



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Naval

# “EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA RESISTENCIA AL AVANCE DE BUQUES”

Tesis para optar al Título de:  
Ingeniero Naval  
Mención: Arquitectura Naval

Profesor Patrocinante:  
Sr. Marcos Salas Inzunza  
Ingeniero Naval  
Licenciado en Ingeniería Naval  
M.Sc. en Ingeniería Oceánica  
Doctor of Philosophy (Ship Science)

JOSÉ MIGUEL AHUMADA FONFACH  
VALDIVIA - CHILE  
2009

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

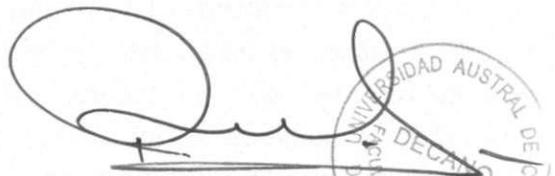
La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, mención **Arquitectura Naval**.

**EXAMEN DE TITULO:**

Nota de Presentación	(Ponderada) (1)	:	4,472
Nota de Examen	(Ponderada) (2)	:	1,300
Nota Final de Titulación	(1 + 2)	:	5,772

**COMISION EXAMINADORA:**

DR. ROGENO MORENO M  
DECANO

  
FIRMA



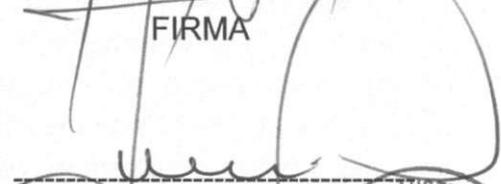
DR. MARCOS SAUAS I  
EXAMINADOR

  
FIRMA

DR. RICHARD LUCAS  
EXAMINADOR

  
FIRMA

JOEL PEREZ O  
EXAMINADOR

  
FIRMA

XIMENA LOBOS S  
SECRETARIO ACADEMICO

  
FIRMA



Valdivia, 13 ABRIL 2009

Nota de Presentación = NC/NA \* 0,6 + Nota de Tesis \* 0,2  
Nota Final = Nota de Presentación + Nota Examen \* 0,2  
NC = Sumatoria Notas de Currículo, sin Tesis  
NA = Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional.

## **Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo establecer una metodología en la utilización de un software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD sigla en inglés) basados en la resolución de las ecuaciones de Navier y Stock, para ensayos hidrodinámicos de embarcaciones, específicamente en la predicción de la resistencia al avance de forma analítica. Proponiendo la técnica CFD como una herramienta de diseño y optimización en la Ingeniería Naval, la cual se ha ido masificando paulatinamente con el desarrollo de la computación, en distintas áreas de la ingeniería que tratan con la mecánica de fluidos.

El estudio se realizó en la optimización de la resistencia al avance tomando como modelo una unidad de superficie, proponiendo como solución de optimización el uso de Flap en popa, el cual fue evaluado en diferentes ángulos manteniendo sus dimensiones de cuerda y envergadura. Tanto los datos de la embarcación como los del dispositivo, se basaron en los ensayos realizados por el canal de prueba de la Universidad Austral de Chile.

Para el análisis de los resultados se utilizaron dos modelos de turbulencia, los que fueron validados con los datos extraídos del canal de pruebas, permitiendo decidir cuál de los modelos es el más adecuado para este tipo de ensayos. Además en el análisis realizado se incluyeron los efectos del Flap de modo particular, demostrando la capacidad y facilidad en el análisis de los resultados arrojados por esta técnica de cálculo, entregando la posibilidad de plantear las opciones más eficientes, de tal forma acotar las pruebas experimentales, aumentando la probabilidad de escoger la mejor solución.

## Índice

<b>Introducción</b>	4
<b>Simbología</b>	5
<b>1. Fundamentos para el Flap de Popa</b>	
1.1 Fenómenos producido por el Flap	6
1.1.1 Modificaciones en el Flujo en la Zona de Popa	6
1.1.2 Modificaciones en el Sistema de Formación de Olas	6
1.1.3 Fenómenos Hidrodinámicos Secundarios	7
1.1.4 Influencia de Fenómenos Viscosos	7
<b>2. Estudio Hidrodinámico Por CFD</b>	
2.1 Condición de carga	8
2.2 Definición de la Simulación CFD	8
2.2.1 Modelo físico	8
2.2.2 Especificación del Modelo Geométrico	9
2.2.3 Especificación del Mallado	10
2.2.4 Modelo Matemático	12
2.2.5 Modelo de Turbulencia	14
2.2.6 Especificación de las Propiedades del Flujo	16
2.2.7 Definición de las Condiciones de Contorno	16
2.2.8 Definición de las Condiciones Iniciales	17
2.2.9 Parámetros de Solución	17
2.2.10 Proceso de Cálculo	17
2.2.11 Análisis de Solución	17
2.2.12 Recursos Computacionales	18
<b>3. Procedimiento de Simulación CFD</b>	
3.1 Procesamiento de dato en CFX	18
3.1.1 Ansys CFX	18
3.1.2 CFX-Pre	19
3.1.3 CFX-Solver	25
3.1.4 CFX-Post	26
<b>4. Análisis de Resultados</b>	
4.1 Situación Sin Flap	31
4.2 Situación de casco con Flap	35
4.2.1 Caso Flap 0 [°] de Inclinación	36
4.2.2 Caso Flap 5 [°] de Inclinación	39
4.2.3 Caso Flap 10[°] de Inclinación	42
4.2.4 Caso Flap 15[°] de Inclinación	45
<b>Conclusiones</b>	48
<b>Referencias</b>	49

## Introducción

La hidrodinámica de una embarcación constituye una parte primordial en su proyecto, lo que durante muchos años han sido los canales de ensayos los encargados de contribuir al diseño de formas para obtener mínima resistencia y óptimo comportamiento en el mar. Sin embargo, desde la introducción del uso masivo de la computación en todo tipo de industria, el ambiente naval no ha estado ajeno a esta situación, surgiendo una nueva herramienta para optimizar hidrodinámicamente las formas de los buques, estos son los llamados CFD.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una rama dentro de la Mecánica de fluidos que utiliza técnicas numéricas para resolver las ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos entorno a un cuerpo, a través de un computador que son los encargados de implementar esas técnicas numéricas. Debido a que las ecuaciones resueltas son aproximaciones de los modelos matemáticos que describen la física del flujo real, hay que tener presente un margen de error en los resultados obtenidos.

Estudiar el comportamiento hidrodinámico de una embarcación ha sido una de las materias de mayor interés como aplicación de los CFD para la ingeniería Naval, siendo el estudio de la resistencia al avance en aguas tranquilas el campo de más importancia, Para este caso se trata a los fluidos como incompresibles e isotérmico, calculándose el campo de presiones locales y los vectores de velocidad en tres dimensiones, en un espacio que rodea a la porción sumergida del casco, de esta manera es posible calcular las fuerzas y efectos que actúan sobre la superficie del casco.

Los diversos problemas de la mecánica de fluidos que se pueden resolver con estas técnicas computacionales, permiten realizar el estudio de optimización hidrodinámica de una embarcación, ya construida instalando un dispositivo con estos fines, aminorando el número de ensayos experimentales, optimizando el tiempo empleado para este estudio.

## Simbología

$\mu_t$	Viscosidad Turbulenta
<b>K</b>	Energía Cinética
$\epsilon$	Disipación de la energía cinética
$\omega$	Disipación de la energía cinética
<b>U</b>	Velocidad
<b>Vc</b>	Volumen de Control
<b>Sc</b>	Superficie de Control
$\nu$	Viscosidad Cinemática
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
<b>P</b>	Presión
$\tau$	Tensor del Esfuerzo Viscoso
$\Omega$	Energía Interna del sistema
<b>C<math>\mu</math></b>	Constante Empírica
<b>SF</b>	Cuerda
<b>C<sub>F</sub></b>	Envergadura
$\beta$	Angulo de Inclinación
<b>Fn</b>	Numero de Froude
$\Delta$	Desplazamiento
<b>L<sub>WL</sub></b>	Eslora en Flotación
<b>L<sub>PP</sub></b>	Eslora entre Perpendiculares
<b>B<sub>WL</sub></b>	Manga en Flotación
<b>T</b>	Calado
<b>S</b>	Superficie Mojada
<b>T<sup>o</sup></b>	Temperatura
<b>S/F</b>	Condición sin flap.
<b>C/F</b>	Condición con flap.
<b>Exp (1)</b>	Resistencia experimental sin Estimuladores.
<b>Exp (2)</b>	Resistencia experimental con Estimuladores.
<b>CFX (1)</b>	Resistencia por CFX sin aplicar la inflación con modelo de turbulencia Shear Stress Transport.
<b>CFX (2)</b>	Resistencia por cfx con inflación y modelo de turbulencia k-e.
<b>CFX (3)</b>	Resistencia por cfx con inflación y modelo de turbulencia Shear Stress Transport.
<b>Resistencia v.</b>	Resistencia viscosa por CFX.
<b>Resistencia p.</b>	Resistencia por presión (ola) por CFX.
<b>Resistencia f.</b>	Resistencia por fricción por ITTC.
<b>Resistencia r.</b>	Resistencia residual experimental.

## 1. Fundamentos Para el Flap de popa

El Flap es una extensión del fondo de una embarcación a popa del espejo, interactuando con el casco a ciertas velocidades produciendo alteraciones en el comportamiento hidrodinámico de la embarcación y variaciones de trimado, pudiendo estos efectos ser beneficiosos en la eficiencia del casco, el flap es un dispositivo relativamente pequeño, montado en el espejo con un ángulo respecto a la prolongación imaginaria del fondo.

La influencia que produce el flap al interactuar con el casco está relacionada con sus características geométricas y su disposición en la popa. Las variables que tienen mayor influencia en el rendimiento de este dispositivo son:

- **Cuerda ( $S_F$ ):** Es una extensión longitudinal, considerada en un porcentaje de la eslora entre perpendiculares (% $L_{pp}$ ).
- **Envergadura ( $C_F$ ):** es la dimensión transversal del flap. Se recomienda que este valor alcance el máximo posible a lo largo del espejo.
- **Ángulo ( $\beta$ ):** este ángulo es medido tomando como referencia una extensión ficticia del fondo a popa del casco, los valores típicos varían entre  $10^\circ$  con el borde del flap hacia arriba (ángulos negativos), hasta  $20^\circ$  con el borde hacia abajo (ángulos positivos)

### 1.1 Fenómenos producidos por el Flap

Aunque los efectos producidos por el Flap de popa se encuentran bajo investigación y discusión, se han identificado los principales fenómenos y efectos hidrodinámicos alrededor del casco, que produce la presencia del Flap.

A través de estudios realizados en más de 50 tipos de cascos, los principales fenómenos y efectos se han identificado como siguen a continuación:

- Modificaciones en el flujo de popa.
- Modificaciones en el sistema de formación de Olas.
- Efectos hidrodinámicos Secundarios.

#### 1.1.1 Modificaciones en el Flujo en la Zona de Popa

El efecto principal producido por un apéndice en la zona de popa es la reducción en la velocidad del flujo, y con ello se produce un aumento de la presión dinámica debajo del la cual genera una fuerza de sustentación con una componente en sentido del movimiento de la nave, lo que ayuda a contrarrestar el Drag producido en la zona de popa.

Por otra parte se ha observado que la velocidad de salida del flujo del borde exterior de estos apéndices es mayor a la de una embarcación sin ellos. Este incremento produce una reducción sustancial de la velocidad de separación del flujo, lo que genera una separación más ordenada de éste, y que se traduce en una significativa reducción de vórtices, y por lo tanto, de la resistencia de presión de origen viscoso.

#### 1.1.2 Modificaciones en el Sistema de Formación de Olas

El flujo alrededor de la zona del espejo sin la presencia de estos apéndices se ve afectado por una pérdida de energía del campo próximo al casco, debido a fenómenos de origen de presión viscosa (vórtices y gran turbulencia principalmente), las cuales no se propagan a la

energía del campo lejano. A velocidades equivalentes, la presencia de un apéndice en la zona de popa produce en el flujo alrededor de esta zona una reducción de: altura de ola, pendiente y posición de la primera cresta de ola en la salida del espejo, velocidad en donde se alcanza una separación ordenada del tren de olas y cantidad de “espuma” en las olas de salida de los bordes. Las velocidades de separación del flujo en la zona del espejo son menores a las registradas en las pruebas de mar.

La literatura muestra que a través de diversos ensayos se ha encontrado una disminución en la altura de las superficies libres de las olas presentes en el campo lejano del casco. Este fenómeno comienza a producirse a partir de las velocidades medias de la fase de transición (alrededor de  $F_n = 0,45$ ). Esta disminución de altura de ola produce una reducción en el coeficiente de formación de olas a velocidades equivalentes.

### **1.1.3 Fenómenos Hidrodinámicos Secundarios**

La presencia de estos apéndices en la zona de popa produce una serie de fenómenos, que en su conjunto contribuyen a mejorar los beneficios hidrodinámicos producidos por su presencia. Estos fenómenos son los siguientes: Aumento de la línea de agua efectiva, Interacción propulsiva, Modificaciones en el trimado, Reducción del desplazamiento aparente, Variaciones de las fuerzas de Lift y Drag.

### **1.1.4 Influencia de Fenómenos Viscosos**

Generalmente, el rendimiento de un flap instalado en una embarcación a escala real es mayor que el obtenido en los ensayos de canal. Este hecho ha llevado a los diseñadores a concluir que, como consecuencia de la menor escala, las condiciones del flujo alrededor del modelo de un flap de popa son distintas a las que ocurren en la nave prototipo. Esto es atribuido a la presencia de fenómenos viscosos, los cuáles no se reproducen exactamente a escala, dado que los ensayos de canal se realizan a iguales  $F_n$  entre la embarcación real y el modelo, y los fenómenos viscosos dependen del número de Reynolds en general. La presión bajo el casco varía según el factor de escala. Como es conocido, la capa límite es mucho más delgada a factores de escala altos. Es probable que la efectividad de un flap sea mitigado por el mayor grosor relativo de la capa límite asociado a las pruebas con modelos muy pequeños. A través de simulaciones computacionales se ha demostrado que la componente de la resistencia por presión viscosa alrededor de la zona de popa tiene un significativo efecto asociado a diferentes números de Reynolds.

## 2. Estudio Hidrodinámico Por CFD

El objetivo de este capítulo es estudiar el comportamiento hidrodinámico de un buque de superficie por el método numérico RANS, para validar los datos obtenidos con los del canal de prueba de la Universidad Austral de Chile. Al tiempo que se hará descripción del método utilizado en la simulación de esta embarcación, estableciendo una estrategia estándar para el cálculo por CFD.

### 2.1 Condición de Carga

Desplazamiento	$\Delta$	4868,57	[ton]
Eslora en flotación	$L_{WL}$	136,26	[m]
Manga en flotación	$B_{WL}$	14,73	[m]
Calado	T	4,6	[m]
Superficie mojada	S	4,261	[m <sup>2</sup> ]

Además se definió una condición de envergadura ( $S_F$ ), Cuerda ( $C_F$ ), cuatro condiciones de ángulo ( $\beta_F$ ) de Flap y cinco velocidades 14 [kn], 18 [kn] 22 [kn], 26 [kn] y 30 [kn] para este estudio.

$S_F$	:	7	[m]
$C_F$	:	1,32	[m]
$\beta_F$	:	0 [°]; 5 [°]; 10 [°]; 15 [°]	

### 2.2 Definición de la Simulación CFD

#### 2.2.1 Modelo Físico

Los datos generales y resultados del modelo de la embarcación de referencia se han extraído de otro informe con respecto al estudio de canal. El modelo de pruebas fue construido en la Universidad Austral de Chile, el material que se utilizó fue madera de balsa de espesor 5 [mm], reforzada con resina P-4 (de poliéster insaturado ortoftálica), la escala empleada fue 1:80 obteniendo las siguientes dimensiones:

Desplazamiento	:	9,27	[Kg]
Eslora Total	:	1,764	[m]
Eslora en flotación	:	1,704	[m]
Manga en flotación	:	184,0	[mm]
Calado	:	57,5	[mm]
Superficie Mojada	:	325,9	[mm <sup>2</sup> ]

Los ensayos se ejecutaron en dos etapas, la primera se realizaron sin estimuladores de turbulencia, la segunda si los incluyeron, estos fueron construidos en aluminio, con 1/8" de diámetro, altura de 1/10", a una distancia de 1" entre ellos y 14mm de distancia de popa de la

roda. En total se aplicaron 12 pins, 6 por lado del modelo, los ensayos de remolque se realizaron en el canal de prueba de la Universidad Austral de Chile. Las dimensiones del canal son 45 [m] de longitud, por 3 [m] de ancho y 2 [m] de altura. El nivel de agua es de 1,8 [m]. Las pruebas fueron realizadas sin apéndices y no se midió el trimado dinámico.

T° canal:	13	°C
$\rho$ canal:	101,865	Kg s <sup>2</sup> / m <sup>4</sup>
$\mu$ canal:	1,20E-06	m <sup>2</sup> / s

Tabla N° 1: Fluido modelo de prueba: Agua Dulce



Figura N° 1: Modelo construido en el Canal de Pruebas

### 2.2.2 Especificación del Modelo Geométrico

En esta etapa se utilizó el software Rhinoceros v. 4.0, para modelar la forma del casco y flaps, este proceso requirió de una gran precisión para reproducir las formas fielmente y eliminar errores, la calidad de la geometría condiciona en un porcentaje importante la exactitud de los resultados, pero también se simplificaron las regiones en el modelo que no tienen un gran efecto en la respuesta final, como son radios o espesores muy pequeños. En la modelación del volumen de control, las dimensiones de ancho y alto fueron las mismas que las del canal de pruebas de la Universidad austral de Chile, las dimensiones que corresponden al largo del canal se hicieron de acuerdo a lo recomendado por la universidad de Iowa en el paper “CFD Process” Ref [13] .

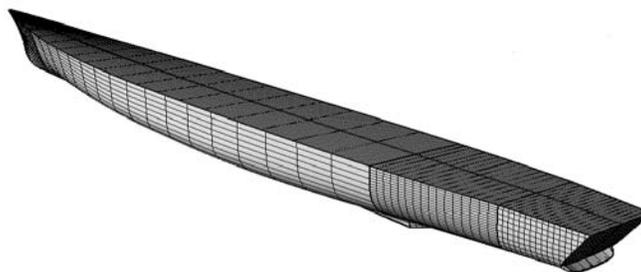


Figura N° 2: Embarcación con Flap de 5° inclinación modelada en RHINOCEROS

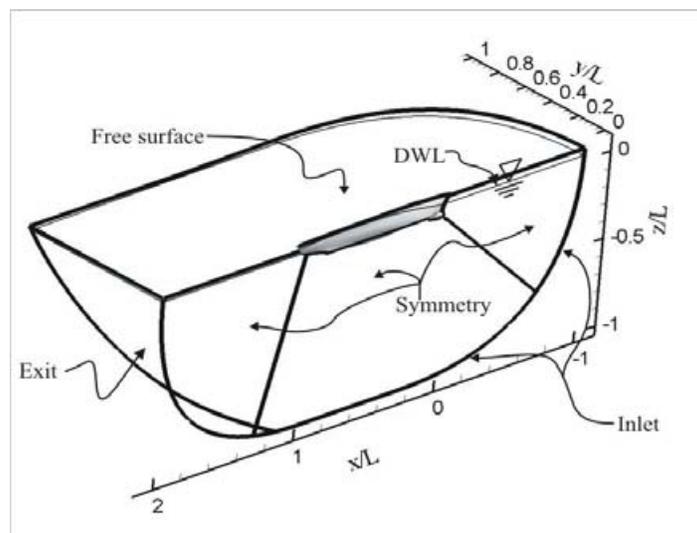


Figura N° 3: extraída de CFD Process, muestra las dimensiones del dominio en unidades de eslora.

### 2.2.3 Especificación del Mallado

El mallado se generó en el Software ICEM CFD V.11.0, optando por una malla híbrida, que se compone de un mallado no estructurado de elementos volumétricos tetraédricos y de superficies triangulares, este tipo de malla es más sencillo de generar y de ajustar a formas complejas, pero el costo computacional aumenta en comparación al estructurado, el otro componente es una inflación de los elementos del casco, incluyendo el flap en los casos correspondientes, generando una capa de enmallado estructurado alrededor del casco del tipo prismática, para mejorar la simulación de la capa limite. El proceso de mallar es el que mayor influencia ejerce sobre el resultado por lo que se requiere una malla de la mejor calidad posible.

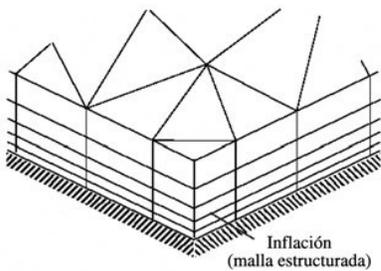


Figura N° 4: esquema de la inflación

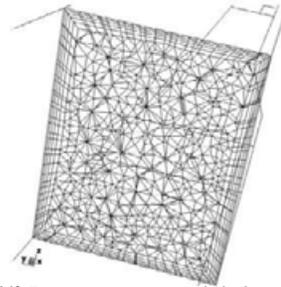


Figura N° 5: corte transversal de la malla no estructurada

En esta etapa para la condición sin flap se generó una malla medianamente fina, para las demás condiciones que incluyen el flap se utilizó un mallado más grueso que la situación anterior, en los dos casos se aplicó la inflación de la malla del casco, los tamaños de malla se indican en el siguiente cuadro.

	condición S/F	condición C/F
Casco	0.018	0.025
Sup. Libre	0.018	0.025
Flap	-	0.003
Entrada	1	1
Salida	1	1
Fondo	1	1
Cielo	1	1
Lado	1	1
Simetría	1	1

Tabla N° 2: Tamaños mallas no estructurada en escala de modelo [m]

- S/F; se refiere a la condición sin flap.
- C/F; se refiere a las condiciones con flap.

Altura inicial [m]	0.0000125
Números de capas	5

Tabla N° 3: Datos de la inflación aplicada a todo los casos

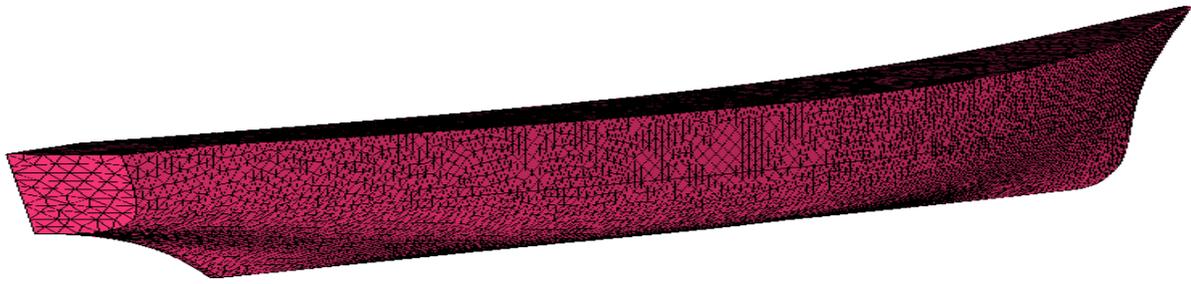


Figura N° 6: Mallado del casco de tamaño 0,018

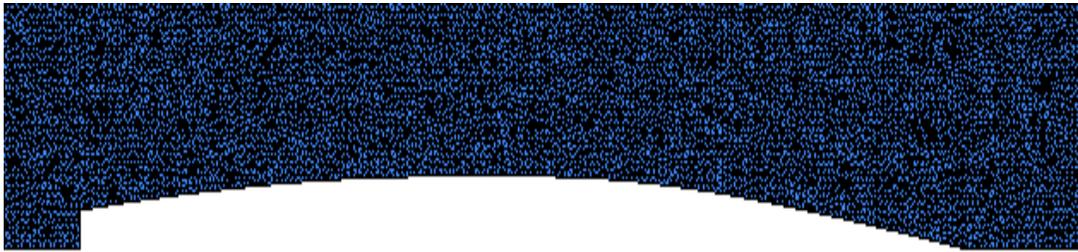


Figura N° 7: Mallado de superficie libre de tamaño 0,018

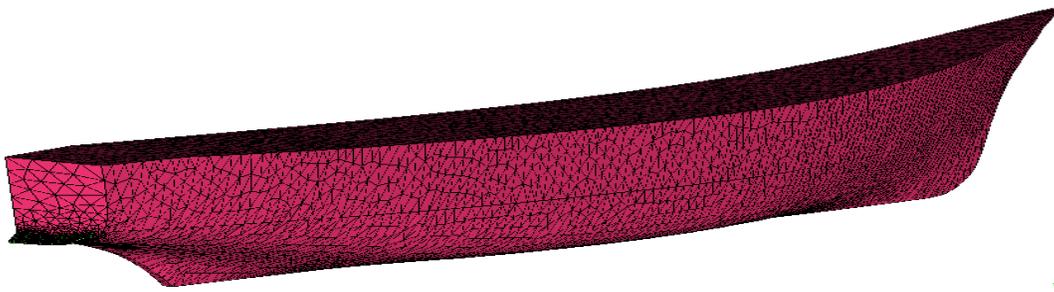


Figura N° 8: Mallado del casco con flap, tamaño 0,025

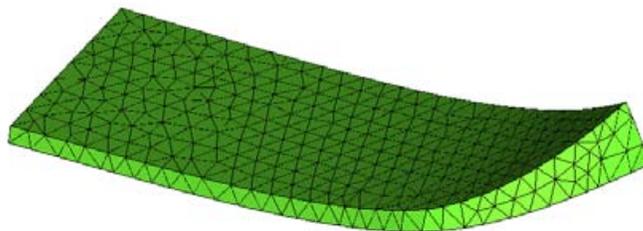


Figura N° 9: Mallado del flap con tamaño 0,003

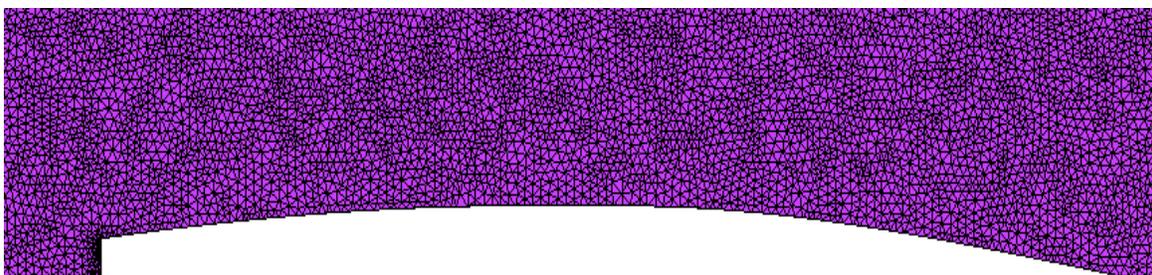


Figura N° 10: Mallado de superficie libre de tamaño 0,025

## 2.2.4 Modelo Matemático

El modelo teórico, basado en la ecuación de Navier – Stokes y la ecuación de continuidad, forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acoplados, no lineales, las ecuaciones de movimiento se aplican a un flujo tridimensional isotérmico de un fluido viscoso con propiedades físicas constantes. Este modelo matemático emplea varias simplificaciones que facilitan la solución, pero sin alterar su validez, estas simplificaciones se nombran a continuación.

- Flujo estacionario;  $\nabla \cdot (\rho \cdot U) = 0$ .
- Flujo incompresible;  $\nabla \cdot U = 0$ .
- Fluido con propiedades física constantes,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ .
- Fluido viscoso newtoniano.

### • Ecuaciones Fundamentales

EL comportamiento del fluido es gobernado por la necesidad de conservación de masa, momento y energía, adicionalmente deben ser establecidas relaciones entre las propiedades física del medio, en este caso del fluido, es decir su densidad y viscosidad. Las propiedades físicas y leyes que gobiernan el movimiento del fluido, se obtienen de la aplicación de los principios de la termodinámica y conservación de la mecánica que dan paso a tres ecuaciones fundamentales que son descritas a continuación.

#### a) Ecuación de continuidad

Expresa la conservación de la masa del flujo que entra y sale del dominio acotado para el problema, calculando los cambios de velocidades de este. Si se considera un flujo estable a través de un volumen, como un tanque con una entrada y una salida, la razón con la cual el fluido entra en el volumen debe ser igual a la razón con la que el fluido sale del volumen para que se cumpla el principio fundamental de conservación de masa.

La conservación de la masa, aplicada al flujo a través de un volumen rígido infinitesimal, es de la siguiente forma:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U) = 0 \quad (1.1)$$

Para un flujo incompresible como el agua se reduce a:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1.2)$$

Que en coordenadas cartesianas es:

$$\nabla = \left( \frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z} \right) \quad (1.3)$$

## b) Ecuación de la cantidad de Movimiento

La ecuación de movimiento de un fluido se obtiene aplicando la Segunda Ley de Newton, según la cual la variación de la cantidad de movimiento de una porción de fluido es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre esta porción.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2.1)$$

Partiendo de la segunda ley de Newton, se establece la ecuación de cantidad de movimiento lineal para un volumen de control.

$$\sum F = \frac{\delta}{\delta t} \int_{V_c} \rho \cdot U dV + \int_{SC} (\rho \cdot U) U ds \quad (2.2)$$

Se trata de una ecuación vectorial, en la que el primer término evalúa las variaciones temporales de la cantidad de movimiento dentro del volumen de control, mientras que el segundo término estudia la cantidad de movimiento que entra y sale por la superficie de control. Estas variaciones de cantidad de movimiento entre flujo entrante y saliente de la superficie de control, (considerando flujo permanente) dan lugar a una fuerza sobre el cuerpo sometido a estudio. La cantidad de movimiento obedece a una ley de conservación, lo cual significa que la cantidad de movimiento total de todo sistema cerrado (o sea uno que no es afectado por fuerzas exteriores, y cuyas fuerzas internas no son disipadoras) no puede ser cambiada y permanece constante en el tiempo.

Nuevamente aplicando a un volumen fijo infinitesimal, las ecuaciones de Navier-Stoke, para la cantidad de Movimiento pueden ser reducidas para un fluido Newtoniano incompresible (el fluido es isotrópico y el esfuerzo en un punto es linealmente dependiente de los niveles de deformación del fluido), con viscosidad constante entonces la ecuación queda:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho \left( \frac{\delta U}{\delta t} + (\nabla \cdot V) U \right) = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 U \quad (2.3)$$

Donde el término de la izquierda es la derivada sustancial de la velocidad, en la parte derecha de la ecuación, el primer término es la fuerza del cuerpo ( $f$ ) actuando sobre un cuerpo en el fluido, usualmente es la gravedad "g", para el agua, el segundo término es la presión local y el tercer término deriva del esfuerzo viscoso local en la superficie.

## c) Ecuación de la Conservación de la Energía:

La ley de conservación de la energía establece que el valor de la energía de un sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo. La conservación de la energía de un sistema esta ligada al hecho de que las ecuaciones de evolución sean independientes del instante considerado. Es decir, el hecho de que en su evolución temporal de un sistema todos los instantes de tiempo sean equivalentes, hace que las magnitudes del mismo varíen coordinadamente de tal manera que cierta magnitud llamada energía permanezca constante. La ecuación de la conservación de la energía puede expresarse mediante la ecuación:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_c} \left( \frac{U^2}{2} + \Omega \right) \rho dV = \int_{S_c} U \tau n ds - \int_{V_c} \tau \frac{\delta U}{\delta x} dV \quad (3.1)$$

Donde el término de la izquierda es la variación de la energía potencial y cinética del sistema, en el lado derecho de la ecuación el primer término es el trabajo de las fuerzas de la superficie, el segundo término de la izquierda es el incremento de la energía interna.

### 2.2.5 Modelo de Turbulencia

Para la condición sin Flap se utilizaron los modelos de turbulencia SST (Shear Stress Transport) y k-ε, en las situaciones con flap solo se utilizó el modelo k-ε, para simular el flujo turbulento, estos modelos están basados en la solución de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (promedio de Reynolds o RANS).

Un flujo es definido como turbulento si su comportamiento es irregular, rotacional, intermitente, altamente desordenado, caótico (determinístico), difusivo ó disipativo. La turbulencia es inherentemente no estacionaria, tridimensional produciendo incrementos en la transferencia de calor, de masa y de momento. Los flujos turbulentos pueden ser representados como un campo de vórtices interactuando con un amplio espectro de escalas temporales y espaciales.

Los flujos turbulentos son asociados con esfuerzos de arrastre (*drag*) y caídas de presión importantes. Dentro de los métodos usuales para simular procesos turbulentos destacan los métodos de simulación numérica directa (*DNS*) Ref [7], de simulación de grandes vórtices (*LES*) Ref [7] y los basados en promediar temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes (*RANS*). La última de estas técnicas es la que demanda un menor costo computacional, y al mismo tiempo ha demostrado buenos resultados cuando se la emplea para resolver problemas tecnológicos reales, con geometrías y condiciones de contornos complejas.

Los modelos de turbulencia son utilizados para predecir los efectos de la turbulencia en un flujo sin necesidad de resolver todas las pequeñas escalas de las fluctuaciones turbulentas. Algunos de estos modelos tienen aplicaciones específicas, mientras que otros pueden ser aplicados en un amplio rango de flujos con un grado razonable de exactitud. Los modelos *RANS* pueden ser clasificados en modelos de viscosidad de remolino y en modelos de las tensiones de Reynolds

Estos modelos asumen que el flujo es completamente turbulento, por lo que la capa límite que se obtiene como resultado son turbulentas desde su punto de inicio. Existen algunos modelos especiales que son capaces de simular capa límite laminar y su transición a régimen turbulento, pero son muy complejos y actualmente no están implementados en códigos de CFD comerciales.

- **Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (Reynold, Averaged Nevier-Stokes, *RANS*)**

El planteamiento de la turbulencia se basa en considerar que cualquier variable del flujo se puede descomponer en dos partes, un valor promediado y una fluctuación, de la forma:

$$q = \bar{q} + q' \tag{4.1}$$

Donde  $\bar{q}$  es el promedio y  $q'$  es la fluctuación

Las fluctuaciones son asumidas al azar. Esta promediación elimina valores que involucran solo un componente de fluctuación, pero no elimina los que involucran dos, esto es:

$$\overline{q'} = 0, \quad \overline{q'q'} \neq 0 \tag{4.2}$$

La ecuación de la conservación de la masa queda de la misma forma que esta descrita anteriormente con el número 1.1, pero con las variables originales de flujo remplazadas por sus valores promediados a razón del tiempo. La forma de la ecuación de Reynolds promediadas a razón de los momentos es más compleja y debe ser ilustrada en relación a su forma, en una notación de tensores compactos:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\overline{\rho q_i}) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\overline{\rho q_i q_j}) = -\frac{\delta \overline{p}}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j}(\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho q_i q_j}) \quad (4.3)$$

Donde el esfuerzo laminar  $\tau_{ij}$  es:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\delta \overline{q_i}}{\delta x_j} + \frac{\delta \overline{q_j}}{\delta x_i} \right) \quad (4.4)$$

El esfuerzo aparente debido a la turbulencia es llamado el esfuerzo de Reynolds y puede ser descrito en términos de un tensor de esfuerzo turbulento.

$$\overline{(\tau_{ij})}_{turb} = -\overline{\rho q_i q_j} \quad (4.5)$$

Que representa el esfuerzo aparente debido al transporte de momento por las fluctuaciones de la turbulencia y las deformaciones atribuidas a estas fluctuaciones. La ecuación de Reynolds no puede ser resuelta a no ser que el nuevo esfuerzo inducido por la turbulencia pueda ser relacionado con las variables de flujo temporales. Este problema es generalmente solucionado mediante un modelo de turbulencia.

- **Eddy Viscosity Methods**

Estos métodos requieren calcular un campo escalar para la viscosidad turbulenta ya que el tensor de Reynolds se asume múltiplo de la identidad. Entre los métodos más referenciados para el cálculo de la viscosidad turbulenta podemos mencionar:

Modelos algébricos, dónde  $\nu_t$  se obtiene a partir de correlaciones empíricas sin necesidad de resolver ninguna ecuación adicional a las planteadas en el modelo laminar. Como ejemplos de este modelo podemos mencionar el modelo LES de Smagorinsky Ref [7], el modelo de la longitud de mezcla de Prandtl Ref [5] y el modelo Baldwin-Lomax Ref [5].

Modelos basados en ecuaciones de transporte, donde se transportan cantidades que luego sirven para calcular una expresión de  $\nu_t$ . Hay modelos de una sola ecuación o de dos ecuaciones. Ejemplos de estos últimos modelos son el standard  $k-\epsilon$ , su versión análoga  $k-\omega$  los cuales serán descritos a continuación.

**a) Modelo  $k-\epsilon$**

Este modelo es uno de los más generalizados, siendo implementado en la mayoría de los códigos de dinámica de fluidos computacional, y es considerado el modelo estándar de la industria, este modelo ha sido extensamente validado y ha demostrado ser estable. En el software CFX el modelo  $k-\epsilon$  utiliza la aproximación de la función de pared para mejorar la precisión de los resultados cuando el mallado en la región cercana a la pared es muy fino.

La energía cinética  $k$ , está definida como la variación de las fluctuaciones en la velocidad y tiene las dimensiones  $[m^2/s^2]$ ,  $\varepsilon$  es la disipación de remolinos turbulentos (la tasa a la cual las fluctuaciones de velocidad se disipan) y las dimensiones son  $[m^2/s^3]$ .

El modelo  $k-\varepsilon$  está basado en el concepto de la viscosidad remolino, y asume que la viscosidad turbulenta está relacionada a la energía cinética turbulenta y la disipación mediante la relación:

$$\mu_t = C_\mu \rho \left( \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (4.6)$$

Donde,  $C_\mu$  es una constante empírica. Los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  vienen directamente de las ecuaciones diferenciales de transporte de la energía cinética turbulenta y de la tasa de disipación turbulenta.

### b) Modelo Shear Stress Transport (SST, $k-\omega$ )

Fue diseñado para dar las mejores predicciones en el inicio de la cantidad de separación del flujo bajo gradientes adversos de la presión por la inclusión de los efectos del transporte en la formulación de la vorticidad-viscosidad. Esto da lugar a una mejora importante en términos de predicciones de la separación del flujo. En este modelo  $\omega$  representa la disipación de energía por unidad de volumen y tiempo y tiene dimensiones  $[s^{-1}]$ , estando está relacionada con la energía cinética por medio de la relación:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.7)$$

## 2.2.6 Especificación de las Propiedades del Flujo

Las constantes de viscosidad, densidad, temperatura, presión, se consideraron de acuerdo a las condiciones ambientales del canal para posteriormente ser comparadas con el modelo experimental.

## 2.2.7 Definición de las Condiciones de Contorno

Se trata básicamente de aquellas condiciones que controlan los valores de ciertas variables en los límites del dominio.

Las características geométricas del modelo permitieron hacer la simulación con solo la mitad de la geometría, con el propósito de ahorrar cálculos, por consiguiente un ahorro de tiempo, aunque se sabe que esta simplificación puede inducir a un cierto porcentaje de error en los resultados finales. Debido a que es una aproximación a la realidad, despreciando los efectos de interferencia que pueden ocurrir considerando la otra mitad de la geometría.

Las condiciones de contorno fueron impuestas en el dominio como sigue a continuación:

### a) Entrada

Regimen de flujo subsónico,

$$U_x = U_m; \quad U_y = 0; \quad U_z = 0$$

### b) Casco

Condición de no deslizamiento

### c) Salida

Regimen de flujo subsónico

$P = P_{rs}$  (presión de salida)

### d) Paredes del costado y fondo

Condición de no deslizamiento:

$$U_x = U_m; \quad U_y = 0; \quad U_z = 0$$

### e) Pared de tope

Condición de libre deslizamiento

## 2.2.8 Definición de las Condiciones Iniciales

La embarcación se consideró con un calado parejo, despreciando el trimado dinámico, el valor del calado fue el mismo que en el modelo para el canal de pruebas.

## 2.2.9 Parámetros de Solución

Se emplearon los parámetros adecuados con el objetivo de obtener, en la medida de lo posible, una buena convergencia, para esto se aplicó una alta resolución y un criterio límite de convergencia residual de  $1.0e-4$  en valores RMS.

## 2.2.10 Proceso de Cálculo

En esta etapa se limitó a 300 iteraciones con un paso de  $0,125[s]$  de tiempo. En el proceso de cálculo se agregó un monitor a los que ya están definidos por defecto para evaluar la convergencia de las fuerzas que actúan sobre la embarcación, en la mayoría de los casos se decidió que la convergencia era suficientemente buena, por lo que se procedió a detener el proceso iterativo, para obtener la respuesta final

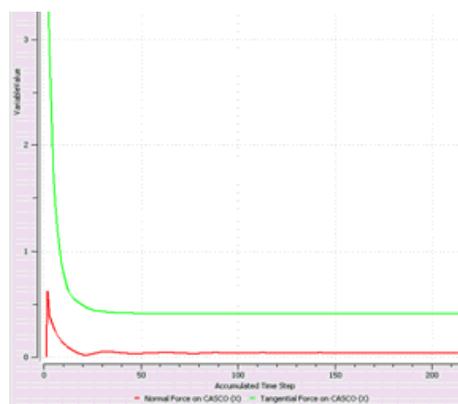


Figura N° 11: cfx-solver monitor de fuerzas sobre el casco

## 2.2.11 Análisis de Solución

En esta etapa se analizó si los datos entregados en la etapa anterior de cálculo son correctos, validándolos con los obtenidos en el canal, para lo cual se utilizó una herramienta módulo que posee el código CFX de pos proceso gráfico que facilita el estudio y análisis de los resultados.

## 2.2.12 Recursos Computacionales

Se utilizó un computador de escritorio armado especialmente para este tipo de aplicaciones, con las siguientes características:

Procesador Intel Pentium de cuatro núcleos a una velocidad de 2.6 GHZ.

8 Gb de memoria RAM, marca Kingston.

Tarjeta grafica Ge Force serie 8400 GS de 512 MB

Disco duro SATA de 500 GB

Sistema Operativo Windows Xp versión 64 bit

## 3. Procedimiento Simulación CFD

### 3.1 Procesamiento de Datos en CFX

#### 3.1.1 Ansys CFX

Es un paquete informático diseñado para el cálculo de la dinámica a través de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, de forma discreta, para cualquier flujo laminar o turbulento, es capaz de resolver casi cualquier problema en esta materia, haciéndolo muy útil para la rama de Arquitectura Naval, ya que no hay limitaciones de forma en el cálculo de resistencia al avance por este método, también se puede agregar prácticamente cualquier apéndice al casco. Ansys CFX se compone de tres módulos estructurados de forma que pasan entre ellos la información necesaria para el análisis CFD, con los cuales se pueden simular flujos permanentes, transitorios, laminares, turbulentos, subsónicos entre otros. Los módulos son CFX-Pre y CFX-post para el procesamiento de datos, CFX-Solver para la resolución de las ecuaciones.

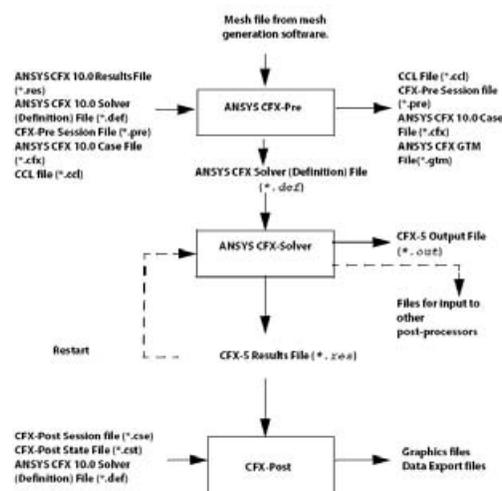


Figura N° 12: Estructura de funcionamiento Ansys CFX

### 3.1.2 CFX-Pre

Este el módulo de pre proceso de los datos, permite importar múltiples mallas, usando la más apropiada para geometrías complejas, las especificaciones físicas del flujo como las condiciones de contorno e iniciales, y los parámetros del solucionador, son especificados en este módulo. En un rango completo de condiciones que incluyen, entrada, salida, abertura, conjuntamente con las condiciones del límite del modelo.

- **Barra de Herramientas**

- Import Mesh: esta herramienta adapta el mallado generado en ICEM u otro programa mallador que tenga compatibilidad con CFX.
- Create Material: con esta herramienta se pueden crear nuevos fluidos por el usuario, especificando sus propiedades con la densidad, viscosidad, etc., los que pueen ser utilizados en la simulación del problema.
- Expressions: si es necesario, con esta herramienta crea nuevas expresiones para definir las condiciones de contorno, es muy útil crear estas expresiones cuando la simulación se repetirá varias veces con mallas diferentes.
- Simulation type: define el tipo de simulación entre transiente o permanente, condicionando los procesos de cálculo y el pre proceso de los datos.
- Create Domain: crea el dominio de la simulación, definiendo el volumen de control.
- Boundary Condition: crea las condiciones de contorno del problema, ingresando los datos necesarios para la resolución del problema.
- Global Initialisation: define los parámetros de iniciación de la resolución del problema, ingresando los datos necesarios
- Solver control: se definan los parámetros de convergencia de la resolución de las ecuaciones.

- **Ingresos de los Datos a CFX-Pre**

En este punto de la guía se privilegiaran las imágenes obtenidas de CFX-Pre, para la generación de condiciones de contorno, ya que son más aclaratorias que comentar el procedimiento, por tratarse la mayor parte de una elección de las funciones y métodos que se incluyen en el programa, e ingreso de valores necesarios.

#### a) Abrir CFX-Pre

Ingresar a **Ansys-CFX v.11 Launcher** en “Inicio/ ANSYS 11.0/CFX/ANSYS CFX 11.0.”



Figura N° 13: CFX Launcher

En “Working Directory” seleccionar el directorio de trabajo, y seleccionar CFX-Pre. Luego presionar en “Create New Simulation”, en el cuadro que parece a continuación elegir “general”, luego presionar Ok.



Figura N° 14: cuadro de iniciación de modulo CFX-Pre

## b) Importar Malla

Ir a “Import Mesh”, luego en el cuadro de diálogo seleccionar el tipo de archivo a traer en “File Type” se selecciona de la lista desplegable la extensión “ICEM CFD (\*.cfx \*.cfx5 \*.msh)” e Importar la malla generada en ICEM CFD.

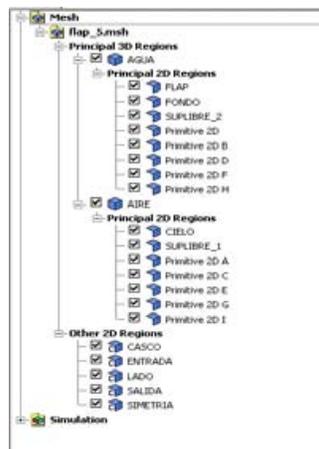


Figura N° 15: Partes del a malla exportada

## c) Ingresar Expresiones

Para esto se debe ir a “Create Expressions” creando las siguientes expresiones.

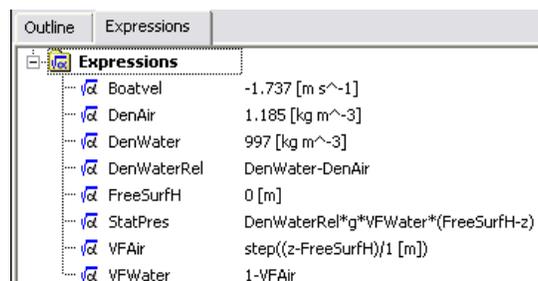


Figura N° 16: expresiones en CFX

### • Definición de las Expresiones

- Boatvel: velocidad de la embarcación en [m/s], Aclarar que la dirección de la velocidad es contraria a la dirección del casco, en este caso la dirección del casco está hacia +x por lo que la velocidad tiene que ser en el sentido -x.
- DenAir: densidad correspondiente al aire en [kg/m<sup>3</sup>].
- DenWater: densidad correspondiente al agua en [kg/m<sup>3</sup>].
- DenWaterRel: densidad relativa del agua en [kg/m<sup>3</sup>].

- FreeSurfH: posición de la superficie libre en la coordenada Z en [m].
- StatPres: presión estática inicial en [Pa].
- VFAir: porción de volumen de aire.
- VFWater: Porción de volumen de agua.

**d) Definición del Tipo de Estudio**

En “Simulation Type”, elegir la opción de estudio permanente.

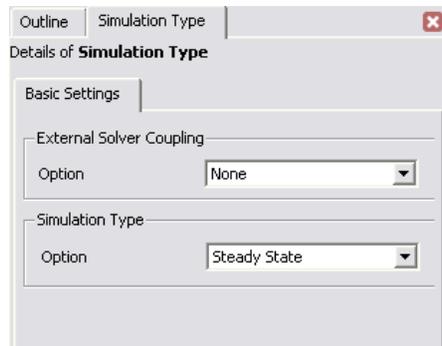


Figura N° 17: Configuración básica del modelo

**c) Definición del Dominio**

En “Create Domain” crear un nuevo dominio con el nombre “Tanke”, donde se definirá el volumen de control para el problema a estudiar, y las condiciones de los fluidos, a continuación se muestran imágenes con las condiciones para este estudio:

- **General Options**

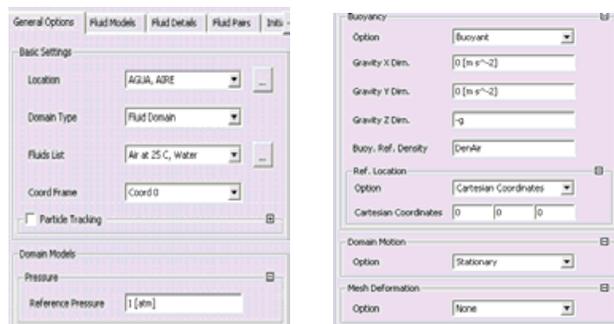


Figura N° 18: configuración de las opciones generales

- **Fluid Models**

Recordar que los modelos de turbulencia fueron Shear Stress Transport y K-ε.

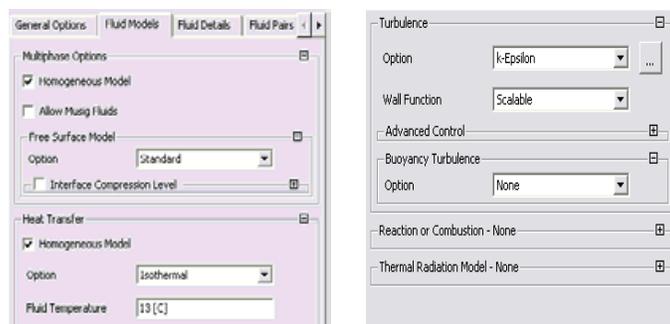


Figura N° 19: Configuración del modelo del fluido

- **Fluid Details**

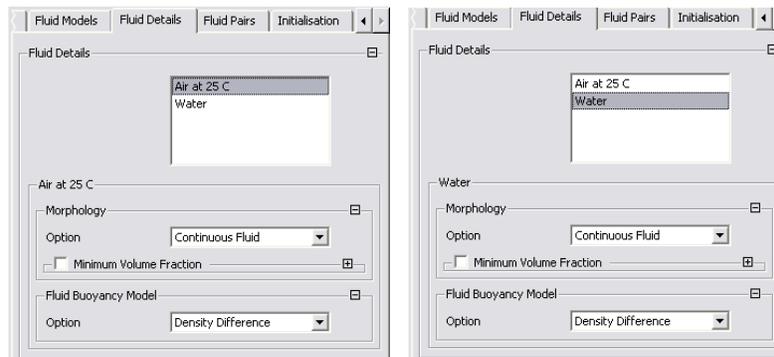


Figura N° 20: Detalles del Fluido

- **Fluid Pairs**

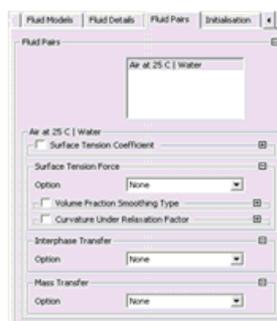


Figura N° 21: Configuración de la interacción entre los fluidos

### d) Ingresar las Condiciones de Contorno

En “Boundary Condition”, crear las siguientes condiciones de contorno:

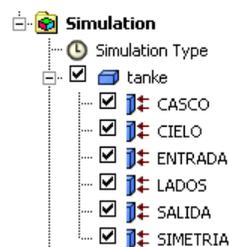


Figura N° 22: Condiciones de contornos

- **Casco**

En este paso recordar que el estudio tiene dos situaciones en general, con flap y sin flap. Para estos casos las condiciones son las siguientes:

Sin Flap

Con Flap

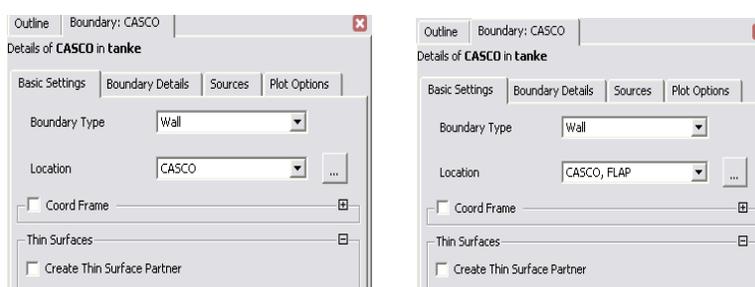


Figura N° 23: detalles de la locación para el contorno del casco

- Detalles de las condiciones para las dos situaciones

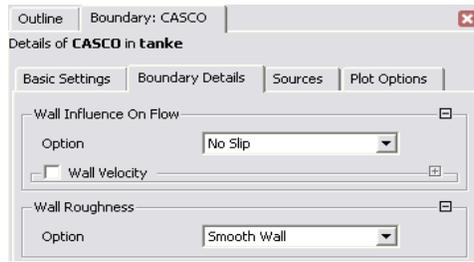


Figura N° 24: detalles del contorno del casco

- Cielo

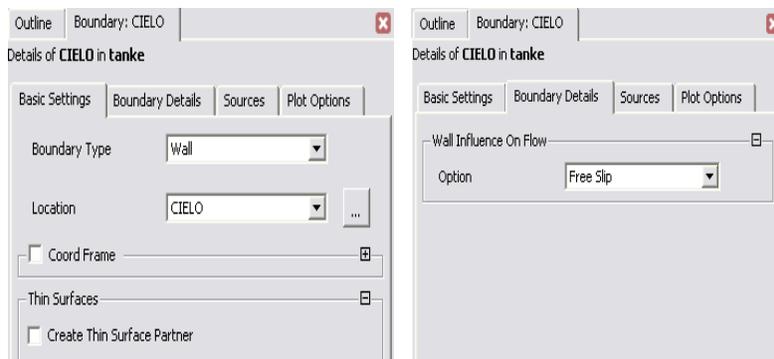


Figura N° 25: detalles de la locación y condición de contorno para el tope del tanque

- Entrada

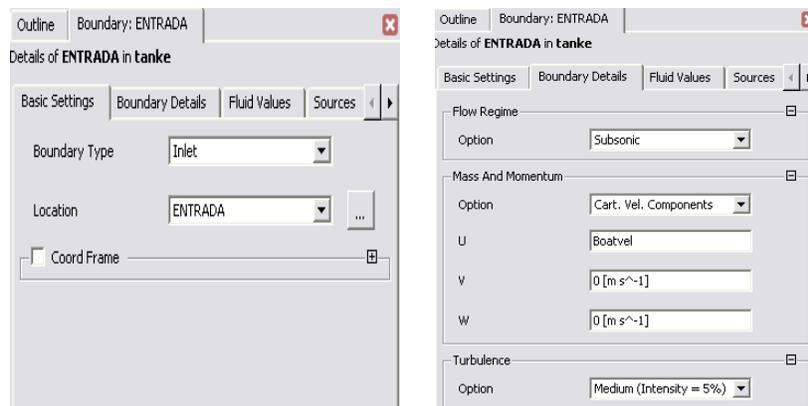


Figura N° 26: detalles de la locación y condición de contorno para la entrada del flujo al tanque

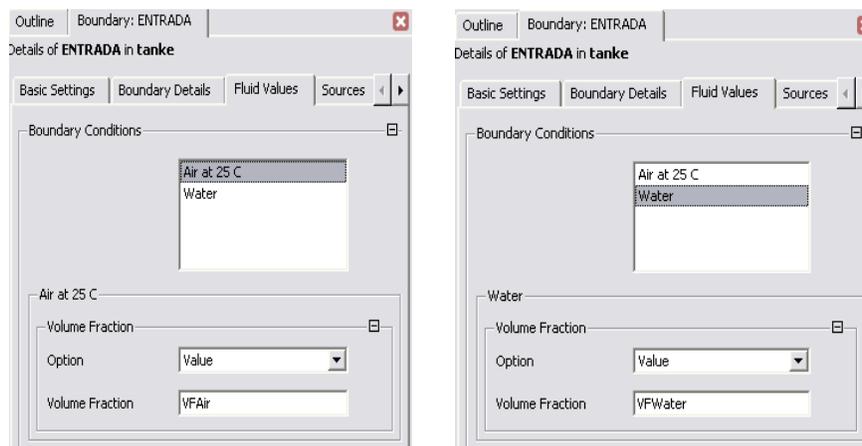


Figura N° 27: detalles de los fluidos en la entrada

- **Lados**

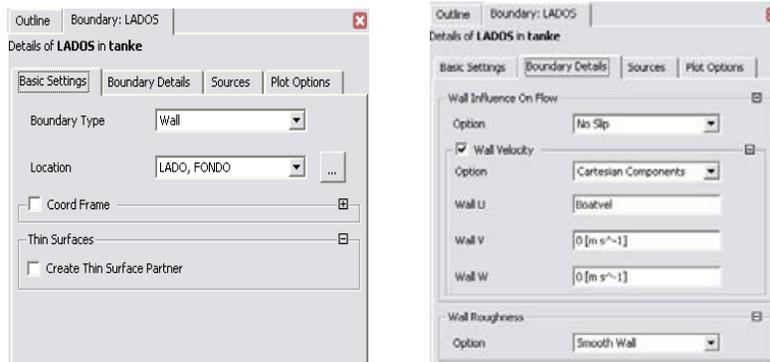


Figura N° 28: detalles de la locación y condición de contorno del lado y fondo

- **Salida**

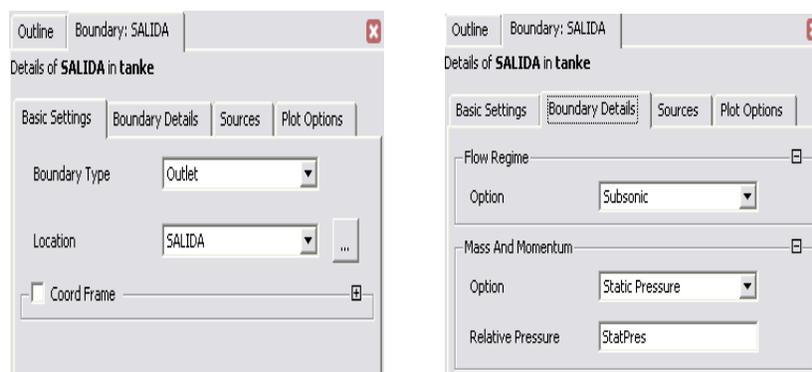


Figura N° 29: detalles de la locación y condición de contorno de salida

- **Simetría**

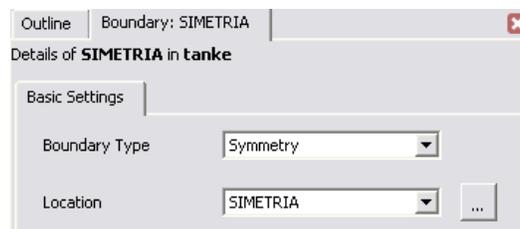


Figura N° 30: detalles de la locación de la simetría

**e) Ingresar los Datos Iniciales**

En “Global Initialisation”, ingresar los siguientes datos:

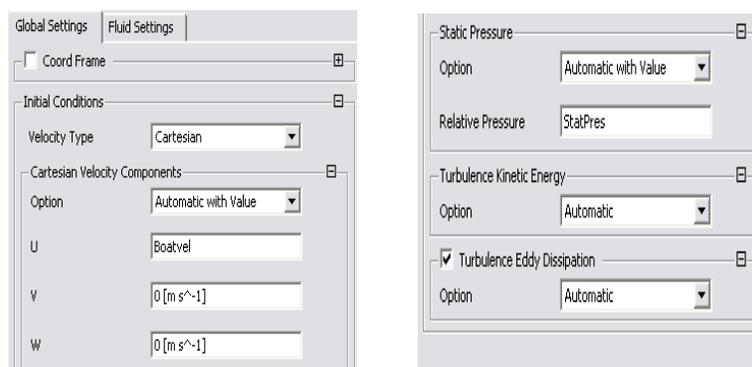


Figura N° 31: configuración global de los datos de inicio

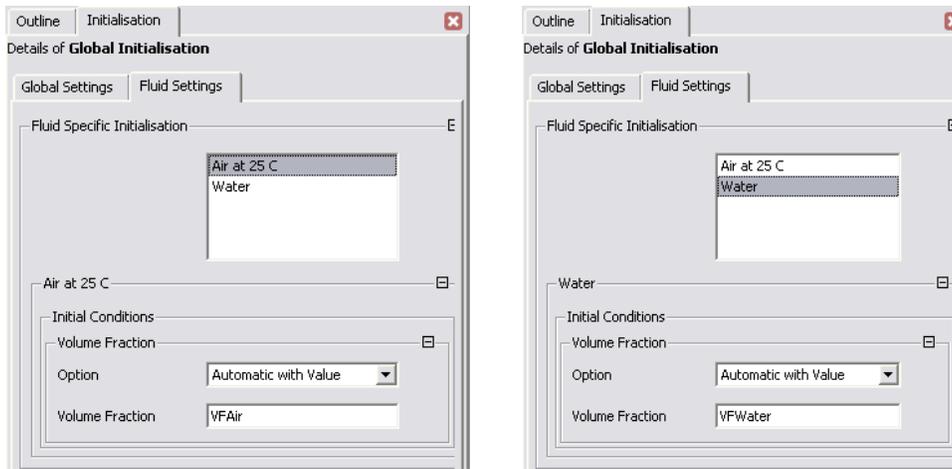


Figura N° 32: configuración del fluido al inicio

## f) Configurar los Parámetros de la Solución

En **Solver Control**, ingresar los parámetros de cálculo y resolución que se muestran a continuación:

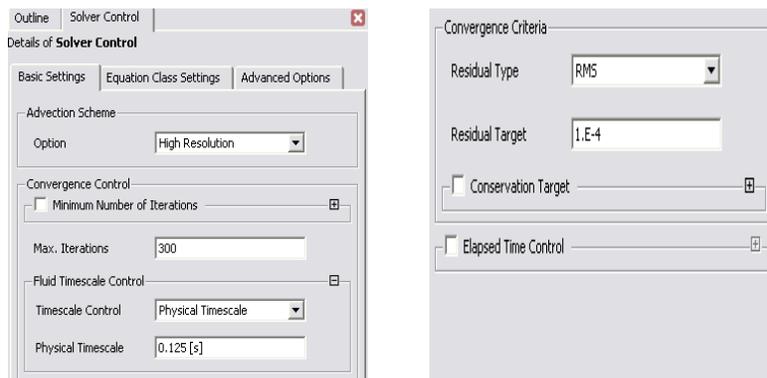


Figura N° 33: configuración de los parámetros de solución

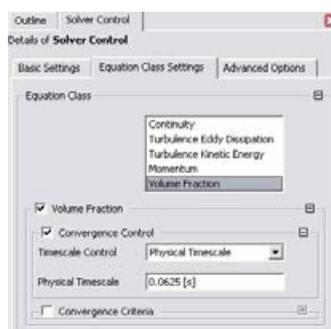


Figura N° 34: configuración de los parámetros de solución

## g) Generación del Archivo de Cálculo

Después de haber terminado todos los pasos anteriores se debe generar el archivo de cálculo en "Write Solver File". Generando un archivo \*.def y abriendo CFX-Solver.

### 3.1.3 CFX-Solver

Este módulo encuentra todas las respuestas para las variables de la simulación para el problema especificado en CFX-Pre. Una de las características más importantes de este solver, es el uso de un solucionador acoplado, en el cual todas las ecuaciones hidrodinámicas son solucionadas como un solo sistema, este método es más rápido que el solucionador

segregado, obteniendo con un menor número de iteraciones la convergencia de la solución del fluido.

- **Manipulación de CFX-Solver**

a) se comienza a resolver las ecuaciones en Start Run

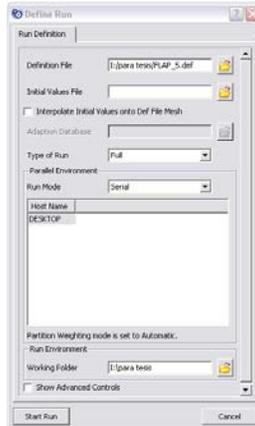


Figura N° 35: Cuadro de iniciación de calculo

b) una vez corriendo el programa se puede insertar un nuevo monitor de variable agregándolo a los que están por defecto, para esto poner el cursor en la barra de herramientas de CFX-Solver, presionar el botón derecho del mouse, en el menú desplegable elegir la opción “New Monitor”, luego en el cuadro elegir la variable que se quiere monitorear, en este caso fueron las fuerzas que actúan sobre el casco.

c) una vez terminado los paso de iteración o se haya cumplido los parámetros de convergencia se generara un archivo \*.res que contiene los resultados de la solución, los que son analizados en CFX-Post.

### 3.1.4 CFX-Post

Este módulo Provee las herramientas interactivas de gráficos de pos procesamiento de avanzada tecnología para analizar y presentar los resultados de simulación ANSYS CFX.

- Las características importantes incluyen:
- El pos procesamiento cuantitativo
- La generación de informe
- La línea de comando, sesión de archivo o el estado del archivo
- Usar las variables creadas por el usuario
- La generación de una colección variada de objetos gráficos.

- **Barra de Herramientas**

- Location: este menú cuenta con diferentes opciones de elementos gráficos, como planos, líneas, puntos, etc., para insertar en el dominio de la solución con el objeto de analizar los resultados gráficamente.

- Vector: esta herramienta se inserta en la solución asignándole alguna variable como presión, velocidad, etc. Mostrando las variaciones de ella, dentro del dominio especificado.
- Contour: al igual que el vector, muestra las variaciones de alguna variable asignada, pero no en forma de vector sino como contornos asignados a un dominio.
- Streamline: muestra la dirección y velocidad a través de líneas, de una o varias partículas del flujo asignado, en otras palabras muestra las líneas de corrientes que sigue el fluido.
- Chart: esta herramienta crea gráficos a partir de líneas generadas en CFX-Post.
- Function calculator: esta herramienta contiene los valores de las variables que se calcularon en la resolución del problema simulado.

- **Análisis de datos en CFX-Post**

### a) Resistencia al Avance

Para conocer este resultado se debe ir a la pestaña “Tool”, luego a “Function Calculator”, o directamente al icono de esta herramienta, luego se escoge la función “Force” y locación casco, dirección x, luego se presiona el botón calculate.

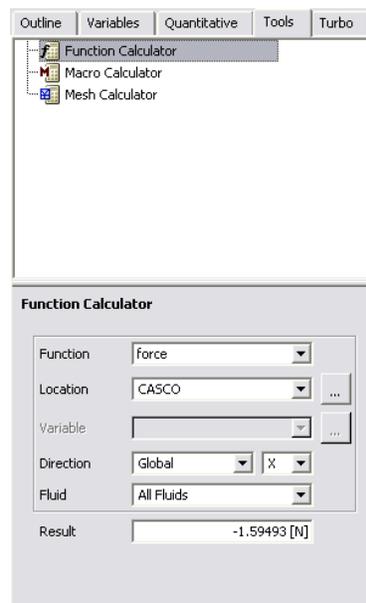


Figura Nº 36: cálculo de la resistencia al avance

### b) Tren de Olas

Para visualizar el tren de ola se debe insertar “Isosurface” del menú “Location” con el nombre “tren de olas “. En los detalles de la Isosurface se debe dejar como variable: “Water.Volume Fraction” y como valor se usa el 0.5 para ver la diferencia de alturas en colores en la pestaña colores se elije el modo variable y en el cuadro de la variable se deja “Z” el rango debe ser local. A continuación se muestran los cuadros que se deben rellenar

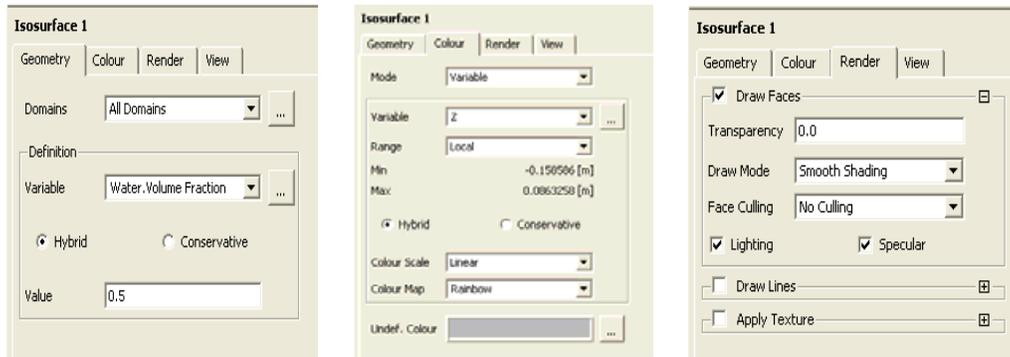


Figura N° 37: Configuración de la superficie libre

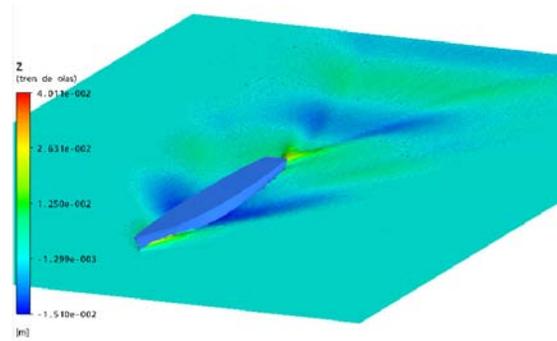


Figura N° 38: Tren de Ola 3D

### c) Generar Cortes de olas Paralelas al Buque

En la barra de herramienta insertar “contour” nombrarlo corte de olas, rellenar el siguiente cuadro. Los valores “Value List” dependen de las dimensiones del modelo.



Figura N° 39: Generación de cortes de ola

Luego se crean “Polyline” El número de polilíneas está definido por la cantidad de cortes de olas que se desea hacer más el corte que se realice al contorno de la carena. En Location insertar una polyline nombrarla “Ola1” luego ingresar los siguientes datos:

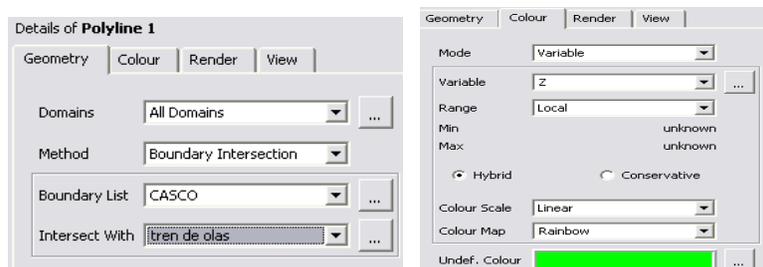


Figura N° 40: Generación del contorno de ola en el casco

continuación se crea el número de polilíneas, acorde a los valores de lista definidos anteriormente, con el botón derecho del mouse se selecciona “Ola1” duplicándola con la opción “Duplicate”, nombrándola “Ola2, y Ola3” y cambiando el método de la línea por “contour”.

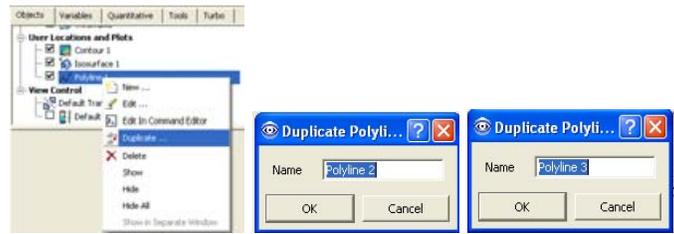


Figura N° 41: reproducción de las líneas de cortes de ola

#### d) Gráficos de los Cortes de Olas

El paso siguiente es crear un gráfico con las líneas que se han creado en el punto anterior, para generar el grafico se elige de la barra de herramienta el botón “Chart”, nombrándolo corte de ola rellorando los siguientes cuadros:



Figura N° 42: Configuración del gráfico

Luego apretar apply, luego en New Line, y elegir la siguiente línea. Repetir el proceso.

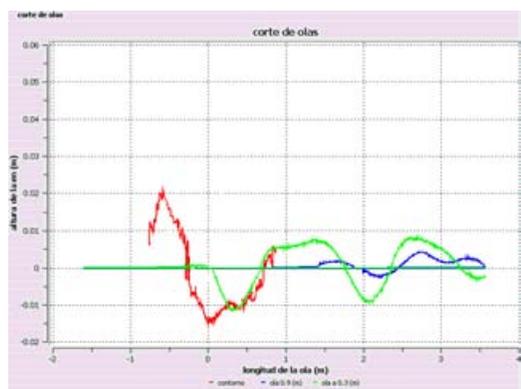


Figura N° 43: Grafico cortes de ola en CFX.

### a) Visualizar las Presiones Dinámicas

En la barra de herramienta ir “contour”, nombrarlo presiones, rellenar el cuadro con las siguientes opciones:

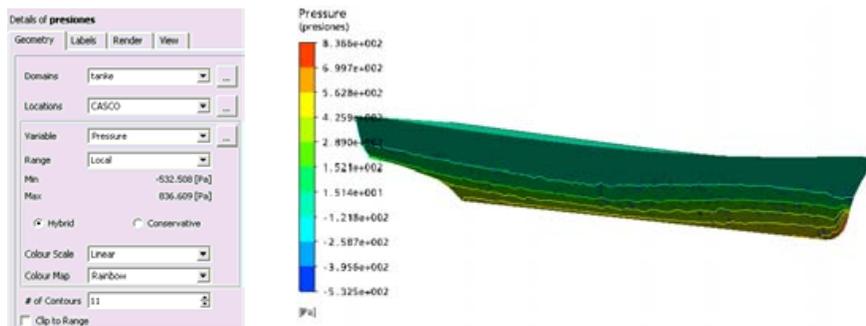


Figura N° 44: configuración del contorno y Distribución de presiones en el casco

Con el mismo procedimiento anterior se puede visualizar la velocidad del flujo al rededor de casco, solo cambiando la locación por el tren de ola y la variable por la velocidad superficial del agua.

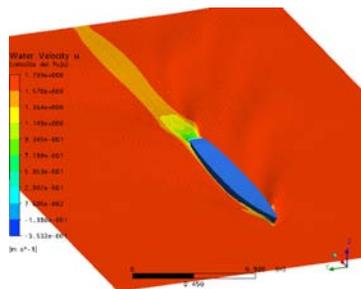


Figura N° 45: Velocidades del flujo en la superficie libre

### b) Insertar Líneas de Corriente,

de la barra de herramienta seleccionar “Streamline” luego rellenar el cuadro con las siguientes opciones:



Figura N° 46: Configuración de las líneas de corrientes en el casco

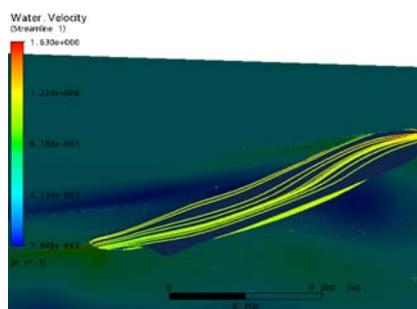


Figura N° 47: Líneas de Corrientes en el Casco

## 4. Análisis de Resultados

### 4.1 Situación de Casco Sin Flap

En este caso se procedió a generar distintos métodos de ensayo, según la estructura de trabajo establecida, con el objetivo de comparar y seleccionar, la formulación de turbulencia que mostró mejores resultados, para luego reproducirlos en los demás casos, ya que este es el más simple de los casos, lo que agiliza la obtención de respuestas en cuanto a tiempo y costo computacional, permitiendo mejorar la calidad de malla y resultados. También hay que tener en cuenta que este caso será comparado con los que incluyen el flap, para conocer la mejor alternativa en la optimización de la resistencia al avance, lo que dió origen a esta espiral de pruebas de manera de obtener el mejor punto de partida posible para los estudios en cuestión, estudio que por lo de más no termina con este informe si no que continua en la espiral, siendo este solo el principio. Como aclaración, en esta y todas las situaciones la curva de comparación y validación para los resultados obtenidos en CFX es la curva de ensayos experimentales sin estimuladores de turbulencia, aunque se ha agregado la curva que los incluye solo como referencia y evitar confusiones con la resistencia real que es utilizada para calcular a escala natural, el objetivo del trabajo es hacer una comparación y validación del modelo numérico contra modelo experimental, en estado natural de las situaciones de estudio.

Los datos obtenidos se pueden apreciar en las tablas y gráficos que se muestran a continuación antes de eso se muestran el significado de las abreviaciones para la interpretación de los gráficos.

**Tabla Nº 4: Cuadro de Abreviaciones**

abreviaciones	significado
Exp (1)	Resistencia experimental sin estimuladores.
Exp (2)	Resistencia experimental con estimuladores.
CFX (1)	Resistencia por CFX sin aplicar la inflación con modelo de turbulencia Shear Stress Transport.
CFX (2)	Resistencia por cfx con inflación y modelo de turbulencia k-e.
CFX (3)	Resistencia por cfx con inflación y modelo de turbulencia Shear Stress Transport.
Resistencia v.	Resistencia viscosa por CFX.
Resistencia p.	Resistencia por presión (ola) por CFX.
Resistencia f.	Resistencia por fricción por ITTC.
Resistencia r.	Resistencia residual experimental.

Cuadro para la interpretación de las tablas y gráficos.

**Tabla N° 5: Cuadro Resumen de Resistencias**

Filas	A	B	C	D	E	F	G	H
$V_m$ [m/s]	Exp (1) [gr]	Exp (2) [gr]	CFX (1) [gr]	CFX (2) [gr]	CFX (3) [gr]	Dif. A-C (%)	Dif. A-D (%)	Dif. A-E (%)
0.797	54.2	45.3	46.55	58.71	91.92	16.44	7.67	41.03
0.977	84.3	75.6	83.61	92.46	119.83	0.82	8.83	29.65
1.248	146.2	134.7	136.68	155.54	171.41	6.97	6.00	14.71
1.497	218.1	215.4	168.07	227.13	239.13	29.77	3.97	8.79
1.732	350.1	353.7	256.2	333.22	338.16	31.98	5.07	3.53
					Prom	17.20	6.31	19.54

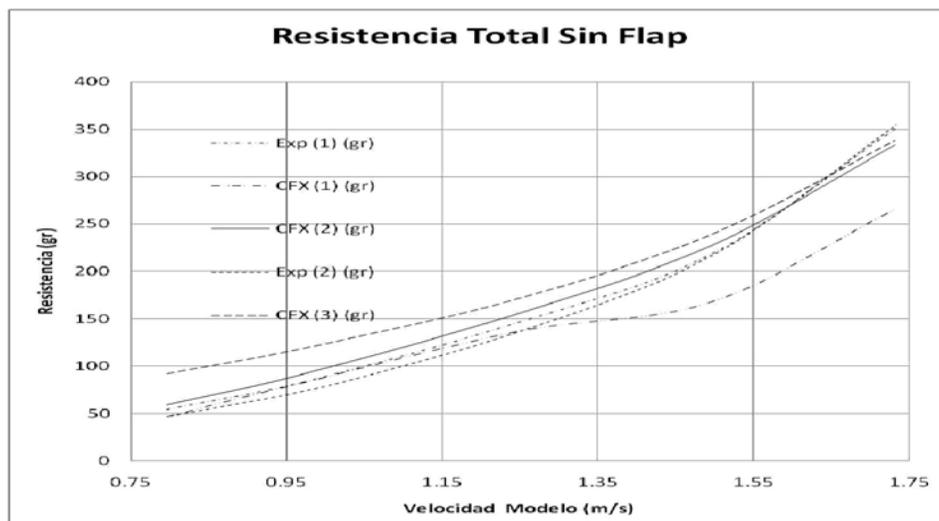


Figura N° 48: Gráfico de la Resistencia Total

De los resultados anteriores los mejores se obtuvieron con el modelo de turbulencia k- $\epsilon$ , por lo que el resto del estudio y analisis se realizaron con este modelo.

Tabla N° 6: Cuadro de las Componente de la Resistencia Total

$V_m$ [m/s]	Resistencia V. (CfX-gr)	Resistencia P. (CfX-gr)	Resistencia f. (ITTC-gr)	Resistencia r. (exp-gr)
0.797	4.65E+01	1.22E+01	4.30E+01	1.12E+01
0.977	7.38E+01	1.86E+01	6.19E+01	2.24E+01
1.248	1.23E+02	3.29E+01	9.59E+01	5.03E+01
1.497	1.75E+02	5.18E+01	1.33E+02	8.51E+01
1.732	2.33E+02	1.00E+02	1.73E+02	1.77E+02

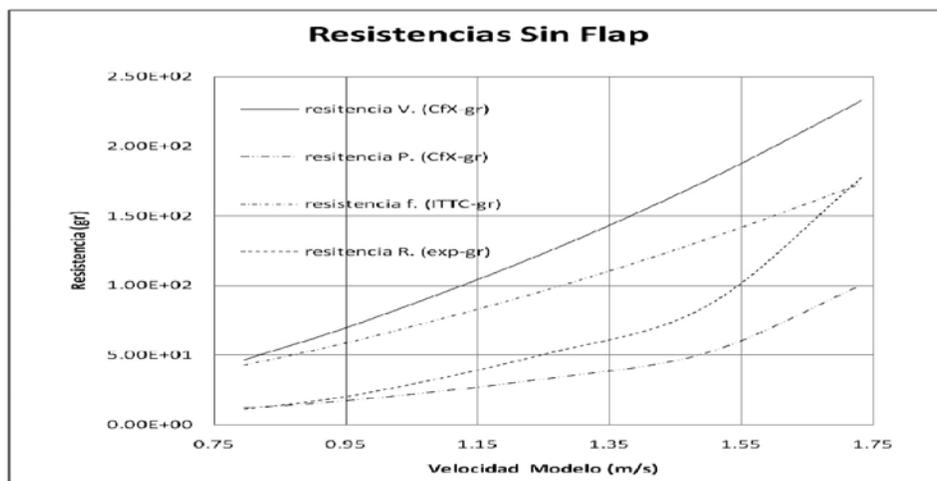


Figura N° 48: Gráfico Componentes de la Resistencia Total

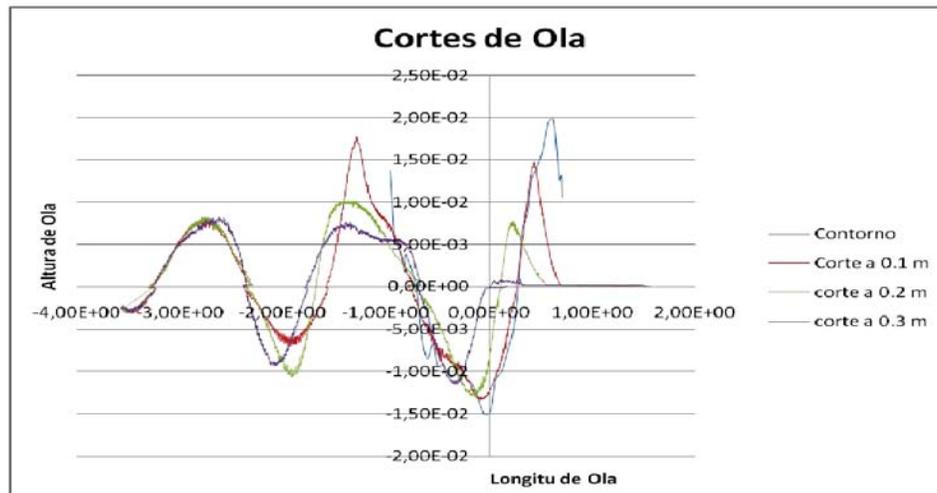


Figura N° 49: Corte de olas Numérico para la velocidad de 1,732 [m/s]

Los cortes de ola son referidos al plano de simetría

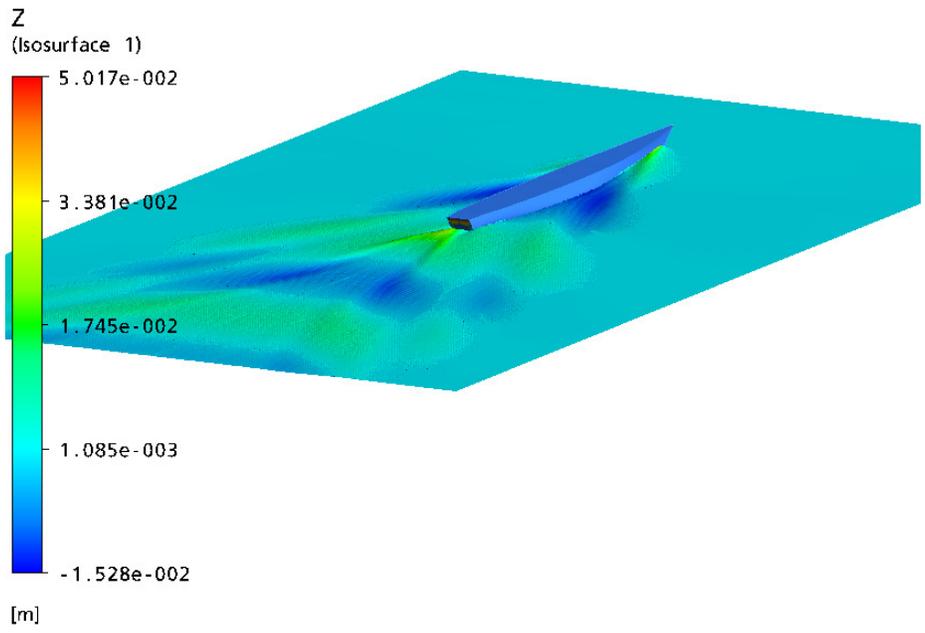


Figura N° 50: Tren de Ola 3D a velocidad 1,732 [m/s]

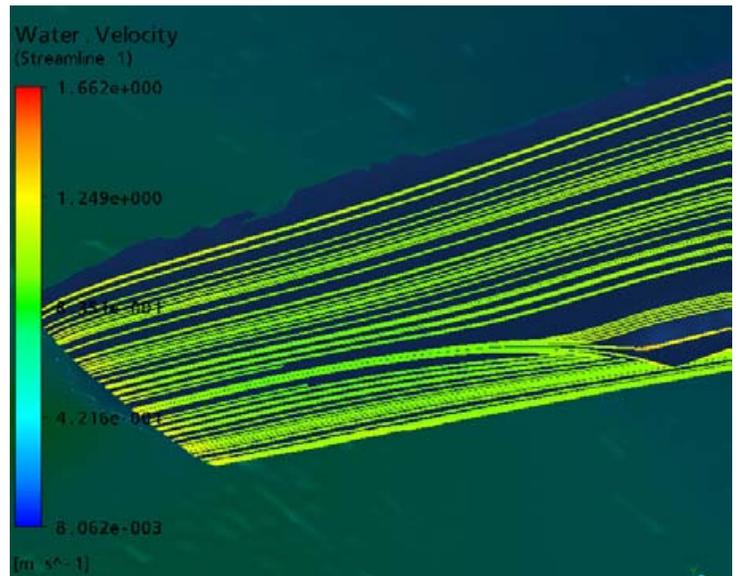


Figura N° 51: Líneas de Corrientes en Popa para la velocidad 1,732 [m/s]

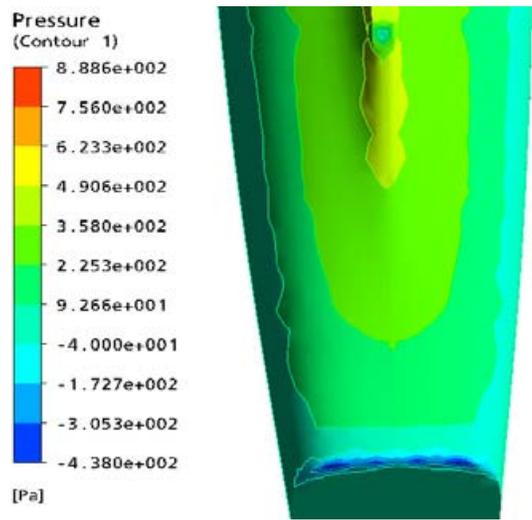


Figura N° 52: Mapa de Presiones Dinámica en Popa a velocidad 1,732 [m/s]

## 4.2 Situaciones de Casco con Flap

Considerando los datos anteriores, se procedió a evaluar la alternativa de instalar un dispositivo que mejore la eficiencia del casco, recordar que la alternativa propuesta fue un flap con las siguientes dimensiones y ángulos:

$$S_F : 7 \text{ [m]}$$

$$C_F : 1,32 \text{ [m]}$$

$$\beta_F : 0 \text{ [}^\circ\text{]; } 5 \text{ [}^\circ\text{]; } 10 \text{ [}^\circ\text{]; } 15 \text{ [}^\circ\text{]}$$

A continuación se muestra un gráfico conteniendo todas las alternativas, luego de esto se realizó un análisis en particular de cada una de las alternativas.

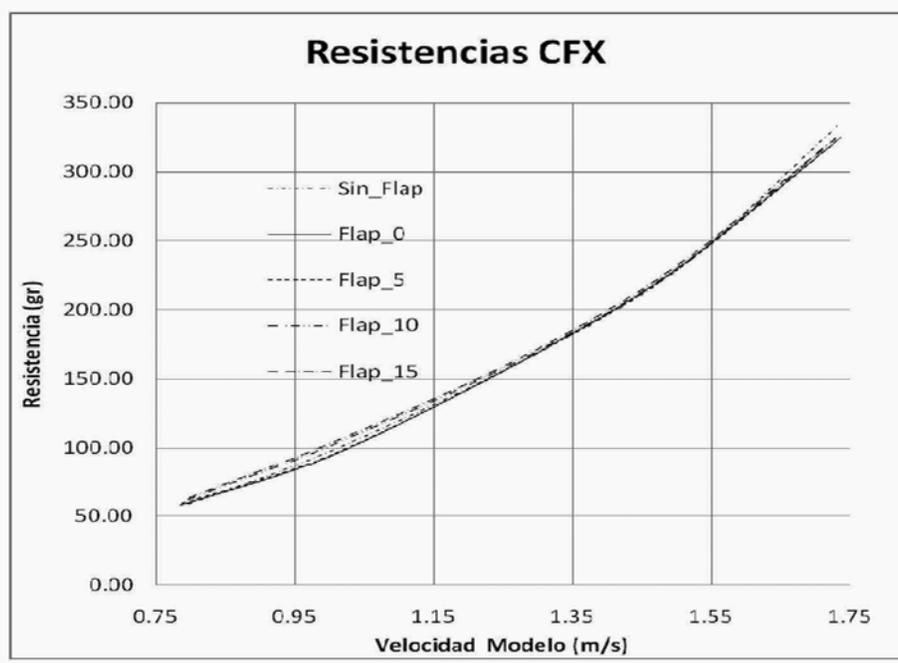


Figura N° 53: Gráfico Comparativo de Todos Los casos calculados en CFX

Como en el caso anterior antes de los resultados se muestra un cuadro con el significado de las abreviaciones para leer los gráficos.

**Tabla N° 7: Cuadro de abreviaciones**

abreviaciones	significado
Exp (1)	Resistencia experimental sin estimuladores.
Exp (2)	Resistencia experimental con estimuladores.
CFX (1)	Resistencia por cfx con inflación y modelo de turbulencia k-e.
Resistencia v.	Resistencia viscosa por CFX.
Resistencia p.	Resistencia por presión (ola) por CFX.
Resistencia f.	Resistencia por fricción por ITTC.
Resistencia r.	Resistencia residual experimental.

Este cuadro es comun para todo los casos con flap, para la interpretacion de graficos y tablas

#### 4.2.1 Caso Flap 0[°] de Inclinación

Tabla N° 8: Cuadro Resumen de Resistencias

Filas	A	B	C	D
$V_m$ [m/s]	Exp (1) [gr]	Exp (2) [gr]	CFX (1) [gr]	Dif. A-C (%)
0.786	56.1	46.8	57.79	2.92
0.996	84.7	75.6	92.80	8.73
1.276	147.4	140.6	162.69	9.40
1.492	212.3	210.0	226.43	6.24
1.734	346.8	350.6	323.59	7.17
			Prom	6.89

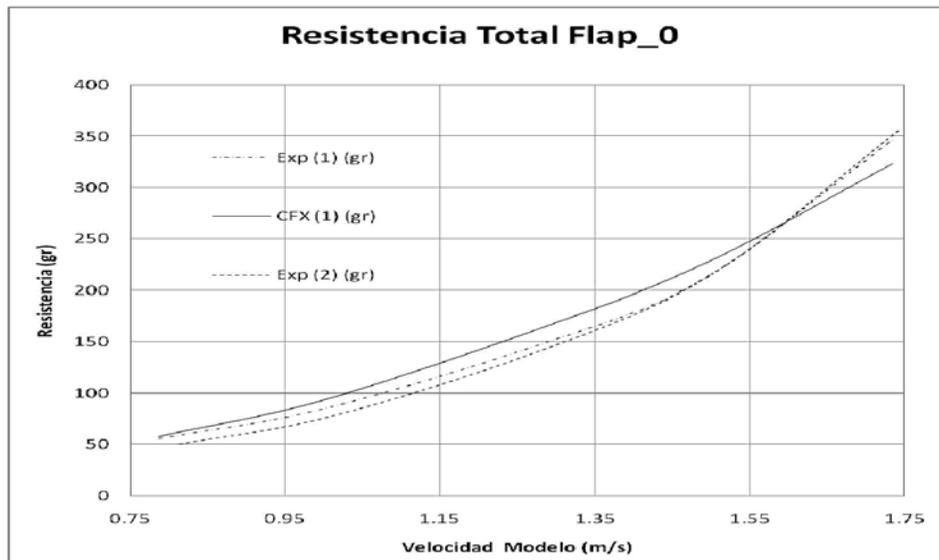


Figura N° 54: Gráfico de la Resistencia Total

Tabla N° 9: Cuadro de las componente de la Resistencia Total

$V_m$ [m/s]	Resistencia V. (CfX-gr)	Resistencia P. (CfX-gr)	Resistencia f. (ITTC-gr)	Resistencia r. (exp-gr)
0.786	4.78E+01	9.99E+00	4.19E+01	1.42E+01
0.996	7.68E+01	1.60E+01	6.40E+01	2.07E+01
1.276	1.33E+02	2.94E+01	9.98E+01	4.76E+01
1.492	1.80E+02	4.61E+01	1.32E+02	8.01E+01
1.734	2.43E+02	8.10E+01	1.73E+02	1.74E+02

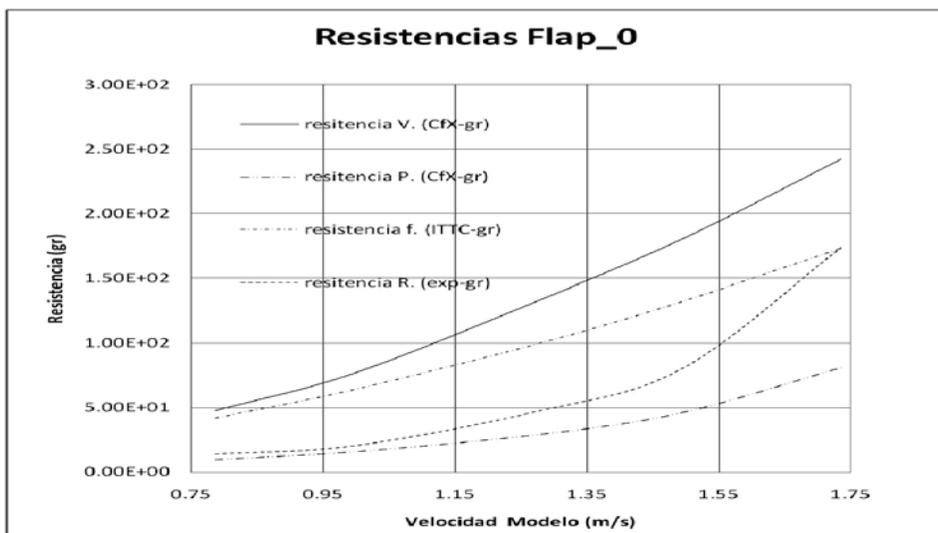


Figura N° 55: Gráfico Componentes de la Resistencia Total

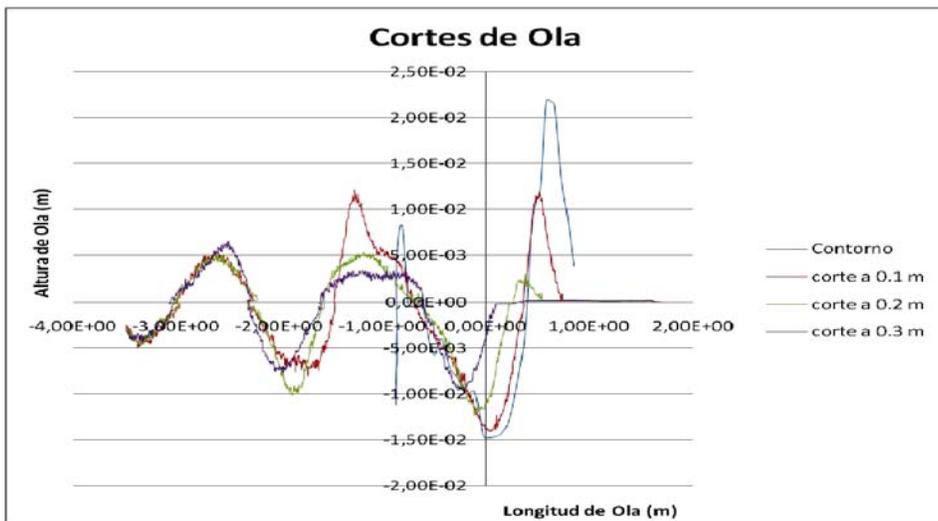


Figura N° 56: Corte de olas Numérico para la velocidad de 1,734 [m/s]  
Los cortes de ola son referidos al plano de simetría

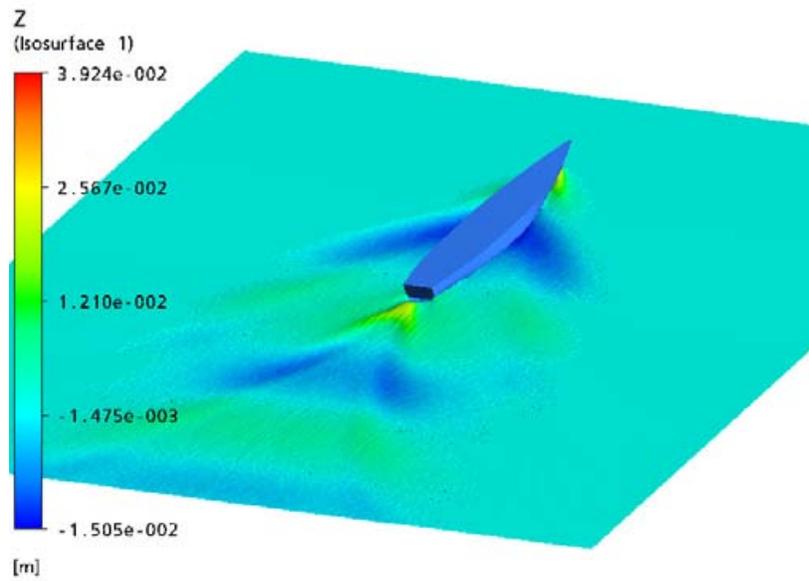


Figura N° 57: Tren de Ola 3D a velocidad 1,734 [m/s]

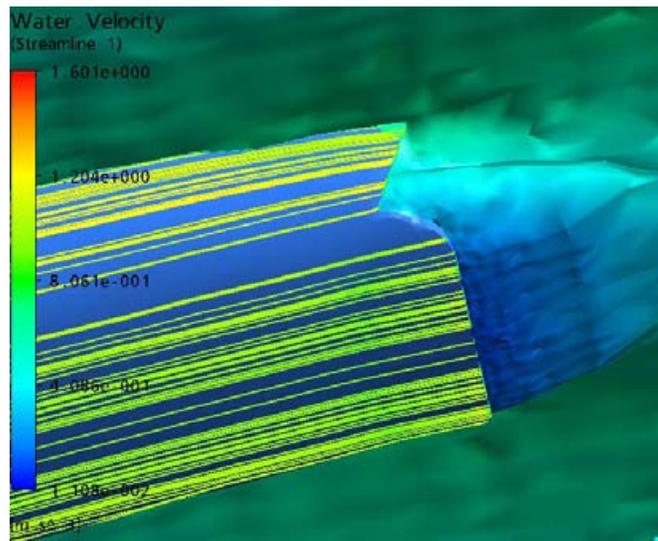


Figura N° 58: Líneas de Corrientes en Popa para la velocidad 1,734 [m/s]

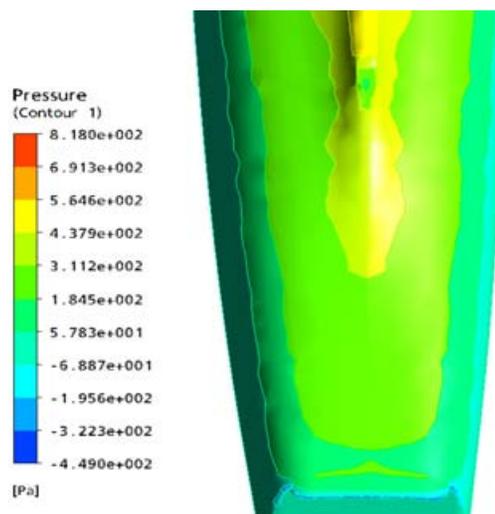


Figura N° 58: Mapa de Presiones Dinámica en Popa a velocidad 1,734 [m/s]

#### 4.2.2 Caso Flap 5[º] de Inclinación

Tabla N° 10: Cuadro Resumen de Resistencias

Filas	A	B	C	D
$V_m$ [m/s]	Exp (1) [gr]	Exp (2) [gr]	CFX (1) [gr]	Dif A-C (%)
0.788	58.0	43.3	59.18	1.99
0.996	83.9	71.0	93.46	10.23
1.269	146.0	133.4	160.76	9.18
1.495	216.2	211.8	226.86	4.70
1.737	345.7	339,9	326.63	6.38
			Prom	6.50

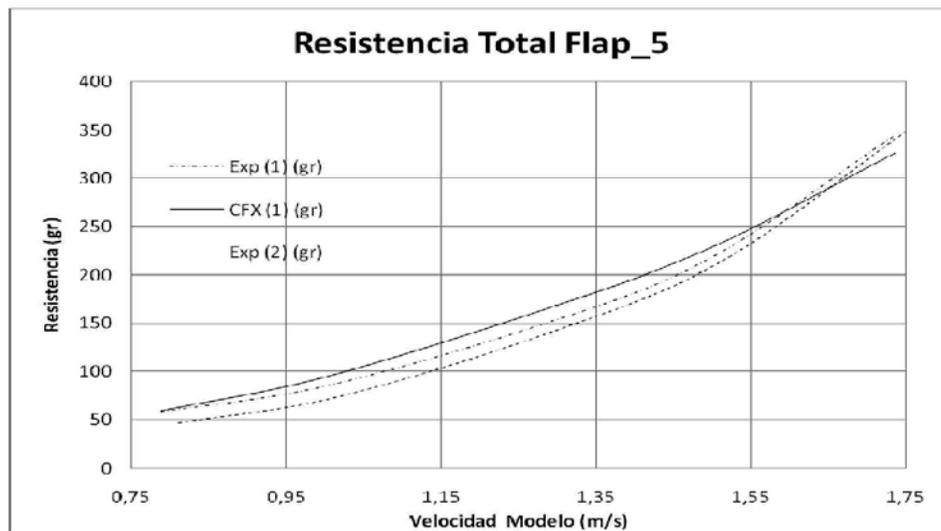


Figura N° 59: Gráfico de la Resistencia Total

Tabla N° 11: Cuadro de las componente de la Resistencia Total

$V_m$ [m/s]	Resistencia V. (CfX-gr)	Resistencia P. (CfX-gr)	Resistencia f. (ITTC-gr)	Resistencia r. (exp-gr)
0.788	4.83E+01	1.09E+01	4.21E+01	1.59E+01
0.996	7.68E+01	1.67E+01	6.40E+01	1.99E+01
1.269	1.32E+02	2.89E+01	9.88E+01	4.72E+01
1.495	1.81E+02	4.57E+01	1.33E+02	8.35E+01
1.737	2.42E+02	8.42E+01	1.74E+02	1.72E+02

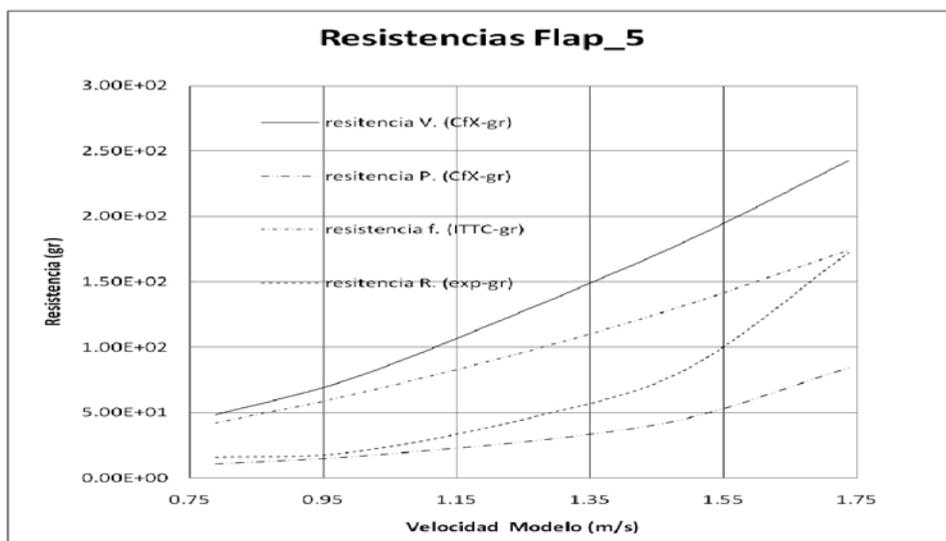


Figura N° 60: Gráfico Componentes de la Resistencia Total

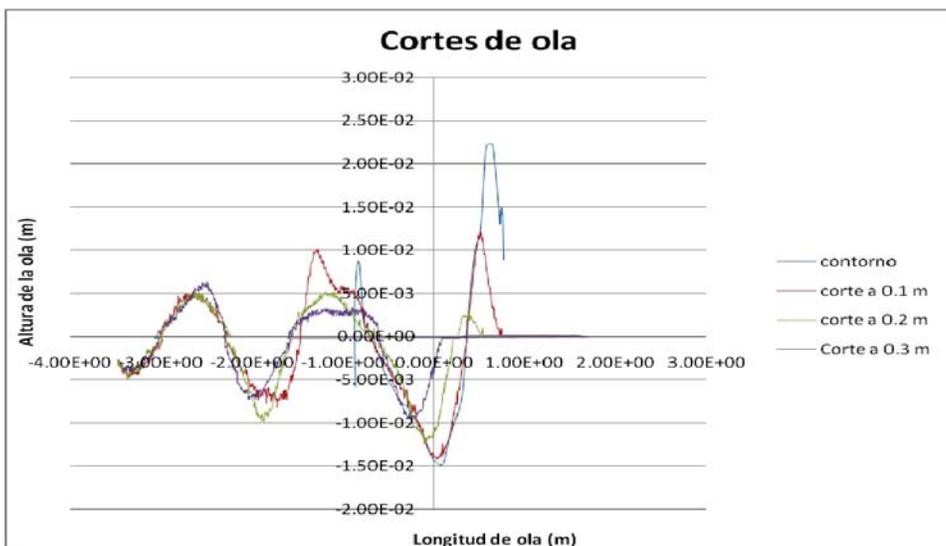


Figura N° 61: Corte de olas Numérico para la velocidad de 1,737 [m/s]  
Los cortes de ola son referidos al plano de simetría

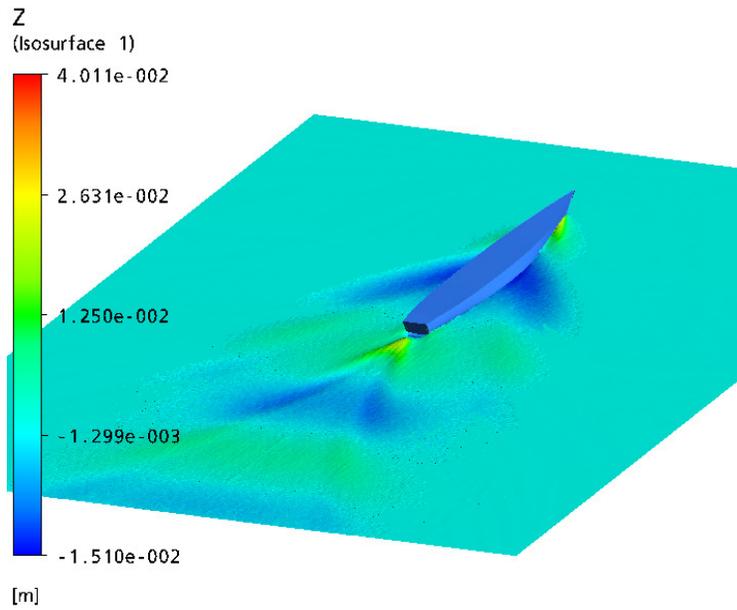


Figura N° 62: Tren de Ola 3D a velocidad 1,737 [m/s]

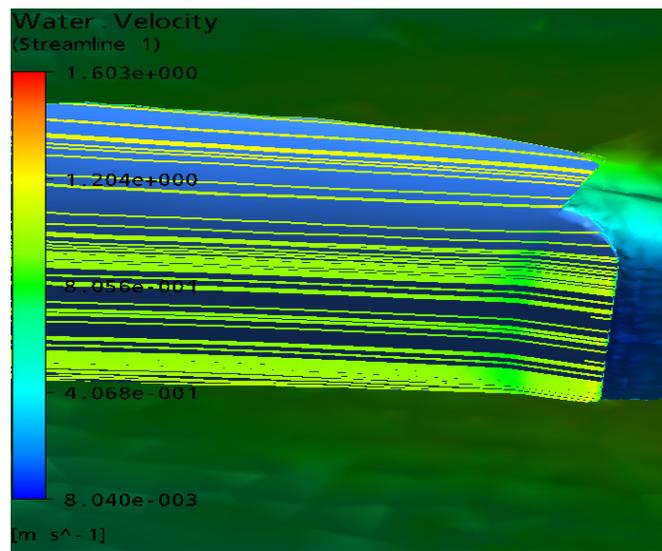


Figura N° 63: Líneas de Corrientes en Popa para la velocidad 1,737 [m/s]

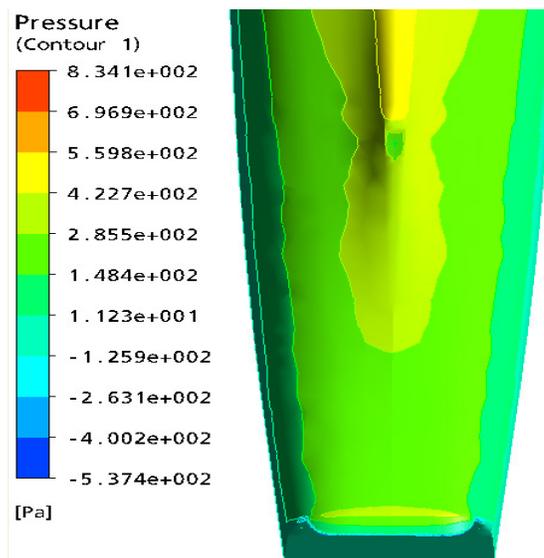


Figura N° 64: Mapa de Presiones Dinámica en Popa a velocidad 1,737 [m/s]

### 4.2.3 Caso Flap 10[°] de Inclinación

Tabla N° 12: Cuadro Resumen de Resistencias

Filas	A	B	C	D
$V_m$ [m/s]	Exp (1) [gr]	Exp (2) [gr]	CFX (1) [gr]	Dif A-C (%)
0.796	59.4	48.5	62.07	4.30
1.000	84.93	77.0	101.52	16.34
1.278	148.15	137.4	164.76	10.08
1.499	213.41	205.5	229.59	7.05
1.730	336.7	327.3	324.21	3.85
			Prom	8.33

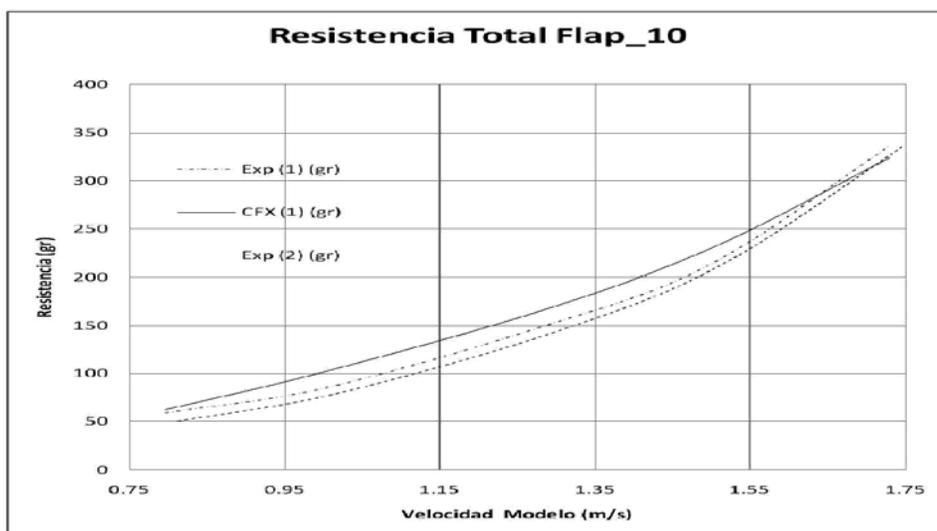


Figura N° 65: Gráfico de la Resistencia Total

Tabla N° 13: Cuadro de las componente de la Resistencia Total

$V_m$ [m/s]	Resistencia V. (CfX-gr)	Resistencia P. (CfX-gr)	Resistencia f. (ITTC-gr)	Resistencia r. (exp-gr)
0.796	4.98E+01	1.25E+01	4.29E+01	1.65E+01
1.000	8.23E+01	1.92E+01	6.45E+01	2.04E+01
1.278	1.34E+02	3.10E+01	1.00E+02	4.80E+01
1.499	1.82E+02	4.73E+01	1.33E+02	8.01E+01
1.730	2.41E+02	8.29E+01	1.73E+02	1.64E+02

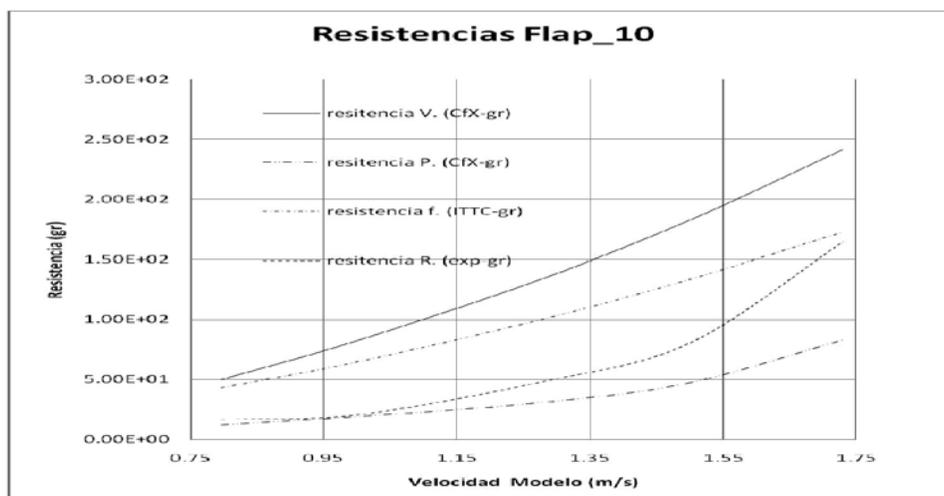


Figura N° 66: Gráfico Componentes de la Resistencia Total

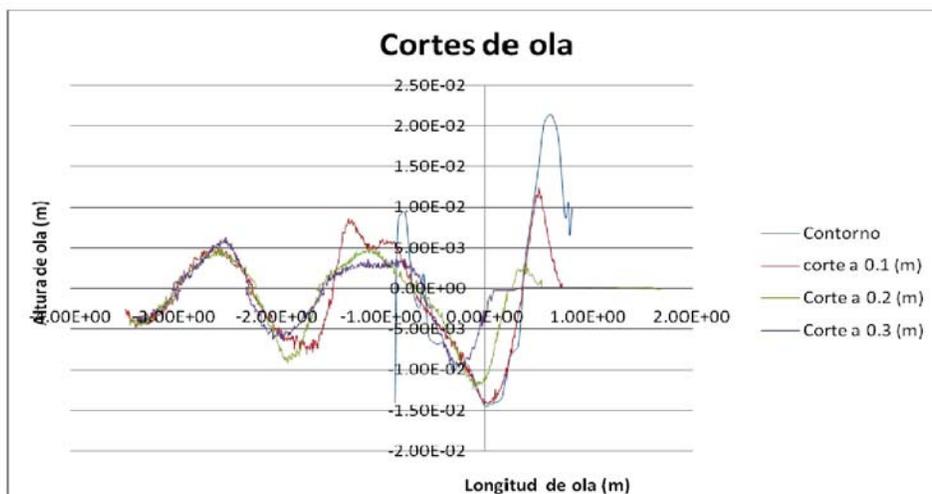


Figura N° 67: Corte de olas Numérico para la velocidad de 1,730 [m/s]

Los cortes de ola son referidos al plano de simetría

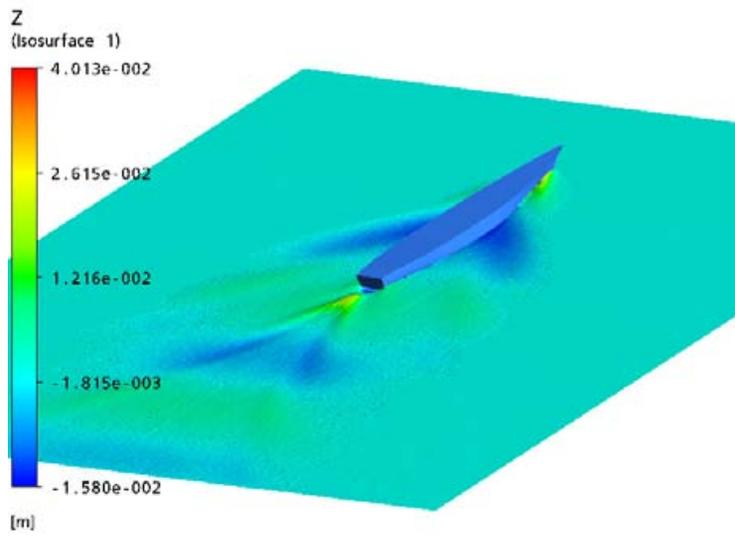


Figura N° 68: Tren de Ola 3D a velocidad 1,730 [m/s]

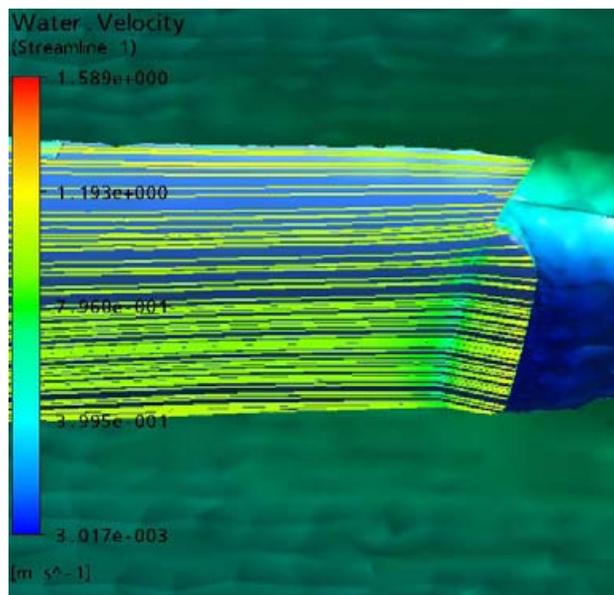


Figura N° 69: Líneas de Corrientes en Popa para la velocidad 1,730 [m/s]

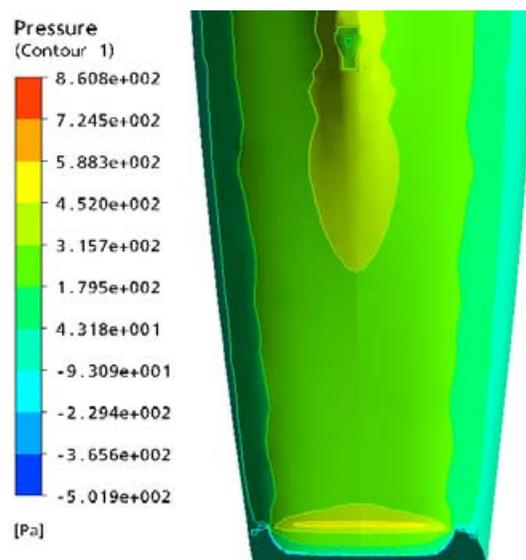


Figura N° 70: Mapa de Presiones Dinámica en Popa a velocidad 1,730 [m/s]

#### 4.2.4 Caso Flap 15[°] de Inclinación

Tabla N° 14: Cuadro Resumen de Resistencias

Filas	A	B	C	D
Vm [m/s]	Exp (1) [gr]	Exp (2) [gr]	CFX (1) [gr]	Dif 1-3 (%)
0.798	60.00	47.0	63.59	5.65
1.000	86.98	78.7	103.24	15.75
1.272	148.81	142.8	164.72	9.66
1.494	212.53	209.5	229.54	7.41
1.733	348.38	337,2	326.10	6.83
				9.06

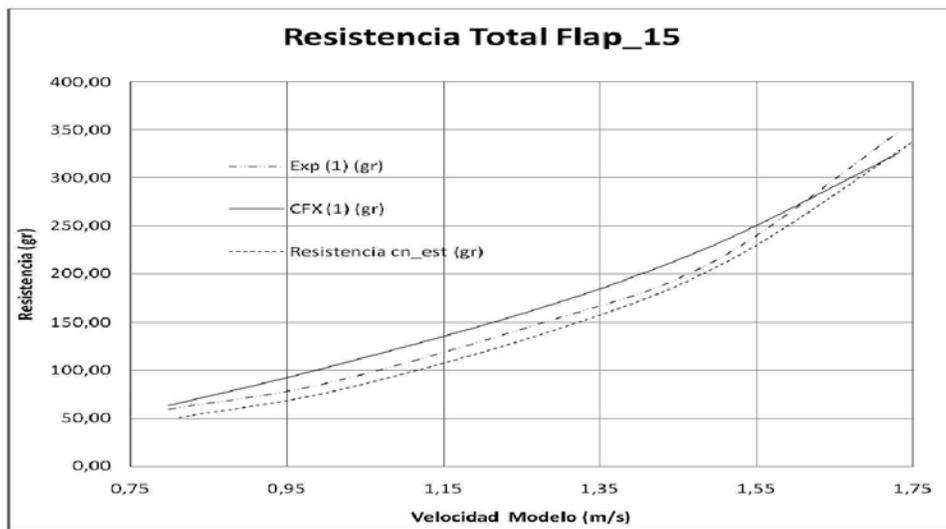


Figura N° 71: Gráfico de la Resistencia Total

Tabla N° 15: Cuadro de las componente de la Resistencia Total

Vb [m/s]	Resistencia V. (CfX-gr)	Resistencia P. (CfX-gr)	Resistencia f. (ITTC-gr)	Resistencia r. (exp-gr)
0.798	4.99E+01	1.37E+01	4.31E+01	1.69E+01
1.000	8.23E+01	2.09E+01	6.45E+01	2.25E+01
1.272	1.32E+02	3.29E+01	9.93E+01	4.96E+01
1.494	1.80E+02	4.96E+01	1.33E+02	8.00E+01
1.733	2.41E+02	8.47E+01	1.73E+02	1.75E+02

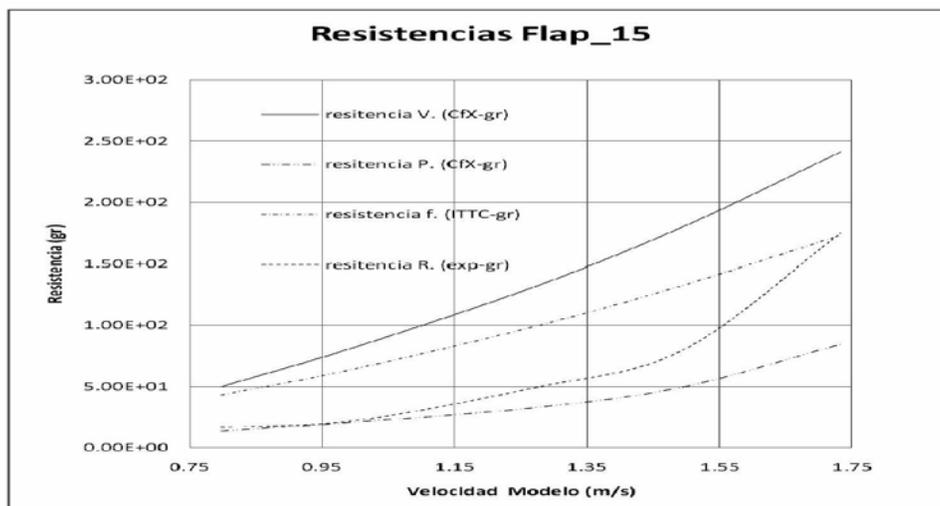


Figura N° 72: Gráfico Componentes de la Resistencia Total

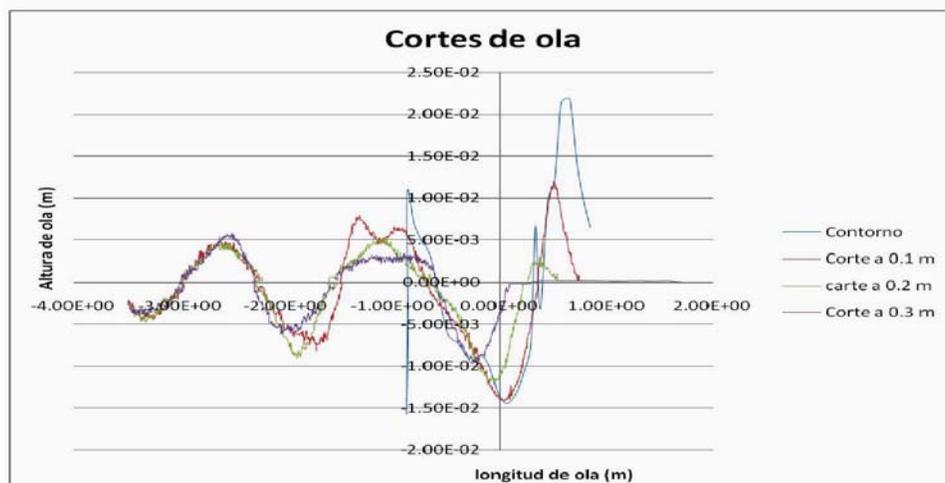


Figura N° 73: Corte de olas Numérico para la velocidad de 1,730 [m/s]  
 Los cortes de ola son referidos al plano de simetría

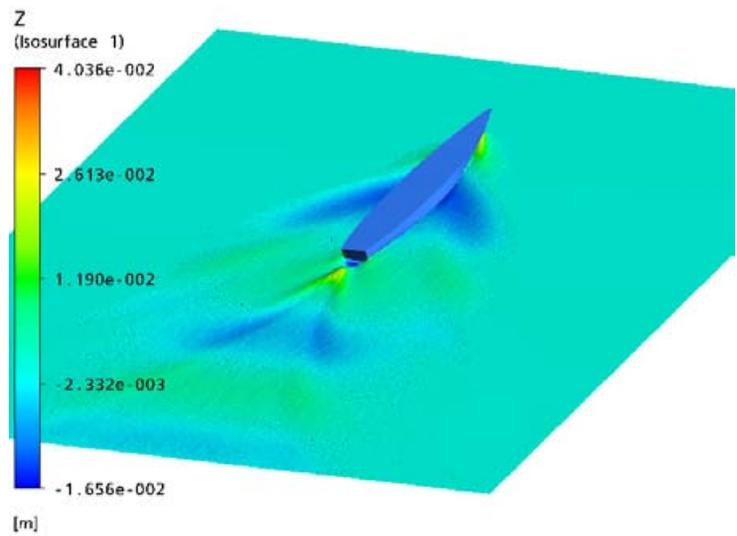


Figura N° 74: Tren de Ola 3D a velocidad 1,733 [m/s]

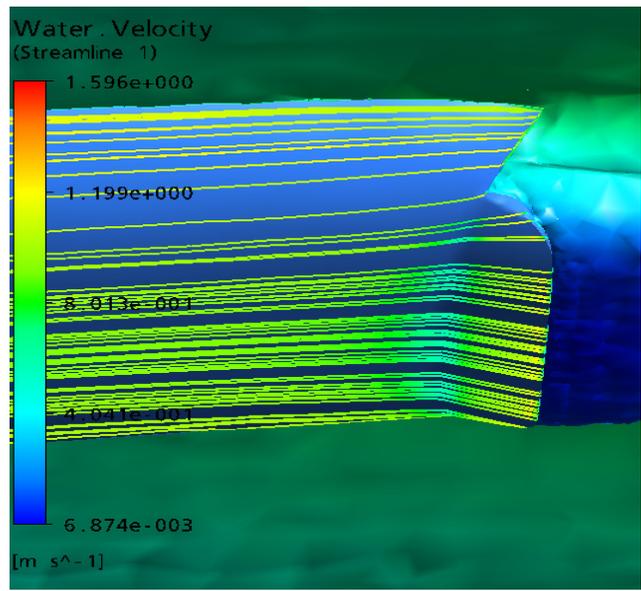


Figura N° 69: Líneas de Corrientes en Popa para la velocidad 1,733 [m/s]

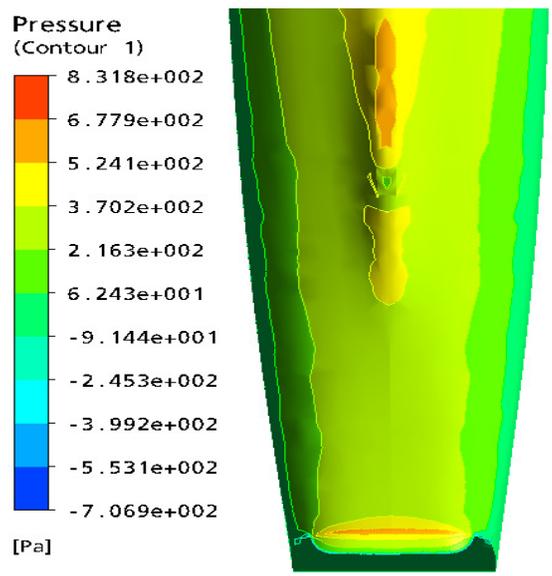


Figura N° 70: Mapa de Presiones Dinámica en Popa a velocidad 1,733 [m/s]

## Conclusiones

El método empleado para los ensayos por CFD, se ha validó obteniendo un porcentaje de diferencia global no mayor del 9% comparados con el canal de pruebas, que para esta etapa de estudio preliminar es una buena aproximación para decidir entre las opciones calculadas, aunque para un estudio comercial las diferencias no deberían ser mayor a un 5%, por lo que se debería optar por mallas más refinadas dependiendo de los recursos computacionales con que se cuenten y tiempo que se quiera emplear en estos ensayos, lo que se muestra en el caso sin Flap en el cual se utilizó una malla más refinada con una mejor definición del casco y mayor concentración de elementos volumétricos alrededor del casco arrojando resultados con menor diferencia global y locales, los que se mejoraron al incluir la inflación en el mallado.

La comparación entre modelos de turbulencia que se realizó en el primer caso ensayado develó que la mejor opción es el modelo  $k-\epsilon$ , por la calidad de resultados y por el menor tiempo empleado en el cálculo ya que se requirió un menor número de iteraciones en la convergencia, a diferencia del modelo SST, que se debió aumentar el número de pasos de cálculos para que la convergencia de la fuerza por presión fuera lo suficientemente buena para considerar el resultado exacto, el análisis develó que los resultados del modelo SST, son más abultados debido a que éste calcula la separación de la capa límite turbulenta anticipadamente, lo que aumenta la cantidad de turbulencia alrededor del casco aumentando la resistencia al avance, en comparación con el modelo  $k-\epsilon$  los resultados fueron más exactos, en el sentido que los datos obtenidos fueron más cercanos al experimental, debido a que a la cantidad de turbulencia calculada por este modelo es menor, en el estudio se hizo una comparación entre la resistencia viscosa calculada por los dos modelos notando que la calculada por  $k-\epsilon$  es menor que SST.

Al analizar los cuadros de las componentes de la resistencia total, se nota una gran diferencia entre los métodos experimentales y numéricos, por ejemplos si se compara la resistencia viscosa por CFX, contra la resistencia de fricción por ITTC en todos los casos es mayor la de CFX, ya que este agrupa las fuerzas por fenómenos viscosos separándolas de las gravitatorias, en cambio el método experimental agrupa la fuerza gravitatoria con la de resistencia de forma, apartando la resistencia por fricción.

El código CFD basado en los métodos RANS es capaz de simular los efectos hidrodinámicos en un amplio rango de posibilidades de modificaciones del Flap al interactuar con el casco, pudiendo ser estos discriminados para el análisis en particular de cada uno de ellos, como la alteración del flujo mostrando un cambio en la velocidad de salida del casco, la alteración en la formación de ola, el aumento de la presión en la zona de popa en el espejo, los cuales se pueden obtener de manera simple y clara facilitando la elección de las diferentes opciones propuestas transformando esta técnica de cálculo en una herramienta real y cada vez mas disponible para la optimización de la eficiencia hidrodinámica de las embarcaciones.

Del análisis y comparación de todas las alternativas propuestas para el modelo escalado, siendo las condiciones de Flaps con ángulos de inclinación de  $0^\circ$  y  $10^\circ$  las que ofrecen mejores resultados en la máxima velocidad ensayada, En comparación con el canal, la mejor solución para el modelo sin estimuladores de turbulencia fue con ángulo de inclinación de  $10^\circ$  para la máxima velocidad. Aunque la mayor baja para el modelo numérico estuvo en el primer ángulo la diferencia de resultados entre  $0^\circ$  y  $10^\circ$  es muy pequeña, siendo de 0,2%, por lo que estas condiciones deberían volverse a ensayar con mallas más refinadas para obtener una tendencia más marcada para considerar una solución definitiva.

## Referencias

1. Robert D.Blevins, "Applied Fluid Dynamic Handbook", Krieger Publishing Company Malabar, Florida, publicación 2002.
2. N. Nigro, Paper: "Análisis Aerodinámico de un automóvil mediante CFD", Centro Internacional de Métodos Numéricos CIMEC, Santa Fe - Argentina. Año de emisión 2003.
3. J. Tizón Pulido, Presentación Power Point: "Seminario de simulación numérica en sistemas de propulsión". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid.
4. Julio García Espinoza, Paper: "Un método de elementos finitos para análisis hidrodinámico de estructuras navales", capítulos cero y cinco, Universidad Politécnica de Catalunya
5. Presentación Power Point: "Teoría del buque código viscoso".
6. Damián Enrique Ramajo, Tesis Para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Mención en Mecánica Computacional: "Simulación computacional de los procesos fluido-dinámicos en el interior de motores de combustión interna", Facultad de Ingeniería y Cs. Híbridas del Litoral, Años de Emisión 2005.
7. Leo Miguel Gonzales Gutiérrez, Tesis: "Integración de las ecuaciones Navier- Stokes mediante el método de elementos finitos y el método de las características. Aplicaciones con superficies libres", Escuela Superior de Ingenieros Navales (E.T.S.I.N.), Mayo 2001.
8. Alejandro Rivas & Gorca Sánchez, Práctica de CFD Evaluada: "Predicción de las Características Aerodinámicas de un Perfil para Flujo Subsónico mediante Mecánica de Fluidos Computacional", Universidad de Navarra Escuela Superior de Ingenieros, Laboratorio de Mecánica de Fluidos, año de emisión 2006.
9. Luis Pérez Rojas, Antonio Soto Iglesias, Louis Delorme, Segundo Simposio de Diseño e Ingeniería naval: "El Futuro Enfoque de la Hidrodinámica Marina", E.T.S.I. Navales.
10. Lomax and Thomas H. Pulliam. (Harvard), David W. Zingg (University Toronto), "Fundamentals of Computational Fluid Dynamic", NASA Ames Research Center, 26 de agosto de 1999.
11. Honorio Sierra Cano, Tesis Doctoral: "Estimación de la velocidad del buque en aguas tranquilas a partir de ensayos con modelos, y análisis de pruebas", Escuela Superior de Ingenieros Navales, año de publicación Octubre de 1971.
12. Patricio Sepúlveda, "Diseño de interceptores en pesqueros utilizando pruebas experimentales y códigos CFD", E.T.S.I.N., Abril 2006.
13. "CFD Process" capítulos dos al capítulo ocho, University Iowa.