



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación hidrodinámica de la fuerza de arrastre del casco de
un buque de desplazamiento en aguas tranquilas*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Joaquín Revuelta Justo

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación hidrodinámica de la fuerza de arrastre del casco de
un buque de desplazamiento en aguas tranquilas*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo se centra en examinar la hidrodinámica del casco de una embarcación de desplazamiento con las herramientas de simulación CFD del software Ansys. Este software cuenta con una versión gratuita para estudiantes. Se toma como referencia el casco parabólico Wigley, del cual se dispone de la definición analítica de su geometría y cuyos resultados experimentales en canales hidrodinámicos se encuentran disponibles en abierto en la literatura. Después de realizar la discretización de la geometría mediante la obtención de una malla y seleccionar los modelos más apropiados para modelar la turbulencia y capturar la superficie libre se lleva a cabo el post-procesamiento de los resultados numéricos, el cual incluye la representación del oleaje generado y la gráfica del perfil de superficie libre sobre el casco. El coeficiente de fuerza de resistencia total del casco y el perfil de la superficie libre son comparados con los resultados experimentales proporcionados en todo el rango de números de Froude ensayado. Finalmente se analizan las áreas donde se podría optimizar la discretización en función de los datos obtenidos en la comparación y se evalúan posibles líneas futuras como propuestas para otros trabajos en el futuro, haciendo especial hincapié en los intereses de la Armada.

PALABRAS CLAVE

Hidrodinámica, CFD, Ansys Fluent, Casco Wigley, fuerza de resistencia total al avance

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer al director de este trabajo, Antonio Eirís, por su constante disponibilidad y apoyo durante todo el desarrollo del trabajo. Quisiera agradecer también a mis padres, Joaquín y Lupe, y a mis hermanas Cristina y Lupe, por ser un apoyo moral fundamental durante mi día a día que sin duda me ha ayudado a afrontar este trabajo de la mejor manera. Por último, agradecerles a mis compañeros por su ayuda y apoyo durante toda mi formación.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción y objetivos.....	13
1.1 Introducción	13
1.2 Objetivos	13
1.3 Ventajas del uso de simulaciones CFD.....	14
1.4 Ansys Fluent.....	14
1.5 Casco parabólico Wigley	14
2 Estado del arte	17
2.1 Introducción	17
2.1.1 Contextualización actual de la simulación CFD	17
2.2 Conceptos fundamentales de la hidrodinámica	17
2.2.1 Principios básicos de la hidrodinámica y la resistencia al avance	17
2.2.2 Fuerzas que actúan sobre el casco de un barco	18
2.2.3 Análisis dimensional de la resistencia de un casco	24
2.3 Tipos de diseños de cascos.....	25
2.3.1 Evolución histórica	25
2.3.2 Diseños actuales	27
2.4 Introducción al CFD	30
2.4.1 Principio de funcionamiento	30
2.5 Otros estudios en este ámbito.....	31
3 Desarrollo del TFG	37
3.1 Generación del CAD.....	38
3.1.1 Modelado del casco	38
3.1.2 Configuración del dominio computacional.....	42
3.2 Obtención de la malla	47
3.3 Setup	53
4 Resultados y Validación.....	63
4.1 Resultados	63
4.1.1 Coeficiente de fuerza de arrastre (CT)	63
4.1.2 Patrón de ola generado.....	63
4.2 Validación	66

4.2.1 Validación del CT obtenido	66
4.2.2 Validación del Perfil de ola obtenido	68
5 Conclusiones y líneas futuras	75
6 Bibliografía.....	77
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	81
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales.....	83
Anexo III: Representación en MatLab	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Vista 3D del casco Wigley.....	15
Figura 1-2 Plano de formas del casco Wigley	15
Figura 2-1 Oleaje generado por un barco con propulsión en aguas tranquilas [9].....	17
Figura 2-2 Oleaje generado por un casco arrastrado en aguas tranquilas [9]	18
Figura 2-3 Componentes de RT [10].....	19
Figura 2-4 Flujo ideal sobre un cuerpo sumergido [10]	20
Figura 2-5 Flujo de agua sobre un cuerpo sumergido [10].....	20
Figura 2-6 Patrón típico de flujo sobre el casco de un barco [10].....	21
Figura 2-7 Patrón de oleaje generado por un objeto móvil en aguas tranquilas [10].....	23
Figura 2-8 Patrón de oleaje de las fragatas F-100 [12].....	23
Figura 2-9 Oleaje generado por la F-102 a gran velocidad [12]	23
Figura 2-10 Esquema de la disposición de una maqueta para ensayo en un canal de ensayos [14] ..	25
Figura 2-11 Buque de guerra egipcio del 1200 a.C. [15].....	25
Figura 2-12 Carabela latina (izq.) y su evolución la Nao Victoria (dcha.) [16] [17]	26
Figura 2-13 HMS Warrior (1860) uno de los primeros buques de guerra con casco de hierro [20]26	
Figura 2-14 CAD generado de un casco genérico con bulbo de proa [23].....	27
Figura 2-15 Un ejemplo de casco de desplazamiento es el del petrolero VLCC Kazusa [28]	28
Figura 2-16 Un ejemplo de casco semi-planeador es el de la Rodman Ventura 790 SD [30].....	28
Figura 2-17 Un ejemplo de casco de quilla fija es el del velero Beneteau Oceanis Yatch 54 [31] ..	28
Figura 2-18 USS Manchester (LCS-14) de la clase Independence [35].....	29
Figura 2-19 AC40 Luna Rossa Prada Team con hidro alas [37]	29
Figura 2-20 Geometría del prototipo ONRT [39]	32
Figura 2-21 Geometría del prototipo KCS [39]	33
Figura 2-22 Geometría del prototipo JBC [39]	33
Figura 2-23 Geometrías del Workshop Tokio 2015 importadas al software CAD [39]	34
Figura 2-24 Fuerzas que actúan sobre un barco de vela [42].....	34
Figura 2-25 Deformación de la malla en una zona sección en contacto [42]	35
Figura 2-26 Comparativa entre la superficie de presión medida y la simulada [42].....	35
Figura 2-27 Estructura de malla O-O [42].....	36
Figura 3-1 Vista inicial del Workbench de Ansys Fluent.....	37
Figura 3-2 Vista de la base del casco Wigley generado	38
Figura 3-3 Vista de la proa del casco Wigley	39
Figura 3-4 Boceto de la vista 3D del CAD generado	39

Figura 3-5 Extracción del documento [4] [43] donde vienen definidos los coeficientes de forma	40
Figura 3-6 Volumen del casco Wigley medido.....	41
Figura 3-7 Área de la sección en la cuaderna maestra.....	41
Figura 3-8 Área de la mitad de la superficie mojada o obra viva	41
Figura 3-9 Vista de la base del dominio computacional generado.....	42
Figura 3-10 Vista del plano XZ del dominio computacional.....	43
Figura 3-11 Exportar CAD en formato STEP en Inventor	43
Figura 3-12 Importar geometría en el Workbench de Ansys.....	44
Figura 3-13 Editar la geometría en DesignModeler	44
Figura 3-14 Named Selection en DesignModeler	45
Figura 3-15 Details View de Named Selection.....	45
Figura 3-16 Generar el Named Selection.....	46
Figura 3-17 Disposición de las caras del dominio	46
Figura 3-18 Mesh, segundo apartado del Workbench.....	47
Figura 3-19 Ejemplo de malla no mapeada de tetraedros.....	47
Figura 3-20 Ejemplo de malla mapeada	48
Figura 3-21 División de caras del dominio computacional	48
Figura 3-22 Bias establecido en el eje Y	49
Figura 3-23 Bias en el eje z sobre la superficie libre.....	49
Figura 3-24 Bias establecido en el eje z alrededor de la carena del casco	50
Figura 3-25 Bias en el eje z por bajo la quilla del casco	50
Figura 3-26 Bias decreciente en el eje x desde el inlet hasta la proa del casco	51
Figura 3-27 Bias creciente en el eje x desde la popa hacia el outlet	51
Figura 3-28 Bias longitudinal sobre el casco y las aristas paralelas.....	52
Figura 3-29 Malla resultante	52
Figura 3-30 Setup en el Workbench.....	53
Figura 3-31 Midplane como plano de simetría	53
Figura 3-32 Configuración de la gravedad	54
Figura 3-33 Configuración multifase.....	54
Figura 3-34 Configuración del modelo de viscosidad.....	55
Figura 3-35 Se definen las propiedades del material.....	55
Figura 3-36 Agua líquida en la base de datos de Ansys Fluent	56
Figura 3-37 Se definen las fases del dominio	56
Figura 3-38 Configuración del punto de referencia de la presión.....	57
Figura 3-39 Configuración de fase y tipo de las caras	57
Figura 3-40 Configuración de la multifase del inflow.....	58

Figura 3-41 Configuración de la turbulencia del inflow.....	58
Figura 3-42 Configuración de los valores de referencia.....	59
Figura 3-43 Configuración de Solution Methods.....	59
Figura 3-44 Configuración de Solution Controls	59
Figura 3-45 Configuración de Residual Monitors.....	60
Figura 3-46 Configuración del informe del coeficiente de la fuerza de arrastre.....	61
Figura 3-47 Configuración punto de referencia	61
Figura 3-48 Configuración informe de velocidad	61
Figura 3-49 Configuración de inicialización.....	62
Figura 3-50 Configuración de autoguardado	62
Figura 3-51 Cálculo de 5000 iteraciones	62
Figura 4-1 Configuración de la superficie libre	64
Figura 4-2 Comparativa de perfiles de ola en función de su Fn	64
Figura 4-3 Patrón de ola para Fn 0.25	65
Figura 4-4 Patrón de ola para Fn 0.267	65
Figura 4-5 Patrón de ola para Fn 0.289	65
Figura 4-6 Patrón de ola para Fn 0.316	65
Figura 4-7 Patrón de ola para Fn 0.354	65
Figura 4-8 Patrón de ola para Fn 0.405	65
Figura 4-9 Pruebas de resistencia de las diferentes organizaciones [3].....	66
Figura 4-10 Gráfica de los coeficientes de arrastre experimentales y simulados	67
Figura 4-11 Gráfica de coeficientes de arrastre experimentales [3].....	68
Figura 4-12 Perfiles de ola obtenidos por la UT adimensionalizado según la fórmula (25)	69
Figura 4-13 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.25$	70
Figura 4-14 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.267$	70
Figura 4-15 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.289$	71
Figura 4-16 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.316$	71
Figura 4-17 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.354$	72
Figura 4-18 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.408$	72
Figura 4-19 Datos del perfil de ola del SRI	73
Figura 4-20 Datos del perfil de ola de la UT	73
Figura 0-1 Dimensiones definidas en MatLab	85
Figura 0-2 Variables definidas y de forma matricial en MatLab	85
Figura 0-3 Función mesh y límites de los ejes en MatLab	85
Figura 0-4 Primera parte del código con la función “hold on”	86

Figura 0-5 Código de MatLab para generar la geometría del casco Wigley 86

Figura 0-6 Geometría Wigley de Matlab (colormap).....87

Figura 0-7 Geometría Wilgey de Matlab (sin colormap) 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Coeficientes de forma del casco Wigley obtenido	40
Tabla 4-1 Coeficientes de arrastre simulados	63
Tabla 4-2 Comparativa de coeficientes de arrastre	66

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La hidrodinámica naval es un ámbito de estudio complejo. El flujo alrededor de un barco se encuentra caracterizado por un régimen de flujo turbulento y la presencia de una superficie libre que dificultan su análisis desde un enfoque teórico. A lo largo de la historia se han usado ensayos experimentales a escala para estudiar las fuerzas de arrastre y las olas generadas por diferentes tipos de barcos, pero con el avance de la tecnología, las simulaciones usando software CFD ha ayudado enormemente en la ingeniería naval.

Estas simulaciones permiten evaluar el rendimiento hidrodinámico de diferentes diseños de cascos, evaluar diferentes sistemas de propulsión, examinar la maniobrabilidad y estabilidad en diversas condiciones de la mar, la interacción del barco con las olas generadas, y facilita además la investigación en nuevos conceptos y tecnologías pudiendo probar estas de forma virtual antes de materializarlas. Las simulaciones con CFD (Computational Fluid Dynamics) permiten acelerar el estudio y abaratar costes en los ámbitos mencionados anteriormente, ya que reduce considerablemente el número de ensayos experimentales a realizar, convirtiéndose estos últimos en la validación de los resultados obtenidos virtualmente.

Es importante recalcar que las simulaciones CFD no sustituyen los ensayos realizados de forma experimental, dado que es muy complicado replicar virtualmente con exactitud el entorno real de manera virtual, pero si es útil para realizar todo el estudio previo de las nuevas tecnologías y diseños antes de fabricarlas.

En este trabajo se hará uso de un software CFD para analizar las fuerzas de arrastre y olas generadas por un tipo de casco genérico, denominado casco *Wigley*. Para ello, se cuenta con publicaciones que nos determinan la geometría de este tipo de casco y que nos proporcionan datos de ensayos experimentales. El software CFD que se utilizará será *Ansys Fluent*. Se usará de apoyo además un software CAD para realizar el modelado 3D del entorno a estudiar, el software que se utilizará será *Autodesk Inventor*.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es realizar el análisis de la resistencia de un barco en aguas tranquilas haciendo uso de herramientas de simulación CFD. Para lograrlo se han planteado una secuencia de hitos parciales que han permitido escalar el trabajo y seguir una planificación. El objetivo principal se ha desglosado en:

- **Obtención de la geometría del dominio computacional**
Elaborar la geometría del dominio computacional en el software CAD y exportarlo al flujo de trabajo.
- **Optimizar las condiciones del contorno y el mallado**
Desarrollar una malla óptima y establecer las condiciones del entorno adecuadas para obtener los resultados más exactos posibles.
- **Evaluar el Impacto de las fuerzas de arrastre y estudiar los patrones de ondas generadas**
Analizar cómo influye la forma del casco y las condiciones del entorno en la generación de olas y en los valores de la resistencia al avance.
- **Establecer correlaciones con los datos experimentales**
Comparar y correlacionar los datos obtenidos en las simulaciones con los experimentales, e identificar así posibles errores de mallado o de configuración del entorno, como la pérdida de datos.
- **Explorar alternativas para la optimización del modelo**

Estudiar cómo se puede modificar el casco para reducir esta resistencia al avance

- **Analizar otros estudios similares y las posibles aplicaciones en el ámbito de la Armada**
Qué otros trabajos se han hecho en este ámbito y qué posibles aplicaciones se pueden encontrar para este tipo de simulaciones en el ámbito de la Armada Española.
- **Sintetizar conclusiones y posibles líneas futuras.**

1.3 Ventajas del uso de simulaciones CFD

El empleo de las simulaciones de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) aporta una serie de ventajas fundamentales como se ha mencionado anteriormente. En primer lugar, supone un considerable ahorro de costos tener la posibilidad de simular ensayos virtuales antes de construir prototipos físicos, evitando los gastos asociados a la construcción y modificación constante de estos prototipos, así como los gastos que supone operar un tanque de agua dedicado al ensayo y todo el equipamiento de medición necesario. Además, facilita la optimización del diseño de cascos y otros componentes, disminuyendo la resistencia al avance y mejorando la eficiencia hidrodinámica para obtener un rendimiento óptimo.

En segundo lugar, nos proporciona también la ventaja de poder simular con facilidad condiciones extremas de oleaje y viento, las cuales serían más difíciles y costosas de llevar a cabo de forma experimental. Esto contribuye a mejorar la seguridad y la resistencia de las embarcaciones en situaciones adversas.

Las simulaciones CFD permiten además evaluar con facilidad el cumplimiento de los diseños con los estándares y normativas vigentes relacionadas con la seguridad y el medio ambiente. Finalmente, este tipo de herramientas cada vez son más cruciales en el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías y conceptos navales.

1.4 Ansys Fluent

El software *Ansys Fluent* es una herramienta de simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) desarrollada por la empresa de simulación de ingeniería estadounidense *ANSYS Inc.* No obstante, este software tiene su origen fuera de la empresa *ANSYS*, bajo el nombre de *Fluent*, desarrollado por la empresa *Fluent Inc.*, fundada en 1983. En el año 2006, la empresa *ANSYS Inc.* adquirió *Fluent Inc.*, y desde entonces este software pasó a integrarse dentro de los productos de simulación de la empresa *ANSYS*.

Por otro lado, la empresa *ANSYS Inc.*, se fundó en 1970 por John A. Swanson, y está especializada en el desarrollo de software de simulación de ingeniería, siendo a día de hoy una de las principales empresas en este campo a nivel mundial. *ANSYS* es un acrónimo de “Analysis System”.

El software *Ansys Fluent* ha ido evolucionando desde su predecesor, incluyendo mejoras en la interfaz de usuario, proporcionando simulaciones más rápidas y detalladas aprovechando las capacidades HPC (High Performance Computing), y sobre todo integrando el programa dentro del ecosistema de *ANSYS*, proporcionando un flujo de trabajo simplificado y muy intuitivo para el usuario en el que se integran múltiples softwares diferentes de la empresa para realizar un mismo trabajo. A esta última funcionalidad se le ha sacado especial provecho en el desarrollo de este trabajo. [1] [2]

1.5 Casco parabólico Wigley

El casco parabólico Wigley tuvo origen como una alternativa de estudio para mejorar el rendimiento hidrodinámico de los cascos de buque. Es un casco parabólico genérico que viene definido por la fórmula:

$$y = \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{z}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Donde ***B*** representa **la manga en la cuaderna maestra**, ***L*** la **eslora entre perpendiculares**, ***D*** el **calado**, y las incógnitas ***x*** y ***z*** como **eje de coordenadas**, siendo ***x*** la dirección longitudinal, ***y*** en la dirección transversal, y ***z*** del calado [3] [4].

Si se congela la incógnita ***z*** y se le da valores a esta, se obtiene la vista planta para los diferentes valores de calado, es decir, las dimensiones de la cubierta para los distintos valores de ***z***. En la Figura 1-1 se puede ver un boceto 3D de un casco Wigley con francobordo.

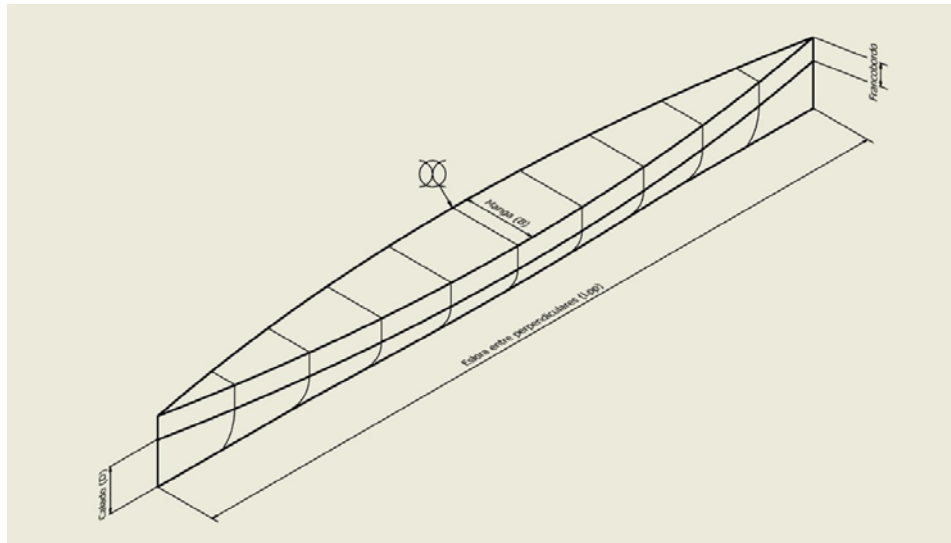


Figura 1-1 Vista 3D del casco Wigley

Juntando todos los valores posibles para ***z***, desde 0, hasta el valor máximo que viene determinado en función de los valores de manga y eslora que se ha escogido, siendo $B = \frac{L}{10}$, y $D = \frac{B}{1,6}$, se obtiene así el perfil manga-calado del casco (Figura 1-2).

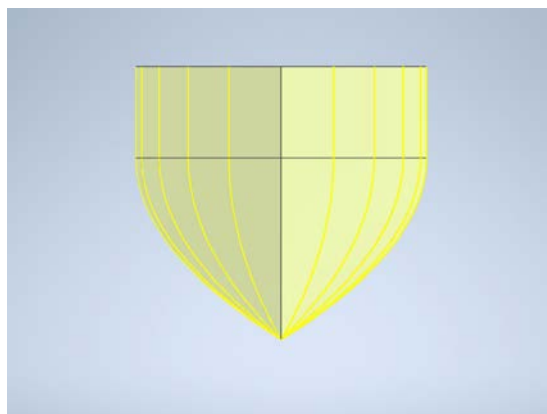


Figura 1-2 Plano de formas del casco Wigley

Este casco actualmente es de los modelos más usados como modelo estándar para diferentes simulaciones y estudios hidrodinámicos y ha sido optimizado a lo largo de los años más en profundidad

y reducido su resistencia al avance mediante el uso de una combinación de métodos de deformación local y global [5].

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

2.1.1 Contextualización actual de la simulación CFD

Actualmente la situación de las simulaciones CFD en el ámbito de la ingeniería naval está caracterizada por su continuo y rápido progreso además de un magnífico potencial para su desarrollo en el futuro. En 2014, Frederick Stern [6] y Kurt Mizzi [7] mostraron que como las simulaciones CFD son cada vez más exactas y fiables gracias a los avances en HPC (High Performance Computing). La industria naval cada vez tiende más al uso de estos métodos numéricos, los cuales reducen costes significativos y son más eficientes que los ensayos tradicionales. Cristian-Milică Niță, en su artículo “Review in Numerical Simulation in Naval Application” [8] enfatizaron la importancia de la simulación CFD en arquitectura naval, particularmente en el análisis del rendimiento de los cascos y en el diseño de proyectos navales eficientes. También hace mención a algunas limitaciones de las herramientas de simulación CFD, indicando que todavía existe un amplio margen de mejora.

2.2 Conceptos fundamentales de la hidrodinámica

2.2.1 Principios básicos de la hidrodinámica y la resistencia al avance

Cualquier buque dentro de un canal de fluido va a ser objeto de una serie de fuerzas y efectos que actuarán sobre él. En el caso de un canal hidrodinámico de flujo continuo y estable, el efecto del viento y del agua sobre el casco será siempre el mismo, y no sufrirá corrientes o cambios de dirección del viento que sí podría sufrir en un escenario real.

El barco navegando en aguas tranquilas genera un patrón de olas bien diferenciado, que aparece en una región triangular a popa del barco y consiste en una serie de olas transversales y divergentes (Figura 2-1). Algunas de estas olas generadas se rompen, mezclándose así con aire y generando una línea de espuma sobre la estela del barco.

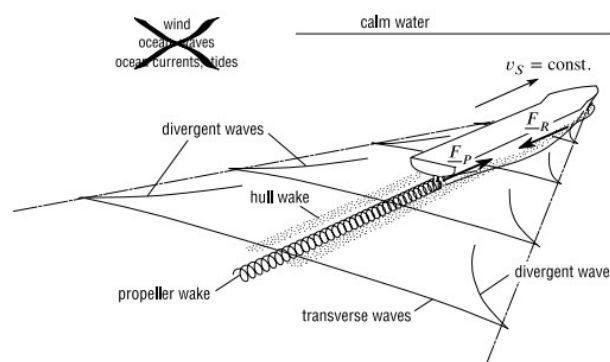


Figura 2-1 Oleaje generado por un barco con propulsión en aguas tranquilas [9]

La aparición de pequeños remolinos a popa y a los costados del barco se debe a la fricción entre el casco y el agua. Una capa superficial se forma sobre la superficie sumergida del casco a popa del barco, que es lo que comúnmente se conoce como **estela**.

Si se cuenta con una hélice de propulsión, que no es el caso de este trabajo, ésta también generaría su propia estela, complicando aún más los patrones de oleaje. No obstante, usualmente se estudia cada fenómeno por separado, es decir, por un lado, se estudian los patrones de oleaje generados por el casco

(Figura 2-2), y por otro lado los del propulsor, si cuenta con uno, para tener un mejor entendimiento global de la situación y poder identificar más fácilmente de donde proviene cada variación.

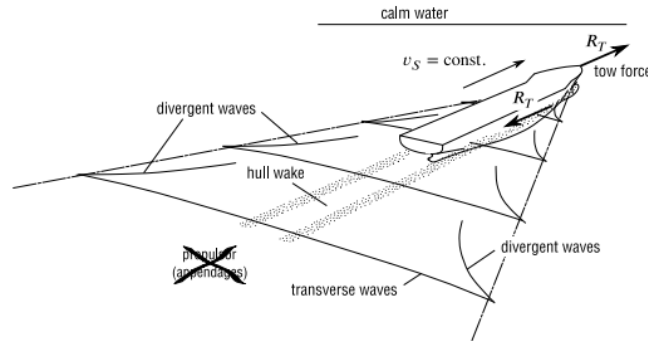


Figura 2-2 Oleaje generado por un casco arrastrado en aguas tranquilas [9]

Otra de las razones por las que se separan casco y propulsión es por la complejidad de la simulación. La simulación de estos elementos por separado ya supone un reto importante para los más avanzados multi-procesadores de hoy en día, por lo que estudiar ambos elementos simultáneamente generaría muchos errores y consumiría demasiados recursos computacionales.

Una vez separado el casco de otros componentes como el propulsor, timón, u otros elementos como aletas estabilizadoras, el casco será remolcado a la velocidad deseada. Una vez alcanzadas estas condiciones se puede deducir fácilmente que la fuerza requerida de remolque F_T será igual a la resistencia de avance total del casco R_T .

No obstante, separar la propulsión del casco cambia considerablemente el sistema hidrodinámico, por lo que existe la necesidad de aplicar correcciones sobre los resultados de los experimentos y simulaciones hechas sobre el casco solo [9].

2.2.2 Fuerzas que actúan sobre el casco de un barco

Resistencia Total (R_T)

Esta fuerza actúa sobre el casco del barco a medida que este se mueve, y actúa en dirección opuesta al movimiento de este. Esta fuerza es la resistencia que opone el agua al movimiento del barco, llamada “resistencia total” (R_T). Esta resistencia total en aguas tranquilas puede variar en función de múltiples factores, como la velocidad del barco, la forma del casco, o la temperatura del agua. R_T aumenta de forma exponencial a medida que el barco aumenta su velocidad.

Esta fuerza de resistencia total se puede descomponer en otras fuerzas ya que existen varios factores que la generan, como la fricción y la viscosidad del fluido, la energía necesaria para generar y mantener las características del oleaje a proa y popa del barco, y la resistencia que opone el aire al avance del barco [10]. Por lo que:

$$R_T = R_V + R_W + R_{AA} \quad (2)$$

Donde, R_V es la **resistencia viscosa total**, R_W es la **resistencia total por la formación de olas**, y R_{AA} representa las **fuerzas aerodinámicas**, estando el aire en calma. En la Figura 2-3 se puede apreciar como a bajas velocidades, R_V es bastante dominante, mientras que a altas velocidades se puede ver como R_W aumenta significativamente convirtiéndose en la resistencia dominante.

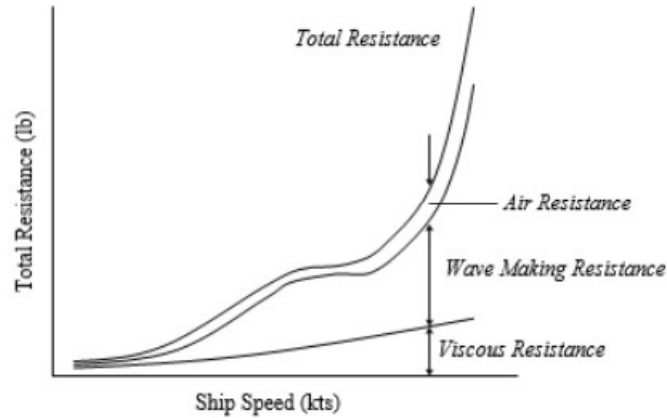


Figura 2-3 Componentes de R_T [10]

En ingeniería naval usualmente se trabaja con coeficientes adimensionales para determinar el rendimiento de un sistema o para compararlo con otros sistemas similares. Estos coeficientes adimensionales permiten al ingeniero naval comparar datos obtenidos con maquetas experimentales a los datos de un barco en su escala real, o para comparar el rendimiento con otros tipos de barcos. En el campo de la resistencia del barco se usan multitud de coeficientes adimensionales estandarizados.

Del mismo modo que se descompone R_T en las diferentes fuerzas que la formaban, se puede deducir la ecuación para la resistencia total en coeficientes adimensionales. Esta ecuación sería:

$$C_T = C_V + C_W \quad (3)$$

Donde C_T es el **coeficiente de la resistencia total**, C_V el **coeficiente de la resistencia viscosa total**, y C_W el **coeficiente de la resistencia total por la formación de olas**. Viendo esta ecuación nos damos cuenta de que la resistencia del aire no tiene representación de forma adimensional, pues esta representación adimensional de la resistencia es el producto de experimentos con maquetas, las cuales en la mayoría de casos carecen de superestructura.

Del mismo modo que la resistencia R_T varía en función de la forma del casco, la velocidad del barco, y las propiedades del agua, el coeficiente C_T también. Por lo que C_T se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (4)$$

donde R_T es la **resistencia total**, ρ es la **densidad del agua**, S es la **superficie de la obra viva del casco**, y V es la **velocidad del barco**.

En la ingeniería naval además se usa una forma adimensional de la velocidad conocida como el “**Número de Froude**” (F_n), llamado así en honor a William Froude, uno de los pioneros en la experimentación de barcos con maquetas. Este número de Froude viene dado por la siguiente fórmula:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (5)$$

donde V es la **velocidad del barco**, g la **aceleración de la gravedad**, y L es la **eslora del barco o de la maqueta** [10].

Otra forma común de expresar la velocidad, esta vez de forma dimensional, es a través de la ratio *velocidad-eslora*. Esta ratio es similar al número de Froude, pero se omite la gravedad. Para la obtención de esta ratio la velocidad se tiene que expresar en nudos [10].

$$\text{ratio velocidad} - \text{eslora} = \frac{V_s}{\sqrt{L_s}} \quad (6)$$

Resistencia Viscosa Total (R_V)

En un fluido ideal, a medida que este fluye alrededor de un cuerpo, se genera una presión normal distribuida sobre la superficie de este, como se puede apreciar en la Figura 2-4. En la proa del casco, la componente de esta presión es contra el avance, mientras que en la popa esta componente es a favor del avance. De este modo, en un fluido ideal, estas 2 componentes mencionadas se cancelarían una a otra y el casco no experimentaría ninguna resistencia por parte del fluido [10].

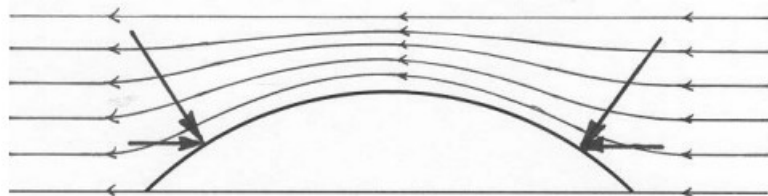


Figura 2-4 Flujo ideal sobre un cuerpo sumergido [10]

El agua no es un fluido ideal, por lo que los cuerpos experimentan resistencia al avance en el seno del fluido. Las partículas del fluido se adhieren al cuerpo, como se puede ver en la Figura 2-5, formando una capa sobre su superficie, a través la cual el flujo varía de velocidad rápidamente, desde cero en la superficie del cuerpo, a la velocidad del flujo. Como resultado de esta viscosidad aparecen dos formas diferentes de resistencia, la **fuerza de fricción tangencial con el casco R_F** y las **fuerzas de presión normal al casco R_p** . La fricción surge de los esfuerzos cortantes en el fluido, y actúa en dirección tangencial al cuerpo. La R_p actúa de forma normal al cuerpo [10] [11].

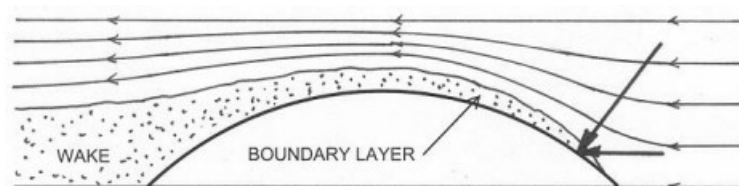


Figura 2-5 Flujo de agua sobre un cuerpo sumergido [10]

Fuerza de Fricción Tangencial R_f

A medida que el barco se desplaza a través del agua, la fricción del agua que actúa sobre la obra viva genera una fuerza que se opone al movimiento del buque. Esta fuerza de fricción varía en función de la rugosidad de la superficie y de la viscosidad del agua. La viscosidad es una propiedad dependiente de la temperatura del fluido que define la resistencia a fluir. Pese a que el agua tiene una baja viscosidad, genera una importante fuerza de fricción sobre el casco. Datos experimentales muestran que la fricción con el agua puede significar hasta un 85% de la resistencia total del casco a bajas velocidades, y entre un 40-50% a velocidades más elevadas [10] [11].

Fuerza de Presión Normal R_p

En la proa del casco las fuerzas de presión que ejerce el fluido sobre el casco actúan normal a la superficie, no obstante, en la zona más a popa, la capa superficial que crea el fluido reduce la fuerza de presión que ejerce el fluido en favor del movimiento. Esta reducción en la fuerza de presión con componente a favor del movimiento ocasiona que la fuerza neta sea de resistencia al avance, como se puede apreciar en la Figura 2-5. Como se puede apreciar también en la Figura 2-5, la forma del casco puede influir en la magnitud de esta fuerza de presión normal. Cascos de poca eslora y con mucha manga tendrán una fuerza de resistencia mayor que otros cascos con formas más afinadas. También aquellos cascos con proas más anchas sufrirán de una mayor resistencia que otros con proas más finas [10] [11].

Flujo Laminar y Turbulento

Se pueden diferenciar dos tipos principales de flujos alrededor de un cuerpo, el flujo laminar y el turbulento. El grado de resistencia viscosa que actúa sobre un cuerpo depende en el tipo de flujo que se esté produciendo.

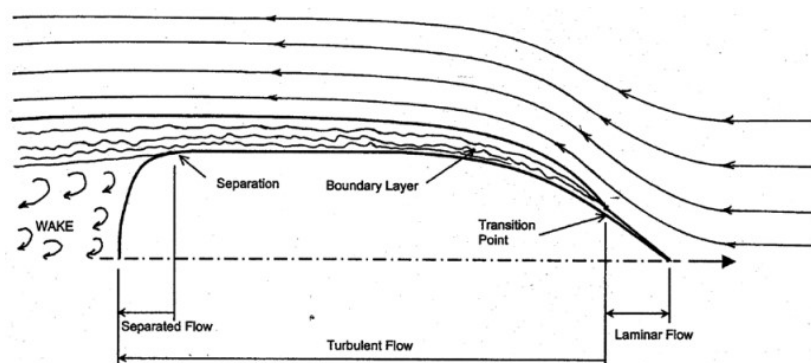


Figura 2-6 Patrón típico de flujo sobre el casco de un barco [10]

El flujo laminar se caracteriza por estar compuesto de líneas suavizadas y uniformes que generan muy poca fricción. Normalmente, el flujo laminar se produce durante poca distancia a lo largo del casco antes de romperse, como se puede observar en la Figura 2-6. A medida que el flujo va avanzando a lo largo del casco, el flujo laminar comienza a romperse y empieza a formarse un flujo más caótico. Este flujo desordenado y caótico se denomina flujo turbulento, y el cambio de flujo entre el laminar y el turbulento sucede en el punto de transición que se puede ver en la Figura 2-6.

Este flujo turbulento se caracteriza por la generación de una capa de agua a lo largo del casco que se mueve con el barco en su misma dirección. La formación de esta capa comienza en el punto de transición, y su grosor aumenta a lo largo de la eslora del casco, a medida que este flujo se vuelve cada vez más turbulento. A medida que el barco aumenta su velocidad, el grosor de esta capa aumenta, y el punto de transición cada vez se acerca más a la proa, provocando un incremento en la resistencia de fricción.

Los flujos laminar y turbulento se pueden describir de forma matemática usando un coeficiente adimensional conocido como el “Número de Reynolds”, en honor a las contribuciones de Sir Osborne

Reynolds al estudio de la hidrodinámica [10]. El número de Reynolds se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$R_n = \frac{\rho LV}{\mu} = \frac{LV}{\nu} \quad (7)$$

Donde, R_n es en **número de Reynolds**, L es la **eslora del barco**, ρ es la **densidad del fluido**, μ es la **viscosidad dinámica del fluido**, V la **velocidad del barco**, y ν la **viscosidad cinemática del agua**.

Los valores adoptados para determinar si el flujo es laminar o turbulento para cascos de barco son los siguientes:

- Laminar: $R_n < 5 \cdot 10^5$
- Turbulento: $R_n > 1 \cdot 10^6$
- Punto de transición: $5 \cdot 10^5 < R_n < 1 \cdot 10^6$

Coeficiente de Resistencia Viscosa Total

Como se ha mencionado anteriormente, este coeficiente adimensional depende de las mismas variables que la resistencia viscosa R_V , la forma del casco, la velocidad, y las propiedades del agua. Las siguientes ecuaciones para este coeficiente son productos empíricos verificados tras muchos años de experimentación, reconocidas internacionalmente por la ITTC (International Towing Tank Conference).

$$C_V = C_F + K \cdot C_F \quad (8)$$

Donde C_V es el **coeficiente de resistencia viscosa total**, C_F es el **coeficiente de la fuerza de fricción tangencial**, y $K \cdot C_F$ equivale al **coeficiente de la fuerza de presión normal al casco**. Más adelante, en el apartado de “Análisis dimensional”, se explica la separación de este coeficiente de manera experimental y por qué sucede [10].

$$C_F = \frac{0.075}{[(\log_{10} R_n) \cdot 2]^2} \quad (9)$$

$$K \approx 19 \left(\frac{\nabla}{L_{WL} \cdot B \cdot T} \cdot \frac{B}{L_{WL}} \right)^2 \quad (10)$$

Resistencia Total por Formación de Olas R_W

El segundo mayor componente de la resistencia del casco es la resistencia ocasionada por la generación de olas. La generación de estas olas requiere energía. A medida que el barco aumenta su velocidad, la altura de las olas producidas por el barco incrementa, por lo que la energía requerida para producir esas olas también aumenta. Esta pérdida de energía se llama resistencia de generación de olas y suele ser un factor limitante para la velocidad del barco. En la Figura 2-7 se identifican las diferentes partes y tipos de olas generadas por cualquier objeto móvil en aguas tranquilas. En la Figura 2-8 y en la Figura 2-9 se

ven los diferentes patrones de oleaje generados por las fragatas F-100 de la clase Álvaro de Bazán en función de su velocidad.

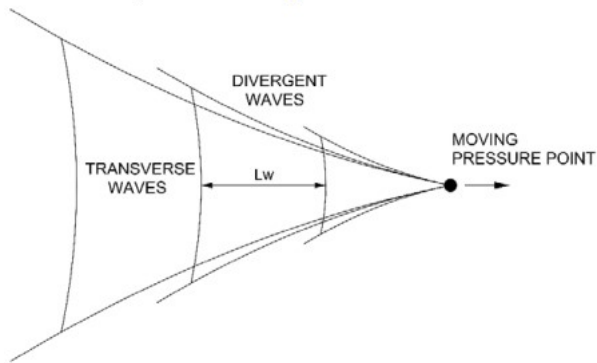


Figura 2-7 Patrón de oleaje generado por un objeto móvil en aguas tranquilas [10]

Figura 2-8 Patrón de oleaje de las fragatas F-100 [12]



Figura 2-9 Oleaje generado por la F-102 a gran velocidad [12]

Fuerzas Aerodinámicas R_{AA}

Las fuerzas aerodinámicas son originadas por el flujo de aire sobre la superestructura del barco, sin presencia de viento. Estas fuerzas se ven afectadas por la forma que tiene el barco por encima de la línea de flotación, es decir, la obra muerta, además de la velocidad y la superficie total del buque expuesta al aire. Barcos con cascos bajos y superficie con “poca vela”, es decir, poca superficie expuesta al aire, suelen verse menos afectados por estas fuerzas aerodinámicas que aquellos con cascos más altos y con más “vela”. Estas fuerzas suelen suponer entre un 4-8% de la resistencia total al avance. Se han intentado producir buques con superestructuras aerodinámicas para reducir este efecto, pero los escasos beneficios a la potencia y al ahorro de combustible que proporciona son superados por los altos costes y las limitaciones que su diseño acarrea [10].

2.2.3 Análisis dimensional de la resistencia de un casco

Como ya se ha visto en el apartado anterior, un barco desplazándose sobre el agua genera un oleaje superficial que resta energía y momento al propio movimiento del barco. Este oleaje generado altera la distribución de presiones sobre la superficie del casco, generando la R_W , resistencia total por formación de olas. Además, las fuerzas cortantes generadas por la viscosidad del fluido sobre el casco añaden una fuerza adicional, como ya se ha visto, llamada resistencia viscosa, o R_V . Debido a que el barco se desliza sobre una superficie libre, la aceleración de la gravedad es una variable que afecta a la resistencia total del casco R_T , además de la velocidad, la eslora, y las propiedades del agua, como la viscosidad y la densidad [13].

William Froude elaboró una hipótesis que consistía en que, la resistencia viscosa R_V , depende únicamente del número de Reynolds, y que la resistencia viscosa que ejerce el agua sobre un barco de eslora L y con una superficie de obra viva S , sería igual a la resistencia viscosa que ejercería el agua sobre una placa plana de longitud L y superficie S . Además, la resistencia total por generación de olas R_W depende únicamente del número de Froude. Froude dedujo que ambas resistencias eran independientes, por lo que lo representó mediante dos coeficientes.

$$\frac{R_V}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V^2 S} = (C_V)^{fp} \quad (11)$$

$$\frac{R_W}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} = C_W \quad (12)$$

Siendo $(C_V)^{fp}$ el **coeficiente de la resistencia viscosa en la placa plana** para flujo turbulento, y C_W el **coeficiente de la resistencia total por formación de olas**. A través de múltiples experimentos con placas planas y barcos de distintos tamaños, Froude pudo confirmar y validar esta hipótesis.

No es posible obtener una semejanza total entre una maqueta a escala y un barco porque el número de Reynolds y el número de Froude no pueden ser iguales para la maqueta a escala y el barco.

No obstante, gracias a la hipótesis de Froude de las placas planas, se puede calcular el C_V , y a partir de ahí solo se necesitaría la maqueta a escala para calcular la resistencia total. Con estas fórmulas, y los datos de la resistencia total obtenidas en el canal de ensayo con la maqueta a escala, simplemente se calcula el C_V de la maqueta a partir de sus dimensiones, sustraérselo a la C_T obtenida experimentalmente, obteniendo así la C_W , la cual debe ser la misma para el barco y la maqueta. Una vez obtenido el C_W , calculamos el C_V del barco con las dimensiones reales, y los sumamos, obteniendo así la C_T del barco a escala real. Una disposición típica de un canal de ensayos hidrodinámicos es como la que se puede apreciar en la Figura 2-10.

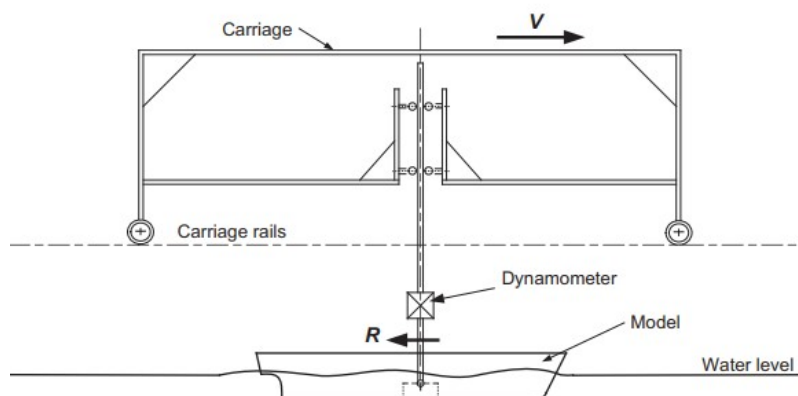


Figura 2-10 Esquema de la disposición de una maqueta para ensayo en un canal de ensayos [14]

2.3 Tipos de diseños de cascos

2.3.1 Evolución histórica

La construcción y diseño de cascos y balsas se remontan al origen de la humanidad, cuando las primeras balsas tenían diseños simples y se basaban en la funcionalidad y en la flotación básica, con énfasis nulo en la hidrodinámica.

El primer avance reseñable en el diseño de casco fue la incorporación de la **quilla**. Pese a que su fecha aproximada de introducción sigue siendo tema de debate, Alexander Belov [15] sugiere que la quilla fue introducida entre las dinastías 18-20 del Antiguo Egipto, entre los años 1600 y 1000 antes de Cristo (Figura 2-11). La función principal de la quilla es proporcionar estabilidad y evitar que el barco sea arrastrado lateralmente por el efecto del viento. También proporciona rigidez y resistencia al casco.

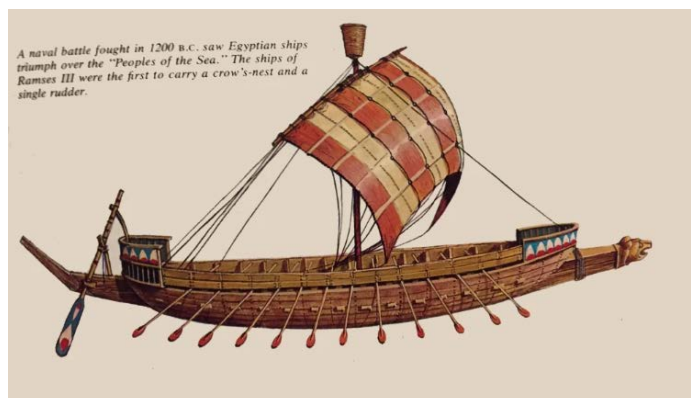


Figura 2-11 Buque de guerra egipcio del 1200 a.C. [15]

Las técnicas de construcción y los materiales fueron evolucionando con el paso de los siglos, siendo la madera el material principal de construcción. La investigación de nuevas maderas con mejores características también supuso importantes avances en el diseño y la ingeniería naval de la época.

El siguiente gran hito fue el desarrollo de un nuevo tipo de buque destinado a largas singladuras, con buena maniobrabilidad y capacidad de almacenamiento. Este nuevo tipo de barco fue la **carabela** (Figura 2-12). El origen de estas embarcaciones es incierto, aunque los primeros documentos mencionando este tipo de barcos datan de mediados del siglo XII en Italia y Portugal. Este tipo de embarcación destacaba por su diseño ligero y esbelto en comparación con el resto de diseños de la época, así como su gran maniobrabilidad. Inicialmente se utilizaron como pesqueros y como buques de exploración en la costa oeste de África. Fue este tipo de buque el que usó Cristóbal Colón en su

expedición en el año 1492. Más adelante este tipo de buque evolucionaría y sería reemplazado por la **nao** (Figura 2-12), las cuales conservaban las características de las carabelas, pero eran más grandes, contando con más tamaño de almacenaje. Este tipo de buque tuvo origen en España y Portugal, y fueron utilizadas en la vuelta al mundo iniciada por Fernando de Magallanes y finalizada por Juan Sebastián de Elcano a principios del siglo XVI. [16]



Figura 2-12 Carabela latina (izq.) y su evolución la Nao Victoria (dcha.) [16] [17]

A finales del siglo XV, se comienza a usar el **hierro** en la construcción de cascos, como el HMS Warrior (Figura 2-13). Este avance abría nuevas barreras dentro de la ingeniería naval. Con el empleo del hierro se mejoraba sustancialmente la resistencia de los cascos y daba la posibilidad de construir buques de mayor tamaño que empleando exclusivamente la madera [18] [19].



Figura 2-13 HMS Warrior (1860) uno de los primeros buques de guerra con casco de hierro [20]

Otro avance reseñable fue el desarrollo de los buques con **propulsión a vapor**. Los primeros prototipos y propuestas comenzaron a emerger entre mediados y finales del siglo XVIII. Este avance proporcionaba mucha más libertad en el diseño de los cascos, ya que no dependían de la propulsión a vela [21].

El avance en los estudios hidrodinámicos y la introducción de nuevos sistemas de propulsión, han desbloqueado cada vez una mayor libertad y complejidad en el diseño de los cascos. Actualmente el diseño de los barcos está cada vez más especializado y optimizado para los diferentes propósitos que se necesiten. La introducción del **bulbo de proa** (Figura 2-14) a principios del siglo XX, atribuida al arquitecto naval estadounidense David W. Taylor, supuso una gran herramienta para la ingeniería naval, especialmente para aquellos buques destinados a navegar largas distancias. Este bulbo se basó en los espolones con los que contaban los buques de guerra de la antigua Grecia. Estos espolones se usaban para embestir y perforar las embarcaciones enemigas, sin embargo, esta no era la utilidad para la que se ideó más tarde el bulbo de proa. Diferentes ensayos hidrodinámicos demostraron que estos espolones

utilizados antiguamente modificaban el flujo de agua sobre el casco, reduciendo la resistencia al avance [22], por lo que Taylor se dedicó a optimizar el diseño de estos para reducir la resistencia al avance lo máximo posible y disminuir de forma significativa el consumo de los barcos y mejorar además su estabilidad. Esta tecnología sigue muy vigente hoy en día, especialmente en los buques de transporte transoceánico [23].

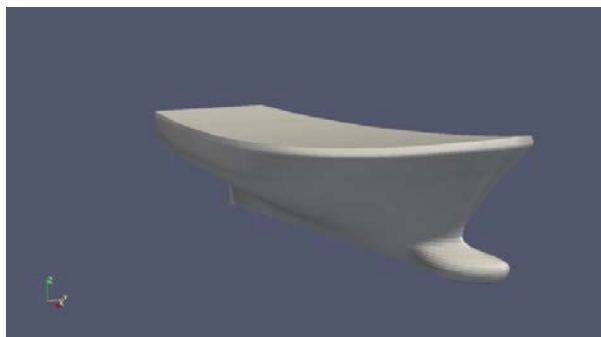


Figura 2-14 CAD generado de un casco genérico con bulbo de proa [23]

Con el desarrollo de nuevas herramientas computacionales de simulación, como los softwares CFD, permiten cada vez una mejor optimización en el estudio hidrodinámico de los cascos, como se ha mencionado anteriormente. Jean Jacques Maisonneuve destacaba en el año 2002 el uso de las nuevas tecnologías para mejorar los diseños de los barcos, particularmente en el diseño funcional de diferentes formas de casco [24]. En el año 2023, Mina Tadros se centra en dos métodos principales, el *Machine Learning* y el *Operational Research*, para encontrar formas de optimizar el diseño de los barcos enfocándose especialmente en la eficiencia energética, y en reducir la huella de carbono en el mar [25].

2.3.2 Diseños actuales

Actualmente existen multitud de tipos de casco dependiendo en los acometidos a los que esté destinado cada unidad. Gracias a los avances en los estudios de la hidrodinámica, la ingeniería naval ha sido capaz a lo largo de la historia de traer nuevas tecnologías y especializar y optimizar cada vez más el diseño de los cascos para lograr un mayor rendimiento en cada ámbito de uso.

Los **cascos de desplazamiento** son los más comunes, con diferentes variantes y usados en múltiples tipos de embarcaciones, desde buques de carga, hasta embarcaciones de recreo. Sidong Shao sugería que la selección de la forma del casco dependería de la velocidad de la embarcación, el número de Froude, y el coeficiente eslora/desplazamiento [26]. Maksimović estudió también el efecto de diferentes deformaciones del casco en su desplazamiento, así como un procedimiento alternativo de lectura de calados [27]. El estudio y la continua optimización de este tipo de cascos ayuda a las empresas de carga a ahorrar costes, especialmente en combustible, y a reducir la contaminación del entorno marítimo. El petrolero VLCC Kazusa (Figura 2-15), uno de los petroleros más grandes del mundo, tiene un casco de desplazamiento.



Figura 2-15 Un ejemplo de casco de desplazamiento es el del petrolero VLCC Kazusa [28]

Los **cascos de poco calado o semi-planeadores** suelen estar destinados a embarcaciones rápidas de menor eslora y desplazamiento que los anteriores, como embarcaciones de recreo similares a la Rodman Ventura 790 SD (Figura 2-16). La producción de estos cascos suele requerir una alta precisión para obtener el rendimiento esperado. Suandar Baso recalca la importancia del diseño de estos cascos para reducir la resistencia al avance, y enfatiza especialmente en la pérdida de resistencia y estabilidad a altas velocidades [29]. Estos cascos, dependiendo del tipo de la embarcación, suelen también estar fabricados en materiales más livianos, como la fibra de vidrio.



Figura 2-16 Un ejemplo de casco semi-planeador es el de la Rodman Ventura 790 SD [30]

El tipo de casco más utilizado en las embarcaciones a vela son los **cascos quillados o de quilla fija**. Esta quilla es una estructura alargada y generalmente plana, situada a crujía y en prolongación al calado del casco, la cual tiene la función principal de resistir la deriva ocasionada por el viento, es decir, evitar ser desplazado lateralmente por el viento. Algunas embarcaciones de vela ligera, como los veleros de la clase snipe, tienen una quilla removible denominada “**orza**”, la cual se puede modificar su calado y ángulo en busca de un rendimiento óptimo. No obstante, la gran mayoría de los cruceros cuentan con una quilla fija, como el velero Beneteau Oceanis Yatch 54 (Figura 2-17).



Figura 2-17 Un ejemplo de casco de quilla fija es el del velero Beneteau Oceanis Yatch 54 [31]

Otra tecnología relativamente reciente son los **barcos multi-casco**, como los catamaranes y trimaranes. Este tipo de barcos se emplean cada vez más especialmente en el ámbito comercial. Estos

barcos permiten una gran capacidad y cubiertas espaciosas, pero manteniendo una reducida resistencia al avance comparado con buques monocasco de dimensiones similares. Al sustituir un casco grande por varios cascos más pequeños se reduce significativamente la resistencia total por formación de olas, que es especialmente relevante a altas velocidades [32]. En el año 1992 se introduce el concepto de una fragata trimarán realizado por BMT (British Maritime Technology). Este concepto podía ser interesante para los buques de guerra, ya que aportaba unidades con alta velocidad, estabilidad, y una cubierta de vuelo espaciosa [33]. En el año 2008 sucede la botadura del primer buque de guerra con este concepto, el *USS Independence (LCS-2)* (Figura 2-18). Este buque estaba destinado al combate litoral, y podía alcanzar unas velocidades superiores a los 40 nudos. Este buque se dio de baja en el año 2021, tras tan solo 10 años de servicio, principalmente debido a los altos costes de actualización de esta clase de buques [34].



Figura 2-18 USS Manchester (LCS-14) de la clase Independence [35]

También se han desarrollado otras tecnologías, especialmente en el ámbito de la competición, como son las **hidro alas**. Estas hidro alas, cuando el barco alcanza cierta velocidad, permiten que el casco se eleve por encima de la superficie del agua, dejando únicamente las hidro alas, unidas al casco por mástiles, debajo del agua. De este modo se reduce de forma muy significativa la resistencia al avance generada por el agua, y permite alcanzar velocidades mucho más elevadas con menos energía. Esta tecnología se encuentra en su forma más desarrollada en los barcos que compiten en la *America's Cup*, como la clase AC40 (Figura 2-19) [36].



Figura 2-19 AC40 Luna Rossa Prada Team con hidro alas [37]

2.4 Introducción al CFD

El software CFD (Computational Fluid Dynamics) es una herramienta informática utilizada para simular y analizar el comportamiento de fluidos y sus interacciones con objetos sólidos. Estos programas aplican métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales que describen el flujo de estos fluidos y fenómenos relacionados, como puede ser la transferencia de calor o el movimiento de partículas. Este software es ampliamente utilizado en ingeniería para analizar el comportamiento de distintos fluidos como el aire o el agua, y como interaccionan con los elementos sólidos que se pretenden diseñar, como puede ser un avión, o en este caso, el casco de un barco.

2.4.1 Principio de funcionamiento

Los códigos del software CFD resuelve las ecuaciones incompresibles RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes). El “solver” aplica la metodología de volumen de control para la discretización espacial y la discretización de las ecuaciones de continuidad de conservación de masa. Considerando un flujo multifase incompresible de un fluido viscoso en condiciones isotérmicas, se puede representar las ecuaciones de conservación de masa, momento, y de fracción volumétrica de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV + \int_S \rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_i (\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S (\tau_{ij} I_j - p I_j) \cdot \mathbf{n} dS + \int_S \rho g_i dV \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i dV + \int_S \alpha_i (\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (15)$$

En estas ecuaciones, V representa el dominio de interés, o el volumen de control, delimitado por una superficie cerrada S que se desplaza a una velocidad $\mathbf{U}_d$ con un vector unitario normal $\mathbf{n}$ en dirección hacia fuera de la superficie. $\mathbf{U}$ y p representan respectivamente la velocidad y la presión. Además, τ_{ij} y g_i son las componentes del esfuerzo viscoso y del vector de gravedad. I_j es un vector cuyas componentes se desvanecen, a excepción de la componente j , la cual es igual a la unidad. α_i representa la fracción número i del fluido, y se usa para distinguir la presencia o ausencia de este fluido, $\alpha_i = 1$ indica la presencia del fluido, mientras que $\alpha_i = 0$ indica su ausencia [38].

El modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) combina el modelo de flujo $k-\omega$ dentro de la superficie delimitante y el modelo de flujo $k-\varepsilon$ para la región fuera de la superficie delimitante. Las ecuaciones de transporte de este modelo son las siguientes:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (17)$$

En las ecuaciones (16) y (17), G_k representa la generación de energía cinética a partir de las turbulencias provocadas por los gradientes de velocidad, mientras que G_ω representa la generación de

ω . Y_k e Y_ω representan la disipación de k y ω debido a las turbulencias, respectivamente. Γ_k y Γ_ω representan la efectividad de la difusión de k y ω , mientras que D_ω es el término que representa la difusión cruzada [38].

El método VOF (Volume of Fluid) es utilizado para modelar la superficie libre. Este método define un campo escalar α que representa una fracción de volumen de agua en una celda. Este campo es igual a 1 cuando dichas celdas se encuentran totalmente llenas de agua, y son igual a 0 cuando las celdas están llenas de aire. Las celdas en la superficie libre tienen un valor de α en un rango entre 0 y 1, $0 < \alpha < 1$. Las propiedades del fluido vienen definidas por la interpolación entre el agua y el aire usando α como peso de este modo:

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \quad (18)$$

$$\mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air} \quad (19)$$

El VOF es arrastrado por una velocidad $\mathbf{U}$, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\mathbf{U}\alpha) = 0 \quad (20)$$

Las ecuaciones (18), (19), y (20) son las ecuaciones que utilizan los “solvers” de VOF de dos fases. Estos “solvers” utilizan un método de volumen finito para establecer la discretización espacial de las ecuaciones de transporte. La velocidad se obtiene de las ecuaciones de conservación de momento, y la presión se extrae de la ecuación de conservación de masa, o de la ecuación de continuidad, transformada en una ecuación de presión. En flujos turbulentos, se resuelven ecuaciones adicionales de transporte para variables modeladas de un modo similar a las ecuaciones de momento, y se pueden discretizar y resolver usando los mismos principios. Las fases del flujo incompresible e inmiscible son modeladas a través de las ecuaciones de conservación para cada fracción volumétrica de cada fase [38].

2.5 Otros estudios en este ámbito

Experimento cooperativo sobre el casco parabólico Wigley en Japón

Este experimento fue propuesto por la decimosexta ITTC (International Towing Tank Conference) en el año 1981, y consistía en un experimento cooperativo para analizar las fuerzas de arrastre y generación de olas de un casco tipo Wigley para establecer una base de datos estándar para este tipo de casco. En este experimento participaron cuatro organizaciones diferentes; la Universidad de Tokio, el Ship Research Institute (SRI), la Universidad Nacional de Yokohama (YNU), y la Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI). Cada una de estas organizaciones construyó su propia maqueta siguiendo la fórmula específica que define el casco Wigley, pero con distintas dimensiones, y realizó los ensayos en su propio canal hidrodinámico.

Se realizaron cinco tipos de medidas diferentes: Medidas de resistencia al avance, análisis del patrón de ola generado, medidas del perfil de la ola generada, medidas de presión en la estela generada, y medidas de presión en la superficie del casco.

Todas las maquetas creadas por las diferentes organizaciones mantuvieron las mismas proporciones, a excepción de la maqueta creada por la YNU, la cual tenía una mayor manga en proporción con su eslora y su calado.

En los diferentes ensayos también cambiaban ciertas condiciones, como la libertad de balance y cabezada de la maqueta en el ensayo. En todos los ensayos de la IHI, la maqueta tenía libertad total de movimiento, mientras que, por ejemplo, los realizados por la Universidad de Tokio, se realizaban ensayos con libertad total, fijos, y con libertad parcial de balance o de cabezada. También cambiaban las condiciones del entorno, como la sección del tanque, la profundidad, o la medida de la velocidad, variando esta última entre velocidad sobre fondo o velocidad de la corriente.

Los resultados de este experimento fueron presentados en la decimosexta ITTC en Varna, en 1983 [3].

Taller de CFD para el estudio de la hidrodinámica de barcos – Tokio 2015

Desde el año 1980, y cada cinco años aproximadamente, se celebra un taller a nivel internacional para el estudio de la hidrodinámica de los barcos centrado en las simulaciones CFD. Estos talleres tienen el objetivo de comparar los resultados numéricos obtenidos por los participantes en las geometrías especificadas para evaluar las capacidades de las metodologías y buscar las mejores alternativas de cara al futuro.

Desde el primer taller de 1980 celebrado en Gotemburgo (Suecia), han ido alternando la sede entre esta ciudad y Tokio (Japón). A los participantes se les expone las condiciones para el estudio y se les proporciona las geometrías a estudiar, así como los datos experimentales recogidos para cada una de ellas, y en el día que se celebra el taller, todos los concursantes exponen sus resultados obtenidos y las metodologías empleadas.

En la edición del año 2015, celebrada en Tokio, seis organizaciones diferentes participaron en la organización de este taller internacional: el NMRI (National Maritime Research Institute) de Tokio (Japón), la YNU (Yokohama National University) de Yokohama (Japón), la CUT (Chalmers University of Technology) de Gotemburgo (Suecia), la IIHR (rama de la Universidad de Iowa) de Iowa (E.E.U.U.), la ECN (Ecole d'ingénieurs Centrale Nantes) de Nantes (Francia), y el KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) de Corea del Sur [39].

En esta edición, a diferencia de la edición anterior de 2010, se propusieron varias geometrías para el estudio, destacando la geometría de un prototipo de buque de guerra bajo el nombre de ONR Tumblehome model 5613 (ONRT), Figura 2-20.



ONR Tumblehome Ship (ONRT)

Figura 2-20 Geometría del prototipo ONRT [39]

Se decidió incluir otro tipo de geometrías además de buques comerciales, pues este tipo de estudios son de gran interés también para las marinas de todo el mundo, pues los buques de guerra suelen ser unidades muy especializadas en sus cometidos y se requiere de un amplio abanico de diseños para las diferentes unidades. Desde patrulleros de poco calado y altas velocidades, hasta buques de aprovisionamiento con diseños similares a los buques comerciales. Estos estudios aportan gran riqueza para la ingeniería naval militar, pues estos estudios pueden ser de gran utilidad para constructoras navales como *Navantia*, especializada en el sector militar, para introducir y simular nuevas tecnologías dedicadas a buques militares.

El prototipo de este buque militar de tipo fragata tiene un diseño de proa afilada de tipo espolón con bulbo de proa, con alneas estabilizadoras en cada banda y popa de espejo. El modelo sobre el que se han realizado los ensayos está a escala 1/49 del prototipo original, no existe un prototipo a escala real de este buque. Los ensayos de este prototipo a escala se llevaron a cabo en el canal de ensayos hidrodinámicos de la IIHR, en Iowa, Estados Unidos [39].

El prototipo ONR Tumblehome fue propuesto por el ONR (Office of Naval Research) en el año 2005 como parte del programa HSSL (High-Speed Sealift) [40]. El ONR es el órgano dependiente del gobierno de los Estados Unidos dedicado a coordinar, ejecutar y promover los programas de ciencia y tecnología de la US Navy y de los Marine Corps. En el año 2018, Yugo Sanada publicó un artículo para el *“Journal of Marine Science and Technology”* en el que demostraba las altas capacidades de maniobrabilidad en aguas tranquilas y con oleaje que tiene este prototipo en comparación con otros diseños similares, cumpliendo además los criterios establecidos por la IMO (International Maritime Organization) [41].

La otra geometría propuesta para este taller fue la de un prototipo de buque portacontenedores diseñado por KRISO, bajo el nombre de KCS (KRISO Container Ship), este modelo además fue propuesto ya en la edición pasada, el taller de 2010 celebrado en Gotemburgo, mostrada en la Figura 2-21. Se realizaron varios ensayos de modelos a escala para esta geometría, los primeros ensayos en un canal hidrodinámico los realizó el KRISO, más adelante el NMRI realizó ensayos de este modelo con propulsión propia, y en el año 2014 también realizó ensayos de canal hidrodinámico. Los datos de los modelos a escala están disponibles en la página web, y del mismo modo que el resto de prototipos, no existe ningún modelo a escala real.



KRISO Container Ship (KCS)

Figura 2-21 Geometría del prototipo KCS [39]

Por último, la otra nueva geometría propuesta para el taller de 2015, además del prototipo ONRT, fue un prototipo de granelero desarrollado de manera conjunta por el NMRI, la YNU, y el SRC (Ship Building Research Center), mostrado en la Figura 2-22. Este prototipo lleva el nombre de JBC (JAPAN Bulk Carrier). Los ensayos hidrodinámicos se llevaron a cabo en el NMRI, SRC, y en la Universidad de Osaka, además se realizaron ensayos en un túnel de viento en la Universidad Técnica de Hamburgo-Harburg. Todos los datos están disponibles en la página web.



JAPAN Bulk Carrier (JBC)

Figura 2-22 Geometría del prototipo JBC [39]

Se han exportado las geometrías proporcionadas por la página web al software CAD de Ansys, el *Ansys Discovery* para visualizar mejor la geometría 3D de estos prototipos, Figura 2-23.

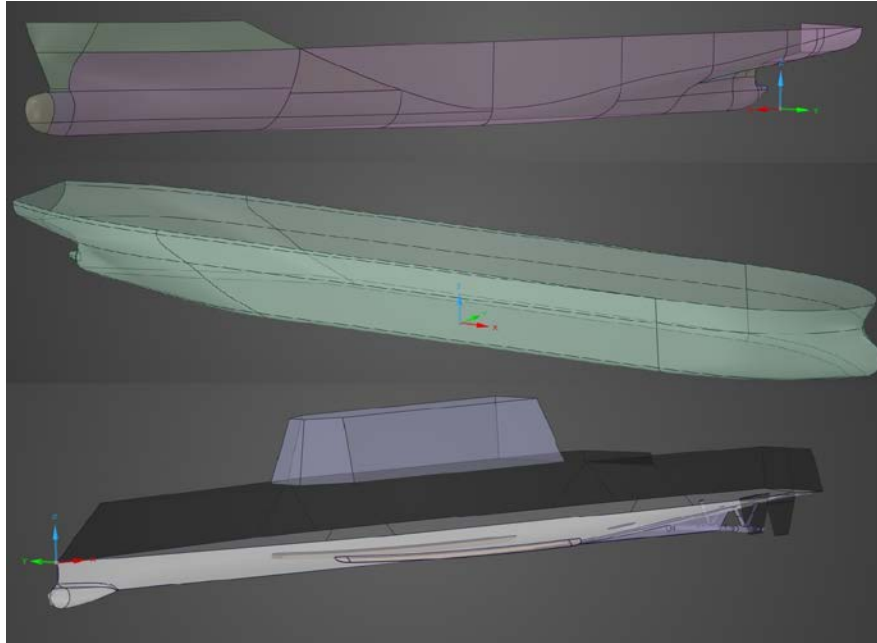


Figura 2-23 Geometrías del Workshop Tokio 2015 importadas al software CAD [39]

Método de simulación de volumen finito para la predicción del rendimiento de un barco de vela

En el año 2002, Hiromichi Akimoto, del Departamento de Matemáticas y Física Aplicadas de la Universidad de Tottori, en Koyama, Japón, junto a Hideaki Miyata, del Departamento Ambiental y de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Tokio, Japón, desarrollaron una metodología de simulación CFD para predecir el rendimiento de un barco de vela en movimiento inestable sobre una superficie libre.

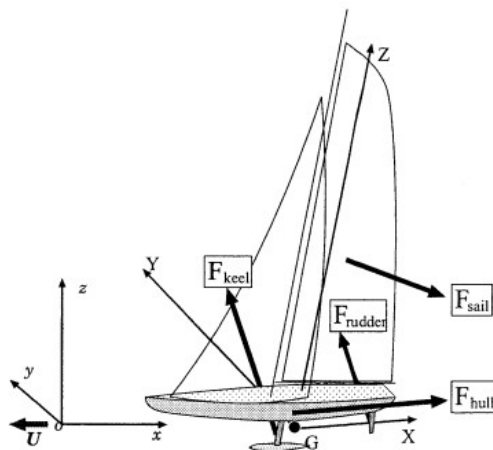


Figura 2-24 Fuerzas que actúan sobre un barco de vela [42]

Este método se basaba en la metodología FVM (Finite Volume Method) y en la técnica de malla móvil, teniendo en cuenta la superficie libre y la deformación de la obra viva del barco debida a sus movimientos arbitrarios (Figura 2-25). La ecuación de movimiento con seis grados de libertad se resuelve haciendo uso de las fuerzas dinámicas del fluido y los momentos obtenidos de la simulación. Las condiciones de navegación del barco son simuladas de manera virtual mediante la combinación de las simulaciones del flujo de agua y las simulaciones del movimiento del barco. La disponibilidad se demuestra a través de cálculos de avance estable, balance, y movimientos típicos de las maniobras de

los veleros de la clase IACC (International America's Cup Class). En la Figura 2-24 se pueden ver todas las fuerzas que actúan sobre un barco de vela [42].

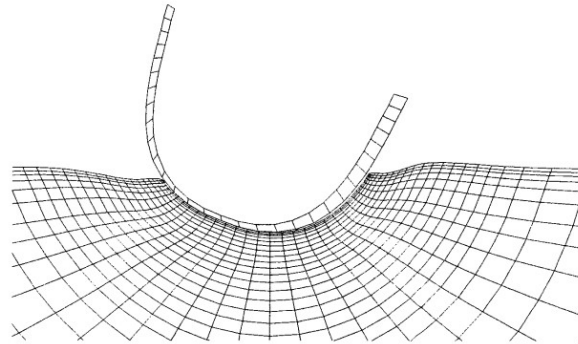


Figura 2-25 Deformación de la malla en una zona sección en contacto [42]

Destaca además como los avances en las simulaciones CFD nos permiten, cada vez de una forma más aproximada, predecir el rendimiento de un barco de vela, así como su maniobrabilidad. En la Figura 2-26 se puede comparar la superficie de presión simulada y la medida experimentalmente [42].

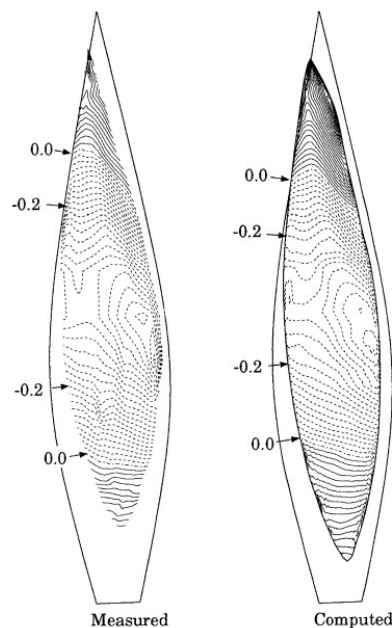


Figura 2-26 Comparativa entre la superficie de presión medida y la simulada [42]

En este trabajo se genera un código WISDAM-VII específicamente para la gran cantidad de movimientos que ocurren en un barco de vela. Este código utiliza además de la metodología FVM, una estructura de malla O-O con una estrategia de Overset, es decir, el casco del barco y el entrono tienen mallas independientes, que se interpolan entre ellas en las celdas que están en contacto para obtener los resultados de la simulación (Figura 2-27). Además, la configuración del mallado se genera de forma dinámica en cada franja de tiempo establecida, y las deformaciones del dominio computacional se gestionan utilizando el procedimiento de “búsqueda de la línea de flotación” y el método de malla móvil [42].

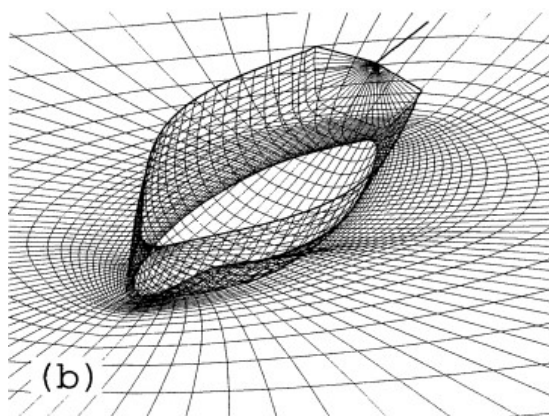


Figura 2-27 Estructura de malla O-O [42]

3 DESARROLLO DEL TFG

Durante el desarrollo de este trabajo, se seguirá el flujo de trabajo que nos proporciona ANSYS en el “workbench” de Ansys Fluent (Figura 3-1). Este “workbench” nos proporciona el flujo de trabajo a seguir y nos permite de una manera muy simple e intuitiva tener bien organizado el trabajo. Este flujo de trabajo se divide en cinco fases:

- **Geometry:** En este apartado se importan los archivos CAD generados en Autodesk Inventor al flujo de trabajo. ANSYS ofrece la posibilidad de usar su propio software CAD para evitar la necesidad de salirnos del flujo de trabajo que ofrece su ecosistema, no obstante, se ha preferido utilizar Autodesk Inventor. También se da uso a *DesignModeler*, uno de los softwares CAD proporcionados por ANSYS, únicamente para dar nombre a las caras del CAD importado.
- **Mesh:** Una vez importada la geometría en el apartado anterior, ANSYS nos proporciona un software de mallado para editar la malla de nuestra geometría, como preparación para la simulación. Todas las modificaciones quedan guardadas en el flujo de trabajo, y en el caso de hacer modificaciones en la geometría, como, por ejemplo, un rescalado, no se necesitaría crear la malla de cero.
- **Setup:** En esta parte del flujo de trabajo, ANSYS nos llevaría ya al software de Ansys Fluent. Aquí se editarían las condiciones del entorno como la multifase, las propiedades de los distintos fluidos, o la velocidad de entrada del fluido.
- **Solution:** Este apartado nos redirige a Ansys Fluent a la parte de soluciones y resultados, donde se pueden visualizar los resultados obtenidos de la simulación.
- **Results:** Este apartado, Ansys nos abre un software para editar la presentación de los resultados obtenidos en la simulación.



Figura 3-1 Vista inicial del Workbench de Ansys Fluent

3.1 Generación del CAD

3.1.1 Modelado del casco

Para generar el modelo CAD del casco Wigley, se ha utilizado principalmente el software CAD *Autodesk Inventor*. Además, como se menciona en el apartado 1.5, se tienen publicaciones de referencia que proporcionan la fórmula (1) que da forma al casco parabólico Wigley.

Los valores que se han adoptado para las diferentes dimensiones del casco Wigley son las siguientes:

- Eslora (L) = 2,5 metros
- Manga (B) = 0,25 metros
- Calado (D) = 0,156 metros

Estas dimensiones coinciden con las dimensiones del modelo a escala creado por la Universidad de Tokio (UT) en el experimento cooperativo del casco Wigley [3]. Además, este casco cuenta con un francobordo cuya altura equivale a la mitad del calado, en este caso, 0,078 metros.

El eje de coordenadas es XYZ, donde la variable “x” representa el eje longitudinal, la variable “y” representa el eje horizontal, y la variable “z” representa el eje vertical.

En primer lugar, se congela la variable “z” en la fórmula, de inicio dándole un valor de $z = 0$. De este modo, usando la función de “Curva Paramétrica” para el boceto en el plano XY se obtiene el boceto de la cubierta principal, como se puede ver en la Figura 3-2, la cubierta con la máxima manga en la cuaderna maestra. La dirección del eje “z” que se ha elegido va desde su valor nulo en la línea de flotación, hasta el valor máximo en la quilla del casco. La cuaderna maestra está situada en $x = 0$.

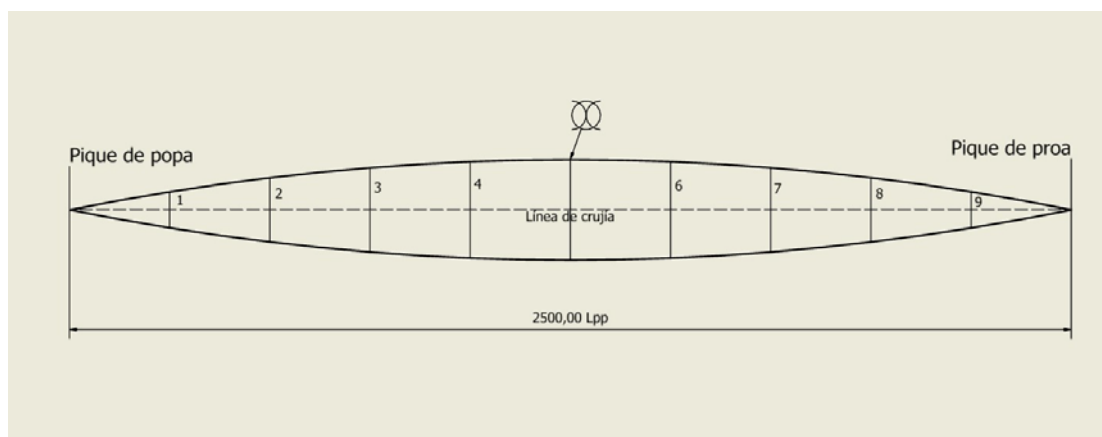


Figura 3-2 Vista de la base del casco Wigley generado

Abarcando todo el dominio posible de valores para “z”, es decir, desde 0, en la línea de flotación, hasta 0,156 metros, donde se sitúa la quilla, se obtiene el perfil YZ del casco, donde añadimos posteriormente el francobordo con una altura de 0,078 metros por encima de la línea de flotación en forma de extrusión como se puede ver en la Figura 3-3.

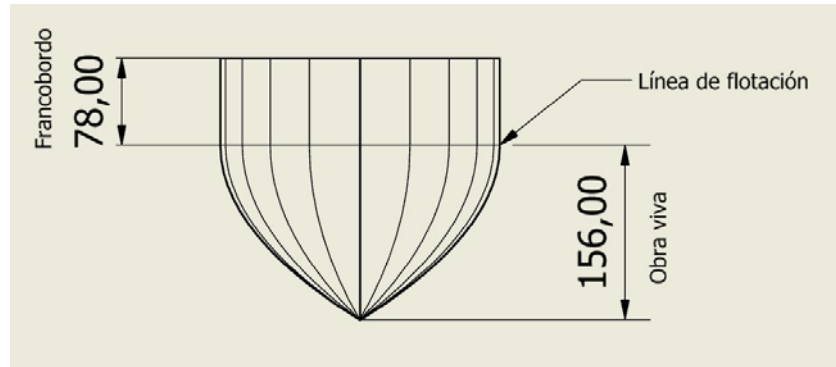


Figura 3-3 Vista de la proa del casco Wigley

Una vez generada la superficie en Inventor, se validan que las dimensiones son las apropiadas basándonos en publicaciones de referencia. En la Figura 3-4 se puede ver un modelo 3D del casco generado resultante.

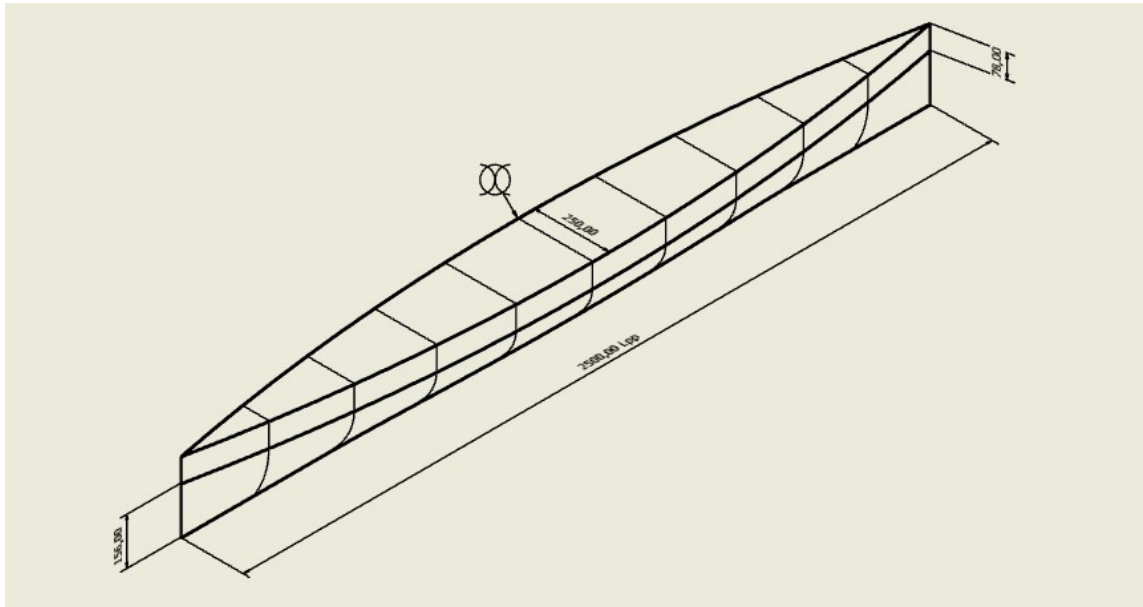


Figura 3-4 Boceto de la vista 3D del CAD generado

De acuerdo a las medidas obtenidas en Inventor, el volumen total del casco generado es de $0,267 \text{ m}^3$. Se validan las medidas del casco a través de coeficientes de forma, como son el **coeficiente de bloque** (C_B), el **coeficiente prismático** (C_{PR}), el **coeficiente de sección de la cuaderna maestra** (C_X), o el **coeficiente de obra viva** (C_S). Las fórmulas para obtener los coeficientes son las siguientes:

$$C_B = \frac{V}{L_{PP} \cdot B \cdot H} \quad (21)$$

$$C_{PR} = \frac{V}{L_{PP} \cdot A_X} \quad (22)$$

$$C_X = \frac{A_X}{B \cdot H} \quad (23)$$

$$C_S = \frac{S}{L_{PP} \cdot (2H + B)} \quad (24)$$

Donde L_{PP} representa la **eslora entre perpendiculares**, A_X el **área de la sección en la cuaderna maestra**, B la **manga en la cuaderna maestra**, H el **calado**, y S la **superficie de la obra viva**.

Los resultados de los coeficientes obtenidos ha sido los siguientes:

Dimensión	Valor (unidad)
Eslora (L_{PP})	2,500 (m)
Manga (B)	0,250 (m)
Calado (H)	0,156 (m)
Superficie de obra viva (S)	0,930 (m^2)
Área de la sección de la cuaderna maestra (A_X)	0,026 (m^2)
Coeficiente de Bloque (C_B)	0,441
Coeficiente Prismático (C_{PR})	0,662
Coeficiente de la sección de la cuaderna maestra (C_X)	0,667
Coeficiente de obra viva (C_S)	0,662

Tabla 3-1 Coeficientes de forma del casco Wigley obtenido

En el apéndice del volumen 1 de [4], se pueden validar el valor de estos coeficientes, mostrados en la Figura 3-5.

WIGLEY's PARABOLIC HULL

Hull Geometry

Reference — Shearer and Cross (1965)

$$B/L = 0.1000$$

$$H/L = 0.0625$$

$$C_B = 0.444$$

$$C_{PR} = 0.667$$

$$C_X = 0.667$$

$$C_S = 0.661$$

Figura 3-5 Extracción del documento [4] [43] donde vienen definidos los coeficientes de forma

En la Figura 3-6, Figura 3-7 y Figura 3-8 se pueden ver las medidas que nos ha dado Inventor sobre el casco Wigley obtenido.

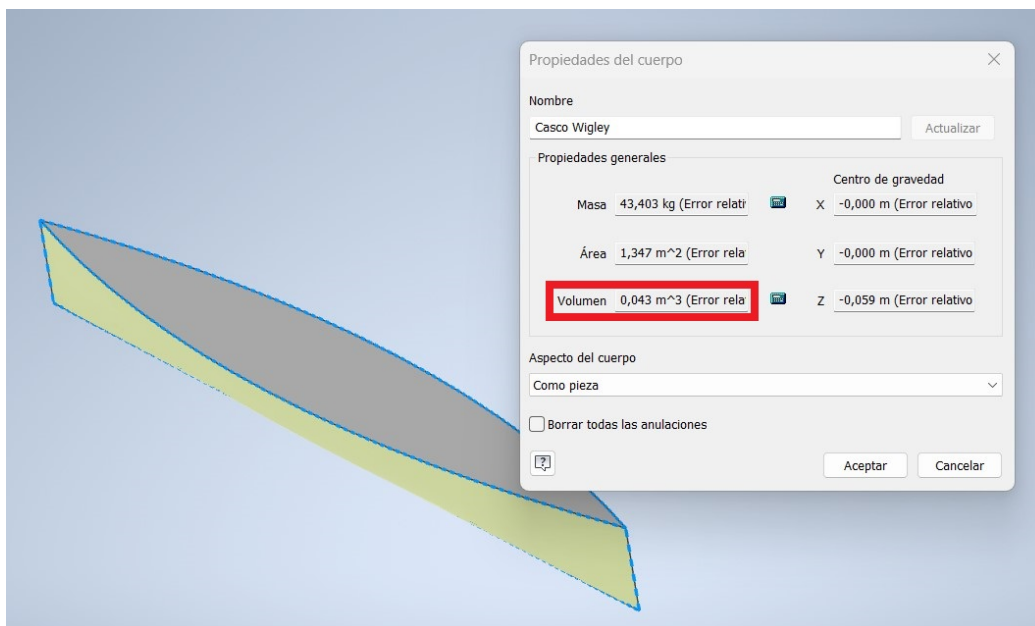


Figura 3-6 Volumen del casco Wigley medido

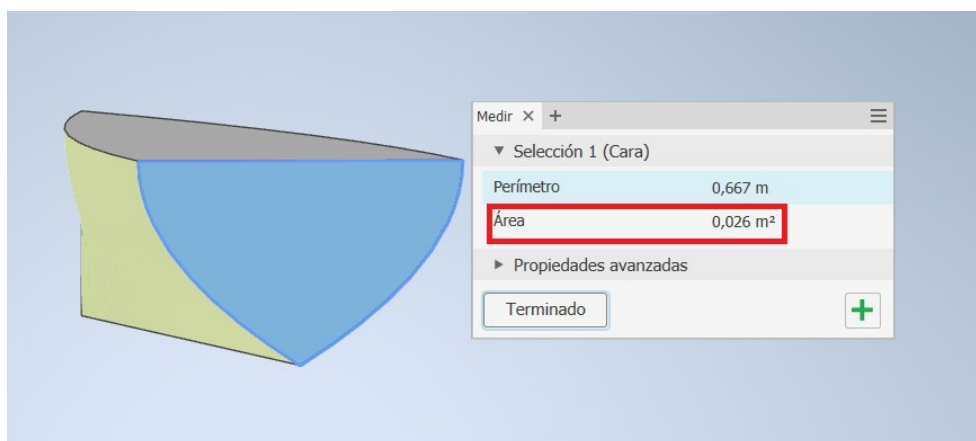


Figura 3-7 Área de la sección en la cuaderna maestra

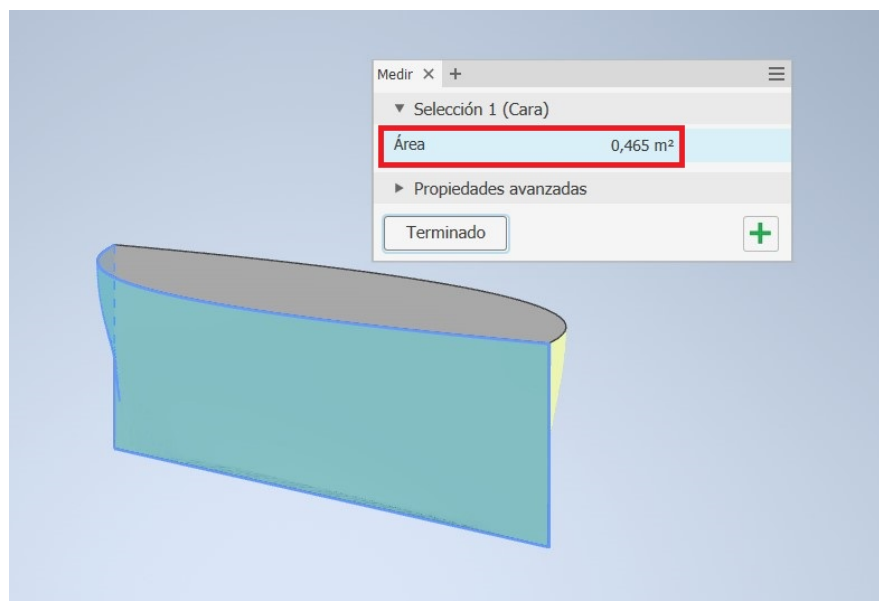


Figura 3-8 Área de la mitad de la superficie mojada o obra viva

3.1.2 Configuración del dominio computacional

Una vez se ha obtenido y validado el modelado 3D del casco Wigley, siguiendo la estrategia que se va a utilizar para el estudio de este caso, se debe obtener la geometría del dominio computacional. Este dominio computacional pretende simular lo que sería nuestro canal hidrodinámico virtual, y sobre este dominio será donde se genera la malla y se importa posteriormente al software CFD para establecer las condiciones de la simulación y para obtener los resultados. Este canal hidrodinámico se ha dimensionado en relación con las medidas del casco, con las dimensiones usadas por la UT en [3]. Las dimensiones que se han elegido son las que se han considerado suficientemente amplias para evitar pérdidas de datos, pero las óptimas para no exceder el tamaño de malla que nos permite la versión de *Ansys Fluent* de estudiante.

Para la generación y el posterior estudio de esta geometría, se usa como base la simetría de esta sobre el plano de crujía, es decir, el XZ, para así únicamente tener que generar, mallar y realizar los cálculos sobre la mitad del entorno, lo que ahorrará tiempo y consumo computacional.

La metodología que se ha utilizado para generar la geometría de este dominio computacional, es básicamente generar una extrusión en *Inventor* con las medidas deseadas y sustraer de esta la geometría del casco.

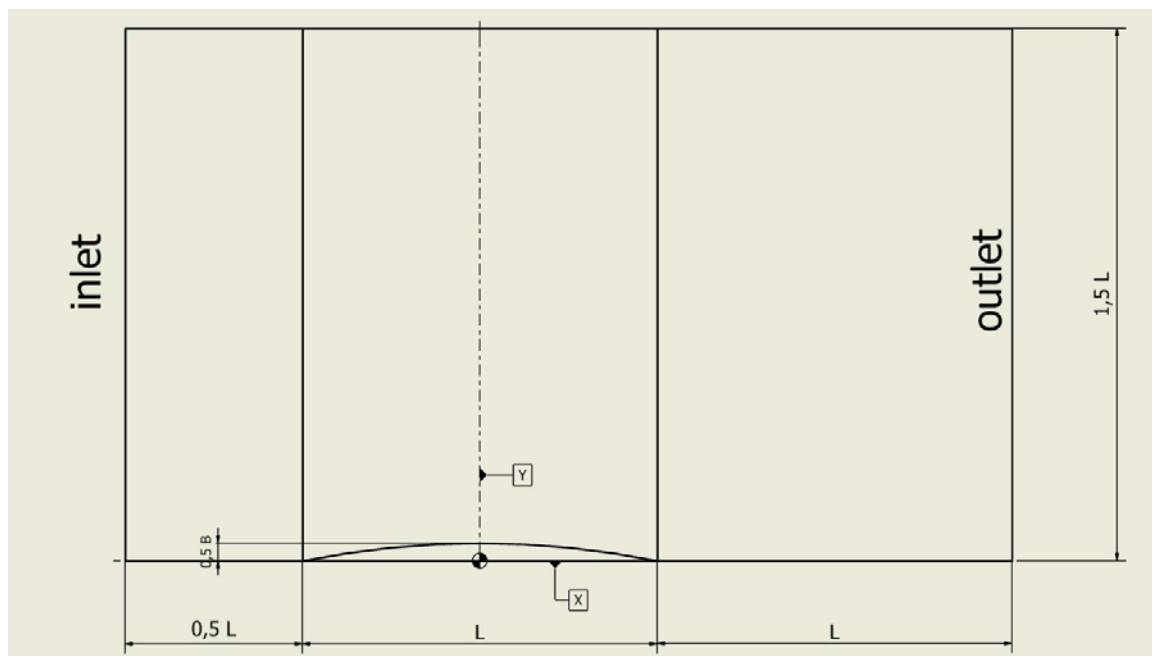


Figura 3-9 Vista de la base del dominio computacional generado

Como se puede observar en la Figura 3-9 y en la Figura 3-10, nuestro canal hidrodinámico virtual tendrá una longitud de 2,5 veces la eslora del casco, igual a 6,25 metros en nuestro caso, una anchura de 3 veces la eslora o lo que es lo mismo, 30 veces la manga total, en nuestro caso 7,5 metros; y una profundidad total de 5 veces el calado, 0,78 metros en nuestro caso. Como se ha mencionado anteriormente, el dominio computacional generado está cortado en el plano XZ por simetría, por ese motivo se puede ver en la Figura 3-4 que la anchura de este dominio es de $1,5L$ en lugar de $3L$. Además, se ha dividido el sólido de este dominio en 9 partes para poder tener un mejor control sobre el mallado posteriormente.

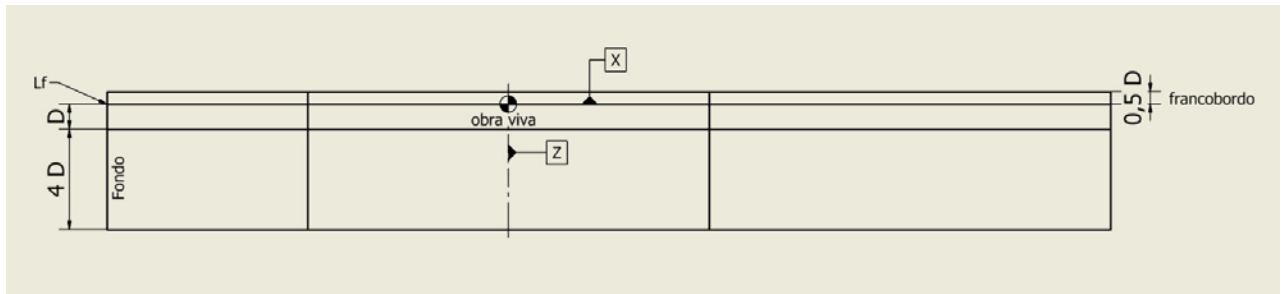


Figura 3-10 Vista del plano XZ del dominio computacional

Una vez se genera el CAD del dominio computacional, el siguiente paso es exportarlo de Autodesk Inventor, en formato STEP (.stp), para importarlo posteriormente en nuestro “workbench” (Figura 3-11)

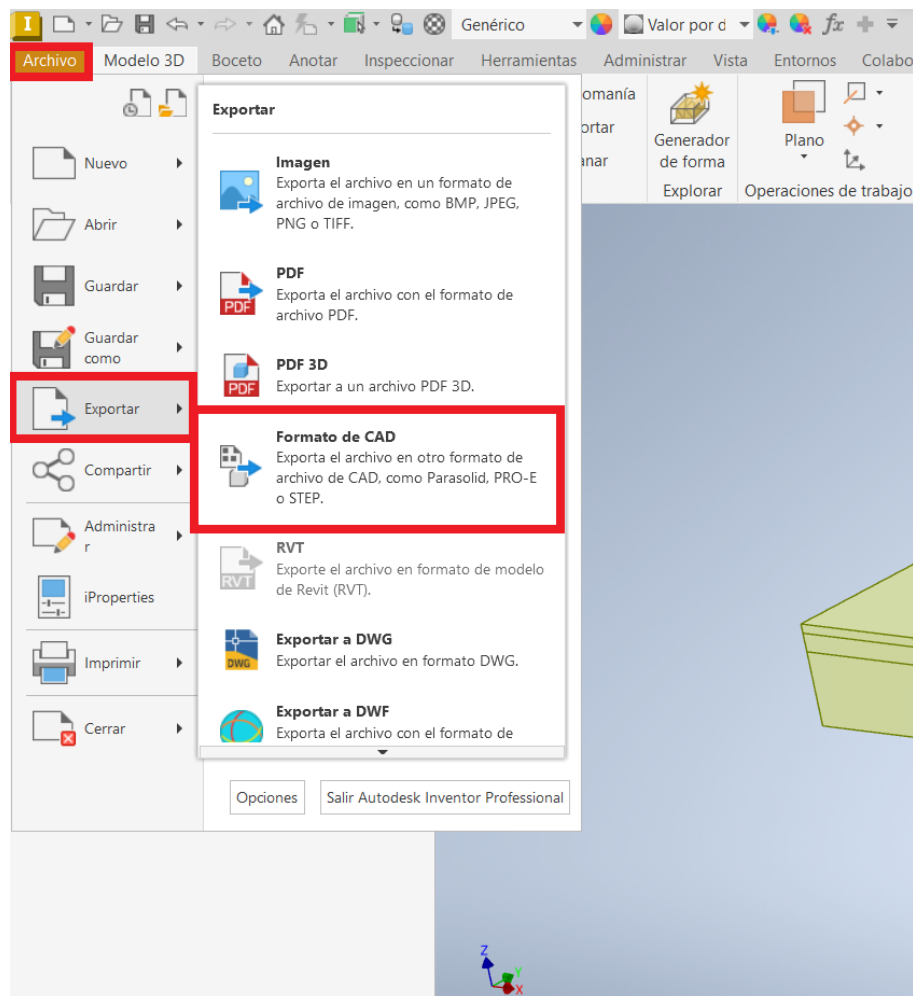


Figura 3-11 Exportar CAD en formato STEP en Inventor

Una vez se genera el archivo STEP de la geometría del dominio computacional, abrimos el “workbench” de Ansys y se importa la geometría (Figura 3-12).

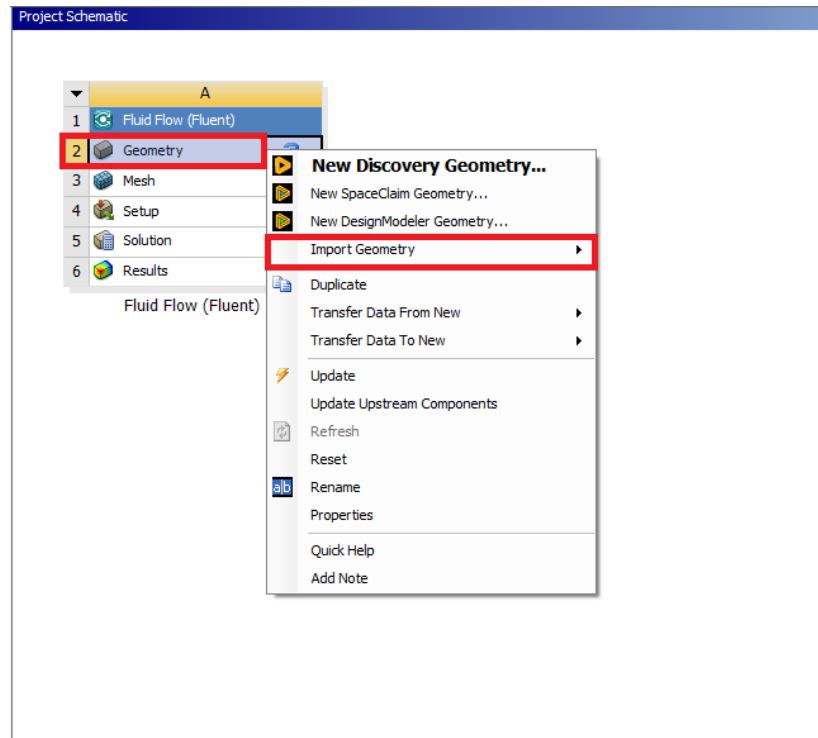


Figura 3-12 Importar geometría en el Workbench de Ansys

Tras esto, se abre la geometría en el software CAD de Ansys llamado “DesignModeler”. Este software se utilizará para dar nombre a las diferentes caras de la geometría (Figura 3-13).

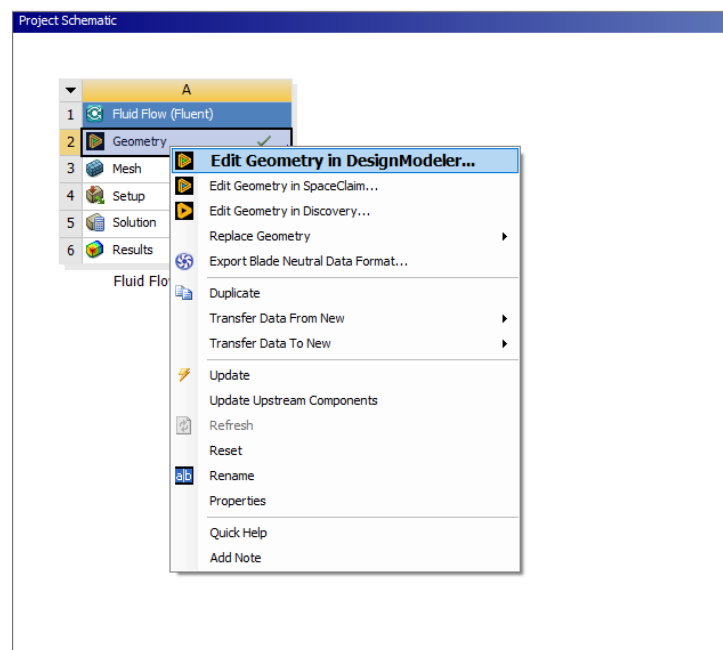


Figura 3-13 Editar la geometría en DesignModeler

En DesignModeler, se genera lo que el programa denomina “Named Selections” para cada cara, de este modo, Ansys Fluent identificará automáticamente las caras por sus nombres por defecto, además nos será más fácil llevar un control de cada zona del dominio computacional tanto para la obtención de la malla, como para la simulación en Fluent.

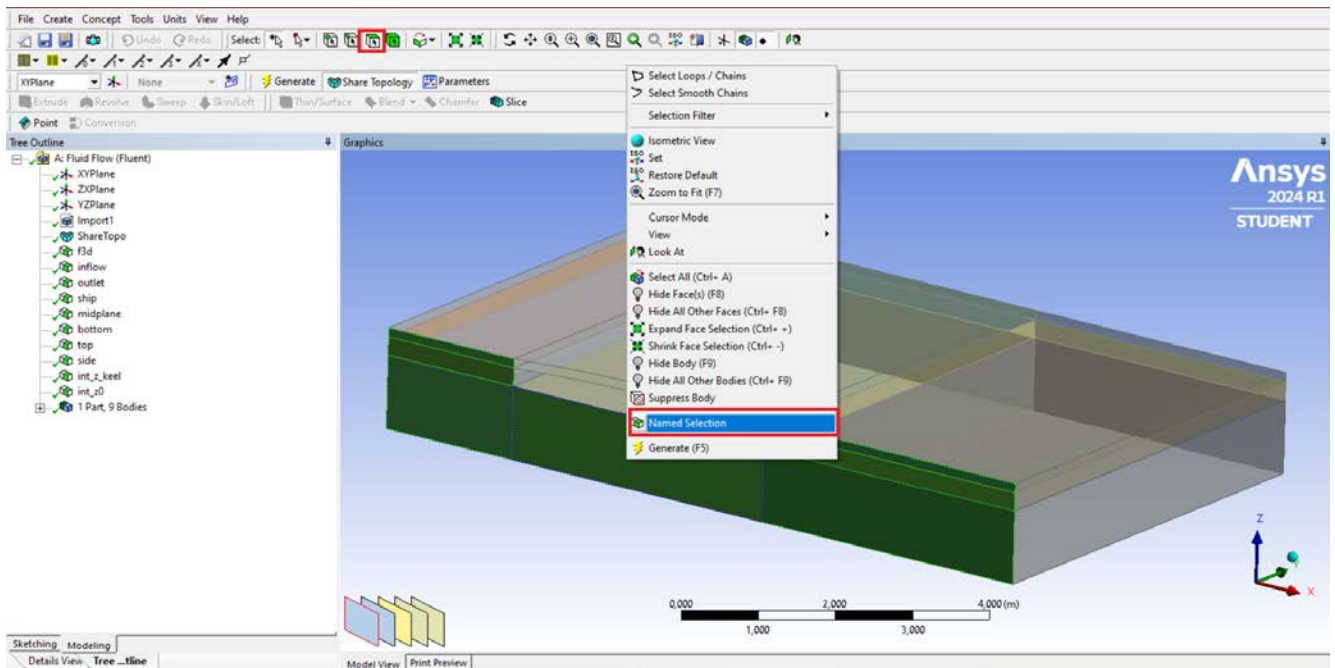


Figura 3-14 Named Selection en DesignModeler

Una vez en DesignModeler, con la opción de selección de caras, se selecciona la cara, o en nuestro caso, todas las subdivisiones de la cara, y con un click derecho se selecciona la opción “Named Selection”, tal y como muestra la Figura 3-14.

Para configurar este “Named Selection” se va a la ventana “Details View”, y en el apartado de Named Selection se configura el nombre deseado, como se muestra en la Figura 3-15.

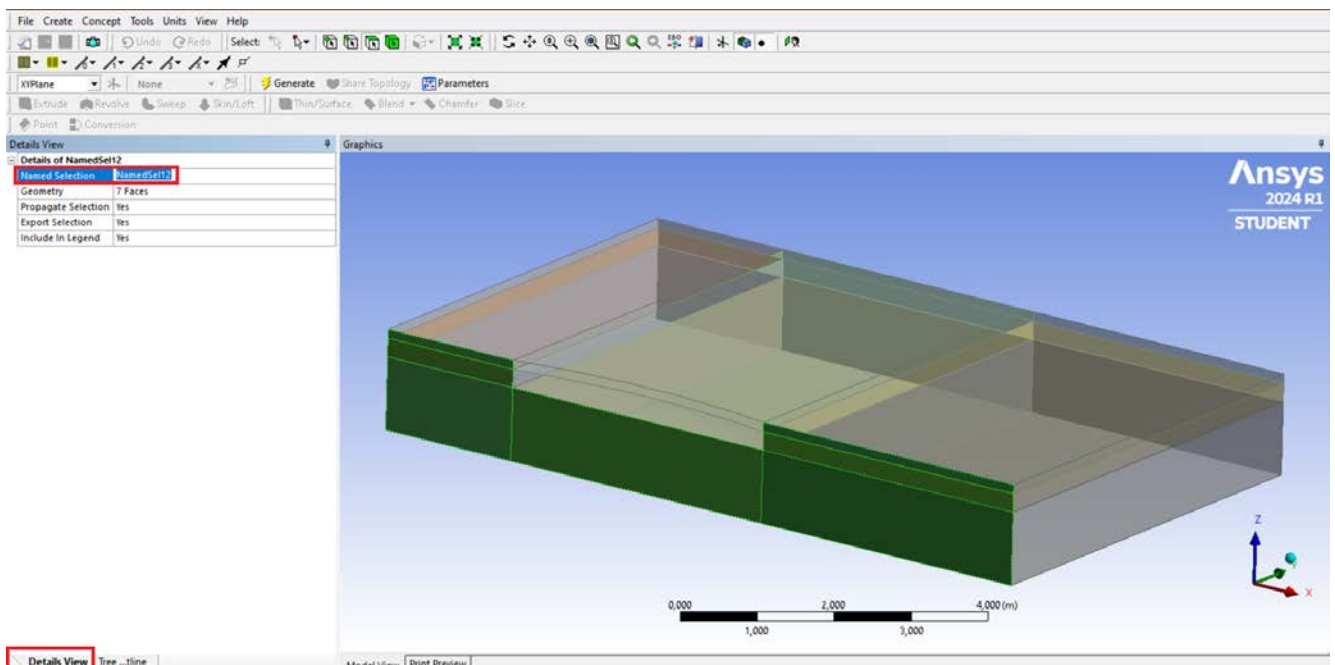


Figura 3-15 Details View de Named Selection

Hecho esto, nuestro Named Selection quedará pendiente de generar. Esto se puede ver en el “Tree Outline” cuando aparece un “⚡” a la izquierda de la operación. Simplemente hay que seleccionar “Generate”, tal y como se muestra en la Figura 3-16.

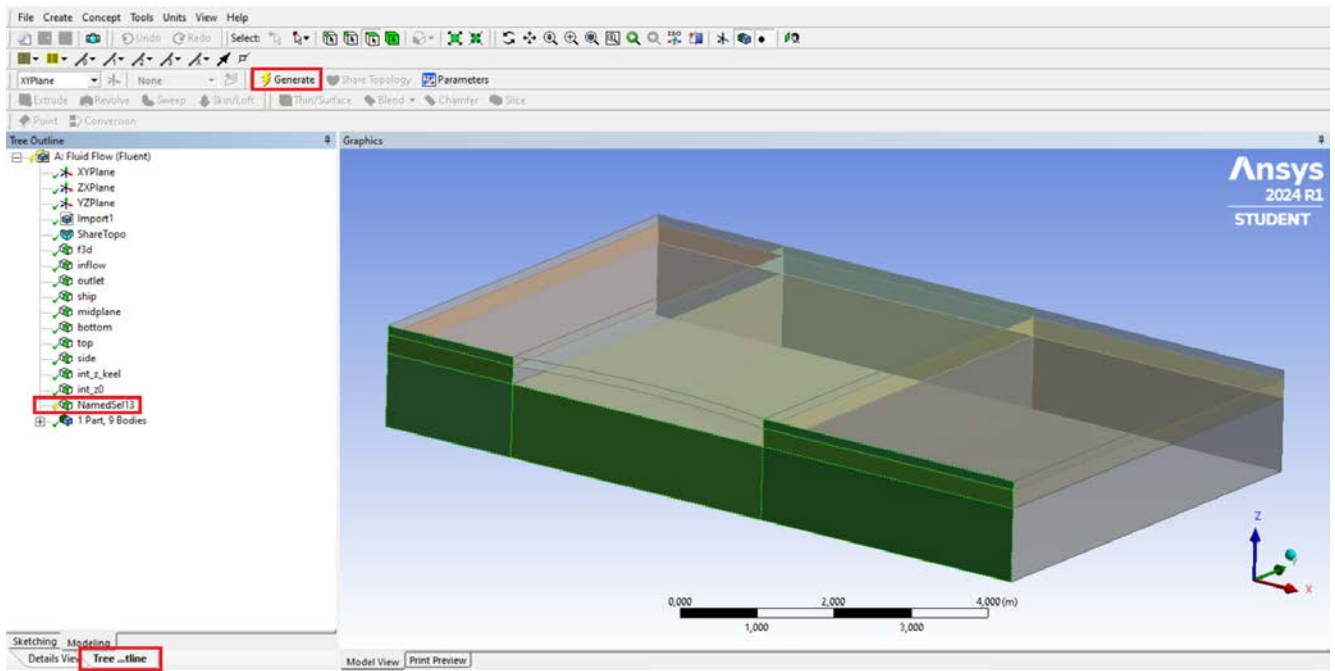


Figura 3-16 Generar el Named Selection

Este proceso se tiene que repetir con todas las caras. Finalmente se obtienen un total de 7 caras dispuestas de la forma que se muestra en la Figura 3-17.

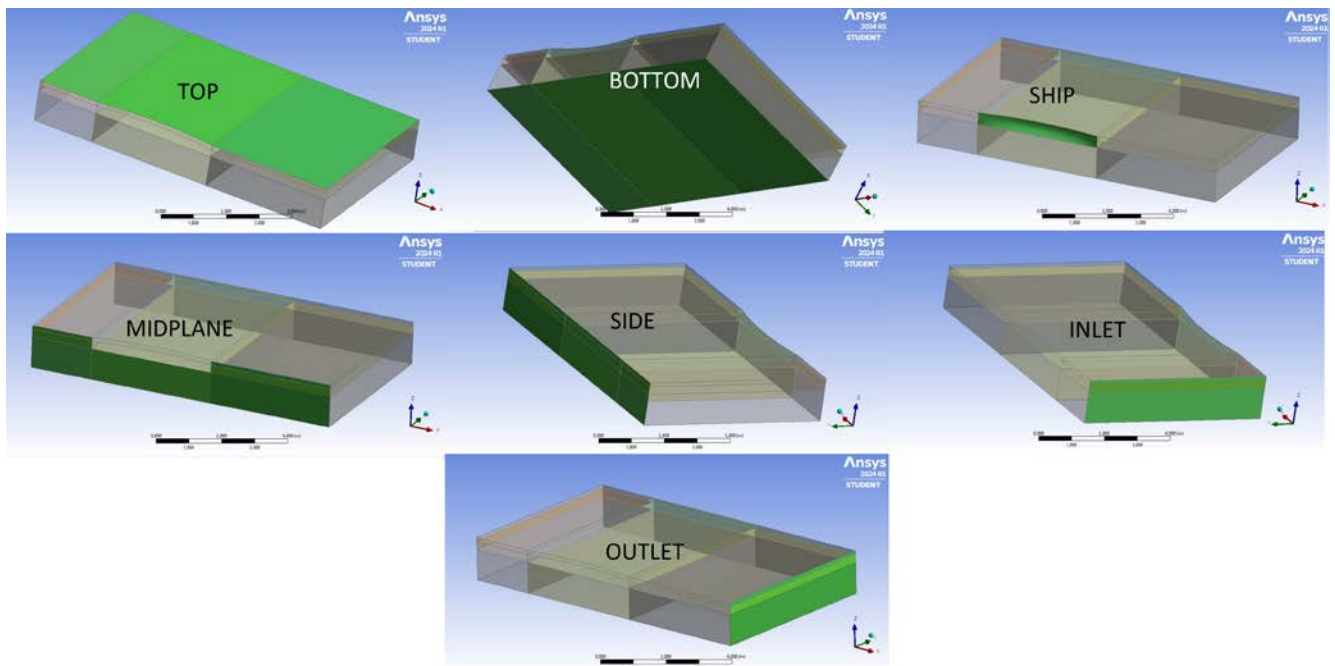


Figura 3-17 Disposición de las caras del dominio

3.2 Obtención de la malla

Una vez obtenida y preparada la geometría del dominio computacional, se pasa al siguiente apartado del flujo de trabajo del workbench, el mallado o “Mesh” (Figura 3-18).

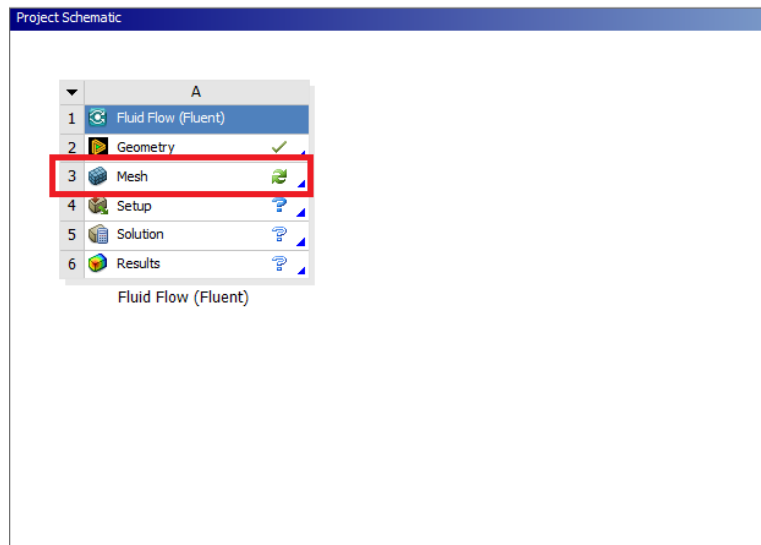


Figura 3-18 Mesh, segundo apartado del Workbench

En primer lugar, cuando se habla de malla dentro de la simulación CFD nos referimos a la discretización del dominio geométrico en una estructura o cuadrícula de elementos finitos. Esta cuadrícula se compone de una serie de puntos, vértices o nodos interconectados que cubren el área sobre la que se realizan las simulaciones. La obtención de esta malla es un paso fundamental de cara a la simulación CFD, ya que afecta directamente a la precisión y la eficiencia del análisis. La calidad de esta malla es crucial para capturar con precisión la interacción del casco con los fluidos del entorno.

Las mallas pueden ser mapeadas o no mapeadas, dependiendo de la disposición de los puntos o celdas. En las mallas mapeadas, como la mostrada en la Figura 3-20, las celdas están organizadas en una cuadrícula regular, lo que facilita el cálculo numérico, pero puede suponer un factor limitante para geometrías complejas. Por otro lado, en las mallas no mapeadas, como la que hay en la Figura 3-19, las celdas se distribuyen de manera más libre y pueden adaptarse mejor a geometrías complejas, pero es probable que requiera un mayor consumo computacional.

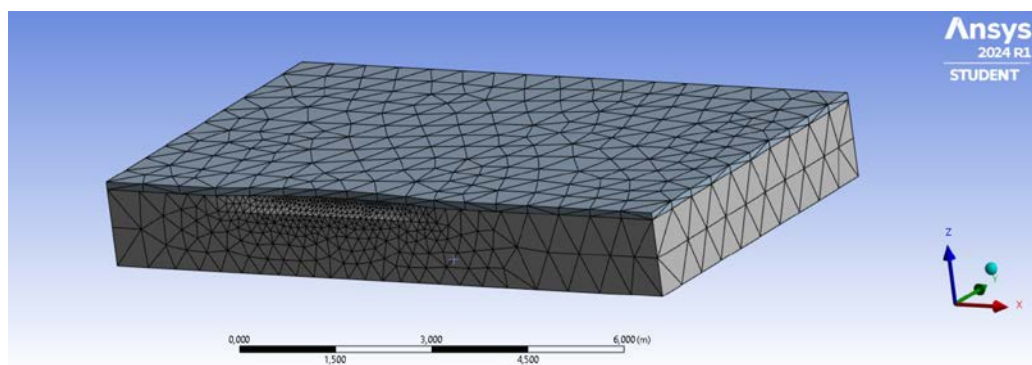


Figura 3-19 Ejemplo de malla no mapeada de tetraedros.

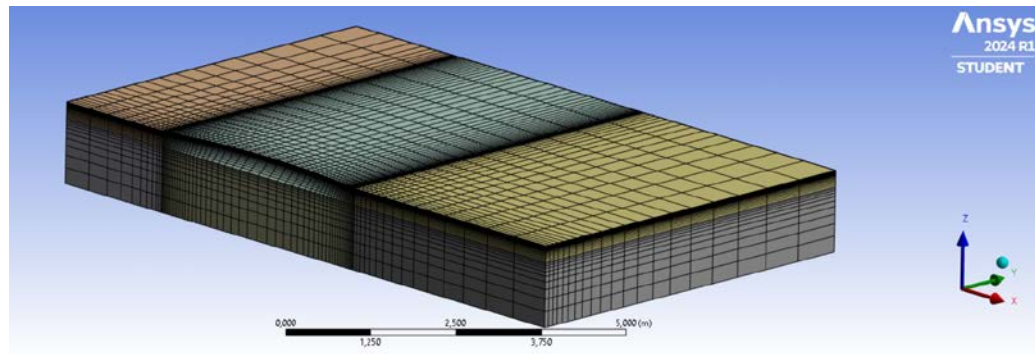


Figura 3-20 Ejemplo de malla mapeada

Las mallas también pueden ser refinadas en áreas de interés, en aquellas donde suceden los cambios más significativos en el flujo, de este modo se obtiene una representación más precisa de estas interacciones entre el sólido y el flujo. El proceso de la obtención de la malla y su refinamiento es una parte integral del preprocesamiento en la simulación CFD y requiere meticulosidad y experiencia por parte del usuario para obtener resultados precisos y veraces.

Para la obtención de la malla se ha tenido en cuenta las zonas de interés para el estudio, es decir, las zonas donde se va a generar el oleaje y las variaciones más significativas que nos darán los datos de resistencia y oleaje generado deseados.

En primer lugar, se ha utilizado una malla mapeada, debido a la baja complejidad de la geometría del dominio computacional y la facilidad que nos proporciona este tipo de malla para controlar su refinamiento en las zonas que se desean. Al importar la geometría del dominio y generar la primera versión de la malla, el software de mallado del “Workbench” de Ansys automáticamente generó una malla mapeada, al detectar la simplicidad de nuestra geometría importada.

Como se menciona ya en el apartado del modelado del dominio computacional, se tiene la geometría dividida en 9 partes para tener un mayor control sobre la malla (Figura 3-21). No obstante, todas estas caras tienen la topología de la malla compartida entre ellas, es decir, el mallado de todas estas caras están unidos entre sí, no son independientes.

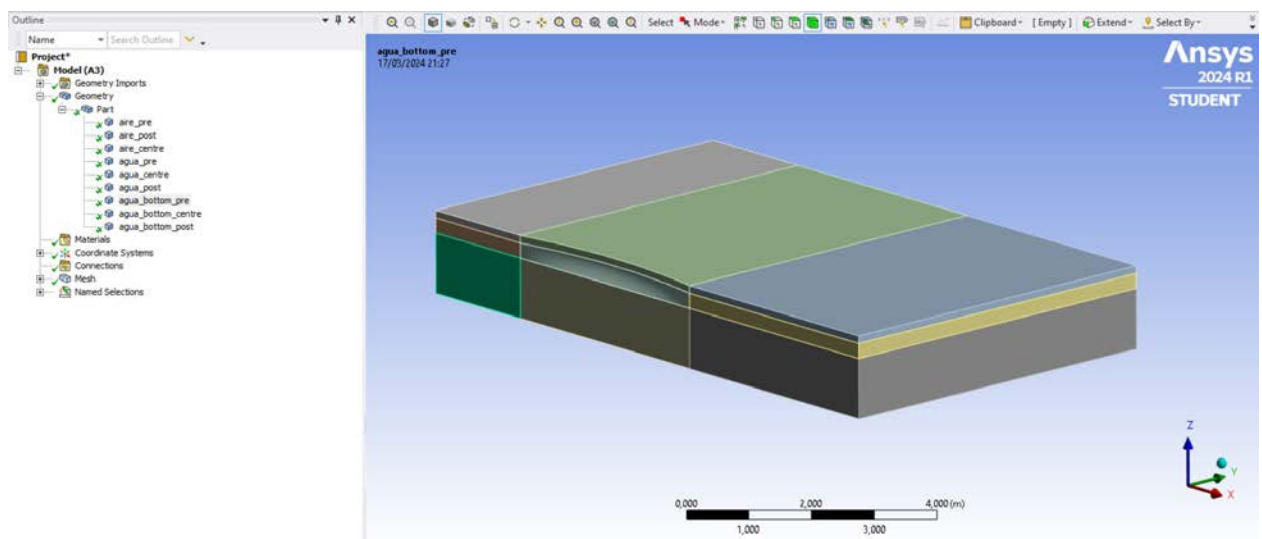


Figura 3-21 División de caras del dominio computacional

Las principales áreas de interés para refinar la malla son la superficie libre, especialmente las zonas más próximas al casco y a popa de este, ya que es donde se genera la estela, y las zonas de agua más próximas al casco bajo la superficie libre, donde se generan las diferentes resistencias al avance.

En primer lugar, se ha establecido un “bias” creciente en el eje y (Figura 3-22). Un “bias” es un término que describe la dirección preferencial en la cual se orienta el refinamiento de la malla. En este caso, el tamaño de las celdas crece en la dirección del eje y en todas las aristas de la geometría paralelas al eje y. Para configurar el tamaño de las celdas existen dos opciones, introducir directamente el tamaño deseado de la celda, o establecer un número de divisiones de la arista seleccionada, en este caso elegimos dividir estas aristas en 20 partes, y un “factor bias” 10, el cual establece la agresividad con la que se aplica el bias, cuanto mayor es este número, más diferencia de tamaño y más rápido aumentan en dirección del eje y. Este bias se aplica debido a que interesa que, en la zona más próxima al casco, cercana a $y=0$, la malla esté más refinada. Además, existe una función denominada “reverse bias”. En ocasiones al seleccionar varias aristas para establecer un mismo bias, en algunas aristas se presenta de manera invertida a la deseada, seleccionado estas aristas y aplicando “reverse bias” se soluciona este problema.

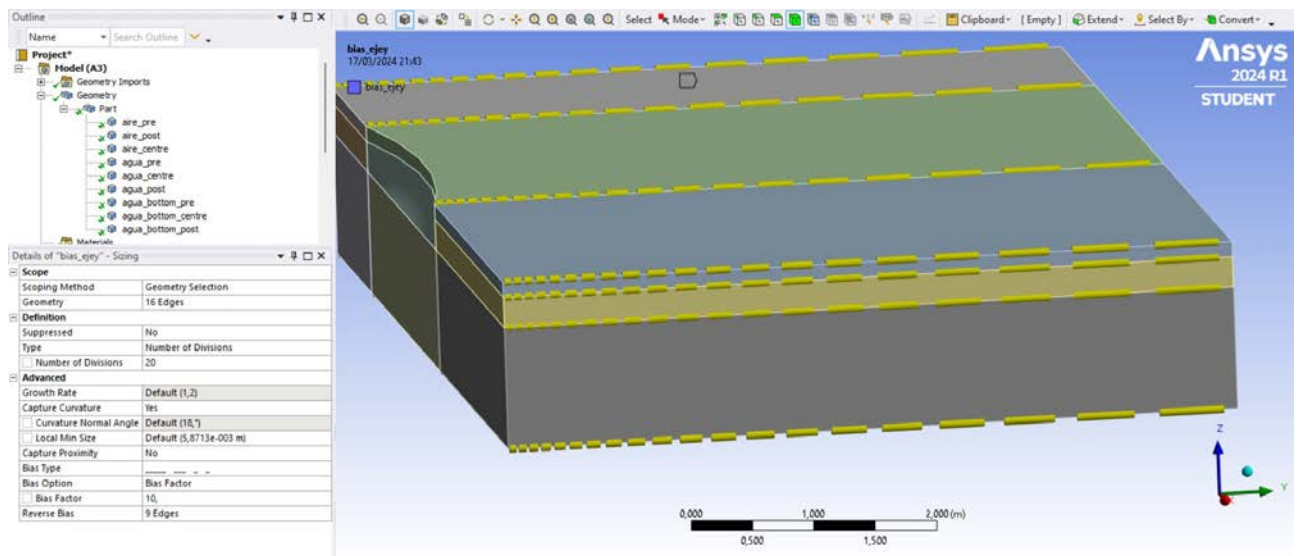


Figura 3-22 Bias establecido en el eje Y

La siguiente condición que se establece es otro bias creciente en el eje z, mostrado en la Figura 3-23, en las aristas verticales del francobordo y la zona del dominio donde el fluido es aire, con una longitud de 0,078 metros, por encima de la superficie libre. Nos interesa tener un mayor refinamiento en las zonas próximas a la superficie libre, dado que es donde se va a generar el oleaje, y las turbulencias e interacciones entre los dos fluidos, el agua y el aire. Estas aristas las se han dividido en 5 partes, con un factor de bias 10.

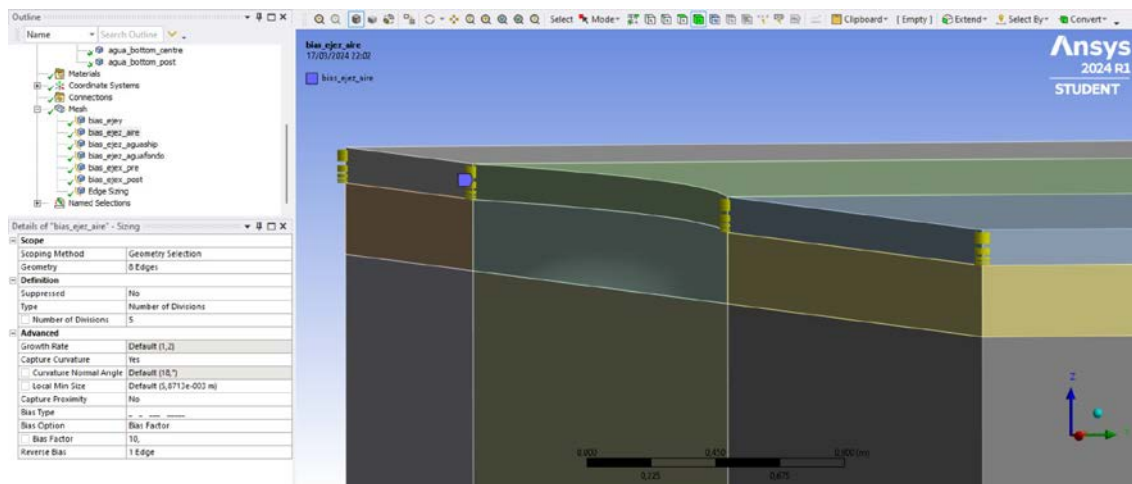


Figura 3-23 Bias en el eje z sobre la superficie libre

A continuación, se establece otro bias, esta vez decreciente en el eje z, en la zona alrededor de la obra viva del casco (Figura 3-24). Este bias refina el tamaño de la malla cerca de la superficie libre. No obstante, el tamaño de la celda es bastante refinado en toda esta zona, dado que incluye toda la zona donde el casco está en contacto con el agua, y se necesita buen refinado para evitar pérdida de datos relevantes. Para estas aristas, paralelas todas al eje z y entre sí, se han dividido en 20 partes y se ha aplicado un factor bias 10. La longitud de estas aristas es igual al calado del casco, es decir, 0,156 metros.

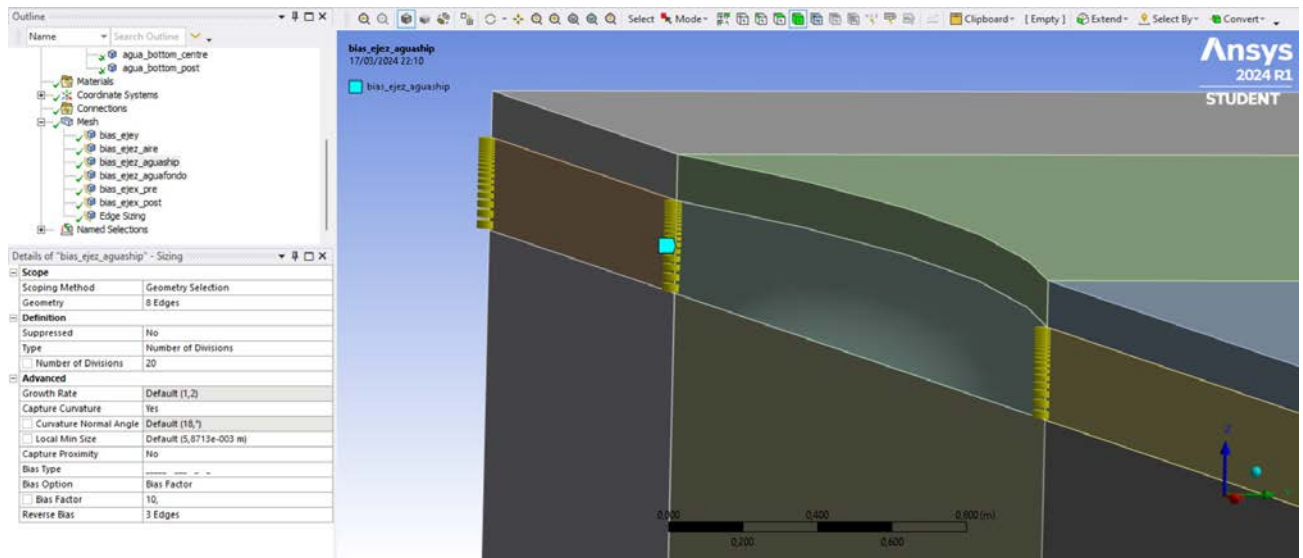


Figura 3-24 Bias establecido en el eje z alrededor de la carena del casco

El siguiente bias que se establece es en las aristas verticales bajo la quilla del casco (Figura 3-25). Este bias es decreciente también en dirección del eje z, pues nos interesa un mayor refinamiento en las zonas más próximas al fondo del casco, y se tendrá un mayor tamaño de celda en las zonas más próximas al fondo del dominio computacional, donde el flujo será más estable y apenas se obtienen datos de valor para el estudio. La longitud de estas aristas es de 0,624 metros, que equivale a la sonda bajo la quilla del casco. Estas aristas se han dividido en 10 partes con un factor bias de 10.

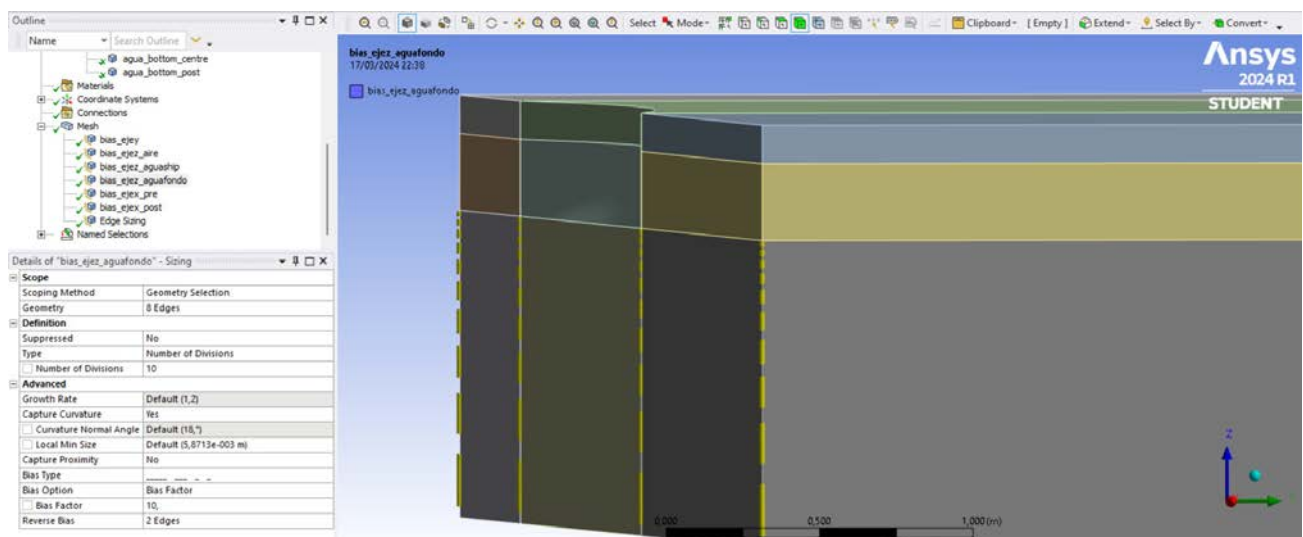


Figura 3-25 Bias en el eje z por bajo la quilla del casco

La siguiente condición impuesta sobre la malla es un bias decreciente en el eje x, como veos en la Figura 3-26, en las aristas paralelas longitudinales que vas desde el “inlet” o la entrada del flujo, hasta la proa del casco. Este bias refina la malla a medida que las celdas se acercan a la proa del casco. Esta zona nos interesa especialmente porque es donde empieza a ocurrir la generación de ola y donde suele estar el punto de transición entre el flujo laminar y turbulento. Mientras tanto, la zona más próxima a la

entrada del flujo tiene poco interés para el estudio, dado que, al no haber pasado el flujo a través del casco, no se ha generado ninguna variación. Estas aristas tienen una longitud equivalente a la mitad de la eslora del casco, en este caso, 1,25 metros. Estas aristas se han dividido en 10 partes con un factor bias de 10.

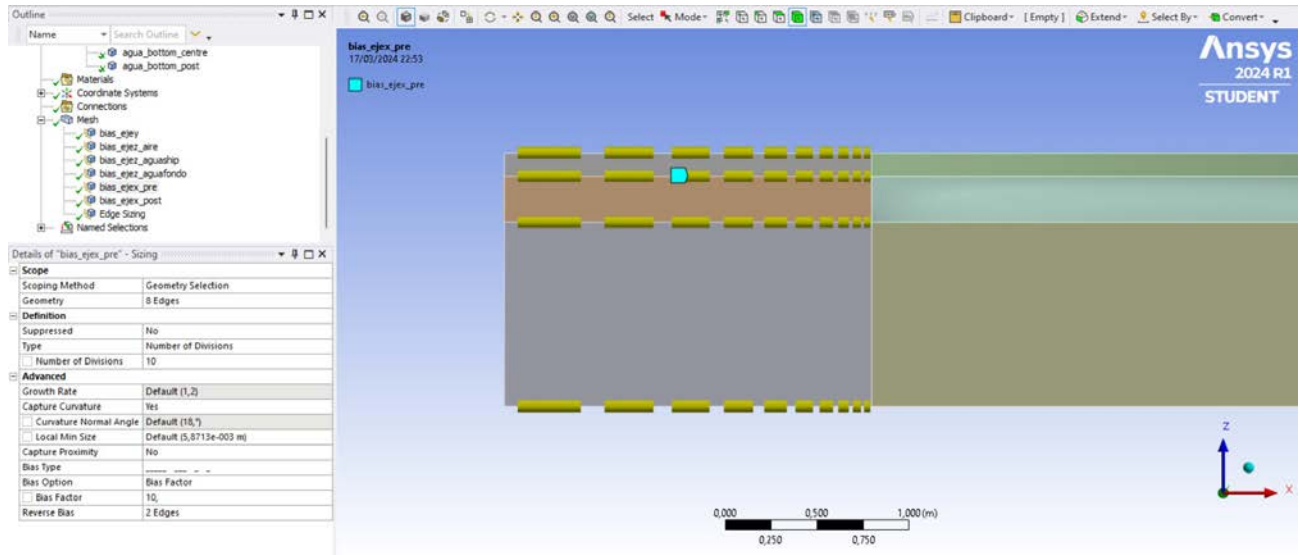


Figura 3-26 Bias decreciente en el eje x desde el inlet hasta la proa del casco

Del mismo modo que la condición anterior, se aplica un bias creciente en la dirección del eje x en las aristas longitudinales desde la popa del casco al outlet del flujo, como se puede observar en la Figura 3-27. Este bias refina la malla en las zonas más cercanas a la popa del casco, que es donde la generación de turbulencias es mayor, y va progresivamente aumentando el tamaño de las celdas a medida que se aleja en dirección del eje x. No obstante, esta zona de popa tiene mayor interés de estudio y necesita de un mayor refinamiento que la zona de proa, ya que en esta zona se va a extender la estela generada por el casco. Estas aristas tienen una longitud equivalente a una eslora, 2,5 metros en este caso. Se han dividido las aristas en 15 partes y se aplica un factor bias de 10.

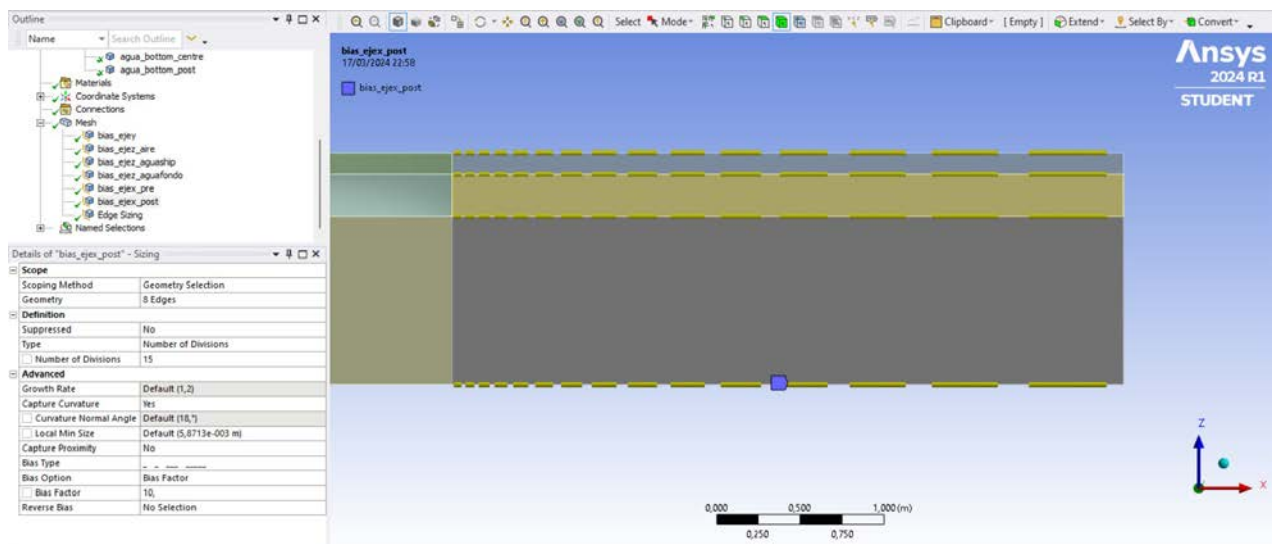


Figura 3-27 Bias creciente en el eje x desde la popa hacia el outlet

Por último, se establece una condición de tamaño de celda para las aristas longitudinales del casco y las paralelas (Figura 3-28). Esta condición consta de un bias que refina el tamaño de la malla en los extremos de la arista y aumenta el gramaje de esta hacia el centro de las aristas. Este bias nos interesa debido a que la mayor cantidad de datos de interés los se obtienen en la proa y en la popa del casco, por

lo que se necesitará un mayor refinamiento en estas áreas, mientras que, en el centro del casco, el área cercana a la cuaderna maestra, no suceden tantos fenómenos y el flujo es algo más uniforme. No obstante, esta zona es la de mayor interés de todo el dominio, por lo que el tamaño de los elementos debe ser pequeño. La longitud de estas aristas es la eslora del casco, es decir, 2,5 metros. Se han dividido estas aristas en 50 zonas y aplicando un factor de bias 10.

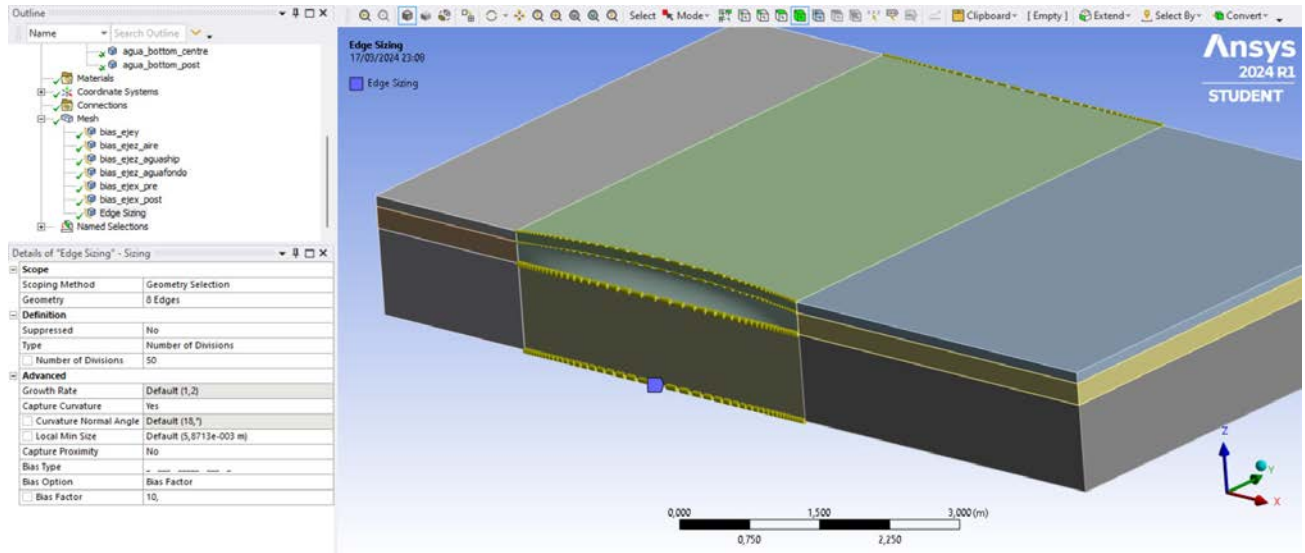


Figura 3-28 Bias longitudinal sobre el casco y las aristas paralelas

Una vez establecidas todas estas condiciones, se procede a generar la malla. La malla resultante, mostrada en la Figura 3-29, es una malla mapeada, de elementos hexaédricos, refinada en la superficie libre verticalmente, y en la proa y la popa del casco longitudinalmente. El número de elementos de la malla es de 52.500 con 57.456 nodos. Todavía se tendría un amplio margen en cuanto a número de elementos en caso de necesitar una malla más refinada, ya que la versión de estudiante de *Ansys Fluent* permite generar mallas de hasta 500.000 elementos.

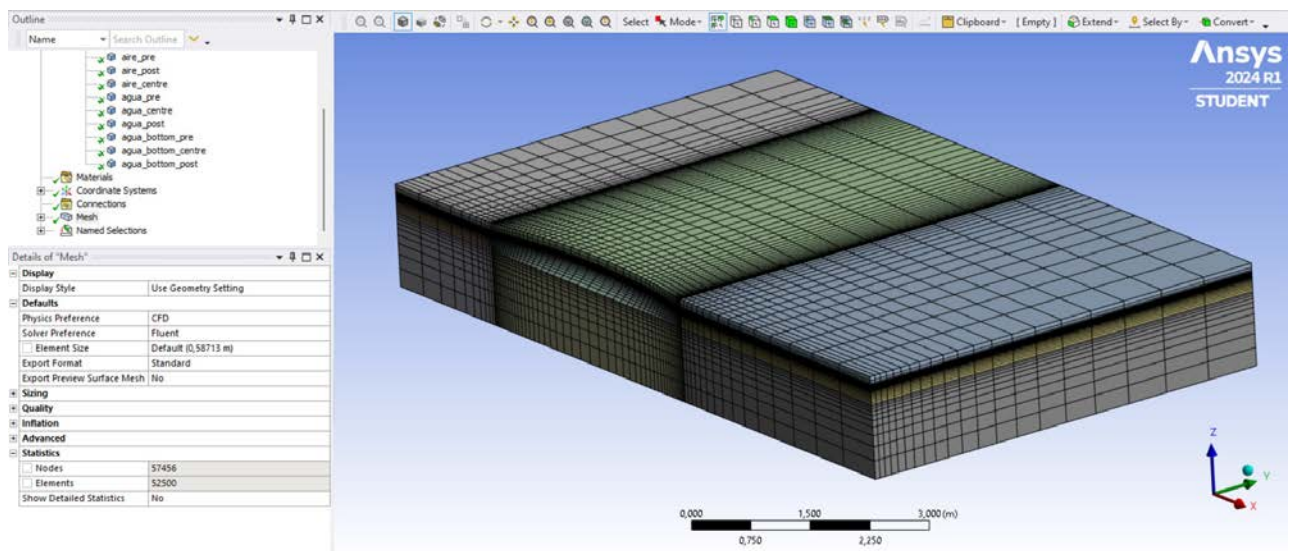


Figura 3-29 Malla resultante

3.3 Setup

Con la malla ya obtenida e introducida en nuestro flujo de trabajo, el siguiente paso del workbench es el “Setup” (Figura 3-30). En este apartado se editan ya directamente desde el software Ansys Fluent las condiciones que se desean establecer en el dominio. Esta etapa corresponde a la última de pre-procesado antes de la simulación.

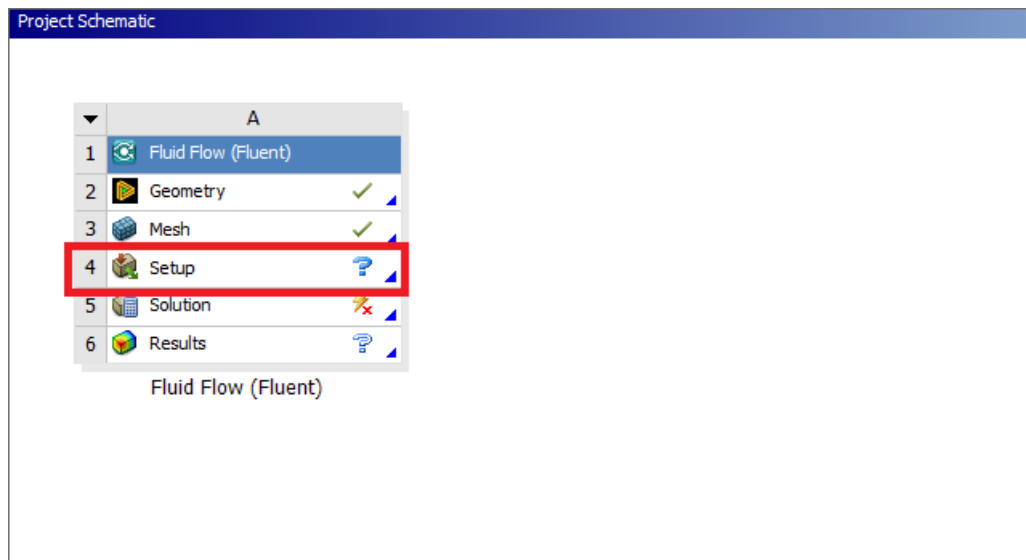


Figura 3-30 Setup en el Workbench

Una vez se hayan terminado de cargar la geometría y la malla correctamente dentro de Ansys Fluent, el primer paso que se va a hacer es configurar la cara “midplane” como plano de simetría, tal y como muestra la Figura 3-31. De este modo el simulador nos mostrará la otra mitad del dominio computacional, sin coste computacional adicional, ya que hará los cálculos pertinentes sobre una mitad y simplemente los representará igual en la otra cara.

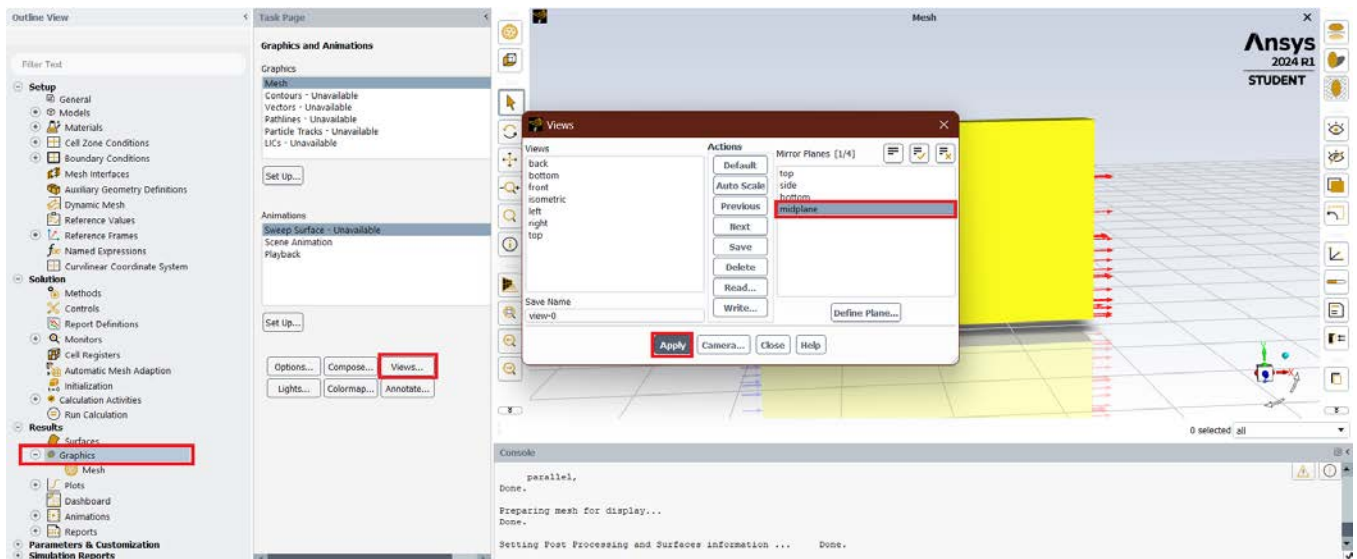


Figura 3-31 Midplane como plano de simetría

Tras esto, en la configuración general, se añade también el efecto de la aceleración de la gravedad sobre el eje z, en dirección negativa (Figura 3-32).

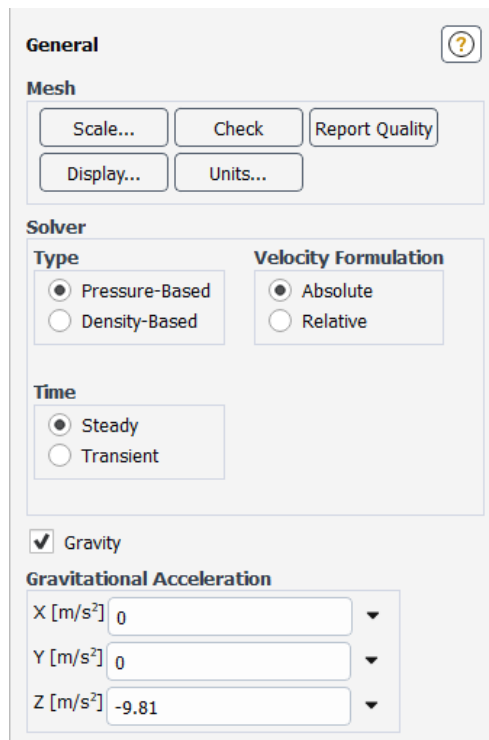


Figura 3-32 Configuración de la gravedad

El siguiente paso es configurar nuestro entorno como un entorno multifásico, ya que existe la presencia de aire y de agua, y para ello se utiliza el modelo VOF (Volume of Fluid), tal y como se muestra en la Figura 3-33.

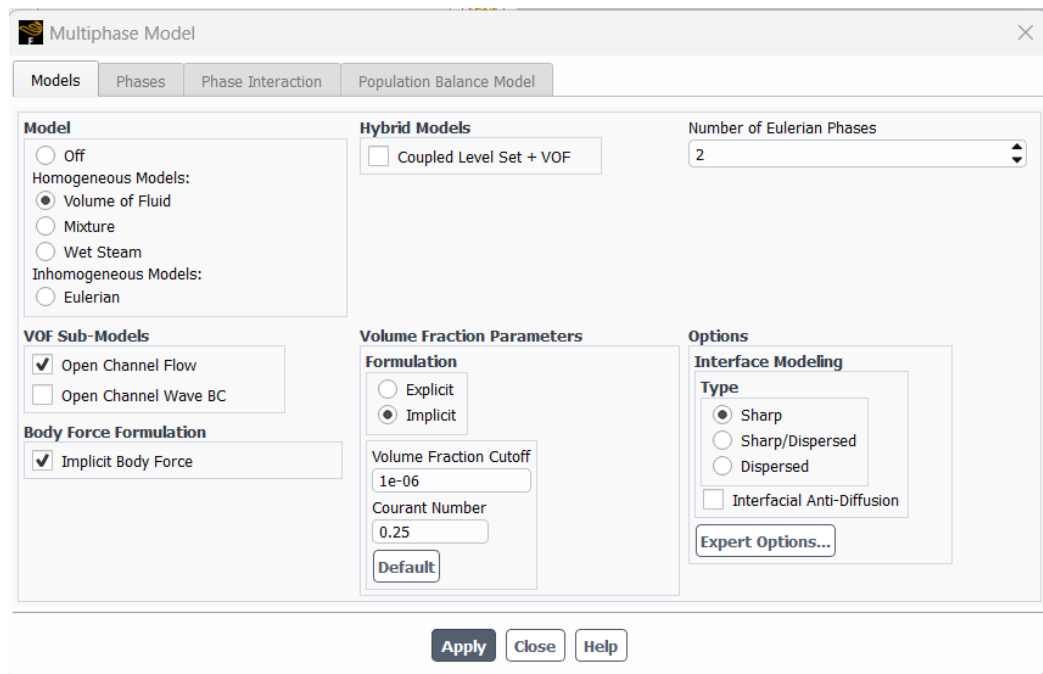


Figura 3-33 Configuración multifase

En el apartado de “Models” también se configura el modelo de viscosidad seleccionando el modelo de turbulencia *SST $k-\omega$* (Shear Stress Transport), como aparece en la Figura 3-34.

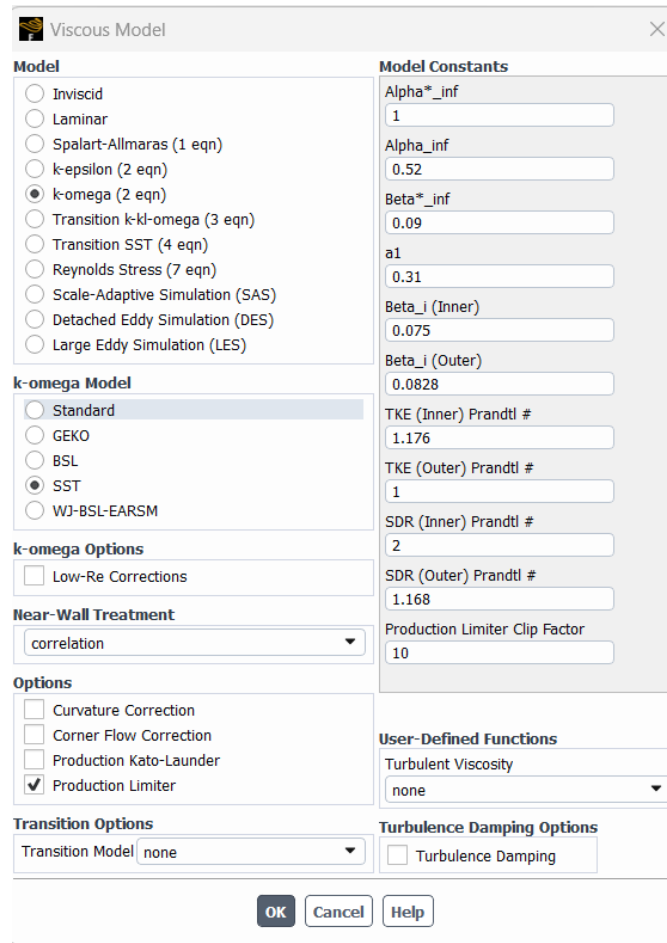


Figura 3-34 Configuración del modelo de viscosidad

Una vez hecho esto, se configuran los distintos materiales del dominio multifásico, el aire y el agua. Las características del agua las se obtienen de la base de datos de materiales que nos proporciona Ansys Fluent (Figura 3-35, Figura 3-36).

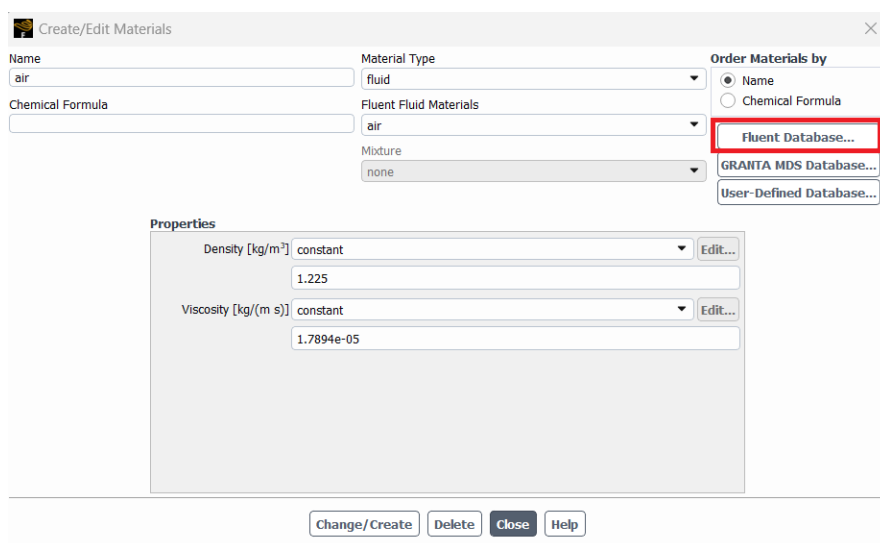


Figura 3-35 Se definen las propiedades del material

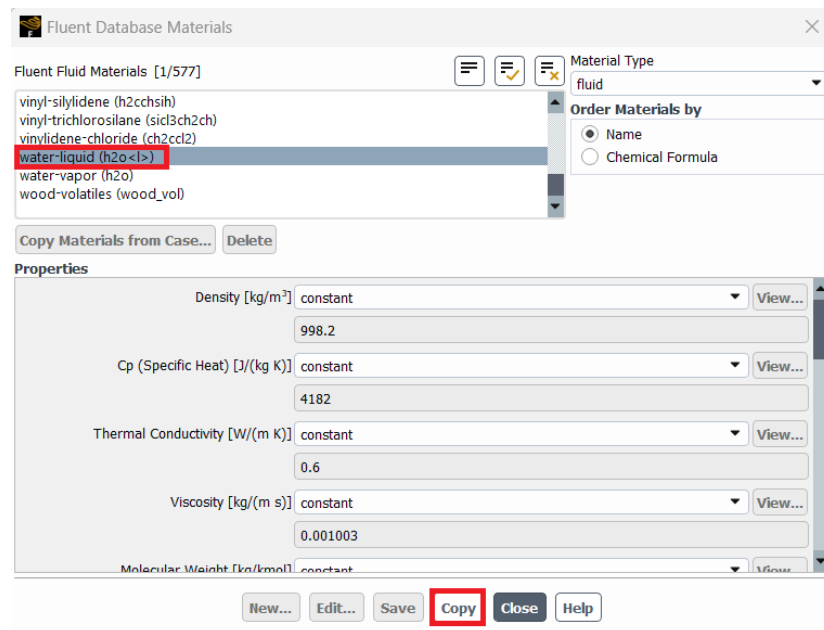


Figura 3-36 Agua líquida en la base de datos de Ansys Fluent

Una vez se tienen definidos los materiales del dominio, el siguiente paso es definir las fases, es decir, en qué zonas del dominio hay aire y en cuales agua. A la fase 1 se llamará “air”, y a la fase 2 “water” (Figura 3-37).

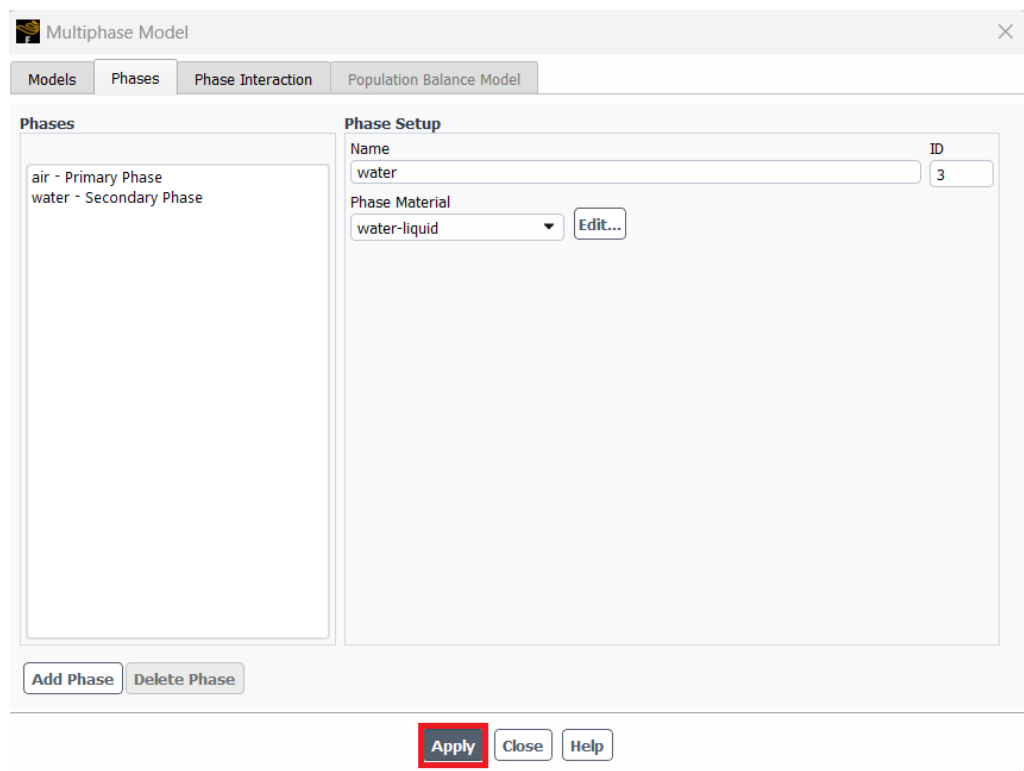


Figura 3-37 Se definen las fases del dominio

Dentro de las “Cell Zone Conditions”, en “Operating Conditions” se establece el punto de referencia de la presión como un punto dentro del dominio en la zona de aire, tal y como se muestra en la Figura 3-38.

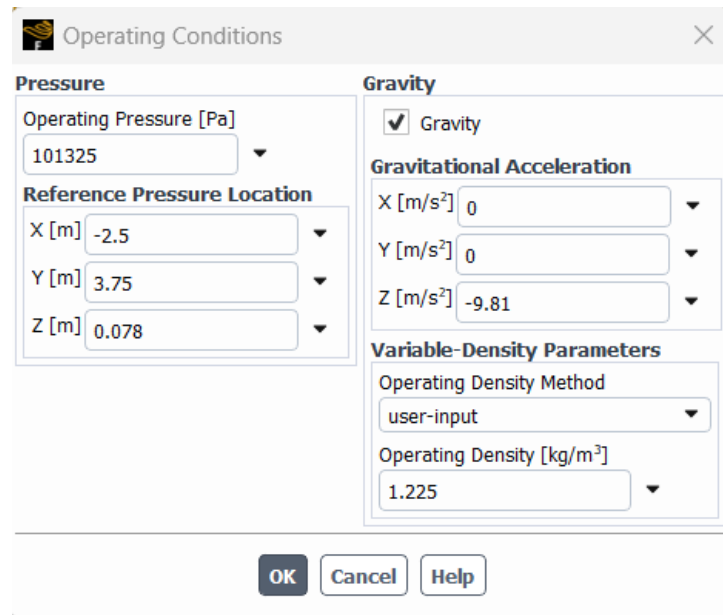


Figura 3-38 Configuración del punto de referencia de la presión

El siguiente paso del setup es configurar las condiciones de contorno. En primer lugar, se configura la entrada del fluido o “inflow/inlet”. Su configuración de fase debe ser “mixture” y el tipo debe ser de entrada de presión o “pressure-inlet”, como se muestra en la Figura 3-39.

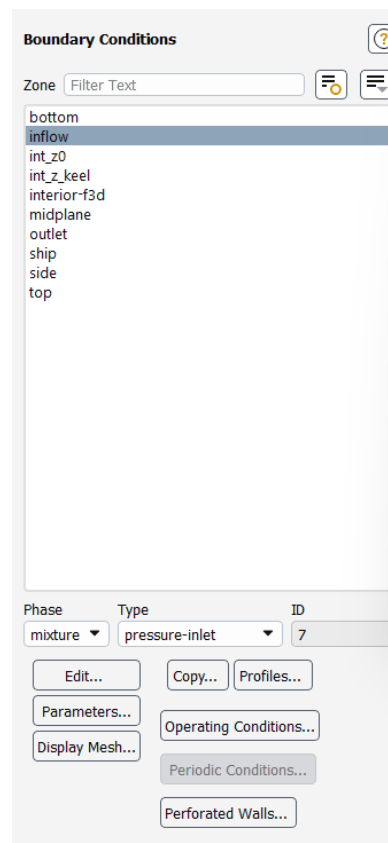
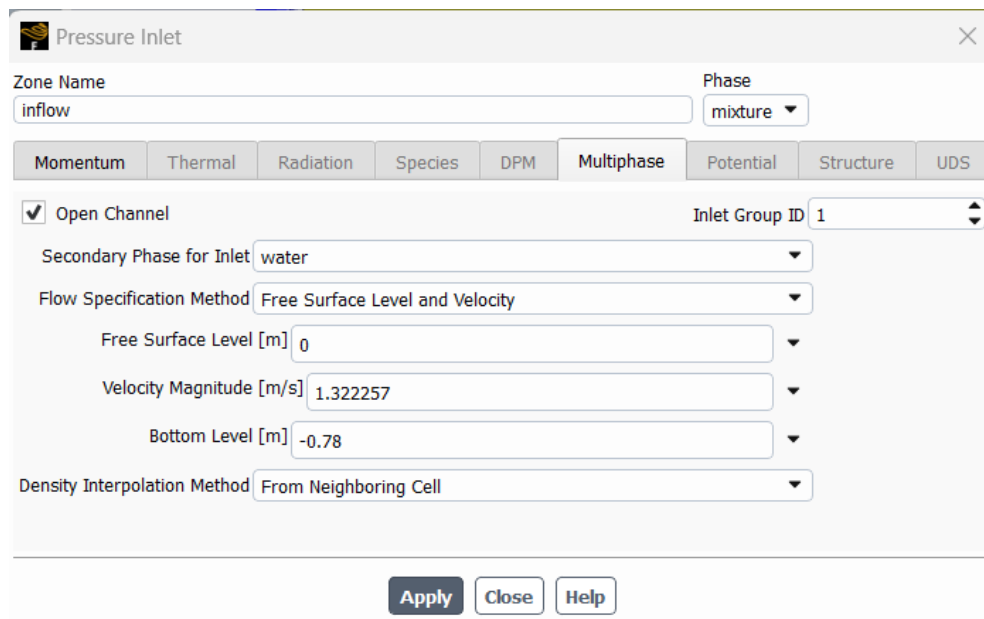


Figura 3-39 Configuración de fase y tipo de las caras

En el apartado multifase del inflow se deben configurar la velocidad de entrada, el nivel de la superficie libre, y el nivel del fondo. Como la primera simulación la se hará para un $F_n = 0,267$, según la fórmula (5), se necesita una velocidad de entrada de 1,322257 m/s. El fondo se encuentra a un nivel

de $z = -0,78$ (m) y la superficie libre en $z = 0$ (m) (Figura 3-40). Y para el apartado de “Momentum”, se selecciona un método de especificación de “Intensity and Length Scale” y introducimos una intensidad de turbulencia del 4% y una “Turbulent Length Scale” equivalente al 3% de la eslora del casco, en nuestro caso, un 3% de 2,5 metros es 0,075 metros (Figura 3-41).



Pressure Inlet

Zone Name: inflow Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM **Multiphase** Potential Structure UDS

☒ Open Channel Inlet Group ID: 1

Secondary Phase for Inlet: water

Flow Specification Method: Free Surface Level and Velocity

Free Surface Level [m]: 0

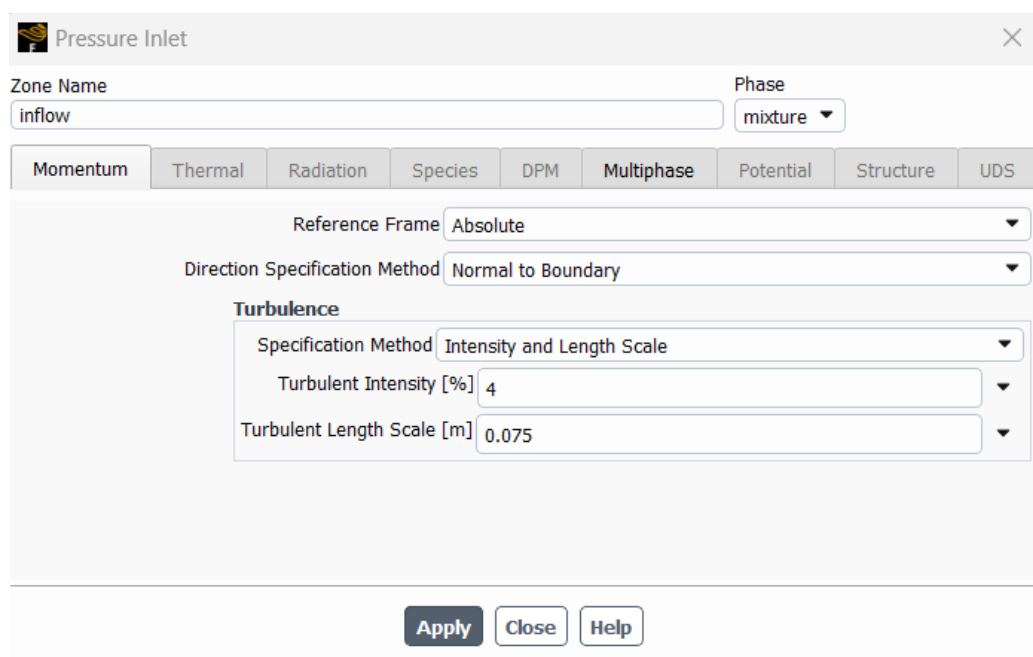
Velocity Magnitude [m/s]: 1.322257

Bottom Level [m]: -0.78

Density Interpolation Method: From Neighboring Cell

Apply Close Help

Figura 3-40 Configuración de la multifase del inflow



Pressure Inlet

Zone Name: inflow Phase: mixture

Momentum **Thermal** Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Reference Frame: Absolute

Direction Specification Method: Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method: Intensity and Length Scale

Turbulent Intensity [%]: 4

Turbulent Length Scale [m]: 0.075

Apply Close Help

Figura 3-41 Configuración de la turbulencia del inflow

Configuramos el outlet del mismo modo, seleccionando “Normal to Boundary” en el apartado de “Momentum”. En el menú mostrado en la Figura 3-39, configuramos el resto de caras como “symmetry” y la cara del casco o “ship” la configuramos como “wall”.

Una vez hecho esto, configuramos los valores de referencia o “reference values”. En “Compute from” seleccionamos el inflow, y se establece el valor de la longitud, “Length”, como el valor de la eslora, es decir, 2,5 metros, tal y como se muestra en la Figura 3-42.

Reference Values

Compute from
inflow

Reference Values

Area [m²] 1

Density [kg/m³] 998.2

Enthalpy [J/kg] 0

Length [m] 2.5

Pressure [Pa] 0

Temperature [K] 288.16

Velocity [m/s] 1.322257

Viscosity [kg/(m s)] 0.0009134445

Ratio of Specific Heats 1.4

Yplus for Heat Tran. Coef. 300

Reference Zone
f3d

Figura 3-42 Configuración de los valores de referencia

Configuramos también los métodos y controles de resolución tal y como se muestran en la Figura 3-43 y la Figura 3-44 respectivamente.

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
PRESTO!

Momentum
Second Order Upwind

Volume Fraction
Compressive

Turbulent Kinetic Energy
Second Order Upwind

Specific Dissipation Rate
Second Order Upwind

Pseudo Time Method
Off

Transient Formulation

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation

Default

Figura 3-43 Configuración de Solution Methods

Solution Controls

Under-Relaxation Factors

Pressure
0.5

Density
1

Body Forces
1

Momentum
0.5

Volume Fraction
0.5

Turbulent Kinetic Energy
0.8

Specific Dissipation Rate
0.8

Turbulent Viscosity
1

Default

Equations... Limits... Advanced...

Figura 3-44 Configuración de Solution Controls

Para la configuración de “Residual Monitors”, seleccionamos las opciones de “Plot” y “Print to Console”. No se establece ningún criterio de convergencia, ya que no es necesario en nuestro caso. Para

las iteraciones para guardar serán 100.000, y se selecciona la opción computar a escala local o “Compute Local Scale”, y en el apartado de “Reporting Option” se selecciona “local scaling” (Figura 3-45). Eara esta opción, cada celda es rescalada por el coeficiente diagonal y todas las celdas tendrán una contribución escalada similar a los residuos totales. El “local scaling” muestra una reducción substancial en los residuos y una menor dependencia en el tamaño de la malla.

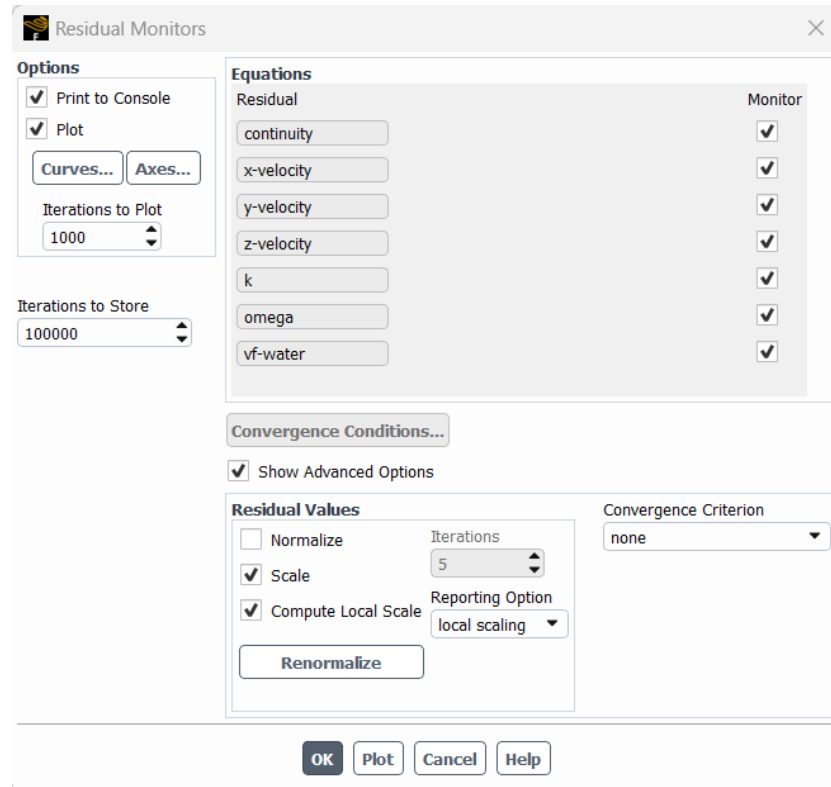


Figura 3-45 Configuración de Residual Monitors

El siguiente paso es configurar un informe del coeficiente de la fuerza de arrastre para que el simulador lo calcule y nos lo muestre en una gráfica. Esta fuerza de arrastre la calcula sobre la superficie del casco. La configuración elegida es la que se muestra en la Figura 3-46. También configuramos un informe de la velocidad del fluido sobre un punto de referencia. Este punto de referencia se coloca en la popa del casco, a la altura de la quilla aproximadamente, por la aleta de estribor. La configuración del punto de referencia se puede ver en la Figura 3-47, y la configuración del informe de velocidad en la Figura 3-48.

Drag Report Definition

Name: drag_coef

Options

☐ Per Zone

Average Over (Iterations): 1

Force Vector

X: 1 Y: 0 Z: 0

Report Files [0/0]

Report Plots [0/0]

Create

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency: 1

☐ Print to Console

☐ Create Output Parameter

Report Output Type

☒ Drag Coefficient

☐ Drag Force

Zones: Filter Text

ship

OK Compute Cancel Help

Figura 3-46 Configuración del informe del coeficiente de la fuerza de arrastre

Point Surface

Name: monitor-point

Reference Frame: global

Coordinates

x [m]: 1.25

y [m]: 0.3

z [m]: -0.14

Snap on Probe Click

☒ Node

☐ Cell Center

☐ Off

Create Close Help

Figura 3-47 Configuración punto de referencia

Surface Report Definition

Name: velocity-monitor

Report Type: Vertex Average

Options

☐ Per Surface

Average Over: 1

Report Files [0/1]: drag_coef-rfile

Report Plots [0/0]

Create

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency: 1

☐ Print to Console

☐ Create Output Parameter

Custom Vectors

Vectors of: Custom Vectors...

Field Variable: Velocity...

Velocity Magnitude

Phase: mixture

Surfaces: Filter Text

bottom

inflow

int_z0

int_z_keel

midplane

monitor-point

outlet

ship

side

top

New Surface

OK Compute Cancel Help

Figura 3-48 Configuración informe de velocidad

Antes de iniciar la simulación, se debe configurar la inicialización, las actividades de cálculo, y el número de iteraciones que se quieren calcular. Para la inicialización, seleccionamos el inflow como la zona donde se empieza a calcular, en el apartado “Compute from”, y como método de inicialización seleccionamos “Flat”, tal y como se muestra en la Figura 3-49. En las actividades de cálculo, en el apartado de autoguardado se ha seleccionado la configuración mostrada en la Figura 3-50. Y finalmente, calculamos 5000 iteraciones, como se muestra en la Figura 3-51.

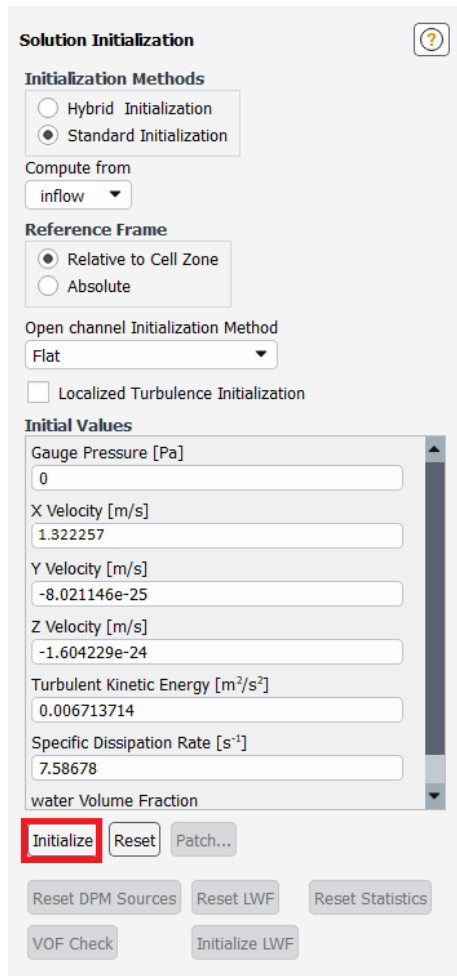


Figura 3-49 Configuración de inicialización

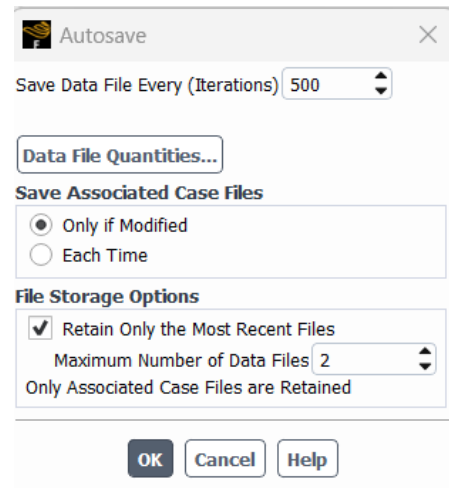


Figura 3-50 Configuración de autoguardado

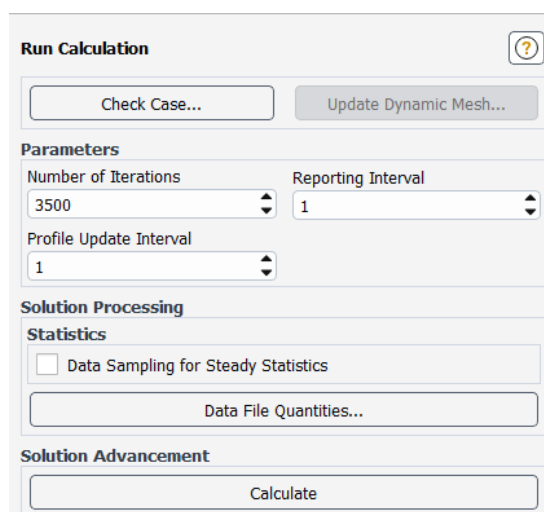


Figura 3-51 Cálculo de 5000 iteraciones

4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

4.1 Resultados

Se ha enfocado estas simulaciones en la medición de 2 parámetros fundamentales: El coeficiente de fuerza de arrastre y el patrón de ola generado.

4.1.1 Coeficiente de fuerza de arrastre (C_T)

La obtención de este coeficiente se ha preconfigurado de acuerdo a la Figura 3-46. Se ha tomado datos para diferentes valores F_n . El valor mostrado es aquel correspondiente a la iteración número 5000 de cada simulación. La R_T calculada según la fórmula (5), es con una densidad del agua de 998,2 (kg/m^3), tal y como se indica en la Figura 3-36, una superficie de carena de 0,930 m^2 , tal y como se indica en la Tabla 3-1, y la velocidad del fluido calculada con el Número de Froude según la fórmula (5).

Número de Froude	C_T	R_T (N)
0,250	0,00480	3,41
0,267	0,00486	3,94
0,289	0,00522	4,96
0,316	0,00535	6,08
0,354	0,00520	7,41
0,405	0,00649	12,11

Tabla 4-1 Coeficientes de arrastre simulados

4.1.2 Patrón de ola generado

Para estudiar este patrón de ola generado, se ha creado dos “Iso-Surfaces” en el post-procesado. La primera que se genera será relativa a la superficie libre. La configuración es la mostrada en la Figura 4-1. El “Iso-Value” configurado es 0.5 ya que, si 1 es para las celdas llenas de aire, y 0 para las celdas llenas de agua, esto quiere decir que se selecciona la superficie cuyas celdas estén llenas al 50% de cada elemento.

La segunda que se genera será para hallar el perfil de la ola sobre el casco, para ello, la configuración será la misma que para la superficie libre, con la única diferencia de que, en el apartado de las superficies, se selecciona “ship”. En la superficie libre no se selecciona nada ya que es relativa a todo el dominio, mientras que el perfil de la ola sólo se ve en el casco.

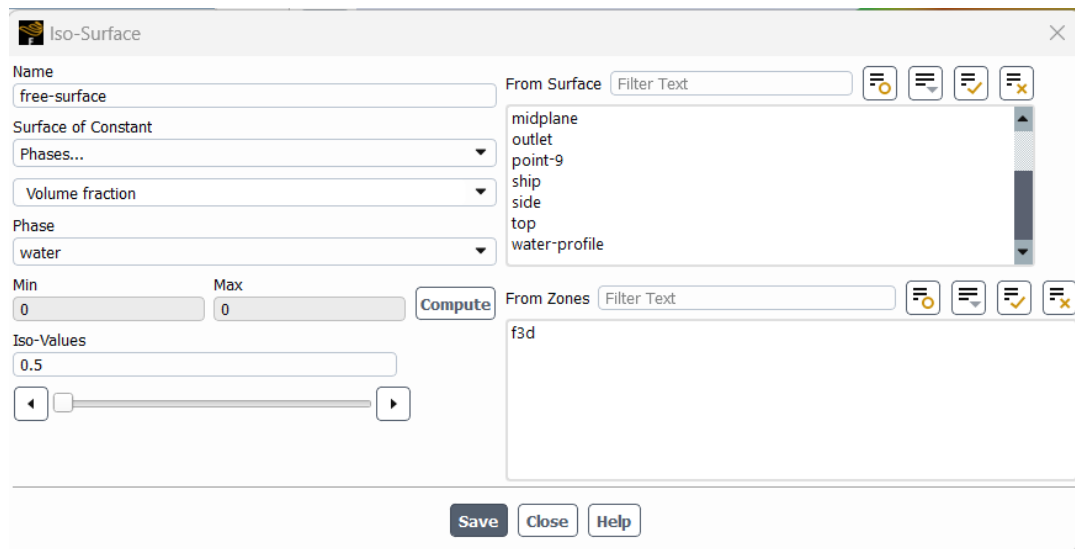


Figura 4-1 Configuración de la superficie libre

Se han realizado los cálculos para diferentes Números de Froude. En la Figura 4-2 se puede ver la comparativa de los diferentes perfiles de ola sobre el casco para los distintos números de Froude estudiados. Estos datos están presentados con una adimensionalización de z/L en el eje y. En el eje x se presentan los valores de la eslora en metros, correspondiendo el valor más bajo a la proa, y el más alto a la popa.

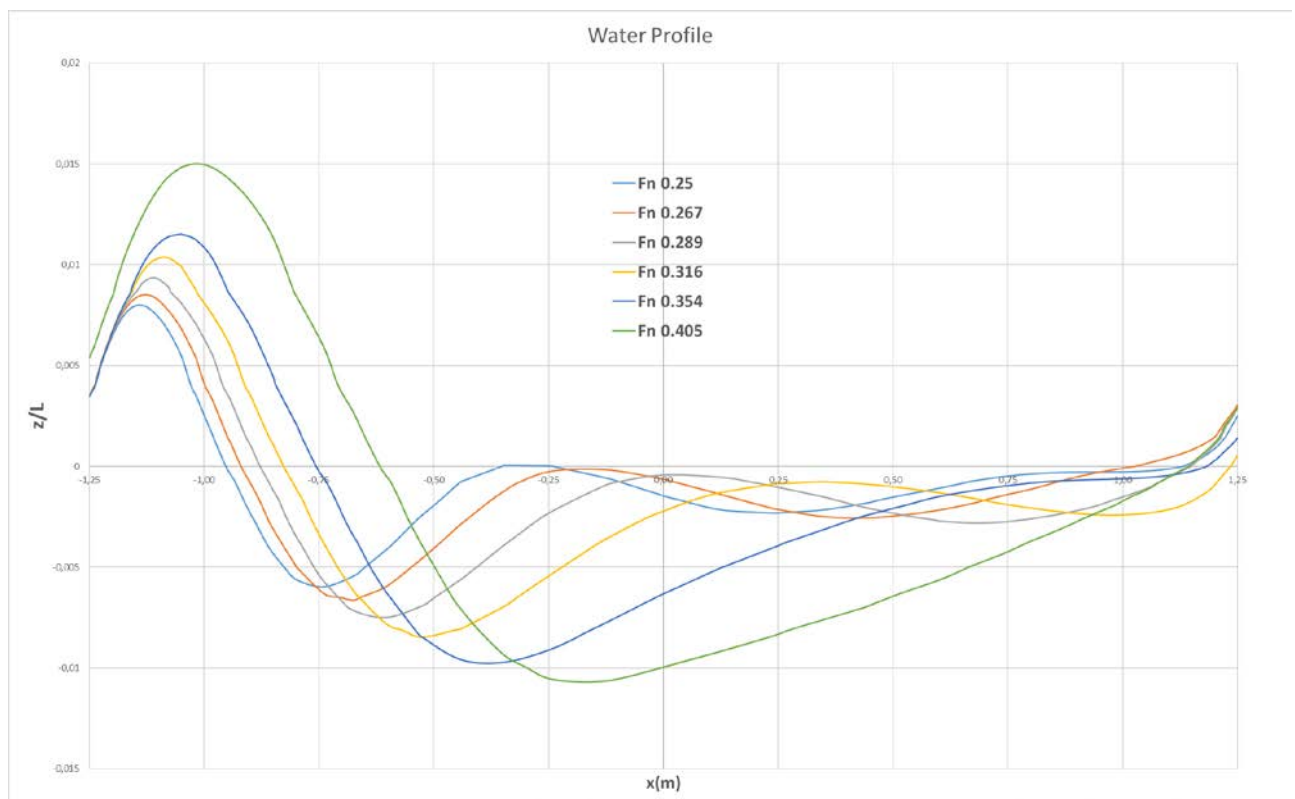


Figura 4-2 Comparativa de perfiles de ola en función de su Fn

Como se puede observar en la Figura 4-2, a mayor número de Froude, es decir, a mayor velocidad, mayor es la altura de la ola generada, y, por tanto, como se ha visto también en la Tabla 4-1, mayor es la resistencia total del casco, en gran medida aportada por la resistencia total de generación de olas (R_W).

En las siguientes capturas (Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8), relativas al patrón de ola generado en la superficie libre, se puede observar como el patrón se mantiene bastante uniforme con el cambio de velocidad, únicamente variando la agresividad del patrón, o, dicho de otro modo, la diferencia de altura de las olas generadas.

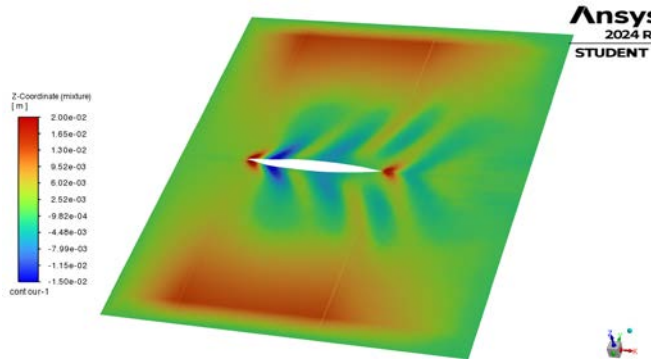


Figura 4-3 Patrón de ola para F_n 0.25

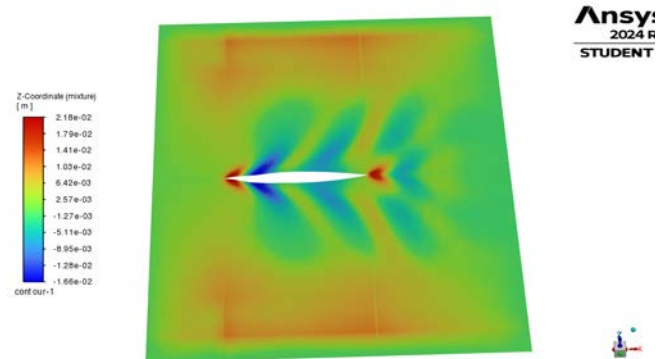


Figura 4-4 Patrón de ola para F_n 0.267

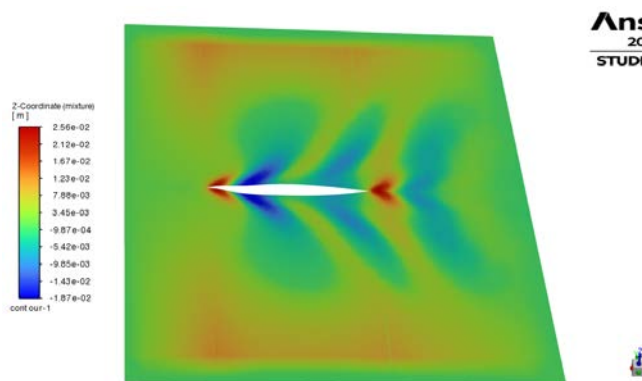


Figura 4-5 Patrón de ola para F_n 0.289

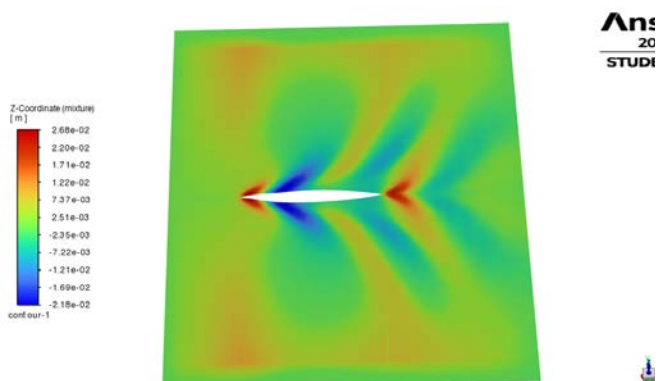


Figura 4-6 Patrón de ola para F_n 0.316

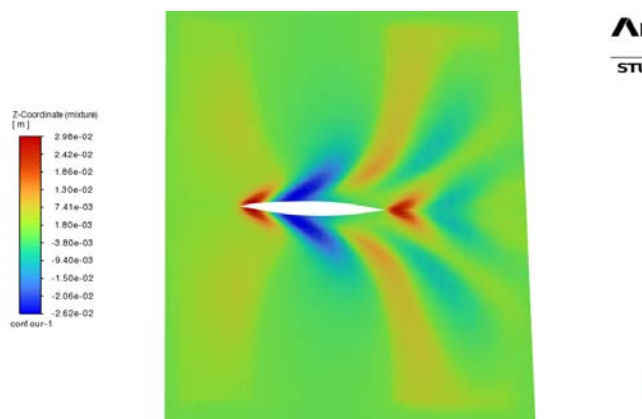


Figura 4-7 Patrón de ola para F_n 0.354

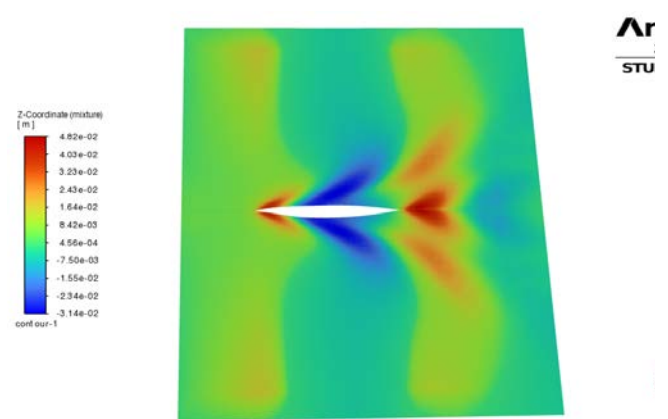


Figura 4-8 Patrón de ola para F_n 0.405

4.2 Validación

Para la validación de los resultados obtenidos se usan de referencia los datos experimentales obtenidos en el Experimento cooperativo sobre el casco parabólico Wigley, cuyos datos se nos proporcionan en la publicación [3]. Se comparan los datos simulados con los datos experimentales obtenidos por cada organización en cada uno de los parámetros estudiados. Se han exportado los datos proporcionados por esta publicación a una hoja de Microsoft Excel para su estudio. Además, se ha evaluado y discutido los métodos de adimensionalización usados en esta publicación. Tuvimos en cuenta también, que, para nuestro caso, únicamente nos sirven los datos de aquellos ensayos categorizados en la publicación como “FX” o “Fixed”, ya que para estos ensayos el modelo del casco se encontraba en una posición fija y no experimentó durante el ensayo ningún tipo de balance o cabezada, al igual que para la simulación.

4.2.1 Validación del C_T obtenido

En este apartado se comparan los resultados obtenidos de coeficiente de resistencia total del casco con aquellos obtenidos de forma experimental por la UT (Universidad de Tokio), y el SRI (Ship Research Institute). Los datos obtenidos por el IHI no nos sirven dado que el anclaje usado para su ensayo hidrodinámico era de libre movimiento, con balance y cabezada, como se muestra en la Figura 4-9. FR significa “Free”, es decir, libre movimiento, FX significa “Fixed”, es decir fijo, y S y T significan “Sink” y “Trim” respectivamente, “sink” refiriéndose a la capacidad de variar el calado, y trim al asiento. Los datos de la YNU (Yokohama National University) quedan también descartados ya que su modelo no mantiene las mismas proporciones que el resto de modelos.

	IHI	SRI	UT	YNU
1 Resistance test	FR	FR,FX	FR,FX, S-FR.T-FX	FR,FX

Figura 4-9 Pruebas de resistencia de las diferentes organizaciones [3]

La comparativa de datos simulados con los experimentales proporcionados se han representado en la Tabla 4-2 y en la Figura 4-10.

	UT (1)	UT (2)	SRI	FLUENT
Fn=0.25	0,0046	0,00458	0,00427	0,00478
Fn=0.267	0,00459	0,0045	0,00418	0,00486
Fn=0.289	0,00491	0,00481	0,00449	0,00522
Fn=0.316	0,00518	0,00517	0,00489	0,00535
Fn=0.354	0,005	0,0049	0,00465	0,00520
Fn=0.405	0,0057	0,00565	0,00551	0,00649

Tabla 4-2 Comparativa de coeficientes de arrastre

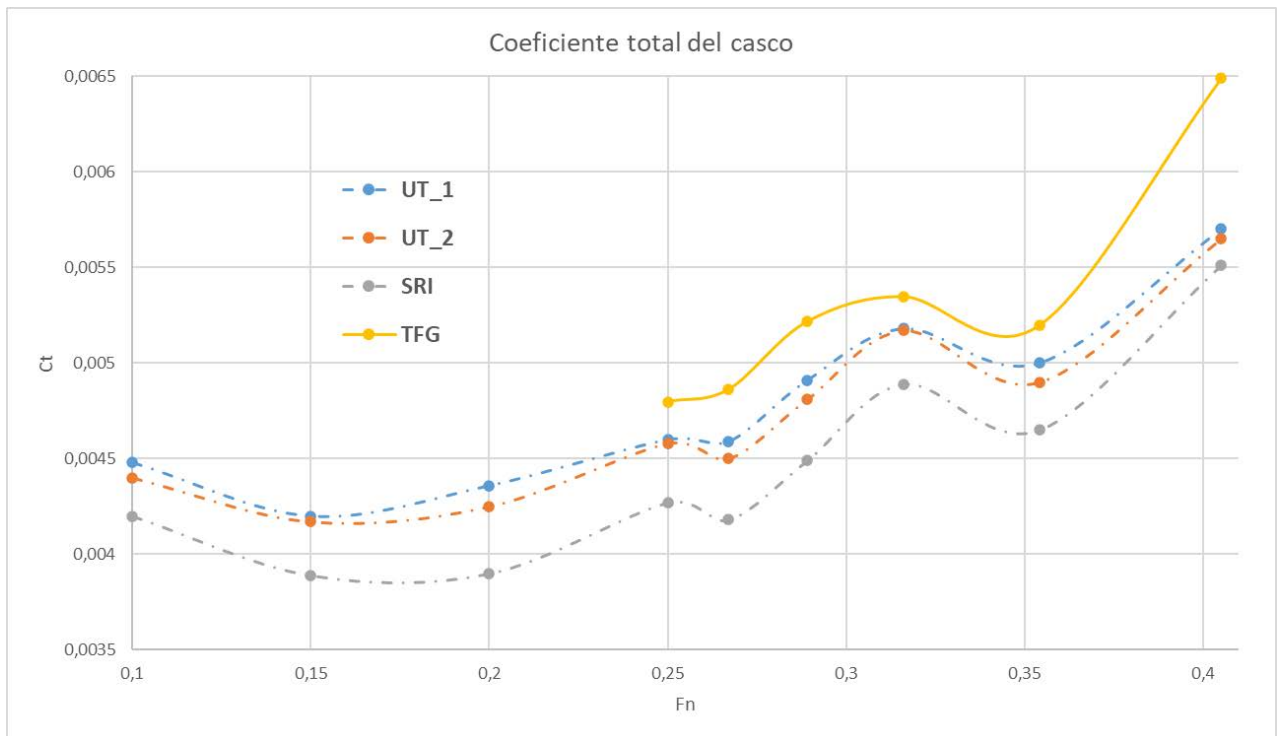


Figura 4-10 Gráfica de los coeficientes de arrastre experimentales y simulados

Como se puede apreciar en la Figura 4-10, nuestros datos obtenidos en las simulaciones se asemejan más a aquellos obtenidos experimentalmente por la UT. A medida que aumenta el F_n , nuestros datos obtenidos difieren más del resto, y esto se debe principalmente a una pérdida de datos debido al gramaje de la malla. Con un mayor refinado de la malla, probablemente nuestros datos se aproximarían más aún a los datos recabados por la UT. Cuanto mayor es el F_n , se producen más turbulencias y mayor es la pérdida de datos.

También se ha deducido, según la cantidad de datos que se proporciona en la publicación [3], que los datos tomados por la UT probablemente sean más fiables que los que nos proporciona el SRI, ya que, según se ve en este documento, la UT contaba con mejores medios que el SRI y era capaz de tomar más medidas con diferentes variables.

Los datos experimentales mostrados en la Figura 4-10 y en la Tabla 4-2, los se han extraído manualmente de la gráfica proporcionada en la página 11 de la publicación [3], mostrada en la Figura 4-11.

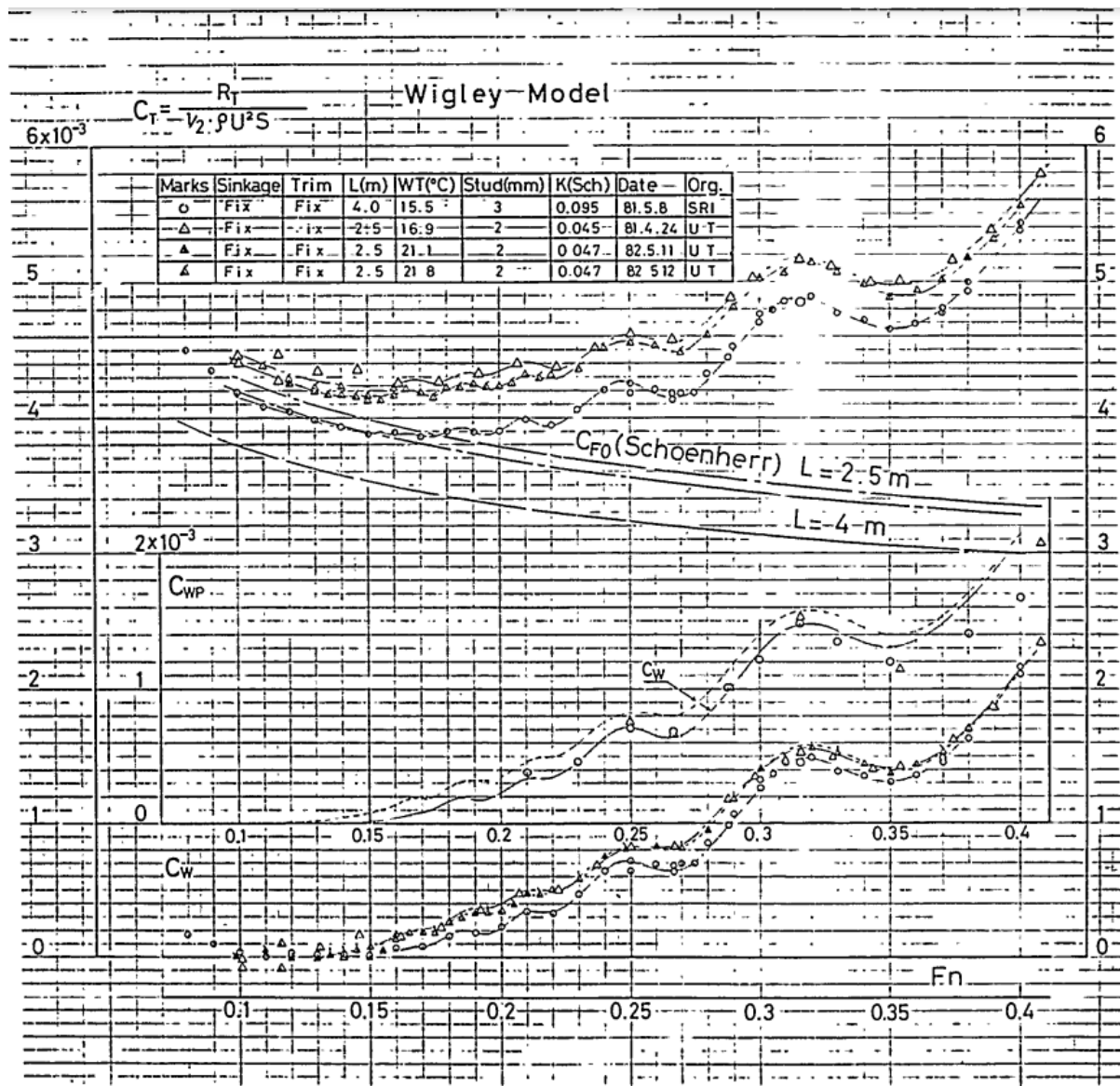


Figura 4-11 Gráfica de coeficientes de arrastre experimentales [3]

4.2.2 Validación del Perfil de ola obtenido

En este apartado se compara el perfil de ola generado sobre el casco para diferentes números de Froude con los obtenidos experimentalmente por el SRI y la UT. Como se ha mencionado anteriormente, nuestro casco simulado tiene las mismas dimensiones que el modelo generado y estudiado por la UT, no obstante, guarda las mismas proporciones que el generado por el SRI y el IHI. En el documento [3], la elevación de la ola en el eje z , está adimensionalizada mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{z}{\left(\frac{u^2}{2g}\right)} \quad (25)$$

Donde u es la **velocidad** del fluido, z la **altura de la ola** en metros, y g la **aceleración de la gravedad**.

No se ha encontrado útil este método de adimensionalización para representar los datos en una gráfica, ya que como se puede apreciar en la Figura 4-12, a mayor número de Froude, la curva es menor, cuando realmente la altura de ola generada es mayor.

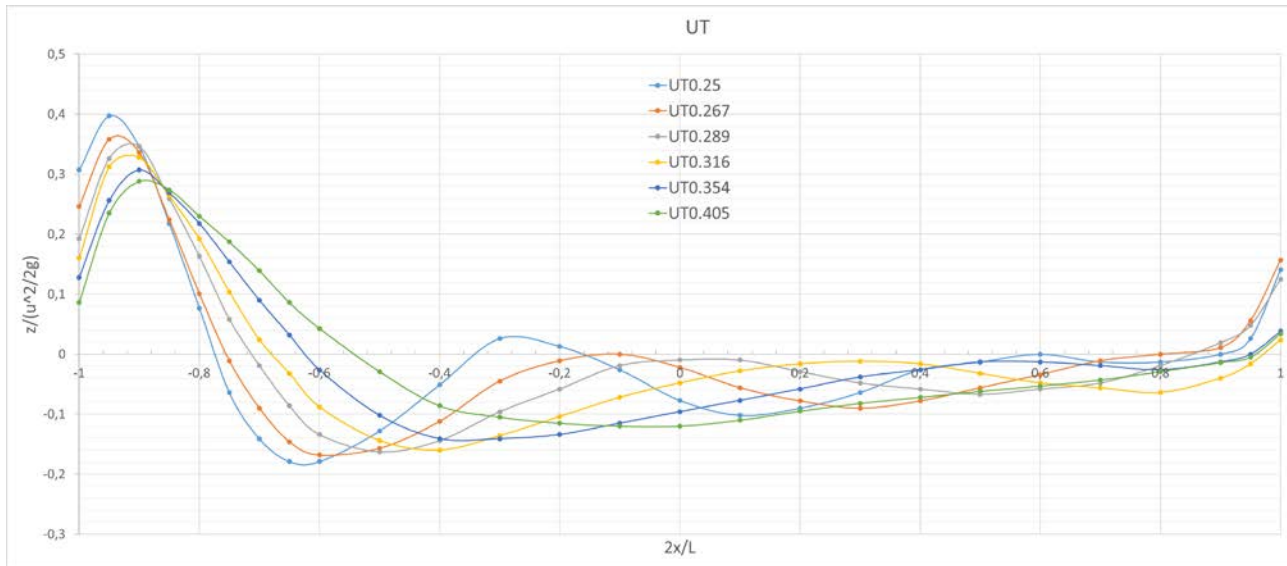


Figura 4-12 Perfiles de ola obtenidos por la UT adimensionalizado según la fórmula (25)

En la Figura 4-12 se puede ver además cómo la eslora está representada de forma adimensional según la fórmula:

$$\frac{2x}{L} \quad (26)$$

Donde x es un **punto sobre la eslora** en metros, y L la **eslora total** del casco. Esto nos sirve para poder comparar cascos con distintas esloras, como es el caso del modelo del SRI, con una eslora de 4 metros.

Se ha preferido representar de forma adimensional nuestros resultados utilizando la fórmula z/L en lugar de la fórmula (25) para el eje y . Con z/L , los resultados en la gráfica se pueden visualizar y entender de forma más sencilla.

A continuación, la comparativa de los perfiles de ola experimentales y simulados para los diferentes números de Froude calculados.

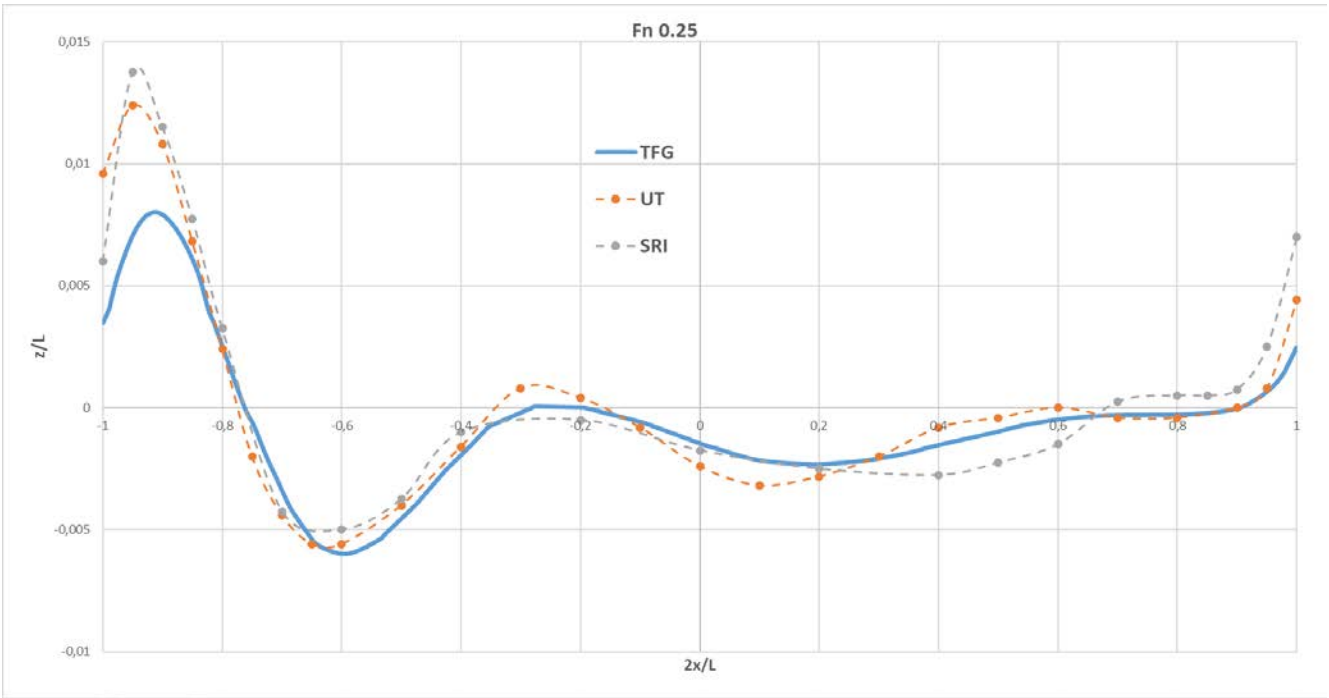


Figura 4-13 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.25$

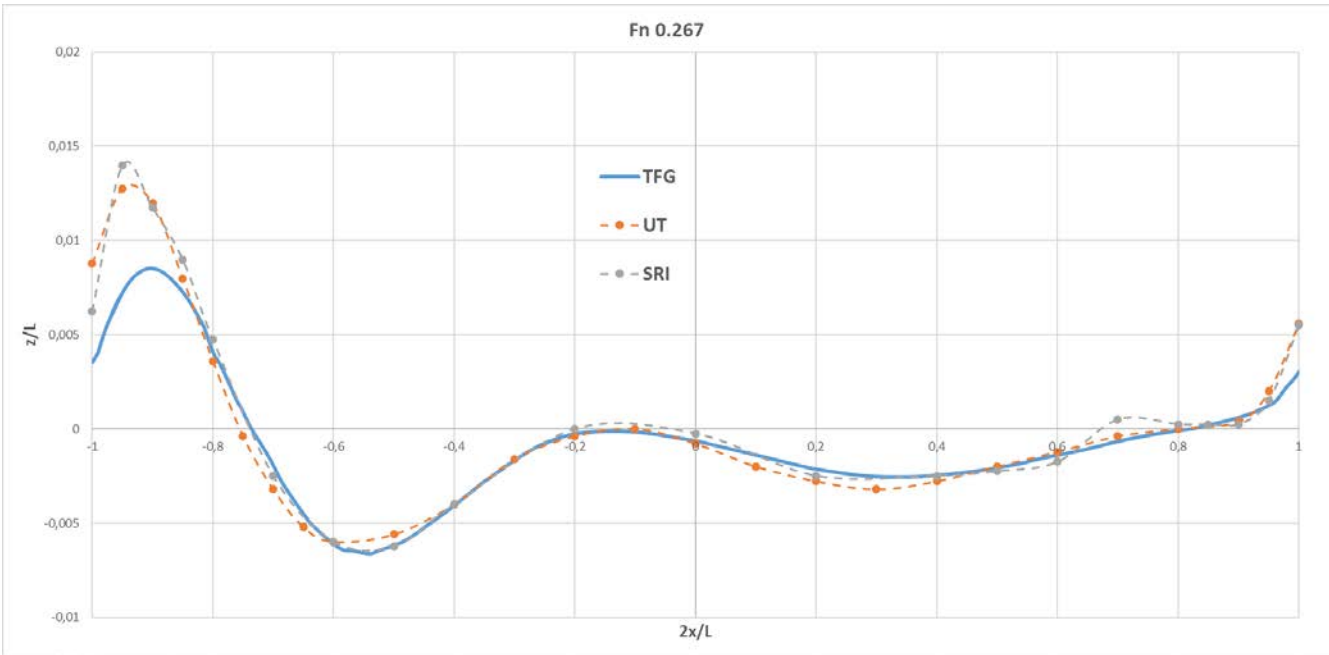


Figura 4-14 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.267$

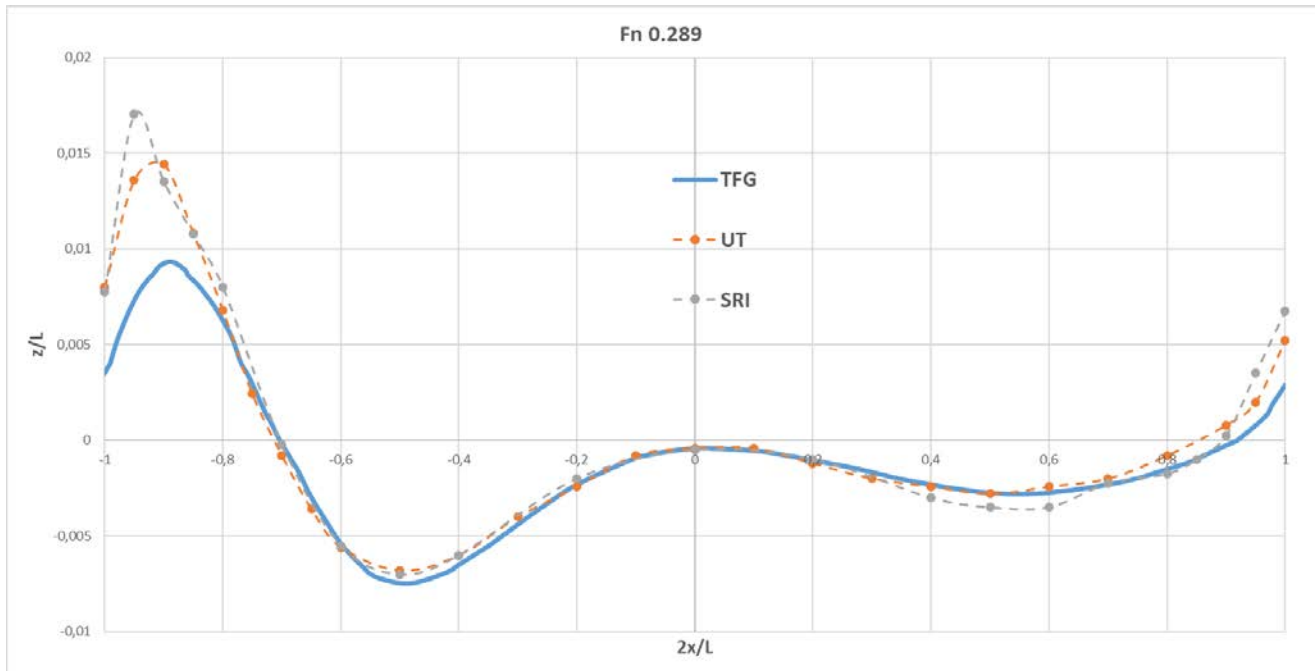


Figura 4-15 Comparativa de los perfiles de ola para $F_n=0.289$

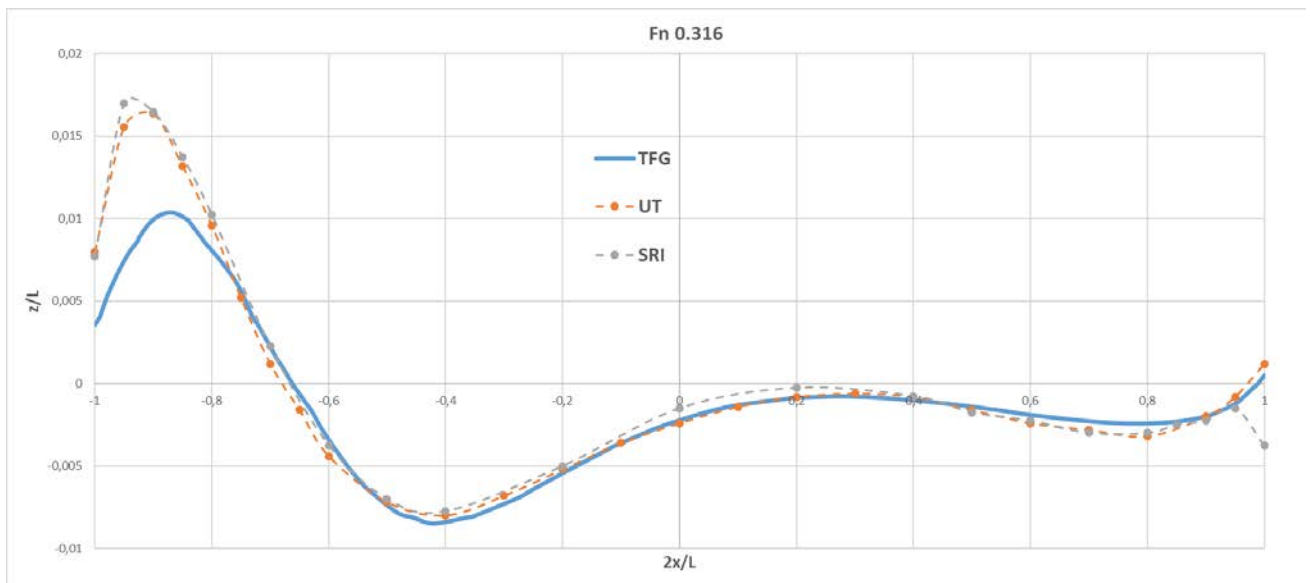


Figura 4-16 Comparativa de los perfiles de ola para $F_n=0.316$

A partir del valor de $F_n = 0,354$, la única organización que aporta datos experimentales es la UT, por lo que se comparan nuestros datos simulados únicamente con los datos de la UT para los 2 valores de F_n siguientes.

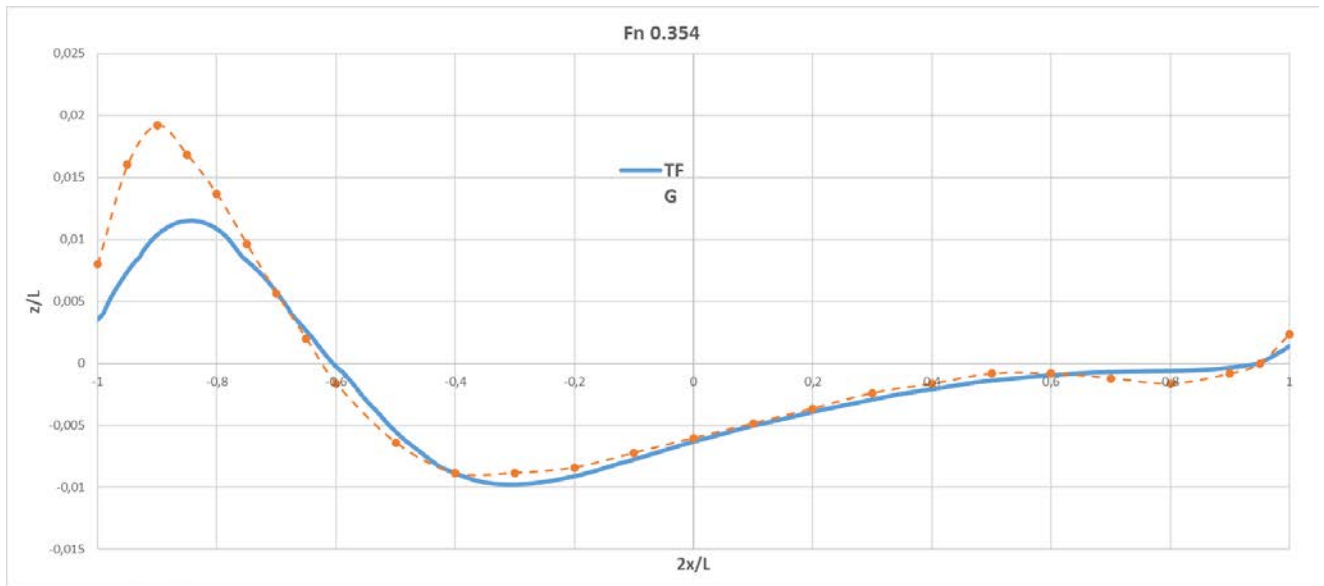


Figura 4-17 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.354$

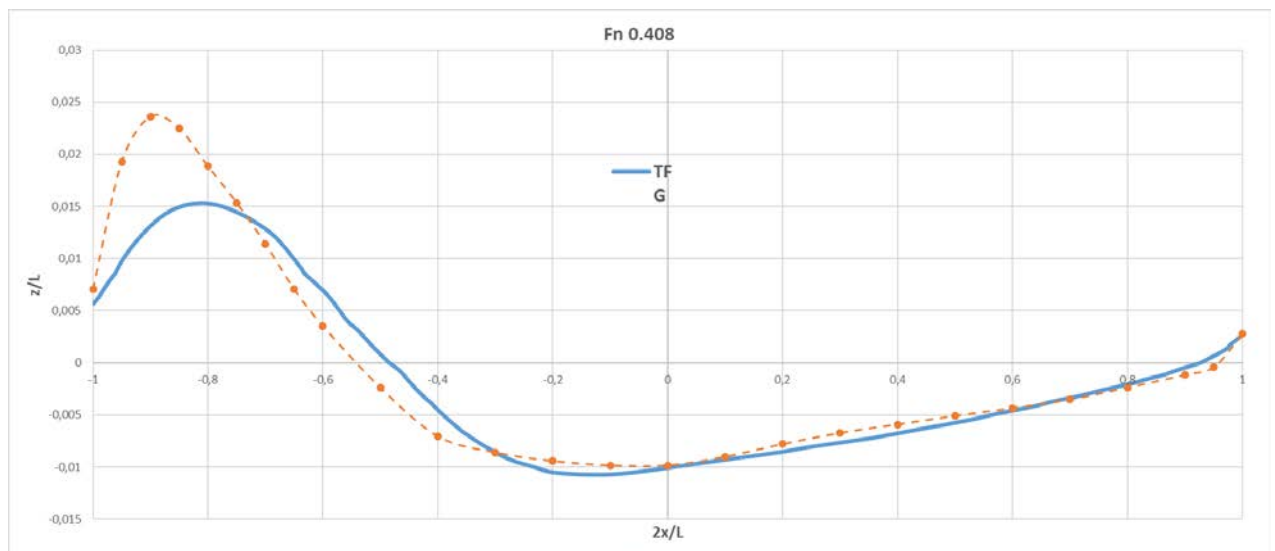


Figura 4-18 Comparativa de los perfiles de ola para $Fn=0.408$

Como se puede apreciar en todas las gráficas, al igual que sucedió en las comparativas de C_T , se tiene una pérdida de datos en la proa del casco, que es lo que genera esa diferencia de valores al principio de la gráfica respecto a los datos experimentales. Con un mayor refinamiento en esa zona, se lograría solventar este problema. A partir de la proa, los datos simulados se asemejan bastante a lo largo de toda la eslora del casco a los datos experimentales, por lo que se puede deducir, que la mayor y más significativa pérdida de datos de las simulaciones suceden en la proa. Como se ha mencionado anteriormente, en la proa es donde suceden la mayor cantidad de fenómenos, pues es donde sucede el punto de transición entre el flujo laminar y el turbulento, y donde la ola toma mayor altura.

Las tablas de donde se han extraído los datos del SRI y de la UT son las mostradas en la Figura 4-19 y la Figura 4-20. Como se menciona anteriormente, los datos están adimensionalizados siguiendo la fórmula (25) en el eje y y la fórmula (26) en el eje x .

$g\zeta/U^2$ Fixed L=4.0m (SRI)				
2X/L	FN= .250	FN= .267	FN= .289	FN= .316
-1.000	.192	.175	.186	.155
-.950	.440	.392	.408	.340
-.900	.368	.329	.324	.330
-.850	.248	.252	.258	.270
-.800	.104	.133	.192	.220
-.750	-.136	-.070	-.035	.070
-.700	-.160	-.168	-.132	-.073
-.650	-.120	-.175	-.168	-.140
-.600	-.032	-.112	-.144	-.155
-.550	-.016	-.030	-.048	-.100
-.500	-.056	-.007	-.012	-.030
-.450	-.030	-.070	-.024	-.005
-.400	-.088	-.070	-.072	-.015
-.350	-.072	-.053	-.084	-.035
-.300	-.048	-.049	-.084	-.040
-.250	.008	.014	-.054	-.030
-.200	.016	.007	-.042	-.030
-.150	.016	.007	-.024	-.030
-.100	.024	.007	.006	-.040
-.050	.030	.042	.034	-.030
0.000	.224	.154	.162	-.075

Figura 4-19 Datos del perfil de ola del SRI

$g\zeta/U^2$ Fixed L=2.5 m (UT)						
2X/L	FN= .250	FN= .267	FN= .289	FN= .316	FN= .354	FN= .400
-1.000	.307	.246	.192	.160	.128	.085
-.950	.397	.358	.326	.312	.256	.235
-.900	.346	.336	.346	.328	.307	.288
-.850	.218	.224	.259	.264	.269	.274
-.800	.077	.101	.163	.192	.218	.230
-.750	-.064	-.011	.058	.104	.154	.187
-.700	-.141	-.090	-.019	.024	.090	.139
-.650	-.179	-.146	-.086	-.032	.032	.086
-.600	-.179	-.168	-.134	-.088	-.026	.043
-.550	-.128	-.157	-.163	-.144	-.102	-.029
-.500	-.051	-.112	-.144	-.160	-.141	-.086
-.450	.026	-.045	-.096	-.136	-.141	-.106
-.400	.013	-.011	-.058	-.104	-.134	-.115
-.350	-.026	.000	-.019	-.072	-.115	-.120
-.300	-.077	-.022	-.010	-.048	-.096	-.120
-.250	-.102	-.056	-.010	-.028	-.077	-.110
-.200	-.090	-.078	-.029	-.016	-.058	-.096
-.150	-.064	-.090	-.048	-.012	-.038	-.082
-.100	-.026	-.078	-.058	-.016	-.026	-.072
-.050	-.013	-.056	-.067	-.032	-.013	-.062
0.000	.000	-.034	-.058	-.048	-.013	-.053
.050	-.013	-.011	-.048	-.056	-.019	-.040
.100	-.013	.000	-.019	-.064	-.026	-.029
.150	.000	.011	.019	-.040	-.013	-.014
.200	.026	.056	.048	-.016	.000	-.005
.250	.141	.157	.125	.024	.038	.034

Figura 4-20 Datos del perfil de ola de la UT

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El análisis del casco parabólico Wigley con un software CFD nos ha permitido adquirir una visión integral y detallada sobre las interacciones de este diseño concreto de casco con los fluidos de su entorno desplazándose a diferentes velocidades. Se ha estudiado el patrón de ola generado, y se ha podido analizar y evaluar los efectos de este patrón sobre el coeficiente de resistencia total del casco.

También se ha podido comparar y validar nuestros datos obtenidos en las simulaciones con datos experimentales obtenidos en el “Experimento Cooperativo sobre el Casco Parabólico Wigley”, realizado en Tokio en el año 1983.

Sobre esta validación se ha podido concluir que se tiene una pérdida de datos en la proa del casco debido al refinado de la malla, dando a entender que hay margen de mejora en esta área. No obstante, se ha visto también que con una malla muy pequeña como la que se ha obtenido, de apenas 52500 celdas, se ha conseguido datos muy aproximados a los resultados experimentales. Esto nos indica la alta fiabilidad y precisión que tienen este tipo de software a día de hoy.

La creciente importancia de este tipo de software cada vez tiene más relevancia dentro de la industria naval, y pese a no ser un reemplazo de los ensayos hidrodinámicos, su continua evolución y su cada vez mayor accesibilidad al público, permite un avance tecnológico importante para la industria.

La rápida evolución de este software permite a pequeños particulares con pocos recursos realizar investigaciones y desarrollar tecnologías y metodologías en el ámbito de la industria naval, como se ha visto en el “Workshop on CFD Ship Hydrodynamics” [39].

Esta área resulta muy interesante para la industria naval militar. En la industria armamentística siempre se busca la vanguardia tecnológica con la introducción de nuevos sistemas y tecnologías que puedan aventajar nuestras unidades frente a las de la amenaza. Como se ha mencionado anteriormente, este software permiten de una manera muy sencilla y económica estudiar el efecto y la viabilidad de nuevas tecnologías propuestas antes de fabricarlas, como es el caso del prototipo de fragata ONR Tumblehome estudiada en el Workshop de 2015 [39].

Como futuros trabajos se pueden incluir otras estrategias de mallado, como es la estrategia de “Overset”, similar a la que encontramos en el estudio de predicción de rendimiento del barco de vela [42]. En el año 2017, Kenway demostró que la efectividad de esta estrategia en la optimización de formas aerodinámicas era mayor que las mallas multi-bloque como la de este trabajo [44].

Otra propuesta para el futuro es la elaboración de una malla más compleja y más grande, con una menor pérdida de datos, con la experiencia y los datos obtenidos en este trabajo. También se puede tratar de estudiar otros parámetros como la presión en el casco.

Se podrían también estudiar otros tipos de cascos más orientados a las demandas de la Armada Española, con otras características y topologías más complejas y especializadas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Farinon, "Magnet design and optimization: The INFN-Genova experience using ANSYS," *Cryogenics*, vol. 47, pp. 577-582, 2007.
- [2] C. Fox, "The Australian and New Zealand Comparative and International Education Society (ANZCIES)," in *Common interests, uncommon goals: Histories of the World Council of Comparative Education Societies and its members*, Springer, 2008, pp. 200-209.
- [3] H. Kajitani, H. Miyata, M. Ikehata, H. Tanaka, H. Adachi, M. Namimatsu and S. Ogiwara, "Summary of the cooperative experiment on Wigley parabolic model in Japan," in *Proceedings of the Workshop on Ship Wave Resistance Computations*, Tokyo, 1983.
- [4] K. J. Bai and J. McCarthy, *Proceedings of the Workshop on Ship Wave-Resistance Computations*, Maryland: David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1979.
- [5] X. Liu, D. Wan, G. Chen and C. Hu, "Wigley Hull Form Optimization with or Without Bulbous Bow," in *The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2019.
- [6] F. Stern, Z. Wang, J. Yang, H. Sadat-Hosseini and S. B. Mousaviraad, "Recent progress in CFD for naval architecture and ocean engineering," in *Proc of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014)*, 2014.
- [7] K. Mizzi, P. Kellett, Y. K. Demirel, R. Martin and O. Turan, "HPC and CFD in the marine industry: past, present and future," *University of Edinburgh*, 2015.
- [8] C.-M. Niță, I.-C. Scurtu and S. Ovidiu Cupsa, "Review in Numerical Simulation in Naval Application," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018.
- [9] L. Birk, *Fundamentals of Ship Hydrodynamics*, New Orleans: John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- [10] "Chapter 7. Resistance and Powering of Ships," Annapolis, United States Naval Academy.
- [11] D. Fernández Gutiérrez, «Análisis y optimización de la resistencia de interferencia en multicascos,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [12] «Armada Española,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/multimedialgaleria/prefLang-es/04fragatas--31ESCUADRILLA>. [Último acceso: 04 03 2024].

- [13] J. A. Fay, "Introduction to fluid mechanics," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 318, p. 408, 1996.
- [14] A. F. Molland, S. R. Turnock and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [15] A. Belov, "Did ancient Egyptian ships have keels? The evidence of Thonis-Heracleion Ship 17," *International journal of nautical archaeology*, vol. 44, pp. 74-80, 2015.
- [16] G. R. Schwarz, "The history and development of caravels," Texas A&M University, 2009.
- [17] «Fundación Nao Victoria,» 23 02 2017. [En línea]. Available: <https://www.fundacionnaovictoria.org/es/la-nao-victoria-visita-la-linea-la-concepcion-2/>. [Último acceso: 04 03 2024].
- [18] D. Starley, "Determining the technological origins of iron and steel," *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, no. 8, pp. 1127-1133, 1999.
- [19] J. Paffett, "Ships' hulls since cheops: an engineer's view," *Industrial archaeology review*, vol. 10, no. 1, pp. 84-99, 1987.
- [20] «National Historic Ships UK,» [En línea]. Available: https://www.nationalhistoricships.org.uk/sites/default/files/data/nrhv/vessels/501_HMSWARRIOR_8.jpg. [Último acceso: 04 03 2024].
- [21] B. E. G. Clark, *Steamboat evolution: a short history*, Lulu.com, 2007.
- [22] H. Schneekluth and V. Bertram, *Ship design for efficiency and economy*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [23] L. Blanchard, É. Berrini, R. Duvigneau, Y. Roux, B. Mourrain and E. Jean, "Bulbous bow shape optimization," 2013.
- [24] J. Maisonneuve, S. Harries, J. Marzi, H. C. Raven, U. Viviani and H. Piippo, "1 Towards Optimal Design of Ship Hull Shapes," 2002.
- [25] M. Tadros, M. Ventura and C. Guedes Soares, "Review of the Decision Support Methods Used in Optimizing Ship Hulls towards Improving Energy Efficiency," *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023.
- [26] S. Shao and Y. Wang, "Experimental Investigation of Hull Form of High-Speed Displacement Vessels," 1985.
- [27] S. Maksimović, A. Radica, K. Zihra and S. Góes, "Effects of hull deformations on ship displacement," 2006.
- [28] "Mitsui O.S.K. Lines," [Online]. Available: <https://www.mol.co.jp/en/services/tanker/>. [Accessed 12 03 2024].
- [29] S. Baso, L. Bochary, Rosmani, M. Hasbullah, A. D. E. Anggriani and A. Ardianti, "Investigating the Performance Characteristics of a Semi-Planing Ship Hull at High Speed," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 875, 2020.
- [30] «Rodman | Embarcaciones exclusivas de recreo y de pesca,» [En línea]. Available: <https://rodman.es/producto/nautica-de-recreo/rodman-ventura/rodman-790-ventura-sd/>. [Último acceso: 12 03 2024].

- [31] "Beneteau," [Online]. Available: <https://brochures.beneteau.com/oceanisyacht54/EN/#page=2>. [Accessed 12 03 2024].
- [32] T. Coppola and M. Mandarino, "The Design of Trimaran Ships," in *Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Elsevier, 2001, pp. 127-134.
- [33] D. J. Andrews and Zhang, "Considerations in the Design of a Trimaran Frigate," 1995.
- [34] "United States Navy," 03 07 2021. [Online]. Available: <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/2713512/uss-independence-lcs-2-decommissions-after-distinguished-service/>. [Accessed 08 03 2024].
- [35] «United States Navy,» [En línea]. Available: <https://www.surfpac.navy.mil/>. [Último acceso: 08 03 2024].
- [36] Bertram and J. R. Meyer, "Hybrid Craft: Renaissance for combination of hydrofoils plus displacers," 1994.
- [37] "America's Cup," [Online]. Available: https://www.americascup.com/photo/2671_JEDDAH-RACE-DAY-1. [Accessed 08 03 2024].
- [38] A. Firdhaus, I. K. Suastika, Kiryanto and Samuel, "Benchmark Study of FINETM/Marine CFD Code for the Calculation of Ship Resistance," *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 18, no. 2, pp. 111-118, 2021.
- [39] «Tokyo 2015 A Workshop on CFD Ship Hydrodynamics,» 4 12 2015. [En línea]. Available: <https://t2015.nmri.go.jp/index.html>. [Último acceso: 10 03 2024].
- [40] W.-M. Lin, M. D. Collette, D. R. Lavis, S. D. Jessup and J. Kuhn, "Recent Hydrodynamic Tool Development and Validation for Motions and Slam Loads on Ocean-Going High-Speed Vessels," San Diego, 2007.
- [41] Y. Sanada, H. Elshiekh, Y. Toda and F. Stern, "ONR Tumblehome course keeping and maneuvering in calm water and waves," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 24, pp. 948-967, 2018.
- [42] H. Akimoto and H. Miyata, "Finite-Volume Simulation Method to Predict the Performance of a Sailing Boat," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 7, pp. 31-42, 2002.
- [43] J. R. Shearer and J. J. Cross, "The Experimental Determination of the Components of Ship Resistance for a Mathematical Model," Transactions of the Royal Institute of Naval Architects, London, 1965.
- [44] G. K. W. Kenway, N. Secco, J. R. R. A. Martins, A. Mishra and K. Duraisamy, "An Efficient Parallel Overset Method for Aerodynamic Shape Optimization," Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Michigan, 2017.
- [45] J. J. Corbett and P. S. Fischbeck, "Emissions from Ships," *Science*, vol. 278, pp. 823-824, 1997.
- [46] S. B. Dalsøren, M. S. Eide, Ø. Endresen, A. Mjelde, G. Gravir and I. S. A. Isaksen, "Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: the contribution from major ship types and ports," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, pp. 2171-2194, 2009.
- [47] E. Angelucci and A. Cucari, *Ships*, New York: Greenwich House, 1983.

- [48] "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics," 04 12 2015. [Online]. Available: <https://t2015.nmri.go.jp>. [Accessed 11 03 2024].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

La introducción del software CFD ha revolucionado la ingeniería naval tanto en los aspectos económicos como ambientales de la industria. Ya se ha mencionado en el apartado 1.5 algunos beneficios de este software sobre la eficacia operativa como a la sostenibilidad medioambiental de la industria naval.

Desde el punto de vista económico, el software CFD permiten a las empresas de ingeniería simular y analizar el comportamiento y las interacciones de los fluidos con cualquier elemento que deseen estudiar, como puede ser el casco de un barco, un sistema de propulsión o una estructura submarina. Además, gracias al perfeccionamiento y la rápida evolución de este tipo de software, son capaces de dar cada vez datos más precisos. Esta capacidad de modelado que nos aportan reduce la necesidad de realizar prototipos físicos y ensayos en canales hidrodinámicos, lo que supone un ahorro significativo en tiempo y recursos durante el proceso de diseño y desarrollo. Este software permite además optimizar la forma de los elementos fácilmente y minimizar así la resistencia al avance, lo que supone una reducción significativa en consumo de combustible, y por consiguiente, un ahorro de costes operativos a lo largo de la vida útil de los elementos diseñados.

Este último punto mencionado se puede hilar perfectamente con las implicaciones medioambientales de estos softwares. La contribución de los softwares CFD a la optimización de las formas de los elementos, y, por tanto, a la reducción de consumo de combustible, genera una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2) o los óxidos de nitrógeno (NO_x). Actualmente, el tráfico marítimo supone una de las mayores fuentes de contaminación del mundo. En el año 1997, James Corbett publicaba un artículo en el que estimaba que el 14% de las emisiones de nitrógeno y más del 16% de las emisiones de sulfuros proviene del tráfico marítimo [45]. En el año 2008, Dalsøren publicó un estudio acerca del impacto del tráfico marítimo en la contaminación del aire, y estimó que contribuían entre un 1-7% en los niveles de partículas PM10, y entre un 7-24% en los niveles de NO_2 en las costas europeas [46]. Además de reducir la contaminación del aire y del mar, la optimización en las formas de los elementos favorece a minimizar la contaminación acústica, ayudando así a preservar los ecosistemas marinos.

En adición al impacto positivo de los softwares CFD en el ámbito económico y medioambiental, tiene también implicaciones más amplias dentro de la industria naval en su conjunto. Su contribución para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los buques aportan competitividad global entre los astilleros y las empresas navieras en la industria naval. Además, fomentan la innovación en el diseño y la construcción naval, y ayudan a promover prácticas de diseño más responsables desde el punto de vista medioambiental.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El uso y desarrollo de los softwares CFD, así como el rápido desarrollo que están teniendo, plantean una serie de reflexiones éticas y sociales que merecen una cuidadosa consideración especialmente dentro de la industria naval para garantizar un uso responsable y beneficioso de esta nueva tecnología.

En primer lugar, la disponibilidad de software para pequeñas empresas. Si bien la accesibilidad a esta tecnología puede nivelar la diferencia de presupuesto entre grandes y pequeñas empresas y, como resultado, aumentar la competitividad en el sector de la industria naval y fomentar la innovación, también plantea desafíos en términos de regulación y control. Es esencial que se establezcan medidas que garanticen el uso regulado de este software y que cumplan con los estándares de seguridad y protección de datos necesarios para operar en cada entorno, especialmente en la industria de defensa nacional.

El uso de software CFD en la industria naval militar plantea dilemas éticos sobre la responsabilidad de los desarrolladores y diseñadores en la creación y aplicación de nuevas tecnologías con posibles implicaciones para la seguridad y los derechos humanos. Es fundamental que se tomen estas dos áreas en cuenta a la hora de innovar mediante el uso del software CFD y se tomen medidas para garantizar el uso ético y responsable de esta tecnología.

Desde una perspectiva social, la promoción de este software dentro de la industria naval plantea ciertos desafíos en términos de equidad y justicia. Es importante que las organizaciones involucradas en este sector garanticen la igualdad de oportunidades y de acceso al uso de nuevas tecnologías y mejoras del software CFD para evitar que crezca la desigualdad entre las grandes y las pequeñas empresas de ingeniería naval.

ANEXO III: REPRESENTACIÓN EN MATLAB

En este apartado se ha diseñado un código en MatLab para poder representar la geometría del casco Wigley (Figura 0-2). MatLab es un sistema de cómputo numérico con lenguaje propio destinada a la programación y cálculo numérico. La geometría del casco Wigley, al ser una función parabólica, es fácilmente representable en este tipo de programas matemáticos.

Para ello, en primer lugar, se tiene que definir las dimensiones de eslora L , manga B , y calado T (Figura 0-1). En este caso, se ha establecido la eslora como $L=4$, y se ha dejado las otras dos dimensiones en función de la eslora siguiendo las proporciones del casco Wigley, $B=L/10$, $T=0,0625*L$.

```

3      % Definimos nuestras dimensiones del casco
4      L=4;
5      T=0.0625*L;
6      B=L/10;
```

Figura 0-1 Dimensiones definidas en MatLab

A continuación se definen los límites de cada eje y se establece en cuantas partes quiero dividirlo, por ejemplo, $x = -L/2:L/100:L/2$, como se puede ver en la Figura 0-2. En esta función los límites de x están entre $-L/2$ y $L/2$, y dividimos el eje x en 100 partes para su representación. Se hace esto con el eje z también. El eje y lo se define con la fórmula que define al casco Wigley (1). Además, se necesita la función `meshgrid`, tal y como se ve en la Figura (0-2), esta devuelve coordenadas en una cuadrícula 2D basadas en las coordenadas contenidas, en nuestro caso, en los vectores X y Z . X es una matriz donde cada fila es una copia de x , y Z es una matriz donde cada fila es una copia de z . La cuadrícula representada por las coordenadas de X y Z tiene un número de “ z ” filas y “ x ” columnas.

```

8      x=-L/2:L/100:L/2;
9      z=0:-T/10:-T; % queremos que el eje z vaya hacia abajo
10     [X,Z]= meshgrid(x,z);
11     Y=B/2 *(1-(2*X/L).^2).*(1-(Z/T).^2); %ecuación que define la forma del casco
```

Figura 0-2 Variables definidas y de forma matricial en MatLab

Con la función `mesh(X,Y,Z)` se representa la función que se tenga definida en estos ejes, como se ve en la Figura 0-3. A continuación, con las funciones `xlabel`, `ylabel`, y `zlabel` se dan nombres a los ejes. Tras esto, se definen los límites de los ejes con la función “`axis`”, Ej.: `axis([-L/2 L/2 -B/2 B/2 -T 0.25*T])`. En primer lugar, los límites del eje x , luego los del eje y , y finalmente los del eje z .

```

12     mesh(X,Y,Z); %Representar en los 3 ejes
13     xlabel('x'); % Dar el nombre a los ejes
14     ylabel('y');
15     zlabel('z');
16     axis([-L/2 L/2 -B/2 B/2 -T 0.25*T]) % Límites de los ejes (x,y, luego z-axis)
```

Figura 0-3 Función mesh y límites de los ejes en MatLab

Con estas funciones definidas, MatLab nos mostraría únicamente una mitad del casco, dividido en la cruz. Para que nos represente ambas mitades a la vez, se usa primero la función “`hold on`”. Esta función conserva la gráfica anterior y da la posibilidad de representar otra función sobre ella. Tras esto, se vuelve a definir la variable y con la función (1) negativa, es decir, con un menos delante, de este modo nos representará la semimanga opuesta a la anterior. Hecho esto se vuelve a escribir la función `mesh`. En la Figura 0-4 se ve cómo quedaría la primera parte del código.

```

8      x=-L/2:L/100:L/2;
9      z=0:-T/10:-T; % queremos que el eje z vaya hacia abajo
10     [X,Z]= meshgrid(x,z);
11     Y=B/2 *(1-(2*X/L).^2).*(1-(Z/T).^2); %ecuación que define la forma del casco
12     mesh(X,Y,Z); %Representar en los 3 ejes
13     xlabel('x'); % Dar el nombre a los ejes
14     ylabel('y');
15     zlabel('z');
16     axis([-L/2 L/2 -B/2 B/2 -T 0.25*T]) % Limites de los ejes (x,y, luego z-axis)
17     hold on; %El código anterior nos trazaría la semimanga
18     Y=-B/2 *(1-(2*X/L).^2).*(1-(Z/T).^2);
19     mesh(X,Y,Z); %Traza la otra semimanga

```

Figura 0-4 Primera parte del código con la función “hold on”

Tras esto, se tiene que seguir el mismo procedimiento para generar el francobordo. Para el francobordo se cambian los valores de la variable z, esta vez los límites serán entre 0 y $0,25T$, en nuestro caso $0,0625$ metros, $z= 0:T/10:0,25*T$. Tras esto se vuelve a definir ambas semimangas del mismo modo que lo hicimos para la obra viva, se define Y con la fórmula (1) y con la función hold on, se define también su inversa $Y= -(1)$. El código resultante sería el que se ve en la Figura 0-5. Añadir que las funciones “clear all” y “clc” sirven para limpiar la hoja de operaciones y para borrar cualquier función que haya podido estar guardada antes del código.

```

WigleyHull.m
1      clear;
2      clc;
3      % Definimos nuestras dimensiones del casco
4      L=4;
5      T=0.0625*L;
6      B=L/10;
7
8      x=-L/2:L/100:L/2;
9      z=0:-T/10:-T; % queremos que el eje z vaya hacia abajo
10     [X,Z]= meshgrid(x,z);
11     Y=B/2 *(1-(2*X/L).^2).*(1-(Z/T).^2); %ecuación que define la forma del casco
12     mesh(X,Y,Z); %Representar en los 3 ejes
13     xlabel('x'); % Dar el nombre a los ejes
14     ylabel('y');
15     zlabel('z');
16     axis([-L/2 L/2 -B/2 B/2 -T 0.25*T]) % Limites de los ejes (x,y, luego z-axis)
17     hold on; %El código anterior nos trazaría la semimanga
18     Y=-B/2 *(1-(2*X/L).^2).*(1-(Z/T).^2);
19     mesh(X,Y,Z); %Traza la otra semimanga
20     %colormap([0 0 0]); %Esto se utiliza para definir el color del plotter
21
22     % Definimos el francobordo
23
24     z=0:T/10:0.25*T; % Redefinimos los límites de z
25     [X,Z]= meshgrid(x,z);
26     Y=B/2 *(1-(2*X/L).^2);
27     mesh(X,Y,Z);
28     Y=-B/2 *(1-(2*X/L).^2);
29     mesh(X,Y,Z)

```

Figura 0-5 Código de MatLab para generar la geometría del casco Wigley

En las Figuras 0-6 y 0-7 se tiene la representación de MatLab de la geometría Wigley, la de la izquierda con la función “colormap” [0 0 0], que implica la composición de colores primarios, siendo esta la equivalente al negro. Y la de la derecha sin la función “colormap” nos la muestra con una gama de colores.

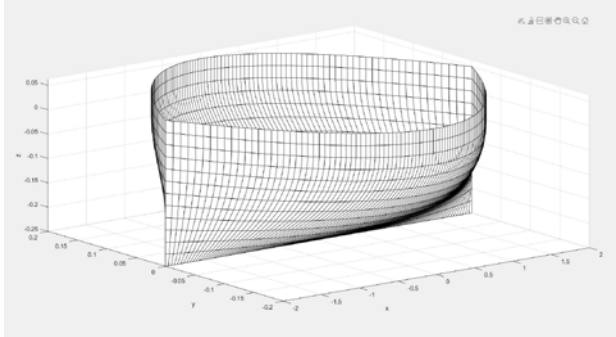


Figura 0-6 Geometría Wigley de Matlab (colormap)

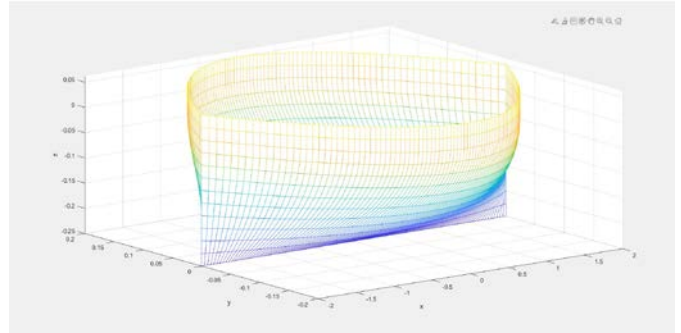


Figura 0-7 Geometría Wigley de Matlab (sin colormap)