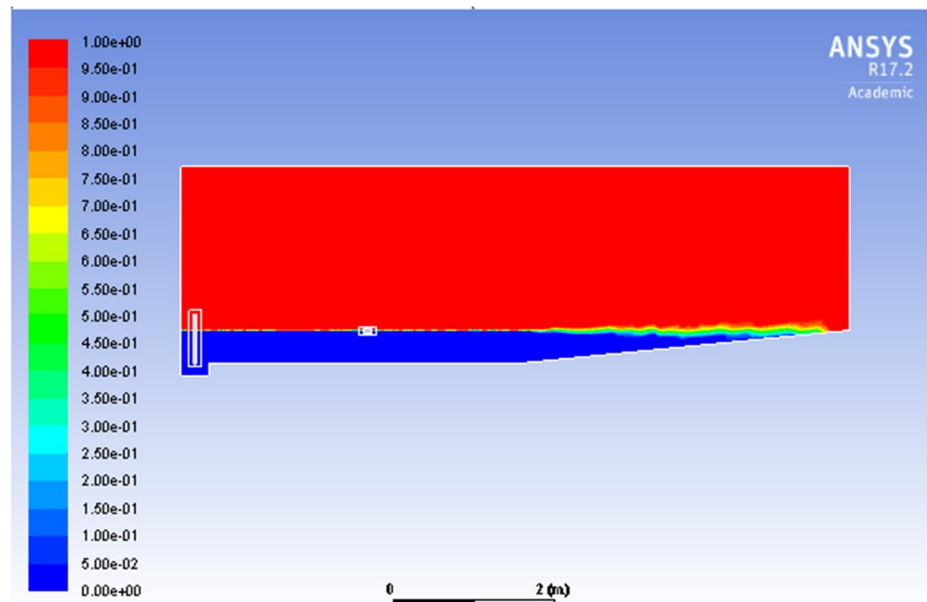


Imagen 8-11 Fracción volumétrica de aire

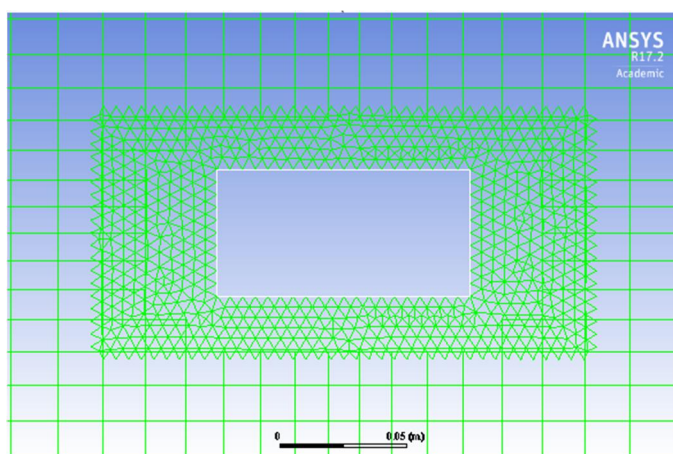


Imagen 8-12 Malla superpuesta objeto flotante

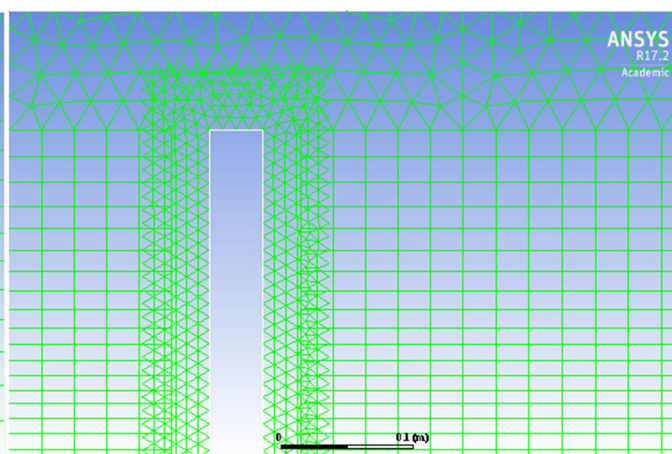


Imagen 8-13 Malla superpuesta generador de olas

Con respecto al movimiento de sólidos en este caso, se llevará a cabo de dos formas diferentes: para el generador de olas se le impondrá un movimiento mediante la creación de un perfil de movimientos cuyas características son conocidas como se puede ver en la Imagen 8-14. Por otra parte, para el movimiento del sólido se empleará el modelo 6DOF, el cual ya se ha utilizado en capítulos anteriores. El archivo de texto con el movimiento del generador de olas de las características detalladas se puede descargar del enlace de la referencia [12].

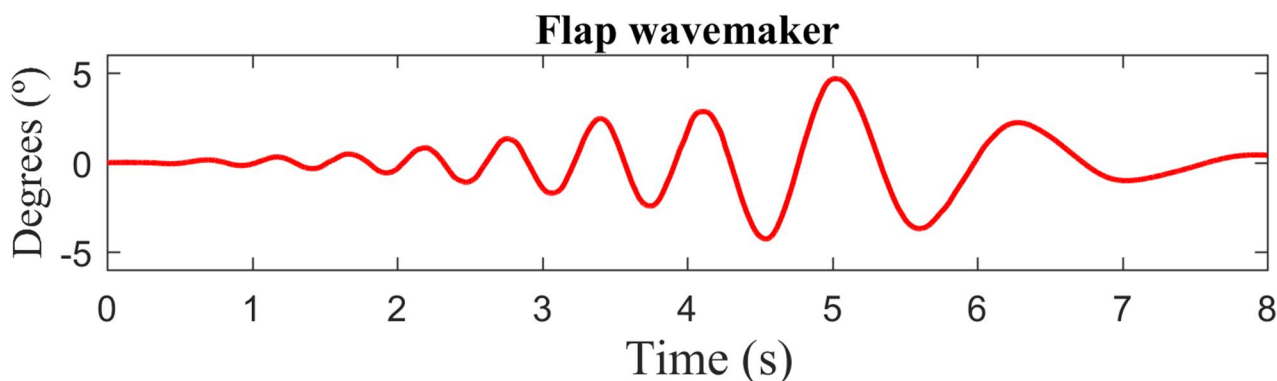


Imagen 8-14 Patrón de movimiento para generar la ola [11]

Para el cuerpo flotante y su zona de malla superpuesta se le establece como ley de movimiento el 6DOF y se le sitúa el centro de gravedad en la posición $x= 2.11$ m e $y=0.395$ m, ya que el sistema de referencia global se encuentra en la base del generador de olas.

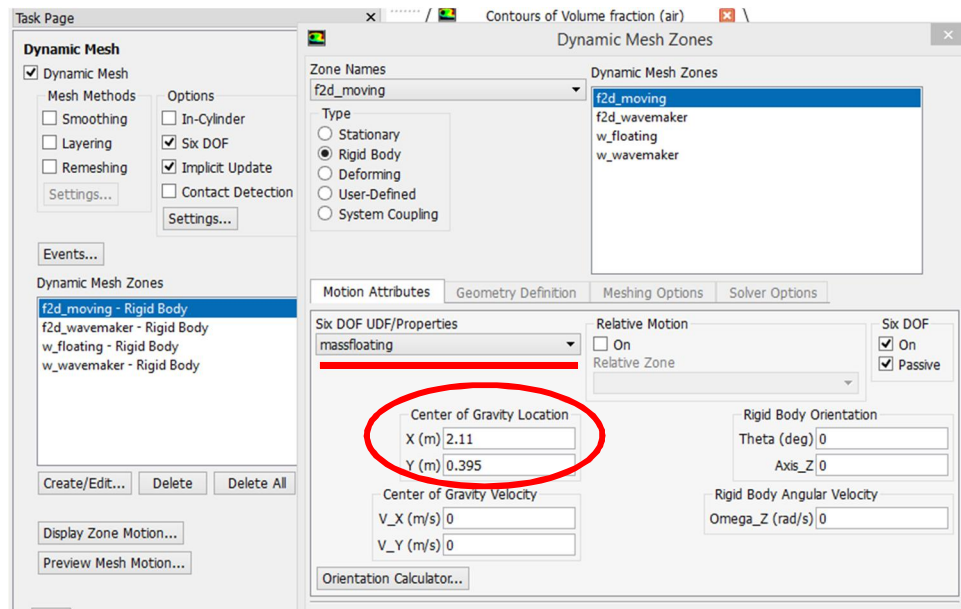


Imagen 8-15 6DOF en cuerpo flotante y centro de gravedad

El generador de olas seguirá el patrón de movimientos mencionado anteriormente y su zona de malla superpuesta se moverá solidaria al generador con el mismo patrón de movimiento. Para ello se lee el perfil de movimiento descargado de [12]. En la siguiente imagen se puede ver como se activa el perfil de movimiento de la zona de malla superpuesta del generador y como se encuentra su movimiento acompasado al del generador de olas (la casilla marcada como passive).

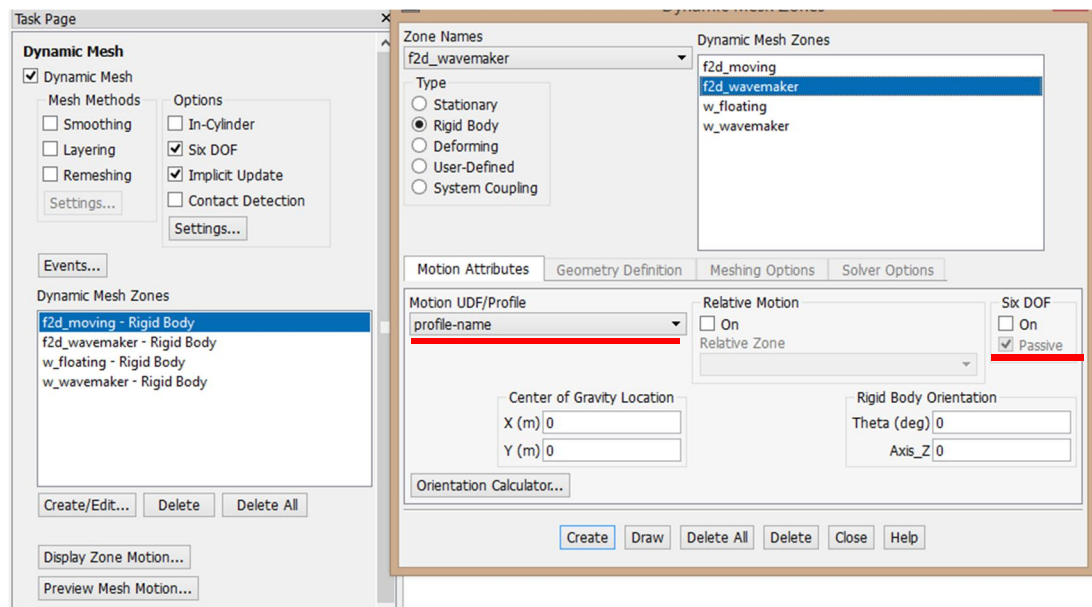


Imagen 8-16 Movimiento generador de olas

Una vez estén todos los parámetros ajustados se procede a realizar el cálculo.

8.1.2.4 Post-procesado

Para analizar los resultados obtenidos con la simulación, en primer lugar se muestra en las siguientes imágenes los valores de los diferentes movimientos del cuerpo flotante en una experiencia real y de la simulación numérica realizada en [11]. Estos datos se pueden conseguir accediendo a la referencia [12]. Las imágenes siguientes se corresponden a esos datos obtenidos de la referencia [12].

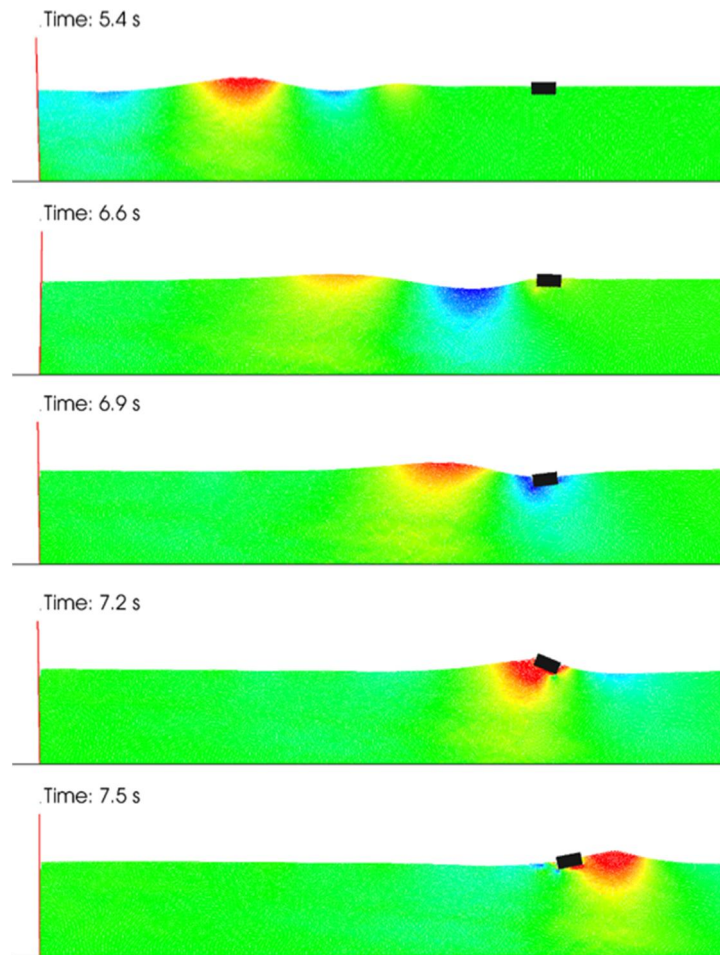
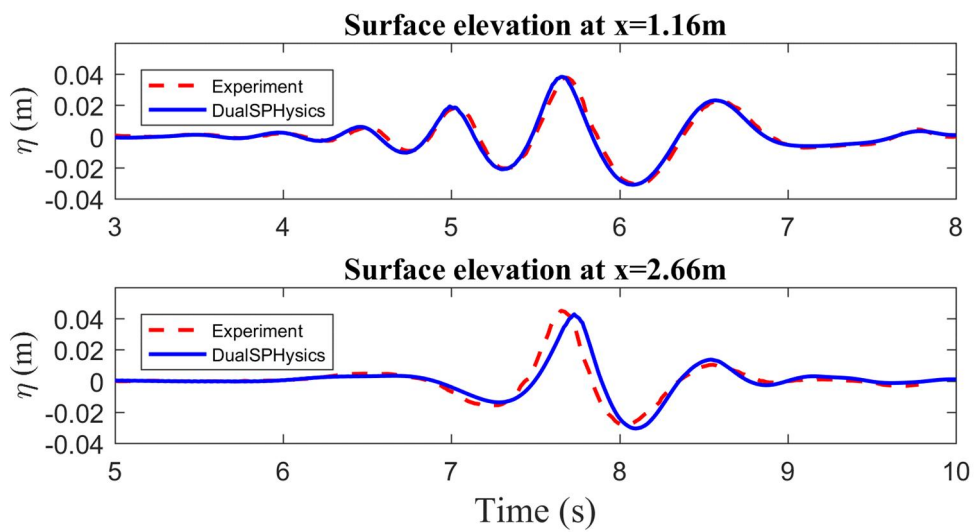


Imagen 8-17 Simulación olas cuerpo flotante [12]



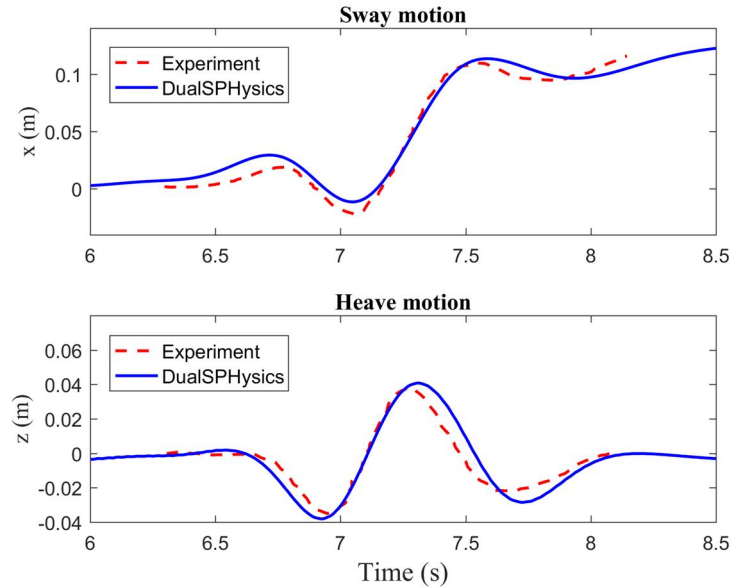


Imagen 8-18 Movimiento transversal y vertical [12]

Las siguientes imágenes se corresponden con la simulación numérica realizada para este trabajo donde se observa la acción interacción entre la ola y el sólido. La primera imagen se corresponde con el instante de tiempo $t = 5.5$ s que se encuentra dentro del periodo en el que la amplitud del generador es mayor. La segunda imagen se corresponde con el instante $t = 6.5$ s y en la última imagen se corresponde con el instante $t = 7$ s.

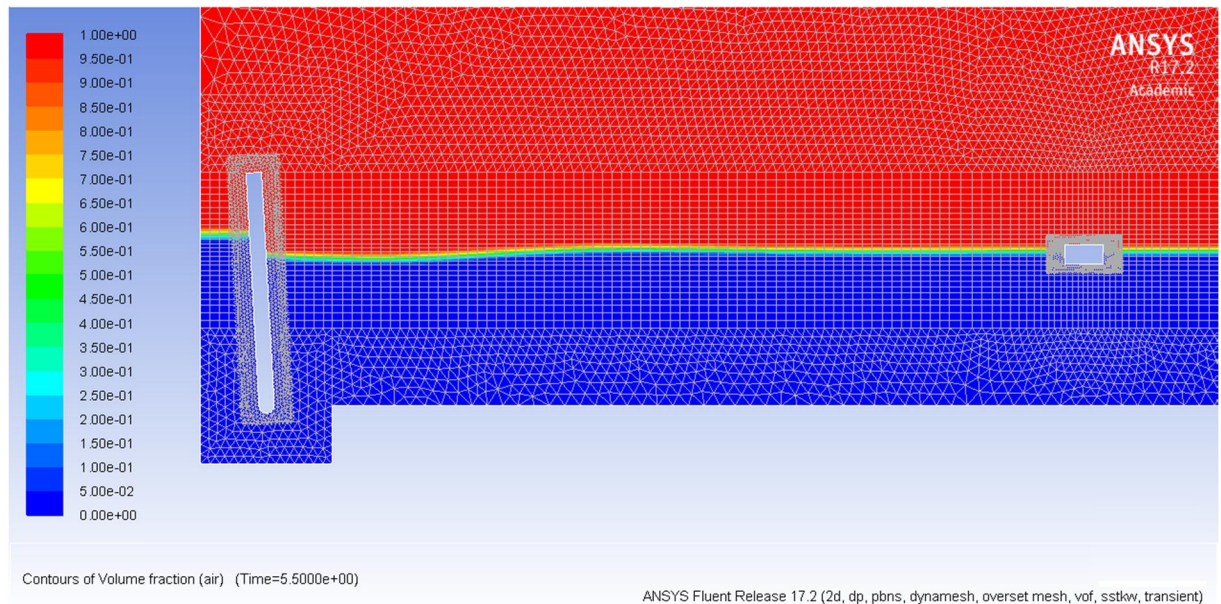


Imagen 8-19 Instante 5.5 s

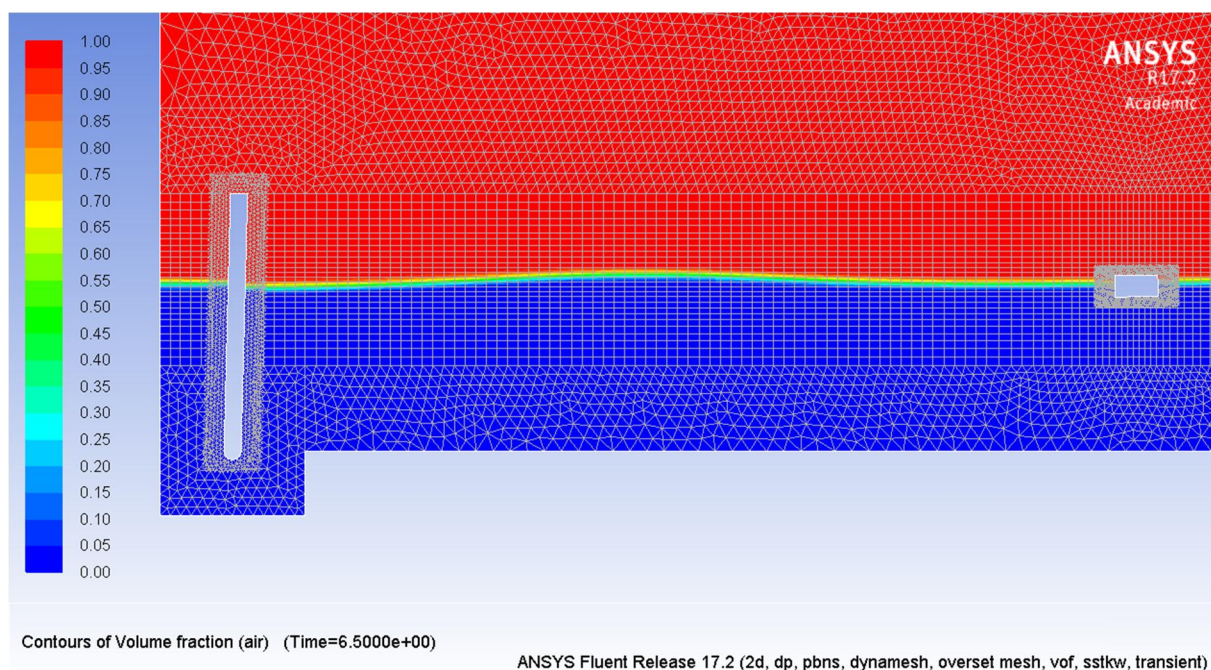


Imagen 8-20 Instante 6.5 s

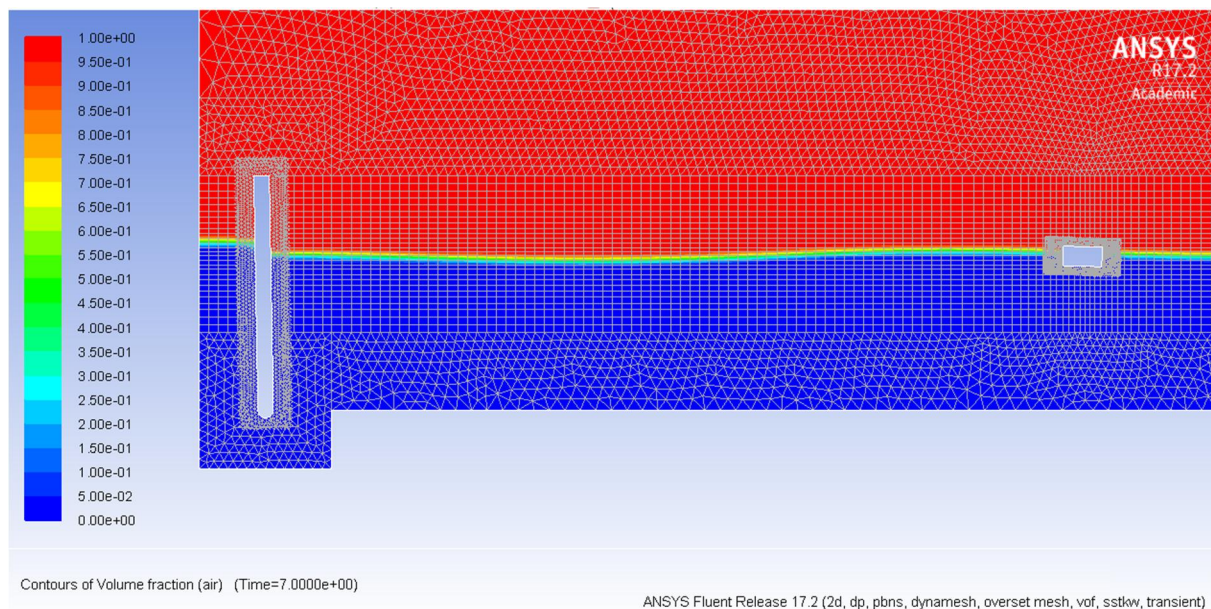


Imagen 8-21 Instante 7.0 s

En las figuras puede observarse como el movimiento del flap generador de olas es el impuesto por el perfil temporal y como el objeto flotante cambia la posición de su centro de gravedad y la orientación. Se observa que el perfil de ola en la superficie libre simulada está suavizado con respecto al experimento. Esta discordancia no ha podido subsanarse durante el período de tiempo de realización del TFG.

9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

9.1 Conclusiones

En lo referente a conclusiones extraídas de los resultados de este trabajo se ha conseguido cumplir con el objetivo principal aunque en algunos problemas no se haya podido llegar al resultado mediante la simulación numérica por diversos motivos. En cuanto a los objetivos secundarios que se establecieron en un primer momento, se ha podido comprobar los resultados de algunos casos de forma experimental y teórica. Por otra parte, en cuanto a conclusiones académicas extraídas de este trabajo, el proceso de aprendizaje fue algo lento en un comienzo, pero una vez se consigue un cierto nivel y control sobre las simulaciones, las ventajas que presentan éstas es muy grande.

En cuanto a conclusiones específicas de los métodos utilizados para los cálculos numéricos, destacar el empleo de las mallas superpuestas ya que presenta un muy buen comportamiento con el modelo multifásico VOF cuando un sólido interactúa sobre dos fluidos, como se ha llevado a cabo en las simulaciones.

9.2 Líneas futuras

Como se ha demostrado la dinámica de fluidos computacional presenta grandes posibilidades en muchos ámbitos es por ello que este trabajo se puede ampliar con otras simulaciones algo más complejas o mejorar este trabajo realizando las mismas experiencias pero con simulaciones en tres dimensiones que permitan que el aprendizaje y la interpretación de los resultados más intuitiva.

En cuanto a problemas de mayor entidad, disponiendo de un ordenador con grandes prestaciones se podría llegar a calcular las situaciones que mayor peligro implicarían a un determinado tipo de buque en función de todas las fuerzas externas a las que se encuentra sometido.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Armada Española, *ICP-02(A). Técnicas y materiales de control de averías*, 2014.
- [2] J. Bartrons I Casademont, *Estudio hidrodinámico por CFD del casco de una lancha motora*, Barcelona, 2014.
- [3] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons, 2011.
- [4] V. B. Practical Ship Hydrodynamics, 2012.
- [5] J. M. Fernández Oro, *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*.
- [6] Y. Ahmed, *Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull at different Froud numbers*, 2011.
- [7] Y. Chen, S. Chau y J. Kouh, *Application of two-phase fluid approach for free surface ship flow simulation*, *Journal of Chinese Institute of Engineers*, 2002.
- [8] Y. Andrillon y B. Alessandrini, *A 2D+T VOF Fully Coupled Formulation for Calculation of Breaking Free Surface Flow*.
- [9] Y. Xing-Kaeding y G. Jensen, *A unified approach to ship seakeeping and manoeuvring using a RANSE method*, 2005.
- [10] Armada Española, *I-CP-03(A). Estabilidad del buque. Publicación de la Armada Española*, 2015.
- [11] A. Crespo y A. Colagrossi, *2-D Wave interaction with floating body*.
- [12] A. Crespo y A. Colagrossi, «Spheric SPH European Research Interest Community,» [En línea]. Available: <http://spheric-sph.org/tests/test-12>.
- [13] I. Barbudo Escobar, *Fundamentos de Maniobra*, FRAGATA Libros Náuticos, 2004.
- [14] J. P. Xamán Villaseñor y M. Á. Gijón Rivera, *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*, 2015.
- [15] R. Mercer, C. Berhault, C. de Jouët, N. Moiroud y L. Shen, «Validation of CFD codes for slamming,» de *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2010.
- [16] B. Godderidge, A. Phillips, S. Lewis, S. Turnock, D. Hudson y M. Tan, *The simulation of free surface flows with Computational Fluid Dynamics*, University of Southampton.
- [17] ANSYS, *ANSYS User,s guide 17.2*.

- [18] ANSYS, *ANSYS Fluent Tutorial Guide 17.0*, Canonsburg, 2016.
- [19] Liang Cheng y Kervin Yeow, *Hydrodynamics VI. Theory and Applications*.
- [20] M. Abdelkader Dbjebli, B. Hamoudi, O. Imine y L. Adjlout, *The Application of a Smarthphone in Ship Stability Experiments*, 2015.
- [21] B. Bouscasse, A. Colagrossi, S. Marrone y M. Antuono, *Nonlinear water eave interaction eith floating bodies in SPH*, 2013.
- [22] R. Pérez Fernández, Estudio de estabilidad de buques. Desde los criterios usados más importantes hasta cómo aplicarlos en función del tipo de barco.
- [23] J. Olivella Puig, Teoría del buque. Estabilidad, varada e inundación..

ANEXO I: GLOSARIE DE TERMINOLOGÍA NAVAL

- Casco: Es el cuerpo del buque en rosca, es decir sin contar con su arboladura, máquinas ni pertrechos [2]
- Proa: Parte delantera del buque que va cortando las aguas del mar. [2]
- Popa: Parte trasera de la embarcación.
- Babor: Lado izquierda de un buque, visto desde popa a proa.
- Estribor: Lado derecho de un buque, visto desde popa.
- Eslora: Es la longitud del buque. Se representa por “L”. Según donde se mida esta longitud, se pueden considerar varios tipos de esloras.
- Manga: Es la anchura del buque. Se representa por “B”. Al igual que la eslora se puede medir en diferentes puntos.
- Puntal: Es la distancia entre el plano de la quilla y la cubierta principal.
- Quilla: Pieza de la estructura situada en la parte inferior del buque en sentido longitudinal construida a base de planchas de acero horizontales. [2]
- Calado en un punto de la flotación es la distancia vertical de la línea de la quilla a la flotación. Lo que está sumergida la proa o la popa se conoce como calado de proa y calado de popa representados por Cpr y Cpp respectivamente.
- Obra viva y obra muerta: La parte del casco estanca al agua, situada sobre la línea de flotación, se llama obra muerta. La obra viva es el volumen de la parte inferior o parte sumergida. Al volumen de la parte sumergida también se le conoce como volumen de carena.
- Centro de gravedad: Es el punto en el que se considera aplicado el peso del buque y si carga. Se representa por “G”. No tiene por qué coincidir con el centro geométrico del buque.
- Plano diametral: plano vertical que divide al casco de proa a popa en dos formas simétricas. El diametral es perpendicular a la línea de flotación estando el buque adrizado.
- Centro de carena Es el centro geométrico del volumen de carena y se representa por “B”. También se le conoce como centro de carena.

- Desplazamiento: Es el peso del volumen de líquido desplazado por un cuerpo sumergido.

ANEXO II: PROPIEDADES DEL GUNT HM 150.06

Las siguientes propiedades del Gunt HM 150.06 han sido obtenidas del modelado realizado en el software Siemens NX11. Las unidades empleadas son Kg para masas y mm como unidad de distancia.

Accuracy used	0.99000000
Density	0.000002335
Area	491734.609
Volume	1374018.786372200
Mass	3.208132751
Center of Mass	Xcbar= -4.63402188 Ycbar= -0.03772468 Zcbar= 62.40168341
First Moments	Mxc= -14086655737 Myc= -0.121025811 Mzc= 200.19288428
Moments of Inertia (work)	Ixxw = 43708.8827317 Iyyw = 55560.1312216 Izzw = 28596.81930157
Moments of Inertia (Centroidal)	Ixx= 31216.505179908 Iyy= 42998.866283294 Izz = 28527.922783697
Moments of Inertia (Spherical)	51371.647123450
Products of Inertia (Work)	Pyzw = -2.723080761 Pxzw= 241.191566500 Pxyw = 3.630777297
Products of Inertia (Centroidal)	Pyz = 4.829133570

	$P_{xz} = 1168.889773268$ $P_{xy} = 3.069941041$
Principal Moments of Inertia	$I_{xxp} = 42998.868509288$ $I_{yyp} = 31653.624009605$ $I_{zzp} = 28090.801728006$
Radii of Gyration (Centroidal)	$R_{gx} = 98.6429325$ $R_{gy} = 115.771680$ $R_{gz} = 94.2993957$
Radii of Gyration (Spherical)	126.542258
Principal Axes	$X_p(X) = -0.000229285$ $X_p(Y) = 0.999999924$ $X_p(Z) = -0.000315192$ $Y_p(X) = 0.936648737$ $Y_p(Y) = 0.000104357$ $Y_p(Z) = -0.350270085$ $Z_p(X) = -0.350270025$ $Z_p(Y) = -0.000375536$ $Z_p(Z) = -0.936648690$

Tabla 10-1 Propiedades Gunt HM 150.06

ANEXO III CURVAS HIDROSTÁTICAS GUNT HM 150.06

