



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelización mediante código CFD de la inundación del  
compartimento dañado de un buque.*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Pedro Luis Ortega Pérez

**DIRECTORES:** Antonio Eirís Barca

**CURSO ACADÉMICO:** 2016-2017

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelización mediante código CFD de la inundación del  
compartimento dañado de un buque.*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

El TFG se basa en la aplicación de la simulación numérica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para el estudio de una inundación en un compartimento dañado de un buque y la evolución temporal del agua embarcada. Para ello, se asumen dimensiones conocidas del compartimento y un orificio.

En primer lugar, se diseña un montaje experimental sobre el que realizar ensayos empíricos. El primero de ellos es calcular el tiempo mediante coeficiente de descargas. Tras este, se inunda el compartimento, observando su evolución temporal y las modificaciones que genera sobre el cuerpo flotante.

Tras los ensayos empíricos, se procede a realizar el modelado mediante programas CAD y se procede con la metodología CFD, que comienza con la definición del dominio computacional. Acto seguido se lleva a cabo la discretización del dominio. Ya en la etapa de resolución se definen las condiciones de contorno y se seleccionan los esquemas numéricos siguiendo recomendaciones internas del programa y de fuentes bibliográficas.

Para finalizar los resultados obtenidos computacionalmente se comparan con los experimentales, realizándose una valoración conjunta.

## **PALABRAS CLAVE**

Inundación, CFD, VOF, Estabilidad, Mecánica de Fluidos.



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a mi Director de TFG D. Antonio Eirís, por toda su ayuda prestada, pero, ante todo, por haber tenido paciencia conmigo.

A mi familia, que siempre me han apoyado en cualquier decisión que he tomado en estos 5 años en la Escuela Naval Militar.

A mis compañeros de la Promoción 417-147, ya que, sin ellos, estos 5 años se habrían hecho más largos.



# CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Inundación en buques .....	7
1.2 Introducción al CFD .....	8
1.2.1 Ventajas de las técnicas CFD .....	8
1.3 Motivación .....	9
1.4 Recursos.....	9
1.4.1 ANSYS FLUENT.....	9
1.4.2 GUNT Hamburg.....	10
1.5 Objetivos .....	10
1.6 Estructura de la Memoria.....	11
2 Fundamentos teóricos .....	12
2.1 Mecánica de Fluidos .....	12
2.1.1 Conceptos básicos .....	12
2.1.2 Fundamentos del movimiento de fluidos.....	14
2.2 Teoría sobre inundación.....	15
2.2.1 Descripción del flujo .....	15
2.2.2 Inundaciones en la Armada.....	16
2.3 Estabilidad.....	17
2.3.1 Geometría de la carena .....	18
2.3.2 Estabilidad transversal .....	20
2.3.3 Estabilidad longitudinal .....	27
2.3.4 Superficie libre .....	28
2.3.5 Libre comunicación .....	29
3 Estado del arte .....	31
3.1 Revisión de trabajos previos .....	31
3.2 Métodos existentes .....	32
3.2.1 Método de volúmenes finitos.....	32
3.3 Aplicación del CFD a flujos industriales. Flujos multifásicos.....	33
3.3.1 Modelos multifase .....	34
3.3.2 VOF .....	34

4 Metodología descriptiva.....	36
4.1 Demostración experimental .....	36
4.1.1 Recursos.....	36
4.1.2 Ensayo real.....	43
4.2 Metodología numérica .....	45
4.2.1 Modelado CAD .....	45
4.2.2 Empleo del software ANSYS FLUENT .....	48
4.2.3 Primer ensayo .....	53
4.2.4 Segundo ensayo.....	56
5 Conclusiones .....	60
5.1 Conclusiones .....	60
5.2 Líneas futuras .....	60
6 Bibliografía.....	61
Anexo I: Imágenes Modelado CAD .....	63
Anexo II: Glosario naval.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Inundación en un buque (tomada de [1]) .....	7
Figura 1-2 HM 150.06 (tomada de [4]) .....	10
Figura 2-1 Flotabilidad (tomada de [5]) .....	14
Figura 2-2: Flujo entre dos compartimentos mediante una apertura (tomada de [6]) .....	16
Figura 2-3 Volumen de carena (tomada de [5]) .....	18
Figura 2-4 Plano de flotación (tomada de [5]) .....	18
Figura 2-5 Plano transversal (tomada de [5]) .....	19
Figura 2-6 Líneas perpendiculares (tomada de [5]) .....	19
Figura 2-7 Cuaderna Maestra (tomada de [5]) .....	19
Figura 2-8 Línea de crujía (tomada de [5]) .....	20
Figura 2-9 Centros de carena (tomada de [5]) .....	20
Figura 2-10 Posición de G y B (tomada de [5]) .....	21
Figura 2-11 Par de fuerzas y brazo adrizante (tomada de [5]) .....	21
Figura 2-12 Centro de carena fuera de la vertical de G (tomada de [5]) .....	22
Figura 2-13 Centro de carena dentro de la vertical de G (tomada de [5]) .....	22
Figura 2-14 GZM (tomada de [5]) .....	22
Figura 2-15 Traslado de peso transversal (tomada de [5]) .....	24
Figura 2-16 Curvas transversales (tomada de [5]) .....	26
Figura 2-17 Curva de estabilidad corregida (tomada de [5]) .....	26
Figura 2-18 Centro de Flotación (tomada de [5]) .....	27
Figura 2-19 Efecto superficie libre (tomada de [5]) .....	28
Figura 2-20 Libre comunicación (tomada de [5]) .....	29
Figura 2-21 Diferencia libre comunicación y superficie libre (tomada de [5]) .....	29
Figura 3-1 SLIC (tomada de [11]) .....	35
Figura 3-2 PLIC (tomada de [11]) .....	35
Figura 4-1 Cuerpo Flotante .....	36
Figura 4-2 Báscula .....	37
Figura 4-3 Placa de soporte peso vertical .....	37
Figura 4-4 Varilla vertical .....	38
Figura 4-5 Peso vertical .....	38
Figura 4-6 Escala de medición vertical .....	39
Figura 4-7 Varilla Horizontal .....	39
Figura 4-8 Peso Horizontal .....	40
Figura 4-9 Escala Horizontal .....	41

Figura 4-10 Montaje completo .....	41
Figura 4-11 Módulo de experimentos completo .....	42
Figura 4-12 Láminas de metacrilato .....	42
Figura 4-13 Pegado de las láminas .....	43
Figura 4-14 Primer ensayo .....	43
Figura 4-15 Segundo ensayo .....	44
Figura 4-16 Doble compartimentación .....	45
Figura 4-17 Cuerpo flotante compartimentado .....	47
Figura 4-18 Corte de sección .....	47
Figura 4-19 Background .....	48
Figura 4-20 3D .....	48
Figura 4-21 Workbench .....	49
Figura 4-22 Design Modeler .....	50
Figura 4-23 Moving parts .....	51
Figura 4-24 Mallado .....	52
Figura 4-25 Interfase background-elemento móvil .....	52
Figura 4-26 Mallado orificio .....	53
Figura 4-27 Setup .....	53
Figura 4-28 Set Units .....	54
Figura 4-29 Selección de materiales .....	54
Figura 4-30 Modelo multifase .....	55
Figura 4-31 Fases .....	55
Figura 4-32 Resultado computacional del primer ensayo .....	56
Figura 4-33 Six DOF .....	56
Figura 4-34 Overset .....	57
Figura 4-35 Primera iteración .....	57
Figura 4-36 Novena iteración .....	58
Figura 4-37 Trigésima iteración .....	58
Figura 4-38 Última iteración .....	59
Figura 0-1 Cuerpo flotante .....	63
Figura 0-2 Soporte .....	63
Figura 0-3 Escala Vertical .....	63
Figura 0-4 Varilla vertical .....	64
Figura 0-5 Peso Vertical .....	64
Figura 0-6 Escala Horizontal .....	64
Figura 0-7 Varilla Horizontal .....	65

Figura 0-8 Peso Horizontal .....	65
Figura 0-9 Ensamblaje completo.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Ventajas e inconvenientes utilización CFD (tomada de [2]).....	9
Tabla 2-1 Parametros en condiciones ambientales (tomada de [6]).....	15
Tabla 2-2 Caudal de inundaciones según altura y el diámetro (tomada de [1]).....	17
Tabla 3-1 Valores de $\emptyset$ en la ecuación general de transporte (tomada de [2]) .....	33
Tabla 4-1 Dimensiones cuerpo flotante .....	36
Tabla 4-2 Dimensiones placa .....	37
Tabla 4-3 Dimensiones varilla vertical.....	38
Tabla 4-4 Dimensiones Peso vertical .....	38
Tabla 4-5 Dimensiones Escala de Medición vertical .....	39
Tabla 4-6 Dimensiones varilla horizontal.....	40
Tabla 4-7 Peso horizontal .....	40
Tabla 4-8 Escala Horizontal.....	41
Tabla 4-9 Propiedades CAD de HM 150.06 .....	46

## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este punto de la memoria se introducirá al lector sobre la motivación y los objetivos propuestos a alcanzar en este Trabajo de Fin de Grado. Se comenzará con una introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), puntualizando las ventajas actuales que tiene en la ingeniería. Además, se hablará sobre los recursos utilizados en este proyecto, como el software utilizado para los ensayos, el ANSYS Fluent, y las ventajas que tiene su uso sobre la materia de la que se va a tratar más adelante, o el manual de experimentos de estabilidad de cuerpos flotantes, el HM 150.06, de la empresa GUNT Hamburg. También se expondrá la importancia de conocer cualquier efecto que pudiera provocar una posible inundación en un buque.

### 1.1 Inundación en buques

En un buque averiado, la posibilidad de supervivencia depende de varios factores, como la preparación del buque para resistir averías, naturaleza de las propias averías, estimación de la situación y medidas correctivas adoptadas posteriormente.

En la Armada Española, el encargado de preparar el buque para que la lucha contra las inundaciones sea efectiva es el Oficial de Seguridad Interior, responsable, además, de la elaboración y mantenimiento de los planes de achique y aligeramiento de pesos.



Figura 1-1 Inundación en un buque (tomada de [1])

La Armada Española define en la referencia [1] la inundación como “la presencia anormal y/o entrada de agua o cualquier fluido en el interior de uno o varios compartimentos del buque debido a roturas de tuberías, orificios en la obra viva u otra circunstancia que permita dicha entrada de agua”.

En el apartado 2.2 se expone como se calcula el caudal que atraviesa un fluido por una determinada sección y se muestra la Tabla 2-2, donde la Armada Española tiene tabulada la cantidad de agua por hora que entra en un compartimento dependiendo del diámetro y la altura. Conociendo este caudal, podremos saber el tiempo en el que se inunda el compartimento, sabiendo las dimensiones de este.

## 1.2 Introducción al CFD

Estas siglas (CFD) vienen de la rama de la Mecánica de Fluidos denominada “*Dinámica de Fluidos Computacional*” en inglés “*Computational Fluid Dynamics*”, que consiste en el empleo de computadores y de técnicas numéricas para resolver problemas físicos relacionados con el movimiento de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, etc.

Las técnicas numéricas han experimentado una gran evolución en Ingeniería en los últimos años, siendo la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas que mayor repercusión ha tenido. Las ecuaciones generales de la Mecánica de Fluidos no admiten soluciones generales analíticas, y es por ello por lo que su estudio se ha tratado de forma empírica, con análisis dimensional o con análisis dimensional simplificado. Con la evolución de los computadores en la última mitad del siglo pasado se añadió la ya mencionada anteriormente “*Dinámica de Fluidos Computacional*” o CFD.

A día de hoy, su utilización se ha extendido a todo tipo de procesos industriales, gracias a la universalización de códigos comerciales y a la progresiva mejora de los algoritmos que implementan. El CFD tiene en la actualidad varios campos de aplicación como son: la industria aeroespacial, aeronáutica, automovilística, química, etc. Pero la que más nos interesa en este trabajo es en el ámbito de la industria naval, que se centra en las características de las hélices de propulsión y en el diseño óptimo de carenas de barcos y submarinos, así como para mejorar las prestaciones de barcos de competición.

### 1.2.1 Ventajas de las técnicas CFD

El uso de las técnicas CFD permite ventajas muy importantes, ya que reduce tiempo y costes en fases de diseño y, además, proporciona un número casi ilimitado de información, puesto que cada una de las celdas que componen el dominio de simulación equivale a un pequeño sensor que nos mide cada una de las variables del flujo. Permite también obtener información valiosa en aquellos casos en los que la experimentación no es segura, ya sea por altas temperaturas o posibles accidentes, o porque la alguna empresa en cuestión no sea capaz de afrontar por tener escasos recursos materiales, o porque no lo puedan abordar económicamente.

Sin embargo, la aplicación de técnicas CFD, aunque reduce los costes de la experimentación, necesita ordenadores potentes para realizar los cálculos pertinentes y también licencias para el uso de un software comercial, lo que supone que se encarezca el precio final. Asimismo, se requiere personal cualificado que sepa interpretar debidamente y discriminar los resultados obtenidos en el ya mencionado software y que lo domine, pues, de no ser así, resultados incorrectos se podrían dar por válidos. En la Tabla 1-1 se resumen las ventajas e inconvenientes principales de las técnicas de la *Dinámica de Fluidos Computacional*.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Reducción sustancial de tiempos y costes en los diseños	Las técnicas CFD tienen un alto precio
Analizar en condiciones difíciles de reproducir empíricamente	Necesidad de personal muy cualificado
Estudiar sistemas en condiciones peligrosas	No siempre se obtienen resultados precisos
Nivel de detalle prácticamente ilimitado	Limitación para la turbulencia, combustión, flujos multifásicos...
Capacidad de CAD	Tendencia a obtener resultados sin suficiente contrastación

**Tabla 1-1 Ventajas e inconvenientes utilización CFD (tomada de [2])**

La compatibilidad de las técnicas CFD con herramientas de diseño asistido por computador (CAE), como el cálculo de esfuerzos y tensiones en estructuras permitirá un avance asombroso en la interdisciplinariedad de la Mecánica de Fluidos en el análisis dinámico de estructuras.

Relacionando lo comentado anteriormente para el presente proyecto, se utilizarán diferentes herramientas: Programa de CAD, MESH (mallador), SOLVE (solver y postprocesado), entre otras.

### **1.3 Motivación**

Este proyecto nace con la intención de aportar una mejor visualización de como una inundación puede afectar al compartimento dañado de un buque, mediante técnicas de la *Dinámica de Fluidos Computacional*, como la del modelo de volumen de fluido (VOF). La intención es, tras obtener los resultados mediante la simulación numérica, compararlos con los estudios experimentales realizados y poder buscar en un futuro una aplicación en el ámbito naval y con ello aportar otra ayuda para la Armada Española en todo lo concerniente a inundaciones de compartimentos y controles de averías.

### **1.4 Recursos**

#### *1.4.1 ANSYS FLUENT*

Como se ha indicado al comienzo del Apartado 1, el software al que se ha recurrido en este TFG es el ANSYS-FLUENT.

ANSYS Inc es una empresa estadounidense, fundada en 1970, que desarrolla, comercializa y da soporte a la ingeniería a través de un software de simulación para estudiar el funcionamiento de un producto bajo una situación real. Está desarrollado para trabajar con la teoría del elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. En la pagina web [3] podemos encontrar más información sobre esta empresa.

Recientemente, se han fusionado la ya comentada ANSYS, que es el líder mundial en el estudio de estructuras por elementos finitos, con FLUENT, que es el paquete líder en CFD por volúmenes finitos. Esta fusión es el hecho que más avanzado está en la interdisciplinariedad de la Mecánica de Fluidos con el análisis dinámico de estructuras.

ANSYS tiene tres herramientas fundamentales llamadas módulos: pre-procesado (creación de geometría y mallado), procesador (solver) y post-procesador. El procesador de elemento finito incluye el análisis de transferencia de calor y de fluidodinámica y el post-procesado visualiza los resultados.

En Estados Unidos, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología utilizó ANSYS para modelar los acontecimientos que llevaron al inicio del desplome de las Torres Gemelas durante el atentado del 11 de septiembre de 2001.

### 1.4.2 GUNT Hamburg

GUNT Hamburg es una empresa de ingeniería alemana que abarca distintos campos de la ingeniería como el diseño mecánico, la mecatrónica, ingeniería térmica, ingeniería de procesos o, el campo que más nos concierne, la mecánica de fluidos.

Esta empresa desarrolló un producto para el estudio y la determinación del empuje y centro de empuje, el centro de masas, el metacentro, la estabilidad y la escora.



Figura 1-2 HM 150.06 (tomada de [4])

En este TFG nos hemos servido de este manual, para crear nuestro propio cuerpo flotante de metacrilato con las mismas medidas que el HM150.06, para poder manejarlo a nuestro antojo, haciéndole secciones en el casco para así llegar a uno de los objetivos del proyecto, que es calcular el tiempo en el que se inunda un compartimento.

## 1.5 Objetivos

El objetivo es determinar la evolución temporal del agua embarcada en un compartimento de geometría conocida y un área del orificio de la vía del casco asumida. Para ello se va a realizar una simulación numérica CFD de la vía de agua.

Una de las tareas principales a realizar para la consecución de este objetivo será determinar el tiempo de llenado mediante métodos analíticos simplificados, además de cronometrarlo en el cuerpo flotante creado.

Tras ello se modelará este cuerpo flotante creado mediante un software CAD y posteriormente se calculará el tiempo de llenado mediante simulación CFD.

## **1.6 Estructura de la Memoria**

En la Introducción se trata de realizar un acercamiento al alcance del TFG en el que se hace una breve introducción, tanto a las técnicas CFD y su importancia en el campo de la Mecánica de Fluidos, como a la importancia que tiene estudiar y conocer todo acerca de la inundación en el campo de la navegación. Se continúa hablando, además, de los recursos empleados, como el software de la empresa ANSYS, y el cuerpo flotante de experimentos de la empresa GUNT. También se explica la motivación y los objetivos que se deben alcanzar.

En el capítulo Fundamentos teóricos se pretende explicar conceptos básicos tanto de Mecánica de Fluidos, como Inundación o de Estabilidad, ya sea transversal o longitudinal. Estos conceptos serán necesarios para el entendimiento de capítulos posteriores.

El siguiente capítulo, el Estado del arte, abordará los distintos métodos existentes para la simulación numérica CFD para una inundación y se realizará una reseña a otros trabajos en los que se ha recurrido a la herramienta CFD para el estudio de la inundación de un buque.

El capítulo Metodología descriptiva expondrá, en primer lugar, los elementos usados para la simulación experimental y sus características y dimensiones. Además, se desarrollarán los resultados obtenidos haciendo alusión y usando los fundamentos teóricos del capítulo Fundamentos Teóricos. Tras esto se realizará la simulación numérica, mostrando cada paso: modelación CAD, mallado y postprocesado.

Se finalizará realizando una comparativa, en el capítulo Conclusiones, de ambas simulaciones de la inundación, tanto la experimental como la numérica. Se tratará de realizar un estudio de las posibles diferencias que se puedan detectar entre ambas simulaciones y, en caso de existir dichas diferencias, se investigarán los factores que pudieran influir. Además, se tratará de exponer las posibles líneas futuras.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se abordarán fundamentos teóricos necesarios para entender el comportamiento de un fluido tras su paso por una sección; teoría acerca de la inundación en depósito; y por último como podría afectar a la estabilidad de un barco, definiendo previamente varios conceptos básicos sobre elementos y geometría naval.

### 2.1 Mecánica de Fluidos

La Mecánica de Fluidos se define como la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (fluidoestática) o en movimiento (fluidodinámica) y la interacción de estos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras. En este TFG lo que nos interesa es la Fluidodinámica, por lo que no se profundizará en la Fluidoestática.

#### 2.1.1 Conceptos básicos

##### 2.1.1.1 Concepto de fluido y sus propiedades termodinámicas

Se define como una sustancia que se deforma de manera continua cuando actúa sobre ella un esfuerzo cortante de cualquier magnitud. Las principales propiedades termodinámicas son:

- **Presión (p):** fuerza de compresión normal que actúa sobre un área.
  - *Unidades:* Pascal(Pa), Atmósfera (atm), Bar(bar).
  - *Conversiones:* 1 atm  $\approx$  1 bar; 1 atm = 101325 Pa.
  
- **Temperatura (T):** nivel de energía interna de un fluido y está relacionada con el hecho de que el objeto esté o no en equilibrio térmico con otro objeto con el cuál está en contacto.
  - *Unidades:* Celsius (°C), Fahrenheit (°F), Rankine (°R), Kelvin (K).
  - *Conversiones:* K = °C+273,16; °F= (°C x 1,8) + 32.
  
- **Densidad ( $\rho$ ):** masa por unidad de volumen. Los líquidos se consideran fluidos incompresibles. Se llama volumen específico ( $v$ ) al inverso de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$v = \frac{1}{\rho}$$

○ *Unidades:* kg/m<sup>3</sup>

- **Densidad relativa ( $\rho_r$ ):** relación entre la densidad de un fluido y la de un fluido estándar, típicamente agua a 4 °C para líquidos y aire para gases.

$$\rho_{r,liquido} = \frac{\rho_{liquido}}{\rho_{agua}}$$

- **Peso específico ( $\gamma$ ):** peso por unidad de volumen.

$$\gamma = \rho \cdot g$$

○ *Unidades:* N/m<sup>3</sup>

- **Viscosidad ( $\mu$ ):** determina la velocidad de deformación de un fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado. También se llama viscosidad dinámica.

○ *Viscosidad cinemática( $\nu$ ):* razón de la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

*Unidades:* m<sup>2</sup>/s

### 2.1.1.2 Flotación

Los principios que sí que nos interesan de la Hidrostática son las leyes de flotación de Arquímedes:

- 1) Un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical de flotación igual al peso del fluido que desplaza.
- 2) Un cuerpo desplaza su propio peso en el líquido en el que flota.

Esta fuerza vertical recibe el nombre de *empuje* y se mide en newtons (N) en el SI.

$$E = m \cdot g = \rho \cdot g \cdot V$$

Se pueden observar tres casos cuando un cuerpo interactúa sobre un fluido:

- 1)  $Peso_{cuerpo} > Empuje$ : El cuerpo se sumerge completamente y cae al fondo.
- 2)  $Peso_{cuerpo} = Empuje$ : El cuerpo se sumerge en el fluido sin llegar al fondo, se encontraría en equilibrio en el seno del líquido.
- 3)  $Peso_{cuerpo} < Empuje$ : El cuerpo se sumerge parcialmente, en cantidad suficiente para que el peso del fluido desalojado sea igual al peso del cuerpo.

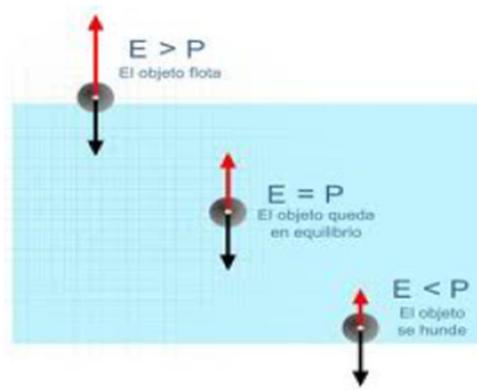


Figura 2-1 Flotabilidad (tomada de [5])

Por lo tanto, y para el ámbito naval, para que un buque flote, su peso tiene que ser igual a la fuerza de empuje, que es el peso del volumen de agua desalojada por la carena.

$$W(\text{Desplazamiento}) = \text{Flotabilidad} = \text{Peso del buque}$$

### 2.1.2 Fundamentos del movimiento de fluidos

En Mecánica de Fluidos una de las cuestiones más importantes es determinar la distribución espacio-temporal de las propiedades fluidas. Existen dos puntos de vista para analizar el movimiento de los fluidos:

- 1) Método lagrangiano: Sigue una partícula fluida en su movimiento, de manera que se busca las funciones que den su posición, así como las propiedades de la partícula fluida en cada instante.
- 2) Método euleriano: Que consiste en que le damos valores a las propiedades en un momento y un instante determinado. El valor de una propiedad en ese momento es el de la partícula fluida que ocupa dicho lugar en ese mismo instante. Es el enfoque más empleado en ingeniería.

#### 2.1.2.1 Flujo volumétrico y flujo másico. Cálculo de caudal.

Para adaptar las leyes de la mecánica de fluidos a volúmenes de control es necesario calcular y el flujo volumétrico o caudal ( $Q$ ) así como el flujo másico ( $\dot{m}$ ) que atraviesa una superficie.

$$Q = \int (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \int v dA$$

Siendo  $\vec{v}$  el vector velocidad,  $\vec{n}$  el vector normal a la superficie que atraviesa el fluido y  $A$  el área de la superficie.

Si esta ecuación se multiplica por la densidad, obtendremos el flujo másico.

$$\dot{m} = \rho Q = \int (\vec{v} \cdot \vec{n}) \rho dA = \int v \rho dA$$

Por lo que si la velocidad y densidad son constantes, el flujo másico se podría calcular como:

$$\dot{m} = \rho v A$$

#### 2.1.2.2 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un líquido moviéndose a lo largo de una corriente de agua, que permite obtener una relación entre la presión ( $p$ ), la velocidad ( $v$ ) y la altura ( $z$ ). Esta ecuación se aplica teniendo en cuenta ciertas hipótesis:

1. Flujo estacionario.
2. Flujo incompresible.
3. Flujo sin fricción.

4. Flujo a lo largo de una línea de corriente.
5. No se considera calor ni trabajo.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 = cte$$

## 2.2 Teoría sobre inundación

Para el estudio de la inundación en un compartimento es necesario comprender dos principios, la ya comentada Ecuación de Bernoulli y la ecuación de estado, por la que están relacionadas entre si las propiedades termodinámicas de un fluido.

La ecuación de estado resulta importante si se toma en consideración bolsas de aire atrapado en un compartimento. La ecuación de estado de un gas ideal es la siguiente:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$$

Donde  $R_s$  es la constante específica de un gas,  $V$  el volumen,  $m$  la masa y  $T$  la temperatura del gas en cuestión. Los datos en condiciones ambientales son los que vienen en la Tabla 2-1.

Temperatura	$T_e$	15°
Presión	$p_e$	101325 Pa
Constante de los gases	$R_s$	287.058 $\frac{J}{kg \cdot K}$

**Tabla 2-1 Parámetros en condiciones ambientales (tomada de [6])**

El subíndice  $e$  es denotado para dichas condiciones ambientes.

Para un proceso isoterma de un gas ideal compresible, la razón presión/densidad es constante. Como resultado, la densidad del aire depende linealmente de la presión multiplicado por el ratio constante de la densidad del aire  $\rho_e$  y la presión ambiente  $p_e$  de la siguiente manera:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_e}{\rho_e} = p \cdot \frac{V}{m} = R_s \cdot T = cte,$$

$$\Rightarrow \rho = p \cdot \frac{\rho_e}{p_e}$$

Si las velocidades de las corrientes de aire son despreciadas y solo la presión aumenta, la masa se asume que será constante también, según la ley de Boyle:

$$p = \frac{1}{V} \cdot p_0 \cdot V_0$$

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T = cte = p_0 \cdot V_0$$

Donde  $p_0$  y  $V_0$  son las presiones y volúmenes de referencia.

La presión del aire  $p$  dentro de un compartimento es siempre tomado como sobrepresión en relación con la presión ambiental  $p_e$ .

### 2.2.1 Descripción del flujo

El agua fluye a través de una abertura pequeña y profundamente sumergida, conectando dos compartimentos a y b (ver Figura 2-2), y sigue la ecuación de Bernoulli para flujos incompresibles:

$$dH = \frac{p_a - p_b}{\rho_w g} + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2g} + z_a - z_b$$

En el que los subíndices a y b hacen referencia los distintos compartimentos y el subíndice w es debido a que es propiedad del agua.

El cuadrado de las velocidades es normalmente muy pequeño comparado con otros términos por lo que pueden ser despreciadas.

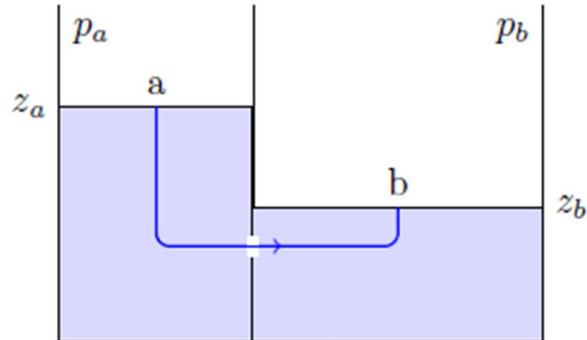


Figura 2-2: Flujo entre dos compartimentos mediante una apertura (tomada de [6])

La ecuación de Bernoulli para un flujo de aire compresible tiene la siguiente forma:

$$dH = \int_{p_a}^{p_b} \frac{1}{\rho g} dp + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2g} + z_a - z_b$$

Que usa la relación para la densidad del aire:

$$\rho = p \cdot \frac{\rho_e}{p_e}$$

Por lo que queda:

$$\int_a^b \frac{dp}{\rho g} = \frac{p_e}{\rho_e g} \cdot \int_{p_a}^{p_b} \frac{1}{p} dp = \frac{p_e}{\rho_e g} \cdot [\ln(p_b) - \ln(p_a)],$$

$$\Rightarrow dH = \frac{p_e}{\rho_e g} \cdot \ln\left(\frac{p_b}{p_a}\right) + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2g} + z_a - z_b$$

Para el flujo de aire, solo la diferencia de presiones es relevante, mientras que el resto de términos se pueden llegar a despreciar.

Para ambos casos de flujo de aire o agua, dH se utiliza para obtener la velocidad del fluido que atraviesa la sección:

$$v = \sqrt{2g \cdot dH}$$

Aquí no se tiene en cuenta el coeficiente de descarga,  $c_d$ , que es un factor adimensional, siempre menor que la unidad, que se incluye en esta expresión para denotar las pérdidas por fricción que puede sufrir el fluido en su recorrido, quedando la siguiente expresión:

$$v = c_d \cdot \sqrt{2g \cdot dH}$$

### 2.2.2 Inundaciones en la Armada

En la referencia [1], la Armada Española usa las ecuaciones anteriores para calcular el caudal de entrada por un orificio en el casco del buque.

Se considera que la cantidad de agua que entra vendrá dada por el volumen de un cilindro que tenga como base la sección del orificio y como altura la velocidad de entrada del agua.

$$Q = S \cdot v$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

A lo que llamaremos “Q” (m<sup>3</sup>/s) a la cantidad de agua que entra; “S” (m<sup>2</sup>) será la sección del orificio, que en ecuaciones anteriores se denotó como “A”; “v” (m/sg), velocidad con que entra el agua; y “H” (m) es la altura desde el centro de presiones del orificio a la superficie del mar. Entonces quedará:

$$Q = S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Como vemos en la ecuación, el caudal de agua varía de forma directamente proporcional con la altura y con la sección del orificio, por lo que modificando uno de estos dos parámetros se podría reducir el caudal de agua de entrada y poder controlar así la inundación. Como variar la altura a la que se encuentra el orificio resulta muy complicado navegando (se podría hacer escorando el barco a la banda contraria), ante una inundación a bordo, se intenta reducir la superficie del orificio mediante distintas técnicas (descritas en la referencia [1]).

En la Tabla 2-2, la Armada Española tiene tabulada el caudal de agua que entra por un orificio, en Toneladas/hora, según la altura y la superficie a la que se encuentre el orificio.

D(cm)	5	10	15	20	50	75	150	200
S(cm <sup>2</sup> )	19	78	176	314	1963	4417	17671	31416
h(m)	Caudal de la inundación en Tn/Hr							
0,5	22	88	199	354	2212	4978	19915	35405
1	31	125	281	500	3129	7041	28164	50070
1,5	38	153	344	613	3832	8623	34494	61323
2	44	177	398	708	4425	9957	39830	70810
2,5	49	197	445	791	4948	11133	44532	79168
3	54	216	487	867	5420	12195	48782	86724
3,5	58	234	526	936	5854	13172	52691	93673
4	62	250	563	1001	6258	14082	56329	100140
4,5	66	265	597	1062	6638	14936	59746	106215
5	69	279	629	1119	6997	15744	62978	111960
5,5	73	293	660	1174	7339	16512	66051	117425
6	76	306	689	1226	7965	17247	68988	122647
6,5	79	319	718	1276	7978	17951	71805	127655
7	82	331	745	1324	8279	18629	74516	132473
7,5	86	342	771	1370	8563	19268	77071	137016

Tabla 2-2 Caudal de inundaciones según altura y el diámetro (tomada de [1])

Estos datos del caudal son bastantes conservadores, ya que se tuvo en cuenta un coeficiente de descarga  $c_d = 1$  y solo tiene en cuenta la altura desde la línea de flotación hasta el eje de la superficie circular del orificio, no constando el agua embarcada una vez superada la cota del orificio.

En ciertos trabajos, como los de la referencia [7] y [8], realizan el estudio de la inundación de un compartimento de un barco mediante el método de coeficientes de descarga, que se basa en lo comentado en este apartado.

## 2.3 Estabilidad

Según la RAE, la definición de estabilidad es “cualidad de estable”, que a su vez define estable como “que se mantiene sin peligro de cambiar, caer o desaparecer; que permanece en un lugar durante mucho tiempo; y que mantiene o recupere el equilibrio”. En el ámbito naval, la estabilidad de un buque se puede llegar a asemejar a la definición dada por la Real Academia Española, ya que se define como

la facilidad que tiene un buque para mantenerse o recuperar su posición de adrizamiento, que es sin ninguna escora.

La estabilidad de un buque se estudia mediante la estabilidad transversal y la estabilidad longitudinal, pero previamente ha de conocerse la geometría del buque y sus simplificaciones.

Para tratar este apartado el TFG se apoya en la referencia [5], que es la publicación de la Armada Española concerniente a la Estabilidad de un buque.

### 2.3.1 Geometría de la carena

#### 2.3.1.1 Definiciones

La **carena** es la figura geométrica de la parte sumergida del buque y el **volumen de carena** (ver Figura 2-3) es volumen de la parte sumergida, respectivamente.

El **plano de flotación** (ver Figura 2-4) es la superficie del agua limitada por la intersección del casco con el plano del agua donde flota. La **línea de flotación** es la intersección del casco con el plano de flotación.



Figura 2-3 Volumen de carena (tomada de [5])



Figura 2-4 Plano de flotación (tomada de [5])

Se le denomina **obra muerta** a la parte del casco estanca al agua y que está situada sobre la línea de flotación; mientras que la **obra viva** es el volumen de la parte sumergida, la limitada por el plano de flotación y la quilla, por lo que equivale al volumen de carena.

El plano vertical que divide al casco de proa a popa en dos formas simétricas se le denomina **plano longitudinal**. Es perpendicular a la superficie del agua con el buque en adrizamiento. La única propiedad geométrica general a todas las formas de los cascos de los buques es la de ser simétricos respecto a este plano. También se conoce como plano diametral.

El **plano transversal de la cuaderna maestra** (ver Figura 2-5) es el plano perpendicular al plano longitudinal y al plano de flotación que pasa por dos puntos simétricos de la carena mas distantes del plano longitudinal; esto quiere decir que es donde el buque tiene mayor manga.

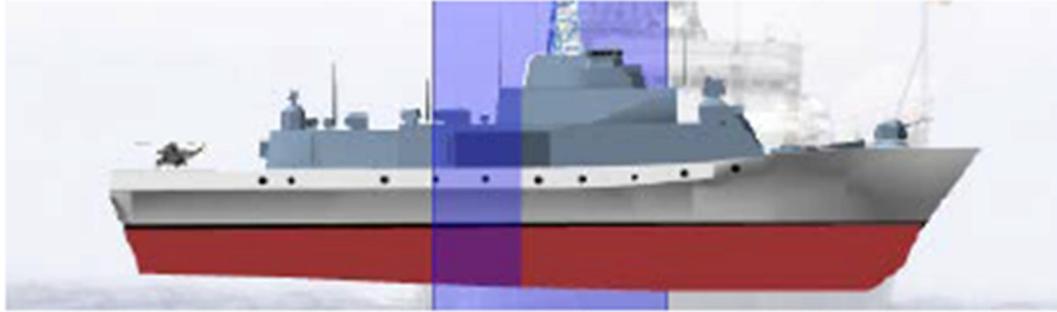


Figura 2-5 Plano transversal (tomada de [5])

### 2.3.1.2 Líneas de referencia del casco

La vertical en el plano longitudinal, trazada por la intersección del plano de flotación con la roda es la **perpendicular de proa** y se denota como  $Pp_r$ . La **perpendicular de popa** ( $Pp_p$ ) es la vertical al plano de flotación en el plano longitudinal, por el punto más saliente a popa de la carena.

La sección transversal de máxima área, que coincide con la sección media, es donde se ubica la **cuaderna maestra**.

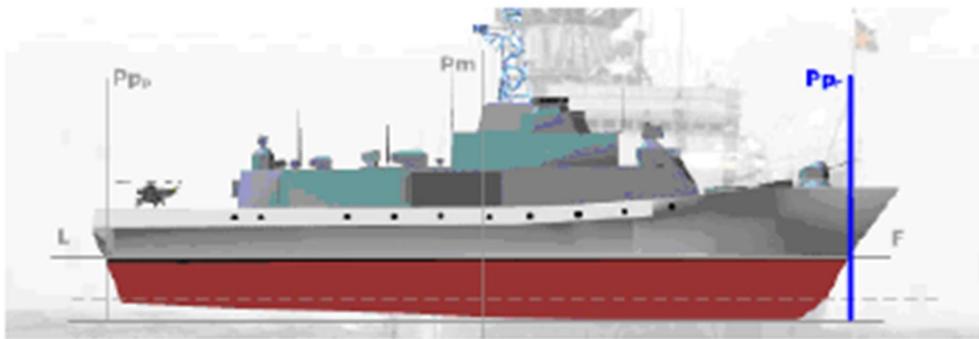


Figura 2-6 Líneas perpendiculares (tomada de [5])



Figura 2-7 Cuaderna Maestra (tomada de [5])

La **línea crujía** es la intersección del plano diametral con cualquier plano paralelo a los de flotación y se representa con el símbolo  $C_L$ .

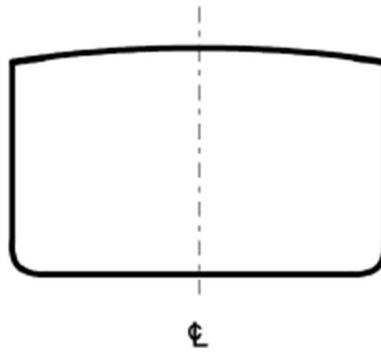


Figura 2-8 Línea de crujía (tomada de [5])

### 2.3.2 Estabilidad transversal

#### 2.3.2.1 Definiciones

La fuerza de empuje que crea el agua desalojada debido al peso de la carena, opuesta al peso del buque, actúa en una vertical que atraviesa el centro geométrico de la obra viva. Este centro es el **centro de carena** y se designa con la letra “B”.

Este centro de carena es variable, debido al balance y cabezada del buque; en cambio, si el buque está adrizado, estará en crujía. Su posición en el longitudinal y su altura se hallarán para cada calado diferente. Si el buque se balancea, el centro de carena realizará una curva para cada calado, cuya forma dependerá del tipo de barco y su forma.

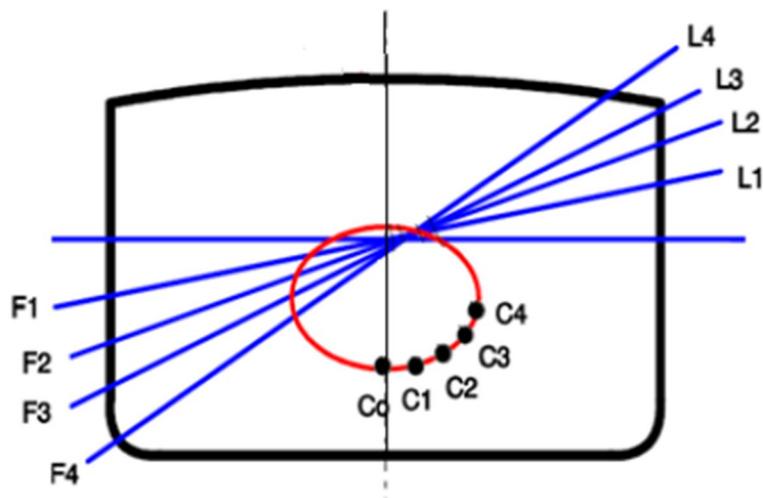


Figura 2-9 Centros de carena (tomada de [5])

El **centro de gravedad** de un buque es el punto donde se considera aplicado el peso total del buque y se denota con la letra “G”. No debe coincidir con el centro geométrico del volumen del barco y en adrizamiento este punto se encuentra en crujía. Al depender solo de la geometría del buque y la cantidad peso, y su distribución, la posición de “G” no variará por el balance y cabezada en la mar.

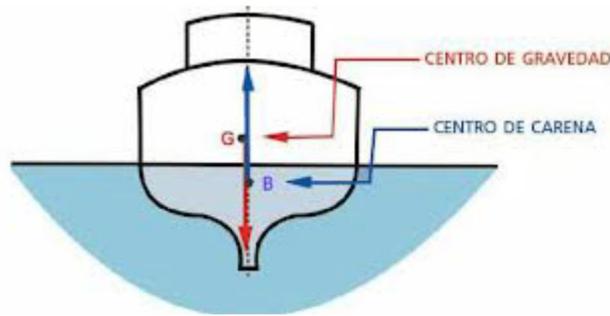


Figura 2-10 Posición de G y B (tomada de [5])

### 2.3.2.2 Estabilidad

Como se ha definido en capítulos anteriores, llamamos estabilidad a la tendencia de un barco a recuperar su posición de equilibrio si ha sido desplazada de esta. En este subapartado se estudiará las distintas fuerzas que actúan sobre un barco en cuestión.

En un barco en equilibrio, “G” y “B” están en la misma vertical, por lo que se anulan las fuerzas aplicadas en ellas. Pero el mar es un medio donde hay fuerzas que perturban este estado de equilibrio, como las olas o el viento, así que el barco puede escorarse debido a estos fenómenos. Si el barco, al escorarse, recupera la posición de equilibrio cuando deja de estar influenciada por las olas o el viento, se dice que es estable; si ocurriese lo contrario y continúa escorándose hasta dar la vuelta, es inestable.

Debido a la escora, la obra viva del barco cambia de forma, y por consiguiente también cambia la posición del centro de carena y esto provoca que la fuerza de empuje y del peso de barco cambien de vertical. Esta separación crea un par de fuerzas llamado **Par de adrizamiento** y la distancia entre las dos se le denomina **Brazo adrizante** o brazo adrizante.

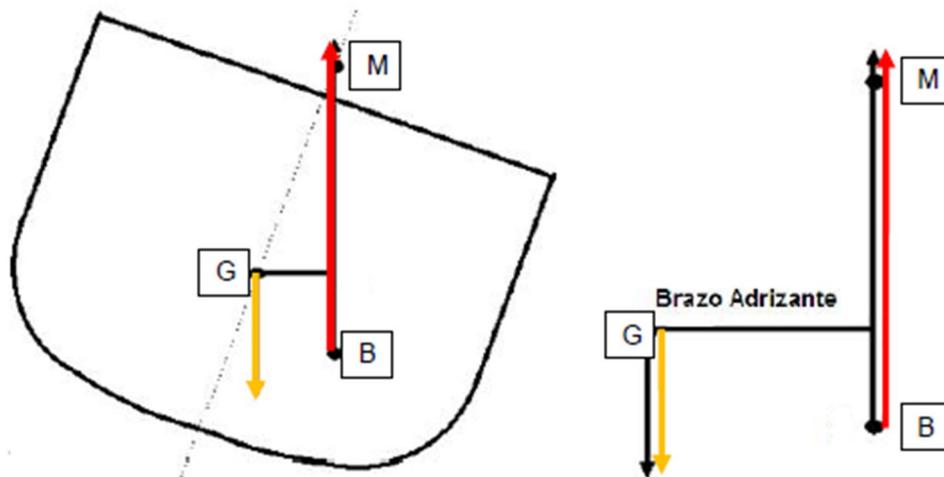


Figura 2-11 Par de fuerzas y brazo adrizante (tomada de [5])

El momento de adrizamiento es el producto de una fuerza por la separación entre ambas (brazo de adrizamiento).

$$M_{to AD} = W \cdot GZ$$

Si al escorarse, el centro de carena está fuera de la vertical de “G”, aparece un par de adrizamiento por lo que el buque es estable (ver Figura 2-12). Por otro lado, si cuando se escora, el centro de carena está situado entre la acción de la fuerza de la gravedad y la línea de crujía, aparecen un **par escorante** y un **momento escorante** (ver Figura 2-13). En este último caso el barco daría la vuelta si al ir escorándose cada vez más el centro de carena no sitúa de nuevo fuera de la vertical de “G”.

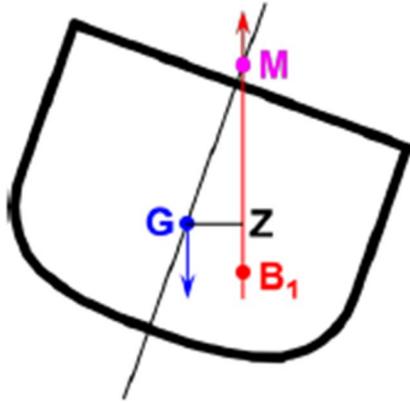


Figura 2-12 Centro de carena fuera de la vertical de G (tomada de [5])

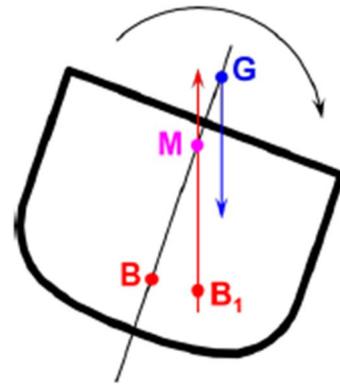


Figura 2-13 Centro de carena dentro de la vertical de G (tomada de [5])

El **metacentro** es el centro instantáneo que existe para cada inclinación. Este lugar geométrico no tiene centro fijo y describe una trayectoria curva. Se le designa como “M” y la distancia entre el centro de gravedad se denomina **altura metacéntrica** y se denota como “GM”.

Si el buque está escorado con un ángulo pequeño, la fuerza de empuje corta por crujía en “M” formándose un triángulo GZM (ver Figura 2-14).

$$GZ = GM \cdot \text{sen } \theta$$

Y como el momento adrizante es:

$$Mto AD = W \cdot GZ$$

Como resultado obtenemos:

$$Mto AD = W \cdot GM \cdot \text{sen } \theta$$

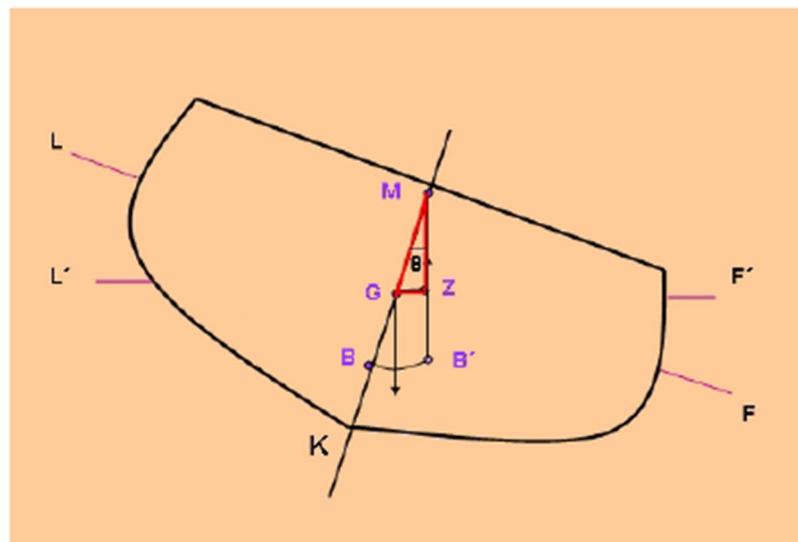


Figura 2-14 GZM (tomada de [5])

La altura metacéntrica será positiva cuando M esté por encima del centro de gravedad y la consecuencia será que el buque tiende a mantenerse adrizado. Por otro lado, si M se encuentra por debajo de CG, la altura metacéntrica es negativa y cuando sea perturbado por una pequeña fuerza, dejará de estar adrizado y se formará un par adrizante.

Para el cálculo de la altura metacéntrica nos servimos de las siguientes fórmulas:

$$GM = KM - KG$$

$$KM = KB + BM$$

Siendo K el punto donde interseca la quilla con la línea de crujía  $C_L$ .

### 2.3.2.3 Efectos del calado en la estabilidad

El calado se define como la distancia vertical de la línea de quilla a la flotación considerada.

El calado es el punto de partida para levantar las curvas hidrostáticas, que se calculan y dibujan para cada tipo de buque y facilitan gran cantidad de datos.

Uno de los datos que proporcionan las curvas hidrostáticas son las **toneladas por centímetro de inmersión** “TPC”, que es el número de toneladas que es necesario embarcar o desembarcar para que el calado varíe un centímetro. Para calcular esta, se ha de saber que, si aumenta el peso del buque, para que este continúe en equilibrio, debe ser compensado por un aumento igual del empuje; es decir, el peso a aumentar es igual al peso en agua del aumento de volumen de la carena.

$$w = \Delta V \cdot \rho$$

Siendo  $w$  el peso aumentado.

### 2.3.2.4 Experiencia de estabilidad

En la Armada Española se estudia mediante métodos experimentales la experiencia de estabilidad, que tiene por objeto calcular la altura del centro de gravedad sobre la línea base KG. La suma de los momentos verticales de dichos pesos con relación a la línea de base, entre el desplazamiento total del buque da la posición de KG:

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

Pero esta KG no es un cálculo exacto, aunque sí muy aproximado, y la experiencia de estabilidad pretende calcularla de forma exacta. Para realizar la experiencia, una vez se comprueba que el barco tiene GM positivo y llevado a un astillero, se coloca un peso conocido “w” a crujía. Para hallar KG se calcula GM, ya que KM lo dan las curvas hidrostáticas a partir del calado medio. En estas condiciones se desplaza transversalmente el peso una distancia conocida “d”. GM se calcula de la siguiente manera:

$$tg\theta = \frac{GG_2}{GM}$$

$$GM = \frac{GG_2}{tg\theta} = \frac{w \cdot d}{W \cdot tg\theta}$$

La  $tg\theta$  se calcula empleando un péndulo de longitud aproximada a la distancia entre dos cubiertas y unas reglas graduadas sobre las que se lee la escora una vez trasladado el peso a una banda, de forma que:

$$tg\theta = \frac{a}{l}$$

Una vez se conoce este dato, se calcula GM y este nos da el KG del buque correspondiente a la condición de carga en la que se hallaba el buque durante la experiencia.

Este KG sirve de punto de partida para hallar la situación del centro de gravedad en otras condiciones de carga mediante cálculos matemáticos.

Todos los datos obtenidos en la experiencia de estabilidad se llevan al Libro de experiencia de estabilidad. Este libro consta de dos partes, la primera “Datos de la Experiencia de estabilidad”,

contiene las observaciones y cálculo para determinar el desplazamiento y centro de gravedad de el buque en rosca. La segunda, “Datos de Estabilidad” contiene la información relativa a las características del buque en las condiciones operativas.

### 2.3.2.5 Efectos de los pesos en la estabilidad

Los traslados de pesos en un buque, ya sean en la dirección vertical o transversal, influyen directamente en la estabilidad del buque.

Al trasladar un peso, la posición G se mueve paralelamente a la trayectoria del peso y varía una magnitud dada por la formula:

$$GG_1 = \frac{w \cdot d}{W}$$

En la que  $GG_1$  es el traslado del centro de gravedad del buque; “w” el peso trasladado; “d” la distancia que se traslada el peso; y “W” es el desplazamiento del buque.

Podemos estudiar dos tipos de traslados de pesos, vertical y horizontal.

En un traslado vertical de pesos, para calcular la altura final del centro de gravedad:

$$KG_{final} = \frac{W \cdot KG \pm w \cdot d}{W}$$

Se ha de tener en cuenta que no se producirá escora, ya que G continuaría en la misma vertical. Si el peso se mueve hacia arriba, la altura metacéntrica disminuye, y si se mueve hacia abajo, aumenta.

Si se trasladan pesos horizontalmente, en un buque intacto y con el resto de pesos repartidos simétricamente, G dejaría de estar en el plano longitudinal y se desviaría paralelamente al movimiento del peso. Esta desviación se calcula de la siguiente manera:

$$GG_2 = \frac{w \cdot d}{W}$$

En la Figura 2-15 se observa como tras el traslado de G a  $G_2$  aparecen un par de fuerzas que va escorando el buque hasta que B, en su trayectoria, se encuentre con la vertical de la nueva posición de G y con ello se establezca el equilibrio al actuar las dos fuerzas, empuje y peso en la misma vertical.

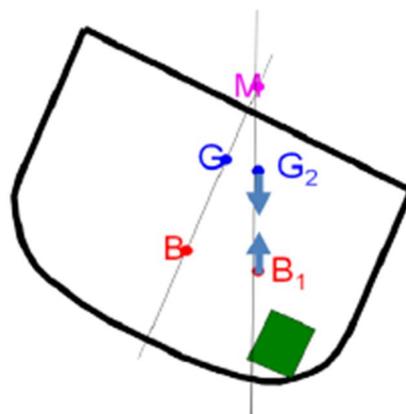


Figura 2-15 Traslado de peso transversal (tomada de [5])

El tercer caso de estudio en los efectos que causan los pesos en la estabilidad es el embarco y desembarco de pesos. Cuando se embarcan y/o desembarcan pesos, los calados varían y pueden influir en el asiento, la escora y la estabilidad total.

Siempre que haya un embarco o desembarco, el desplazamiento variará en la cantidad del peso añadido o retirado y el calado medio será el correspondiente al este nuevo desplazamiento, pudiéndose obtener de las curvas hidrostáticas.

El aumentar o disminuir pesos supondrá una variación de G y seguirá la siguiente ecuación:

$$GG_1 = \frac{w \cdot d}{W \pm w} = \frac{w \cdot Gg}{W_{final}}$$

Si el peso embarcado está por encima de G, la variación será positiva, si no, negativa; en caso de desembarcar pesos, si este está por encima de G, la variación será negativa, siendo positiva en caso contrario.

En caso de que haya varios pesos a desembarcar y/o embarcar, es más sencillo tomar momentos respecto a la quilla, obteniendo así KG directamente.

$$KG_1 = \frac{W \cdot KG \pm \sum w \cdot Kg}{W \pm \sum w}$$

La nueva altura metacéntrica  $G_1M_1$  se obtiene de las curvas hidrostáticas para el nuevo desplazamiento, conociendo  $KM_1$  y  $KG_1$ .

$$G_1M_1 = KM_1 - KG_1$$

Si hay un embarco de pesos fuera del plano longitudinal, el buque escorará a la banda en la que se añadió el peso; en cambio si desembarca pesos, escorará a la banda contraria. En ambos casos, primero se calculará la elevación virtual de G y después la separación de la línea de crujía. Esto último se hará suponiendo que el peso embarcado se coloca sobre el plano diametral a la altura definitiva y después se traslada a su posición final; en caso de desembarco, se supondrá que el peso se traslada transversalmente al plano longitudinal y después se desembarca. Para embarco y desembarco, la desviación  $G_1G_2$  se calcula:

$$G_1G_2 = \frac{w \cdot d}{W \pm w}$$

Siendo  $G_1G_2$  la separación de la diametral del centro de separación; el producto  $w \cdot d$  el momento escorante; y  $W \pm w$  el desplazamiento final.

Si el barco en cuestión tuviese ya una escora inicial, a la nueva posición de G habrá que incluirle el momento escorante inicial, por lo que:

$$G_1G_2 = \frac{Mto\ inicial \pm Mto\ introducido}{W\ final}$$

Si se quiere adrizar un buque escorado, habrá que calcular el momento escorante e introducir otro momento escorante igual, pero de sentido contrario.

Estos movimientos de pesos influyen en los momentos de adrizamiento para todos los ángulos de escora. Se ha de tener en cuenta que cambia el desplazamiento haciendo que el momento varíe en el mismo sentido que él, puesto que:

$$Mto\ AD = W \cdot GZ$$

En las curvas transversales de estabilidad (Figura 2-16) se observa que la modificación del calado hace variar los momentos de estabilidad en sentido opuesto a la variación de desplazamiento, ya que si aumenta, GZ disminuye y al contrario.

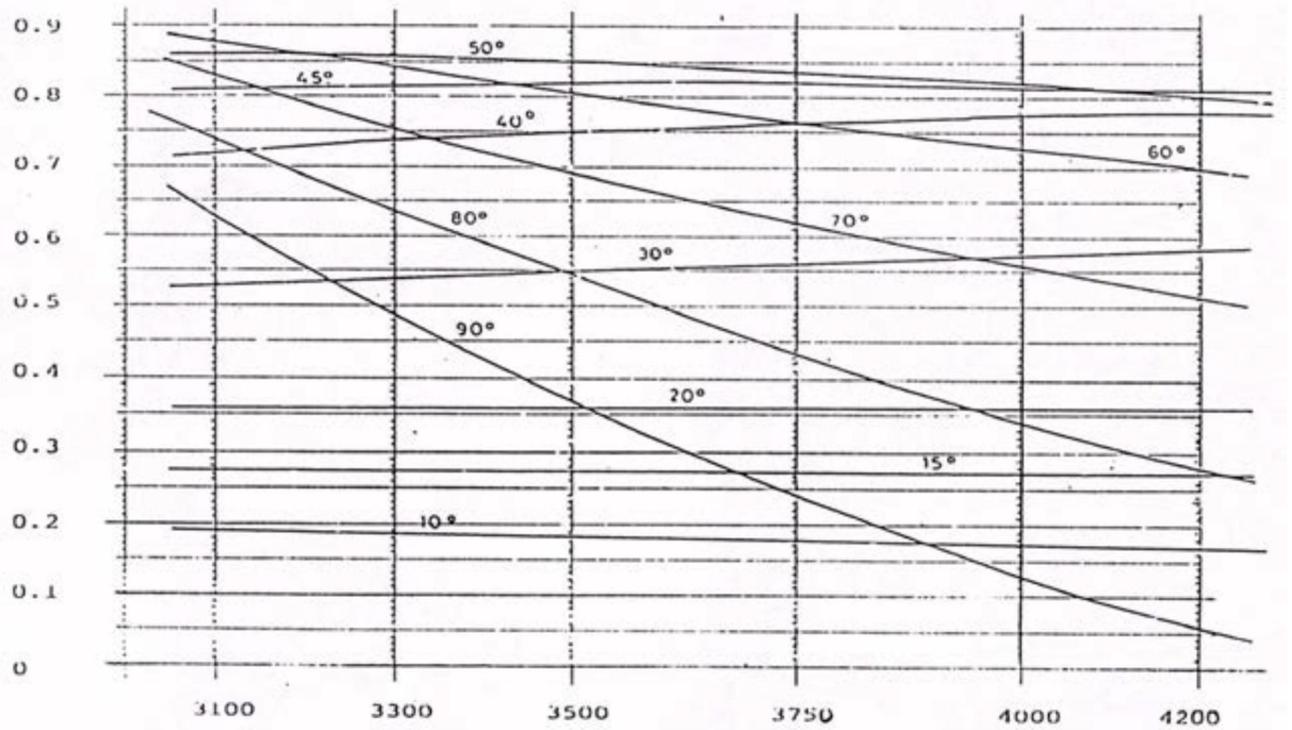


Figura 2-16 Curvas transversales (tomada de [5])

Por otro lado, los brazos de adrizamiento aumentan o reducen dependiendo de la posición adoptada por G. Para poder visualizar el efecto total del embarco y/o desembarco de pesos sobre la estabilidad, habrá que dibujar la curva calculada para el buque después de cambiar su peso.

Esta curva se halla, primero, tomando la curva de estabilidad de las curvas transversales para el nuevo desplazamiento (curva azul de la Figura 2-17); corrigiendo esta curva para la distancia vertical entre el eje supuesto de las curvas transversales de estabilidad y la nueva posición de G (curva negra de la Figura 2-17); corrigiendo la curva anterior por el traslado transversal del centro de gravedad, si hubieran pesos asimétricos (curva violeta de la Figura 2-17). Si se quiere calcular la curva de momentos habrá que multiplicar los brazos de adrizamiento resultantes por el nuevo desplazamiento.

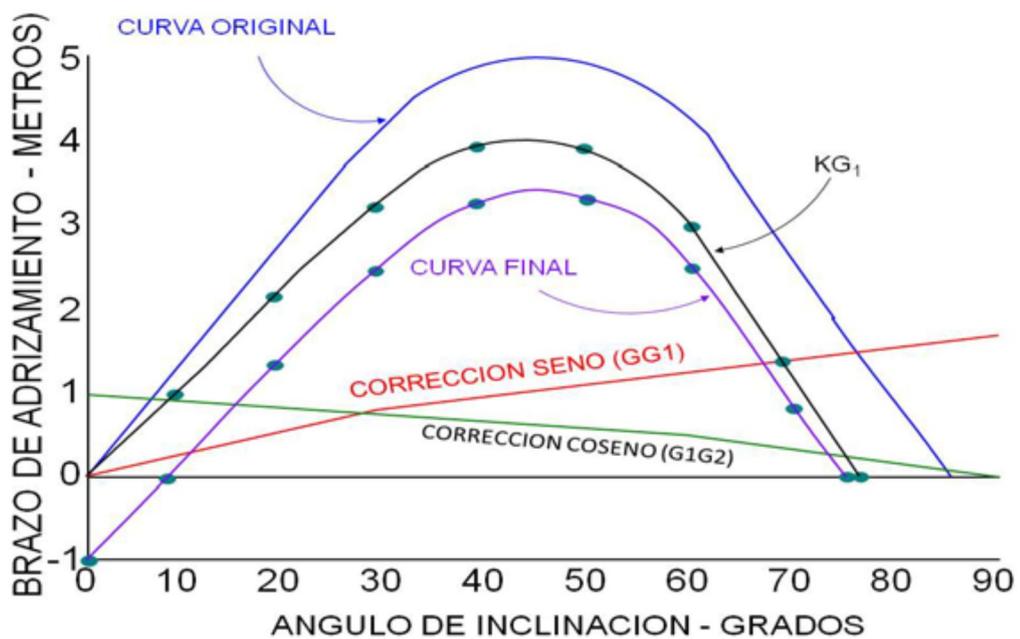


Figura 2-17 Curva de estabilidad corregida (tomada de [5])

### 2.3.3 Estabilidad longitudinal

Es la tendencia a recobrar la posición longitudinal de equilibrio. La diferencia entre los calados de proa y popa se llama asiento. Las curvas hidrostáticas dan para cada flotación paralela a la quilla la posición longitudinal del centro de carena.

El centro de gravedad del plano de flotación se denomina centro de flotación, y por él pasa el eje de asiento del buque, alrededor del cual gira el mismo cuando cabecea. Su posición exacta se obtiene para cualquier condición de carga mediante las curvas hidrostáticas y suele venir referido por su distancia a la sección media. Puede encontrarse justo en la sección media, pero en otros buques pueden encontrarse a proa o a popa de esta.

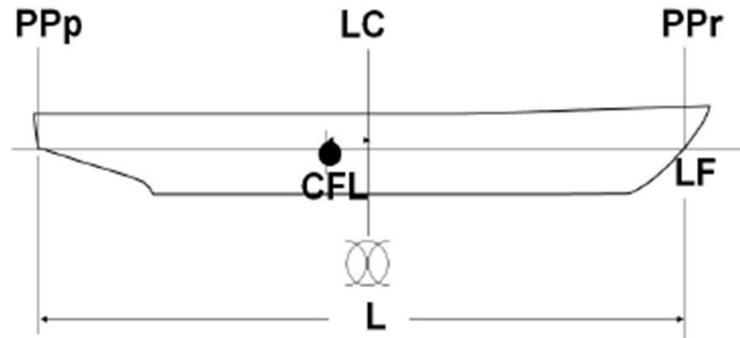


Figura 2-18 Centro de Flotación (tomada de [5])

Los cambios de asiento se producen debido a traslados de pesos de proa a popa o viceversa, o por embarco o desembarco de pesos fuera de la vertical del centro de flotación. El cambio de asiento se producirá hacia donde se haya añadido más peso, por lo que el asiento final será la suma algebraica del asiento inicial más el cambio de asiento.

La medida de la estabilidad longitudinal inicial viene dada por la altura metacéntrica longitudinal  $GM'$

$$GM' = KB + BM' - KG$$

Donde  $KG$  y  $KB$  son los mismos que en estabilidad transversal, mientras que  $BM'$  será:

$$BM' = \frac{I'}{V}$$

$I'$  es el momento de inercia del plano de flotación con relación al eje transversal del buque que pasa por  $CF$ .

La unidad de medida para conocer la estabilidad longitudinal de un buque es la resistencia que opone para variar su asiento un centímetro.

$$MT1 = \frac{GM' \cdot W}{100L}$$

Supongamos ahora el traslado longitudinal de un peso " $w$ " una distancia " $d$ ", el momento longitudinal que produce será  $w \cdot d$ . Así, si lo dividimos por  $MT1$  obtendremos el cambio de asiento:

$$\Delta A = \frac{w \cdot d}{MT1}$$

Siempre que hay un embarco o desembarco de pesos, los calados varían la misma cantidad. La variación de calado medio debido al embarque de pesos se calcula dividiendo el peso por las TPI:

$$\Delta C = \frac{W}{TPI}$$

La variación de calados a proa y popa serán:

$$\Delta C_{pr} = \Delta A \cdot \frac{\text{Distancia del centro de flotación a la marca de calado Pr}}{L}$$

$$\Delta C_{pp} = \Delta A - \Delta C_{pr}$$

### 2.3.4 Superficie libre

El efecto de la superficie libre es el que puede llegar a producir en un buque, un tanque que estuviese parcialmente lleno, ya sea un tanque de combustible, agua potable, de contraincendios, etc. Si este tanque estuviese totalmente lleno, se considerará que es un peso sólido, pues no le afecta el balance y cabezada del barco.

Al escorarse un barco, el líquido que haya en un compartimento parcialmente lleno, se mueve acorde con la escora y tiende a permanecer paralelo a la superficie del agua del mar. Por tanto, el centro de gravedad de ese compartimento “g” se desplaza a “g<sub>1</sub>”, y, por ende, G pasa a G<sub>2</sub> produciendo una pérdida del brazo adrizante. Este brazo adrizante se puede equiparar a una elevación virtual de G<sub>2</sub> a G<sub>3</sub>, para así facilitar cálculos. Este G<sub>3</sub> sería la intersección de la línea de acción de la fuerza del peso del buque con la línea de crujía. La elevación virtual viene dada por la fórmula:

$$GG_3 = \frac{i \cdot d'}{V \cdot d}$$

Donde “i” es el momento de inercia del área de la SL; “V” el volumen de carena del buque; “d’” la densidad del líquido del tanque; y “d” la densidad del agua en la que flota el barco.

Para un compartimento rectangular, cuya manga sea “b” y eslora “l” el momento de inercia será:

$$i = \frac{b^3 \cdot l}{12}$$

Para un líquido con superficie libre que tenga una densidad igual o próxima a la del agua del mar, se pueden despreciar la densidad de los líquidos.

La última simplificación que se puede hacer es expresar el volumen de carena en función del desplazamiento, por lo que nos quedaría:

$$GG^3 = \frac{b^3 \cdot l}{12W} \cdot 1,026$$

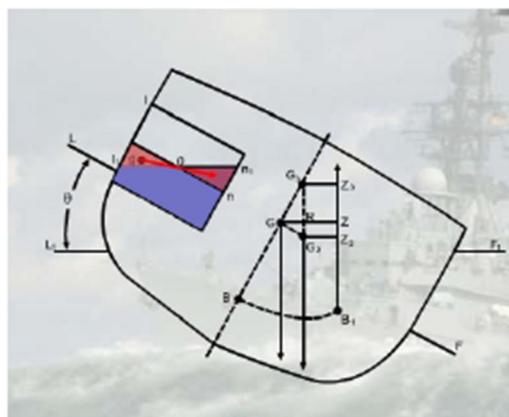


Figura 2-19 Efecto superficie libre (tomada de [5])

Este efecto no se puede equiparar al que produce un traslado transversal de pesos, porque el efecto de la superficie libre (SL) incrementa a medida que el buque se escora.

### 2.3.5 Libre comunicación

Cuando el forro del casco de un buque es dañado y el agua puede entrar y salir con el movimiento de balance, existe una inundación parcial con libre comunicación con la mar. Así,  $KG$  puede ser disminuido, aumentando  $GM$  y  $GZ$  debido al embarco del agua que inunda el compartimento. Si la avería fuese en un tanque con líquido, si está al mismo nivel de la flotación no habrá variación de peso ni del  $CG$  del buque; en cambio, si el tanque estuviese lleno de líquido con un nivel superior a la línea de flotación, habría un desembarco de pesos y bajaría el  $CG$ .

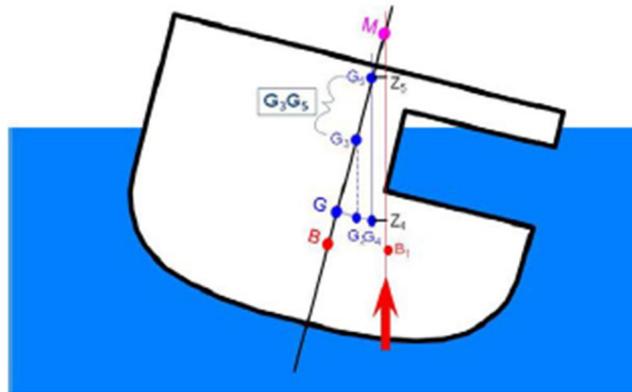


Figura 2-20 Libre comunicación (tomada de [5])

Existe una subida virtual de  $G_1$  a la posición  $G_3$  debido al efecto de superficie libre y otra a la posición  $G_5$  por el de libre comunicación. Esto conlleva a una disminución de  $GM$  y  $GZ$ .

El efecto de la libre comunicación no depende del peso total del agua embarcada ni del efecto de superficie libre, si no del peso de agua que embarca y desembarca el buque en sus balances. Al igual que en el caso de superficie libre, se estudiará como una elevación virtual de  $G_3$  a  $G_5$ .

Considerando el buque de la Figura 2-19 que escora a estribor y tiene el casco intacto,  $G$  pasa a  $G_2$  debido a que la superficie libre toma forma de cuña; pero si el casco está abierto al mar, saldrá agua del compartimento hasta quedar a la altura de la línea de flotación, y habrá por ello un desplazamiento de  $G_2$  a  $G_4$ .

Si ahora escorase a babor y con el casco intacto,  $G$  pasa a  $G_2$  por SL. Si el casco está abierto al mar. Entra agua hasta la línea de flotación y hace pasar  $G_2$  a  $G_4$ .

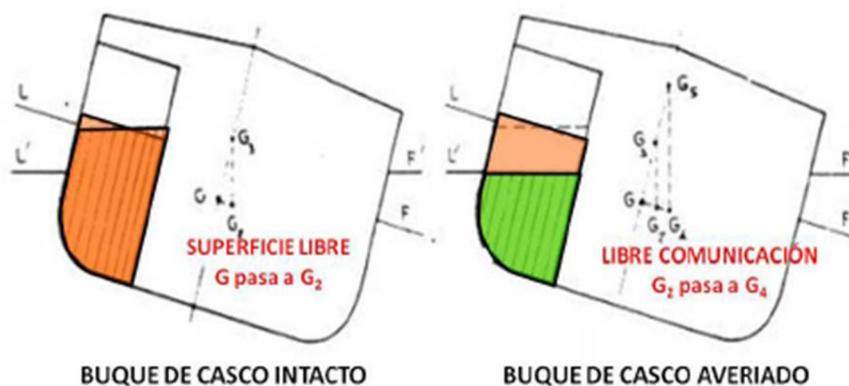


Figura 2-21 Diferencia libre comunicación y superficie libre (tomada de [5])

La variación  $GG_2$  se debe al traslado de la cuña líquida.  $G_2G_4$  aumenta y disminuye con el ángulo de escora y su efecto, al ser los brazos adrizantes  $G_4Z_4$  y  $G_5Z_5$  iguales, se estudia como una elevación de  $G_4$  a  $G_5$ . El efecto de la libre comunicación se calcula como:

$$G_3G_5 = \frac{a \cdot y^2}{V}$$

Donde “a” es el área de la SL; “y” es la distancia transversal desde el centro de gravedad de laSL al diametral del buque adrizado; y “V” es el volumen de carena teniendo en cuenta el agua embarcada.

## 3 ESTADO DEL ARTE

### 3.1 Revisión de trabajos previos

En el pasado, el proceso de inundación en un barco tras la entrada de agua ha sido investigado de diferentes modos. La primera necesidad para describir tal evento de manera precisa y científica surgió tras varios accidentes graves ocurridos en buques, causados por la inundación en grandes compartimentos, y donde los modelos existentes no eran capaces de describir los fenómenos físicos que conducían a estos accidentes.

En las primeras investigaciones, el proceso de eventos que conducían al hundimiento de un barco eran evaluadas de manera manual, examinando solo algunas etapas intermedias de la inundación. A medida que esto ocurría, hubo un gran avance en la simulación por códigos numéricos del movimiento de un barco en condiciones meteorológicas adversas. Inicialmente, estas simulaciones se realizaban con el objetivo de informatizar el movimiento de un barco intacto en medio de oleaje. En los años noventa, se han llevado a cabo diversas investigaciones para modelar la influencia de un posible compartimento inundado de agua en el movimiento del barco, las cuales se realizaban normalmente describiendo el comportamiento del agua inundada mediante las “shallow waters equation” (llamadas ecuaciones de Saint-Venant en forma unidimensional), que son una derivación de las ecuaciones de Navier-Stokes (la referencia [9] es el desarrollo de estas fórmulas). Sin embargo, estos métodos están limitados a algunos compartimentos de geometría simple.

La inundación de compartimentos de geometrías más complejas, con varias aberturas externas e internas, se ha comenzado a estudiar a finales de los años noventa, por lo que se han ido desarrollando y mejorando los métodos numéricos de inundación. Esto fue principalmente motivado por la necesidad de modelar la inundación progresiva de grandes buques. Actualmente, los esfuerzos se están centrando en incorporar los métodos de simulación de inundación dependientes del tiempo en las nuevas regulaciones.

La OMI (Organización Marítima Internacional) empezó a abordar con la seguridad de grandes buques en el 2001, en la 44 Conferencia del Subcomité de Estabilidad. Para una mejor caracterización de la supervivencia de un determinado tipo de buque, se estableció el término “time-to-sink” (en castellano, tiempo en hundirse), que se cambió en la siguiente conferencia por el término “time-to-flood” (tiempo en inundarse). Este desarrollo vino seguido por varias investigaciones de distintos grupos.

Uno de los desarrollos más recientes de los métodos de simulación de inundación progresiva fue realizada por Pekka Ruponen y su equipo en la Universidad de Helsinki (referencia [10]). Ruponen realizó en su tesis doctoral una descripción de la teoría subyacente del método numérico basado en la corrección de presión, junto con una validación detallada de dicho método por los experimentos de

modelos publicados en trabajos anteriores suyos. El principal enfoque de este método es el comportamiento de la inundación de un buque en aguas tranquilas y no el comportamiento de un buque dañado bajo los efectos de fuerzas perturbadoras como la mar o el viento.

Hendrik Dankowski (referencia [6]), desarrolló en su tesis un método de simulación numérica para predecir y revisar posibles escenarios de inundación bajo discretización temporal de un modo rápido, estable y conciso. Este método se desarrollo dentro del sistema de diseño de buques E4, el cual asegura un modelo de datos consistente y permite el acoplamiento directo con los métodos más recientes. Se elige un enfoque cuasiestático en el dominio del tiempo para calcular la inundación de la subdivisión interna y la posición flotante en cada paso de tiempo intermedio. Las trayectorias de inundación las modeló con la ayuda de un asistente gráfico y los flujos de agua a través de los orificios se calcularon mediante un modelo hidráulico basado en la ecuación de Bernoulli. Tras la determinación de agua embarcada, calculó la posición de equilibrio resultante.

En la referencia [8] muestran como todo el proceso anterior tomado por Dankowski se puede simplificar a un modelo basándose en el estudio de un flujo de agua a través de un orificio, calculando el peso embarcado y/o desembarcado mediante coeficientes de descargas.

### 3.2 Métodos existentes

La estrategia utilizada en la *Dinámica de Fluidos Computacional* es la de reemplazar un problema definido sobre un dominio continuo (de la Mecánica de Fluidos clásica) por un dominio discreto definido mediante una malla. En el dominio continuo, cada variable de flujo está definida en todos los puntos del espacio. En cambio, en el discreto, cada variable de flujo está únicamente definida en los puntos que configuran la malla. A este proceso se le denomina discretización espacial, porque el espacio se discretiza en un número finito de puntos.

Será también necesario realizar una discretización temporal, en caso de que las ecuaciones de gobierno dependan del tiempo. Existen varias metodologías para realizar estos tipos de discretizaciones, siendo las mas importantes el método de diferencias finitas (FDM), el método de elementos finitos (FEM) y el método de volúmenes finitos (MVF). Este último es el más general y extendido, siendo además el método empleado en este TFG y el cual se desarrollará en el siguiente subapartado.

#### 3.2.1 Método de volúmenes finitos

El objetivo del MVF es desarrollar una metodología numérica para resolver la ecuación general de transporte. La idea principal es el concepto de discretización: reemplazar una solución analítica en derivadas parciales que proporciona el valor de  $\phi$  de forma continua en todos los puntos del espacio por una solución numérica aproximada que da el valor de  $\phi$  únicamente en una serie de puntos discretos definidos por la malla.

La variable  $\phi$  es una variable genérica, que según el valor que adopte, nos devuelve cada una de las ecuaciones de las ecuaciones generales de conservación (o transporte) para la masa, cantidad de movimiento, energía, etc.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi \, dV + \oint_A \rho \phi \vec{v} \, d\vec{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \, d\vec{A} + \int_V S_\phi \, dV$$

Ecuación	Variable $\phi$
Continuidad	1
Cantidad de movimiento en $x$	$u$ (componente en $x$ de la velocidad)
Cantidad de movimiento en $y$	$v$ (componente en $y$ de la velocidad)
Cantidad de movimiento en $z$	$w$ (componente $z$ de la velocidad)
Energía	$h$ (entalpía)

Tabla 3-1 Valores de  $\phi$  en la ecuación general de transporte (tomada de [2])

La transformación de las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas precisa de una discretización espacial mediante la generación de una malla que permita dividir el dominio de interés en una serie de celdas a las que se le asocia el valor de la variable discreta  $\phi$ .

El MVF discretiza el dominio en un número finito de celdas, es decir, en un volumen de control, por lo que el método se basa en valores discretos que están promediados en la celda. Esto diferencia al MVF de otros métodos como el de diferencias finitas o elementos finitos, en los que la variable numérica fundamental es el valor local de la función en los nodos de la malla.

Tras realizar el mallado, el MVF asocia un volumen de control a cada punto de la malla, y a continuación aplica las leyes integrales de conservación a cada volumen local.

Una ventaja esencial en el MVF es que garantiza una discretización conservativa, que encaja con el hecho de tener que resolver una ecuación de transporte conservativa.

### 3.3 Aplicación del CFD a flujos industriales. Flujos multifásicos

La aplicación del CFD en el ámbito industrial, también conocido como I-CFD, además de la descripción del campo de fluido o de la transferencia de calor asociada, necesita de otros modelos que describan fenómenos de combustión, cambios de fase, coexistencias multifásicas o reacciones químicas.

Desde el punto de vista molecular coexisten varias fracciones másicas de diversas especies, pero macroscópicamente el fluido se comporta como una única fase constituyente.

En la naturaleza y en la industria existe un gran número de flujos que están compuestos macroscópicamente por una mezcla de gases. Cuando se habla de flujos multifásicos, se define a cada fase como aquel tipo de material identificable, con una frontera bien definida macroscópicamente y que presenta una determinada respuesta o interacción con el flujo dominio en el que esté confinado. Así, las fases también hacen referencia a materiales que, estando en el mismo estado de la materia, presentan distintas propiedades fisicoquímicas, como por ejemplo una mezcla de agua y aceite, ambos líquidos, pero con características bien diferenciadas.

En este tipo de flujos, la fase primaria debe ser continua y corresponderse con la fase principal del flujo. El resto de fases se denominan fases secundarias, y pueden estar de forma dispersa, interpenetradas en la primaria o de forma continua.

Según el estado de las materias que participan en el flujo. La clasificación de flujos multifásicos, en interacción gas-líquido y líquido-líquido incluye:

- Flujo con burbujas: inclusión de pequeñas burbujas en forma de fase discreta en un medio fluido continuo.
- Flujo con gotas: inclusión de pequeñas gotas de líquido en un medio gaseoso continuo.
- Flujos con bolsas de aire (slug flow): grandes burbujas de gas en un medio líquido continuo.
- Flujos estratificados o con superficie libre: fluidos inmiscibles separados por una interfaz claramente definida.

Este último tipo de flujo multifásico es objeto de estudio en los distintos proyectos, tesis o trabajos relacionados con la inundación en compartimentos delimitados.

Se pueden indicar, además, más tipos de flujos multifásicos en interacciones gas-sólido y líquido-sólido, pero no son objeto de estudio en inundaciones.

### 3.3.1 Modelos multifase

No existe ningún modelo multifásico capaz de predecir todos los tipos de flujos según el estado de las materias que en ellas intervengan, debido a que existe una gran variedad, por lo que se han desarrollado diferentes modelos que son lo más apropiados posibles para una situación muy concreta. La selección del modelo adecuado ha de tener en cuenta factores del flujo multifásico, como son el régimen, la cantidad y dispersión de las fases o el número de Stokes de las partículas transportadas en el caso de que hubiese.

Existen cuatro modelos fundamentales para el estudio numérico de flujos multifásicos:

- Modelo de fase dispersa (DPM): se resuelven las ecuaciones de transporte para la fase continua primaria junto con la simulación de una fase secundaria discreta desde un punto de vista lagrangiano.
- Modelo euleriano: se emplea para modelar múltiples fases interpenetradas, ya sean líquidas, gaseosas o sólidas, y en cualquiera de sus combinaciones.
- Modelo de mezcla: es una versión simplificada del modelo euleriano, basada en suponer que el número de Stokes es significativamente pequeño de manera que la magnitud y dirección de las partículas es casi la misma que la del fluido.
- Modelo de volumen de fluido (VOF): permite el modelado de dos o más fluidos inmiscibles. La fracción de volumen de cada una de las fases se resuelve con una ecuación de transporte, a partir de la cual es posible definir la posición de las interfases.

### 3.3.2 VOF

La formulación VOF se basa en la suposición de que los fluidos participantes no están interpenetrados. Su aplicación se limita al análisis de flujos con superficie libre. El mayor problema que debe resolver este problema es el cálculo de las interfaces que delimitan a cada una de las fases en el interior del dominio.

Cada fase incorporada al modelo introduce su fracción de volumen al cálculo, teniendo, además, en cuenta la no interpenetrabilidad de las fases: la fracción de cada fase tiene un valor nulo en las celdas donde no haya presencia de esa fase, vale 1 en aquellas celdas llenas de dicha fase y su valor oscilará entre 0 y 1 en las celdas en interfase. En el modelo VOF no puede haber celdas vacías que no estén ocupadas por alguna de las fases.

Los campos de todas las variables (velocidad, temperatura, presión) son compartidos por todas las fases y representan valores promediados en función de las fracciones de volumen en cada celda. La ecuación de momento que se aplica es:

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

Donde la fuerza volumétrica,  $\vec{F}_v$ , se introduce para implementar el efecto de la tensión superficial en el cálculo de las interfaces. Además, las ecuaciones de transporte para cada fase q-énesima a resolver son:

$$\frac{\partial(\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q\rho_q\vec{v}) = \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q}$$

Donde los términos del segundo miembro se han introducido por las posibles transferencias de masa entre las fases.

Este algoritmo debe ser conservativo cuando defina las interfases a lo largo del tiempo y que la difusión numérica esté controlada para el cálculo de los flujos de las fracciones de volumen. Es necesario pues, introducir un algoritmo que determine la variación de  $\alpha_q$  en cada celda reconstruyendo la interfase a partir de los campos de  $\alpha_q$  en la iteración anterior.

Hay dos métodos para la reconstrucción de la interfase a partir de esos valores en las celdas:

- Cálculo de la interfaz por líneas simples (SLIC): que aproxima la interfaz por líneas rectas paralelas a los ejes de coordenadas (Figura 3-1).
- Cálculo de la interfaz por aproximación de pendientes (PLIC): que emplea líneas con pendientes para reconstruir la interfaz (Figura 3-2).

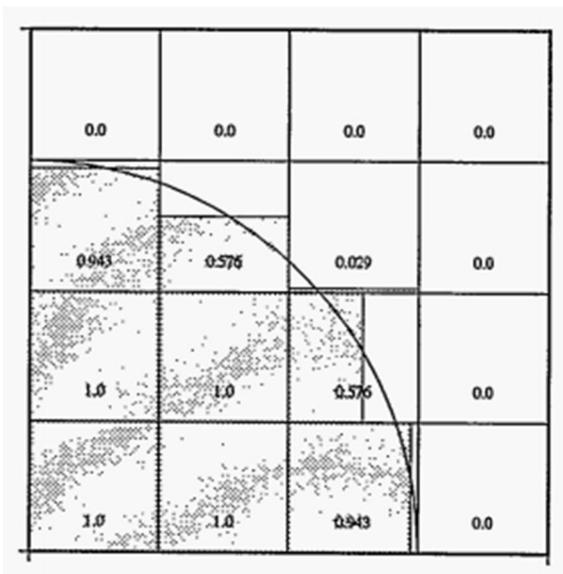


Figura 3-1 SLIC (tomada de [11])

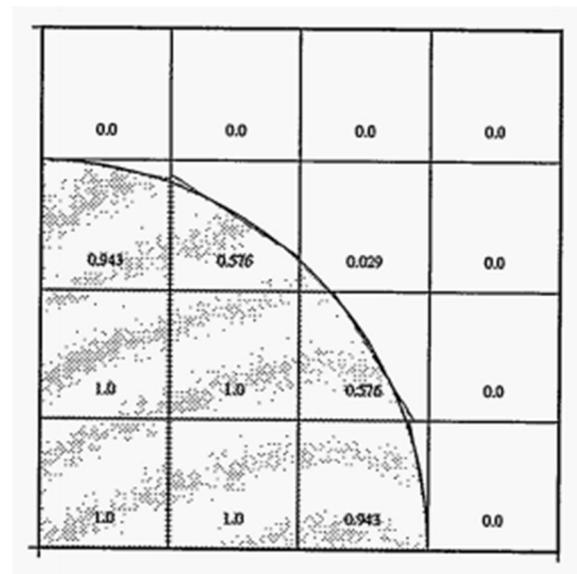


Figura 3-2 PLIC (tomada de [11])

El término temporal en la ecuación de transporte para las fracciones de volumen se puede resolver tanto de forma implícita como de forma explícita. La formulación implícita, se emplea cuando interesa la solución asintótica del flujo, despreciándose la evolución en el transitorio. Por otro lado, se usa la explícita cuando el resultado depende del proceso transitorio.

## 4 METODOLOGÍA DESCRIPTIVA

### 4.1 Demostración experimental

En este apartado se estudia de forma empírica el efecto de una vía en un cuerpo flotante y el tiempo en el que se inunda un compartimento de dimensiones conocidas. Para ello, el estudio se ha basado en el experimento del manual [4] de la empresa GUNT. Pero para no tener que realizar un orificio en la pared de este cuerpo flotante, se procedió a la construcción de otro cuerpo flotante con las mismas dimensiones, para poder así taladrar una de sus paredes y compartimentar dicha estructura.

#### 4.1.1 Recursos

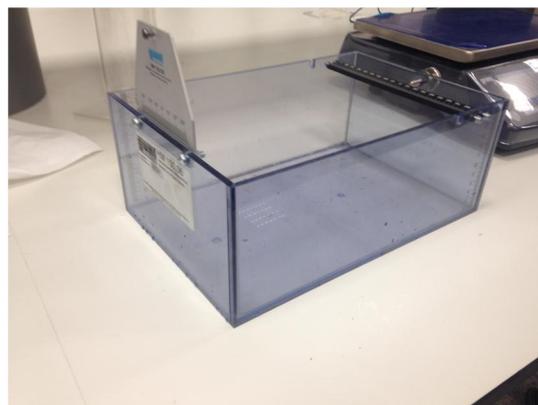
##### 4.1.1.1 Cuerpo flotante sin compartimentar HM 150.06

Este primer objeto de estudio consta de un paralelepípedo de metacrilato con las siguientes dimensiones:

Eslora	300 mm
Manga	200 mm
Puntal	120 mm
Espesor paredes	5 mm

**Tabla 4-1 Dimensiones cuerpo flotante**

Estas mediciones son propias y ciertos parámetros distan unos milímetros de los especificados en el manual [4] de GUNT.



**Figura 4-1 Cuerpo Flotante**

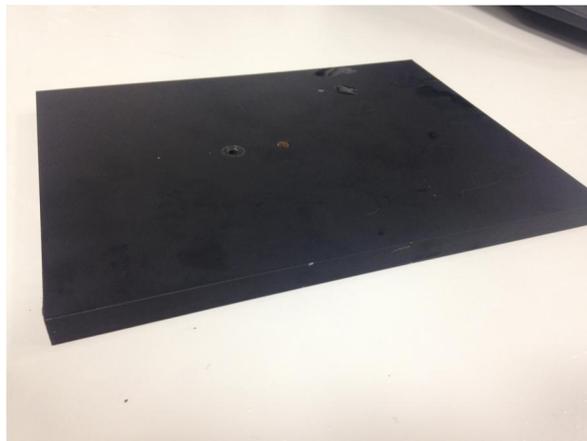
Para la medición de la masa se le desatornillaron todas las piezas, como el medidor de escora, la escala horizontal o los tornillos de apriete que aparecen en Figura 4-1; además, se utilizó la báscula de Figura 4-2, obteniéndose una masa de 1,3045 kg.



**Figura 4-2 Báscula**

Resaltar que se está recurriendo a vocabulario naval para denotar las partes del cuerpo debido a que se va a estudiar su comportamiento como si fuese un buque.

Dentro del paralelepípedo se atornilla una placa al fondo (ver Figura 4-3) sobre la que se enrosca una varilla de acero (ver Figura 4-4), por la que se desliza un peso con un tornillo de apriete para fijarlo y una escala de medición en forma de L (ver Figura 4-6) para medir a la altura a la que se posiciona.



**Figura 4-3 Placa de soporte peso vertical**

Largo	200 mm
Ancho	150 mm
Espesor	10 mm

**Tabla 4-2 Dimensiones placa**

Además, posee dos agujeros pasantes de 5mm de diámetro situados en a la mitad del ancho y a 73 mm y 95 mm, respectivamente. Su peso aislado es de 0,833 kg.



**Figura 4-4 Varilla vertical**

Largo total	413 mm
Diámetro	10 mm
Largo parte roscada	10 mm
Diámetro parte roscada	5 mm

**Tabla 4-3 Dimensiones varilla vertical**

El peso de la varilla aislada corresponde a 0,2465 kg.

El peso de la varilla vertical consta de un agujero usado para deslizarse por la varilla vertical y un agujero en el lateral al que se instala un tornillo de apriete para fijarlo en una altura determinada. Mediante este peso se puede estudiar como afecta al supuesto buque el traslado de pesos vertical. La masa de dicho peso es de 0,5665 kg y de 0,5785 kg con el tornillo de apriete.

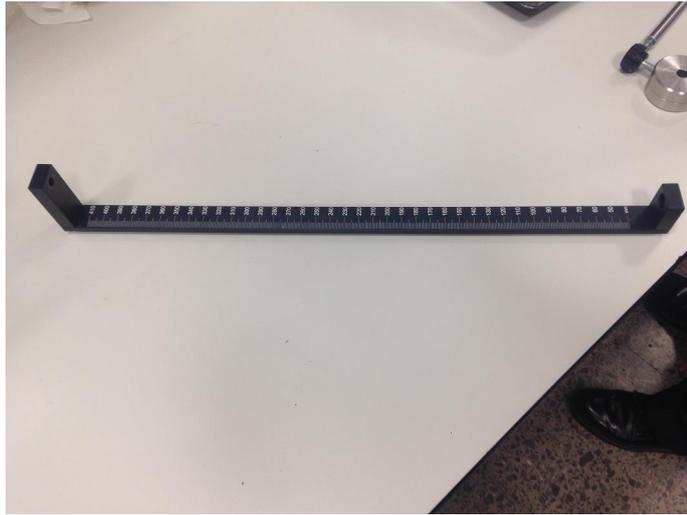


**Figura 4-5 Peso vertical**

Diámetro	79 mm
Altura	15 mm
Diámetro agujeros	10 mm

**Tabla 4-4 Dimensiones Peso vertical**

La escala de medición vertical tiene, además, dos agujeros tanto en la base, que sirve para ir atornillada la base, y en el tope, en el que se atornilla la varilla metálica. Su masa se sitúa en 0,147 kg.



**Figura 4-6 Escala de medición vertical**

Largo	413 mm
Ancho	20 mm
Espesor parte graduada	5 mm
Altura de la base	10 mm
Largo de la base	30 mm
Largo del tope	52 mm
Altura del tope	10 mm
Diámetro agujeros	5 mm

**Tabla 4-5 Dimensiones Escala de Medición vertical**

Para el estudio de traslados de pesos en horizontal, es decir, de banda a banda, el módulo de experimento, al igual que para el traslado de pesos en vertical, consta de una escala atornillada en las paredes internas de ambas bandas y de una varilla de acero, por la que se desliza a su vez otro peso, que se posa sobre dos cavidades.



**Figura 4-7 Varilla Horizontal**

La varilla horizontal se coloca sobre unas ranuras que tiene el HM 150.06 a banda y banda en la parte superior, ajustado con una arandela y una rosca a cada banda.

Diámetro	7 mm
Largo	190 mm
Diámetro parte roscada	5 mm
Largo parte roscada	11 mm

**Tabla 4-6 Dimensiones varilla horizontal**

La varilla finaliza en una parte roscada de menor diámetro a cada lado, la cual se coloca, como se mencionó anteriormente, sobre las ranuras. Tiene una masa de 0,08 kg.

Sobre la varilla de la Figura 4-7 se desliza un peso de 0,196 kg, con un tornillo de apriete para ajustarlo en una determinada posición y crear una determinada escora.



**Figura 4-8 Peso Horizontal**

Diámetro	40 mm
Altura	20 mm
Diámetro agujeros	9 mm

**Tabla 4-7 Peso horizontal**

La escala horizontal va atornillada en cada banda en la cara interior de las paredes por dos tornillos a cada lado. La masa de la escala es de 0,0535 kg.

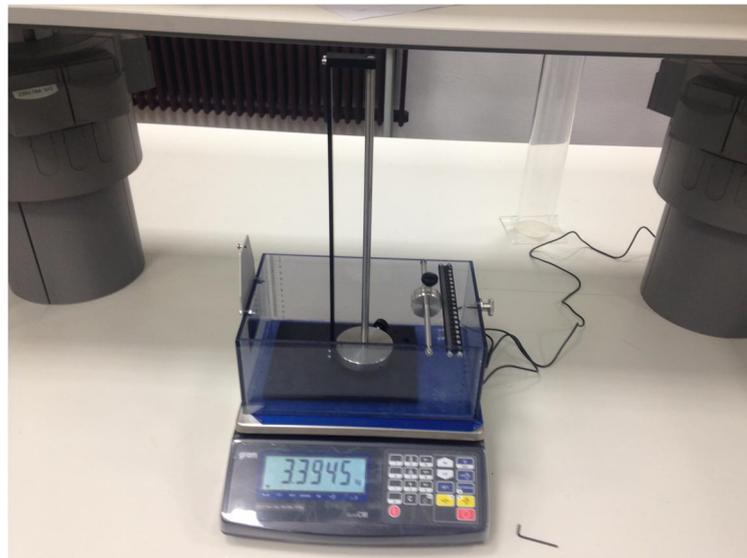


**Figura 4-9 Escala Horizontal**

Largo	190 mm
Ancho	2 mm
Espesor	5 mm

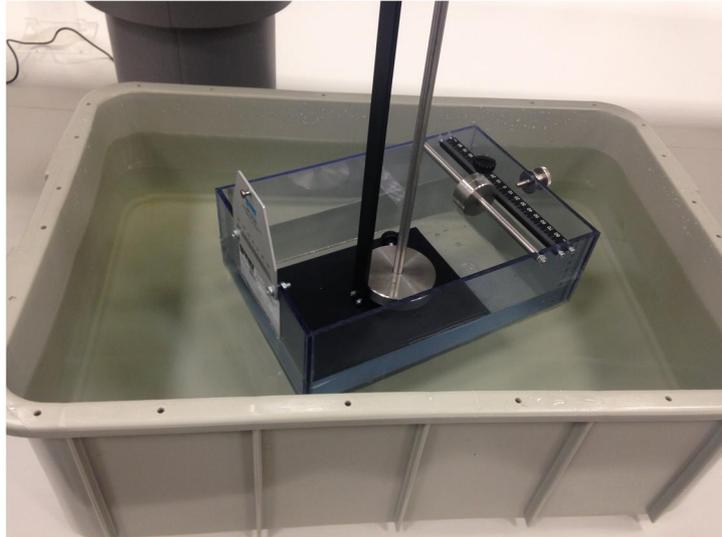
**Tabla 4-8 Escala Horizontal**

Todos los elementos atornillados y fijados poseen una masa total de 3,3945kg



**Figura 4-10 Montaje completo**

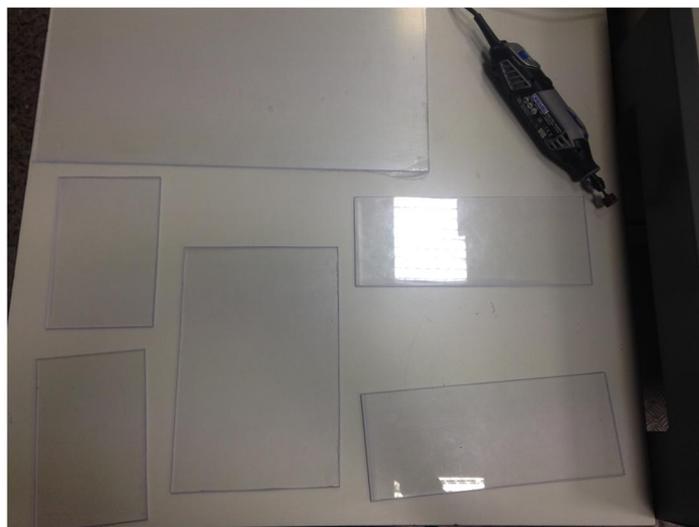
Además, el módulo de experimentos GUNT de estabilidad de cuerpos flotantes proporciona un depósito de plástico en el que, una vez lleno de agua, se deposita el montaje completo para proceder al estudio de traslados de pesos. También incorpora un medidor de escora a proa de la estructura.



**Figura 4-11 Módulo de experimentos completo**

#### **4.1.1.2 Cuerpo flotante compartimentado**

Para crear el cuerpo en el que nos basaremos en el experimento, se dispuso de unas láminas de metacrilato, las cuales se cortaron y seccionaron para generar las paredes del objeto de estudio.



**Figura 4-12 Láminas de metacrilato**

Se cortaron con las mismas dimensiones que el HM 150.06, pegando los cantos con un adhesivo (ver Figura 4-13) y sellándolo con silicona. Además, se procedió a compartimentar el cuerpo, de banda a banda y de forma simétrica, realizando un orificio solo en una banda, para que así se inunde un compartimento, exclusivamente.



**Figura 4-13 Pegado de las láminas**

La masa del cuerpo compartimentado es de 1,079 kg, que dista mucho de los más de 3 kg del HM 150.06. Esta escasa masa resulta un gran problema ya que el calado apenas superaba el espesor de la lámina que servía de quilla (la base del cubo).

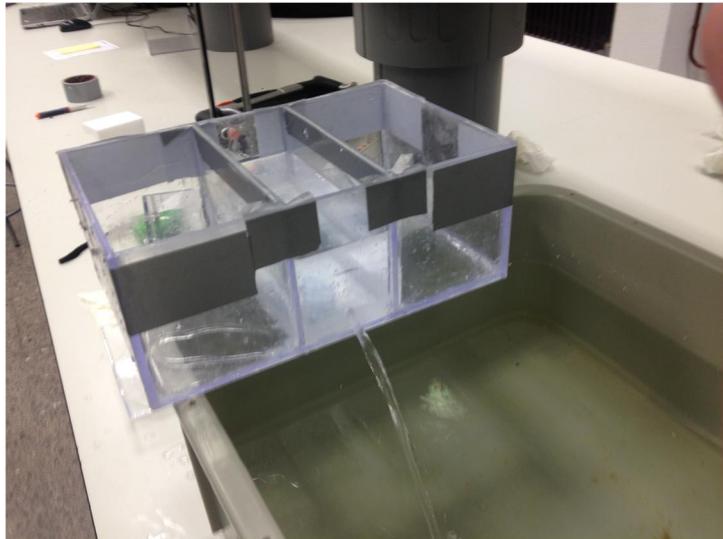
Debido a esto se procede a incluir pesos iniciales de 0,9 kg a proa y popa del compartimento, para incrementar el calado de la estructura.

Se le incluye también el medidor de escora del HM 150.06.

#### *4.1.2 Ensayo real*

##### **4.1.2.1 Primer ensayo**

Este primer ensayo se realiza para calcular el tiempo en desembarcar una cierta cantidad de agua. Para ello se perfora un orificio de 8 mm de diámetro a 20 mm de la quilla y se dispone sobre el depósito de agua como se muestra en la Figura 4-14.



**Figura 4-14 Primer ensayo**

Se decide medir el tiempo que tarda en vaciarse desde el total de la altura hasta 60 mm de altura desde la quilla, lo que supone un volumen de agua a desalojar de:

$$V = L \times M \times H = 80 \times 190 \times 60 = 912000 \text{ mm}^3 = 0,912 \text{ L}$$

Esta cantidad de agua a desembarcar, con cronómetro en mano, tarda un total de 19 segundos.

Mediante el método de coeficiente de descarga:

$$Q = S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 4^2 = 50,265 \text{ mm}^2$$

$$Q = 50,265 \cdot \sqrt{2 \cdot 9810 \cdot 60} = 54537,5 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Por lo que debería haber tardado 17 segundos. Esta diferencia se debe a que la ecuación del caudal se emplea para el calado medio y, ya que el caudal varía con la altura, como se va vaciando H va disminuyendo, por lo que habría que realizar la integral.

#### 4.1.2.2 Segundo ensayo

En el segundo ensayo se incluyen las masas comentadas anteriormente y se introduce el montaje experimental en el depósito de agua.

El objeto de estudio de este segundo ensayo es calcular el tiempo que vuelve a su posición de adrizamiento y ver como va variando la escora.



Figura 4-15 Segundo ensayo

Para ello se coloca el medidor de escora del montaje HM 150 y se comienza la observación. El cuerpo flotante tarda en estabilizarse 56 segundos, oscilando su escora entre 0° y 2° a babor, embarcando un total de 0,912 L y siendo su calado final de 65 mm.

#### 4.1.2.3 Tercer ensayo

En este ensayo se vuelve a compartimentar (ver Figura 4-16) para tratar de nuevo la evolución temporal de la inundación en un compartimento de menores dimensiones, para que cuando se modele en código CFD no de ciertos problemas por discretización temporal.

La capacidad del compartimento será:

$$V = 80 \times 115 \times 95 = 874000 \text{ mm}^3$$



**Figura 4-16 Doble compartimentación**

Se le añade un total de 3,8 kg, distribuyendo equitativamente 1,9 kg a proa y a popa y se comienza el ensayo. Se incluyen también unos pivotes a proa y popa del compartimento sobre la línea de crujía, para fijar los pesos y que cuando el cuerpo escora, no se mueva y para facilitar el movimiento de pesos.

Se observa, al comenzar a inundarse, se escora a la banda de babor, que es la banda en la que posee el orificio, hasta un total de 5° de escora a babor. El tiempo en el cual tarda en llenarse el compartimento hasta estabilizarse es de 34 segundos y en ese tiempo embarcan 760000 mm<sup>3</sup> de agua, es decir, el agua embarcada ocupa el 87% de la capacidad del compartimento. La variación de calado pasa de ser de 7,5 mm el calado inicial a 10,5 mm tras embarcar el agua.

## 4.2 Metodología numérica

### 4.2.1 Modelado CAD

El modelado del cuerpo flotante HM 150.06 (apartado 4.1.1.1) se realizó mediante el software Siemens NX versión 11.0.

En primer lugar se modelaron las distintas piezas de la estructura por separado, aplicándoles el material correspondiente. Tras esto, se procedió al ensamblaje de todas las piezas. Las imágenes de las distintas piezas se encuentran adjuntas en el Anexo I: Imágenes Modelado CAD.

Las siguientes propiedades del HM 150.06 se han extraído del modelado realizado en el software CAD mencionado anteriormente:

Accuracy used	0.99000000
Density	0.000002335
Area	491734.609
Volumen	1374018.786372200
Mass	3.208132751

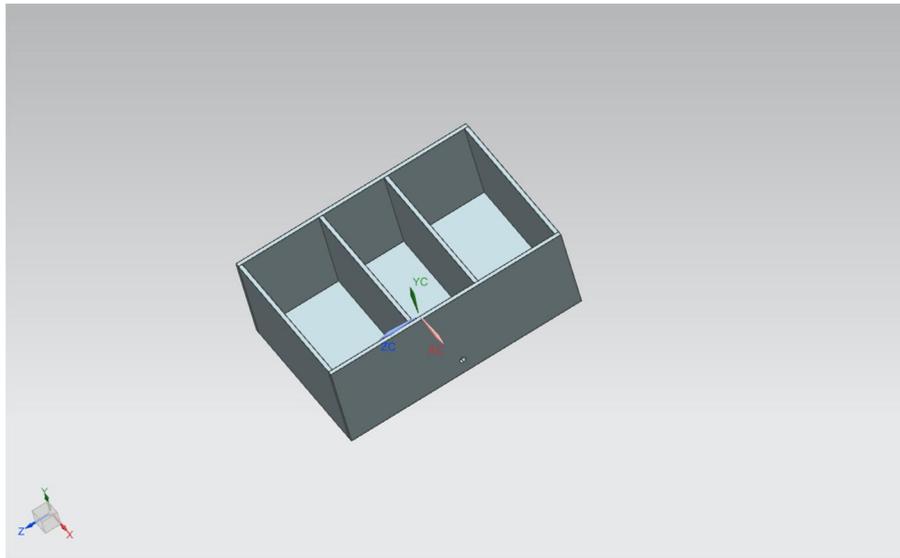
	Xcbar= -4.63402188
Center of Mass	Ycbar= -0.03772468
	Zcbar= 62.40168341
	Mxc= -14086655737
First Moments	Myc= -0.121025811
	Mzc= 200.19288428
	Ixxw = 43708.8827317
Moments of Inertia (work)	Iyyw = 55560.1312216
	Izzw = 28596.81930157
	Rgx= 98.6429325
Moments of Inertia (centroidal)	Rgy= 115.771680
	Rgz = 94.2993957
Radio of Gyration (Spherical)	126.542258
	Xp(X) = -0.000229285
	Xp(Y)= 0.999999924
	Xp(Z)= -0.000315192
	Yp(X)= 0.936648737
Principal Axes	Yp(Y)= 0.000104357
	Yp(Z)= -0.350270085
	Zp(X)= -0.350270025
	Zp(Y)= -0.000375536
	Zp(Z)= -0.936648690

---

**Tabla 4-9 Propiedades CAD de HM 150.06**

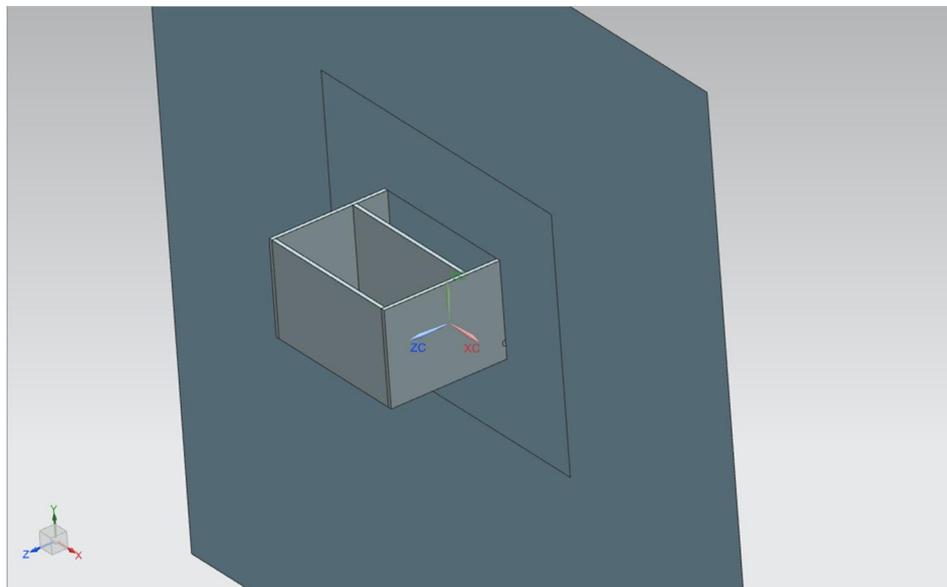
Las unidades empleadas para masas son de kg y las de distancia están referidas en mm.

El cuerpo compartimentado se modela también en el software CAD Siemens NX 11.0. Se modela en primer lugar el cuerpo para el ensayo de coeficiente de descarga.



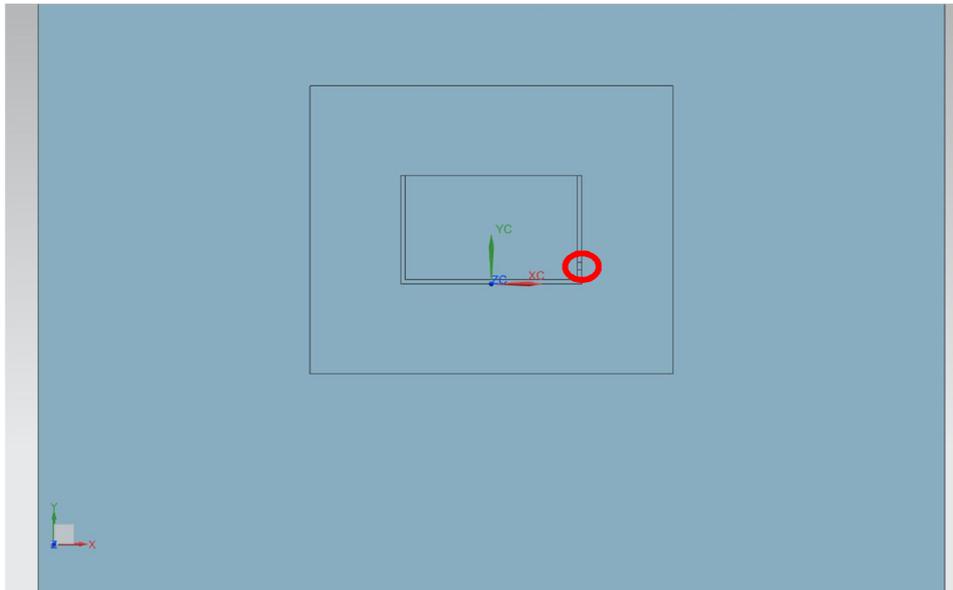
**Figura 4-17 Cuerpo flotante compartimentado**

Para realizar la simulación en 2D se debe realizar un corte por la sección donde se encuentra el orificio (ver Figura 4-18).



**Figura 4-18 Corte de sección**

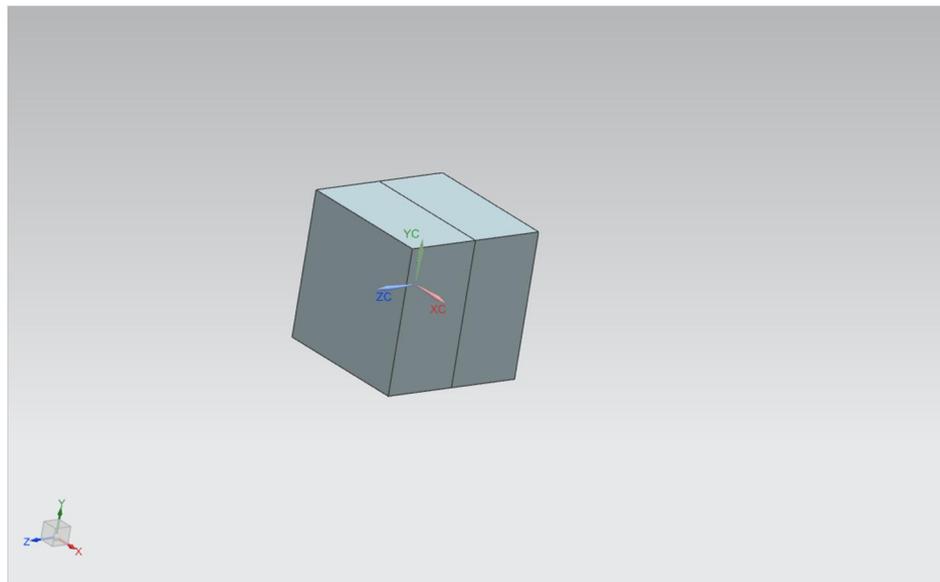
El resultado es el de Figura 4-19. La parte redondeada muestra el orificio por el que habrá un flujo de agua. La parte más interior muestra el contorno del cuerpo por el que se ha realizado el corte. Este contorno está dentro de un cuadrado que será donde se establecerán las condiciones de flujos, es decir, por donde se observará los movimientos de flujo de agua y aire. La parte final es el *background*, que resultará ser nuestro dominio.



**Figura 4-19 Background**

Este cuerpo CAD será el que se importe en el software CFD ANSYS y se realizará una visualización en 2D de los coeficientes de descargas.

Finalmente, y para líneas futuras, se establece un *background* en 3D, es decir, se encierra en un cubo para establecer dicho *background* en las tres dimensiones.



**Figura 4-20 3D**

#### 4.2.2 Empleo del software ANSYS FLUENT

Para emplear el software, primero se ha de lanzar la aplicación de ANSYS Workbench. Esta aplicación permite muchas posibilidades ya que acepta archivos compatibles realizados con otro tipo de software. Así, se puede modelar en otro software CAD y realizar el resto del proceso en Ansys.

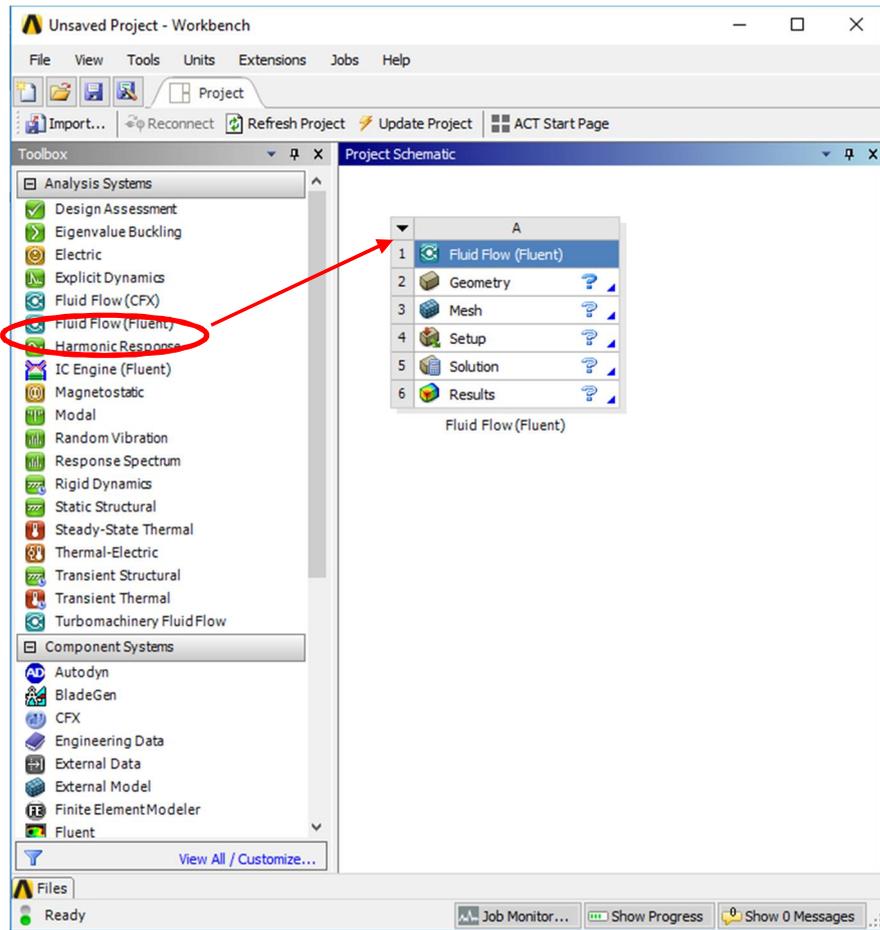


Figura 4-21 Workbench

Al lanzar el Workbench (verFigura 4-21) en la pestaña de *Analysis Systems* se despliega un árbol con todos los tipos de aplicaciones que usa el ANSYS. Se usará el *Fluid Flow (Fluent)*, que al clicar sobre él nos abre una ventana en *Project Schematic*. En esta ventana nos incorpora varias opciones, entre ellas la de modelar un cuerpo. Para modelar el cuerpo, lanza la aplicación *Design Modeler*.

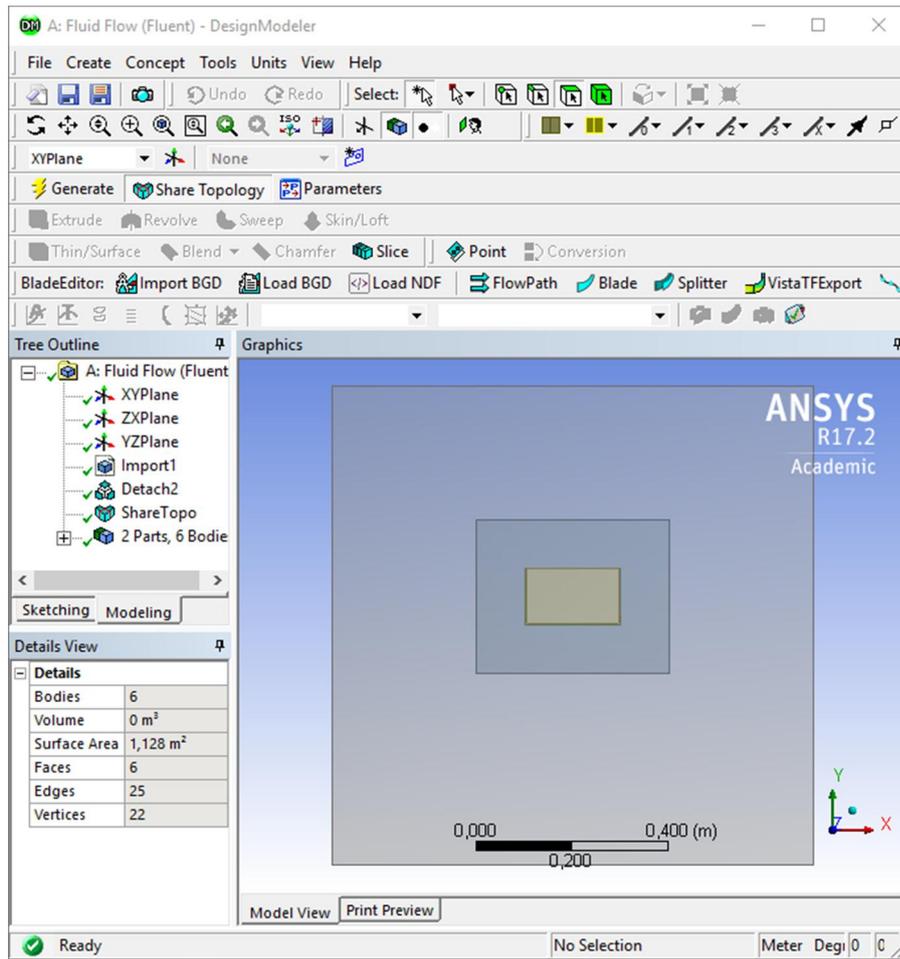


Figura 4-22 Design Modeler

Como se ha dicho anteriormente, el modelado no se realiza con esta aplicación del software ANSYS, si no que se realiza por NX y se importa. Se nombra el *background* que será fijo, el resto de elementos serán nombrados *moving* en la que están incluidos las paredes del metacrilato, la vía, y los elementos interiores y exteriores, que serán el espacio en el que habrá el movimiento de flujo tanto de agua como de aire.

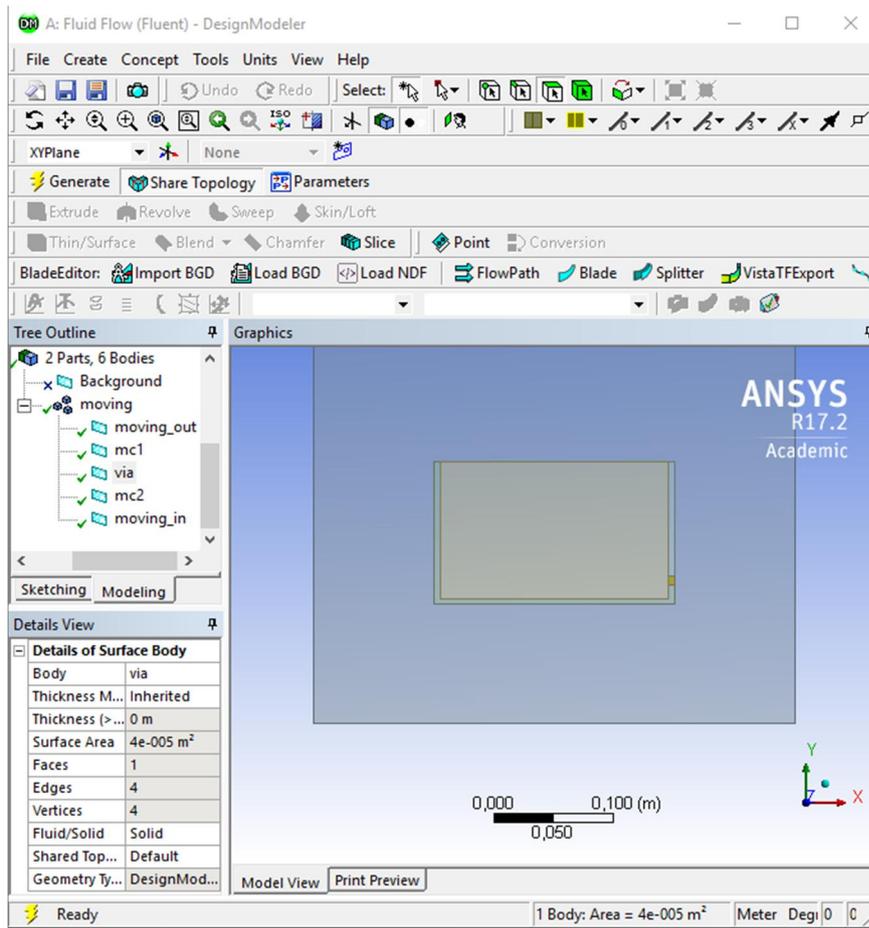


Figura 4-23 Moving parts

El siguiente paso sería mallar el cuerpo de estudio. Para ello, ANSYS lanza la aplicación *Meshing* (Figura 4-23). Para comenzar el mallado, primero hay que marcar y nombrar los límites de la geometría de estudio. Tras esto, se ha de establecer los parámetros básicos del mallado que queremos. Cuando se finaliza el mallado, habiendo establecido el número de celdas y el tipo de mallado en cada cuerpo, se procede a generar la malla

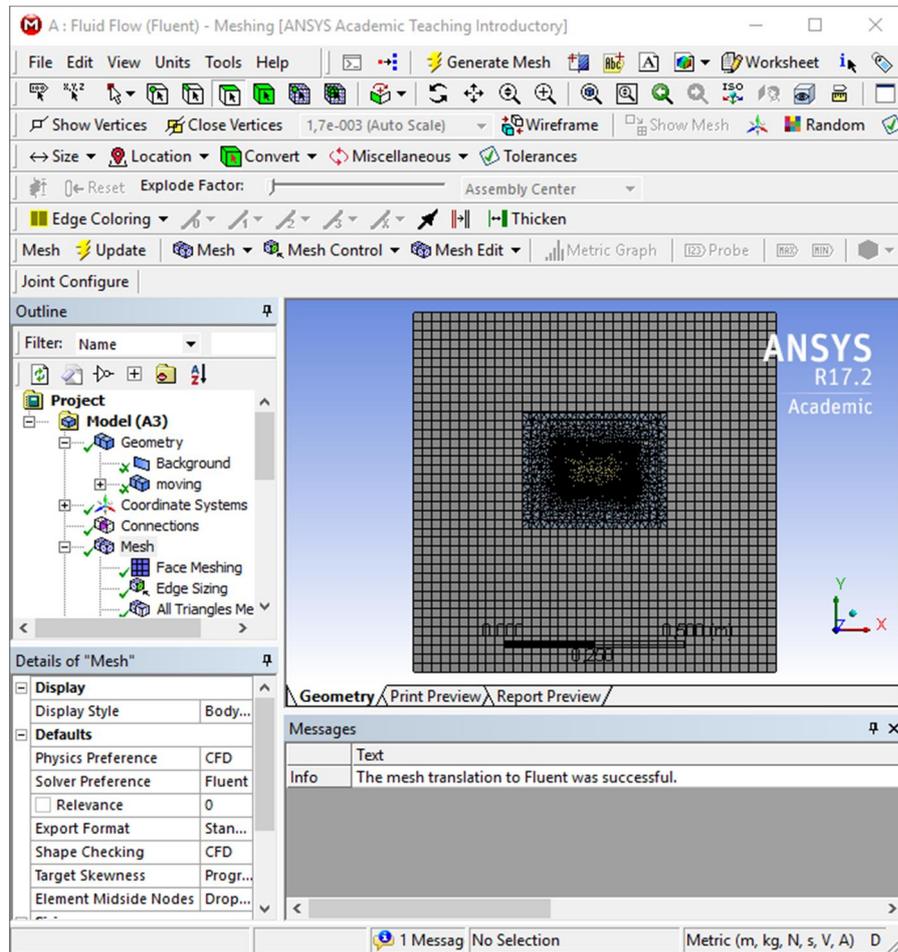


Figura 4-24 Mallado

En primer lugar, se malla el *background*, que al ser un elemento uniforme se decide realizar un mallado con celdas cuadradas, pues no precisa de exactitud en este elemento. Para el mallado de los elementos móviles, se realiza una malla con triángulos, haciendo coincidir en la interfase con el *background* de tal manera que una celda cuadrada del *background* coincida con aproximadamente la base de dos celdas triangulares del elemento móvil.

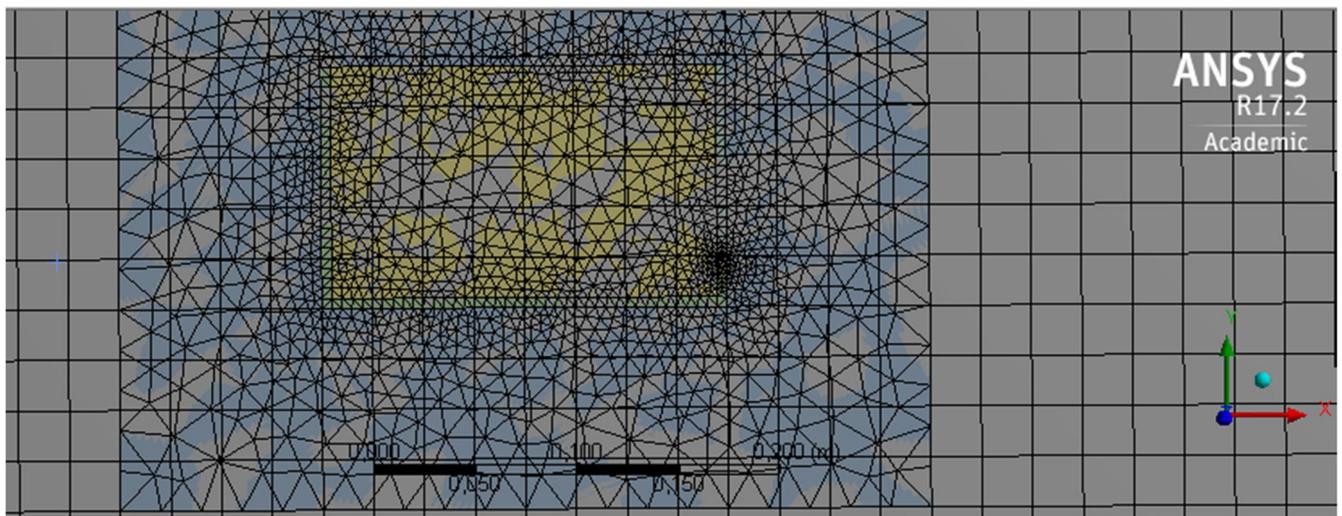


Figura 4-25 Interfase background-elemento móvil

El elemento en el cual se necesita mayor precisión es en los contornos del orificio. Aquí intervienen varios elementos, como son las paredes del metacrilato, el elemento móvil interior, el exterior y el propio contorno del orificio, por ello se realiza también un mallado triangular.

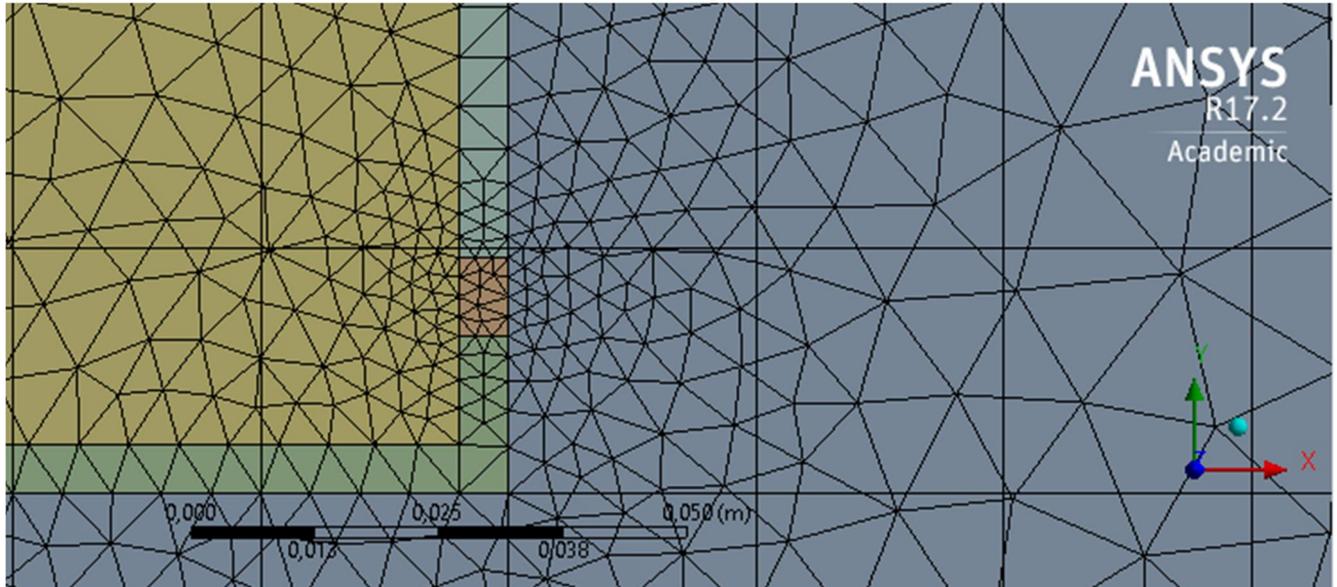


Figura 4-26 Mallado orificio

Tras el proceso de mallado, que es común para los distintos ensayos, viene el proceso de “Setup”, en el que se establecerá el dominio y se preparará el modo de funcionamiento de los flujos.

### 4.2.3 Primer ensayo

En este primer ensayo queremos que el metacrilato quede fijo y visualizar como el flujo de agua dentro del metacrilato sale por el orificio.

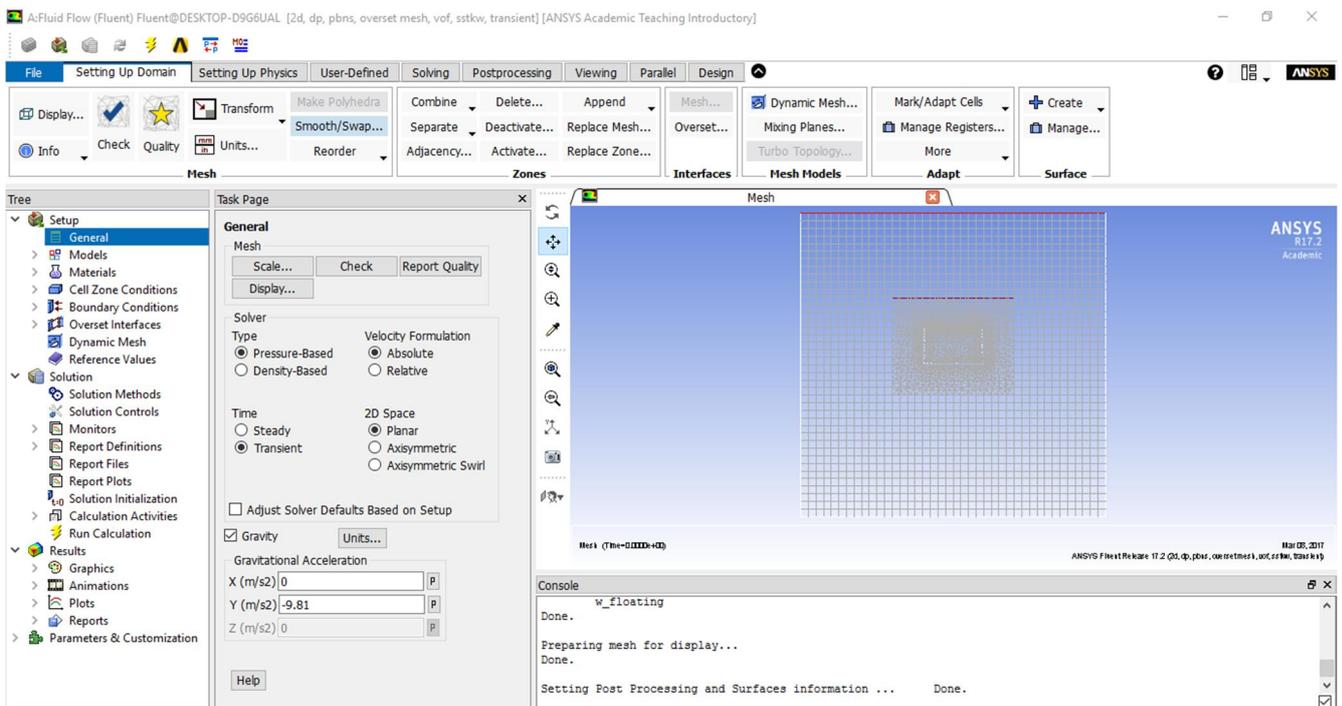


Figura 4-27 Setup

En primer lugar, en la barra de herramientas superior se establece, en la pestaña *Setting Up Domain*, el dominio en el que se va a trabajar, así como las unidades de medida en las que se va a trabajar, como la calidad del mallado.

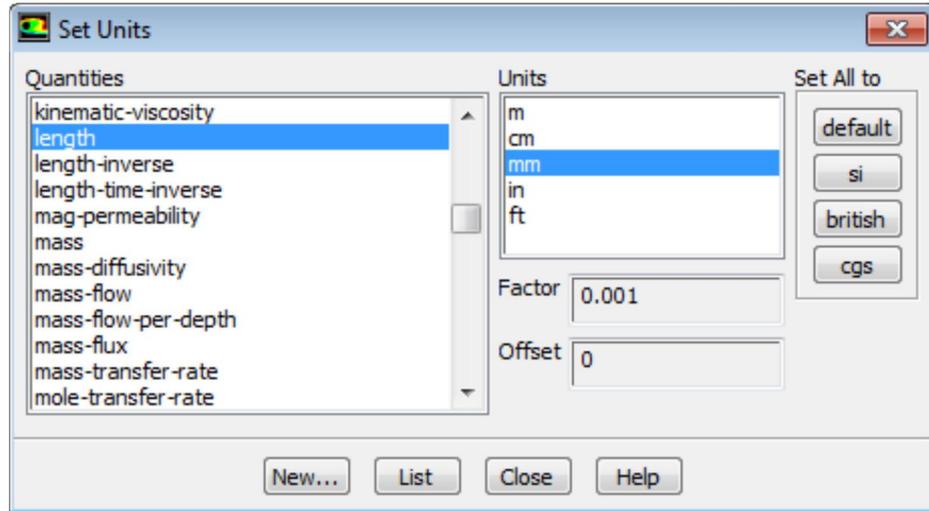


Figura 4-28 Set Units

Además, se debe establecer el modelo multifase VOF, ya que se realiza un estudio tanto de flujo de aire como de agua (ver Figura 4-30). Se debe incluir también, desde la pestaña *Setting Up Physics* los materiales que intervienen en este proceso. Entonces, se debe establecer ambos flujos existentes, el flujo de aire y el flujo de agua.

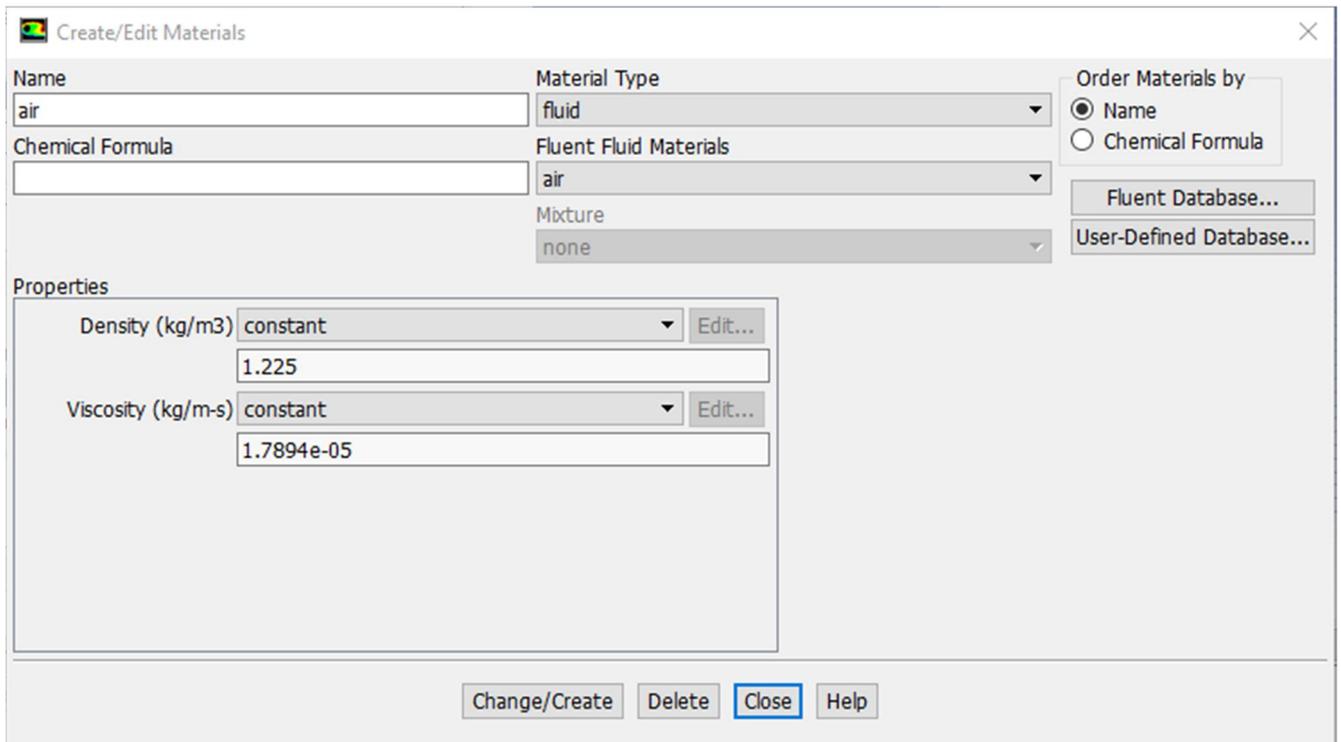


Figura 4-29 Selección de materiales

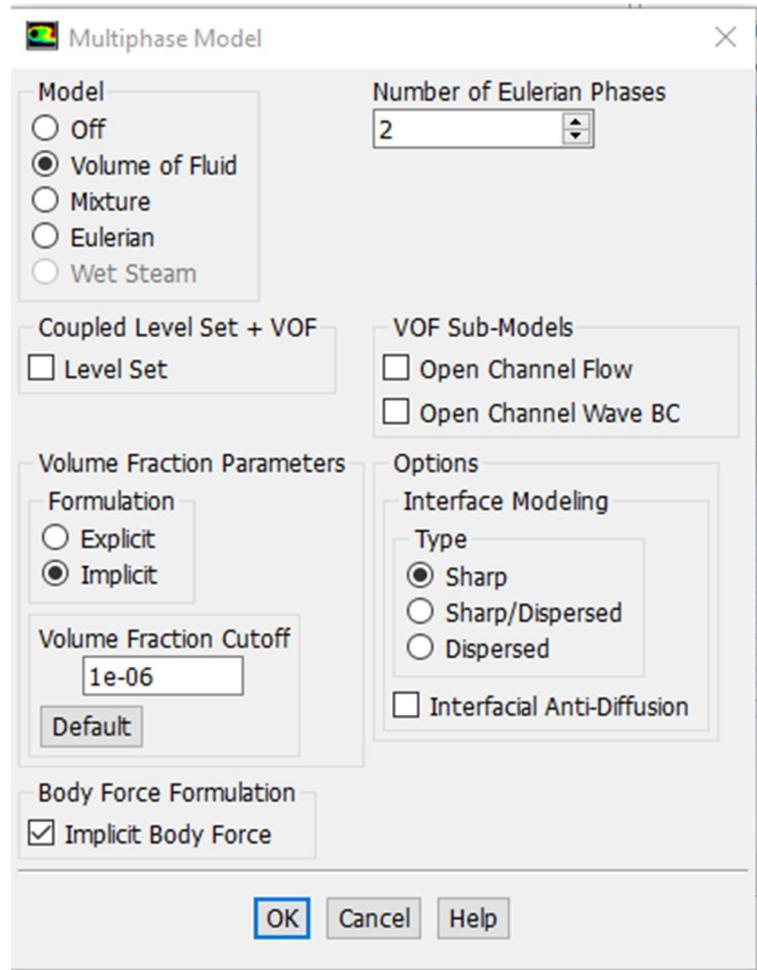


Figura 4-30 Modelo multifase

En la misma pestaña, *Setting Up Physics*, se deben seleccionar las condiciones de contorno y los propios límites. Los límites serán las paredes del metacrilato.

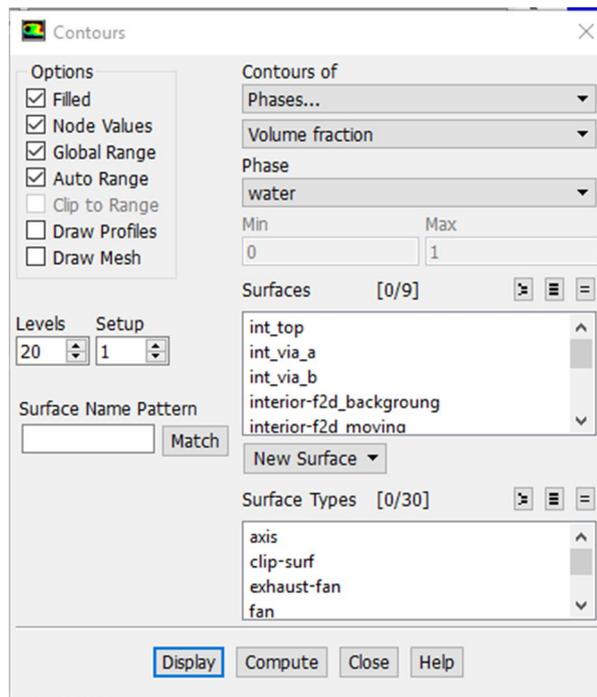


Figura 4-31 Fases

Una vez finalizado el establecimiento de los parámetros, el siguiente paso es la visualización. Previamente, se debe haber inhabilitado la capacidad de *Dynamic Mesh*, por la que dejamos fijo el metacrilato y observamos como fluye el agua a través del orificio. Se ha de establecer también (ver Figura 4-31) el resultado que queremos visualizar, que en nuestro caso es diferenciar las fases para ver los distintos flujos. El resultado se observa en la Figura 4-32:

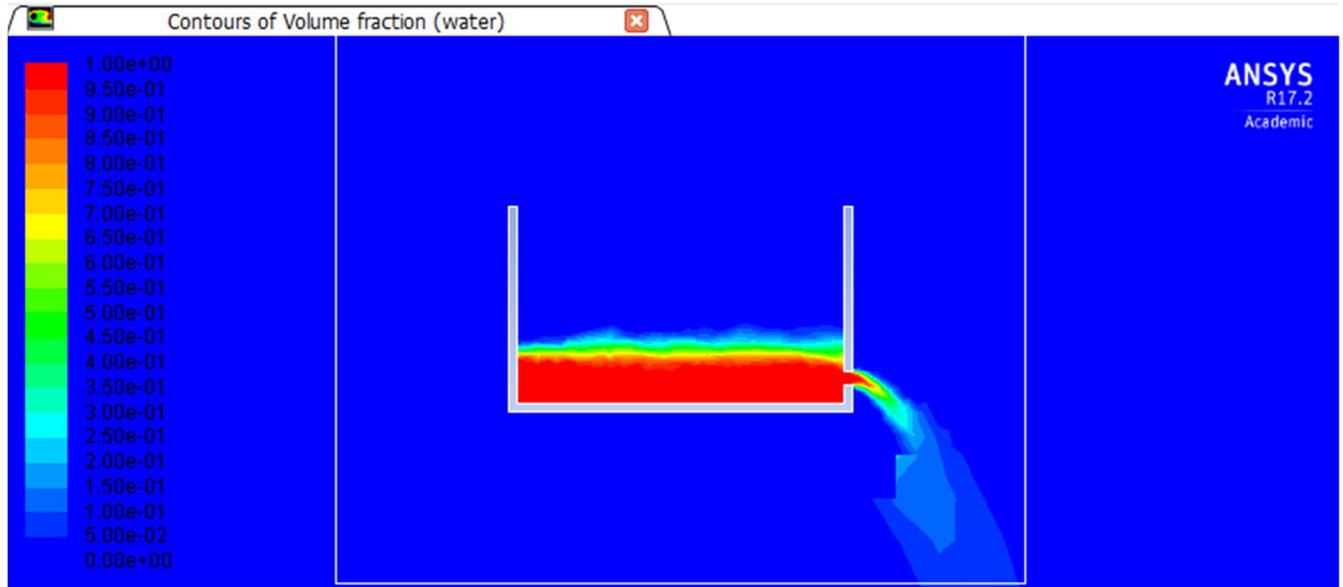


Figura 4-32 Resultado computacional del primer ensayo

#### 4.2.4 Segundo ensayo

Este segundo ensayo, a diferencia del anterior, debemos activar el *Dynamic Mesh*, pues queremos que el metacrilato sufra el movimiento que pueda generar los movimientos de flujo y observar que ocurre en las interfaces. Para ello debemos activar el 6DOF (Six Degrees Of Freedom) como se muestra en la Figura 4-33:

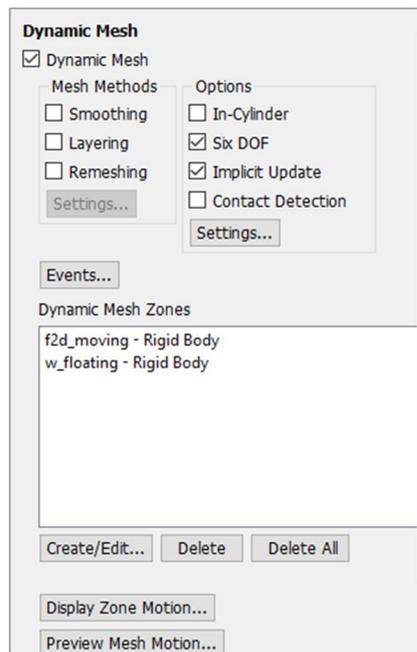
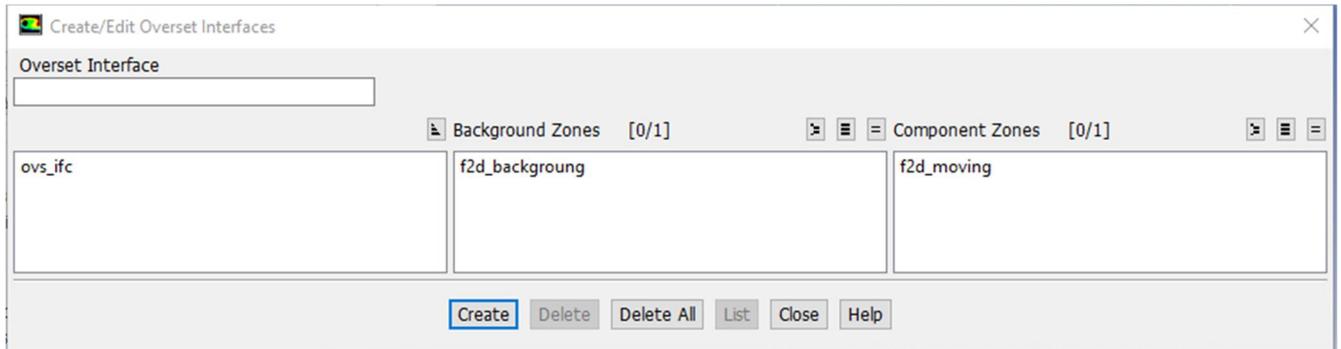


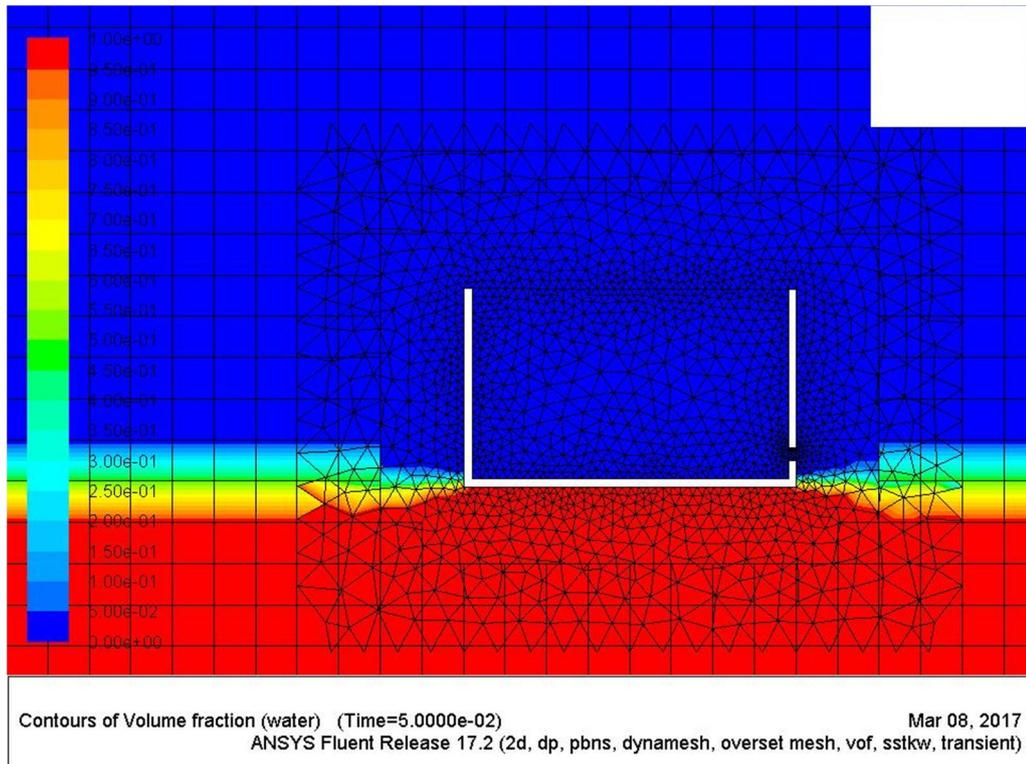
Figura 4-33 Six DOF

Se debe habilitar también la herramienta overset, en la pestaña de la barra de herramientas *Setting Up Domain*, para conjuntar el mallado en la interfase.



**Figura 4-34 Overset**

Una vez habilitado esto, se debe inicializar el software y que calcule lo establecido. Los resultados los muestra en iteraciones establecidas de 0,05 segundos, como se muestra a continuación:



**Figura 4-35 Primera iteración**

En la primera iteración el cuerpo aun está suspendido sobre la superficie del agua (Figura 4-35).

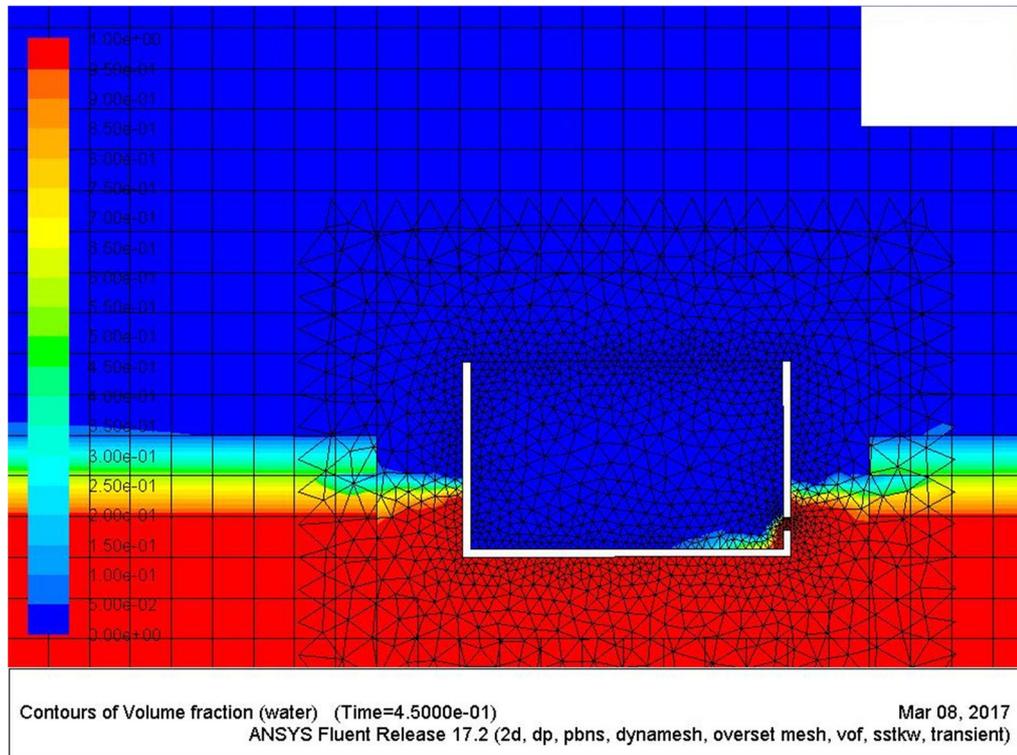


Figura 4-36 Novena iteración

En la novena iteración observamos como comienza a entrar el flujo de agua por el orificio y comienza a afectar a la estabilidad transversal del cuerpo.

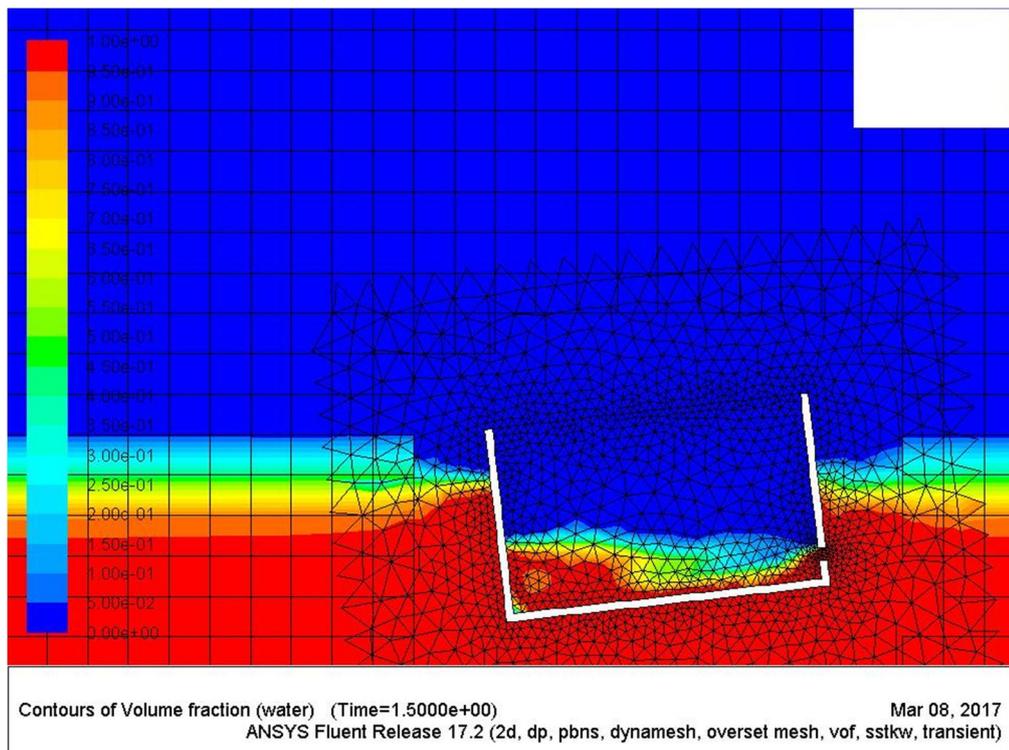


Figura 4-37 Trigésima iteración

En la Figura 4-37 se aprecia como el caudal de agua existente ya en el interior del cuerpo de metacrilato afecta considerablemente a la estabilidad.

Finalmente, a medida que se inunda a ambas bandas, el cuerpo comienza a estabilizarse balanceando a banda y banda, con pequeños ángulos de escora, hasta que el agua embarcada se iguala con la línea de flotación exterior (Figura 4-38)

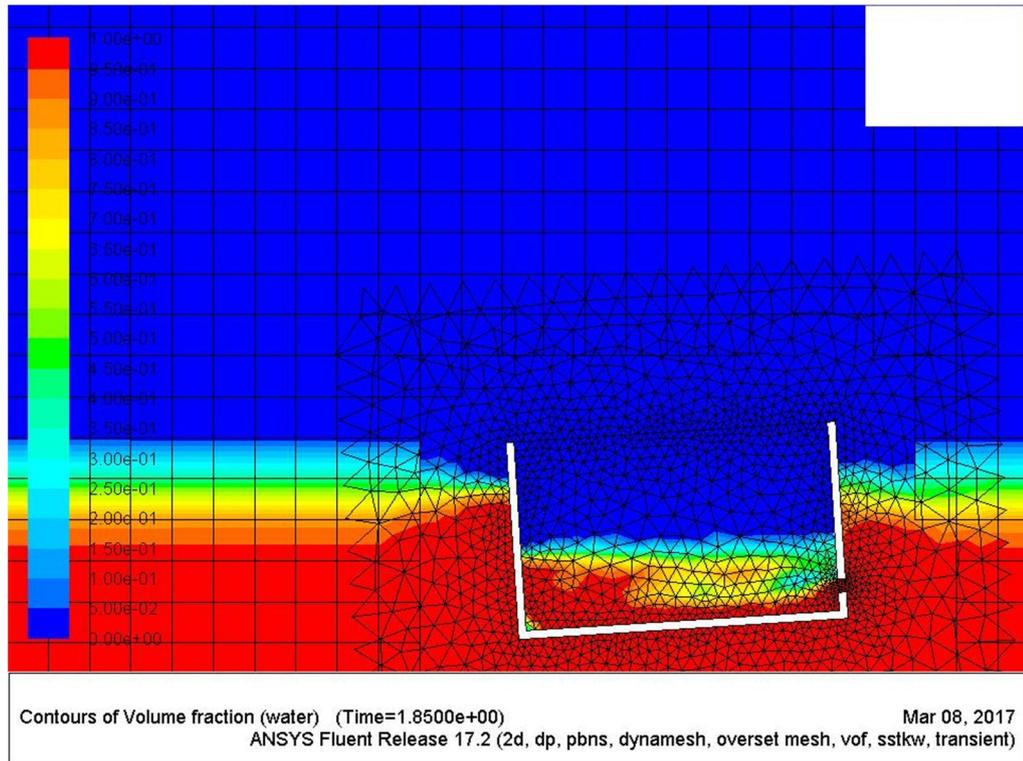


Figura 4-38 Última iteración

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

La herramienta CFD para el estudio de una inundación sobre un cuerpo flotante sirve de gran ayuda para una mejor visualización de este fenómeno. Sin embargo, en las primeras fases del trabajo de simulación conviene tener un montaje experimental que sirva de apoyo para validar los primeros resultados. Una vía de trabajo exclusivamente numérica de un problema complejo está llena de dificultades y a veces puede tenerse la sensación de atascarse y de no progresar.

El coste computacional de la resolución de un problema 3D transitorio con superficie libre es muy elevado y, por motivos de tiempo, se ha preferido potenciar la metodología bidimensional y el trabajo experimental.

En este trabajo se ha conseguido ampliar las capacidades de un montaje para el estudio de la estabilidad y convertirlo en un equipo que también permite analizar la estabilidad bajo la condición de una inundación en un compartimento.

Se observan también dificultades en los medios disponibles de observación y medición de los fenómenos descritos, pudiéndose paliar en líneas futuras en esta vía de estudio

### 5.2 Líneas futuras

La ampliación de este trabajo se podría hacer realizando el estudio CFD en 3 dimensiones. Sólo cuando se tenga los resultados de la simulación numérica se puede tener una verdadera validación de esta metodología de simulación de la inundación de un compartimento.

Una de las posibles líneas futuras podría consistir en añadir al modelo los fenómenos de taponamiento y de achique.

En este estudio, la inundación se ha tenido en cuenta que el compartimento inundando está siempre a presión atmosférica, no siendo en la realidad así, ya que, si un compartimento estanco sufre una vía y comienza a inundarse, el aire comenzaría a comprimirse, así que se propone como otra posible línea futura realizar el mismo estudio considerando la compresión de aire.

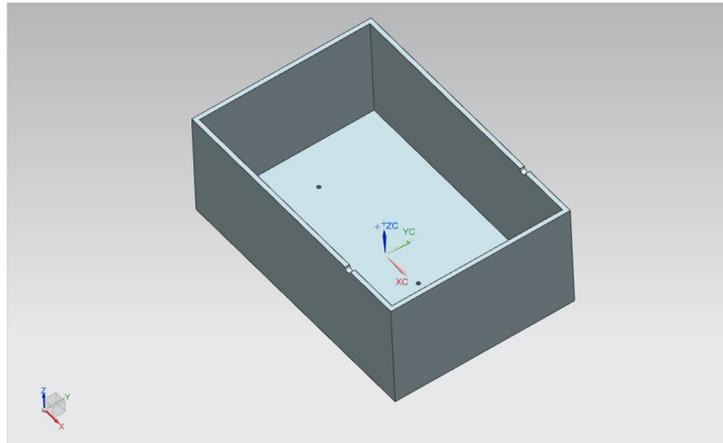
Como última ampliación a este trabajo, se propone realizar el modelo de la estructura de un barco de la Armada Española mediante impresión 3D, y realizar los mismos ensayos empíricos, siendo comparado posteriormente con simulación numérica CFD.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

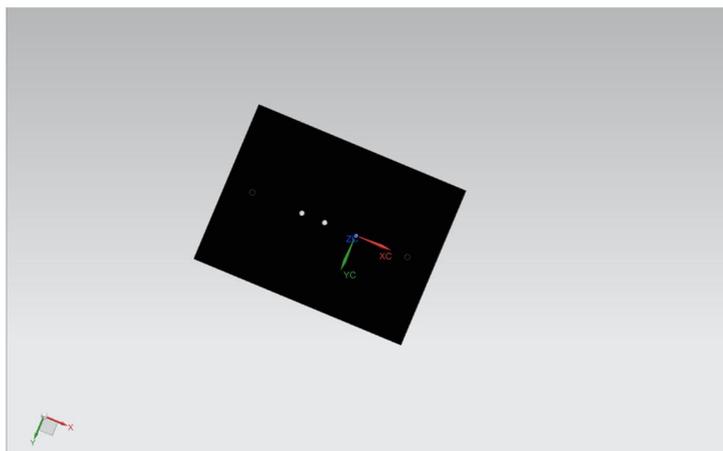
- [1] A. Española, *I-CP-02(A) Técnicas y Materiales de Control de Averías*, 2014.
- [2] J. M. F. Oro, *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos*, Editorial Reverté, 2012.
- [3] «ANSYS,» [En línea]. Available: <http://www.ansys.com/>. [Último acceso: 5 Marzo 2017].
- [4] P. Mittasch, «Manual de Experimentos de Estabilidad de Cuerpos Flotantes de GUNT,» 2015.
- [5] A. Española, *I-CP-03 (A) Estabilidad del Buque*, 2015.
- [6] H. Dankowski, «A Fast and Explicit Method for Simulating Flooding and Sinkage Scenarios of Ships,» Hamburgo, Schriftenreihe Schiffbau, 2013, p. 8.
- [7] B. Massey y J. Ward-Smith, *Mechanics of Fluid (8th Edition)*, Taylor and Francis, 2006.
- [8] C. D. Wood, A. J. Sobey, D. A. Hudson y M. Tan, «Estimation of Orifice Flow Rates for Flooding of Damaged Ships,» The Royal Institution of Naval Architects, 2011.
- [9] D. A. Randall, «The Shallow Water Equations,» Fort Collins, Colorado, 2006.
- [10] P. Ruponen, «Progressive Flooding of a Damaged Passenger Ship,» Helsinki, 2007.
- [11] D. B. Kothe, W. J. Rider, S. J. Mosso, J. S. Brock y J. L. Hochstein, «Volume Tracking of Interfaces having Surface Tension in Two and Thre Dimensions,» Reno, Proc. Of the 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996.
- [12] I. Barbudo, *Fundamentos de Maniobra*, Madrid: FRAGATA Libros Náuticos, 2004.



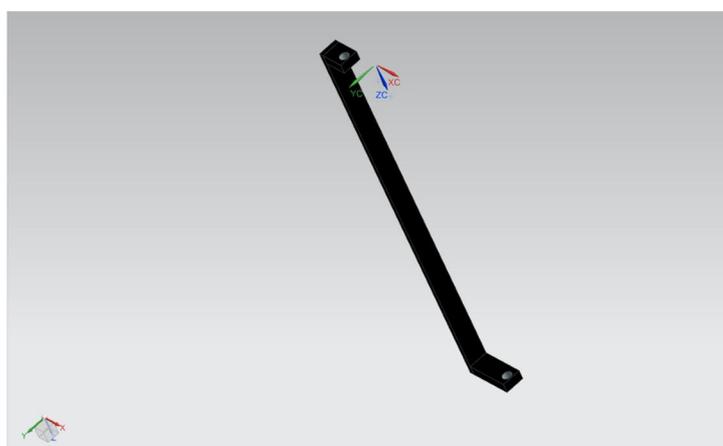
## ANEXO I: IMÁGENES MODELADO CAD



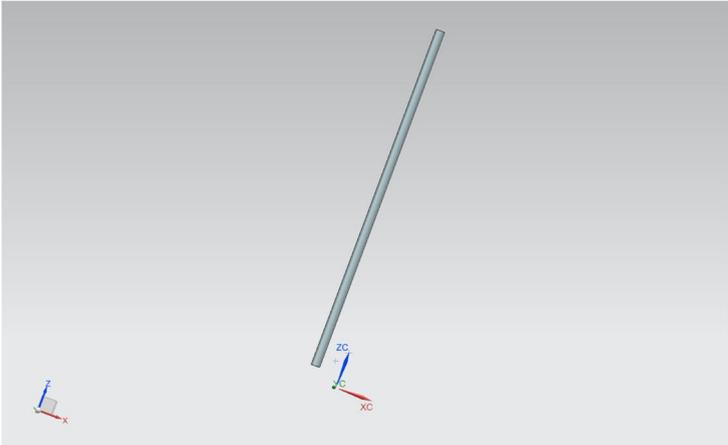
**Figura 0-1** Cuerpo flotante



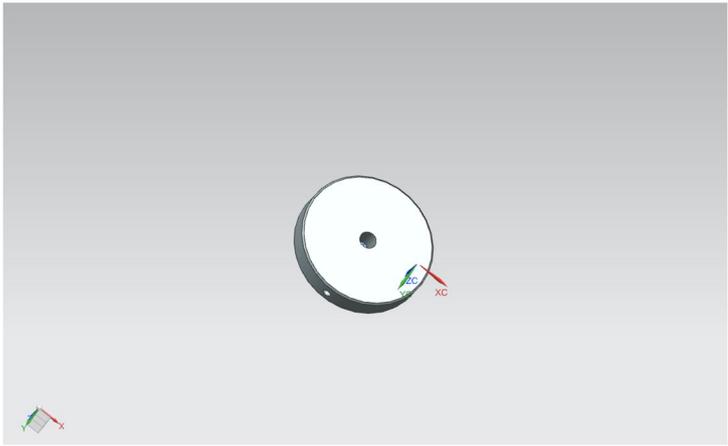
**Figura 0-2** Soporte



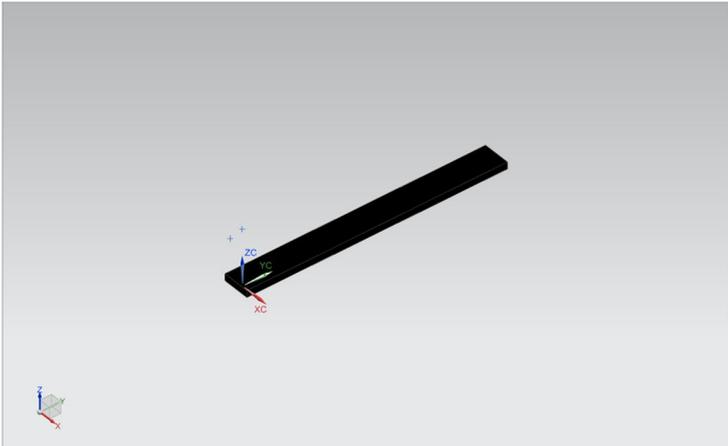
**Figura 0-3** Escala Vertical



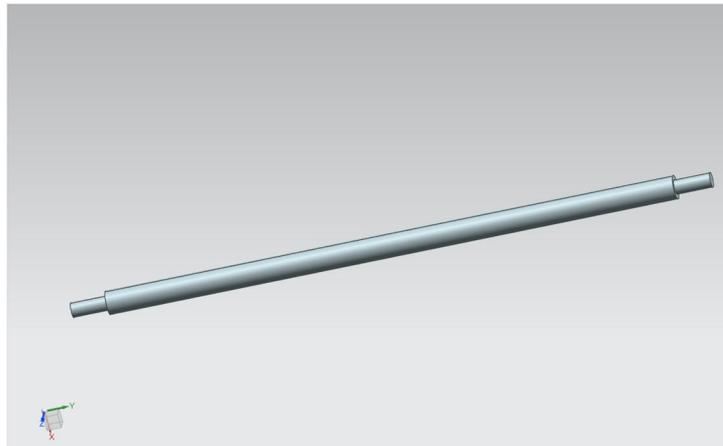
**Figura 0-4 Varilla vertical**



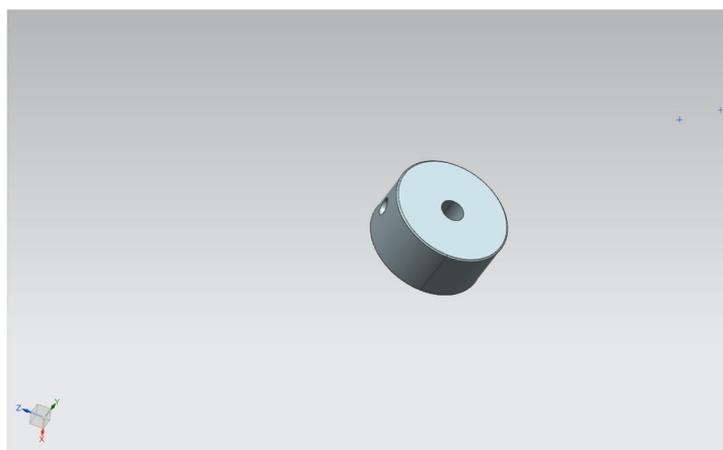
**Figura 0-5 Peso Vertical**



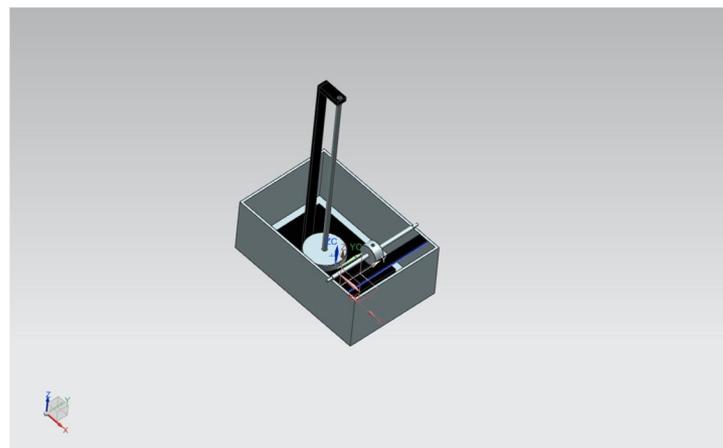
**Figura 0-6 Escala Horizontal**



**Figura 0-7 Varilla Horizontal**



**Figura 0-8 Peso Horizontal**



**Figura 0-9 Ensamblaje completo**

## ANEXO II: GLOSARIO NAVAL

**Buque:** Toda construcción flotante, de suficiente entidad o tamaño para poder navegar, simétrico con respecto al plano en el sentido de su longitud (plano longitudinal)

**Proa:** Parte delanterior del buque que va cortando las aguas del mar. Se denomina también proa al tercio anterior del buque.

**Popa:** Terminación posterior de la estructura del buque. Por extensión se llama también popa a la parte trasera de un buque.

**Babor:** Mirando hacia proa, todas las partes del buque que estén a la izquierda de la línea de crujía

**Estribor:** Mirando hacia proa, todas las partes del buque a la derecha de la línea de crujía.

**Amura:** Cada una de las zonas más curvas del casco en las proximidades de la proa.

**Aleta:** La parte más curva del costado en las proximidades de la popa.

**Eslora:** Es la longitud del buque medida en el plano longitudinal entre las perpendiculares que pasa por la proa y por la popa.

**Manga:** Es la mayor anchura de un buque, que se encuentra en la cuaderna maestra.

**Puntal:** Es la altura de un buque o distancia vertical, contada desde la línea de quilla hasta la cubierta principal.

**Calado:** Distancia vertical desde la quilla hasta la línea de flotación.

**Arrufo:** Deformación temporal que sufre el buque por efecto de diversas tensiones en la que la proa y la popa están más elevadas que el centro.

**Quebranto:** Deformación contraria, en la que el centro del buque está más alto que los extremos de proa y popa

**Balance:** Movimiento del barco navegando en la mar en la que cambia de banda a banda, variando su escora.

**Cabezada:** Movimiento del barco navegando en la mar en la que cambia de proa a popa continuamente, variando su asiento.