



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

# Parametrización del casco de un AUV

---

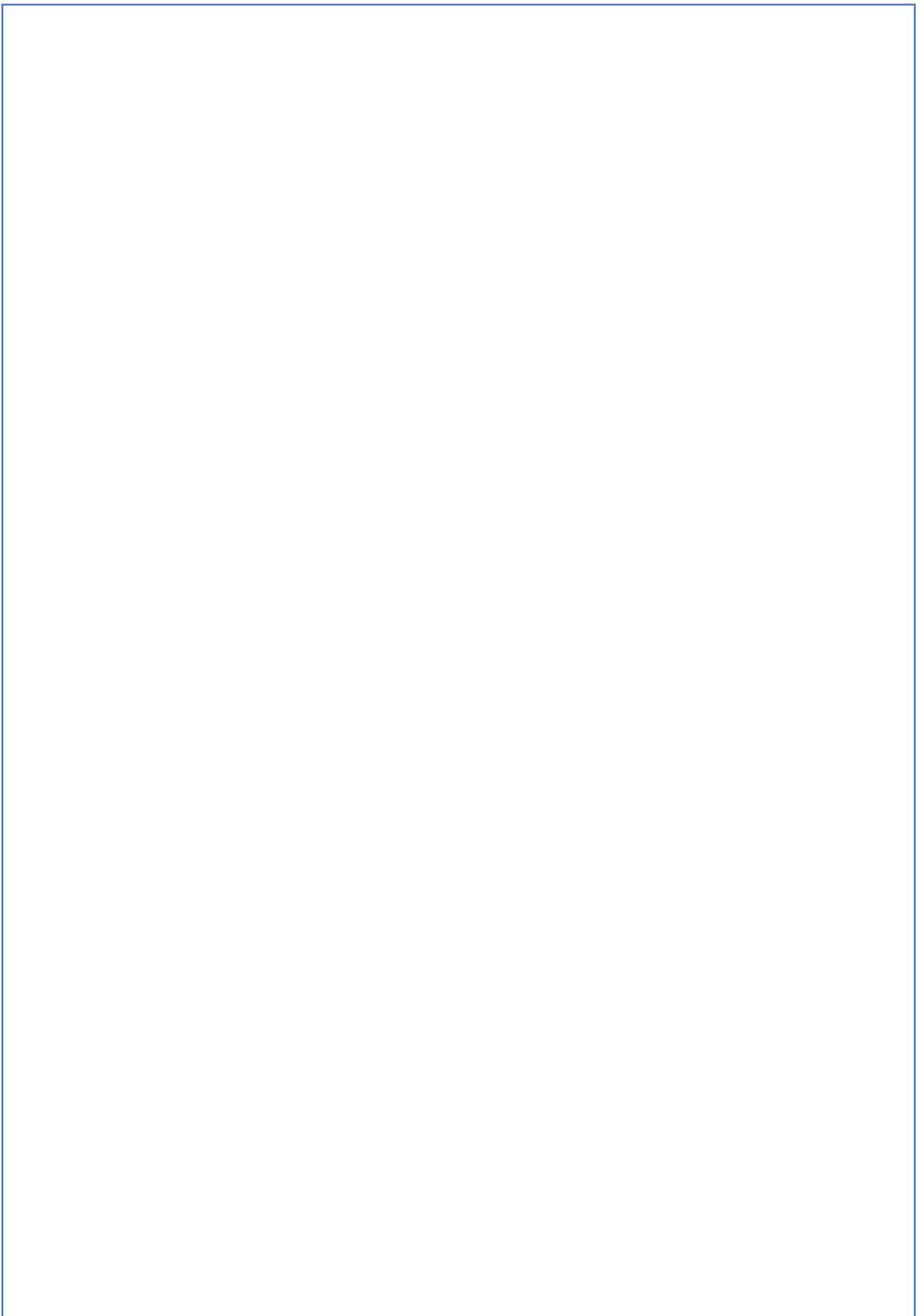
Master CAD-CAM-CIM 2009-2010

Francisco José Grau Calabuig

01/12/2009

Director: Josep Tornero Montserrat

Tutor: Freddy A. Aguirre Gómez



# INDICE

---



# 1. Índice

1. Índice .....	5
2. Introducción .....	9
3. Descripción de los AUV .....	13
4. Fundamentos teóricos .....	19
4.1. Consideraciones básicas.....	19
4.2. Arrastre para cuerpos bidimensionales .....	21
4.3. Arrastre en cuerpos axis métricos y tridimensionales .....	24
5. Consideraciones de diseño.....	29
5.1. Forma .....	29
5.2. Efecto de la capa límite en la fricción.....	31
5.3. Superficies de control.....	32
5.4. Influencia de la propulsión.....	32
5.5. Otras consideraciones .....	33
6. Metodología ensayo.....	37
6.1. Modelado .....	37
6.2. Simulación .....	45
7. Análisis de la sensibilidad de las limitaciones del modelo .....	61
7.1. Análisis de la limitación del tamaño de malla del volumen del fluido .....	61
7.2. Análisis de la limitación del tamaño del volumen del fluido.....	69
7.3. Conclusiones.....	76
8. Análisis de los resultados .....	81
8.1. Variación de la relación L/D a volumen constante.....	81
8.2. Variación del tramo recto .....	90
8.3. Análisis del efecto de la velocidad .....	100
8.4. Análisis de diferentes ángulos de incidencia.....	110
8.5. Análisis posición de apéndices .....	125
8.6. Análisis altura de los apéndices .....	132
9. Conclusiones.....	141
9.1. Comportamiento de las fuerzas .....	141
9.2. Punto de aplicación.....	143
9.3. Distribución de las tensiones .....	144
9.4. Evolución presiones y esfuerzos tangenciales máximos.....	148

9.5.	Análisis de la variación de la velocidad .....	149
9.6.	Análisis del ángulo de giro.....	152
9.7.	Elaboración de un modelo .....	155
10.	Bibliografía .....	161
11.	Lista de imágenes.....	165

# INTRODUCCIÓN

---



## 2. Introducción

La presente tesina es el resultado de la aplicación de una parte de los conocimientos adquiridos durante la realización del máster CAD-CAE-CIM adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño perteneciente a la Universidad politécnica de Valencia.

En este proyecto se plasmarán los diferentes operaciones y procedimientos realizados para el cálculo de un vehículo submarino no tripulado (a partir de ahora AUV<sup>1</sup>) en relación con el proyecto PROMETEO llevado a cabo por el IDF<sup>2</sup> perteneciente a esta misma universidad.

Para la realización de dicha tarea se utilizarán diferentes herramientas empleadas a lo largo de la realización del máster, como puede el programa CAD SIEMENS NX6 y su módulo de cálculo adjunto NASTRAN. Mediante este software se procederá a diseñar el casco y los apéndices del AUV, además de realizar los cálculos hidrodinámicos y estructurales que sean pertinentes.

Primeramente se procederá a describir brevemente qué es y cómo funciona un AUV, además de presentar diferentes aplicaciones características. A continuación se expondrán diversas reglas de diseño a nivel estructural y consideraciones hidrodinámicas que se han de tener en cuenta en la concepción de estos vehículos. También se explicará, de forma breve, la teoría en la que se apoya lo anteriormente mencionado. Dejando ya a un lado los conceptos teóricos, se procederá a exponer el análisis hidrodinámico y estructural del casco y los apéndices de un AUV, para finalmente plasmar las conclusiones obtenidas de dicho capítulo en un último apartado.

---

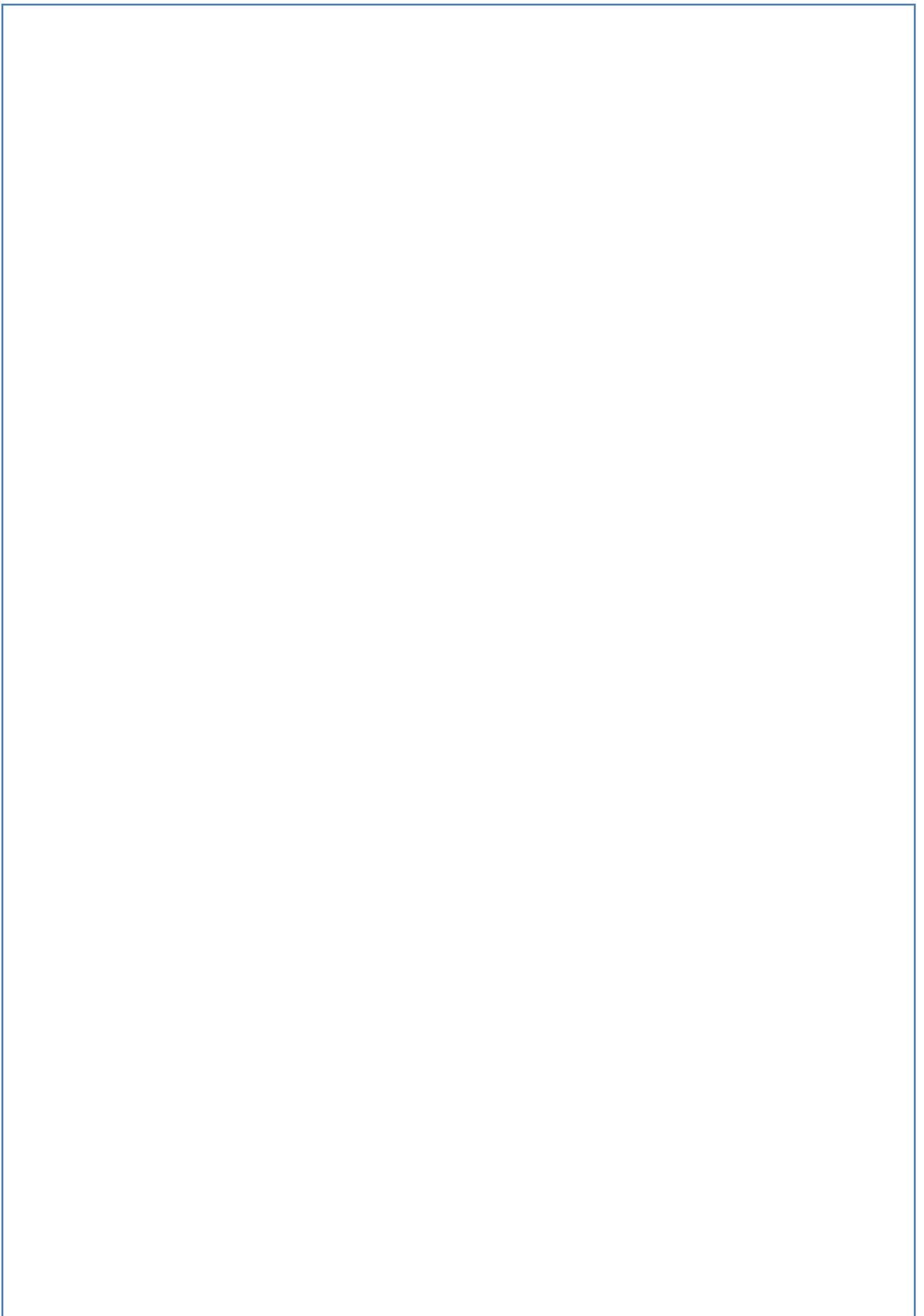
<sup>1</sup>Siglas en inglés de Autonomous Underwater Vehicle

<sup>2</sup> Insituto del Diseño y Fabricación



# DESCRIPCIÓN DE LOS AUV

---



### 3. Descripción de los AUV

Un AUV se puede describir brevemente como un vehículo submarino no tripulado que posee en su interior diferentes instrumentos necesarios para el desarrollo de tareas en el medio marino. Normalmente, estos vehículos están conformados por un casco cilíndrico, en el que normalmente se incluye todo el instrumental, un propulsor axial y una serie de apéndices (timón, aletas de popa y proa) que le confieren la capacidad de maniobrar dentro del agua.

Estos artefactos suelen equipar sensores que permiten navegar de forma autónoma y mapear características del fondo marino. Estos pueden ser brújulas, sensores de profundidad, escáneres laterales, sonar, magnetómetros etc. En cuanto a su navegación puede utilizar varios sistemas de posicionamiento subacuático en función si navega en una zona donde se hayan situado una red de transpondedores (sistema LBL<sup>3</sup>), si existe un barco de soporte (sistema USBL o SBL<sup>4</sup>) o navega de forma autónoma (sistema GPS<sup>5</sup>). En el caso que tenga que realizar maniobras muy precisas o navegar entre posiciones fijas, monta a bordo un sistema de navegación inercial.

En cuanto al accionamiento de sus propulsores, se puede realizar mediante el uso de baterías de ion-litio, polímeros de litio, nickel o células de combustible.

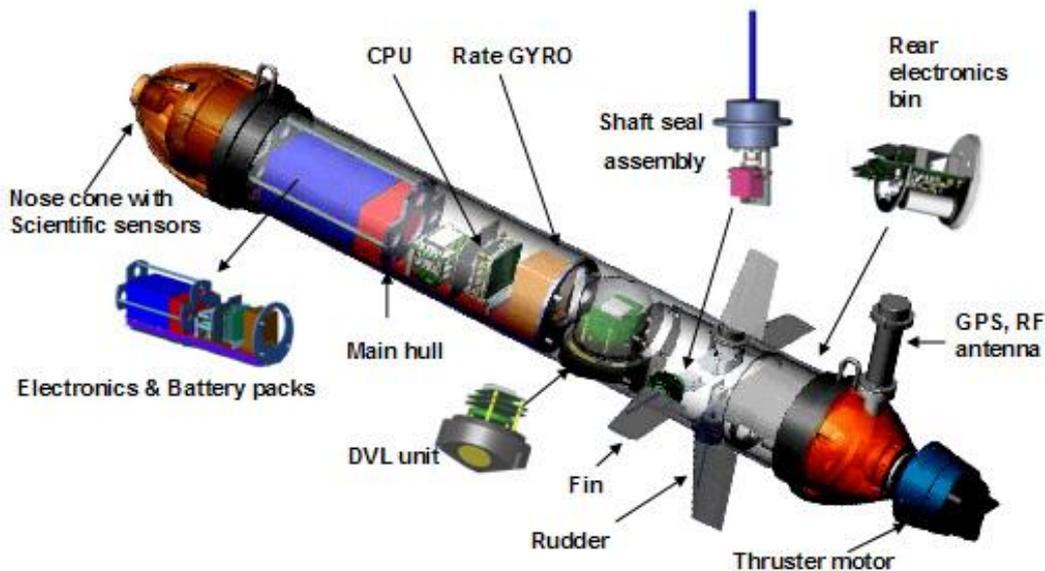


Ilustración 1. Esquema típico de un AUV, National Oceanographic Institute (India)

<sup>3</sup> Siglas de Long BaseLine acoustic positioning system

<sup>4</sup> Siglas de Ultra Short (USBL) o Short (SBL) BaseLine acoustic positioning system. Posicionamiento del AUV a partir del posicionamiento GPS del barco de apoyo.

<sup>5</sup> Siglas en inglés de Global Positioning System

La gran ventaja de los AUVs es su autonomía prácticamente ilimitada ya que, a diferencia de los vehículos operados de forma remota (ROV<sup>6</sup>), no se requiere de un operario para su control ni de ningún cordón umbilical para transmitir los datos (en caso de ser filoguiado). Esta diferencia permite a estos vehículos capacidades operativas mucho más amplias que las de los ROVs. Otras ventajas que tiene respecto a estos últimos y a los vehículos tripulados, es su bajo coste y elevada portabilidad.

Un AUV puede realizar mapeados de características estáticas o dinámicas del fondo marino. Dentro del primer grupo de actividades se podría destacar realización de batimetría y análisis del magnetismo del suelo marino, búsqueda de depósitos de petróleo alejados de la costa o funciones de cazaminas. En cuanto a labores relacionadas con aspectos dinámicos destacaría el análisis de la circulación oceánica (cambio climático), la obtención de datos para la realización de modelos predictivos de las mareas, la inspección de cables y el análisis de la temperatura y la salinidad del agua.

Las actividades mencionadas en el párrafo anterior pueden tener aplicaciones comerciales, militares y de investigación. Debido a su bajo coste también entra en la categoría de hobbies.

Como ejemplos de AUV se puede encontrar

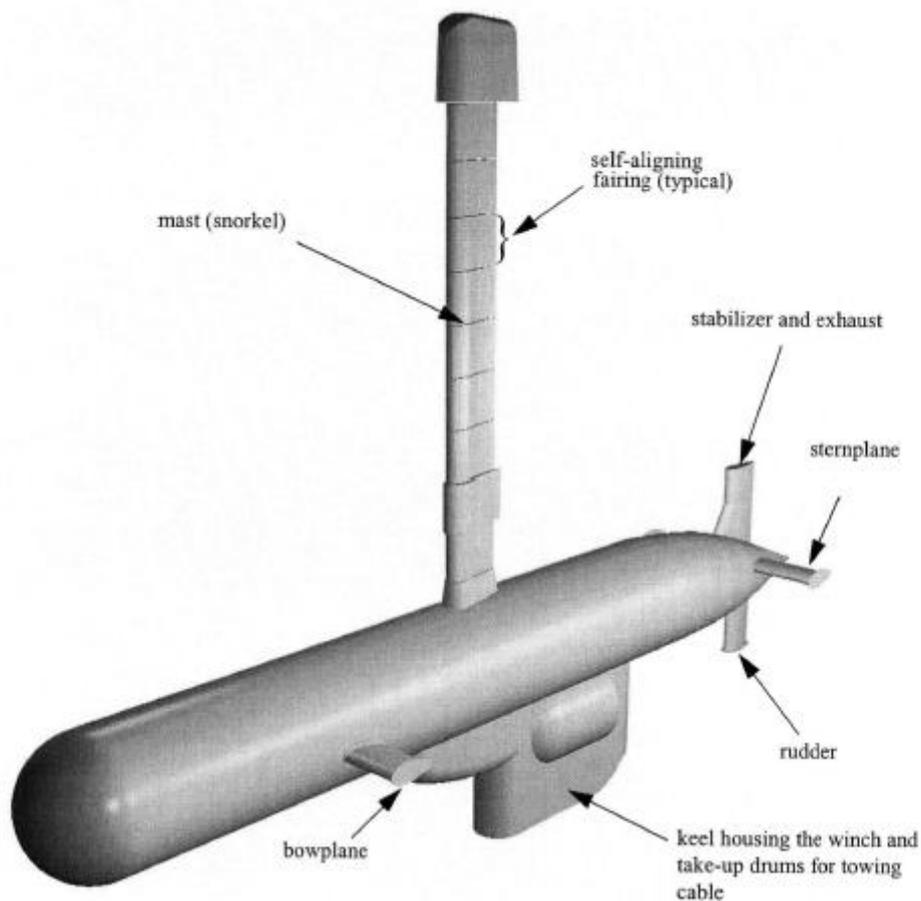


Ilustración 2 Dolphin AUV, University of British Columbia (EE.UU)

<sup>6</sup> Siglas en inglés de Remotely Operated Vehicle

En la ilustración 2 se puede observar el AUV Dolphin, desarrollado por la ISER<sup>7</sup>, destinado a labores de investigación. Se construyó como plataforma de instrumentación con aplicaciones típicas tales como prospecciones oceanográficas, mapeado del suelo marino y búsqueda de minas. Mide 8.534 metros de largo con un diámetro de casco de 1 metro, su peso en seco es de 4500 Kg y tiene una potencia de 3500 hp que le permite obtener una velocidad punta de 18 nudos (9.3 m/s).



Ilustración 3. ISE MUN Explorer, University of Newfoundland (Canada)

En la imagen anterior se muestra el AUV ise mun explorer, construido gracias a la colaboración de ISE, empresa dedicada a la fabricación de ROBs, y la Memorial University of Newfoundland. Dicho AUV ha sido utilizado en labores de investigación, como pueden ser investigación del efecto de los vertidos de la industria petrolera y de gas, monitorización del medio oceánico, misiones antárticas...Además, también se ha dedicado a labores como la detección de minas y otros elementos junto con Defense Research and Development Canada (DRDC). Mide 4.5 metros de largo con un diámetro de casco de 0.69 metros. Su peso es de 630Kg y presenta capacidad para mantener una velocidad de crucero de 2.3m/s y alcanzar profundidades de 3000m.

<sup>7</sup> Siglas de International Submarine Engineering Research

En cuanto a AUVs comerciales, se puede citar a la familia Hugin de Kongsberg Maritime, que tienen aplicación en el campo de la prospección de gas y petróleo, investigación marina, hidrografía y operaciones navales de ámbito militar..

	HUGIN 1000	HUGIN 1000 for 3000 m	HUGIN 3000	HUGIN 4500
Weight	650-850 kg	650-850 kg	1400 kg	1900 kg
Length	4.5 m	4.7 m	5.5 m	6.0 m
Diameter	0.75 m	0.75 m	1.00 m	1.00 m
Speed	2-6 kts	2-6 kts	2-4 kts	2-4 kts
Depth	1000 m	3000 m	3000 m	4500 m
Battery	LiPolymer pressure tolerant. 15 KWh	LiPolymer pressure tolerant. 15 KWh	Al/HP semi fuel cell, 45 KWh	Al/HP semi fuel cell, 60 KWh
Endurance	24hrs @ 4kts (with MBE, SSS, SBP and CTD)	24hrs @ 4kts (with MBE, SSS, SBP and CTD)	60hrs @ 4kts (with MBE, SSS, SBP and CTD)	60hrs @ 4kts (with MBE, SSS, SBP and CTD)
Navigation system and sensors (main + options)	NavP AINS: IMU, DVL, Depth, USBL, NavP TP Ranging, GPS, TerrNav	NavP AINS: IMU, DVL, Depth, USBL, NavP TP Ranging, GPS, TerrNav	NavP AINS: IMU, DVL, Depth, USBL, NavP TP Ranging, GPS, TerrNav	NavP AINS: IMU, DVL, Depth, USBL, NavP TP Ranging, GPS, TerrNav
Communication (main + options)	Acoustic command and data links, RF, Iridium, Ethernet, WLAN	Acoustic command and data links, RF, Iridium, Ethernet, WLAN	Acoustic command and data links, RF, Iridium, Ethernet, WLAN	Acoustic command and data links, RF, Iridium, Ethernet, WLAN
Payloads (main + options)	MBE, SSS, SBP, SAS, CTD turbidity sensor, ADCP, camera+ others	MBE, SSS, SBP, CTD turbidity sensor, ADCP, camera + others	MBE, SSS, SBP, CTD ADCP, camera + others	MBE, SSS, SBP, CTD, ADCP + others
Main applications	Naval, research, offshore, hydrography	Naval, research, offshore, hydrography	Offshore, research	Offshore, research

Ilustración 4. Familia Hugin, Kongsberg Maritime

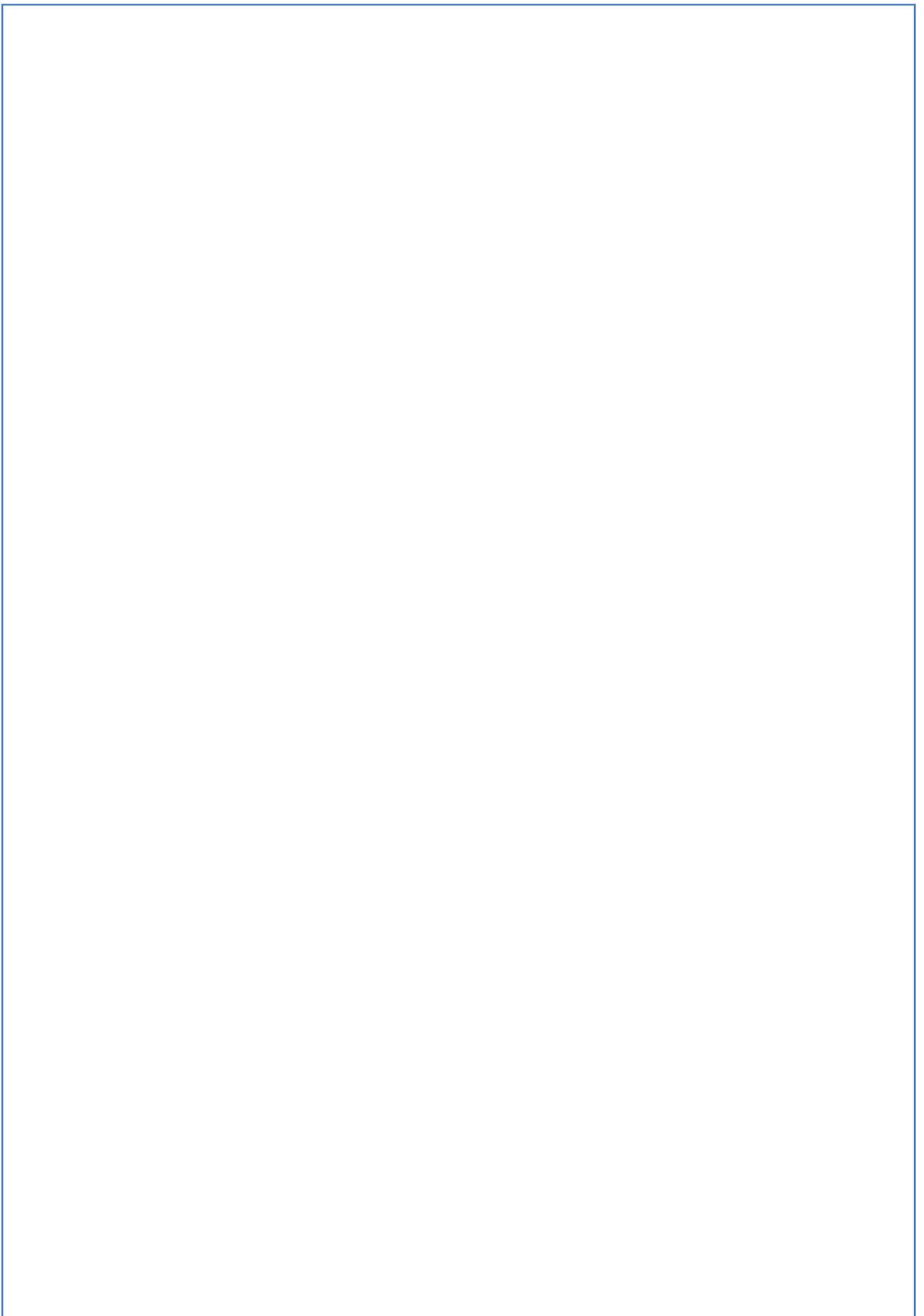
En la tabla anterior se muestran las diferentes características de los AUV miembros de la familia Hugin.



Ilustración 5. Hugin 1000, Kongsberg Maritim

# Fundamentos teóricos

---



## 4. Fundamentos teóricos

### 4.1. Consideraciones básicas

Un cuerpo inmerso en un fluido está sometido tanto a fuerzas viscosas como fuerzas de presión en el fluido. La suma de las fuerzas que actúan de forma perpendicular a la dirección de la lámina libre son las fuerzas de sustentación, mientras que las que actúan de forma paralela a dicha dirección son las fuerzas de arrastre. Las fuerzas de flotación y el peso también pueden actuar sobre el cuerpo, pero de todos modos las fuerzas de sustentación y arrastre están limitadas, por definición, a aquellas producidas por la acción dinámica del fluido.

Considerando las fuerzas que actúan sobre un perfil aerodinámico, los vectores perpendiculares a su superficie son fuerzas normales por unidad de superficie, a las cuales se referirá de forma simple como presión. Debido a que la velocidad del flujo en la parte de arriba del perfil es mayor que la velocidad de la lámina libre, la presión en la superficie superior es negativa, o menor que la de la lámina libre (esto se depende directamente de la aplicación de la ley de Bernouilli). Debido a que la velocidad en la región inferior es menor que la velocidad de la lámina libre, la presión aquí es positiva, o mayor que la de la lámina libre. Entonces, ambas presiones, positivas y negativas contribuyen a la sustentación del cuerpo.

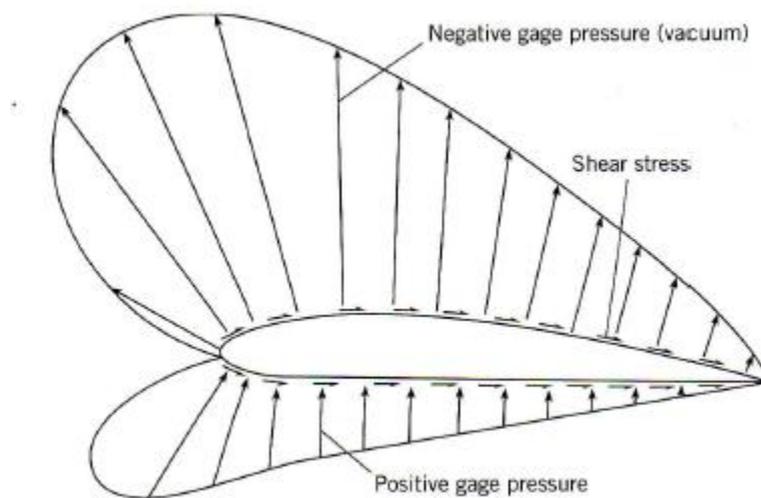


Ilustración 6. Distribución de presiones en un cuerpo hidrodinámico

Los vectores que son paralelos a la superficie representan las fuerzas cortantes por unidad de área, a las cuales se referirá de forma simple como tensión cortante. A excepción del frontal del perfil, los cortantes actuarán de forma paralela a la dirección de lámina libre. Por lo que contribuyen principalmente al arrastre.

La formulación matemática para la sustentación y arrastre en términos de presión y de tensiones cortantes se puede derivar de la siguiente figura, donde se muestra la presión y las fuerzas viscosas actuando en un diferencial de área. La magnitud de la fuerza de presión es  $\delta F_p = p \cdot \delta A$ , y la magnitud de la fuerza viscosa es  $\delta F_v = \tau \cdot \delta A$ . De todos modos, es conveniente

separar las fuerzas en componentes que son normales y paralelas a la dirección de lámina libre para determinar la sustentación y el arrastre respectivamente.

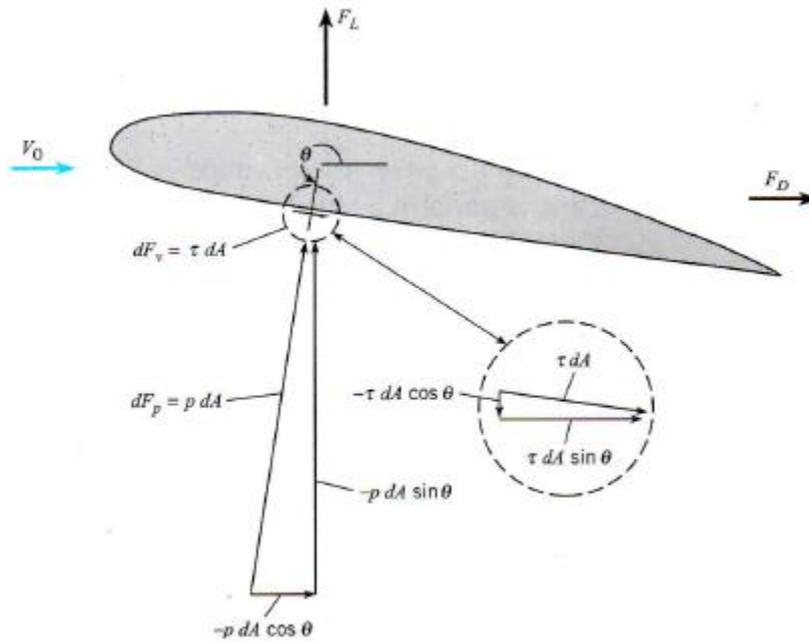


Ilustración 7. Detalle arrastre en cuerpo aerodinámico

Fuerza sustentación

$$\delta F_s = -p \cdot \delta A \cdot \sin\theta - \tau \cdot \delta A \cdot \cos\theta$$

Fuerza de arrastre

$$\delta F_a = -p \cdot \delta A \cdot \cos\theta + \tau \cdot \delta A \cdot \sin\theta$$

Obteniéndose la sustentación total y el arrastre total mediante la integración de estas fuerzas a lo largo de la superficie del perfil aerodinámico.

$$F_s = \int (-p \cdot \sin\theta - \tau \cdot \cos\theta) \cdot \delta A$$

$$dF_a = \int (-p \cdot \cos\theta + \tau \cdot \sin\theta) \cdot \delta A$$

Ambas ecuaciones son aplicables para flujo bidimensional, lo cual implica que no haya componente de velocidad perpendiculares al plano del dibujo, por lo que las tensiones cortantes y la presión están situadas en el plano de la página. No obstante, el mismo principio básico (separación de las fuerzas en direcciones paralelas y normales a la dirección de lámina libre) se puede extender fácilmente a los casos de flujo tridimensional.

Existe otra clasificación, que es la del cuerpo axis métrico (el caso aplicable en parte de esta tesina). Aquí, si el flujo es uniforme y paralelo al eje de simetría, el efecto resultante del flujo es bidimensional. Esto es, para un sistema de coordenadas r-x, donde x se mide a lo largo del eje de simetría y r es la distancia perpendicular del eje a un punto, los componentes de la velocidad existen solo en las direcciones x e r.

Las ecuaciones mencionadas anteriormente permiten evaluar la sustentación y el arrastre cuando la presión y las fuerzas tangenciales se pueden obtener de forma tanto analítica como experimental. De todos modos es habitual obtener el arrastre y la sustentación media mediante medidas con dinamómetros en túneles de viento.

## 4.2. Arrastre para cuerpos bidimensionales

Para ilustrar el efecto relativo de las fuerzas viscosas y de presión en el arrastre, se considera una placa orientada primeramente de forma paralela al flujo, y en segundo lugar de forma perpendicular. En el primer caso actúan las fuerzas cortantes, mientras que en el segundo solo actúan las fuerzas de presión.

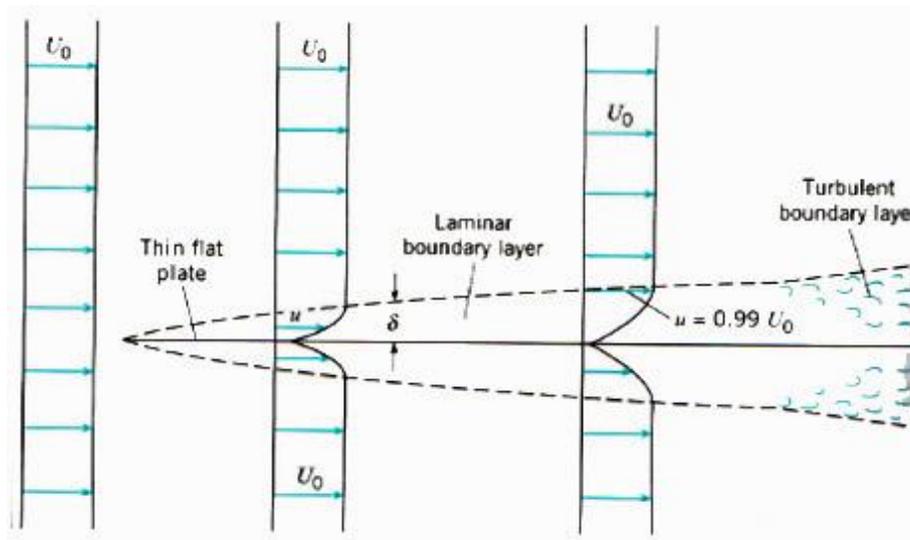


Ilustración 8. Placa paralela a un flujo

En el primer caso, placa paralela al flujo, es conveniente expresar la tensión tangencial  $\tau_0$  y la fuerza cortante en términos de coeficientes de resistencia adimensionales y la presión dinámica en la capa límite ( $\rho V_0^2/2$ ).

$$c_f = \frac{\tau_0}{\rho V_0^2/2}$$

El factor  $c_f$  depende del número de Reynolds, siendo calculado de una forma u otra en función si el flujo es laminar o es turbulento.

La fuerza cortante total viene dada por la ecuación  $\delta F_v = \int \tau_0 \cdot \delta A$ , que dada en términos de  $c_f$  queda como se presenta a continuación.

$$F_v = \int c_f \cdot (\rho V_0^2/2) \cdot \delta A = \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot \int c_f \cdot \delta A$$

Si se divide a ambos lados de la ecuación por el producto de la longitud y la anchura de la placa ( $bl$ ), se obtiene que:

$$\frac{F_v}{bl} = \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot \left[ \frac{\int c_f \cdot \delta A}{bl} \right]$$

Siendo  $C_f$  un valor dado que ese expresa como sigue:

$$C_f = \frac{\int c_f \cdot \delta A}{bl} = \frac{F_v}{\rho V_0^2 \cdot bl/2}$$

Por los que se deduce que la fuerza de arrastre se puede expresar, para este caso y para ambas caras de la placa, como :

$$F_a = 2 \cdot C_f \rho bl \cdot \frac{V_0^2}{2}$$

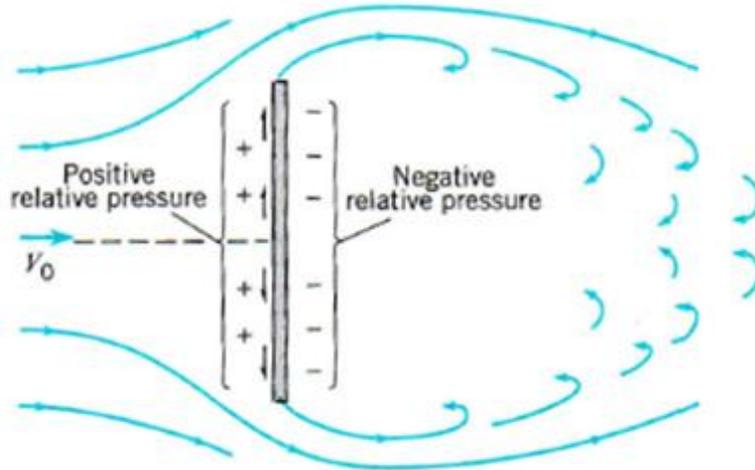


Ilustración 9. Placa perpendicular a un flujo

En el segundo caso, placa perpendicular al flujo, la fuerza de arrastre se expresa como

$$F_a = \int -(p \cdot \cos\theta) \cdot \delta A$$

Las presiones aguas arriba y aguas debajo de la placa se pueden obtener de forma experimental y, usualmente, vienen dados en términos de  $C_p$  para flujos con valores relativamente altos de números de Reynolds.

La presión aguas abajo es esencialmente constante, y como  $\theta=0$ , la contribución al arrastre aguas abajo es:

$$F_{a,aguas\ abajo} = -\left(p_0 - 1.2\rho \frac{V_0^2}{2}\right) \cdot bl = -p_0 bl + 1.2\rho \frac{V_0^2}{2} bl$$

Donde  $l$  es la longitud normal al plano del papel, y por definición de un cuerpo bidimensional  $l \gg b$ .

Para aguas arriba,  $\theta=\pi$ , por lo que  $\cos\theta=-1$ , siendo la contribución de la fuerza de arrastre en este lado:

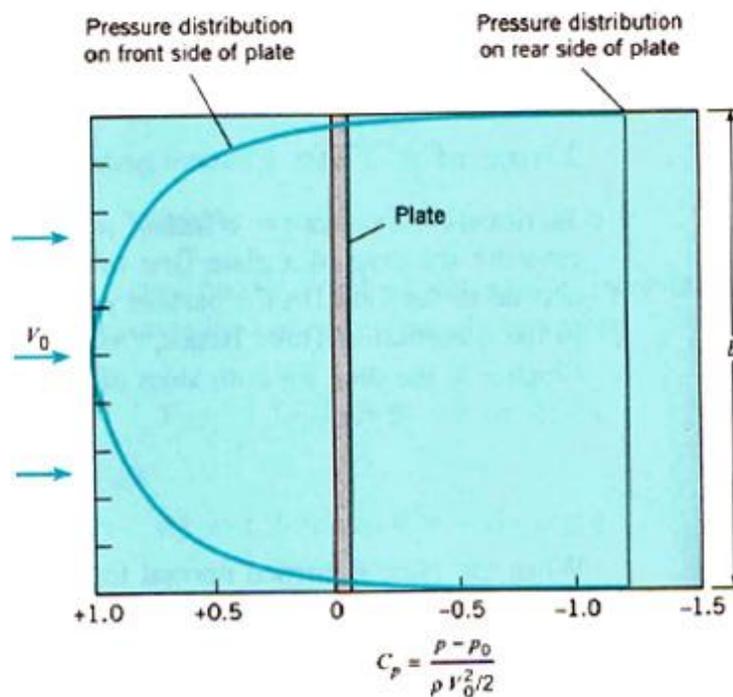
$$F_{a,aguas\ arriba} = \int_{-b/2}^{b/2} \left(p_0 + C_p \rho \frac{V_0^2}{2}\right) l \delta y = p_0 bl + \rho \frac{V_0^2}{2} l \int_{-b/2}^{b/2} C_p \delta y$$

El arrastre total es la suma del arrastre aguas arriba y aguas abajo, por lo que resultará, asumiendo que el factor integrado que aparece es igual a 0.80b:

$$F_a = \rho \frac{V_0^2}{2} l \left( \int_{-b/2}^{b/2} C_p \delta y + 1.2b \right) = \rho \frac{V_0^2}{2} lb \cdot (0.80 + 1.2)$$

Definiendo la suma (0.80+1.2) como  $C_d$ , la fuerza de arrastre se puede escribir como:

$$F_a = C_d A_p \rho \frac{V_0^2}{2}$$



**Ilustración 10. Distribución de presiones en una placa**

Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre,  $A_p$  es el área proyectada del cuerpo,  $\rho$  la densidad del fluido y  $V_0$  la velocidad de lámina libre. Como  $C_d$  es función de  $C_p$ , que a su vez es función del número de Reynolds,  $C_d$  también será función de este último. Cuando el arrastre del cuerpo es debido únicamente a las fuerzas cortantes,  $C_d$  todavía es función del número de Reynolds, ya que  $\tau$  también es función de este.

$C_d$  también se puede medir en un túnel de viento mediante un dinamómetro mediante la relación que sigue:

$$C_d = \frac{F_a}{A_p \rho \frac{V_0^2}{2}}$$

En la mayor parte de la literatura, dicho  $C_d$  se obtiene de esta manera a la hora de obtenerlo en función del número de Reynolds. En general, el arrastre en un cuerpo es debido tanto a la variación de presión como al la fricción. El arrastre por presión depende en mayor

parte de la forma del cuerpo, por lo que también se llama arrastre de forma. El arrastre viscoso, también se llama arrastre de fricción de pared.

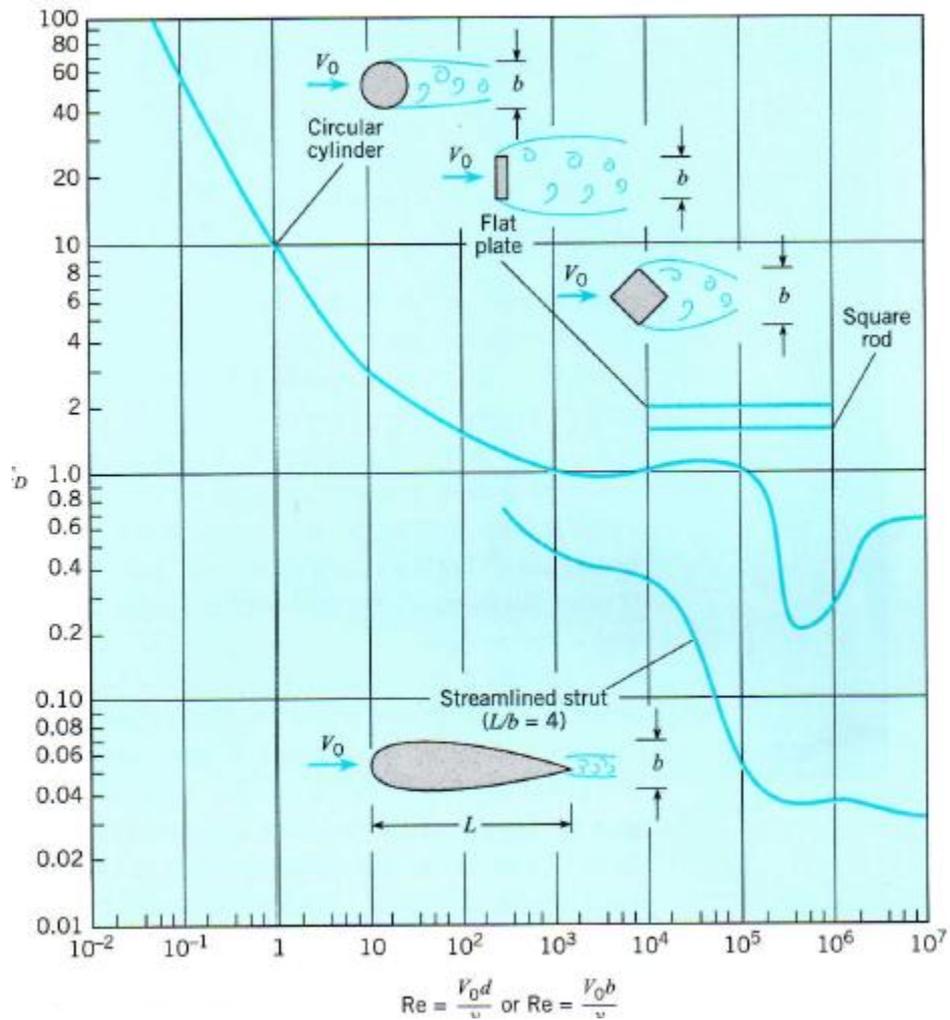


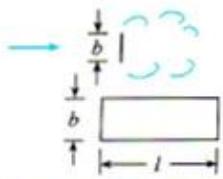
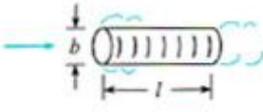
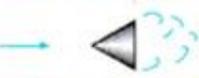
Ilustración 11. Coeficientes de arrastre bidimensionales

### 4.3. Arrastre en cuerpos axis métricos y tridimensionales

Los mismos principios que se aplican en el arrastre de cuerpos bidimensionales se aplican a los cuerpos axis métricos y tridimensionales.

Para valores de Reynolds muy bajos, el coeficiente de arrastre viene dado por ecuaciones exactas que relacionan  $C_d$  y  $Re$ , mientras que para altos valores de  $Re$  el coeficiente de arrastre es constante para cuerpos angulosos a la vez que para cuerpos redondeados varía bruscamente.

TABLE 11.1 APPROXIMATE  $C_D$  VALUES FOR VARIOUS BODIES

Type of Body	Length Ratio	Re	$C_D$	
	$l/b = 1$	$>10^4$	1.18	
	$l/b = 5$	$>10^4$	1.20	
	$l/b = 10$	$>10^4$	1.30	
	$l/b = 20$	$>10^4$	1.50	
	$l/b = \infty$	$>10^4$	1.98	
	$l/d = 0$ (disk)	$>10^4$	1.17	
	$l/d = 0.5$	$>10^4$	1.15	
	$l/d = 1$	$>10^4$	0.90	
	$l/d = 2$	$>10^4$	0.85	
	$l/d = 4$	$>10^4$	0.87	
	$l/d = 8$	$>10^4$	0.99	
	Square rod	$\infty$	$>10^4$	2.00
	Square rod	$\infty$	$>10^4$	1.50
	Triangular cylinder	$\infty$	$>10^4$	1.39
	Semicircular shell	$\infty$	$>10^4$	1.20
	Semicircular shell	$\infty$	$>10^4$	2.30
	Hemispherical shell		$>10^4$	0.39
	Hemispherical shell		$>10^4$	1.40
	Cube		$>10^4$	1.10
	Cube		$>10^4$	0.81
	Cone—60° vertex		$>10^4$	0.49
	Parachute		$\approx 3 \times 10^7$	1.20

SOURCES: Brevoort and Joyner (4), Lindsey (19), Morrison (22), Roberson et al. (24), Rouse (26), and Scher and Gale (28).

Ilustración 12. Coeficientes de arrastre tridimensionales (I)

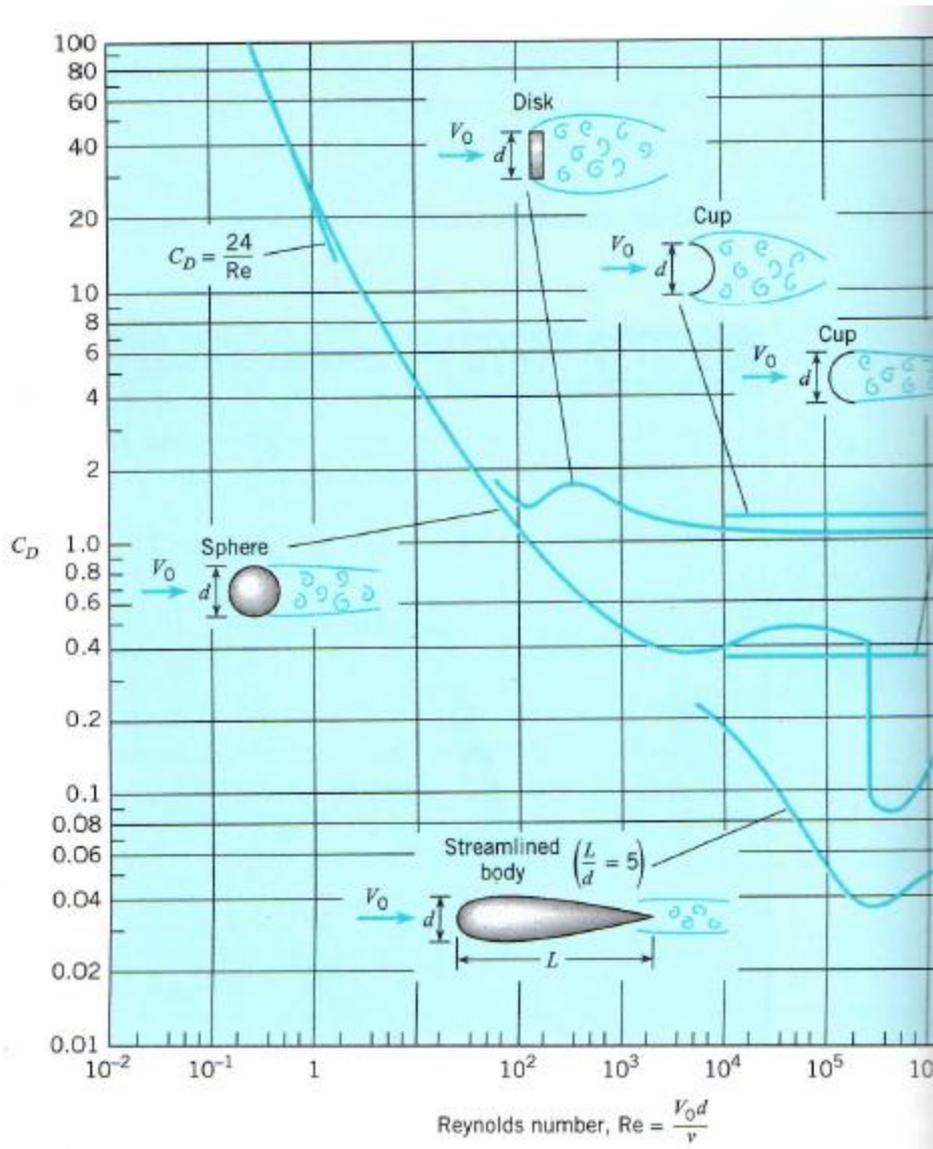
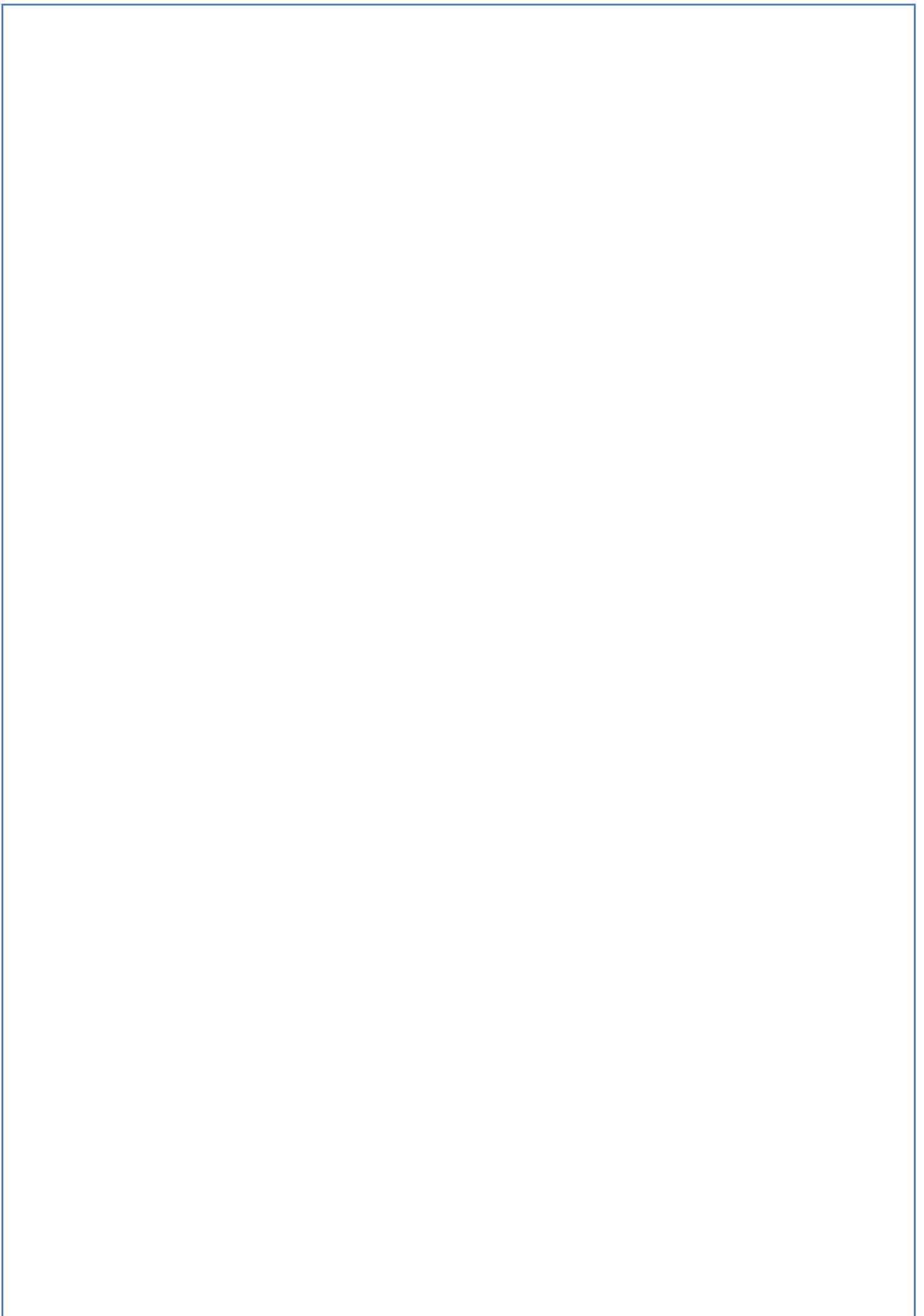


Ilustración 13. Coeficientes de arrastre tridimensionales (II)

# CONSIDERACIONES DE DISEÑO

---



## 5. Consideraciones de diseño

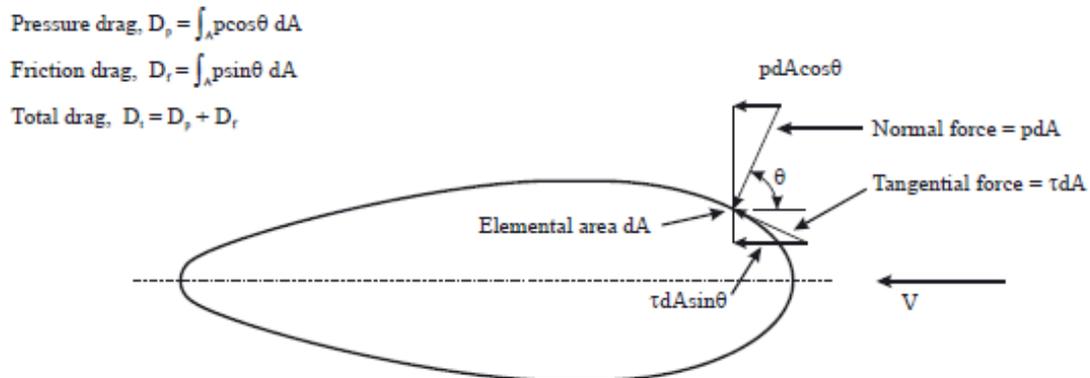
### 5.1. Forma

El principal parámetro que determina prestaciones hidrodinámicas del sumergible es la relación existente entre su longitud y su diámetro (factor L/B). Existen dos tipos de arrastre que se han de considerar, el que es debido a la presión y el que es debido a la fricción de las paredes

La presión actúa perpendicularmente en cada punto de la superficie, siendo máxima en la nariz del submarino, en el punto en que las líneas aerodinámicas se dividen. Según la ecuación de Bernouilli la presión es más elevada cuando estas líneas se separan (aumentando la velocidad). En el caso de que el fluido no fuese viscoso, la presión en la cola adquiriría el mismo valor que en la nariz, por lo que la integral de las presiones actuando en el área elemental será 0:

$$\oint p \cdot dA = 0$$

No obstante, el fluido sí que posee viscosidad, lo que produce fuerzas tangenciales o fricción en las paredes.



The components of the two forces in the direction of the velocity,  $V$ , give the drag on the elemental area.

Integration gives the drag on the body.

Ilustración 14. Componentes fuerzas en cuerpo aerodinámico

El factor L/B tiene diferentes efectos contrapuestos en los diferentes tipos de arrastre. Un factor L/B elevado proporciona un cuerpo largo y esbelto, lo que produce que el arrastre debido a la presión disminuya. No obstante, ello implica que la superficie del cuerpo sea mayor, lo que produce que el arrastre debido a la fricción de las paredes aumente. El valor óptimo de L/B suele estar sobre 7. El inconveniente es que en esta región la curva combinada de los dos tipos de arrastres es prácticamente plana, por lo que no se puede obtener un mínimo con precisión.

No obstante esta conclusión no tiene en consideración los apéndices del casco, tales como el timón y demás superficies de control, que aumentan considerablemente el arrastre.

Otro parámetro que influye en la resistencia de un cuerpo hidrodinámico es el coeficiente prismático,  $C_p$ , que describe la cantidad de volumen al final de la quilla, y la rugosidad del casco.

La forma ideal implicaría un diámetro variable a lo largo de la longitud del AUV. La pro debería tener una forma elipsoidal, mientras que la popa debería de ser parabólica. Una pequeña variación de esta forma, considerando una sección central paralela, reduciría los costes de producción sin una penalización muy severa en el arrastre y en el ruido generado. Una gran variación no solo afectaría al aumento del arrastre y el ruido, sino que también impondría limitaciones a la velocidad y a la autonomía del vehículo.

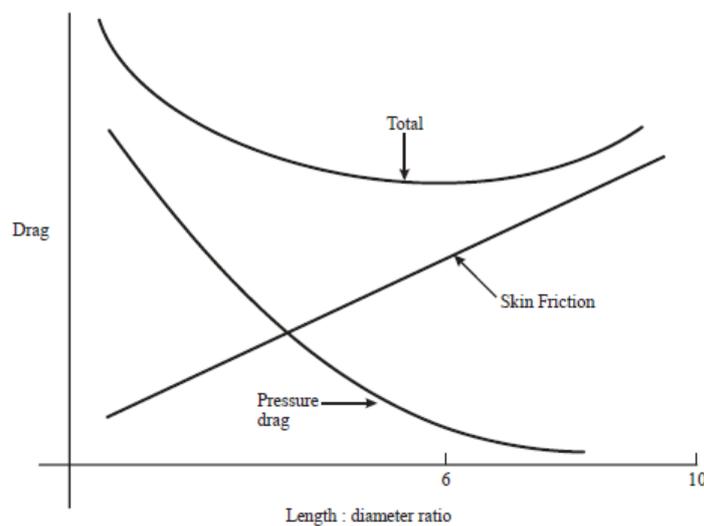


Ilustración 15. Evolución arrastre vs L/D

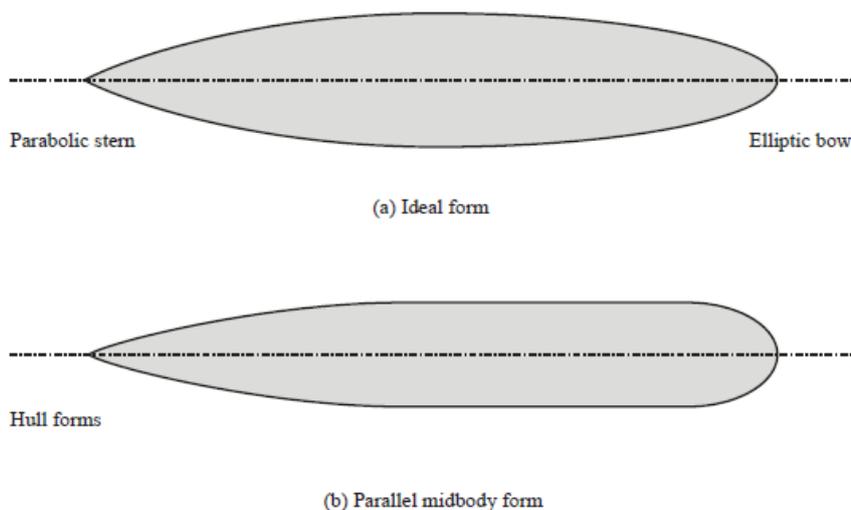


Ilustración 16. Ejemplo de formas de casco

## 5.2. Efecto de la capa límite en la fricción

La fricción entre la superficie está condicionada en función del tipo del flujo que lo envuelve, si es laminar o turbulento. En el flujo laminar, varias capas de fluid deslizan suavemente unas sobre otras, conformando un gradiente de velocidades que va desde velocidad nula en la superficie del sumergible hasta la velocidad de lamina en las capas más alejadas. Por otra parte, en el flujo turbulento dichas capas giran y rotan sobre si mismas, produciendo un aumento del ruido y de la fricción.

El parámetro que permite determinar si el flujo es laminar o turbulento (o transición entre ambos) es el numero de Reynolds. A altos número de Reynolds el flujo será turbulento, mientras que para valores bajos será laminar.

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot l}{\vartheta}$$

En un cuerpo hidrodinámico, en el que la presión varía en función de la forma, un gradiente de presión negativo en la dirección del flujo permite un flujo laminar, mientras que un aumento de la presión lo dificultaría. Es imposible mantener un flujo laminar, pero si se pudiese mantener en gran parte de la superficie del cuerpo se conseguirían beneficios significativos en lo que se refiere a la velocidad, autonomía y al ruido generado.

En una región donde exista un gradiente de velocidad severo que frene bruscamente o invierta el flujo en la capa límite, ésta se puede separar de la superficie del cuerpo. Este fenómeno se denomina separación. Este efecto viene acompañado de un incremento considerable del ruido y de del arrastre si se produce en una región extensa de cuerpo.

El fenómeno de la separación se produce de forma más inmediata en fluidos laminares, mientras que en fluidos turbulentos su mayor energía permite una mayor penetración en la región donde se produce el incremento de presión.

En la ilustración 17 se muestra una capa límite extendiéndose a lo largo del sumergible. El flujo en la proa es laminar, evolucionando posteriormente a turbulento (tal como se muestra en el número Re, para una velocidad dada). Notar el gradiente de velocidades entre la superficie y la superficie de lámina libre en la zona laminar.

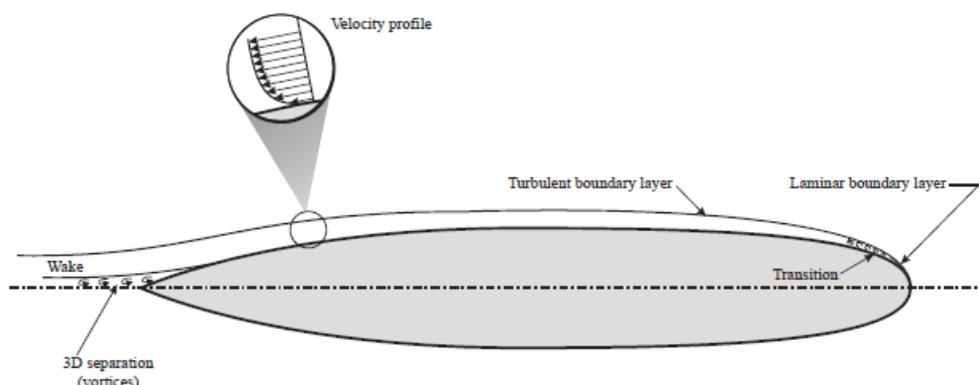


Ilustración 17. Capa límite en el casco de un submarino

### 5.3. Superficies de control

Los apéndices obstruyen el flujo principal que recorre el casco, generando un arrastre adicional. Algunos apéndices son necesarios para el control, y no pueden ser eliminados con la tecnología existente actualmente.

Las aletas frontales son necesarias para realizar la inmersión y emerger, además de mejorar la maniobrabilidad de la nave. Las aletas posteriores suelen montarse en forma de aspa o cruz. Si se montan delante de la hélice se genera una estela que puede afectar a la suavidad del comportamiento de ésta. No obstante es complicado situar dichas aletas detrás de la hélice, por lo que cualquier esfuerzo en este sentido es inútil.

Las superficies de control pueden ser de dos tipos, completamente movibles, o con una base fija y una región del cuerpo móvil.

Las superficies completamente móviles presentan el problema de que los ejes y los rodamientos que las conforman han de soportar cargas considerables al estar sometidas a grandes momentos flectores a plena carga hidrodinámica. Ello implica sobredimensionar estos elementos, lo que se penaliza en la necesidad de sobredimensionar también el casco.

Otro inconveniente de las superficies móviles radica en la posible separación de la capa límite en la región de baja presión de la aleta, consecuencia de la modificación del ángulo de incidencia de ésta para la realización de correcciones en la trayectoria.

### 5.4. Influencia de la propulsión

La mejor forma para conseguir el mínimo arrastre puede ser la de un cuerpo hidrodinámico para una nave que es arrastrada, no obstante puede no ser la óptima para un cuerpo que es impulsado por una hélice. Esto es debido a que el incremento de propulsión asociado a la presiones afecta a la distribución de las presiones a en el casco.

El empuje se logra incrementando el momento angular del fluido que atraviesa la hélice. Esto se puede conseguir con diámetros pequeños de hélice y flujo a alta velocidad, o mediante diámetros grandes y flujos de baja velocidad.

Existen dos factores importantes y opuestos en la física. El fluido que entra en un sistema con una sola hélice, la mayor parte de él se desplaza lentamente debido al efecto de la capa límite del cuerpo del submarino. Este fluido es acelerado hasta alcanzar el empuje deseado, pero nunca alcanzará la misma velocidad aguas abajo que el que sea impulsado por una hélice situada fuera de la capa límite y que parte de una velocidad inicial mayor. No obstante la eficiencia propulsiva<sup>8</sup> del primero será mayor que la de dos propulsores desplazados en el mismo submarino y a la misma velocidad situados fuera de la capa límite.

---

<sup>8</sup> Depende de la velocidad del chorro aguas abajo relativa a la velocidad de Vessel. Cuando menor sea esta velocidad relativa, mayor será la eficiencia.

A consecuencia de esto una popa en que el arrastre sea mayor que otra se puede mejorar la eficiencia propulsiva, compensando el mayor consumo de combustible debido al mayor arrastre.

El segundo factor hace referencia a la aceleración del fluido en la hélice. Esto proporciona una mayor velocidad, y por tanto incrementa el arrastre debido a la fricción en el cuerpo.

## 5.5. Otras consideraciones

Si la nariz del sumergible es achatada se puede producir una burbuja en la que se produzca la separación de la capa límite. Esta puede ser seguida de una readhesión de una capa límite turbulenta que debe ser evitada.

Los diferentes grados de rugosidad incrementan la fricción en un flujo turbulento (ilustración 8). Este asunto es ciertamente complejo, ya que hay tipos de rugosidad que son función del número de Reynolds y otros no. Otros factores de los que puede depender son:

- Rugosidad estructural, ondulaciones, soldadura, cambios de sección.
- Daños locales
- Corrosión (pitting)
- Oxido
- Fallos de pintura
- Inclusiones
- Otros

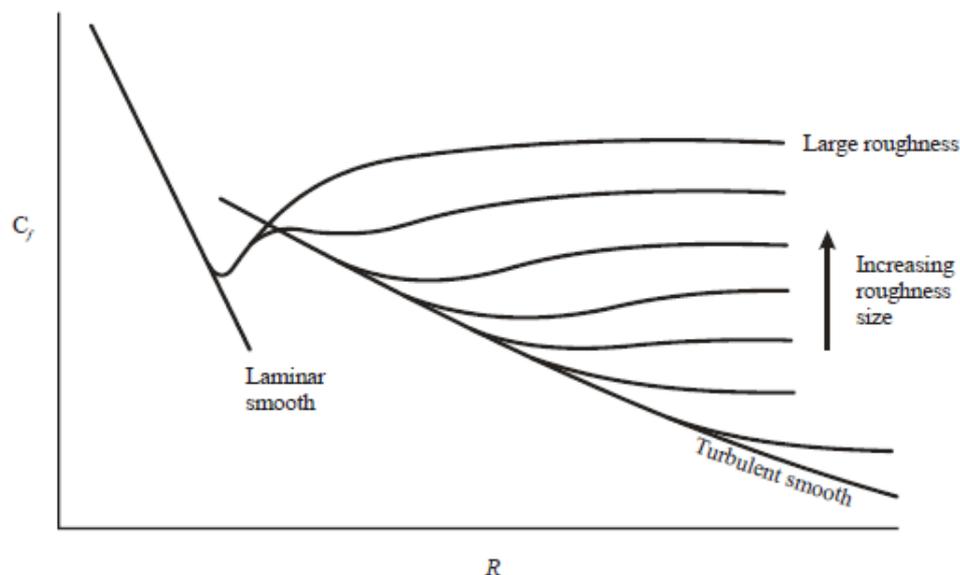


Ilustración 18. Coeficiente fricción vs Re

La existencia de agujeros en el caso (por ejemplo para drenaje) representan una fuente considerable de ruido y de arrastre.

En el caso de que haya que incluir algún tipo de mástil o similar se ha de procurar que posea forma hidrodinámica. En el caso que tenga forma cilíndrica y haya que colocar más de uno, se colocaran uno detrás de otro en la dirección perpendicular al flujo en tal de minimizar el arrastre.

# METODOLOGÍA DE ENSAYO

---



## 6. Metodología ensayo

En este apartado se va a mostrar los pasos que se han seguido para la realización del modelo y del ensayo. Para ello se ha utilizado el programa CAD/CAE/CAM de Siemens NX6. Dicho programa cuenta con diversos módulos, de los cuales se emplearán en esta tesina el que se ocupa del modelado y el utilizado para la simulación avanzada.

### 6.1. Modelado

Para la realización del modelo en 3D se utilizará el módulo de *modelado*. Para ello, en un archivo nuevo se selecciona en la etiqueta *iniciar* el módulo correspondiente. Es conveniente guardar el archivo resultante en la misma carpeta en la que se guardarán los demás archivos resultantes de las simulaciones. El formato con el cual se trabaja en esta tesina es .prt.

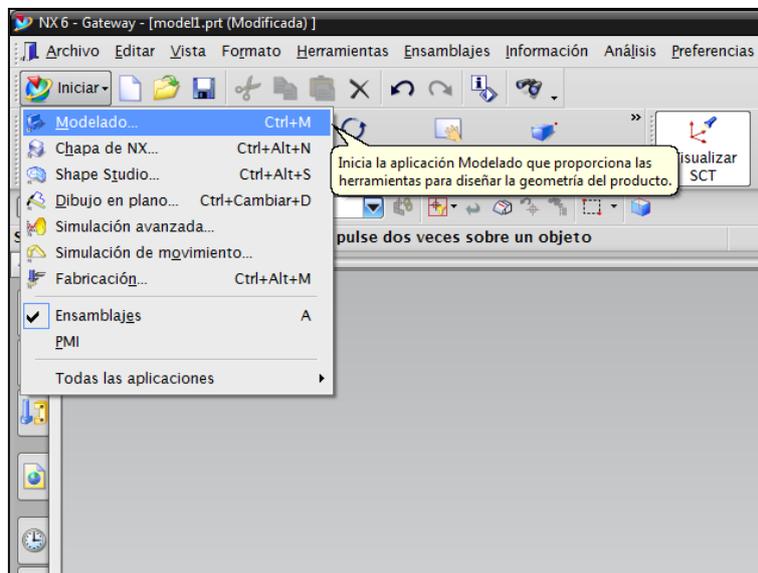


Ilustración 19 Menú iniciar NX6

La realización del cuerpo se realizará mediante la revolución de un croquis. Al sólido resultante se le extraerán las caras dando lugar a un cuerpo laminar, el cual deberá ser desparametrizado para poder eliminar los sólidos de los que depende. Finalmente se modificará dicho cuerpo para facilitar el posterior mallado. Ello puede implicar generación de nuevas caras o simplificar ciertos puntos de su geometría.<sup>9</sup>

Para la creación del croquis se selecciona el comando croquis en la barra de herramientas, para después elegir en el menú desplegable el plano el que se quiere realizar. En este caso se ha seleccionado el plano ZY.

<sup>9</sup> En los ensayos se detectaron problemas de mallado producida por la superposición de la malla en la popa del casco. Esto se solucionó truncando ésta 60mm.

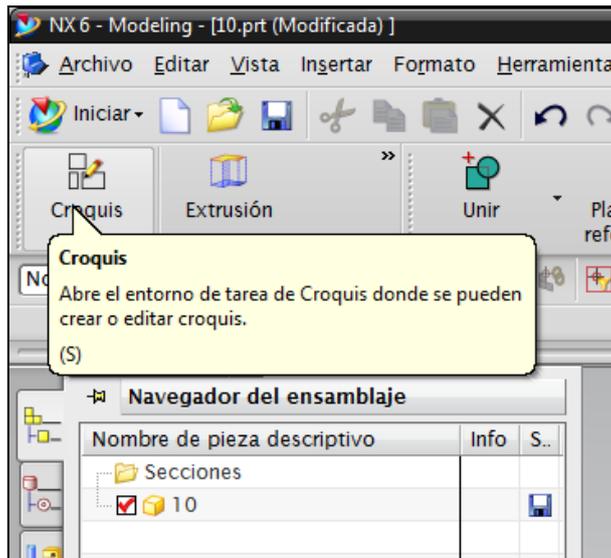


Ilustración 20. Comando de croquis

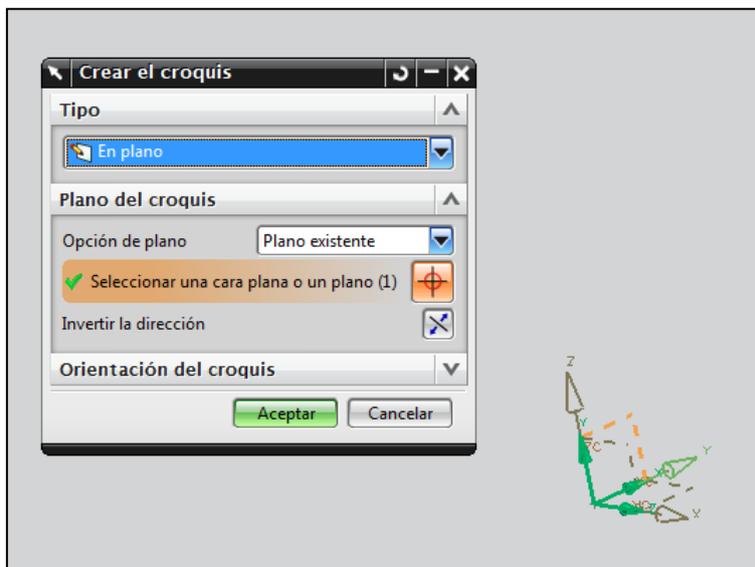


Ilustración 21. Ventana de croquis

Una vez dentro del menú de croquis, se generará el boceto en 2D que se revolucionará para la realización del sólido. En este caso, se ha realizado mediante la ayuda de los comandos de *línea*, *cónica* (realización de la elipse), *recorte rápido* y *arco*. En este proceso se han aplicado condiciones de tangencia entre las diferentes curvas implicadas en el croquis (*restricciones*), además de imponer las medidas adecuadas de cada uno de los elementos mediante el comando de *medidas deducidas* (acotación).

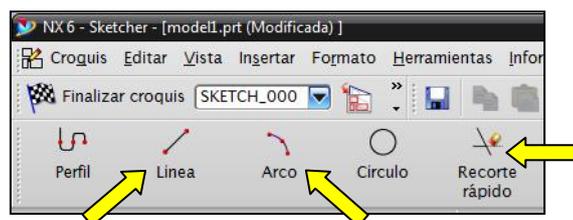


Ilustración 22. Herramientas croquis 1



Ilustración 23. Herramientas croquis 2

Inicialmente se traza un alinea desde el punto (0,0) de 2000mm de longitud, la cual servirá de referencia como eje de revolución y determinará la longitud total del casco (en este caso). Mediante el comando de *medidas deducidas* se fijará su longitud y mediante el comando de *restricciones* se le impondrá la condición de horizontalidad. También se trazará una línea vertical en el punto medio de la referencia horizontal de longitud igual al radio del casco. Esta línea servirá para marcar el punto de transición entre la elipse y la parábola o como punto medio del tramo recto en el caso que el casco posea. En el último supuesto considerado se trazará otra línea vertical con la misma longitud, centrada en la elipse, que implicara el paso de ésta al tramo recto.

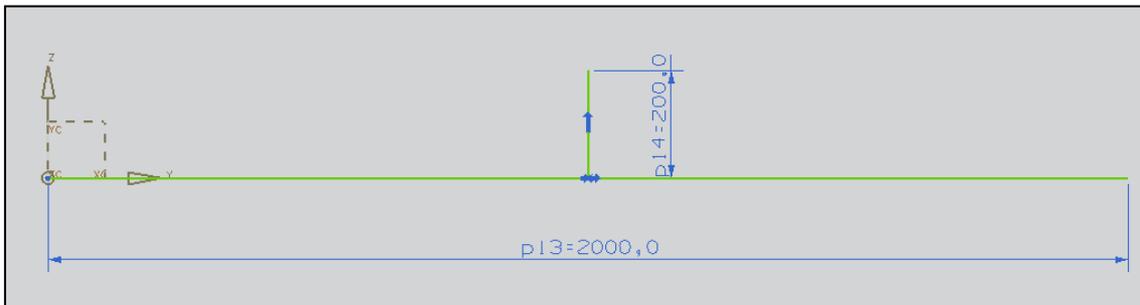


Ilustración 24. Referencias casco elipsoidal

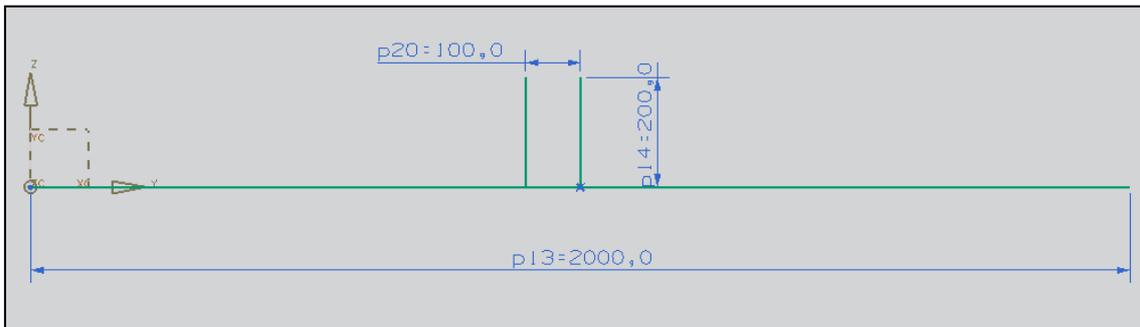


Ilustración 25. Referencias casco tramo recto

A continuación se dibujará una elipse centrada en el punto medio de la línea (o descentrada la mitad del tramo recto, si posee), cuyo semieje menor será el radió del casco y su semieje mayor será tal que coincida con uno de los extremos de la línea de referencia. Mediante el comando *recorte rápido* solo se dejará un cuarto de la elipse, el comprendido entre la referencia horizontal y la referencia vertical que pasa por su centro.

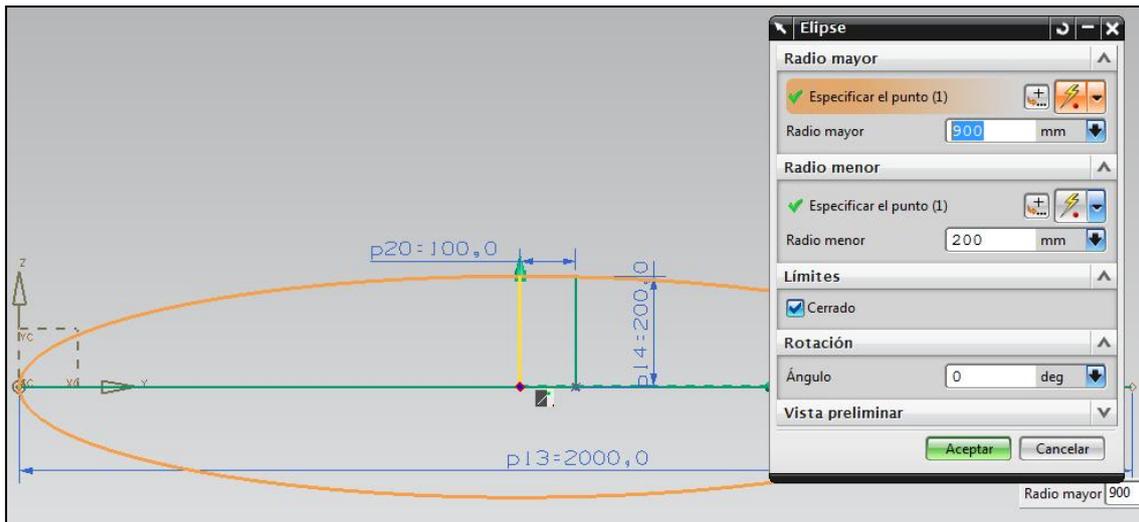


Ilustración 26. Realización de la elipse

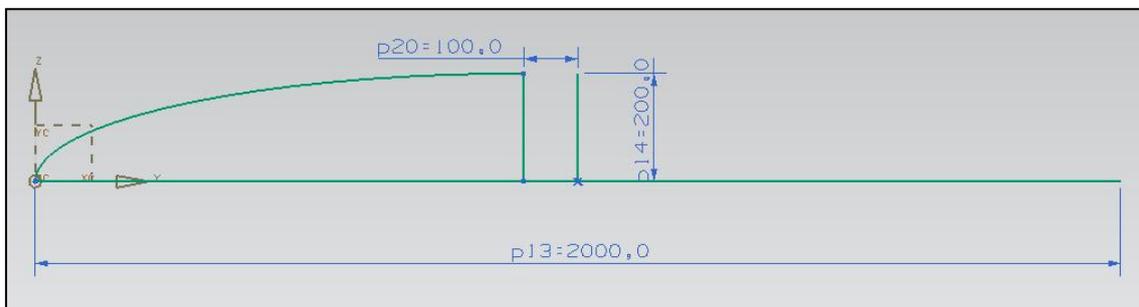


Ilustración 27. Recorte de la elipse

Si el casco posee tramo recto, se trazarán dos líneas horizontales de igual longitud (con la correspondiente restricción) en el extremo de la línea vertical situada en el centro de la referencia. Dichas líneas serán tangentes a la elipse y al arco de proa y popa.

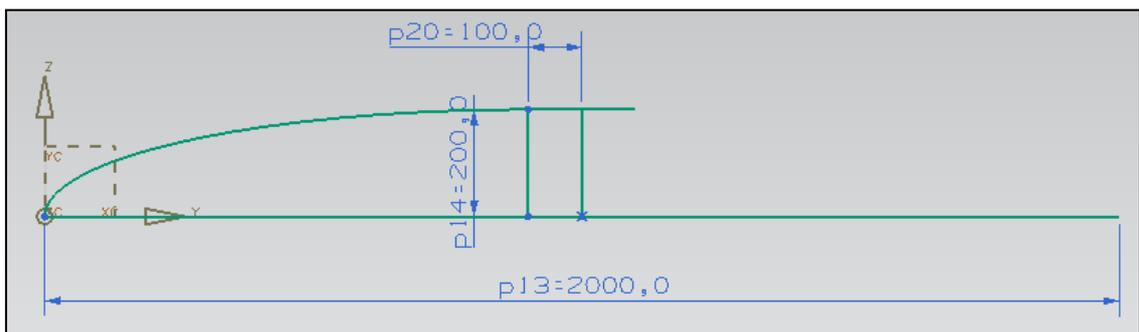


Ilustración 28. Recorte de la elipse (caso de tramo recto)

Mediante el comando de *arco* se dibujará la popa. Para ello se considera uno de los extremos de la referencia horizontal y el extremo de la elipse recortada o de la línea del tramo recto, según el caso. Dicho arco ha de ser tangente a la elipse o a la línea horizontal mediante la aplicación de la restricción correspondiente. Considerar que todas las medidas se deberán fijar con el comando de *medidas deducidas*. El resultado final es el que sigue.

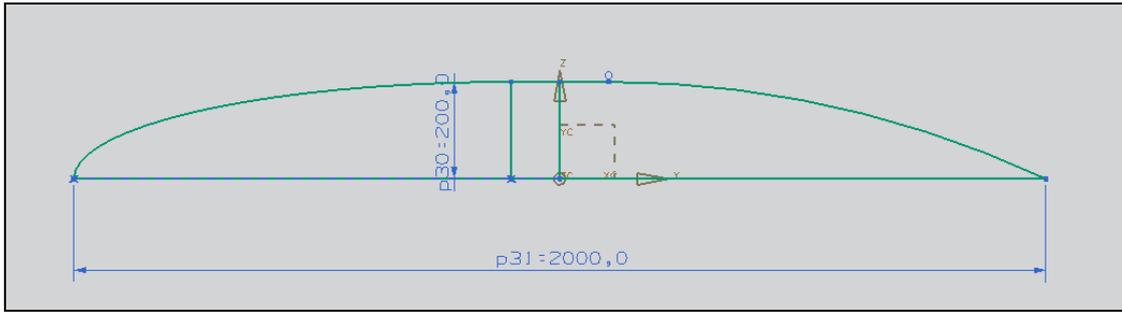


Ilustración 29. Croquis finalizado

El croquis generado se revoluciona para genera un cuerpo sólido. Para ello se utiliza el comando *revolución* (R). Para realizar dicha operación se seleccionan las curvas a revolucionar (es conveniente seleccionar curva única en el filtro de selección, en tal de no seleccionar el croquis entero), el vector de giro (la referencia horizontal), el punto base y el ángulo que se desea (360°). En la siguiente imagen se identifican dichos elementos (a excepción de punto, que se selecciona el que viene por defecto)

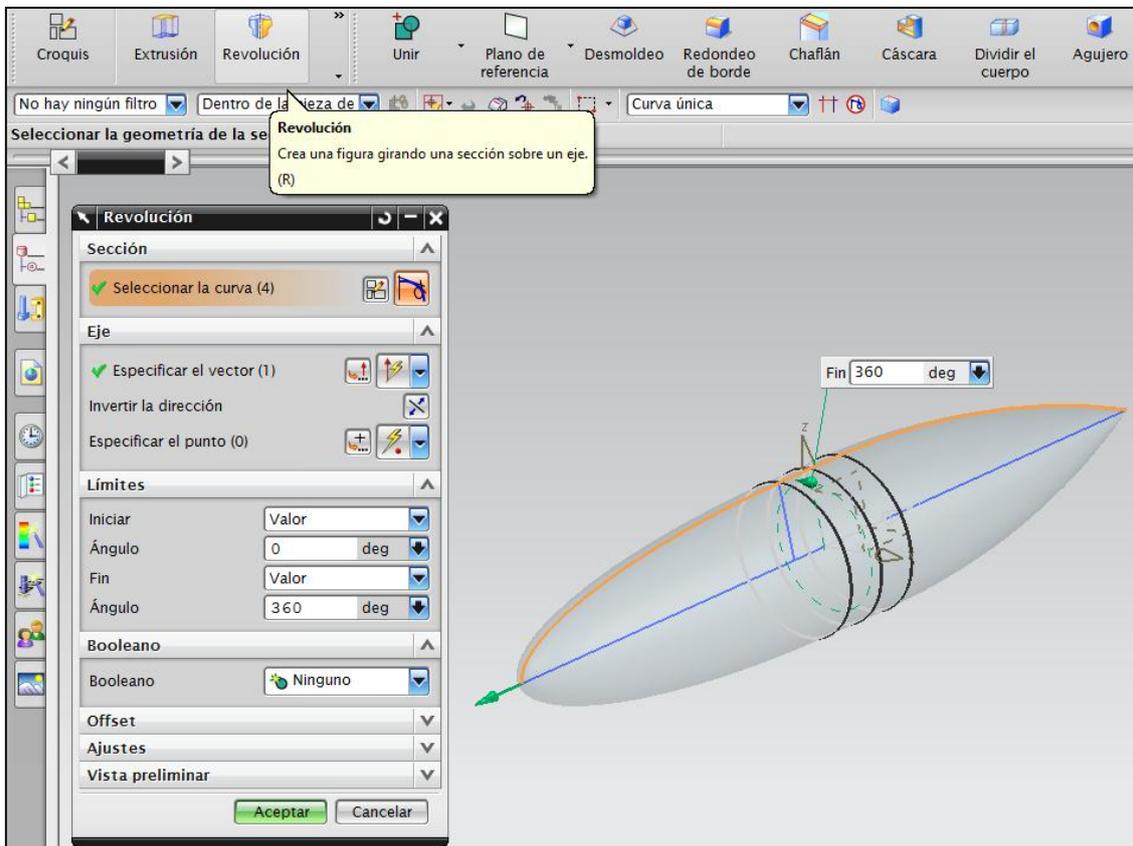


Ilustración 30. Proceso de revolución

El siguiente paso lleva a extraer las superficies en tal de generar un cuerpo laminar. Dichas superficies serán desparametrizadas mediante el comando *quitar parámetros*, para eliminar la dependencia de los sólidos de los que dependen y así poder suprimir estos últimos (este proceso es conveniente para realizar el mallado en 2D, pero no necesario<sup>10</sup>). Para generar

<sup>10</sup> Esto facilita el procedimiento de selección de superficies a la hora de realizar el mallado

las superficies se selecciona el cuerpo y se aplica el comando *extraer*. A continuación, se quitan los parámetros de dichas caras con la herramienta *quitar parámetros* y se borran los sólidos de los que dependen.

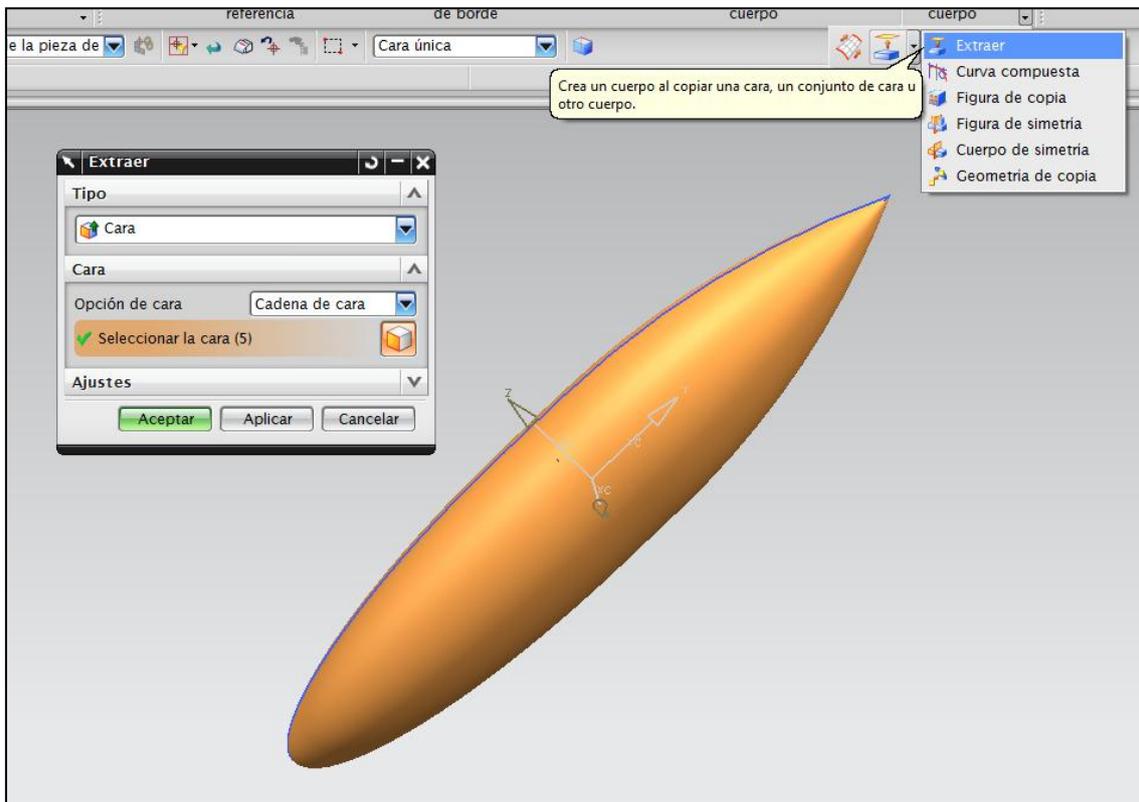


Ilustración 31. Extracción de las caras del sólido

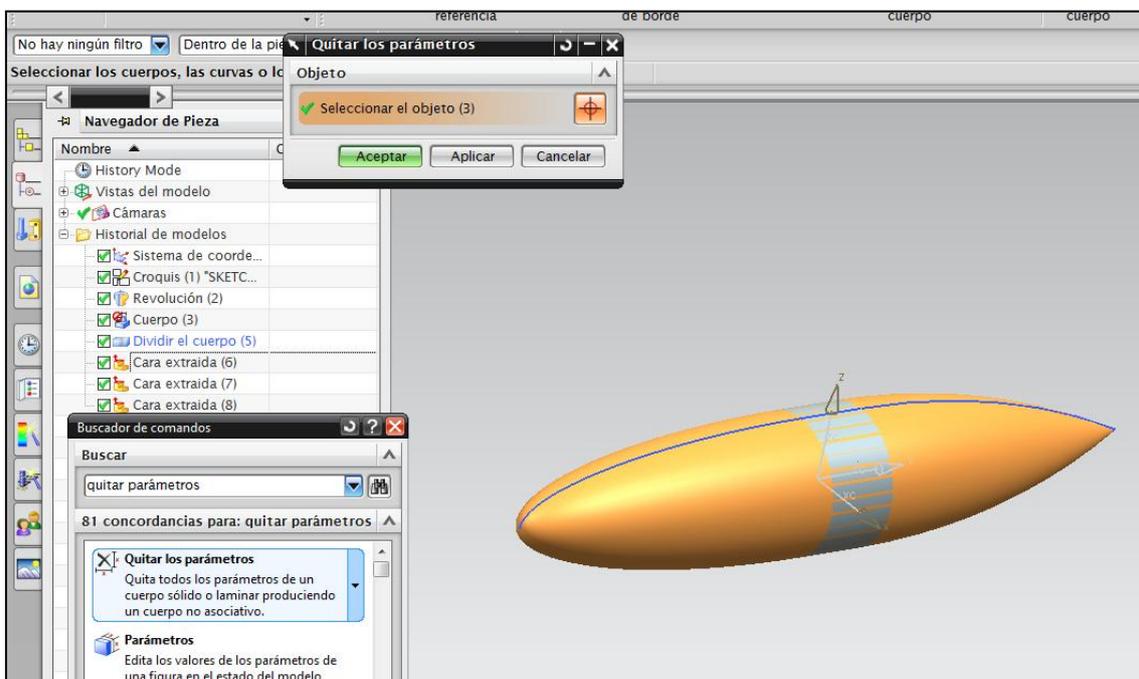


Ilustración 32. Desparametrización de las superficies

Una vez generado el cuerpo laminar, éste se debe preparar para el mallado. El proceso de preparación se basa principalmente en la generación de nuevas caras que permitan crear un mallado más regular (uso del comando *dividir cuerpo*), y simplificar la geometría para evitar errores en el mallado (uso de la herramienta *recortar*). La existencia de elementos muy deformados en la malla falsea el resultado, de ahí la necesidad de generar una lo más uniforme posible. La exigencia de simplificar el cuerpo sirve para prevenir errores en el mallado. Implica medidas tales como el truncamiento de la popa para evitar el solapamiento de elementos de dos mallas diferentes. En los apartados pertinentes se mencionará los procesos necesarios que se deben seguir a la hora de preparar el cuerpo para la simulación.

Para finalizar la realización del modelo, es necesario generar el volumen de fluido en el que se contiene el casco. Para ello se considerará un volumen dos veces mayor que las dimensiones máximas de éste (ello se justificará en puntos posteriores). Es decir, si la dimensión máxima del casco es de 2000mm de largo por 666mm de diámetro, el volumen será un cubo de 4000X1332X1332mm. Dicho elemento se genera fácilmente mediante la herramienta *bloque*.

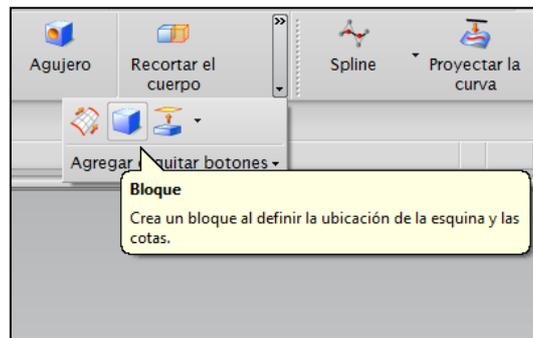


Ilustración 33 Ubicación de la herramienta bloque.

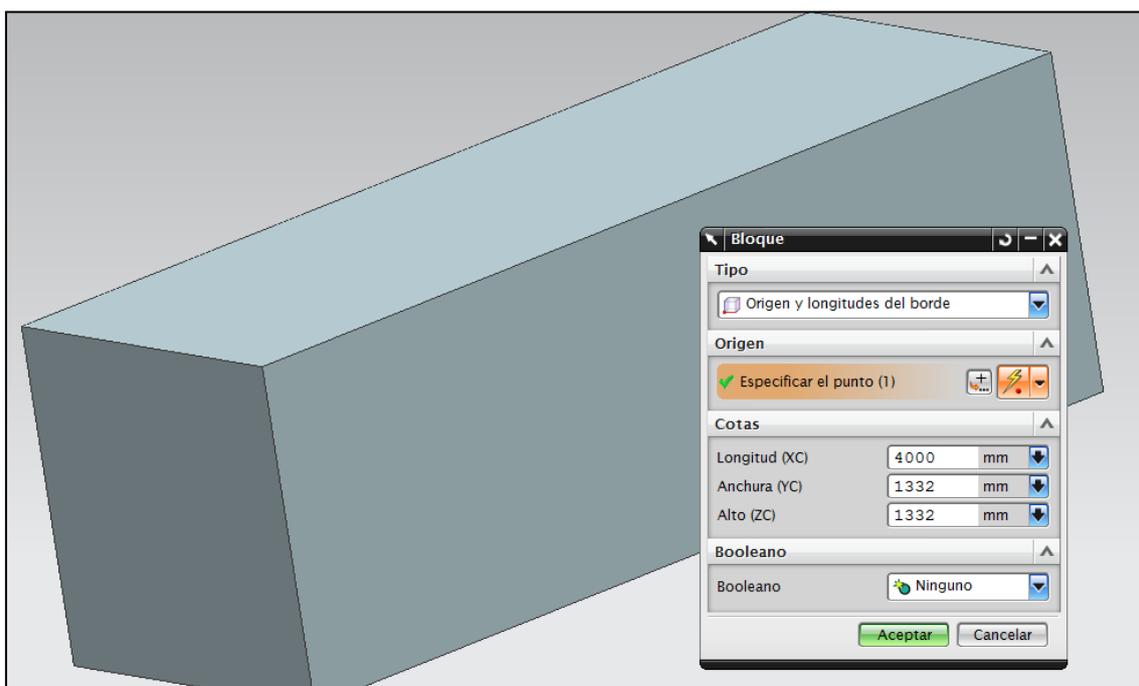


Ilustración 34. Generación del volumen de agua

Ambos elementos, el casco y el volumen, se deben ensamblar, por lo que se debe de crear un nuevo modelo en el que se realizará el ensamblaje de ambos elementos. Éstos se repositionarán de tal manera que el eje mayor del casco este alineado con el eje mayor del volumen, además de estar centrado en este último. Dicho proceso se realiza con el comando *mover el componente*, realizando los movimientos necesarios en función de cuál sea el sistema de referencia que acompaña a la realización de ambos sólidos.

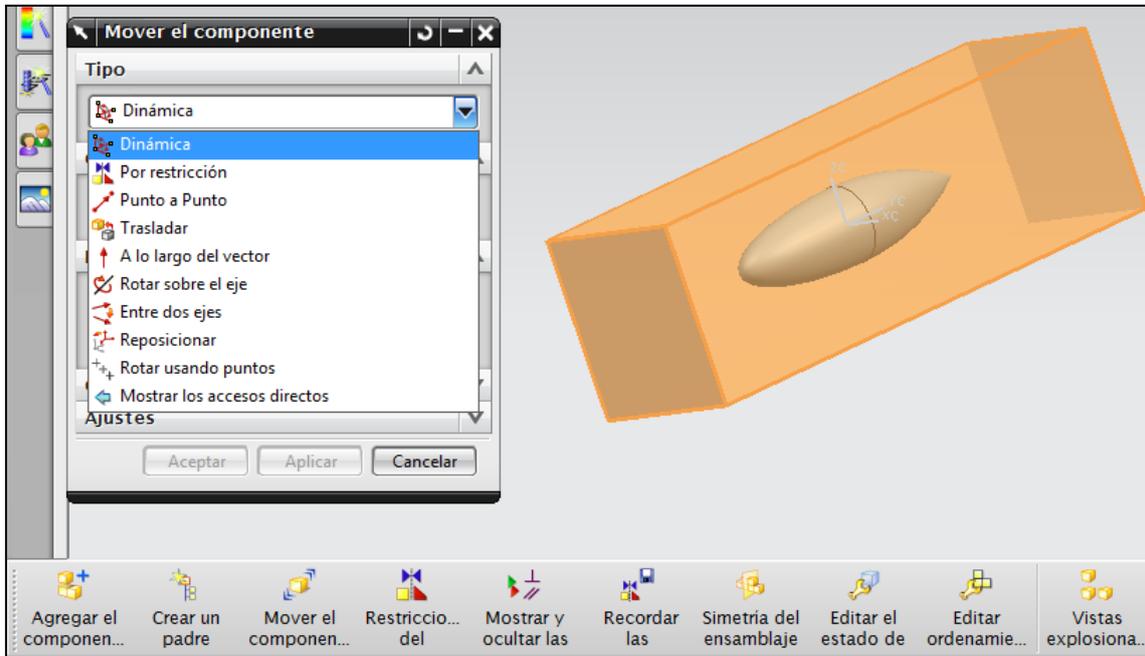


Ilustración 35. Opciones para realizar el repositionado del cuerpo

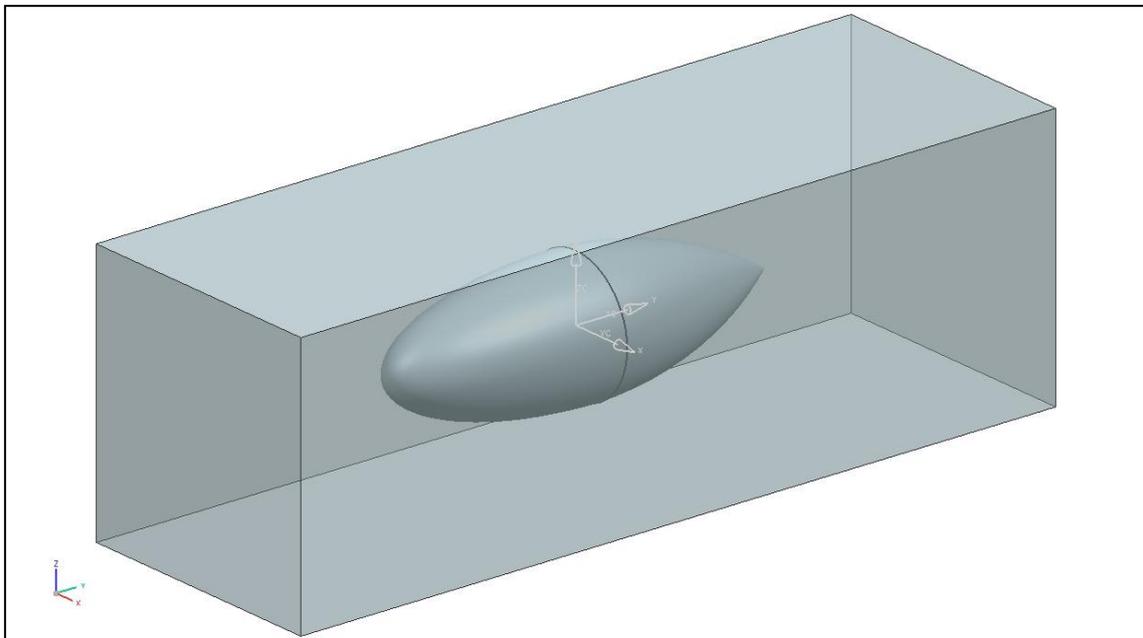


Ilustración 36. Imagen del conjunto ensamblado

## 6.2. Simulación

Una vez se ha generado el modelo 3D, se deben crear la simulación. Para ello son necesarios un archivo .sim, que contiene todas las variables del entorno, y otro .fem en el que se guarda la malla del cuerpo. Para ello, en la pestaña *iniciar* se resalta la opción de *simulación avanzada*.

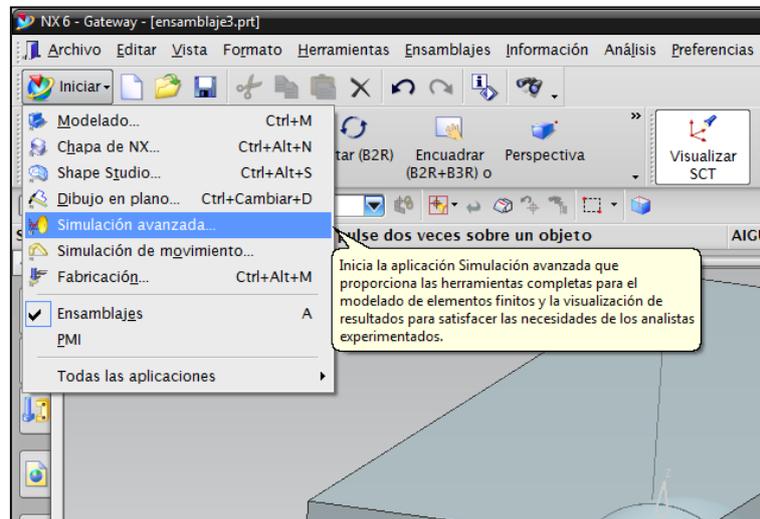


Ilustración 37. Pestaña iniciar NX6, selección de *simulación avanzada*.

Una vez activado el módulo, aparece el *navegador de simulación*. Para seleccionar el tipo de simulación que se desea se selecciona con el botón derecho el ensamblaje que se ha creado, apareciendo una lista de opciones. De éstas se elige la opción *FEM nuevo y simulación*, que dará paso a una serie de ventanas de diálogo en las que se deberá configurar la simulación.

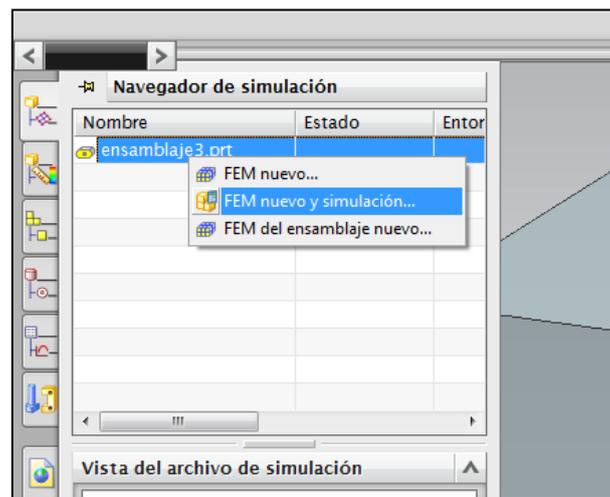


Ilustración 38. Navegador de simulación

En la primera ventana que aparece se selecciona el tipo de simulación que se va a llevar a cabo. En este caso se elige el solver asociado a *flujo/térmico aplicación de NX* y *flujo* como tipo de análisis.

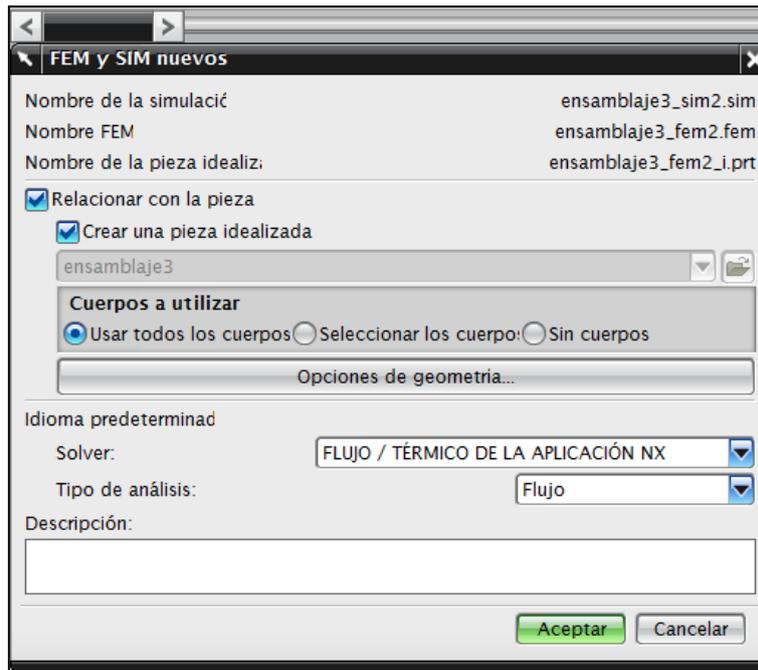


Ilustración 39. Menú inicial simulación NX

En la mayoría de las pestañas que aparecen en el menú de *editar solución* se mantienen los valores que asigna el programa por defecto, modificándose únicamente ciertos valores que aparecen en las pestañas de *detalles de la solución*, *flujo en 3D* y *opciones de resultados*.

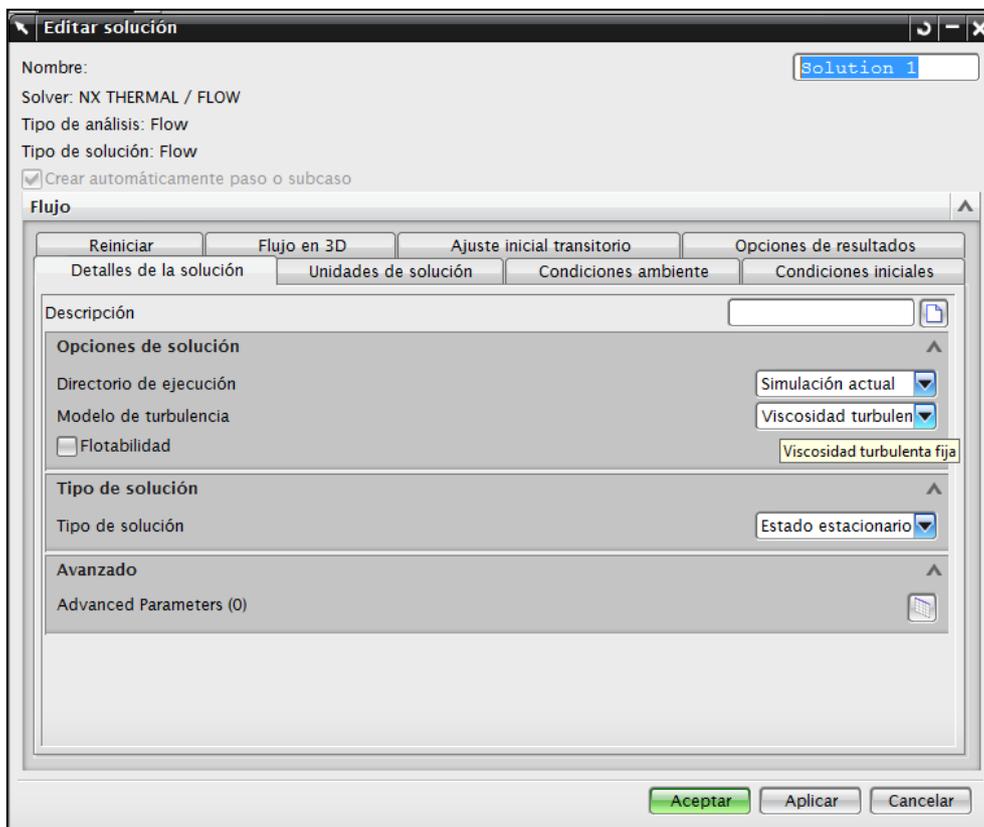


Ilustración 40. Editar solución/Detalles de la solución

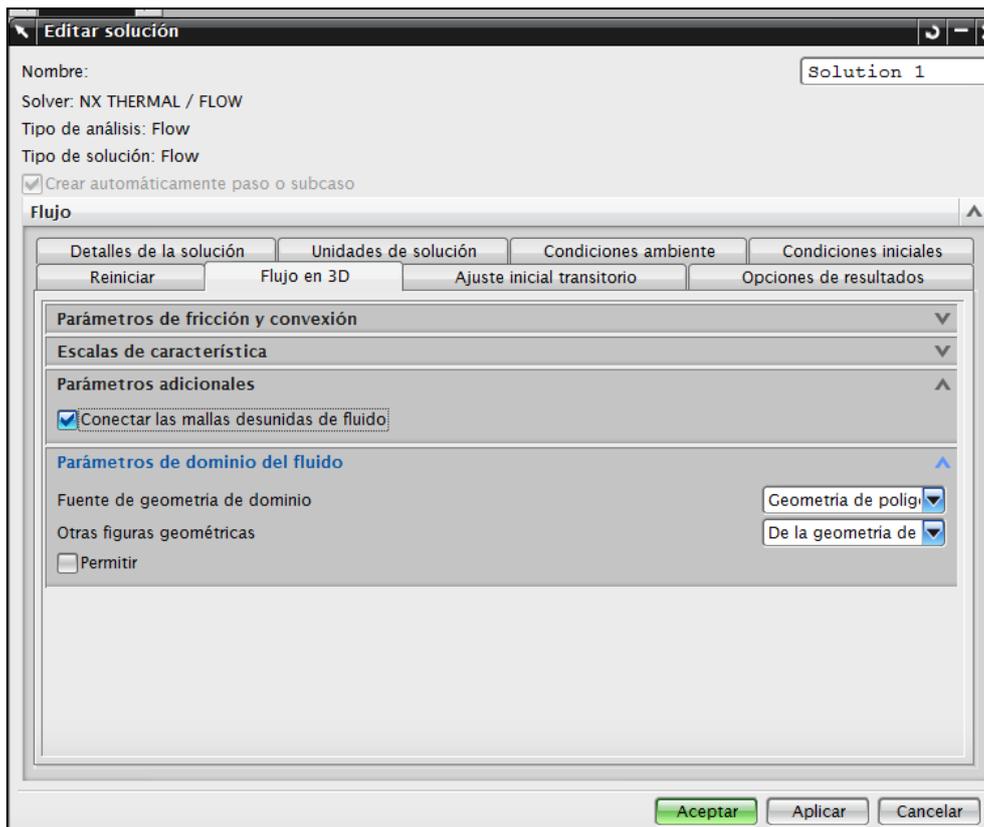


Ilustración 41. Editar solución/Flujo en 3D

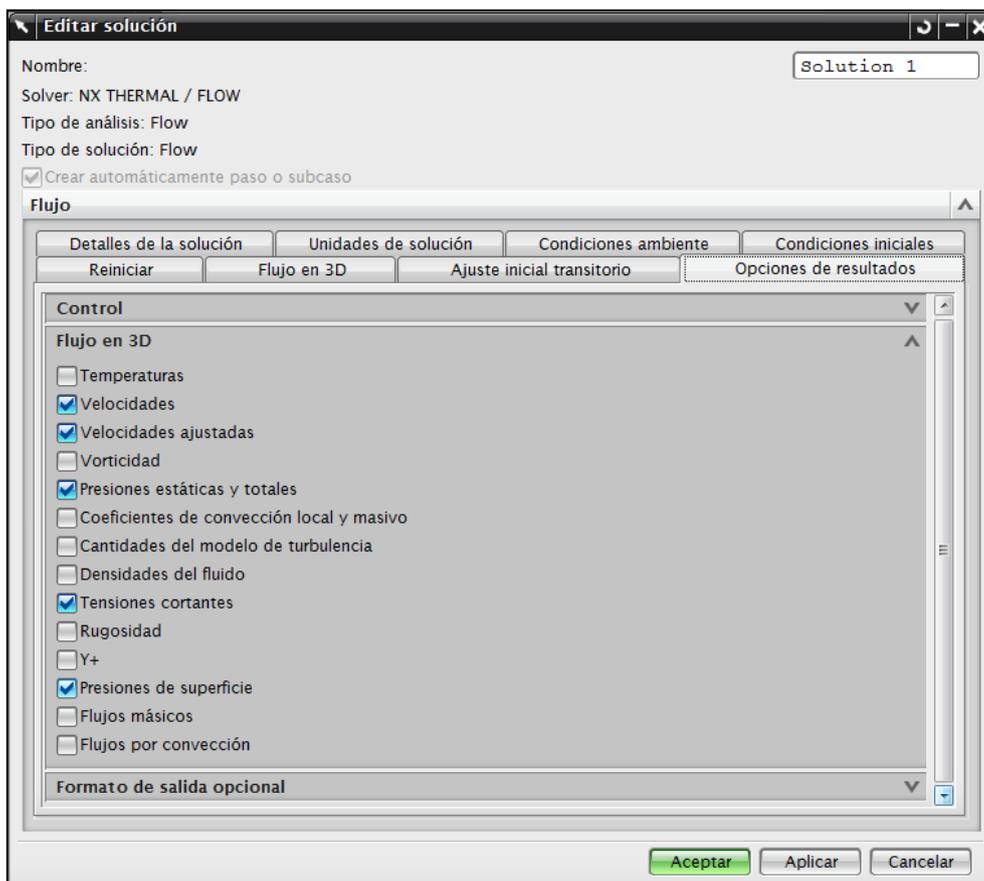


Ilustración 42. Editar solución/ Opciones de resultados

Los datos que se han introducido en las pestañas anteriormente mencionadas son los que se enumeran a continuación.

En la pestaña *detalles de solución*, se selecciona como modelo de turbulencia el de *viscosidad turbulenta fija*. Dicho modelo es de orden  $O^{11}$ , computando la viscosidad turbulenta ( $\mu_t$ ) a partir de la densidad del fluido ( $\rho$ ), la velocidad media del flujo escalar ( $V$ ) y un parámetro que indica el tamaño de los torbellinos formados en el flujo turbulento ( $L^{12}$ ). Los dos últimos parámetros sirven para describir el estado del fluido, en todo el dominio del cual la viscosidad turbulenta es fija. La ecuación que lo define es la siguiente:

$$\mu_t = 0.1 \cdot \rho \cdot V \cdot L$$

Este modelo es rápido y robusto, pero muy sensible al parámetro  $L$ . La elección de este modelo a pesar de este inconveniente se debe a la sencillez de la geometría que analizada y a las poco exigentes condiciones de contorno aplicadas, por lo que hace innecesario la adopción de modelos más complejos que requieran mayor coste computacional.

En la apartado *flujo 3D*, se debe elegir en *parámetros de geometría del dominio*, como fuente de geometría de dicho dominio, el campo *geometría de polígonos*. Esto permite indicar al programa que defina los límites del mallado del fluido a partir de la geometría poligonal visible en los archivos .sim y .fem.

Finalmente, en el desplegable *flujo en 3D de opciones de resultados* se marcan los resultados que se desea mostrar. En el caso de estudio se chequearán las velocidades (vector correspondiente a la velocidad conservativa en los nodos del fluido), velocidades ajustadas (vector correspondiente a la velocidad en los nodos del fluido ajustada a las condiciones de contorno), presiones estáticas y totales (valor de la presión en los nodos y elementos del fluido), tensiones cortantes (valor de las tensiones cortantes en las superficies del flujo) y presiones de superficie (valor de la presión del fluido en los elementos no fluidos).

Una vez definidos los parámetros de la solución se procederá a la generación del mallado de la superficie de análisis. Para ello se selecciona en el navegador de vista del archivo de simulación el archivo del ensamblaje\_fem mediante un doble click en él. Esto permite el acceso a todas las herramientas que permitirán realizar la malla del casco.

El mallado que se procederá a realizar será un mallado 2D con elementos TRI3 thin shell de un tamaño de 35mm. Antes de realizar este proceso es conveniente ocultar el volumen de agua que envuelve el casco. Para ello se selecciona dicho cuerpo sólido y se pulsan las teclas CTRL+B (o se busca el comando *ocultar*). Para mostrar posteriormente dicho volumen se realizará con el comando CTRL+K (o con el comando *mostrar*).

---

<sup>11</sup> Modelo “zero-equation” que posee un bajo coste computacional.

<sup>12</sup> Turbulent Eddy length scale. Viene definido de forma diferente según el modelo. Es necesariamente menor que la dimensión del problema y sirve para estimar las propiedades del flujo turbulento.

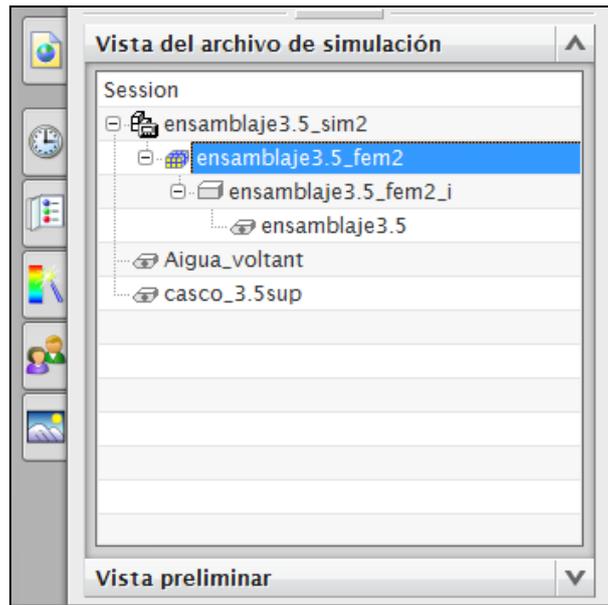


Ilustración 43. Selección del archivo para realizar el mallado.

Para realizar el mallado del cuerpo se busca el comando *mallado 2D* en el desplegable que aparece en pulsar sobre *mallado tetraédrico*. Ello hará aparecer un menú en el que se seleccionarán las superficies a mallar y se introducirá el tamaño y tipo de elemento característicos de la malla, entre otras opciones.

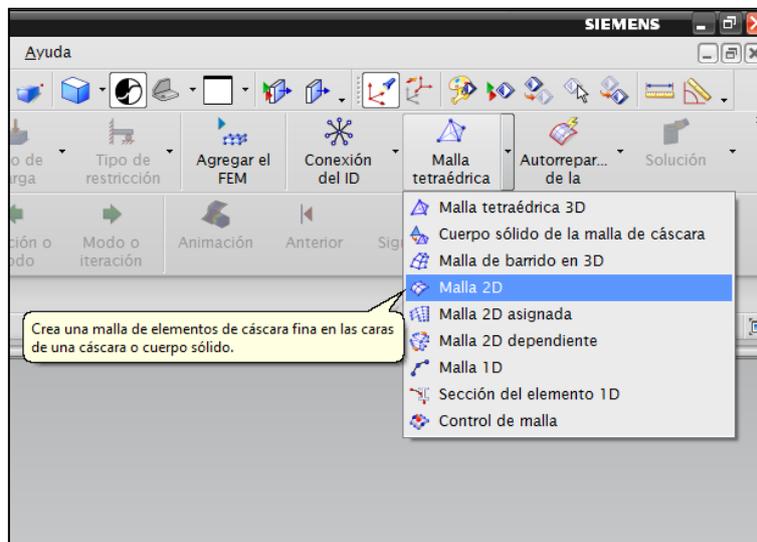


Ilustración 44. Selección del comando malla 2D

En el menú comentado anteriormente se seleccionará en el campo *type* de propiedades del elemento el campo que indique *TR13 Thin Shell*<sup>13</sup>. A continuación se introduce el valor de 35mm en *tamaño del elemento* de los parámetros de la malla. En función del sólido se realizará una única malla o varias, por lo que en ocasiones el proceso se deberá repetir

<sup>13</sup> Elemento tetraédrico para malla fina con tres nodos, uno en cada vértice. Existe la misma posibilidad de usar elementos iguales a éste pero con 6 nodos. Los tres nodos extra están situados en la mitad de las aristas del elemento.

algunas veces. Siempre se debe evitar obtener elementos que no estén muy deformados, ya que éstos pueden falsear los resultados.

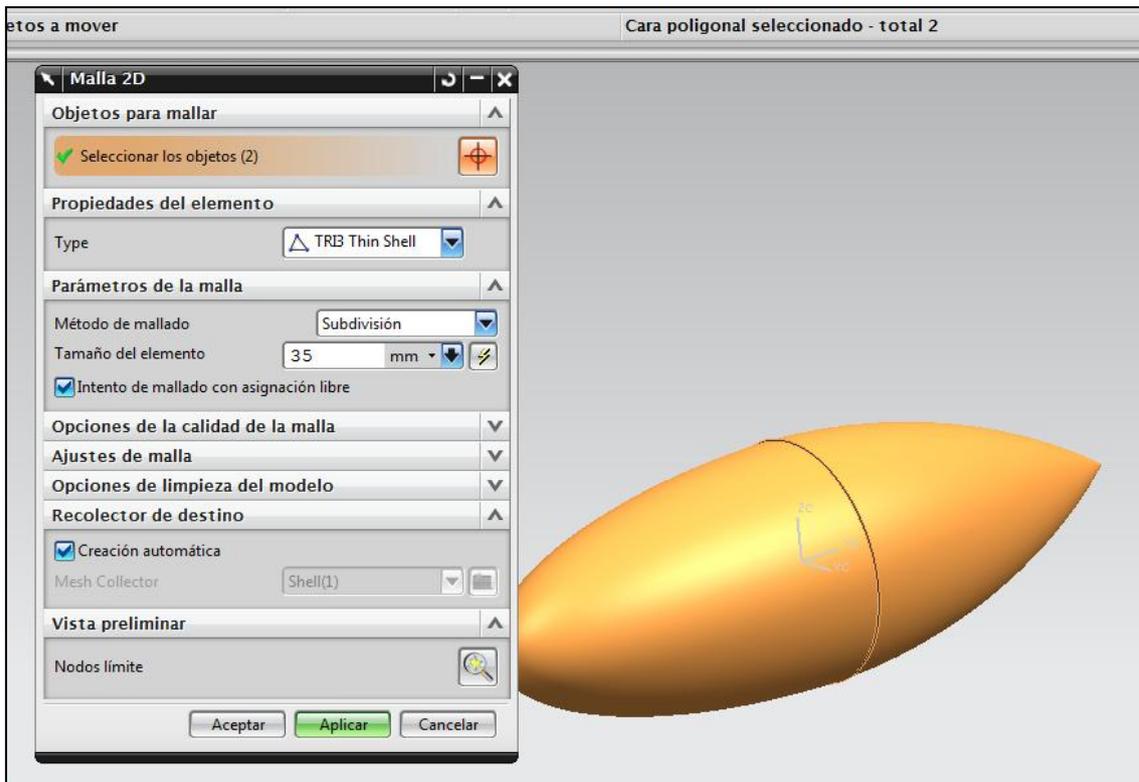


Ilustración 45. Menú de mallado del casco.

Una vez realizado el mallado se selecciona en el navegador de vista del archivo de simulación haciendo doble click en el archivo ensamblaje\_sim. Esto permitirá el acceso a todos los comandos necesarios para definir las condiciones de contorno y mallar el volumen del fluido.

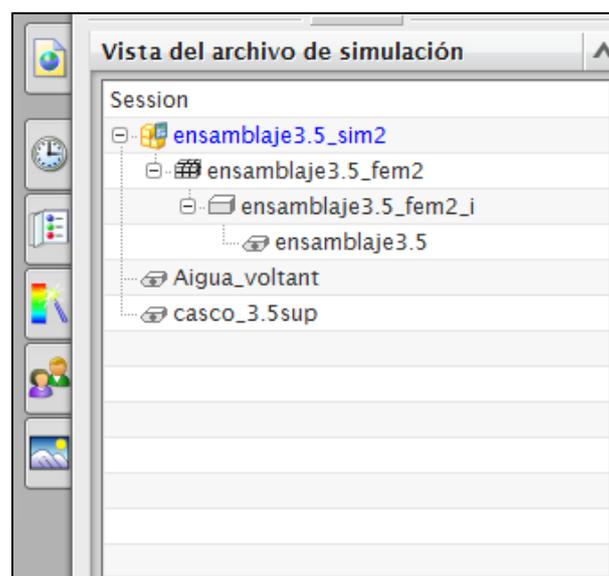


Ilustración 46. Selección del archivo de simulación.

El mallado del volumen de agua se realizará mediante el comando de *dominio del fluido*, en el se definirá la *mallado del fluido* y la *mallado de la superficie del fluido*. Como parámetros de mallado se tomará como material del fluido el agua y como tamaño del elemento se tomará el que mejor se ajuste para la realización del ensayo (ver limitaciones del modelo). Las condiciones de contorno se aplican mediante el comando *condición límite de flujo*. Se considerará un flujo de agua penetrando a cierta velocidad por la proa del casco (*flujo de entrada*) y saliendo sin succión por la popa (*abriendo*). Para ello, es necesario mostrar el volumen de agua y darle cierta translucidez para aplicar las restricciones correctamente

Primeramente se procederá a la definición de la malla del volumen de agua. Para ello se ha de elegir el comando *dominio del fluido* en el menú *tipo de objeto/condición límite del fluido*, el cual hace aparecer una ventana de diálogo.

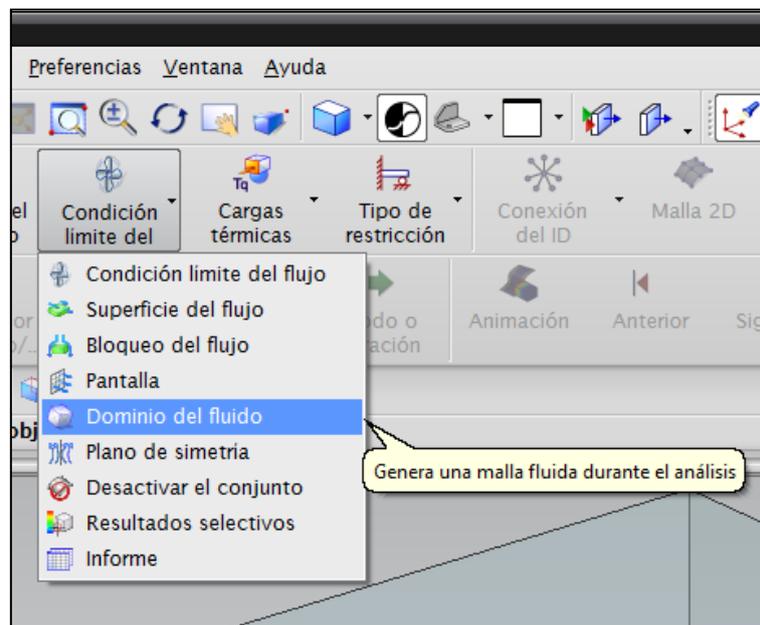


Ilustración 47. Listado de opciones *tipo de objeto/condición límite de fluido*.

En el menú de dominio del fluido, en el campo tipo se permite elegir entre la aplicación de la *mallado del fluido* y la *mallado de la superficie del fluido*. Al seleccionar la primera se definirá en *material* el *material del fluido* como agua, además de la *densidad de la malla*. Para éste parámetro se introduce un *tamaño de elemento*, comprobando que en la opción de tipo de *tamaño de elemento* esté seleccionado *absoluto*. Finalmente se selecciona el volumen del fluido (como cuerpo sólido) y se confirma con aplicar. Para aplicar la segunda opción únicamente hay que seleccionar el volumen del fluido (de nuevo como cuerpo sólido) y aceptar.

Hay que tener en cuenta que la realización de los pasos mencionados en el párrafo anterior no generan de forma inmediata ningún tipo de malla. Ésta se genera de forma automática cuando se procede a la resolución de la simulación, por lo que no se podrá detectar ningún problema con el mallado hasta ese momento.

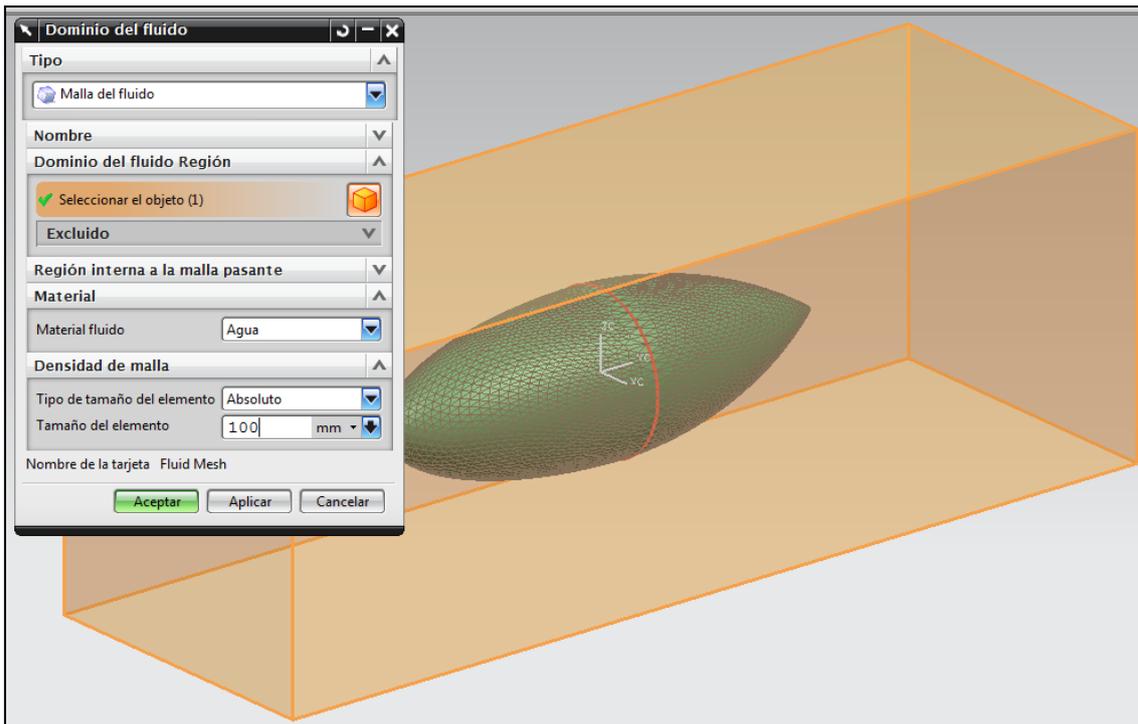


Ilustración 48. Aplicación de la malla del fluido

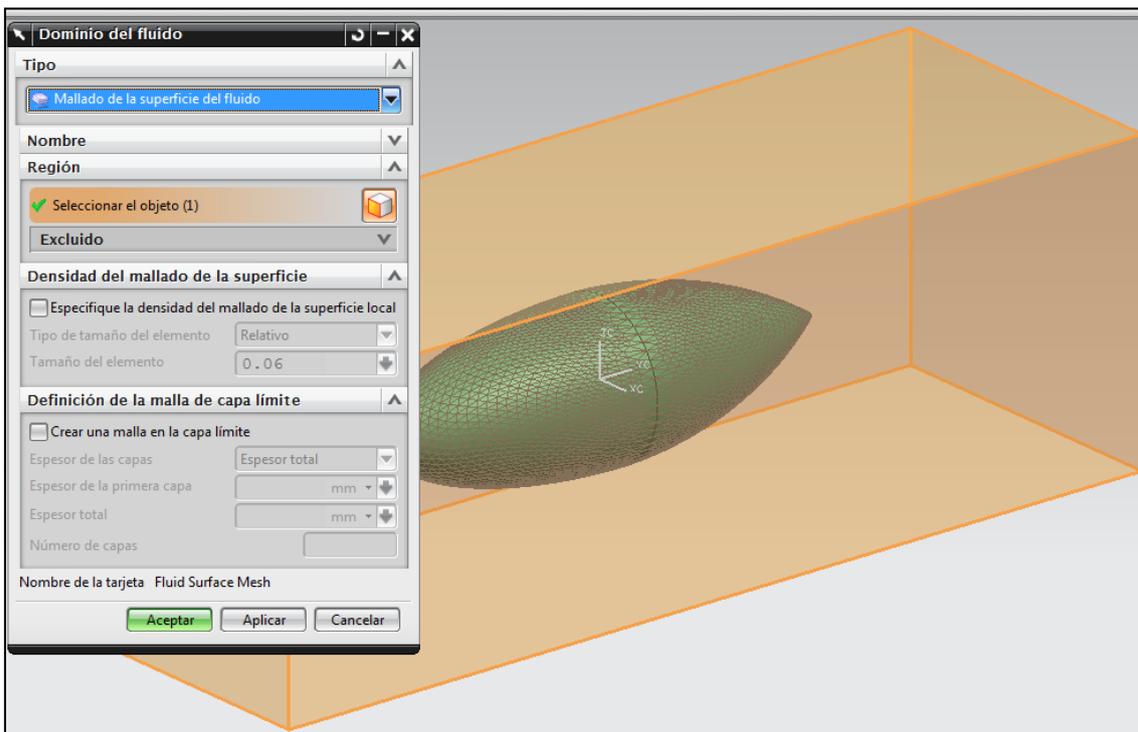


Ilustración 49. Aplicación de la malla de la superficie del fluido.

Una vez determinado el dominio del fluido se procederá a introducir las condiciones de contorno. Para ello en el mismo menú *tipo de objeto/condición límite del fluido* mencionado en el punto anterior se selecciona el icono *condición límite del flujo*. De la ventana que aparece al seleccionar la opción se seleccionará la condición de contorno a aplicar en el desplegable que aparece en el campo *tipo*. Primeramente, en dicho apartado se seleccionará *flujo de entrada*,

seleccionándose la cara del volumen que coincide con la proa del casco. Se introducirá como *velocidad*, en el campo *magnitud* un valor de  $10\text{m/s}^{14}$ . Una vez aplicada esta condición de contorno, en *tipo* se seleccionará *abriendo*, seleccionando la cara del volumen próxima a la popa del barco y aplicando la condición. Estas condiciones implican que el flujo entrará por la proa a cierta velocidad, saliendo por la proa sin que haya ningún efecto de succión desde el exterior.

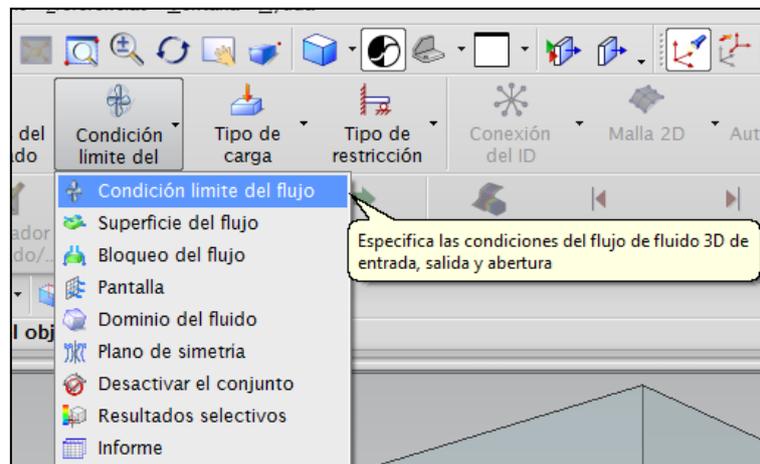


Ilustración 50. Selección condición límite de flujo

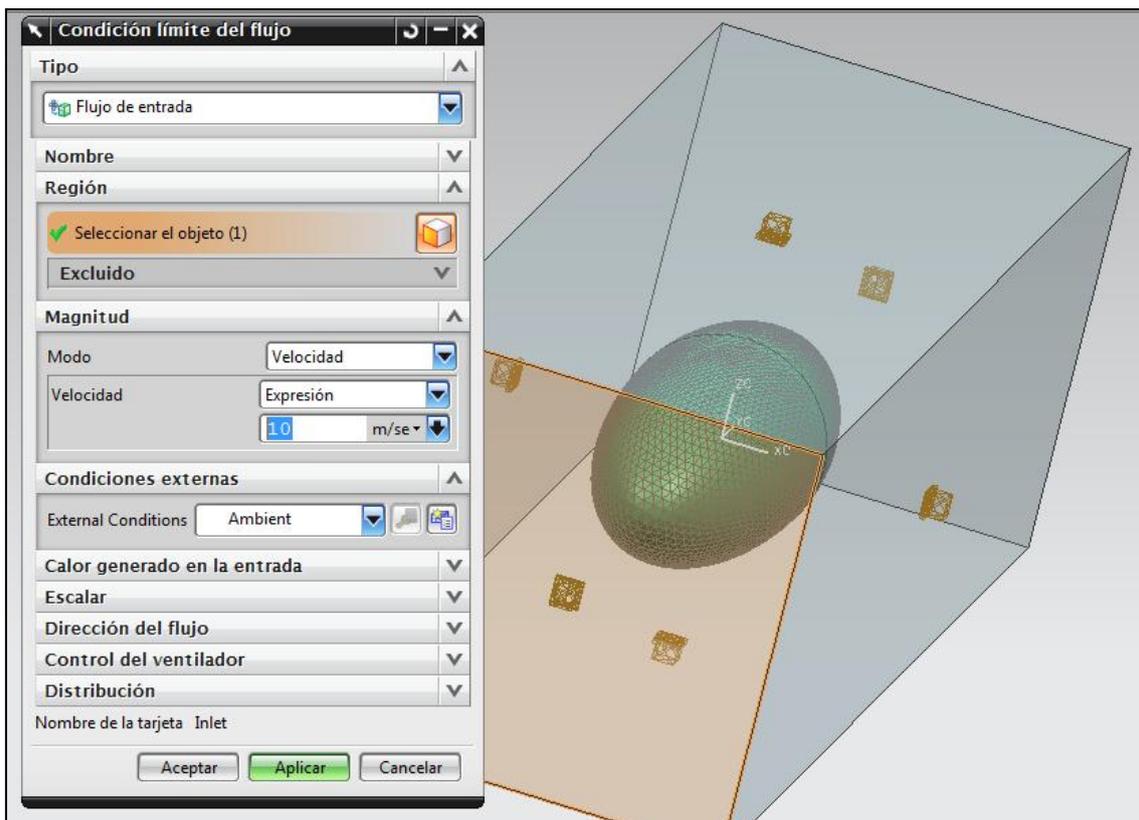


Ilustración 51. Aplicación condición flujo de entrada

<sup>14</sup> Se toma este valor como valor de referencia ya que se supone que las prestaciones del AUV serán similares a las del AUV Dolphin presentado en la introducción.

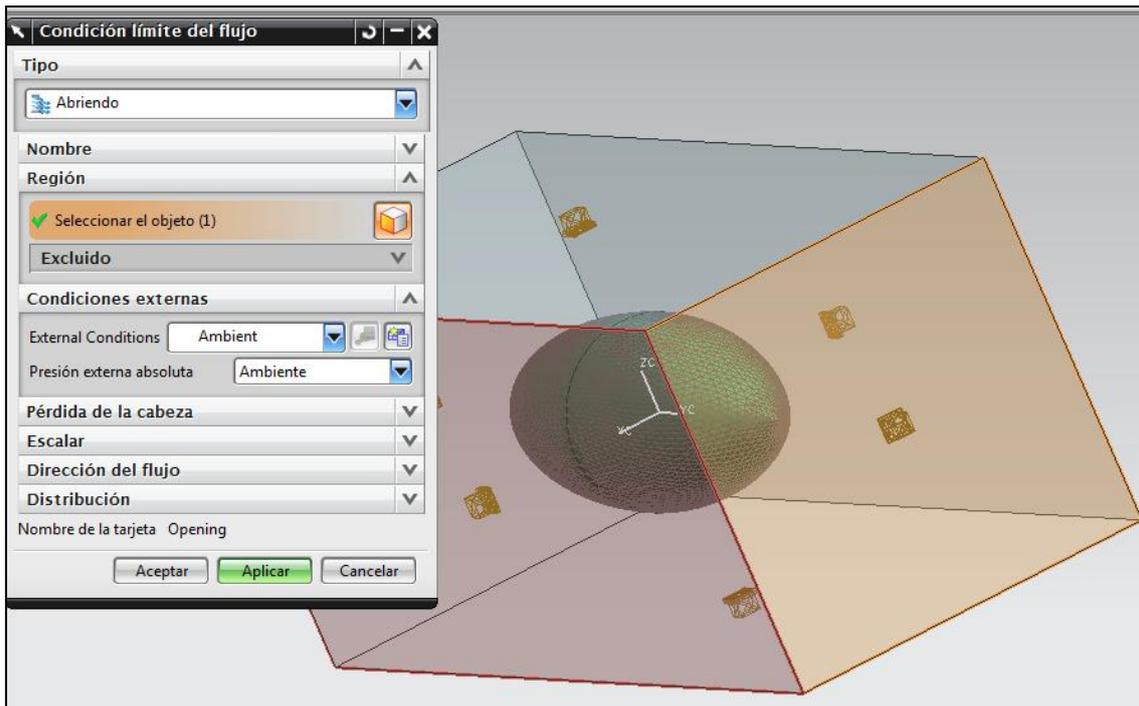


Ilustración 52. Aplicación condición abriendo

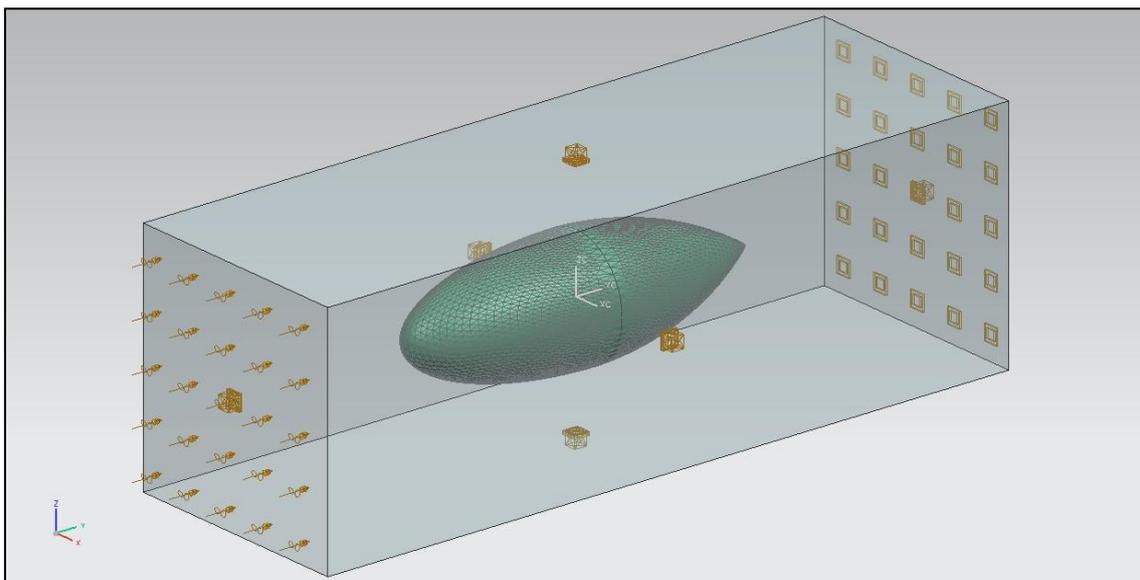


Ilustración 53. Resumen de la aplicación de las condiciones de contorno.

Llegado a este punto solo resta lanzar la simulación y evaluar los resultados que se generen. Esto se logra pinchando con el botón derecho sobre el campo *solution* del *navegador de simulación*, y seleccionando la opción *resolver*. Una vez realizados los cálculos (primero el programa malla el volumen y luego resuelve el problema del flujo), aparece una ventana que informa del fin de la simulación (*simulation completed*), además de un campo adicional en el *navegador de simulación* con el nombre de *results*. Haciendo doble click sobre éste se tiene acceso a las soluciones, a las cuales se podrá acceder posteriormente mediante las pestañas situadas a la izquierda del navegador.

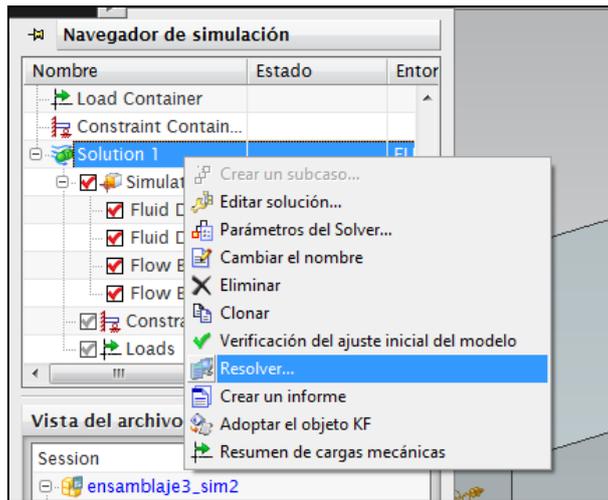


Ilustración 54. Ejecución de la simulación

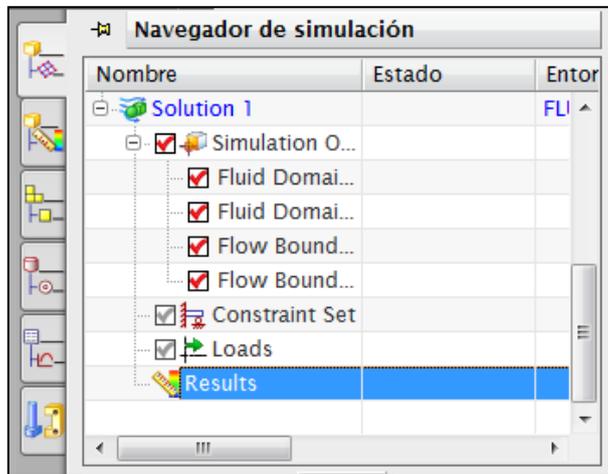


Ilustración 55. Aparición del campo de resultados.

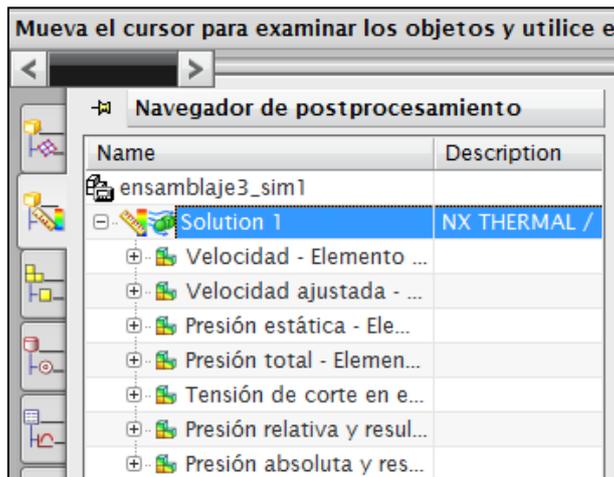


Ilustración 56. Navegador de postprocesamiento, resultados.

NX 6 permite representar los resultados obtenidos de diferentes formas en función siempre que sean resultados escalares o vectoriales. En la representación de los resultados es conveniente mostrar el volumen de agua como un objeto translúcido, ya que ello permite ver

los resultados sobre el casco. Ello se puede realizar con el comando *edit* que aparece al pinchar con el botón derecho el campo *post view* del *navegador de postprocesado*. A continuación, se selecciona en la pestaña *borde y caras*, en *visualización primaria*, las opciones *figura* y *translúcido* respectivamente.

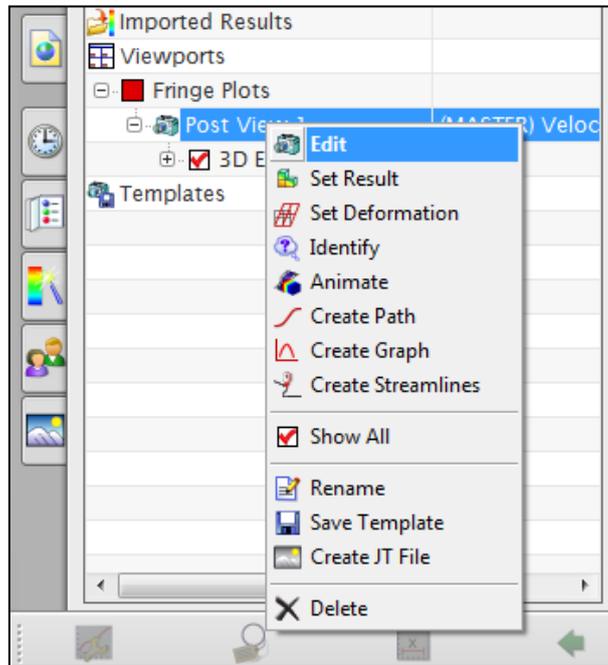


Ilustración 57. Selección de la edición de los resultados

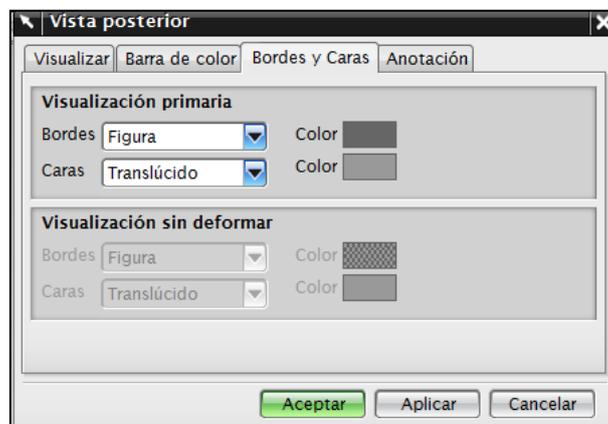


Ilustración 58. Edición de los resultados

Como se ha dicho anteriormente, NX permite visualizar los resultados de diferentes formas. En la misma ventana que se menciona en el párrafo anterior, en la pestaña *visualizar*, *visualizar en color* se muestran diferentes opciones, de las cuales las que más fácilmente permiten evaluar los resultados son *liso*, *iso-línea*, *flechas*<sup>15</sup> y *líneas aerodinámicas*<sup>16</sup>.

<sup>15</sup> Las magnitudes vectoriales no admiten la representación en flechas.

<sup>16</sup> Es necesario crear los puntos (seeds) de origen de las líneas aerodinámicas.

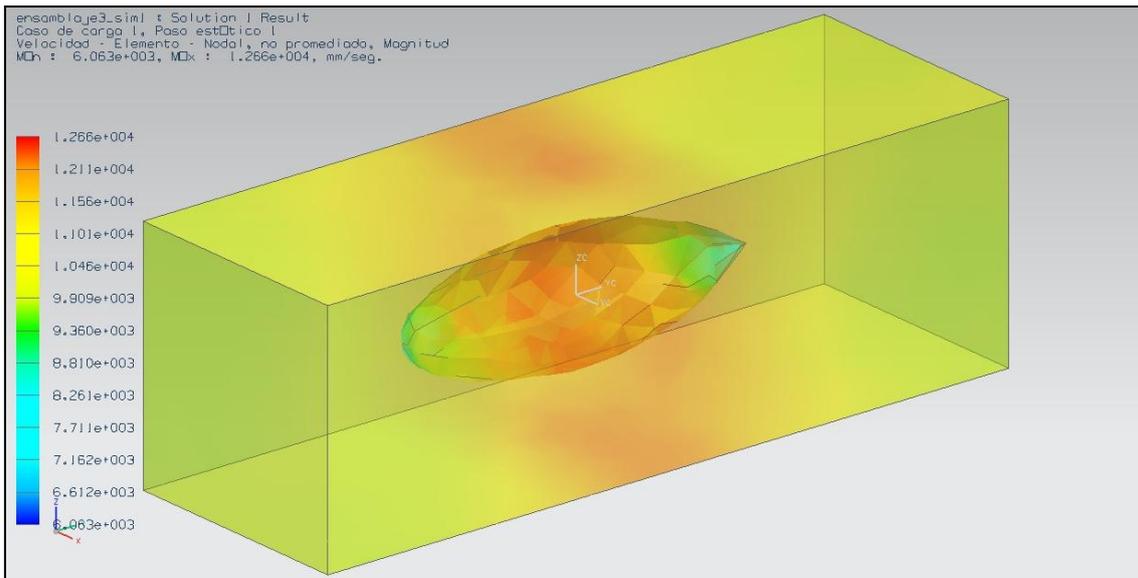


Ilustración 59. Vista de solución con volumen translúcido

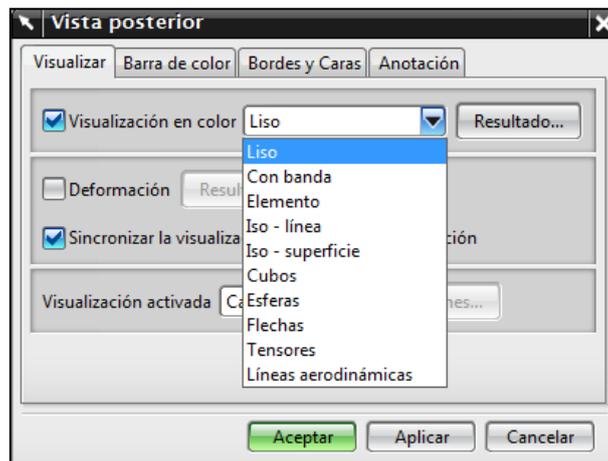


Ilustración 60. Opciones de visualización de resultados

Para concluir este apartado solo queda realizar dos apuntes. Para visualizar el máximo y el mínimo basta con marcar en la pestaña *anotación* de la ventana en la que se editan los resultados (vista posterior) la opción *mostrar marcado min-max*. Para conocer el resultado en cualquier punto se usa el comando *identificar los resultados* de la barra de herramientas.

En caso de que fuese necesario se explicará detalladamente la obtención de ciertos resultados y la construcción de las líneas aerodinámicas en aquellos resultados que se consideren más destacados. El programa proporciona otros métodos para la representación de los resultados, (por ejemplo la generación de animaciones), que a priori no van a ser utilizados en la realización de esta tesina.

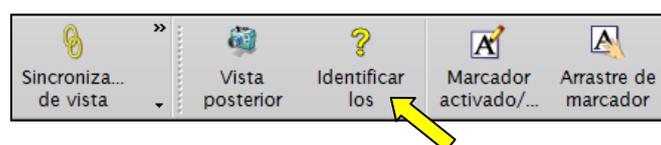


Ilustración 61. Icono identificar los resultados

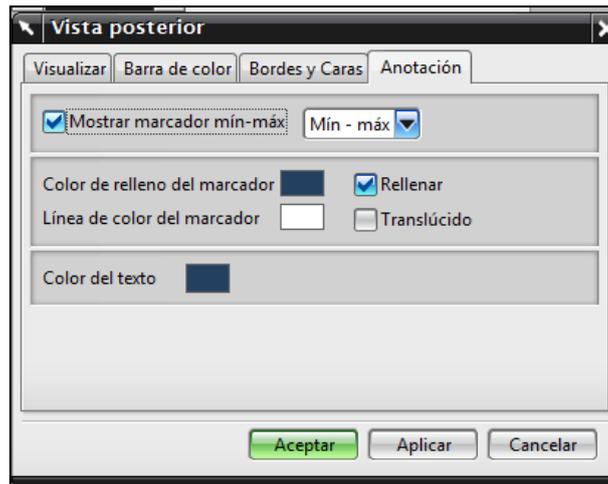


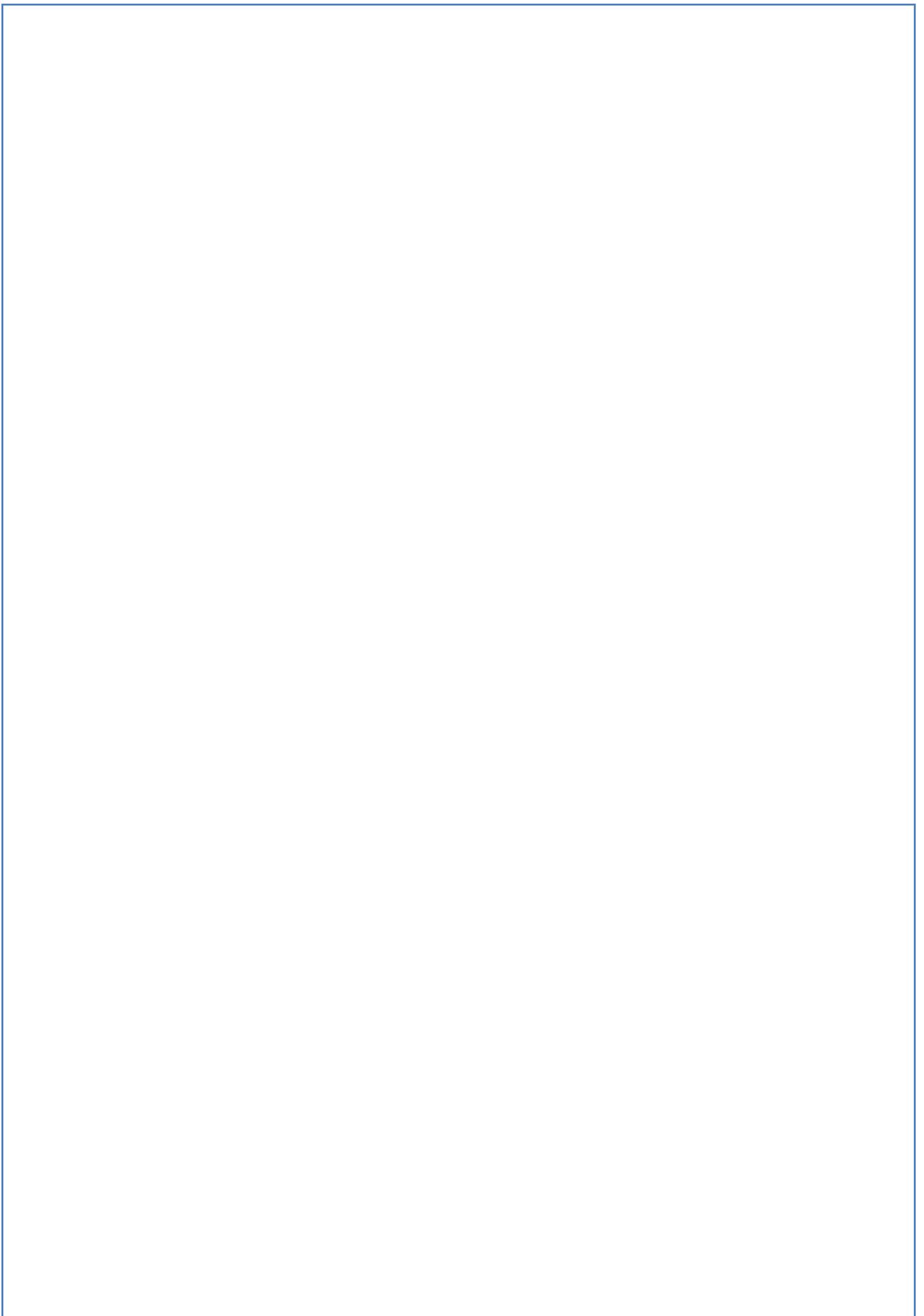
Ilustración 62. Marcaje de máximos y mínimos

No obstante, los principales resultados de análisis de la presente tesina, no se obtienen mediante el proceso mostrado anteriormente. Dichos resultados están contenidos en el archivo nombre de la simulación-sim\_solution.txt, generado durante la simulación en la carpeta correspondiente. Al final de dicho archivo, en el apartado forces, se muestran los resultados del punto de aplicación de la resultante de la fuerza de arrastre (centro de gravedad, CGC) y los valores vectoriales y en magnitud, de la fuerza de arrastre debido al esfuerzo tangencial, al esfuerzo de presión y a la composición de ambos.

Forces at CG of Flow Surfaces	x-comp	y-comp	z-comp	R
GLOBAL FLOW SURFACE				
CG location (mm):	-4.313E+01	3.718E-01	-6.102E-01	
CP location (mm):	-4.183E+01	-3.250E+01	1.572E+01	
Total Force (mN):	1.365E+08	2.138E+06	-6.638E+06	1.367E+08
Total Torque (mN-mm):	-4.791E+07	2.235E+09	4.502E+09	5.027E+09
Shear Force (mN):	7.347E+06	9.208E+03	7.741E+02	7.347E+06
Shear Torque (mN-mm):	3.193E+05	-1.926E+07	-4.281E+06	1.973E+07
Pressure Force (mN):	1.292E+08	2.129E+06	-6.638E+06	1.294E+08
Pressure Torque (mN-mm):	-4.823E+07	2.254E+09	4.506E+09	5.039E+09

# ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE LAS LIMITACIONES DEL MODELO

---



## 7. Análisis de la sensibilidad de las limitaciones del modelo.

La mayoría de herramientas CAE orientadas al cálculo están basadas en el método de los elementos finitos. Dicho método consiste en dividir el problema en infinidad de subproblemas, de elementos, en cada uno de los cuales se resuelven las ecuaciones pertinentes considerando las diferentes condiciones de contorno de dicho elemento.

Cuanto más fina sea la malla mayor se obtendrá un resultado más preciso, pero el tiempo de cálculo a emplear será mayor. Además de la fineza de la malla, en la calidad del resultado intervendrán otros aspectos como la regularidad de la malla. Una malla regular proporcionará mejores resultados que una irregular en la que la distorsión de los elementos podría falsear los resultados. Este último fenómeno se produce principalmente en radios de acuerdo pequeños, ángulos minúsculos y curvaturas, por lo que muchas veces se tiende a simplificar la geometría eliminando estos detalles.

Otro aspecto a considerar, más pertinente al tema objeto de la tesina, es el volumen de fluido que envuelve al casco. Cuanto mayor sea este en relación al volumen del submarino, más se asemejarán las condiciones de contorno a las condiciones de mar abierto.

Un volumen de fluido envolvente implicará que el programa haya de mallar un volumen de fluido más elevado, y que tenga que resolver más ecuaciones al haber más elementos. Por tanto, un mayor volumen se traduce en un mayor coste computacional para el programa.

Balanceando ambas características, se buscará un equilibrio para representar lo más fielmente posible las condiciones de contorno de mar abierto, y obtener la suficiente precisión para obtener correctamente las correlaciones entre los diferentes parámetros que es, en última instancia, el objeto de la tesina actual.

### 7.1. Análisis de la limitación del tamaño de malla del volumen del fluido

Para dicho análisis se ha analizado un casco de volumen  $0.25\text{m}^3$ , con una relación L/B de 5 moviéndose a una velocidad relativa con el flujo de  $10\text{m/s}$ . El modelo de turbulencia que se ha empleado es el de longitud de mezcla.

El análisis ha consistido en ensayar dicho casco considerando un volumen de fluido el doble del suyo propio (en dimensiones), con diferentes tamaños de malla 35, 50, 65, 80 y 100mm. Se ha considerado el volumen de fluido antes mencionado para apremiar el tiempo de cálculo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tamaño malla	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
100	2925	1903	226,5	3497
80	2455	558,4	51,15	2518
65	2328	425,3	-234,6	2378
50	2417	107,2	87,76	2421
35	2254	183,7	-150,7	2266

Ilustración 63. Resultados fuerza de arrastre en función del tamaño de malla

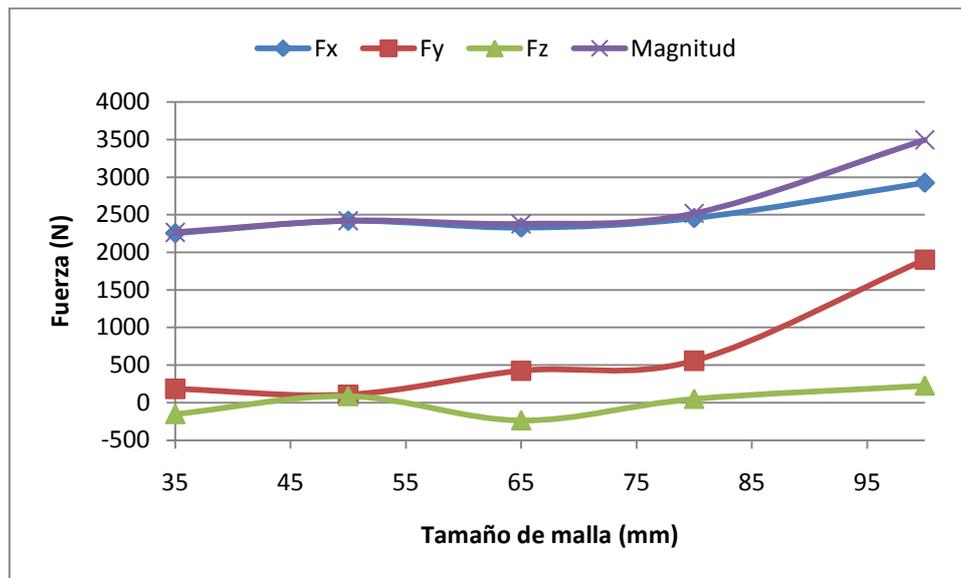


Ilustración 64. Fuerza de arrastre en función del tamaño de malla

En las gráficas se puede observar cómo, a excepción de la malla con elementos de tamaño 100mm, la mayor parte de la magnitud de la fuerza de arrastre total corresponde a la componente X. A medida que se refina la malla las demás componentes pierden peso dentro de la resultante total, la magnitud cual se estabiliza progresivamente.

Tamaño malla	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
100	401,5	-0,4986	1,353	401,5
80	464,5	-0,3889	-1,204	464,5
65	483,4	-0,5162	-0,1392	483,4
50	495,5	0,7264	-0,3272	495,5
35	554,1	-0,07417	-0,1459	554,1

Ilustración 65. Resultados fricción de arrastre en función del tamaño de malla

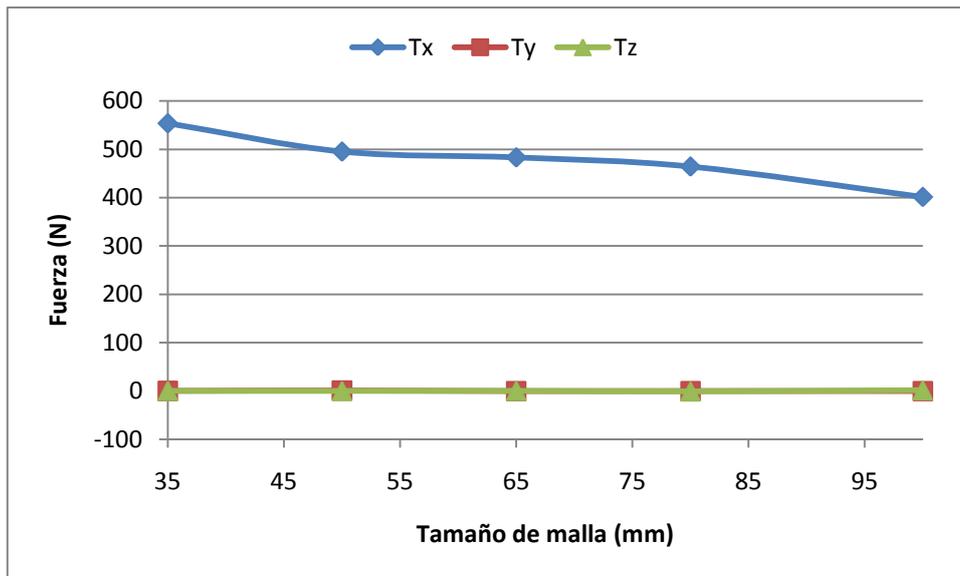


Ilustración 66. Fricción de arrastre en función del tamaño de malla

La fuerza de arrastre aportada por la fricción únicamente posee componente en X, siendo los demás componentes meramente testimoniales. El valor de la fuerza de arrastre tangencial tiende a aumentar, produciéndose un pequeño repunte en tamaño de malla de 35mm.

Tamaño malla	P. Arrastre X	P Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
100	2524	1903	225,1	3169
80	1990	558,8	52,36	2068
65	1845	425,8	-234,4	1908
50	1921	106,5	80,809	1926
35	1699	183,7	-150,6	1716

Ilustración 67. Resultados presión de arrastre en función del tamaño de malla

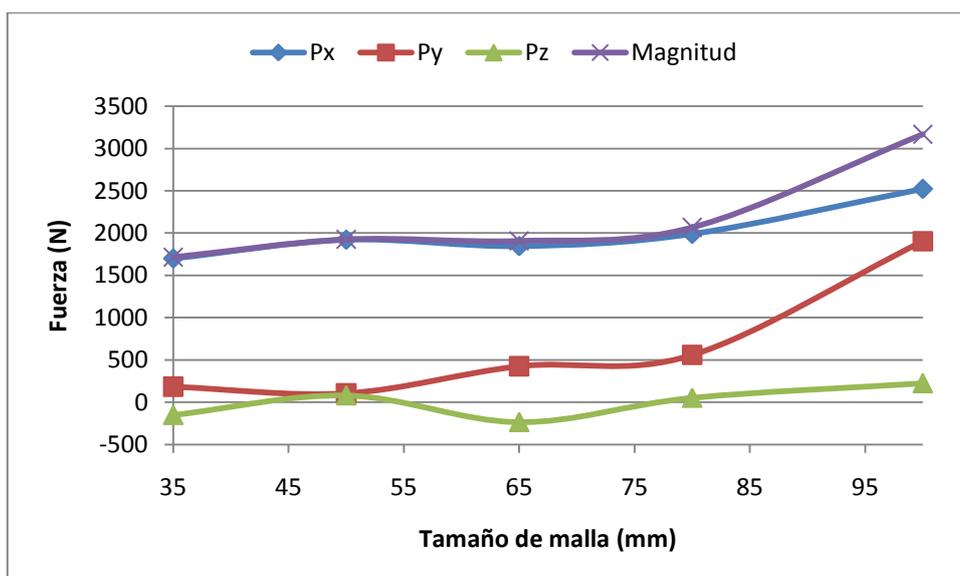


Ilustración 68. Presión de arrastre en función del tamaño de malla

En cuanto a la aportación de la presión en la fuerza de arrastre, presenta un comportamiento muy similar a la fuerza de arrastre total. Las componentes en Y y en Z pierden peso a medida que disminuye el tamaño del elemento, estabilizándose el valor de la magnitud de la resultante total.

Vista la aportación de la presión y de los cortantes en la fuerza de arrastre total, cabe destacar que la principal responsable de las variaciones en el arrastre total será la presión (al menos en este caso) debido a su mayor peso específico.

Tamaño malla	Diferencia F.arrastre total.	Diferencia F.arrastre cortante	Diferencia F.arrastre presión
mm	%	%	%
100	54.32	27.54	84.67
80	11.12	16.17	20.51
65	4.94	12.76	11.19
50	6.84	10.58	12.24
35	Referencia	Referencia	Referencia

Ilustración 69. Diferencias existentes entre los valores obtenidos

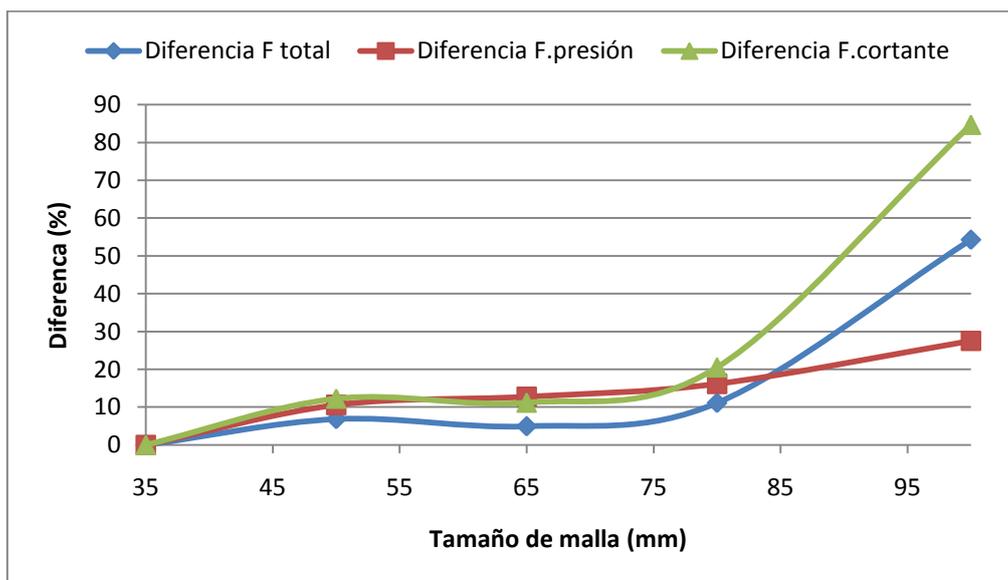


Ilustración 70. Evolución de las diferencias en función tamaño de malla

En cuanto a la variación porcentual de los resultados respecto a una referencia<sup>17</sup> la diferencia entre las diferentes magnitudes de los contribuyentes al arrastre, y éste mismo, tiende a 0. En tamaños de elementos de malla bastos (100mm) existen grandes discrepancias respecto los valores de referencia (84% en cortante, 20.5% en presión y 54.3% en el total), pero estas variaciones se estabilizan entre tamaños de malla comprendidos entre 50 y 65mm, adoptando valores de 5-6% en la fuerza de arrastre total, y de un 11 -13% en los demás componentes.

<sup>17</sup> Se toma como referencia el mallado de 35mm, por ser el más preciso.

En el gráfico también se observa que el valor más sensible a la variación del tamaño de malla es la fuerza resultante del cortante, seguida de la fuerza de arrastre total. El arrastre debido a la presión es el que permanece más constante a lo largo del ensayo, presentando un comportamiento bastante lineal.

Tamaño malla	X	Y	Z
mm	mm	mm	mm
100	-18,500	-72,890	20,970
80	-69,250	9,634	-84,710
65	-73,690	-28,390	-34,770
50	-67,370	-10,830	42,760
35	-72,100	-7,275	14,270

Ilustración 71. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla

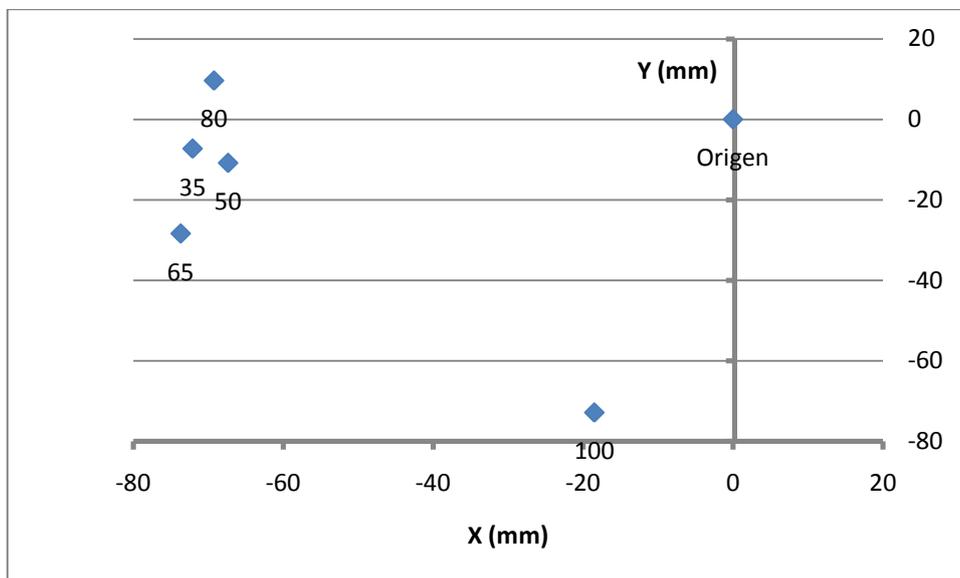


Ilustración 72. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano XY

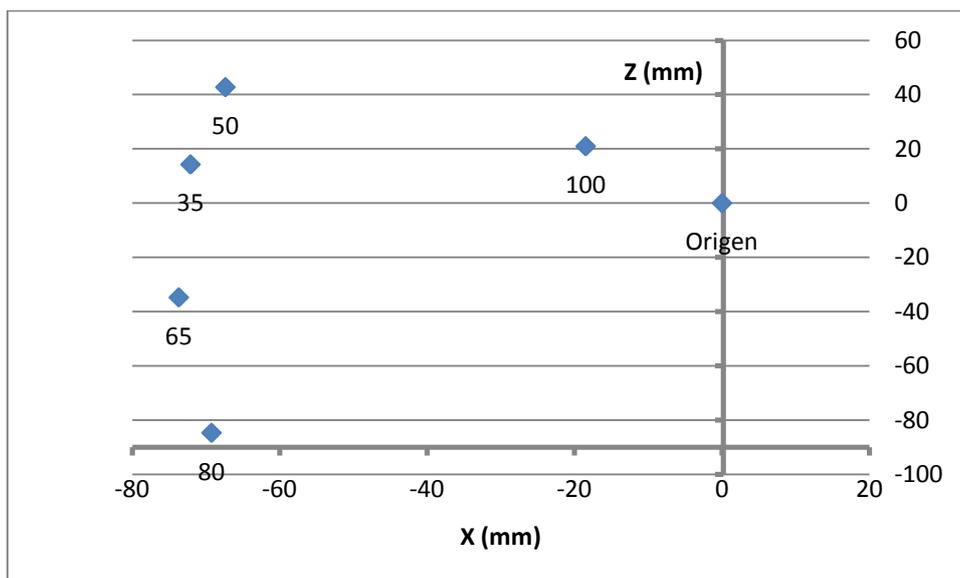
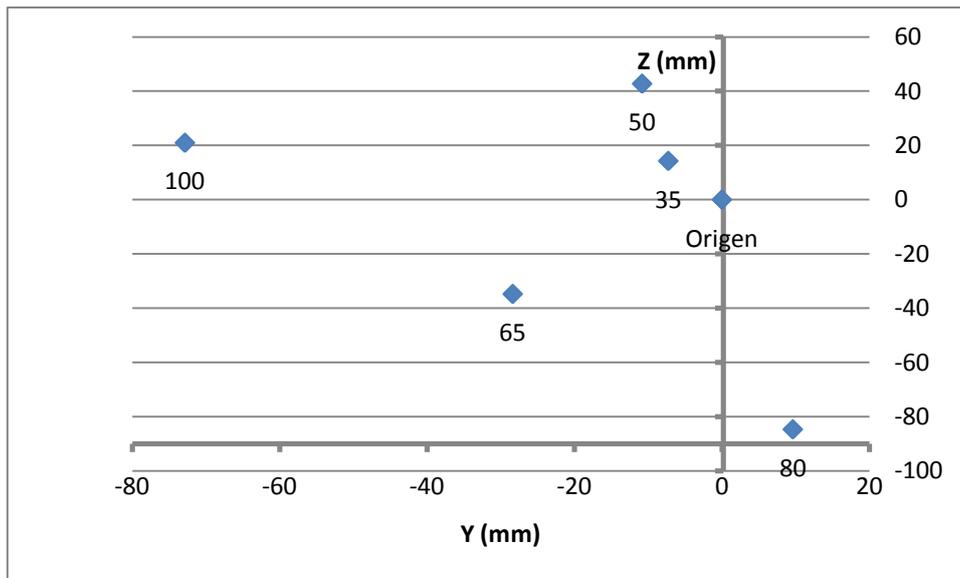


Ilustración 73. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano XZ



**Ilustración 74. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano YZ**

En los dos gráficos anteriores se muestra el punto de aplicación de la fuerza resultante respecto al origen de coordenadas en el cual está centrado todo el ensamblaje (que no corresponde con el centro de gravedad del cuerpo). Se puede observar, que a excepción del punto correspondiente a un tamaño de malla de 100mm, los puntos de aplicación están aplicados sobre una misma región. Advertir que el punto correspondiente al mallado de 35mm es el que está más cercano al origen.

Tamaño malla	Presión superficie máx.	Esfuerzo tangencial máx.	Tiempo ensayo
mm	Mpa	Mpa	s
100	3,61E-02	2,09E-04	23
80	3,75E-02	2,18E-04	42
65	4,03E-02	2,34E-04	81
50	4,40E-02	2,34E-04	150
35	5,18E-02	2,66E-04	438

**Ilustración 75. Valores de las tensiones máximas en función del tamaño de malla**

En cuanto a los valores de presiones máximas que se obtienen en los ensayos producen variaciones similares a las que se producen con la fuerza de arrastre. A medida que se reduce la malla el valor máximo de la presión en la superficie va aumentando.

El esfuerzo tangencial aumenta progresivamente a medida que disminuye el tamaño del elemento. Presenta un comportamiento prácticamente idéntico al de la aportación de la fricción a la fuerza de arrastre.

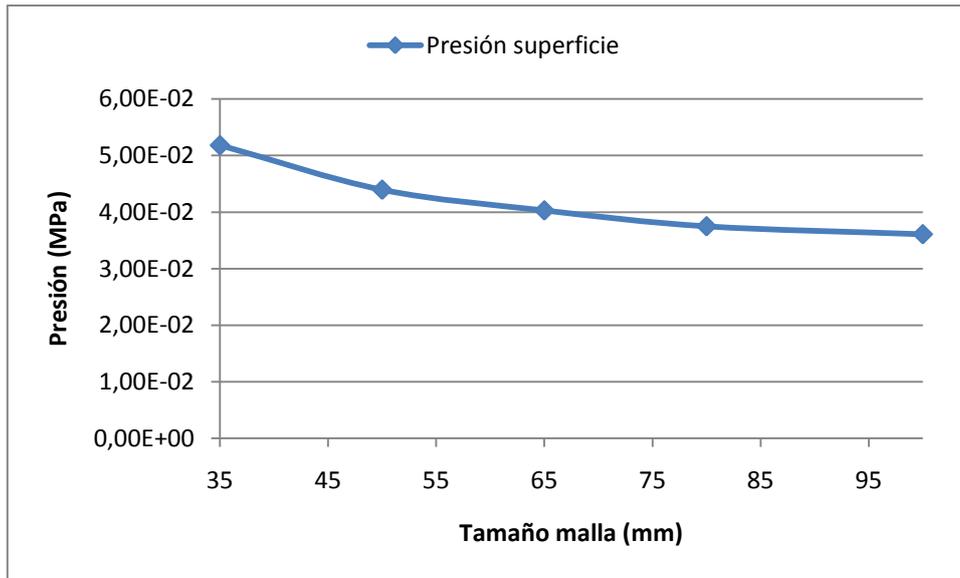


Ilustración 76. Presión en superficie máxima en función del tamaño de malla

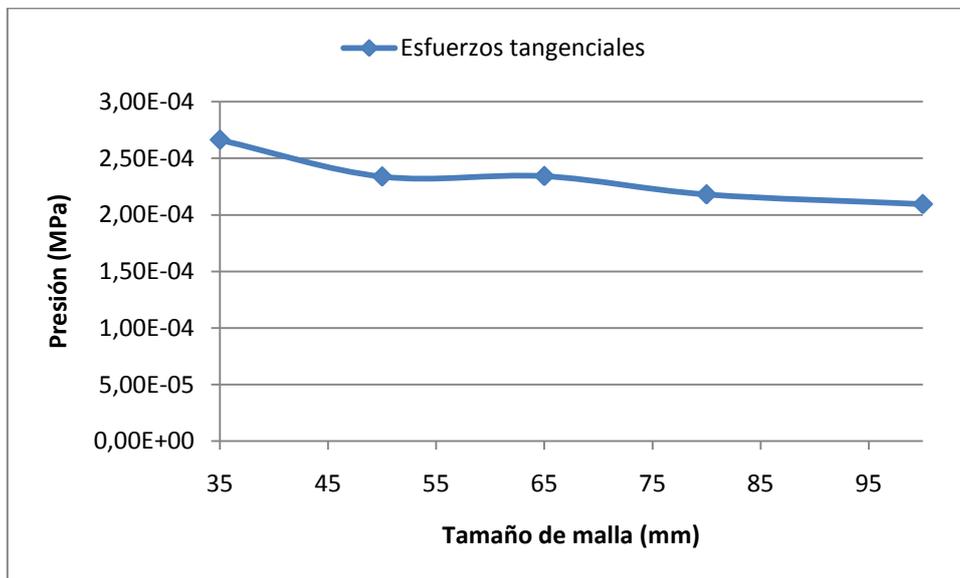


Ilustración 77. Esfuerzos tangenciales máximos en función del tamaño de malla

Tamaño malla mm	Diferencia P.superficie max	Diferencia E.tangencial max
	%	%
100	30,31	21,37
80	27,61	18,14
65	22,20	12,05
50	15,15	12,20
35	Referencia	Referencia

Ilustración 78. Diferencias entre valores máximos de tensiones función del tamaño de malla

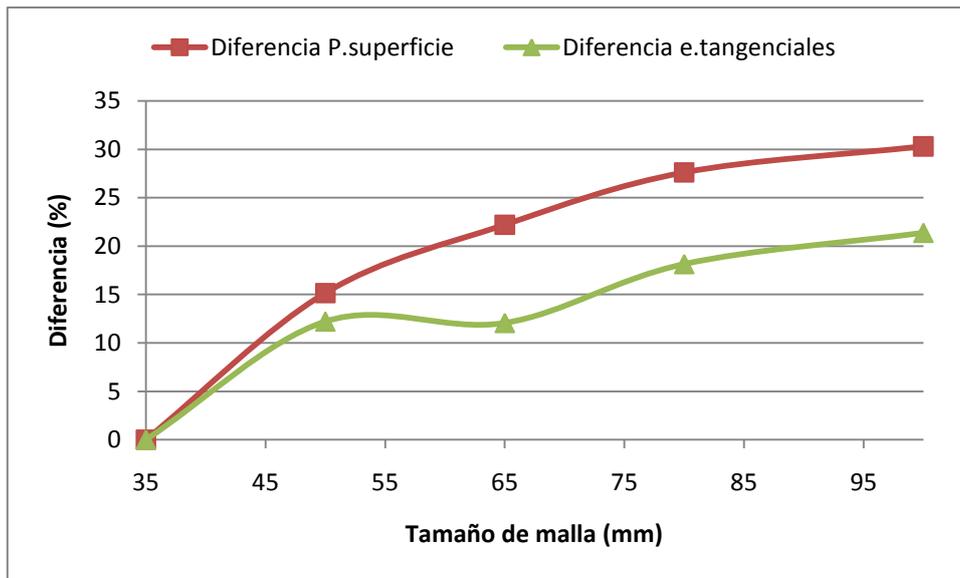


Ilustración 79. Variación diferencias valores máximos de tensiones en función del tamaño de malla

Al igual que se ha realizado con los resultados anteriores, si se consideran las diferencias porcentuales respecto a la referencia, se comprueba que los diferentes esfuerzos presentan diferente sensibilidad al tamaño de malla. Como era de suponer, a mayor tamaño de malla se producen mayores discrepancias, como puede ser el 30.1% de la presión en la superficie y el 21.37% de los esfuerzos tangenciales

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros a la malla, la presión en la superficie y los esfuerzos tangenciales presentan una sensibilidad similar.

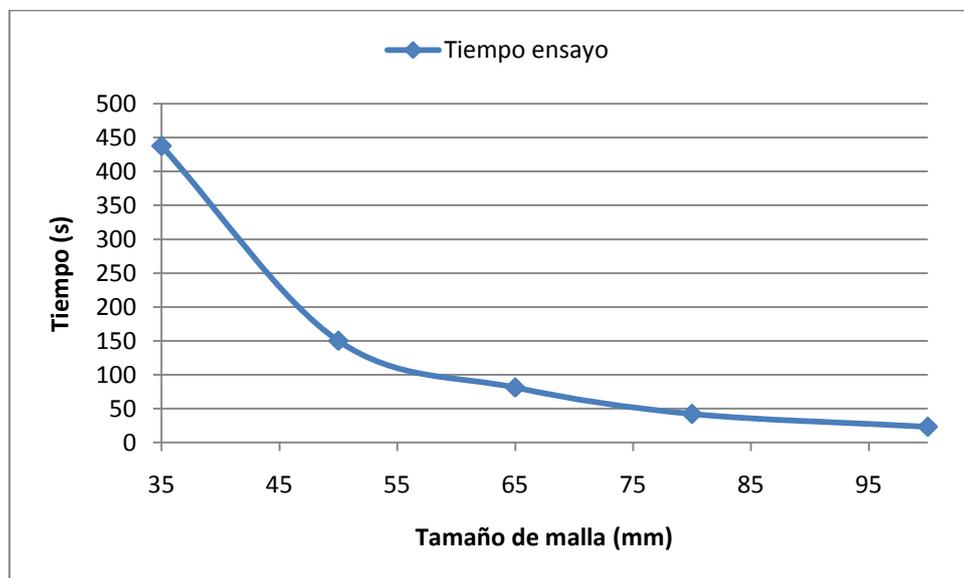


Ilustración 80. Evolución del tiempo de cálculo en función del tamaño de malla

Finalmente, el último elemento a tener en cuenta es el tiempo. En un intervalo entre 100mm y 65mm de tamaño de malla, el tiempo del ensayo crece de forma progresiva. A partir de este punto, dicho tiempo empieza a evolucionar de forma prácticamente exponencial,

pasando de 150 a 438 segundos entre 50 y 35mm (el incremento de tiempo entre 100 y 50 segundos son 127 segundos).

## 7.2. Análisis de la limitación del tamaño del volumen del fluido

Para realizar este análisis se ha considerado un casco con volumen de  $0.25\text{m}^3$ , con una relación L/B de 5, inmerso en un fluido con el cual posee una velocidad relativa de 10m/s. Se ha considerado un modelo de turbulencia de longitud de mezcla.

El volumen que envuelve el objeto de estudio presenta un tamaño de mallas de 100mm, en tal de obtener resultados con una cierta celeridad, y sus dimensiones varían desde 2 veces las dimensiones máximas del casco, hasta 6 veces las mismas. Los resultados alcanzados son los siguientes.

Tamaño volumen	F.Arrastre X	F.Arrastre Y	F.Arrastre Z	Magnitud
Veces	N	N	N	N
2	2925	1903	226,5	3497
3	2341	848,3	-205,6	2499
4	2174	730,5	-196,9	2302
5	2096	569,8	127,6	2175
6	2100	522,9	-272,2	2187

Ilustración 81. Resultados fuerza de arrastre en función volumen del fluido

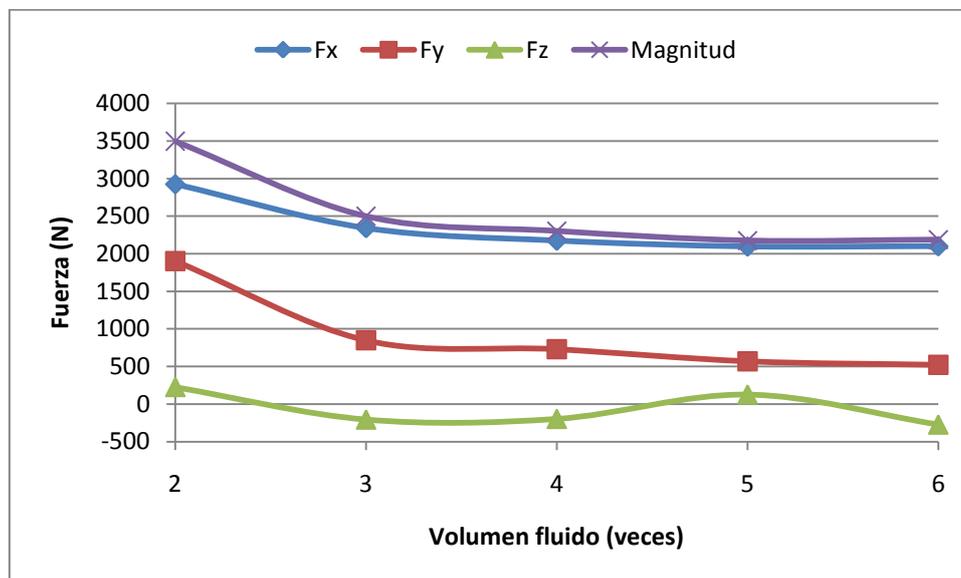


Ilustración 82. Fuerza de arrastre en función del volumen del fluido

En la fuerza de arrastre total se puede observar como a medida que aumenta el tamaño de malla disminuye el peso de las componentes Y y Z en la magnitud total. No obstante en volúmenes grandes aún tienen cierto efecto en el valor de la magnitud. Remarcar que las tres componentes y el valor de la magnitud de la fuerza de arrastre poseen una tendencia descendente, estabilizándose a partir de un volumen cuatro veces mayor al del casco.

Tamaño volumen	T.Arrastre X	T.Arrastre Y	T.Arrastre Z	Magnitud
Veces	N	N	N	N
2	401,5	-0,4986	1,353	401,5
3	352,1	-0,4807	1,271	352,1
4	333,9	-0,5256	1,245	333,9
5	329,3	-0,6663	-0,1457	329,3
6	329,1	-0,4956	1,276	329,1

Ilustración 83. Resultados de la fricción de arrastre en función del volumen del fluido

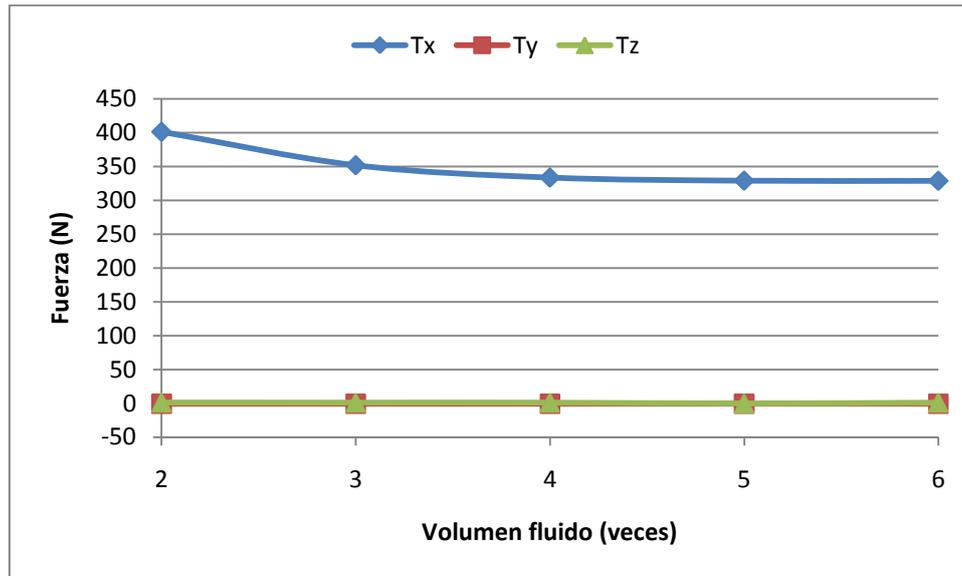


Ilustración 84. Fricción de arrastre en función del volumen del fluido

Respecto al arrastre procedente de la fricción, prácticamente solo tienen componente en el eje X. Su valor desciende con el aumento del volumen, estabilizándose de forma completa alrededor de un volumen de fluido igual a 4.

Tamaño volumen	P.Arrastre X	P.Arrastre Y	P.Arrastre Z	Magnitud
Veces	N	N	N	N
2	2524	1903	225,1	3169
3	1989	848,8	-206,9	2173
4	1840	731,1	-198,2	1990
5	1766	570,5	127,8	1861
6	1777	523,4	-273,5	1876

Ilustración 85. Resultados de la presión de arrastre en función del volumen del fluido

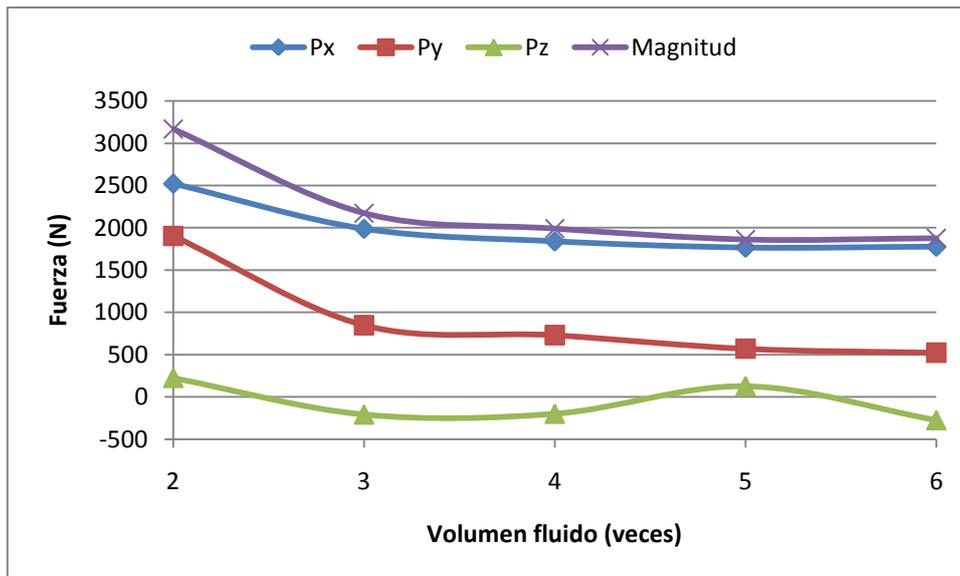


Ilustración 86. Presión de arrastre en función del volumen del fluido

El arrastre debido a la presión presenta un comportamiento similar al del total, es decir, las tres componentes junto con la magnitud descienden con el volumen, estabilizándose en un cierto valor. También disminuye la contribución de las componentes Y y Z respecto a X.

Tamaño volumen	Diferencia F.arrastre total.	Diferencia F.arrastre cortante	Diferencia F.arrastre presión
Veces	%	%	%
2	59,90	22,00	68,92
3	14,27	6,99	15,83
4	5,26	1,46	6,08
5	0,55	0,06	0,80
6	Referencia	Referencia	Referencia

Ilustración 87. Diferencias en función del volumen del fluido

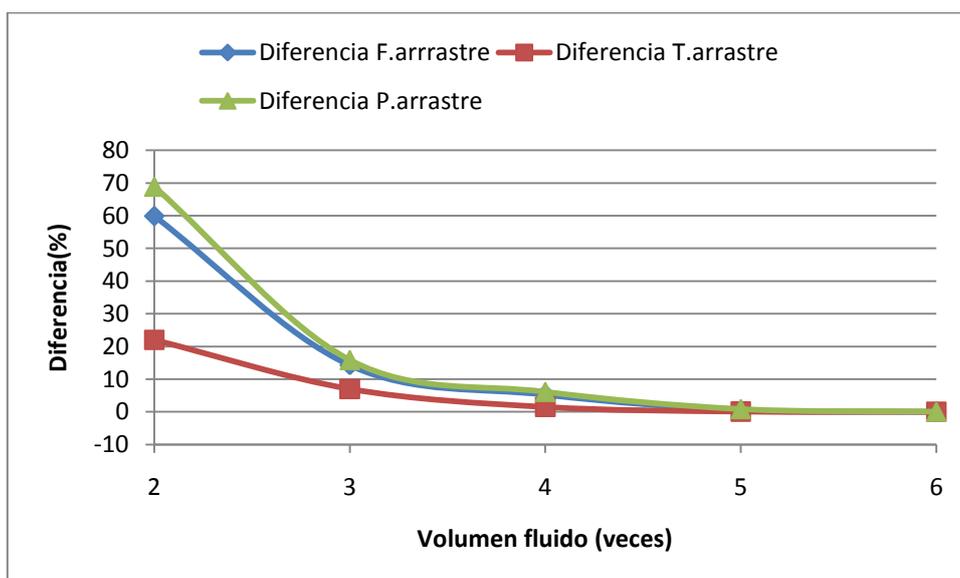


Ilustración 88. Variación de las diferencias en función del volumen del fluido

En lo que se refiere a la variación porcentual de las diferentes componentes de la fuerza de arrastre, y su valor total respecto a la referencia<sup>18</sup>, se puede observar que existe una elevada variación entre un volumen 2 y 3 veces superior al volumen del casco (60-70% en arrastre total y de presión, 20% en cortantes), estabilizándose los valores alrededor de volúmenes 4 veces mayores a éste. A partir de este punto se encuentran diferencias respecto a la referencia del orden de un 1% en el arrastre cortante y del 5-6% en el arrastre total y el atribuido a la presión.

En cuanto a la sensibilidad, se puede observar que el valor de fuerza total y el proporcionado por la presión, son especialmente sensibles al volumen del fluido, mientras que los cortantes lo son en menor medida.

Tamaño volumen	X	Y	Z
Veces	mm	mm	mm
2	-18,5	-72,89	20,97
3	-45,79	-57,4	-12,19
4	-55,64	-40,73	-27,25
5	-48,96	-99,78	18,86
6	-61,58	-42,64	-45,62

Ilustración 89. Puntos de aplicación en función del volumen

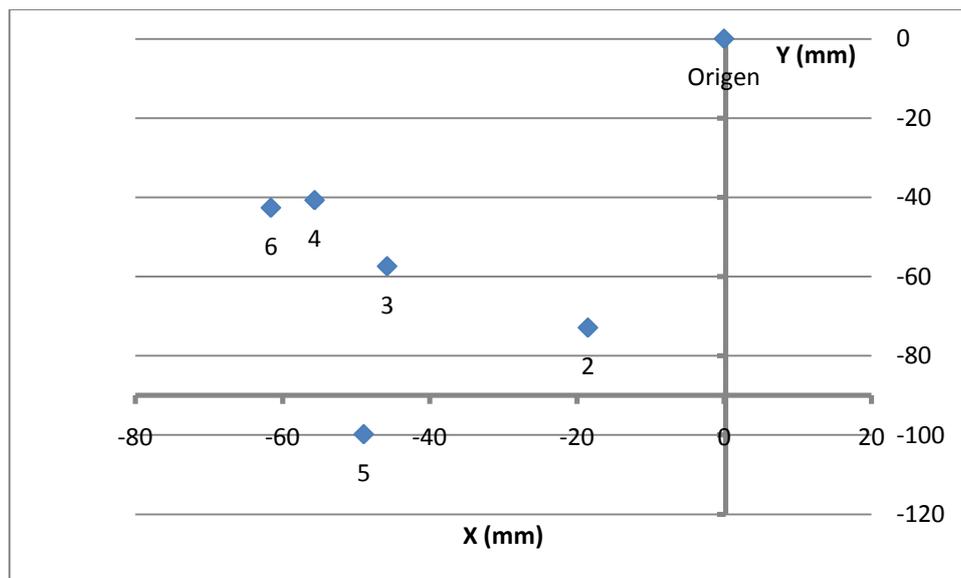


Ilustración 90. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano XY

<sup>18</sup> Se toma como referencia el volumen 6 veces superior al del casco, ya que es el que mejor refleja las condiciones de contorno de mar abierto.

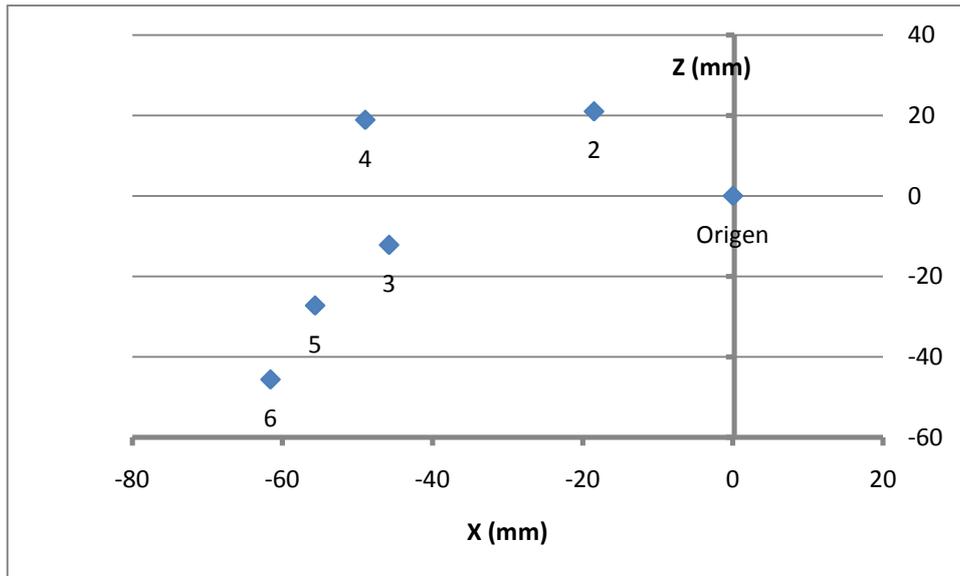


Ilustración 91. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano XZ

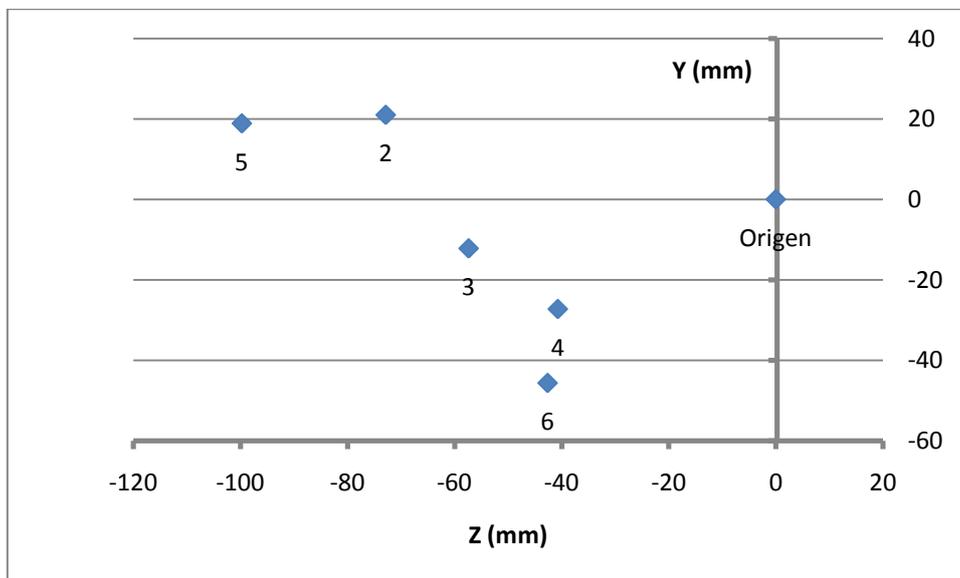


Ilustración 92. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano ZY

En las gráficas anteriores, se puede observar que los valores aparecen un tanto dispersos, por lo que no se observa ningún punto de concentración claro en cual se aplique la fuerza.

Tamaño volumen	Presión superficie máx.	Esfuerzo tangencial máx.	Tiempo ensayo
Veces	Mpa	Mpa	s
2	3,61E-02	2,09E-04	23
3	3,43E-02	1,64E-04	67
4	3,45E-02	1,55E-04	173
5	3,55E-02	1,57E-04	327
6	3,42E-02	1,50E-04	532

Ilustración 93. Valores de las tensiones máximas en función del volumen del fluido

Si se consideran los valores de los esfuerzos máximos que se producen en el cuerpo, la presión en la superficie desciende de forma muy gradual a medida que se aumenta el tamaño del volumen del fluido.

En el caso de los esfuerzos tangenciales, se produce un brusco descenso en el paso entre los volúmenes 2 y 3 veces mayores al del casco. A partir de este último valor, el esfuerzo tangencial tiende a estabilizarse.

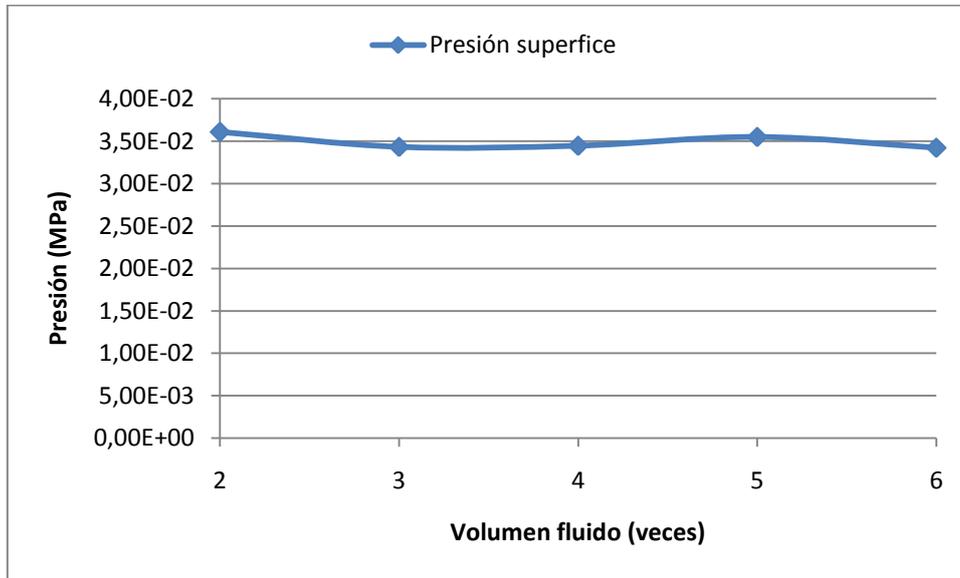


Ilustración 94. Presión en superficie en función del volumen del fluido

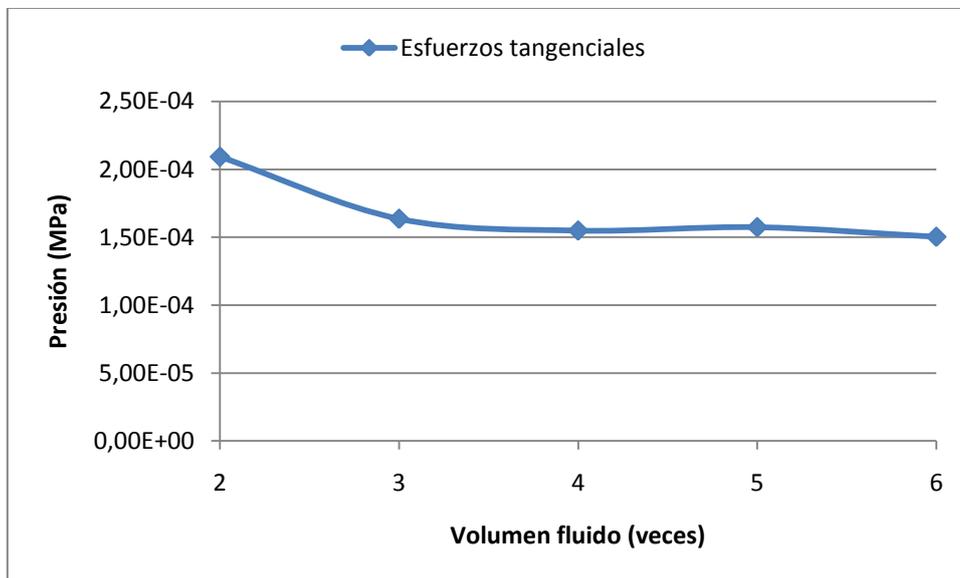


Ilustración 95. Esfuerzos tangenciales en función del volumen del fluido

Tamaño volumen	Diferencia P.superficie máx.	Diferencia E.tangencial máx.
Veces	%	%
2	5,49	39,32
3	0,29	8,85
4	0,70	3,06
5	3,74	4,72
6	Referencia	Referencia

Ilustración 96. Valores de las diferencias de las tensiones máximas en función del volumen del fluido

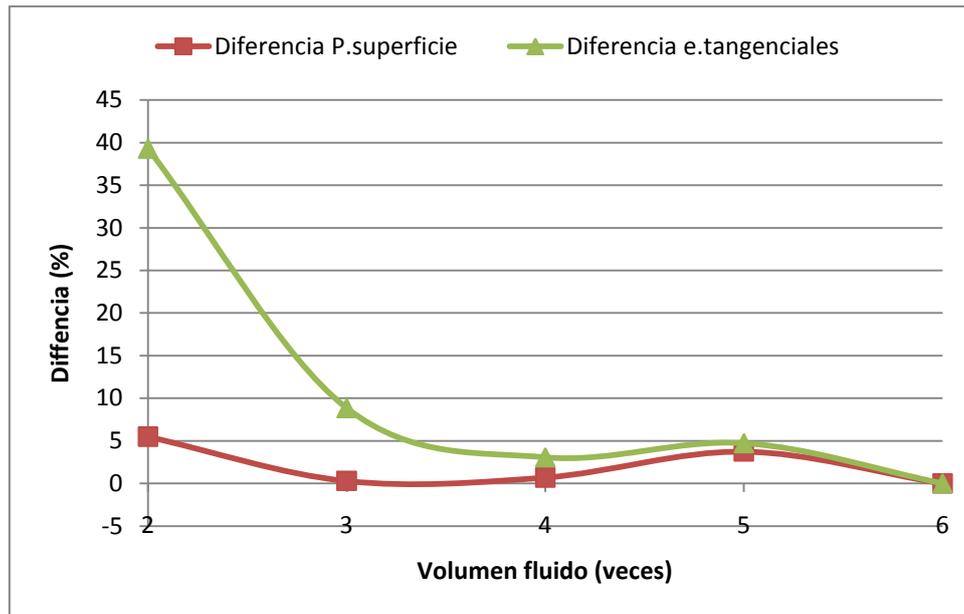


Ilustración 97. Diferencias de las tensiones máximas en función del volumen del fluido

Si se consideran ahora las diferencias porcentuales entre los diferentes elementos, el elemento más sensible a la variación del volumen del fluido son los esfuerzos tangenciales, obteniendo una diferencia respecto a la diferencia de un 39,32%, en un volumen del fluido 2 veces mayor al del casco. A partir de aquí las discrepancias disminuyen, aunque se mantienen en valores relativamente altos (entre 3 y 8%).

La presión máxima en superficie es poco sensible al volumen del fluido. Salvo en el volumen más pequeño, en el que presentan una diferencia alrededor de un 5.5%, apenas varía respecto la referencia.

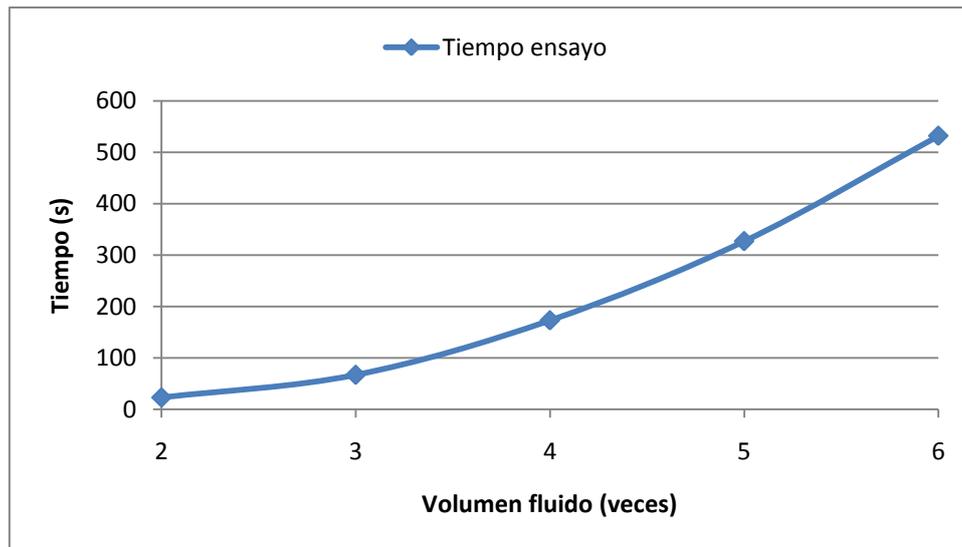


Ilustración 98. Tiempo de ensayo en función del volumen del fluido

Finalmente, notar que el tiempo de cálculo crece de forma considerable a medida que aumenta el volumen del fluido. Este aumenta cada vez más rápidamente, incrementándose el tiempo del punto 2 al 3 en 44 segundos, mientras que de 5 a 6 aumenta en 205 segundos.

### 7.3. Conclusiones

De los resultados que se desprenden de los dos puntos analizados anteriormente, se puede deducir cuales son los efectos del refinamiento de malla y del aumento del volumen de control del fluido.

El refinamiento de la malla tiene una mayor influencia en el punto de aplicación de la fuerza de arrastre, y por ende el valor de las componentes. Al moverse el cuerpo paralelo al flujo (en la dirección X), centrado con este, es de suponer que los resultados más precisos serán aquellos en el que el punto de aplicación esté más cercano al  $Y=0$  y  $Z=0$ , y que la magnitud de la componente x sea prácticamente idéntica al valor de la magnitud total de la fuerza. Dicho efecto se puede observar bien, como se ha dicho antes, a medida que se refina la malla.

En cuanto a los valores de las presiones máximas que se producen sobre el cuerpo, el refinamiento de malla afecta principalmente a la presión sobre la superficie del cuerpo y a los esfuerzos tangenciales, produciéndose grandes variaciones entre malla fina y malla basta.

El aumento del volumen del fluido afecta al nivel de “realidad” de los valores obtenidos. Al aumentar el volumen, los diferentes valores, tanto de presiones máximas como de fuerzas de arrastre, tienden a cierto valor que corresponde a la solución en el caso en que el cuerpo este en mar abierto y no influenciado por el efecto de las paredes del fluido. No obstante, ello no tiene influencia sobre el punto de aplicación de la fuerza de arrastre, por lo que no se asegura una mayor precisión.

Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo de cálculo. Si se quiere obtener unas condiciones reales de análisis junto con una buena precisión, se deberá considerar el efecto de

incremento de cálculo que supone el aumento del volumen del fluido y el refinamiento de malla, multiplicándose ambos tiempos. Se han realizado ensayos considerando un tamaño de malla de 50mm junto con un volumen 4 veces mayor al del casco, no poseyendo el ordenador la suficiente potencia computacional como para resolver el problema.

En los ensayos realizados a lo largo de la tesina se ha optado por obviar, en cierta forma, el efecto de las paredes del volumen control en tal de potenciar la precisión de los resultados. Esto último permite obtener unas mejores correlaciones entre los parámetros de diseño, lo cual es el objeto de este trabajo, independientemente de unas condiciones de contorno u otras. La mayoría de los ensayos se han realizado considerando un volumen dos veces superior al del casco (en diversos tutoriales se proponía que el cuerpo fuese dos tercios del volumen) y un tamaño de malla de 50mm. No obstante, por motivos de cálculo relacionados con las capacidades del ordenador, algunos cálculos se han llevado a cabo con un tamaño de 100mm debido a la necesidad de trabajar con un volumen de fluido mayor.



# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

---



## 8. Análisis de los resultados

En este apartado se van a mostrar y desarrollar los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas en esta tesina. En los diferentes apartados se presentarán y analizarán los resultados obtenidos para mostrar, en un apartado final las conclusiones que se derivan de su análisis.

Los datos que se analizan en cada uno de ellos son:

- Valor componentes de las fuerzas de arrastre en X, Y, Z y su magnitud, además de su punto de aplicación<sup>19</sup>
- Valor de los componentes en X, Y, Z y su magnitud de la aportación de la presión y de la fricción a la fuerza de arrastre
- Valores máximos de la presión en la superficie del cuerpo y de los esfuerzos tangenciales, así como su distribución a lo largo del cuerpo.

Los parámetros mostrados anteriormente únicamente serán analizados en aquellos casos en que sea de interés o aporten datos relevantes. Se considera como sistema de referencia un eje de coordenadas centrado en el cuerpo, con las direcciones X, Y,, Z alineadas con los ejes del volumen contenedor del fluido.

### 8.1. Variación de la relación L/D a volumen constante

En esta batería de ensayos se ha variado la relación entre la longitud y el diámetro del cuerpo considerando que el volumen permanece constante e igual a  $0.25\text{m}^3$ . Se ha barrido una relación L/D entre 3 y 10, a intervalos de una unidad.

Como condiciones de realización de estas pruebas, se ha considerado que el casco está encerrado en un volumen de fluido prismático dos veces cada una de sus dimensiones máximas, en el cual el agua penetra por un lado a  $10\text{m/s}$  y sale por el opuesto sin que haya succión ninguna.

En lo referente a los parámetros numéricos de la solución, se ha considerado una malla  $2\text{D}^{20}$  de  $35\text{mm}$  para mallar la superficie del cuerpo, mientras que para el volumen de fluido se ha utilizado una malla  $3\text{D}$  de tamaño de elemento  $50\text{mm}$ . El modelo de turbulencia empleado ha sido el de longitud de mezcla.

En las siguientes imágenes se puede observar el mallado tipo del casco, el mallado el volumen del fluido, y una representación de las condiciones de contorno bajo las cuales se han realizado los experimentos.

---

<sup>19</sup> CP según NX

<sup>20</sup> EL tipo de malla es Tri3 thin shell

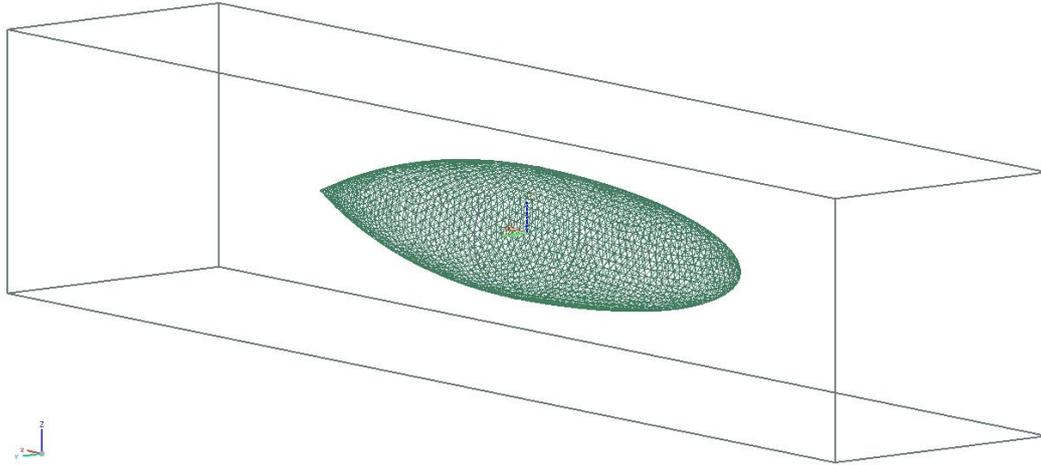
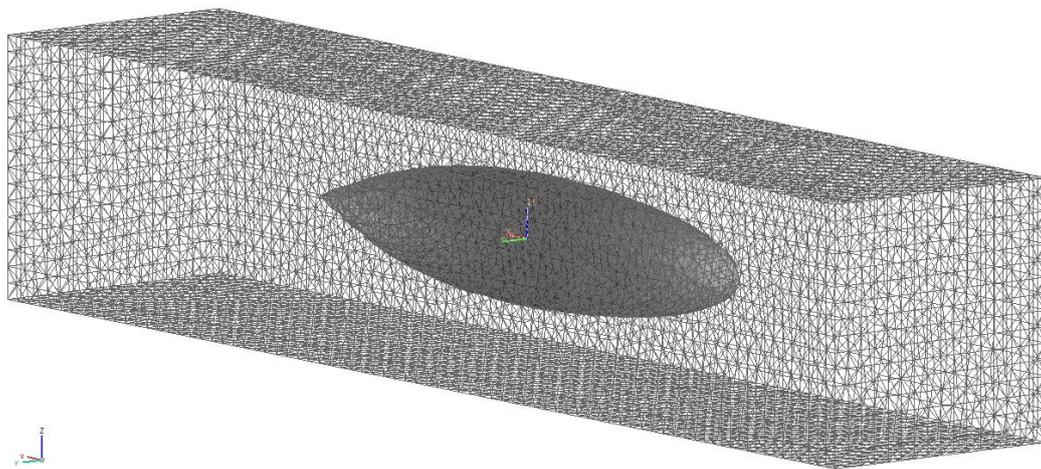
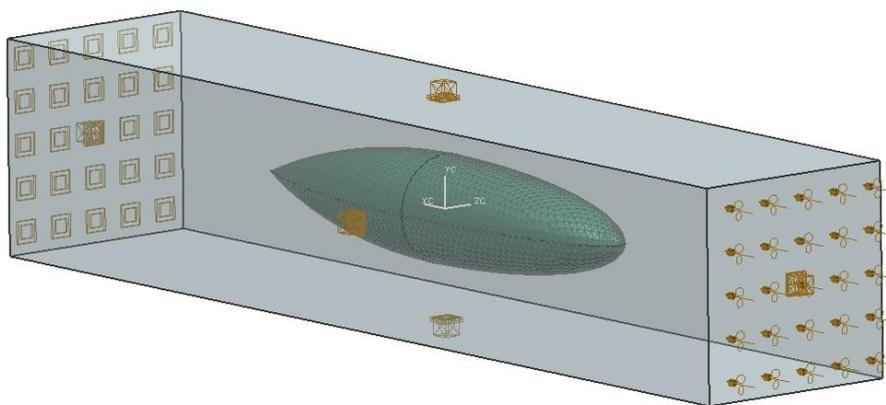


Ilustración 99. Malla del casco



ANALYSIS\_1 WORK

Ilustración 100 Malla del volumen de fluido



SIM\_1 WORK

Ilustración 101. Condiciones de contorno

A continuación se muestran los resultados referentes al valor y el punto de aplicación de las fuerzas de arrastre.

L/D	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
mm/mm	N	N	N	N
3	4274	370	-289,8	4300
4	3081	295,3	-283,6	3108
5	2417	107,2	87,76	2421
6	2112	344,8	-39,32	2140
7	1904	51,85	-410,7	1946
8	1778	95,53	63,69	1786
9	1688	224,6	-7,484	1702
10	1636	45,06	-29,69	1637

Ilustración 102. Magnitud y componentes fuerza de arrastre barrido L/D

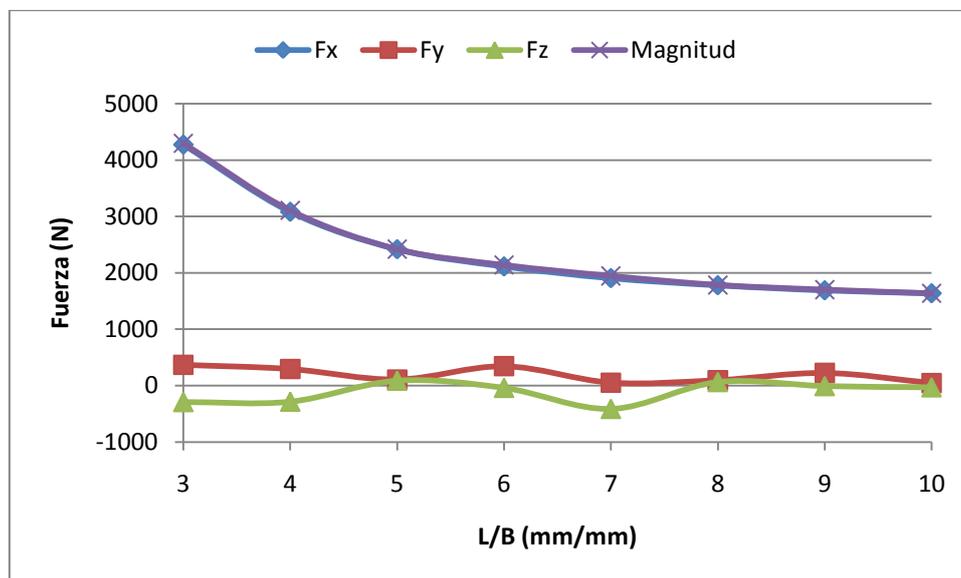


Ilustración 103. Evolución magnitud y componentes fuerza de arrastre

En la gráfica anterior se puede comprobar cómo la magnitud de la fuerza de arrastre disminuye a medida que aumenta la relación entre L/D. Notar que prácticamente toda la aportación de la fuerza de arrastre procede de la componente X, siendo Z e Y componentes un residuales.

La fuerza de arrastre producida por la fricción del fluido aumenta de forma constante al aumentar la relación entre la longitud y el diámetro del casco. Se puede decir que únicamente posee componente en X, ya que las componentes en Z e Y son del orden de 1000 veces menores, pudiéndose considerar prácticamente despreciables.

Dichos resultados están plasmados en la tabla y la gráfica posteriores.

L/D	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
mm/mm	N	N	N	N
3	436,8	0,009785	0,06946	436,8
4	473,9	0,4262	-0,3142	473,9
5	495,5	0,7264	-0,3272	495,5
6	545,1	-0,1965	-0,4351	545,1
7	555,5	0,3658	-0,08605	555,5
8	590,5	-0,0778	-0,07904	590,6
9	599,6	-0,1203	0,5266	599,6
10	627,9	0,9962	-0,4805	627,9

Ilustración 104. Magnitud y componentes fuerza de arrastre fricción barrido L/D

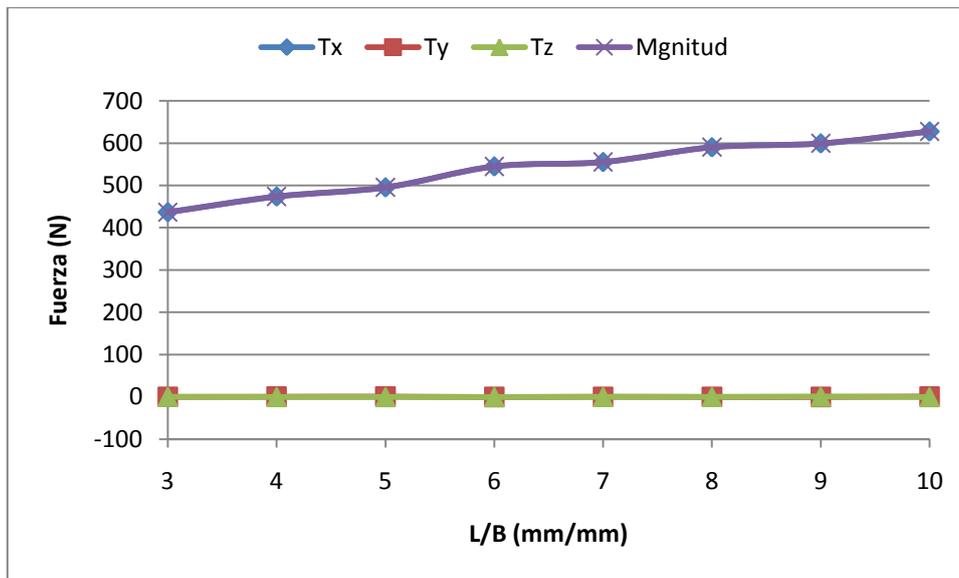


Ilustración 105. Evolución magnitud y componentes fuerza de arrastre fricción

Al aumentar la relación L/D se produce un aumento del arrastre debido a la presión, calculando prácticamente la gráfica que muestra la evolución de la fuerza de arrastre total. La principal componente es X, siendo Z e Y componentes que no tienen apenas relevancia en el valor de la magnitud final.

Notar que el valor de la componente Z e Y en el arrastre de presión es el mismo que en la fuerza de arrastre total, ya que la aportación de Tx y Tz a ésta es inapreciable.

La gráfica y la tabla de datos que se muestran a continuación muestran los aspectos del arrastre debido a la presión arriba mencionados.

L/D	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
mm/mm	N	N	N	N
3	3837	370	-289,8	3866
4	2607	294,9	-283,3	2639
5	1921	106,5	80,809	1926
6	1567	345	-38,89	1605
7	1349	51,48	-410,6	1411
8	1187	95,6	63,76	1193
9	1088	224,7	-8,01	1111
10	1008	44,07	-29,21	1009

Ilustración 106. Magnitud y componentes fuerza de arrastre de presión barrido L/D

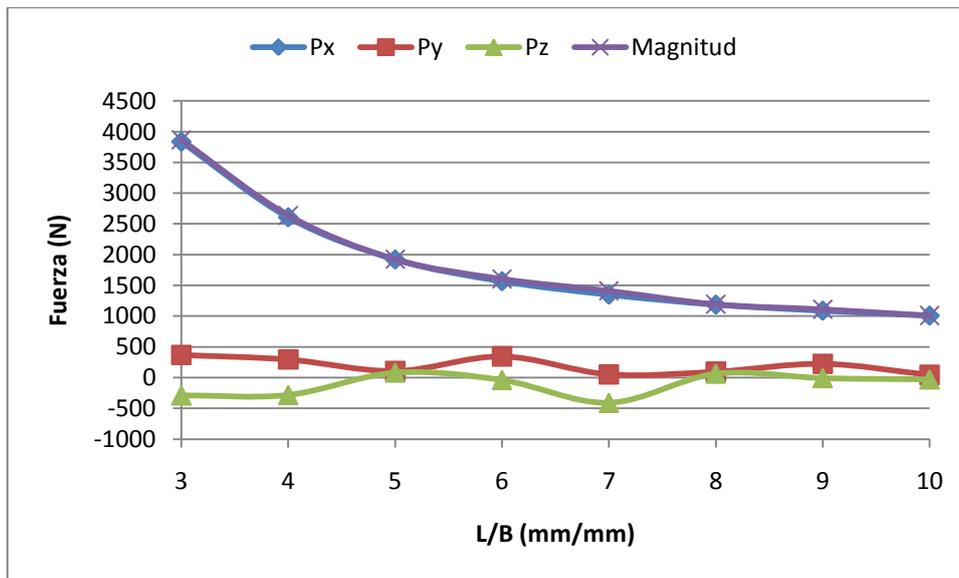


Ilustración 107. Evolución magnitud y componentes fuerza de presión

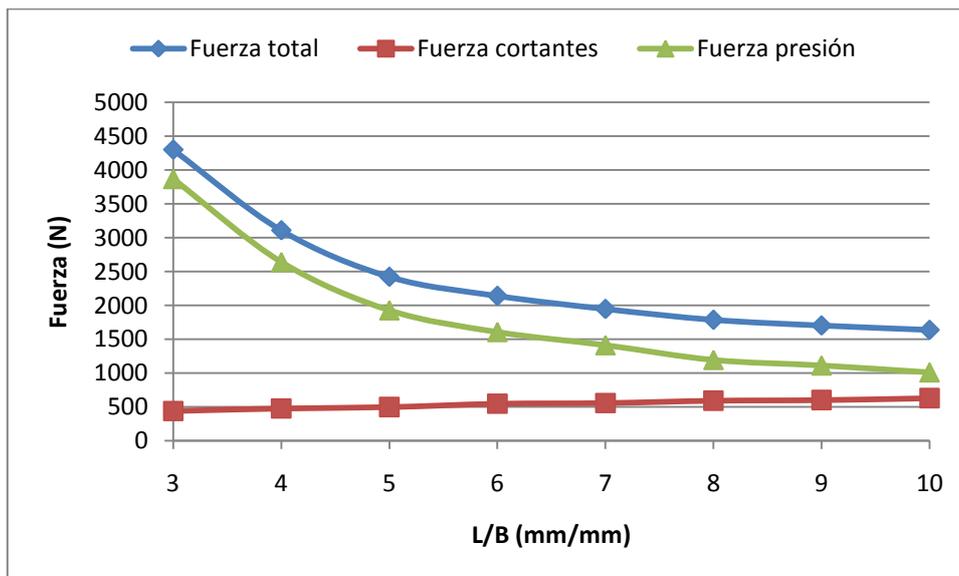


Ilustración 108. Comparación magnitud arrastre total, de presión y de fricción.

Comparando el arrastre debido a la presión y el arrastre debido a la fricción del fluido con el arrastre total, se puede observar que el factor más importante de ambos es la presión, quedando la fricción en un segundo plano. De hecho el aumento de ésta última no aumenta en demasía el arrastre total.

Otro aspecto a destacar es que la magnitud de la fuerza debido a la presión y la de la fricción tiende a igualarse, disminuyendo el peso de la primera en la magnitud total a medida que aumenta la relación L/D. Todo ello se puede observar en la gráfica anterior.

En cuanto al punto de aplicación de la fuerza, éste se tiende a desplazar hacia la proa del casco a medida que aumenta la relación L/D. En cuanto a las coordenadas Z e Y, estas tienden a comportarse de forma un tanto aleatoria, situándose siempre alrededor del origen.

L/D	X	Y	Z
mm/mm	N	N	N
3	-0,4796	6,327	10,97
4	-61,11	-4,281	-1,453
5	-67,37	-10,83	42,76
6	-77,18	-21,14	69,01
7	-100,4	-45,86	-42,1
8	-112,6	2,265	15,65
9	-110,9	17,04	5,949
10	-126,3	40,32	75,94

Ilustración 109. Puntos de aplicación de la fuerza

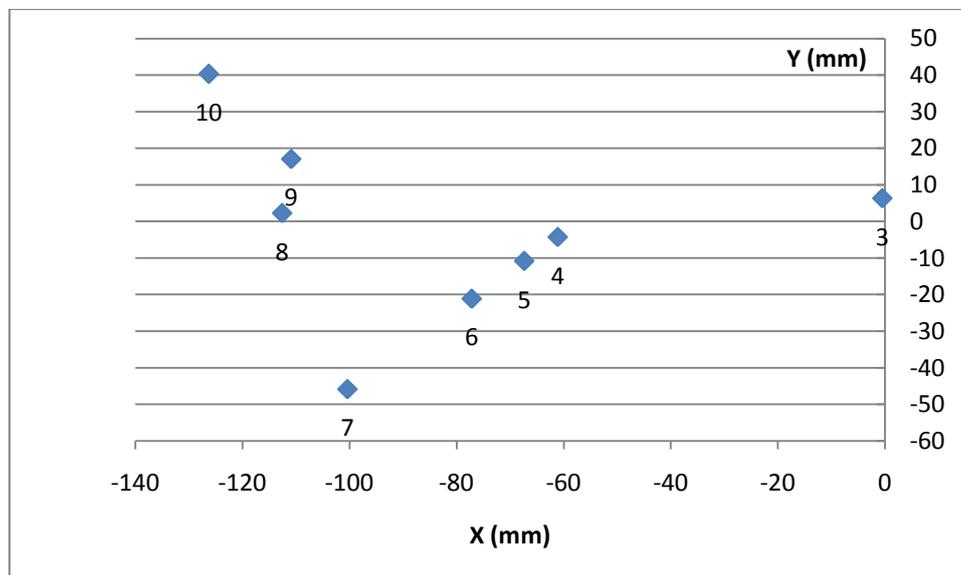


Ilustración 110. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano XY

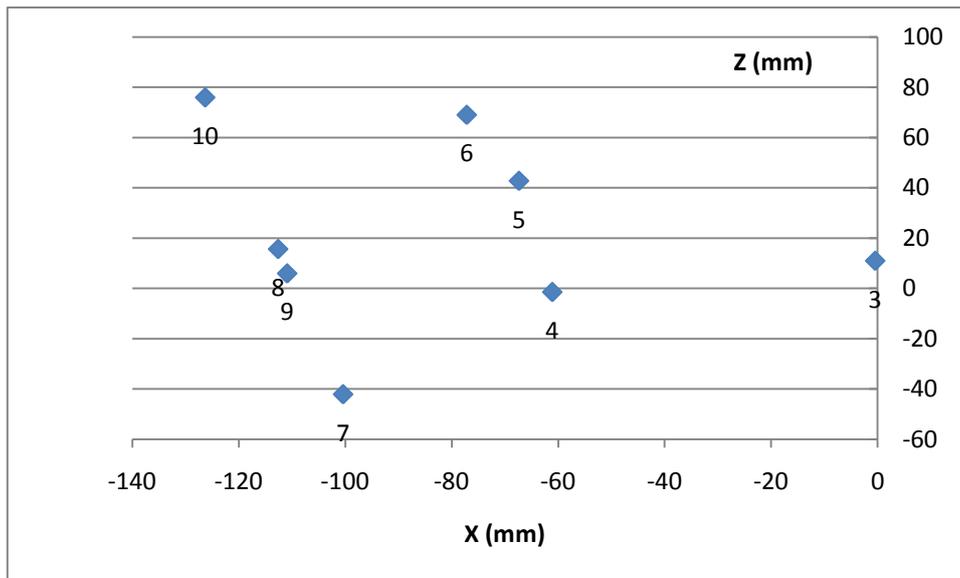


Ilustración 111. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano XZ

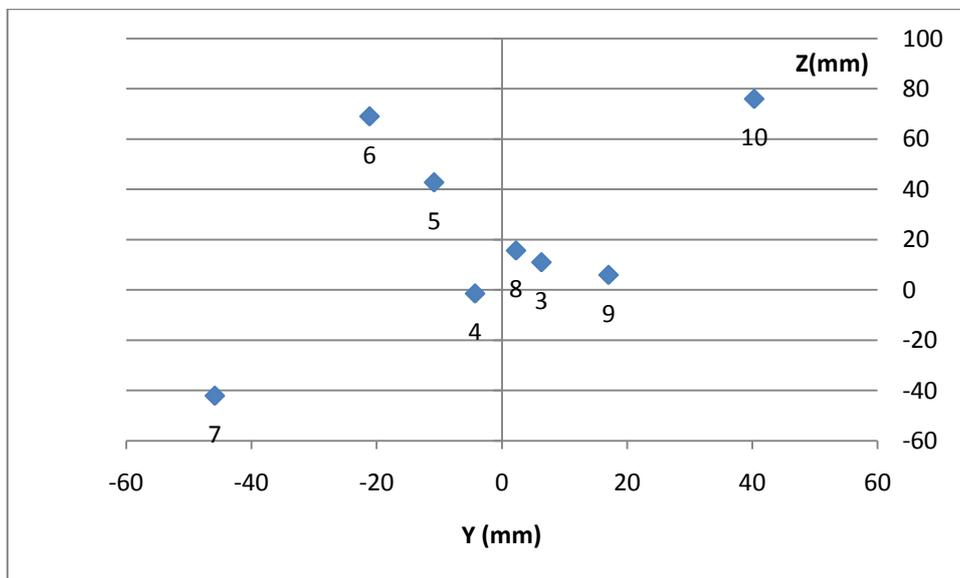


Ilustración 112. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano YZ

A continuación se presentará a estudiar los esfuerzos máximos que se producen en la superficie del casco, tanto debido a la presión como a los cortantes (fricción), al igual que su distribución a lo largo de éste

A la vista de los resultados, se puede observar que la presión máxima en la superficie disminuye progresivamente medida que aumenta L/D. Los esfuerzos tangenciales máximos no parecen tener patrón de comportamiento alguno, pero se puede intuir una tendencia parabólica con mínimo entre 5 y 8.

Otro aspecto a destacar es el valor de estos esfuerzos. La presión en la superficie presenta valores dos órdenes de magnitud mayores a los esfuerzos tangenciales, acentuándose la diferencia entre ambos en relaciones de L/D bajas.

L/D	Presión superficie max	Esfuerzos tangenciales max
mm/mm	MPa	MPa
3	5,62E-02	2,60E-04
4	5,08E-02	2,43E-04
5	4,40E-02	2,34E-04
6	4,44E-02	2,42E-04
7	4,15E-02	2,38E-04
8	4,07E-02	2,37E-04
9	4,41E-02	2,45E-04
10	3,57E-02	2,55E-04

Ilustración 113. Valores de los esfuerzos máximos en el barrido L/D

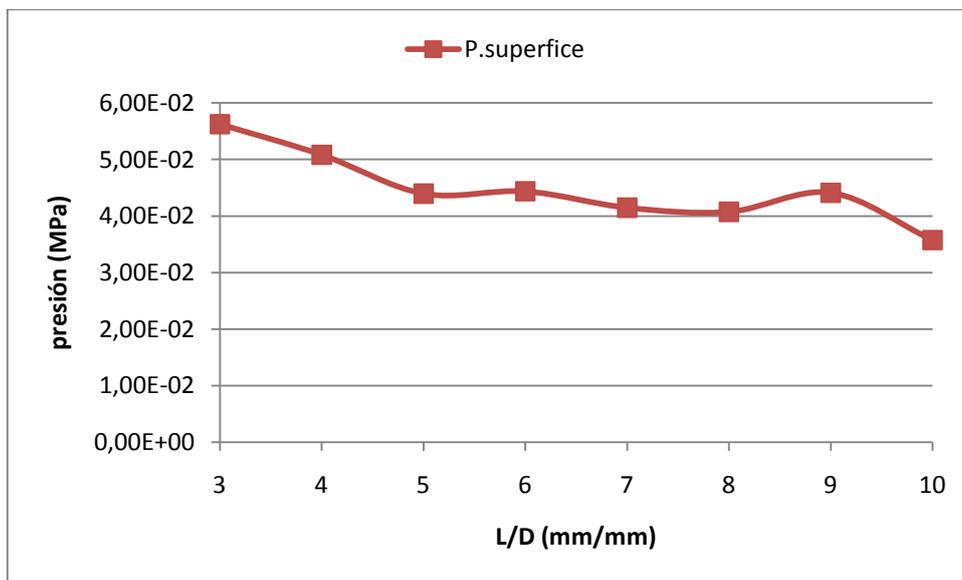


Ilustración 114. Valor de la presión en la superficie máxima en barrido L/D

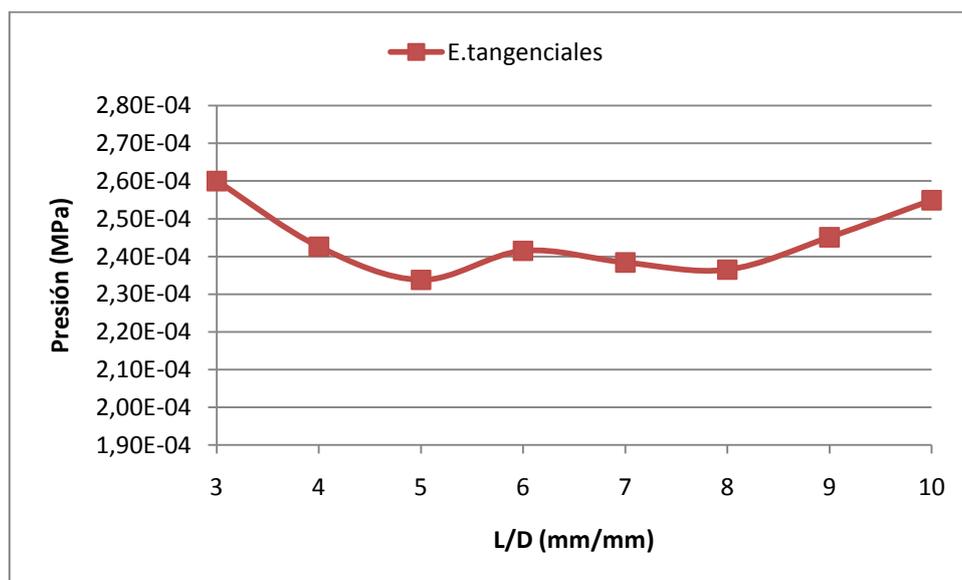


Ilustración 115. Valor de los esfuerzos tangenciales máximos en barrido L/D

Analizando la presión existente en la superficie del cuerpo, su valor máximo se produce en la proa del casco, disminuyendo hasta alcanzar el mínimo en el punto de mayor diámetro. A partir de este punto vuelve a aumentar la presión a medida que se acerca a la popa, no alcanzándose en ningún momento máximos comparables a los de la proa.

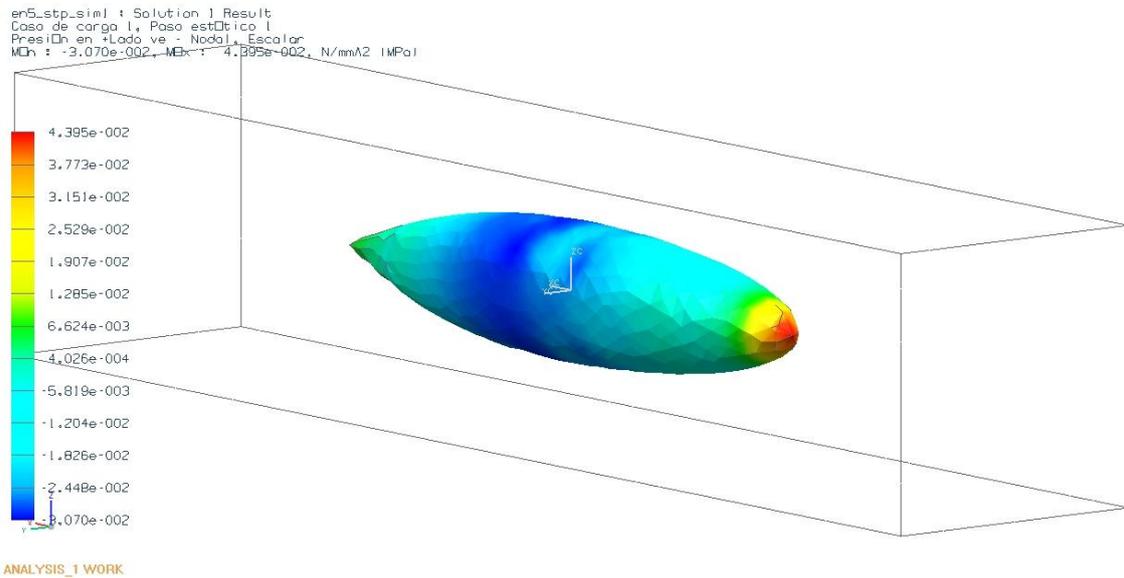


Ilustración 116. Ejemplo de distribución de presiones en el casco

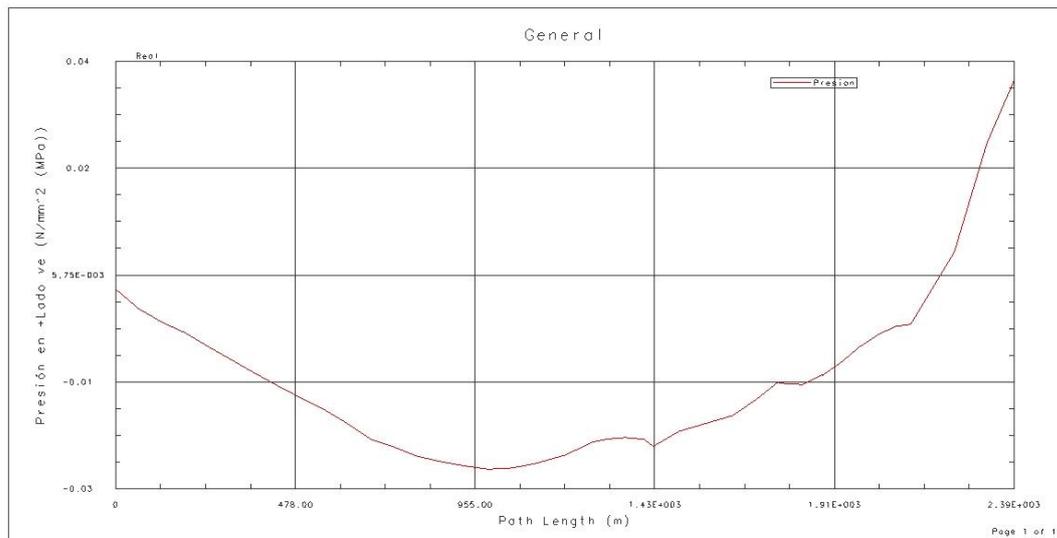
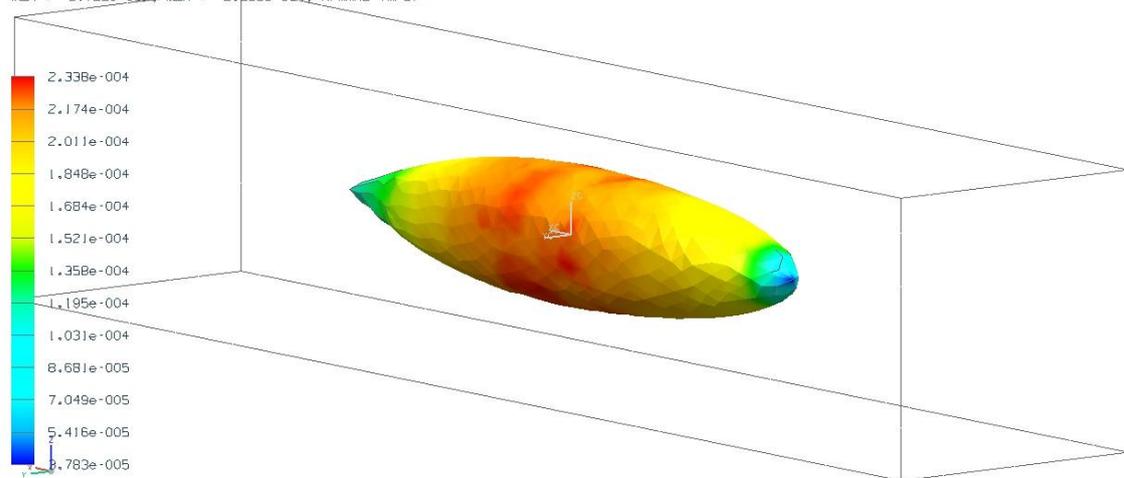


Ilustración 117. Grafica de distribución de presiones en el casco

El valor máximo de los esfuerzos tangenciales se encuentra en el punto en el que el diámetro es máximo, mientras que el mínimo se encuentra en el vértice frontal del casco (aunque en la popa se alanza otro mínimo local). La distribución de esfuerzos es completamente inversa a la que se ha visto en las presiones

er5\_stp\_sim1 : Solution 1 Result  
 Caso de carga 1, Paso estático 1  
 Tensión de corte en el lado +ve - Nodal, Escalar  
 Min : 3.783e-005, Max : 2.338e-004, N/mmA2 (MPa)



ANALYSIS\_1 WORK

Ilustración 118. Ejemplo de distribución de esfuerzos tangenciales en el casco

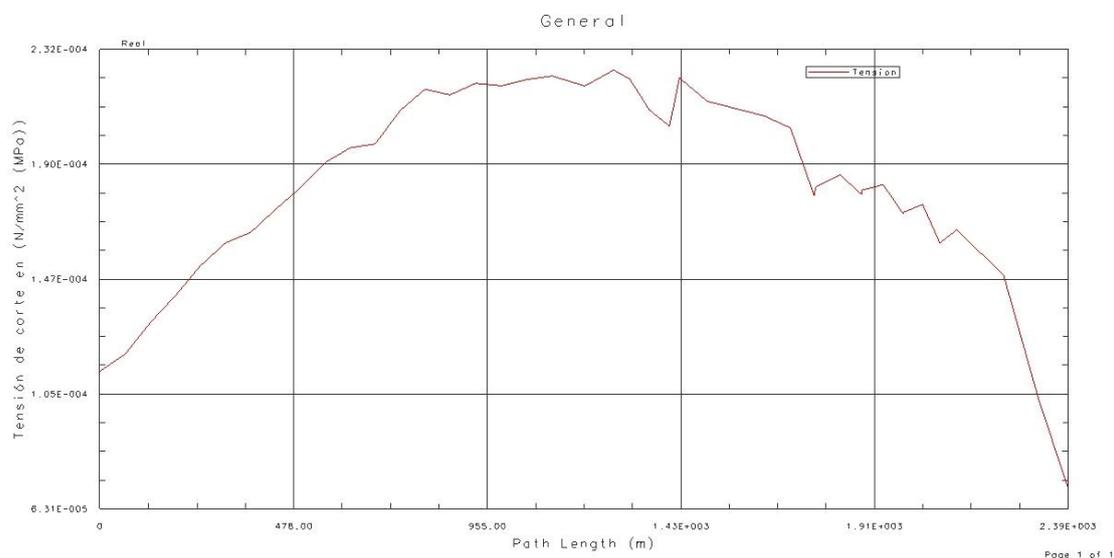


Ilustración 119. Grafica de distribución de esfuerzos

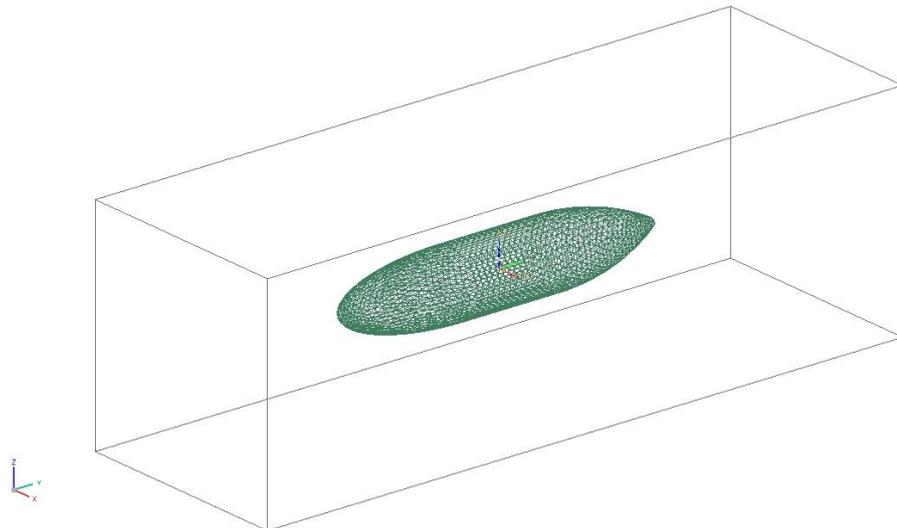
## 8.2. Variación del tramo recto

En esta tanda de ensayos se ha considerado la inclusión de un tramo recto en el cuerpo del casco, considerando que éste posee una longitud fija igual a 2000mm y una relación L/D de 5. Se ha considerado la variación del tramo recto en función de un porcentaje de la longitud del cuerpo, analizando desde 0 hasta 70% del valor total en variaciones de 10%. Mencionar que, para un adecuado mallado del cuerpo, se han truncado 40mm del cono de popa del casco.

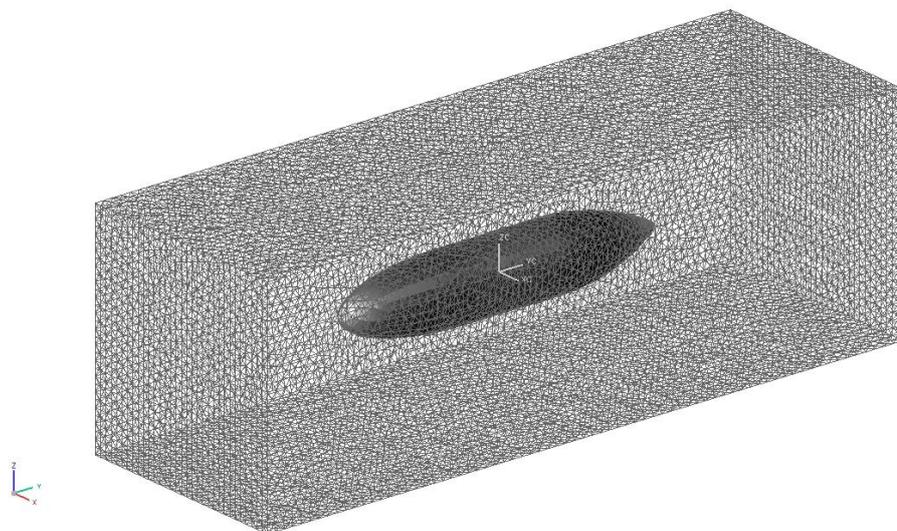
En cuanto a las condiciones de contorno, el cuerpo está inmerso en un volumen prismático dos veces mayor que sus dimensiones máximas, en el cual el fluido entra por el lado de la proa del casco a una velocidad de 10m/s y sale por el lado opuesto sin que haya ningún tipo de succión.

Para la resolución del modelo, se ha considerado un mallado del cuerpo en malla 2D de tamaño de elemento de  $35\text{mm}^{21}$ , mientras que para el fluido se ha empleado una malla 3D de tamaño de elemento igual a  $50\text{mm}$ . El modelo de turbulencia empleado es el modelo de longitud de mezcla.

A continuación se muestran diversas imágenes que muestran un ejemplo visual de lo mencionado en los párrafos anteriores.



**Ilustración 120. Mallado tipo del cuerpo para barrido de longitud**



**Ilustración 121. Mallado tipo del volumen del fluido para barrido de longitud**

---

<sup>21</sup> Idem que estudio anterior

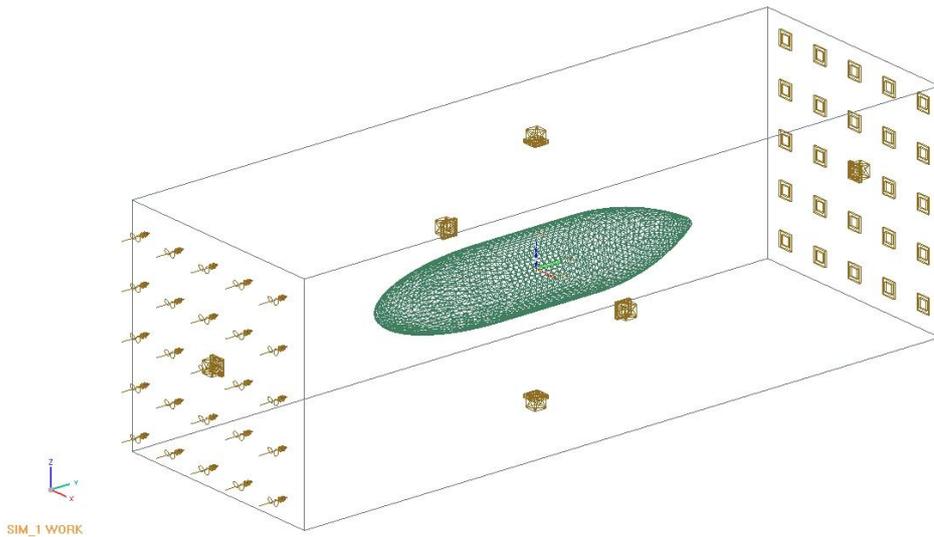


Ilustración 122. Representación de las condiciones de contorno para barrido de longitud

Los resultados referentes al punto de aplicación de la fuerza de arrastre, de sus componentes y la contribución a esta de la presión y de la fricción, se presentan a continuación.

L	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
%	N	N	N	N
0	1662	17,27	-164	1671
10	1660	80,4	216,5	1678
20	1730	144	145,7	1741
30	2112	344,8	-39,32	2140
40	2320	156	172	2331
50	2680	218	99,28	2689
60	3080	247	-3,879	3086
70	4090	13,3	182,2	4097

Ilustración 123. Magnitud y componentes de la fuerza de arrastre en el barrido de longitud

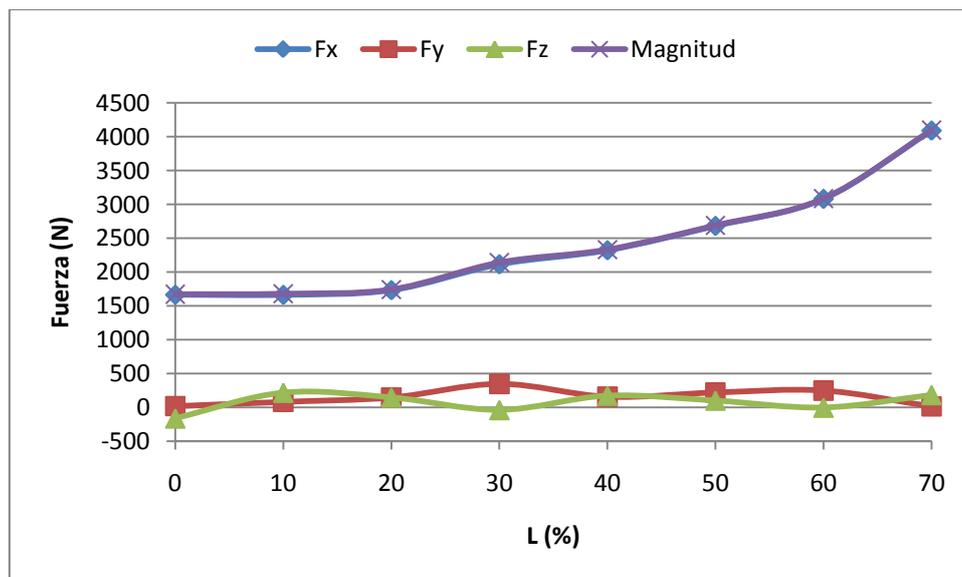


Ilustración 124. Evolución de fuerza de arrastre en barrido de longitud

De los datos presentados en la tabla anterior y representados en la gráfica que sigue, se puede comprobar como la fuerza de arrastre total aumenta a medida que se aumenta la longitud del tramo recto central. De las tres componentes que componen la fuerza, la que asume un mayor protagonismo es X, ya que es prácticamente igual al valor de la magnitud. Las componentes en Z e Y permanecen prácticamente constantes a lo largo del barrido, poseyendo poca importancia en el modulo de la fuerza.

L	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
%	N	N	N	N
0	329,8	-0,1544	-0,04886	329,8
10	328,6	0,0676	-0,00005119	328,6
20	317,5	-0,6389	-0,2723	317,5
30	339,8	0,06199	-0,1808	339,8
40	347,9	-0,06293	0,1368	347,9
50	362,4	-0,2048	0,03478	362,4
60	357,9	-0,001877	0,03573	357,9
70	365,7	0,1838	-0,0862	365,7

Ilustración 125. Valores de la fricción de arrastre en el barrido de longitud

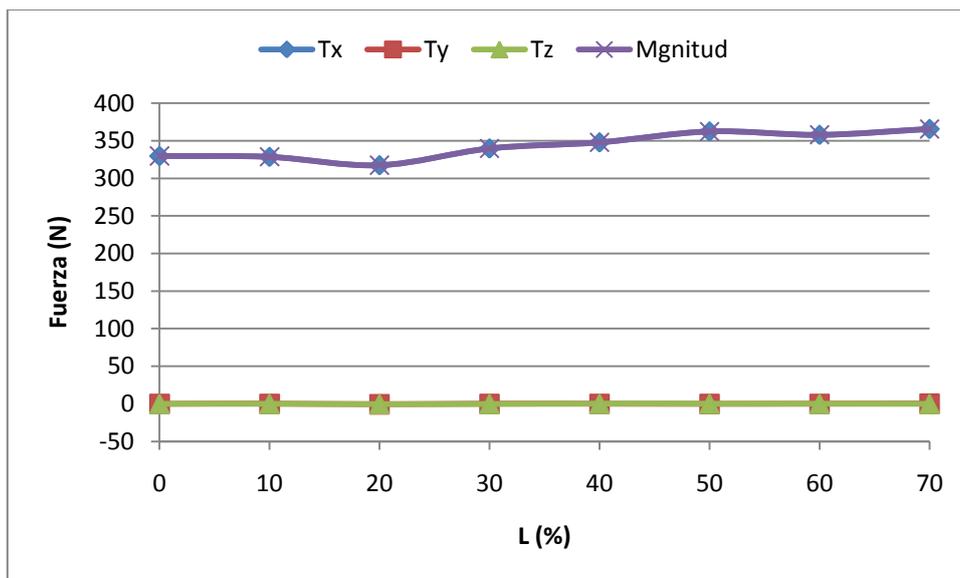


Ilustración 126. Evolución de la fricción de arrastre en el barrido de longitud

El arrastre debido a la fricción aumenta ligeramente a medida que se incrementa el tramo recto. No obstante, dicho aumento es de escasa importancia, por lo que no sería descabellado considerarlo constante a efectos prácticos. Se reproduce tendencias observadas anteriormente. La mayor parte del cortante se produce en la dirección de las X, siendo el que se produce en Z e Y testimonial. Todo ello se puede observar en la tabla y la gráfica anteriores.

L	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
%	MPa	MPa	MPa	MPa
0	1333	17,42	-163,9	1343
10	1333	80,38	216,8	1353
20	1412	144,4	146	1427
30	1658	162,9	126,9	1671
40	1971	155,7	171,8	1985
50	2316	218	99,25	2329
60	2719	247,5	-3,914	2730
70	3727	13,14	182,2	3727

Ilustración 127. Valores de la presión de arrastre en el barrido de longitud

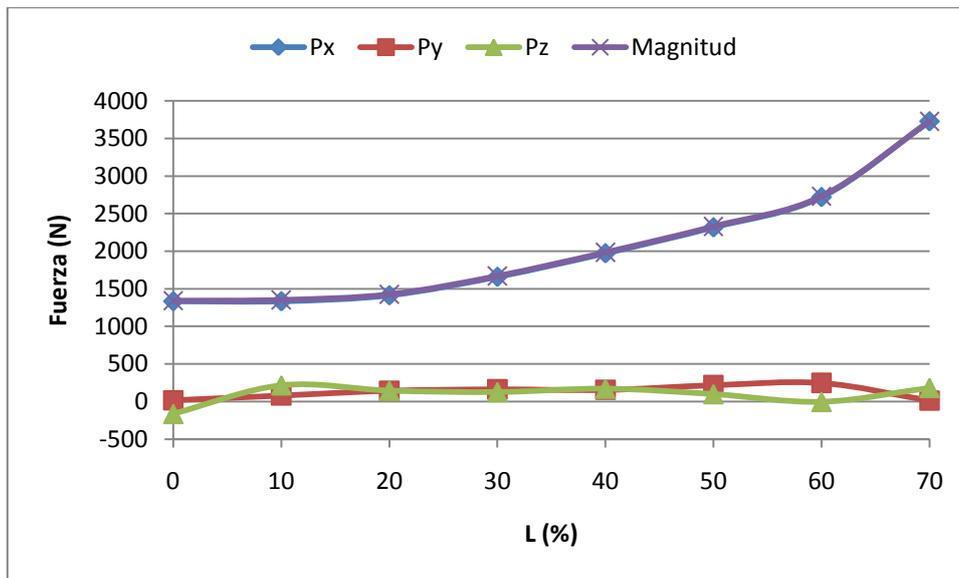


Ilustración 128. Evolución de la fricción de arrastre en el barrido de longitud

Respecto a la presión de arrastre se podría aplicar mismo análisis que se ha realizado en el arrastre total. Se produce un aumento de de la magnitud a medida que aumenta la longitud del tramo recto, siendo las componentes Z e Y elementos secundarios ya que la mayor contribución a la magnitud total se realiza en el eje X.

En cuanto a la contribución de la presión y la fricción en el arrastre total, se observa que la aportación del segundo es muy escasa, presentando el arrastre total y el arrastre de presión una evolución calcada a lo largo de los ensayos. Ello se puede comprobar en la grafica presentada a continuación.

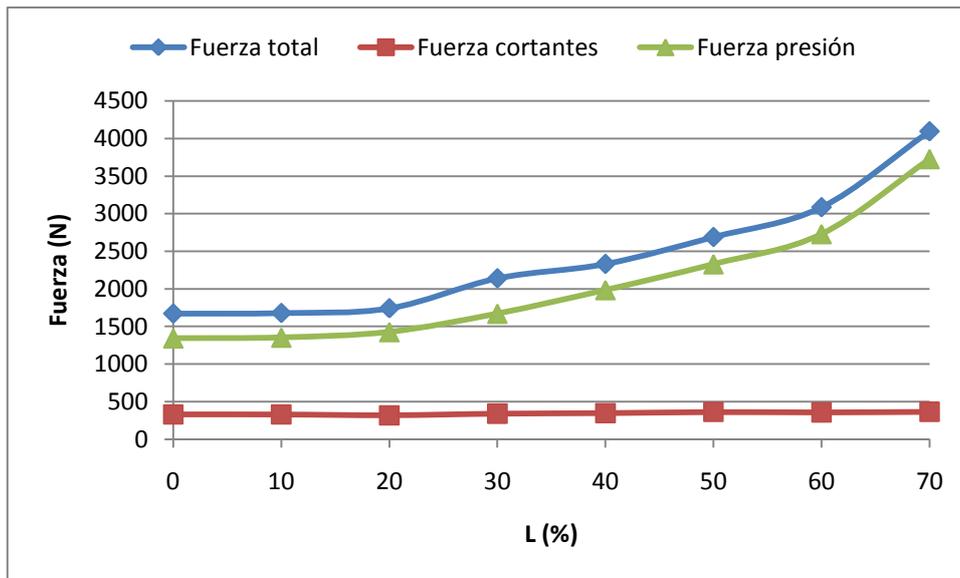


Ilustración 129. Comparación de la fuerza de arrastre total, la presión y la fricción de arrastre en el barrido de longitud

L	X	Y	Z
%	N	N	N
0	-63,5	-42,72	-18,98
10	-59,74	-5,307	20,33
20	-46,51	-34,49	-27,81
30	-39	-7,621	-21,84
40	-34,14	-7,661	-17,09
50	-24,24	7,312	-27,47
60	-15,82	10,44	-11,04
70	-9,018	-6,309	2,202

Ilustración 130. Puntos de aplicación de la fuerza en el barrido de longitud

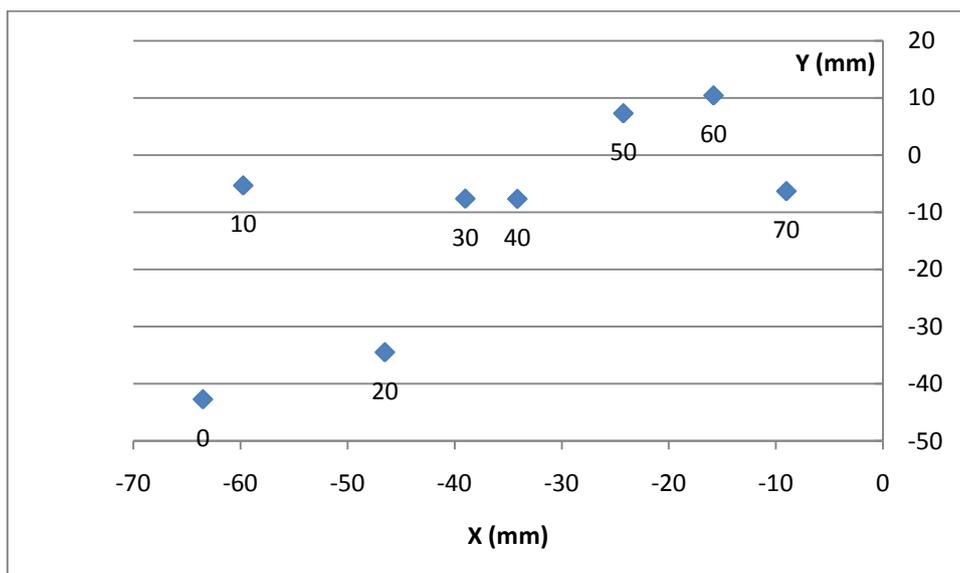


Ilustración 131. Aplicación de la fuerza en plano XY

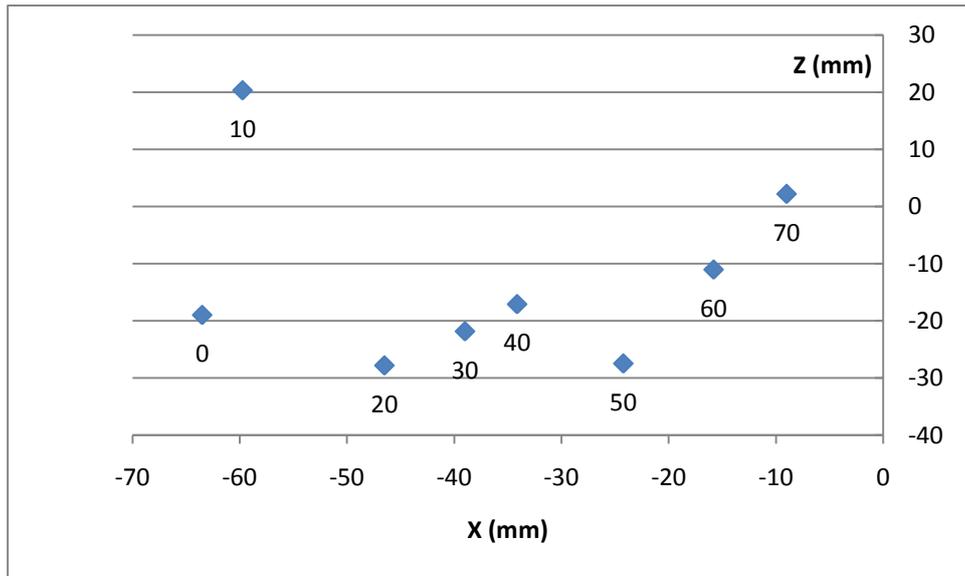


Ilustración 132. Aplicación de la fuerza en plano XZ

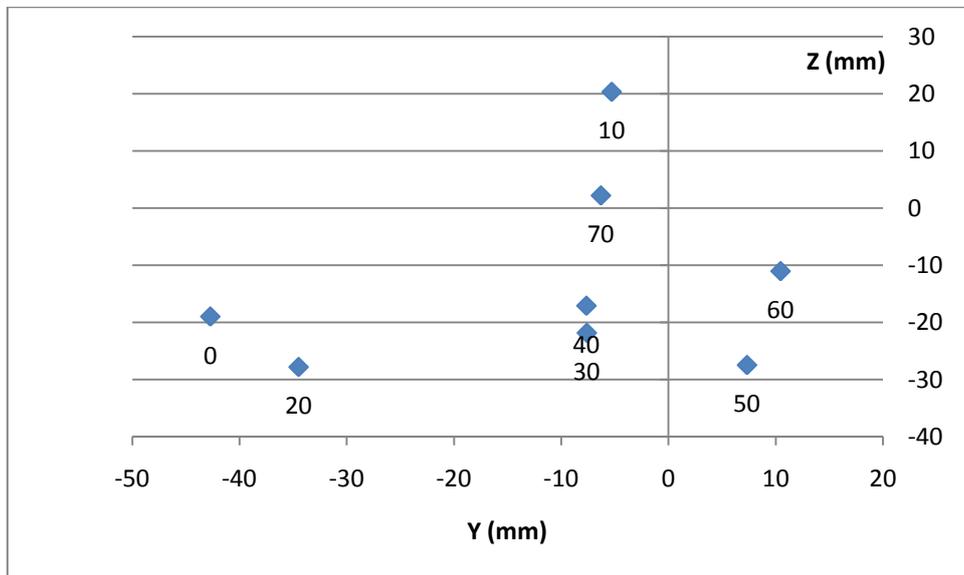


Ilustración 133. . Aplicación de la fuerza en plano ZY

En lo que respecta al punto de aplicación de la fuerza, se reproducen las tendencias observadas en el barrido L/D. Dicho punto se desplaza hacia la proa del casco, mientras que las coordenadas en Z e Y, presentan un comportamiento un tanto anárquico siempre alrededor del origen de coordenadas..

A continuación se pasará a analizar los esfuerzos máximo obtenidos en este ensayo.

L %	Presión superficie max	Esfuerzos tangenciales max
	MPa	MPa
0	4,60E-02	2,35E-04
10	4,97E-02	2,00E-04
20	4,82E-02	1,92E-04
30	4,83E-02	1,95E-04
40	5,36E-02	1,86E-04
50	5,27E-02	1,99E-04
60	5,60E-02	2,14E-04
70	5,93E-02	1,99E-04

Ilustración 134. Valores de esfuerzos máximos en barrido de longitud

Según los datos presentados, la presión máxima en la superficie aumenta progresivamente a medida que aumenta la longitud del tramo recto. En cambio, los esfuerzos tangenciales máximos parecen tener un comportamiento un tanto errático, en el que parece adivinarse una ligera tendencia descendente.

Al igual que en el análisis anterior, los esfuerzos tangenciales presentan un valor del orden de 100 veces inferior al de la presión en la superficie.

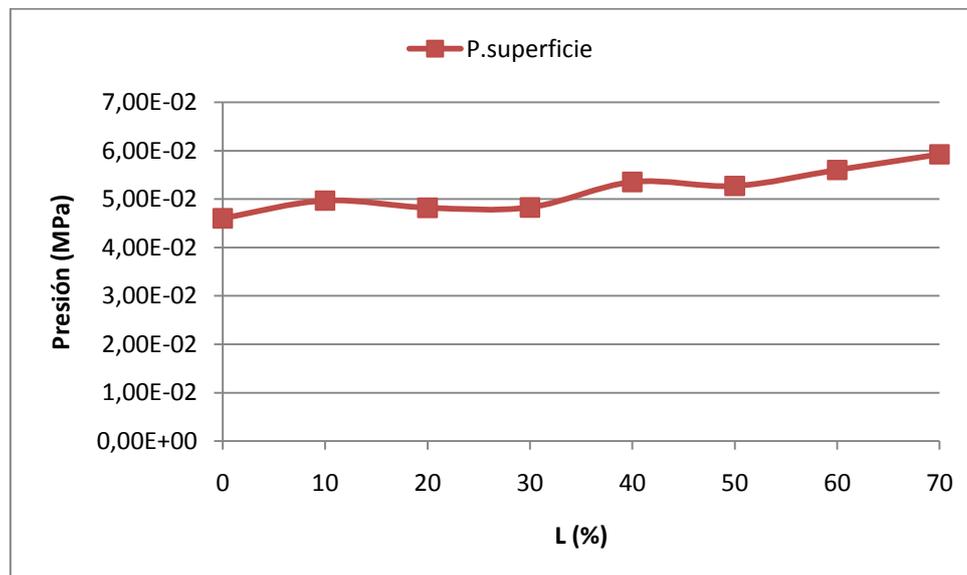
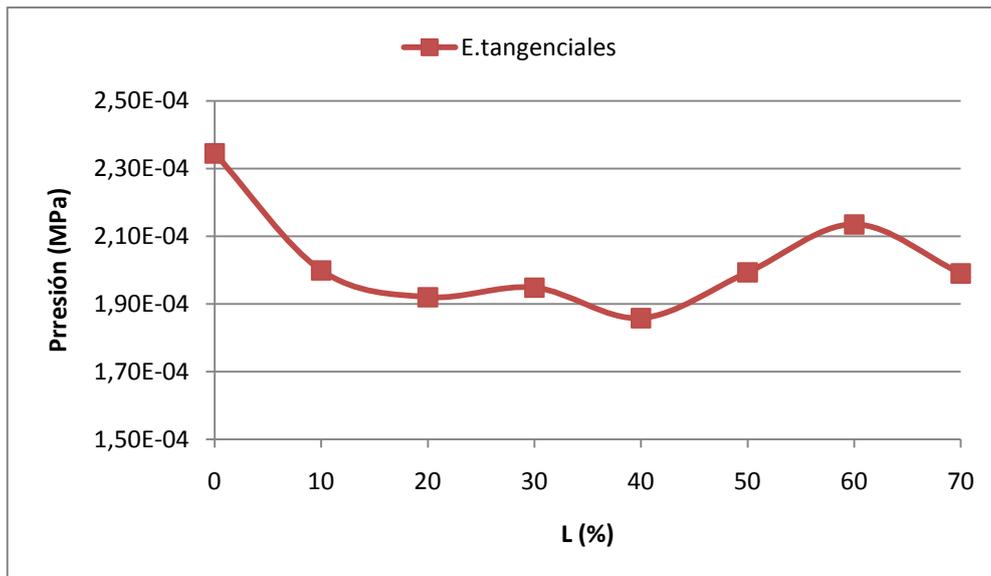


Ilustración 135. Evolución de la presión en la superficie máxima en barrido de longitud

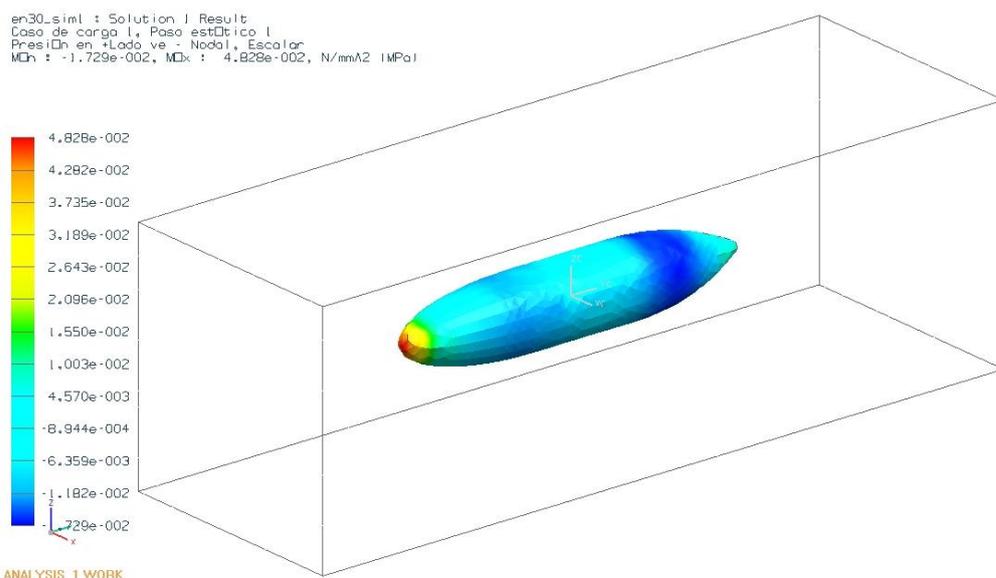


**Ilustración 136. Evolución de los esfuerzos tangenciales máximos en barrido de longitud**

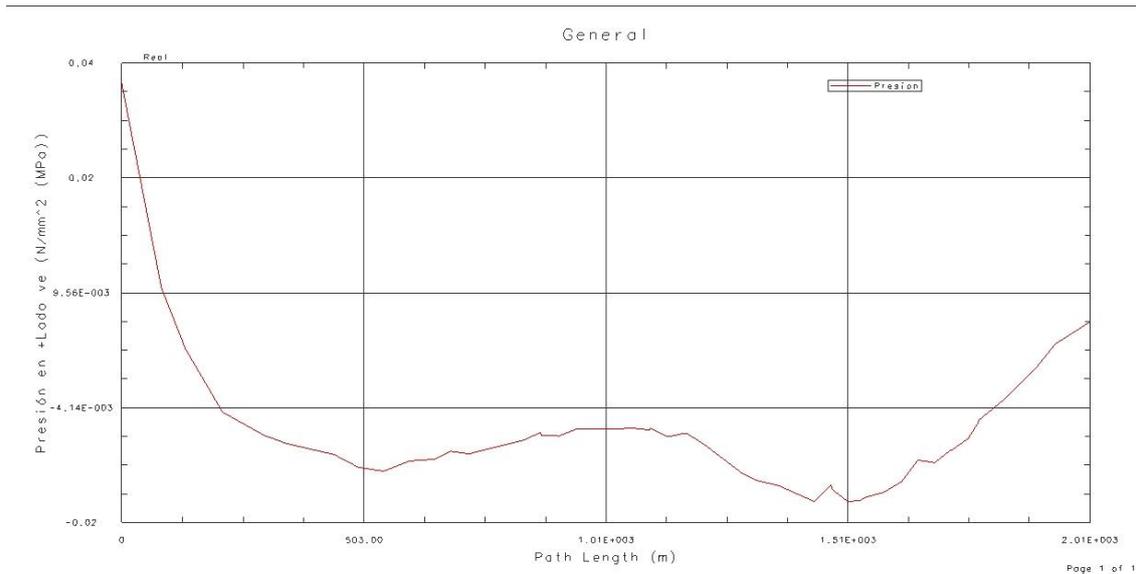
En cuanto a la distribución de las presiones a lo largo del cuerpo, se puede aplicar un análisis similar al que se ha mencionado en el barrido de L/D.

La presión en la superficie presenta un máximo en el vértice de la proa, disminuye hasta el diámetro máximo, y vuelve a aumentar hasta el cono de popa. No obstante, dentro del tramo recto se producen los valores mínimos en la región inmediatamente anterior al inicio de la curvatura de la popa, no en el centro como se podría esperar.

Los esfuerzos tangenciales tienen mínimos en proa y popa del casco, y el máximo en el punto de diámetro máximo situado antes del cono de popa. De nuevo, presenta el comportamiento opuesto al de la presión en la superficie.

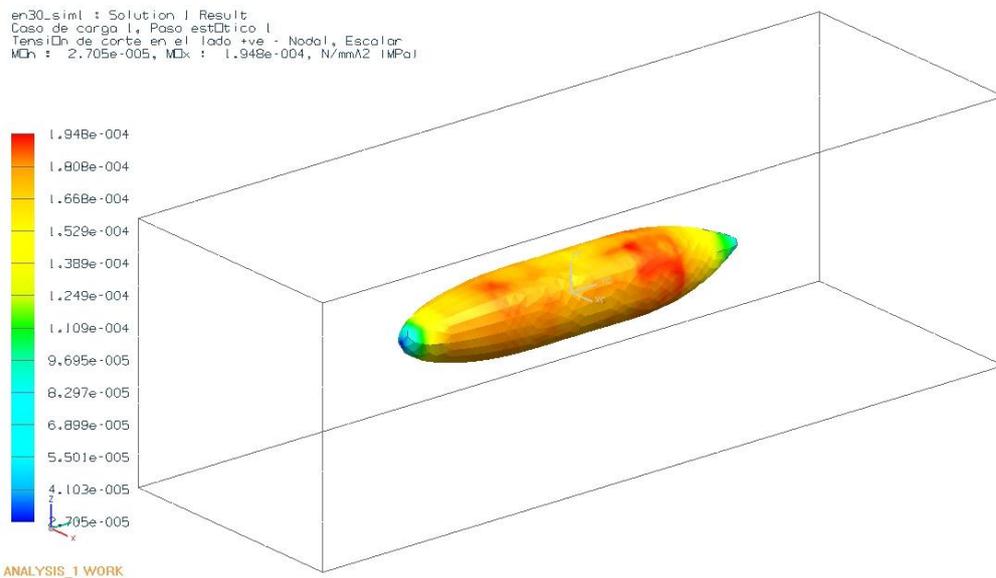


**Ilustración 137. Distribución de la presión en superficie en un cuerpo de 40% de tramo recto**

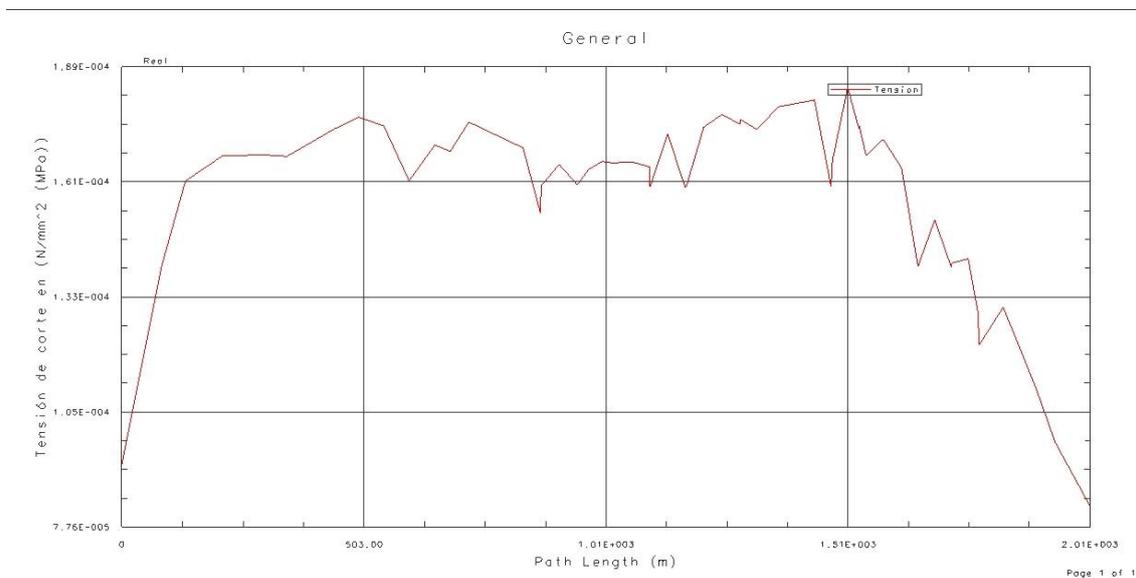


**Ilustración 138. Distribución de la presión en superficie en un cuerpo de 40% de tramo recto**

en30\_sim1 : Solution 1 Result  
 Caso de carga 1, Poso estático 1  
 Tensión de corte en el lado +ve - Nodal, Escalar  
 Min : 2.705e-005, Max : 1.948e-004, N/mm<sup>2</sup> (MPa)



**Ilustración 139. Distribución de los tangenciales en un cuerpo de 40% de tramo recto**



**Ilustración 140. Distribución de los tangenciales en un cuerpo de 40% de tramo recto**

### 8.3. Análisis del efecto de la velocidad

En estos ensayos se analizará el efecto que tiene la variación de la velocidad en la fuerza de arrastre. Para ello se analizará tres cascos de submarino que presentan un volumen fijo de  $0.25\text{m}^3$  y una relación L/D de 3, 6 y 10 respectivamente. Se considerara un espectro de velocidades entre los 10 y los 50 m/s, considerando intervalos de 10m/s.

El submarino se introducirá en un prisma de fluido el doble de las dimensiones máximas del casco, en el que éste entrara por el lado de proa y saldrá sin succión por el lado de popa. La velocidad del fluido es uno de los parámetros del ensayo.

En cuanto a las condiciones de resolución numérica, el cuerpo estará mallado con una malla 2D de  $35\text{mm}^{22}$ , mientras que el volumen del fluido poseerá un tamaño de elemento tridimensional de 50mm. El modelo de turbulencia será el de longitud de mezcla.

No se muestran imágenes referentes a la disposición de la malla y las condiciones de contorno ya que son idénticas a lo descrito en el punto 6.1.

Los resultados correspondientes a la fuerza de arrastre son los que se presentan a continuación.

Velocidad	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
m/s	N	N	N	N
<b>L/D=3</b>				
10	4274	370	-289,8	4300
20	16760	1476	-1158	16860
30	37310	3316	-2603	37550
40	65870	5893	-4628	66290
50	102400	9202	-7231	103100
<b>L/D=6</b>				
10	2112	344,8	-39,32	2140
20	8039	1396	-157,7	8161
30	17620	3157	-353,7	17910
40	30790	5630	-624,6	31310
50	47490	8815	-969,1	48310
<b>L/D=10</b>				
10	1636	45,06	-29,69	1637
20	6082	146,6	-131	6085
30	13150	289,5	-305,6	13160
40	22760	466,4	-554,5	22770
50	34860	672,5	-878,5	34880

Ilustración 141. Valores de la fuerza de arrastre en el barrido de velocidades.

<sup>22</sup> Idem ensayos anteriores

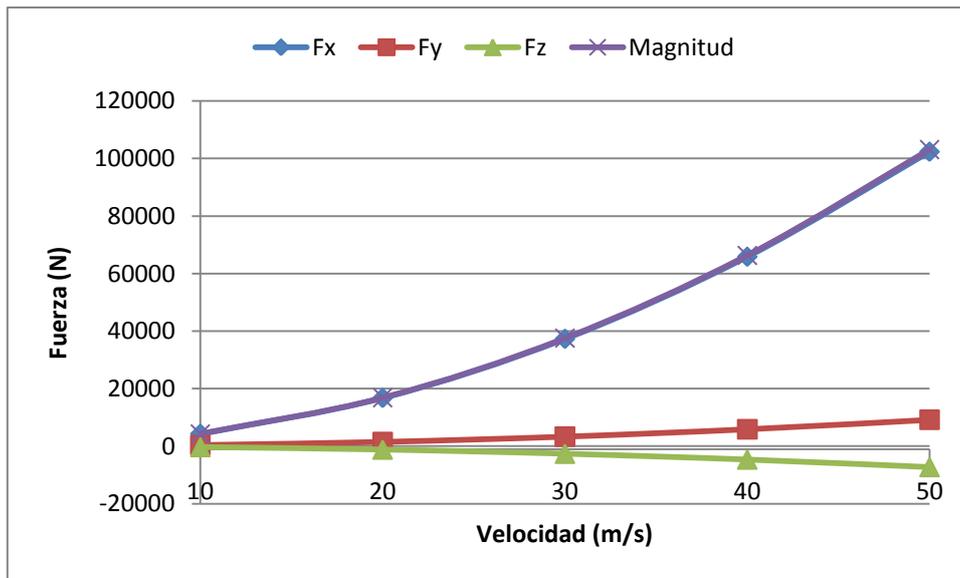


Ilustración 142 Evolución de la fuerza de arrastre para L/D=3.

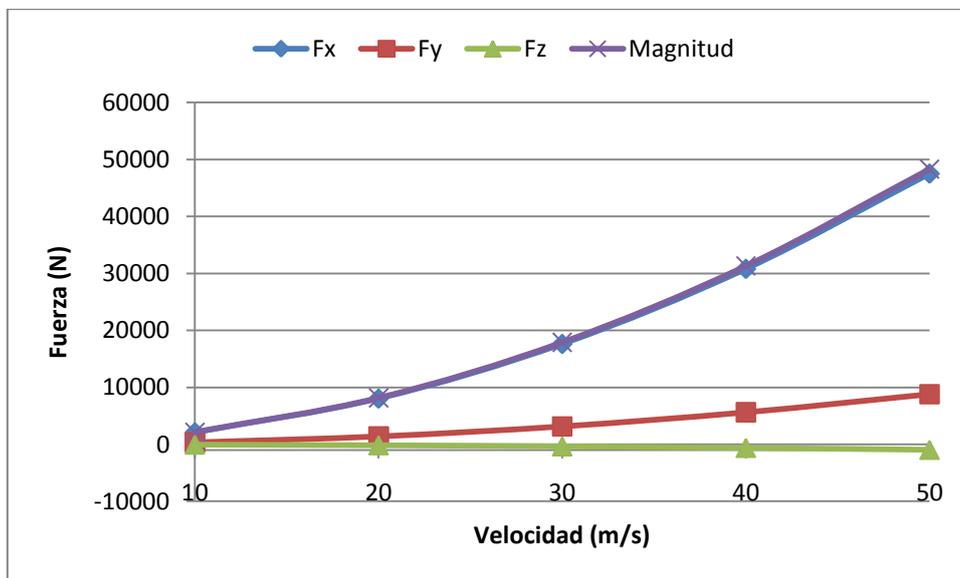


Ilustración 143. Evolución de la fuerza de arrastre con la velocidad para L/D=6

En las gráficas anteriores y la posterior se puede observar como la fuerza de arrastre total aumenta muy rápidamente a medida con el aumento de la velocidad del fluido. Las componentes Z e Y van perdiendo su peso en la fuerza total en la misma proporción que esta aumenta, aumentando su diferencia respecto a X. También se produce cierto distanciamiento entre el valor de la componente Z y la de Y, aumentando más rápidamente esta última a medida que se produce el incremento de velocidad. Advertir que a medida que aumenta L/D este efecto se minimizan, pero se magnifica la diferencia de ambas componentes con X.

Si se comparan los tres cascos, la proporción en que aumenta el arrastre será menor a medida que aumente la relación entre la longitud y el diámetro del cuerpo. Ello se puede observar en la figura 145.

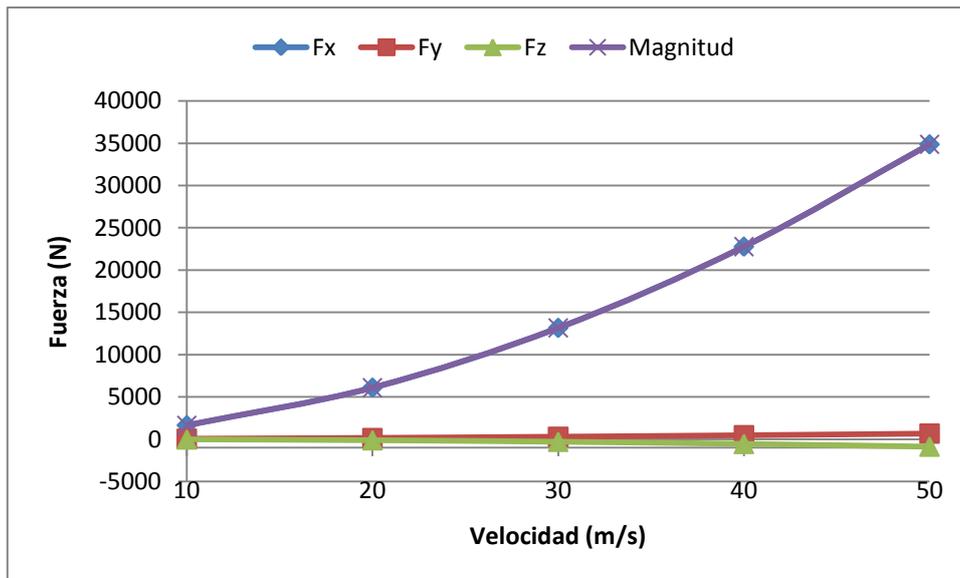


Ilustración 144 Evolución de la fuerza de arrastre con la velocidad para L/D=10

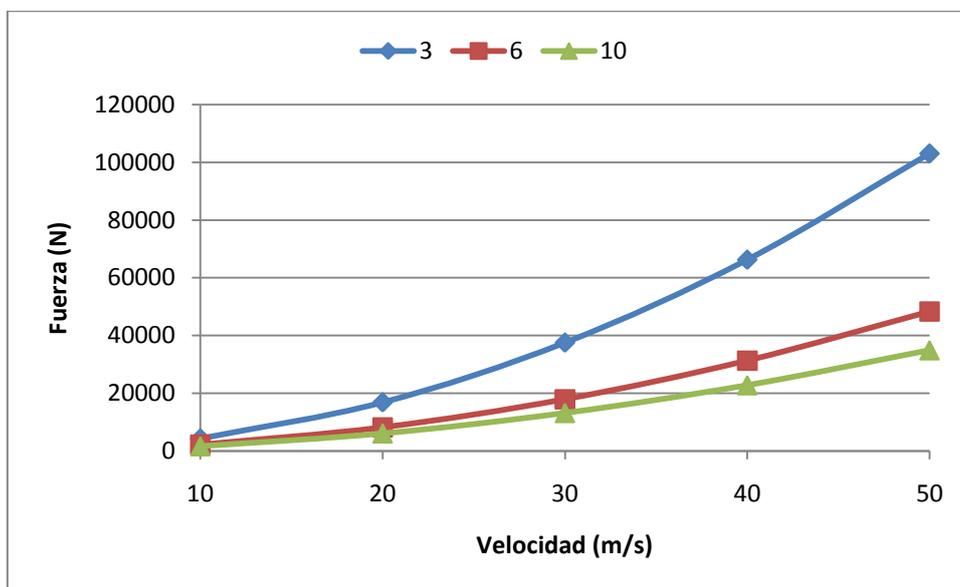


Ilustración 145. Comparación de la evolución de las fuerzas de arrastre con la velocidad.

En lo referente al arrastre producido por fricción, prácticamente solo existe componente en el eje X, siendo los componentes en Z e Y prácticamente inexistentes. La magnitud de dicha fuerza, al igual que la fuerza total, también aumenta rápidamente a medida que se incrementa la velocidad del fluido.

Comparando los tres cuerpos, el aumento con la velocidad será mayor en la que presente una mayor relación entre la longitud y el diámetro del casco.

Las tablas y las gráficas que muestran estos datos son presentadas a continuación.

Velocidad	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
m/s	N	N	N	N
<b>L/D=3</b>				
10	436,8	0,009785	0,06946	436,8
20	1556	0,02079	0,2505	1556
30	3280	0,026	0,5362	3280
40	5574	0,02156	0,9224	5574
50	8415	0,00533	1,407	8415
<b>L/D=6</b>				
10	545,1	-0,1965	-0,4351	545,1
20	1941	-0,7041	-1,546	1941
30	4091	-1,491	-3,253	4091
40	6953	-2,542	-5,519	6953
50	10500	-3,847	-8,321	10500
<b>L/D=10</b>				
10	627,9	0,9962	-0,4805	627,9
20	2237	3,548	-1,702	2237
30	4715	7,477	-3,578	4715
40	8014	12,71	-6,067	8014
50	12100	19,18	-9,146	12100

Ilustración 146. Valores del arrastre por fricción para el barrido de velocidad.

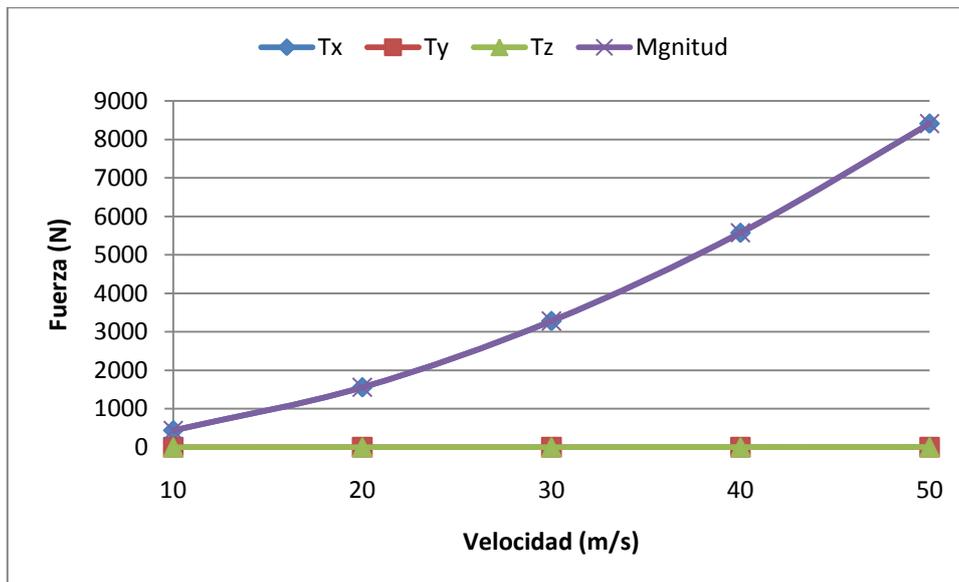


Ilustración 147. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para L/D=3

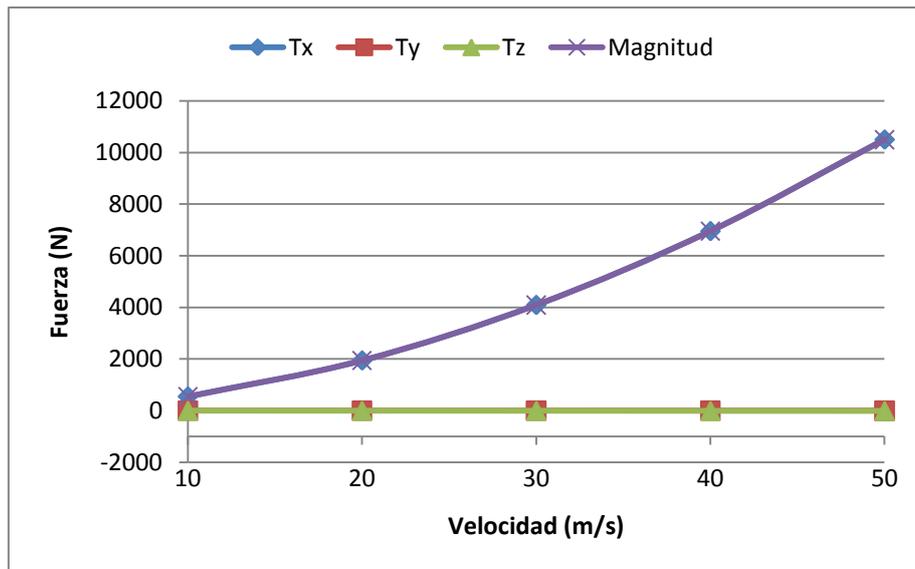


Ilustración 148. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para  $L/D=6$

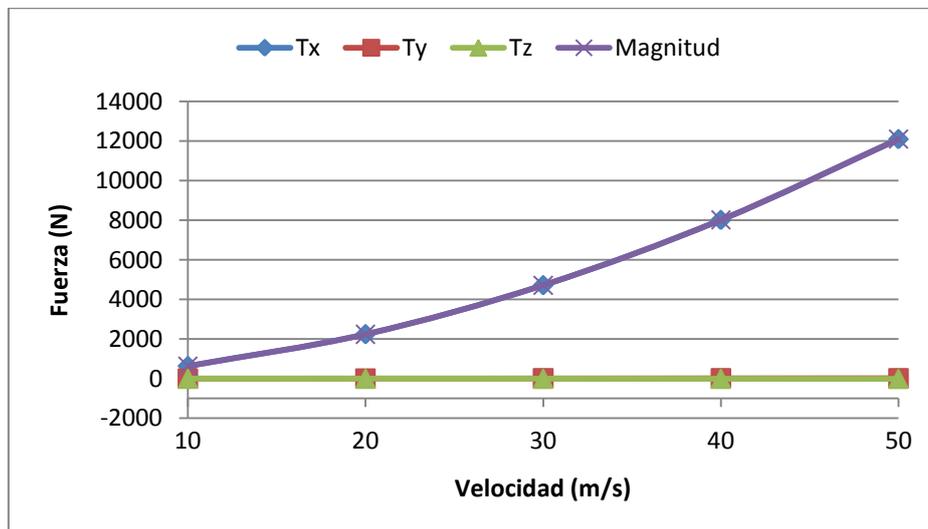


Ilustración 149. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para  $L/D=10$

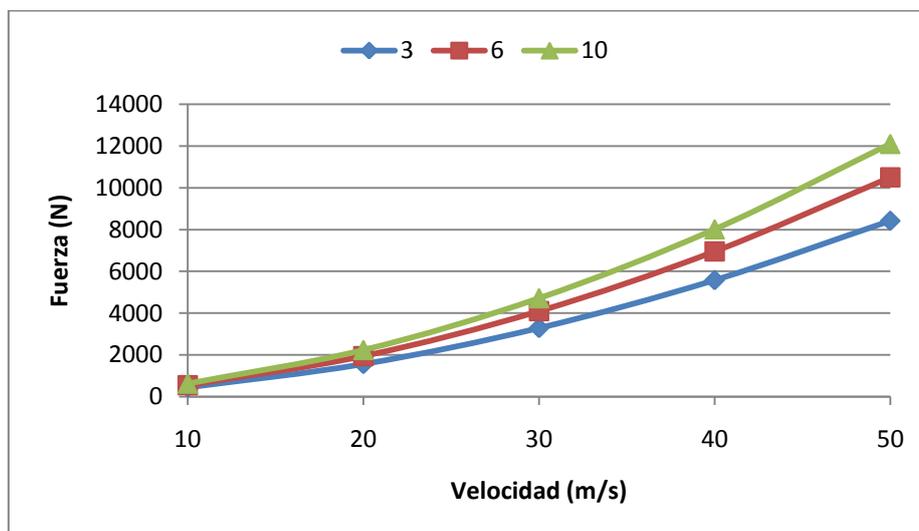


Ilustración 150. Comparación del arrastre por fricción en función de la velocidad.

La fuerza arrastre debido a la presión presenta un comportamiento prácticamente análogo al del arrastre total. A medida que aumenta la velocidad éste aumenta rápidamente mientras las componentes Z e Y pierden peso, acentuándose este efecto a medida que aumenta la relación entre L/D.

Comparativamente, la proporción en que aumenta la fuerza debido a la presión con la velocidad disminuye con el aumento de la relación entre longitud y diámetro.

Velocidad	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
m/s	N	N	N	N
<b>L/D=3</b>				
10	3837	370	-289,8	3866
20	15200	1476	-1158	15320
30	34030	3316	-2603	34290
40	60300	5893	-4626	60760
50	93980	3202	-7233	94710
<b>L/D=6</b>				
10	1567	345	-38,89	1605
20	6098	1397	156,2	6258
30	13530	3159	-350,4	13900
40	23480	5633	-619,1	24510
50	36990	8819	-960,8	38040
<b>L/D=10</b>				
10	1008	44,07	-29,21	1009
20	3845	143	-129,3	3850
30	8436	282	-302,1	8446
40	14750	453,7	-548,4	14770
50	22760	653,3	-869,4	22790

Ilustración 151. Valores del arrastre de la presión en función de la velocidad

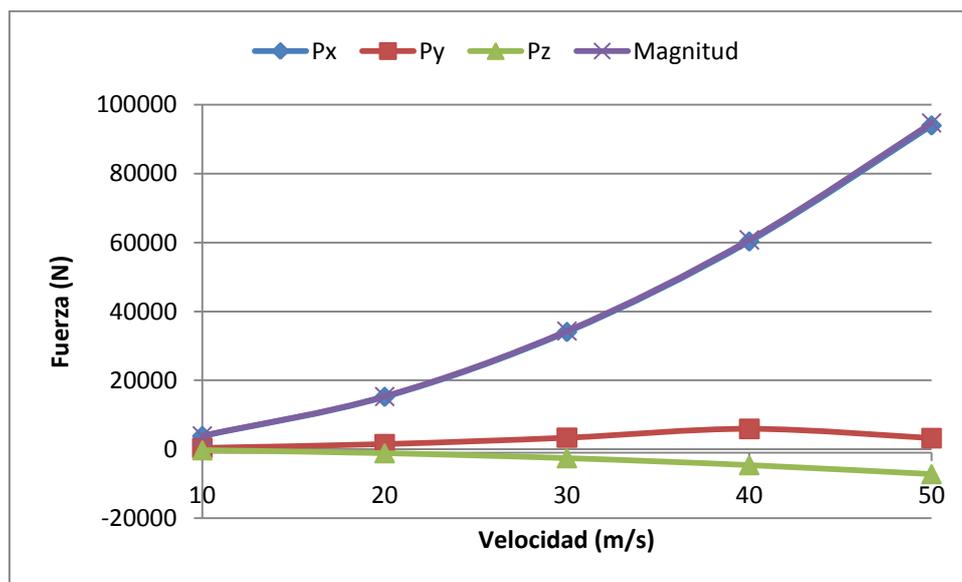


Ilustración 152. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=3

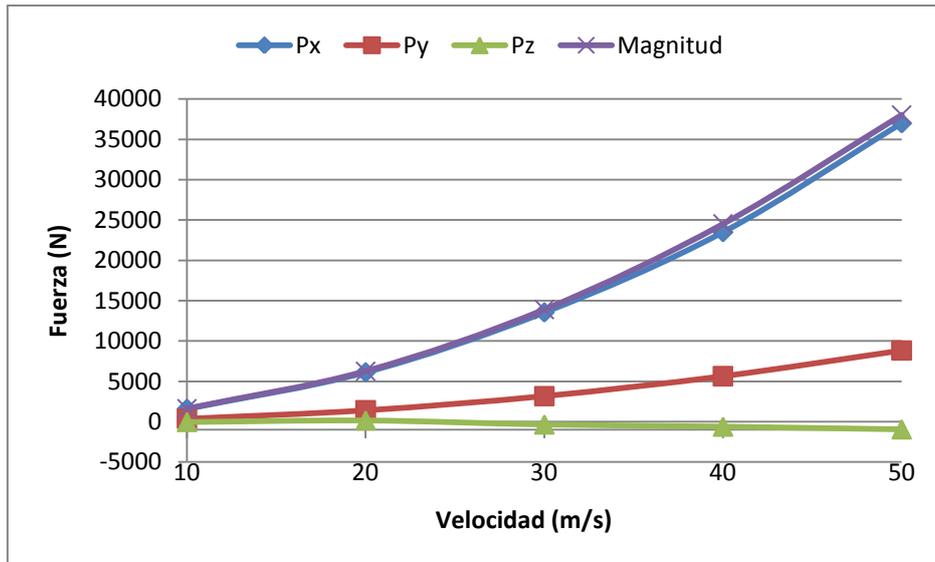


Ilustración 153. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=6

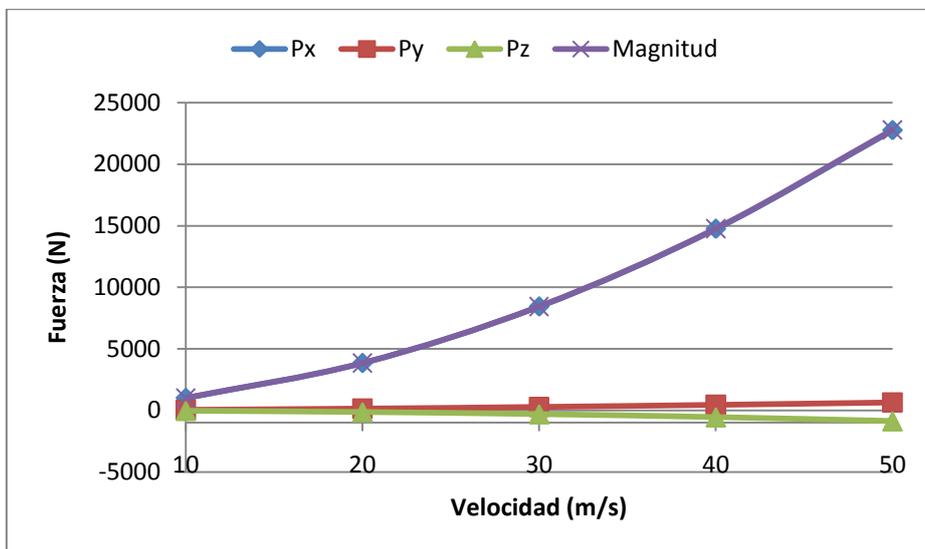


Ilustración 154. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=10

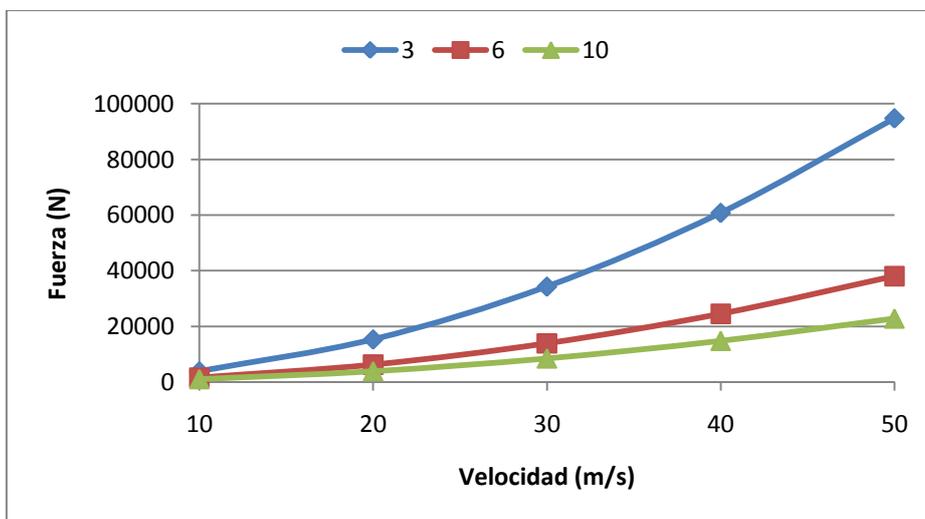


Ilustración 155. Comparación del arrastre por presión con la velocidad

Otro aspecto a destacar es el la proporción en la que aporta a la fuerza de arrastre total la fricción y la presión. A medida que aumenta la velocidad el efecto de la presión aumenta más rápidamente que el de los cortantes, pero esta tendencia tiende a disminuir cuanto mayor es la longitud del casco respecto al diámetro.

Esto se puede observar en las tres gráficas que se presentan a continuación.

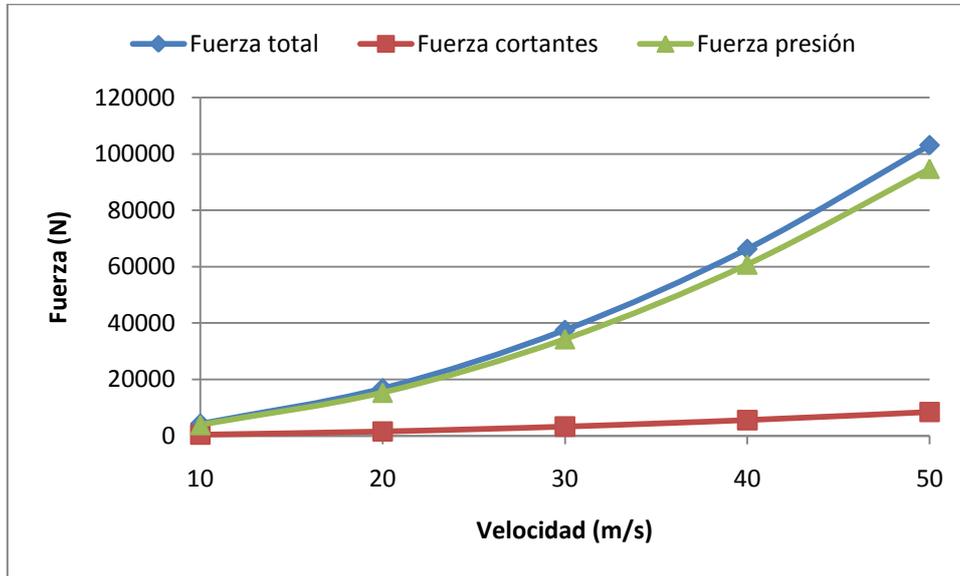


Ilustración 156. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=3

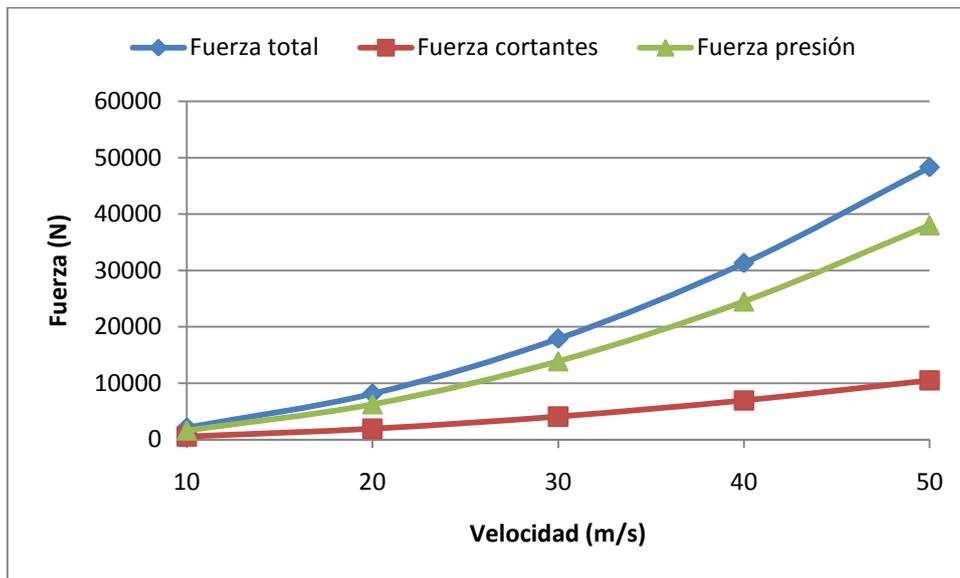


Ilustración 157. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=6

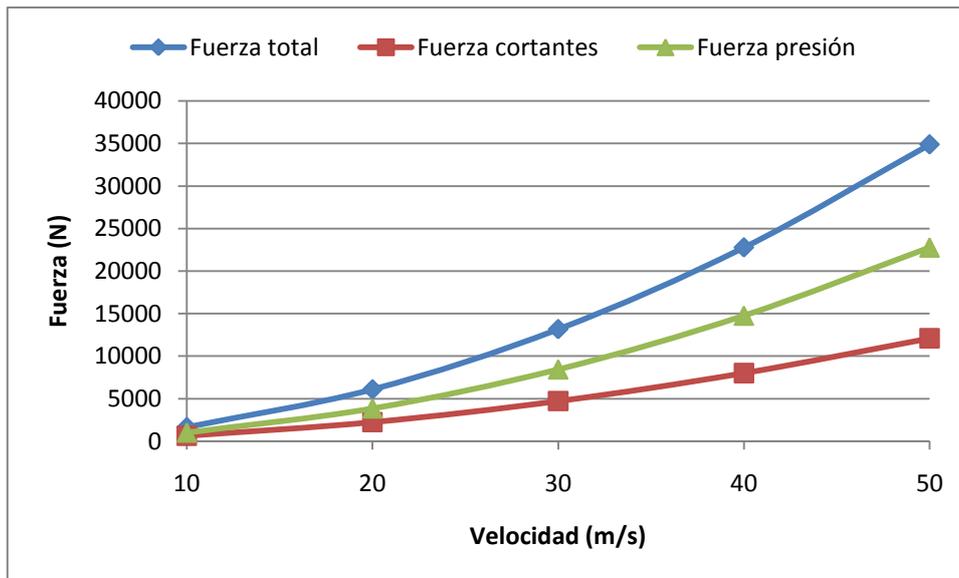


Ilustración 158. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=10

Velocidad	X	Y	Z
m/s	mm	mm	mm
<b>L/D=3</b>			
10	-47,96	6,327	10,97
20	-47,95	6,369	11,13
30	-47,94	6,392	11,21
40	-47,93	6,408	11,27
50	-47,98	6,419	11,33
<b>L/D=6</b>			
10	-77,18	-21,14	69,01
20	-76,4	-23,57	71,9
30	-76	-24,73	73,42
40	-75,72	-25,5	74,45
50	-75,53	-26,01	75,2
<b>L/D=10</b>			
10	-126,3	40,32	75,94
20	-126,2	54,39	76,79
30	-126,2	62,51	77,11
40	-126,1	68,21	77,32
50	-126	72,63	77,47

Ilustración 159. Punto de aplicación de la fuerza en el barrido de velocidad

En cuanto al punto de aplicación de la fuerza, es virtualmente constante independientemente de la velocidad del ensayo, por lo que no tiene ningún sentido representarlo.

A continuación se presentarán el efecto de la velocidad en las tensiones máximas producidas por el fluido.

Velocidad	Presión superficie max	Esfuerzos tangenciales max
m/s	MPa	MPa
<b>L/D=3</b>		
10	5,62E-02	2,60E-04
20	2,24E-01	9,23E-04
30	5,02E-01	1,94E-03
40	8,91E-01	3,30E-03
50	1,39E+00	4,97E-03
<b>L/D=6</b>		
10	4,44E-02	2,42E-04
20	1,75E-01	8,59E-04
30	3,91E-01	1,81E-03
40	6,93E-01	3,08E-03
50	1,08E+00	4,65E-03
<b>L/D=10</b>		
10	3,57E-02	2,55E-04
20	1,39E-01	9,02E-04
30	3,10E-01	1,90E-03
40	5,46E-01	3,21E-03
50	8,47E-01	4,85E-03

Ilustración 160. Valores de esfuerzos máximos con el barrido de la velocidad

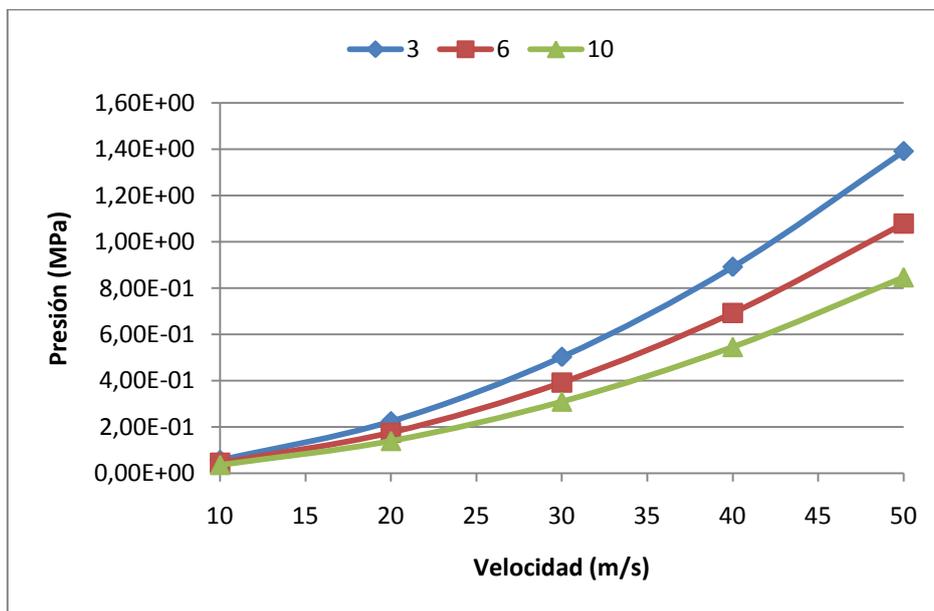


Ilustración 161. Evolución de la presión en la superficie máxima en función de la velocidad.

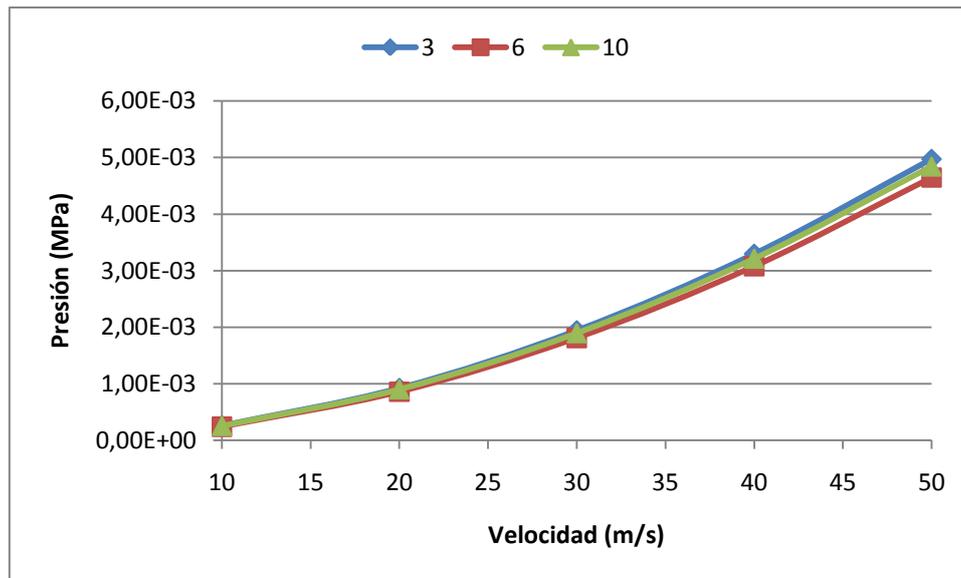


Ilustración 162. Evolución de los esfuerzos tangenciales máximos en función de la velocidad.

En cuanto a los esfuerzos máximos a los que está sometido el cuerpo se puede observar, que aumentan de forma similar a la fuerza de arrastre a medida que aumenta la velocidad.

En lo referente a la presión en la superficie del cuerpo, aumenta más rápidamente cuanto menor es la relación L/D, mientras que los esfuerzos tangenciales evolucionan prácticamente de la misma forma independientemente de la relación longitud/diámetro.

En lo que corresponde a la distribución de los esfuerzos mencionados en el cuerpo, el análisis sería análogo a lo mencionado en el punto 6.1, por lo que no se considera necesario especificarlo en este apartado.

#### 8.4. Análisis de diferentes ángulos de incidencia.

En este apartado se va a analizar la fuerza de arrastre y los esfuerzos que surgen en el casco en función de diferentes ángulos de incidencia del fluido. En este caso se escoge un casco con una relación de L/B igual a 5 y un volumen de  $0.25\text{m}^3$ , al cual se le variará la posición dentro del volumen del fluido respecto a un sistema de referencia alineado y situado en el centro de este último. Se variará un ángulo horizontal  $\beta^{23}$ , entre 0 y  $180^\circ$ , situando un punto cada  $30^\circ$ , y un ángulo vertical  $\alpha^{24}$  entre 0 y  $60^\circ$ , considerándose también un punto cada  $30^\circ$ .

El casco se introducirá en un volumen cúbico de lado igual a dos veces la dimensión máxima del submarino. El fluido entrará siempre por un lado del cubo, saliendo sin succión por el lado opuesto.

<sup>23</sup> Giro respecto al eje Z

<sup>24</sup> Giro respecto al eje Y

En cuanto a los parámetros del cálculo, la superficie del casco se ha mallado con malla 2D de tamaño 35mm, mientras que el volumen del fluido, debido a su tamaño y a razones de cálculo, se ha utilizado elemento 3D de 100mm. El modelo de turbulencia utilizado ha sido el habitual, el modelo de longitud de mezcla.

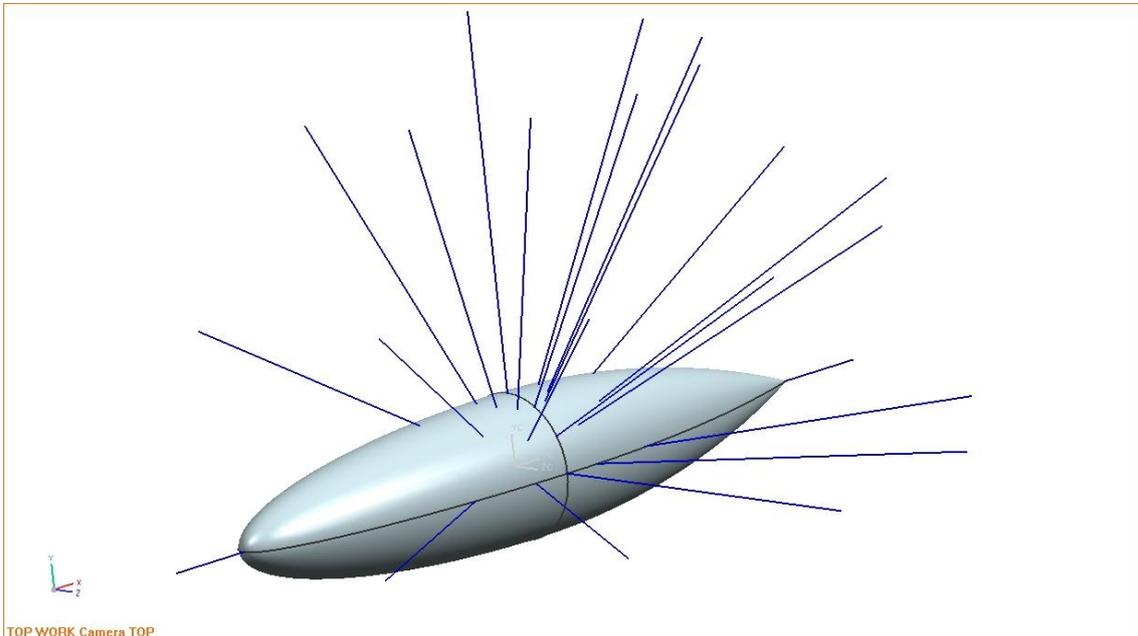


Ilustración 163. Dirección de incidencia del fluido

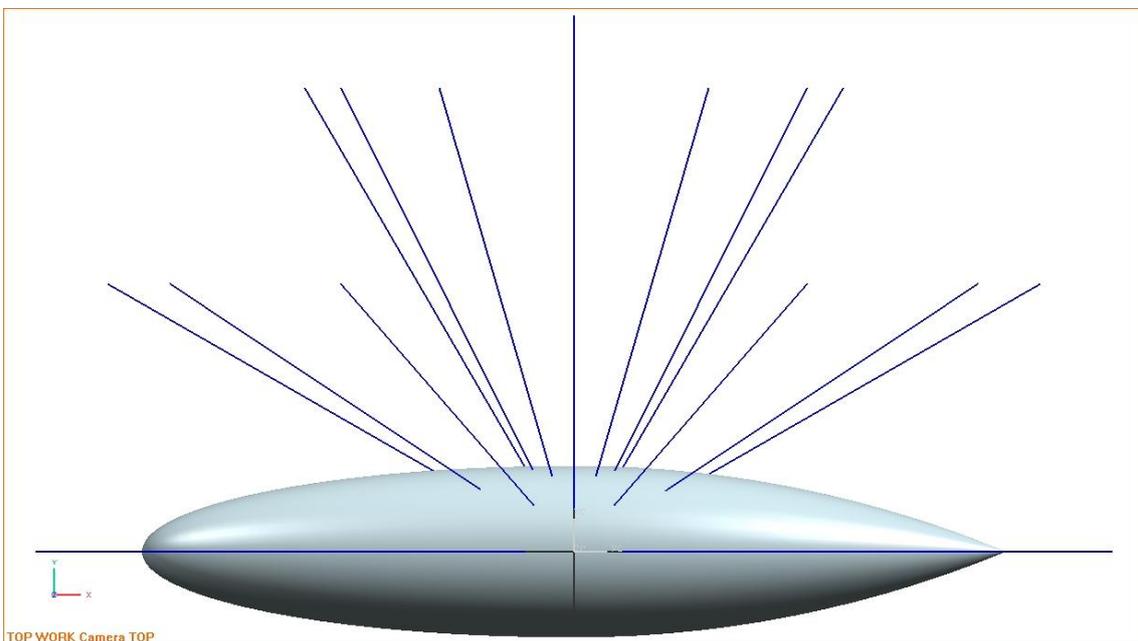


Ilustración 164. Dirección de incidencia del fluido (perfil)

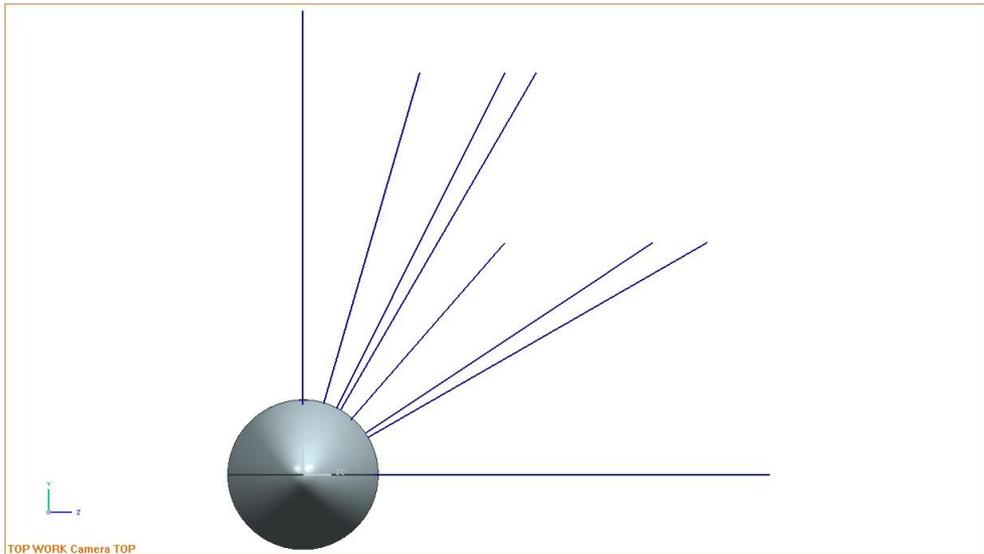


Ilustración 165. Dirección de incidencia del fluido (lizado)

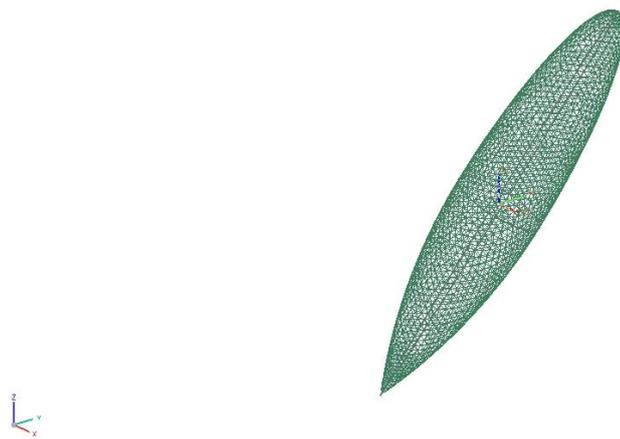


Ilustración 166. Mallado del casco (caso  $\beta=60^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ )

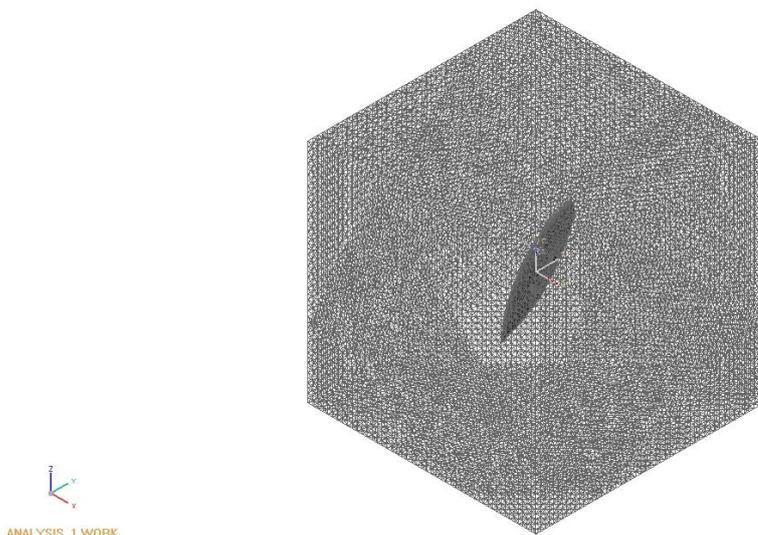


Ilustración 167. Mallado del volumen (caso  $\beta=60^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ )

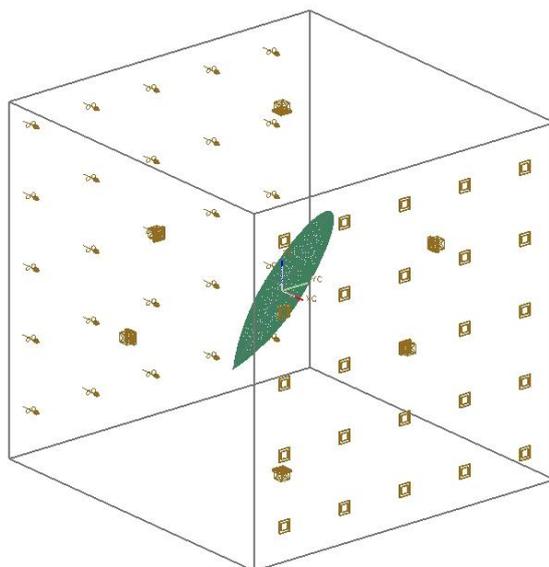


Ilustración 168. Condiciones de contorno (caso  $\beta=60^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ )

Los valores de fuerza de arrastre obtenidos son los siguientes.

Ángulo ( $\beta$ )	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
$\alpha$	N	N	N	N
<b><math>\alpha=0</math></b>				
0	2050	511,8	60,37	2113
30	11710	1575	18200	21700
60	38240	973,4	21480	43870
90	54820	1850	287,7	54850
120	37990	2761	20390	43210
150	12490	669,5	18470	22310
180	2058	117,5	438,7	2107
<b><math>\alpha=30</math></b>				
0	12990	18980	398	23000
30	21650	18070	14680	31790
60	44620	12110	14620	48490
90	56890	1991	520,3	56920
120	47660	11050	16999	51790
150	22355	18570	14420	32440
180	12840	18830	416,1	22800
<b><math>\alpha=60</math></b>				
0	40510	22690	1388	46450
30	45320	21240	3802	50190
60	50600	5756	1866	50960
90	56600	300,7	273,3	56600
120	49170	6629	1687	49640
150	46280	20800	5583	51040
180	41240	23320	4347	47580

Ilustración 169. Valores de fuerza de arrastre para diversos ángulos

En las siguientes gráficas se puede observar la evolución de las componentes de la fuerza de arrastre en función del ángulo de giro. A primera vista se puede apreciar que las componentes son prácticamente simétricas respecto al punto de  $90^\circ$ , sea cual sea el cabeceo (ángulo  $\alpha$ ). No son completamente simétricas debido a la diferencia de la forma entre la proa y la popa del casco.

La componente X presenta una forma parabólica con máximo para  $\beta=90^\circ$  y mínimos en  $0$  y  $180^\circ$ . Es la componente que más peso tiene en la magnitud total. A medida que aumenta el ángulo  $\alpha$  dicha curva se aplana, disminuyendo las diferencias entre los valores extremos y el máximo.

La componente Y presenta una forma simétrica respecto a  $\beta= 90^\circ$ , adoptando una forma que se asemeja a una V, con mínimo en  $90^\circ$  y máximos en los extremos ( $0^\circ$  y  $180^\circ$ ). A medida que aumenta  $\alpha$ , su aportación a la magnitud total va aumentando, presentando un máximo entre  $0$  y  $90^\circ$ , ya que para  $\alpha=60^\circ$ , se advierte que la curva tiende a aplanarse.

En cuanto a la magnitud de la fuerza de arrastre en función del ángulo  $\alpha$ , a medida que este aumenta se aplana la curva, tendiendo a ser horizontal en  $\alpha=90^\circ$  (este último caso no se ha representado, ya que en esta posición se ve la misma superficie del cuerpo desde los dos ángulos considerados, y sería igual al caso de  $\beta=0$  y  $\alpha=90$  intercambiando la Z y la Y).

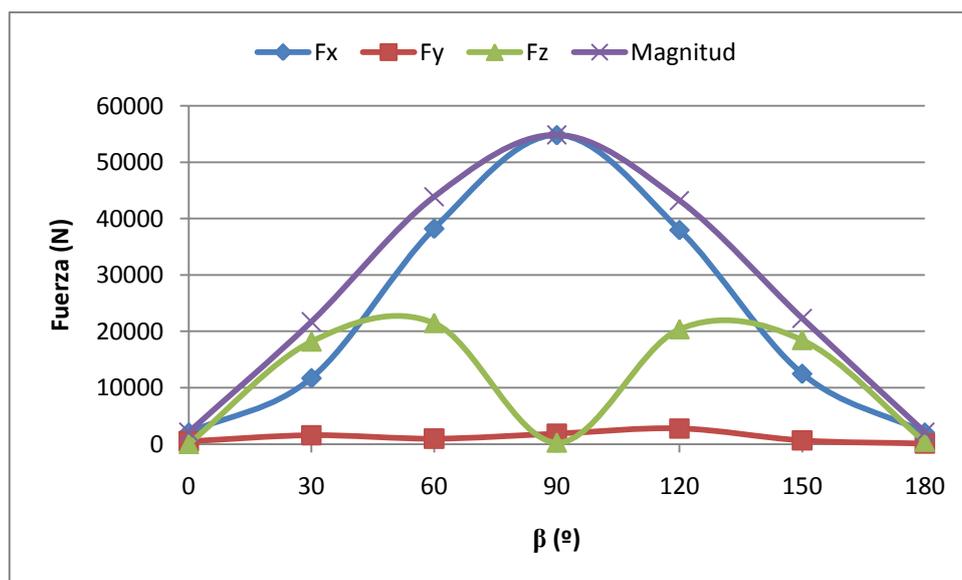


Ilustración 170. Evolución de la fuerza de arrastre para  $\alpha=0^\circ$

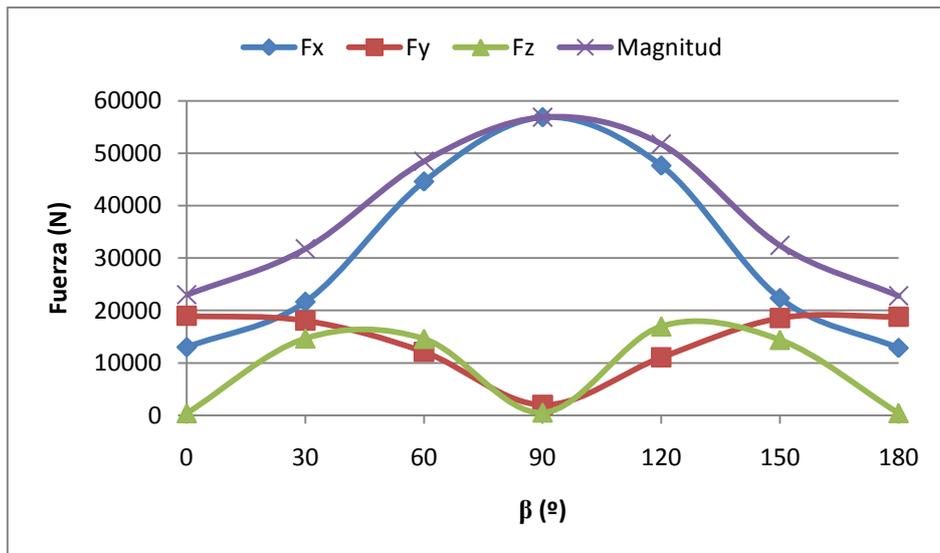


Ilustración 171. Evolución de la fuerza de arrastre para  $\alpha=30^\circ$

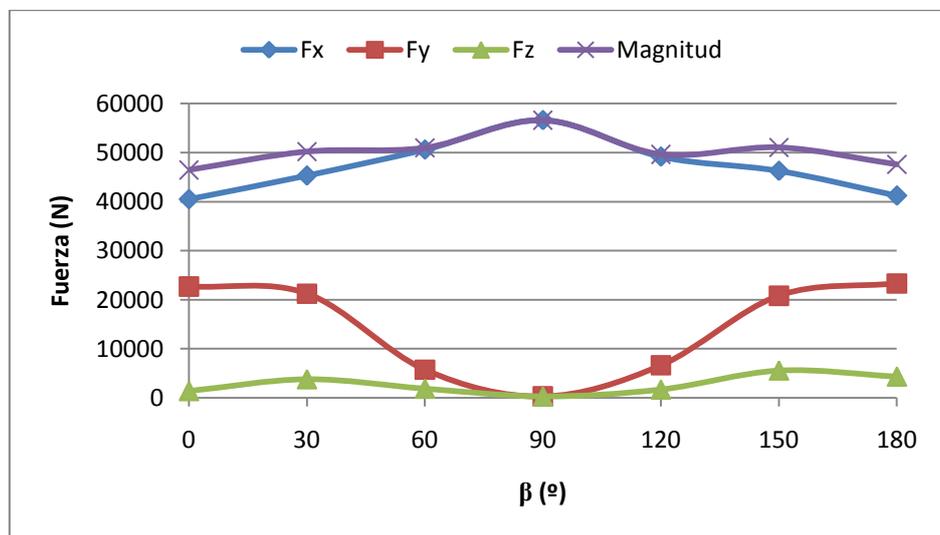


Ilustración 172. Evolución de la fuerza de arrastre para  $\alpha=60^\circ$

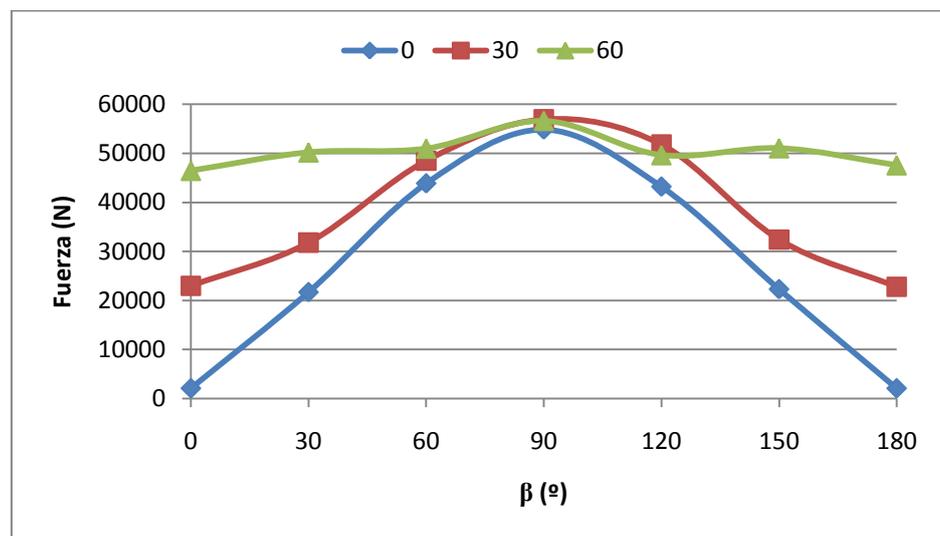


Ilustración 173. Evolución de la fuerza de arrastre para  $\alpha=0, 30$  y  $60^\circ$

En cuanto la magnitud total, se comporta de forma análoga a la componente X.

Ángulo ( $\beta$ )	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
$\alpha$	N	N	N	N
<b><math>\alpha=0</math></b>				
0	323,3	0,2438	0,4306	323,3
30	280	3,934	48,55	284,5
60	195,5	1,519	34,4	198,5
90	173,7	2,532	1,069	173,7
120	195,1	1,394	33,08	197,9
150	279,1	3,98	48,89	283,3
180	324,8	0,2628	0,4262	324,8
<b><math>\alpha=30</math></b>				
0	267,3	47,73	2,831	271,5
30	249,2	40,06	33,42	254,6
60	194,1	16,86	25,16	196,5
90	171,3	3,868	0,9022	171,3
120	187,8	17,74	23,54	189,8
150	246,4	40,95	34,52	252,1
180	267	48,26	2,7	271,3
<b><math>\alpha=60</math></b>				
0	203,1	37,57	1,614	206,5
30	200,1	32,64	9,047	203
60	164,6	8,459	0,8739	164,8
90	181,3	1,318	1,913	181,3
120	166,1	7,984	1,608	166,3
150	199,5	32,27	8,555	202,2
180	200,1	36,72	0,8123	203,4

Ilustración 174. Valores de la fricción de arrastre para diversos ángulos

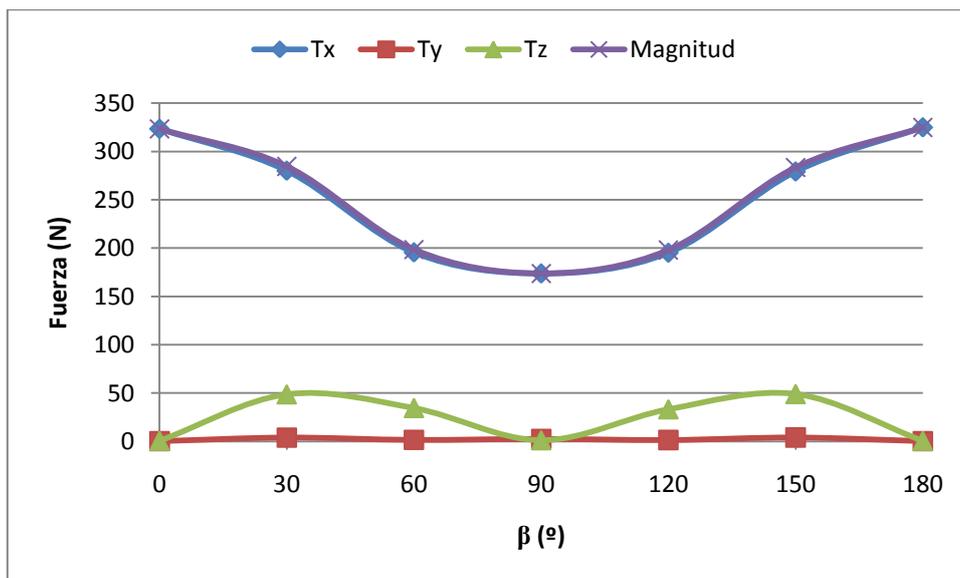


Ilustración 175. Evolución de la fricción de arrastre para  $\alpha=0^\circ$

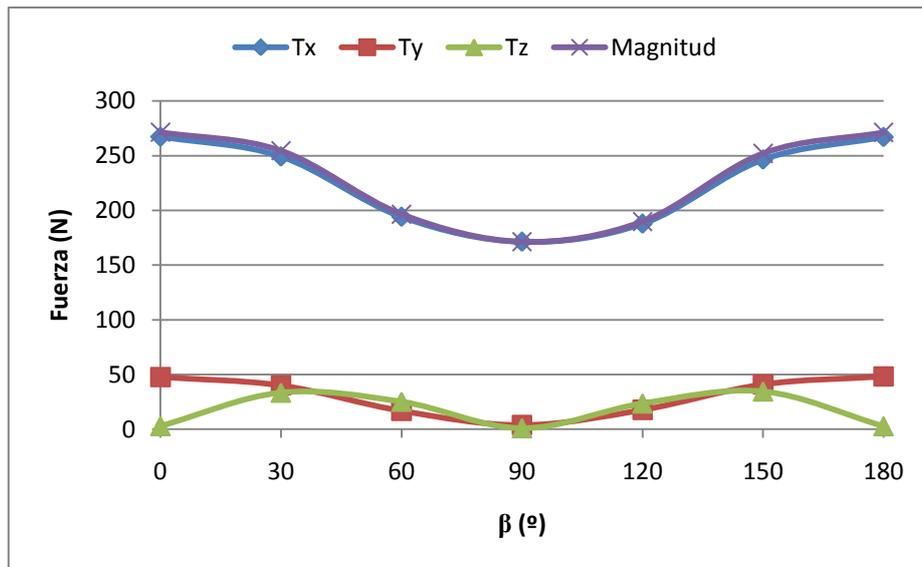


Ilustración 176. . Evolución de la fricción de arrastre para  $\alpha=30^\circ$

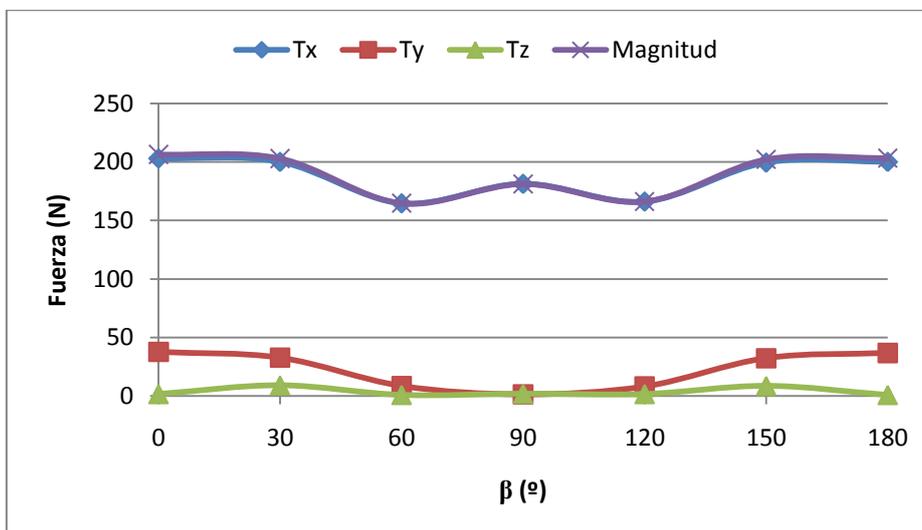


Ilustración 177. . Evolución de la fricción de arrastre para  $\alpha=60^\circ$

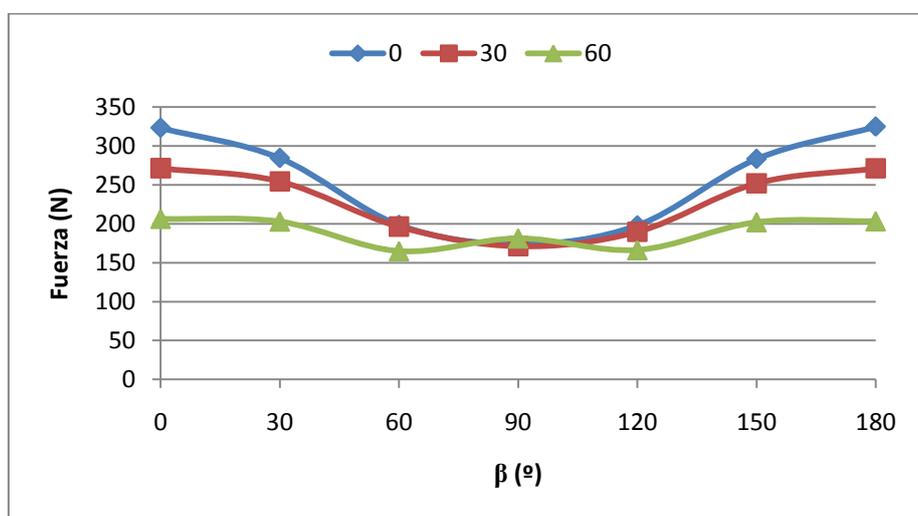


Ilustración 178. Evolución de la fricción de arrastre para  $\alpha=0, 30$  y  $60^\circ$

La fuerza de arrastre debido a la fricción posee principalmente componente en X, presenta forma de V y su mínimo está situado en  $\beta=90^\circ$ <sup>25</sup>. A medida que  $\alpha$  aumenta, la curva tiende a hacerse plana.

Las componentes en Z e Y presentan el mismo comportamiento que las mismas componentes de la fuerza de arrastre total. La componente Y presenta forma de V con mínimo en  $\beta=90^\circ$ , aumentando su valor con  $\alpha$  hasta que llega un punto en que invierte la tendencia y se vuelve a hacer plana. La componente en Z presenta máximos en 45 y 135<sup>a</sup>, y mínimos en 0, 90 y 180<sup>o</sup>, comportándose en  $\alpha$  de la misma forma que Y. La aportación de ambas a la magnitud es muy pobre respecto la aportada por X

Ángulo ( $\beta$ )	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
$\alpha$	N	N	N	N
<b><math>\alpha=0</math></b>				
0	172,6	512,1	60,8	1802
30	11430	1579	18250	21590
60	38050	974,9	21520	43720
90	54650	1848	288,7	54680
120	37800	2762	20420	43050
150	12210	673,5	18527	22190
180	1733	117,3	439,2	1792
<b><math>\alpha=30</math></b>				
0	12720	19030	400,9	22890
30	21400	18110	14710	31660
60	44420	11200	14650	48320
90	56710	1990	521,2	56750
120	47470	11070	17010	51630
150	22110	18610	14460	32310
180	12570	18880	413,4	22690
<b><math>\alpha=60</math></b>				
0	40310	22720	1386	46290
30	45120	21280	3811	50030
60	50440	5765	1867	50800
90	56420	302,6	272	56420
120	49000	6637	1689	49480
150	46080	20830	5592	50880
180	41040	23360	4346	47420

Ilustración 179. Valores de la presión de arrastre para diversos ángulos

<sup>25</sup> En líneas generales, ya que en  $\alpha=60^\circ$ , en 90<sup>o</sup> se produce un punto extraño

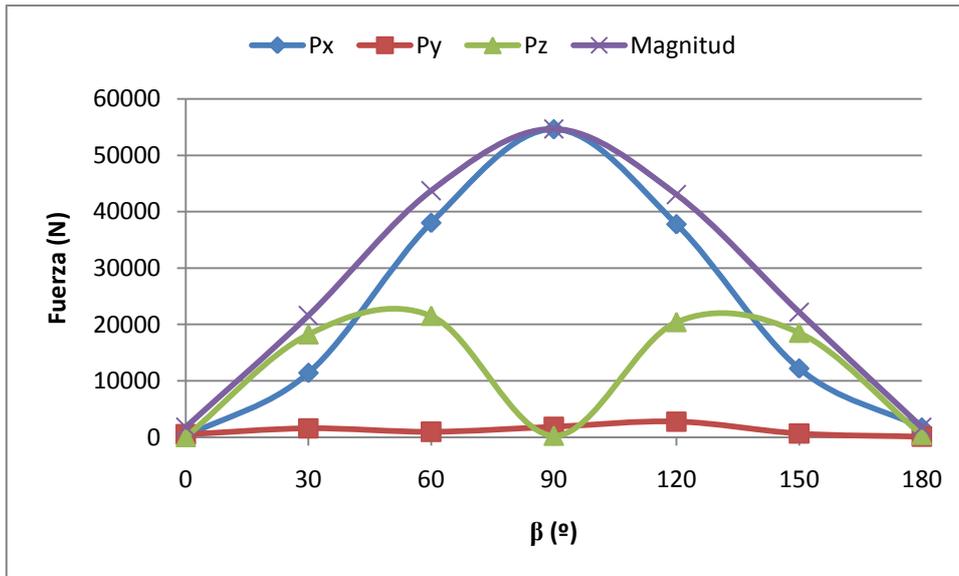


Ilustración 180. Evolución de la presión de arrastre para  $\alpha=0^\circ$

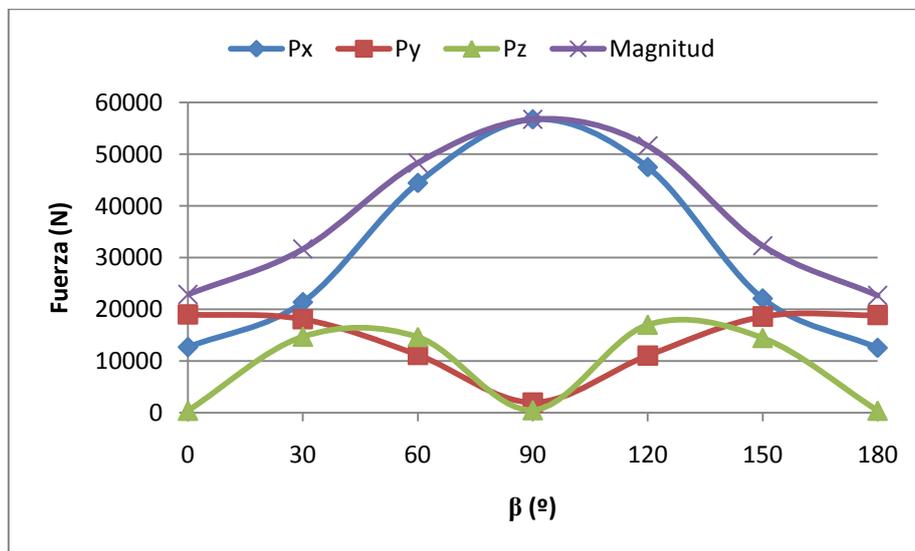


Ilustración 181. Evolución de la presión de arrastre para  $\alpha=30^\circ$

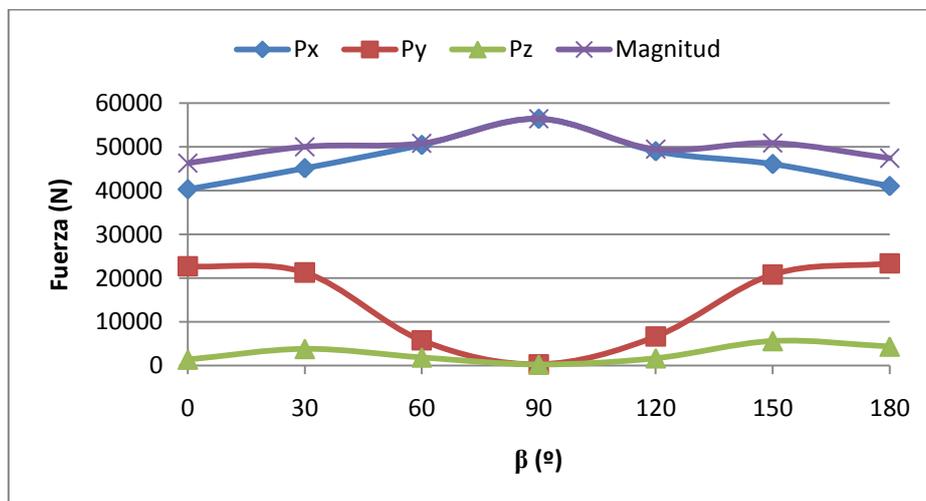


Ilustración 182. Evolución de la presión de arrastre para  $\alpha=60^\circ$

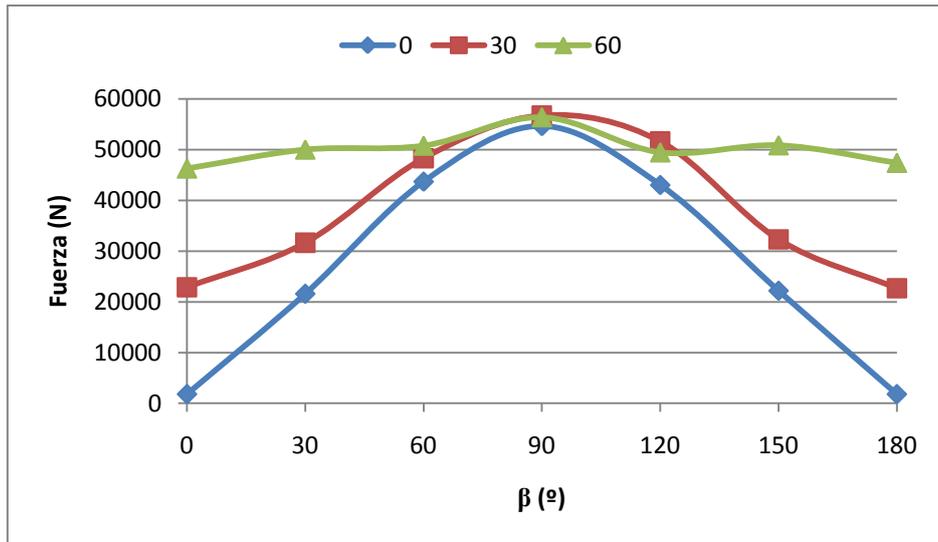


Ilustración 183 Evolución de la fricción de arrastre para  $\alpha=0, 30$  y  $60^\circ$

La presión de arrastre se comporta de forma prácticamente idéntica a la fuerza total de arrastre.

La principal componente es la del eje X, que presenta una forma parabólica con máximo en  $\beta=90^\circ$ , y que se aplanan a medida que  $\alpha$  aumenta.

La componente Y presenta forma de V con mínimo en  $\beta=90^\circ$ , aumentando con  $\alpha$  hasta llegar a un punto en que se invierte la tendencia y se vuelve a hacer plana. La componente en Z posee máximos en  $45$  y  $135^\circ$ , y mínimos en  $0, 90$  y  $180^\circ$ , presentando el mismo comportamiento en  $\alpha$  que la componente en Y.

En cuanto a la magnitud total, presenta el mismo comportamiento que la componente en X.

Ángulo ( $\beta$ )	X	Y	Z
$\alpha$	mm	mm	mm
<b><math>\alpha=0</math></b>			
0	-60,62	-33,71	-23,65
30	-282,4	-1,606	178,4
60	-86,41	0,2707	150,9
90	1,527	0,9458	72,1
120	24,78	-0,3778	-21,94
150	169,2	2,277	-120
180	-51,77	50,71	72,73
<b><math>\alpha=30</math></b>			
0	-27,26	32,11	0,396
30	-218,3	146,9	128,2
60	-63,3	64,92	122,2
90	-37,35	21,99	0,593
120	14,02	-22,78	-39,91
150	90,64	-72,66	-62,62
180	138,7	-99,67	-0,7363
<b><math>\alpha=60</math></b>			
0	-103,5	174,9	0,1584
30	-69,68	142	41,14
60	-12,89	84,73	74,51
90	-22,41	37,49	9,818
120	-7,207	46,29	38,62
150	23,19	-48,12	-14,28
180	31,38	-66,89	1,877

Ilustración 184. Punto de aplicación de la fuerza de arrastre en función de  $\alpha$  y  $\beta$

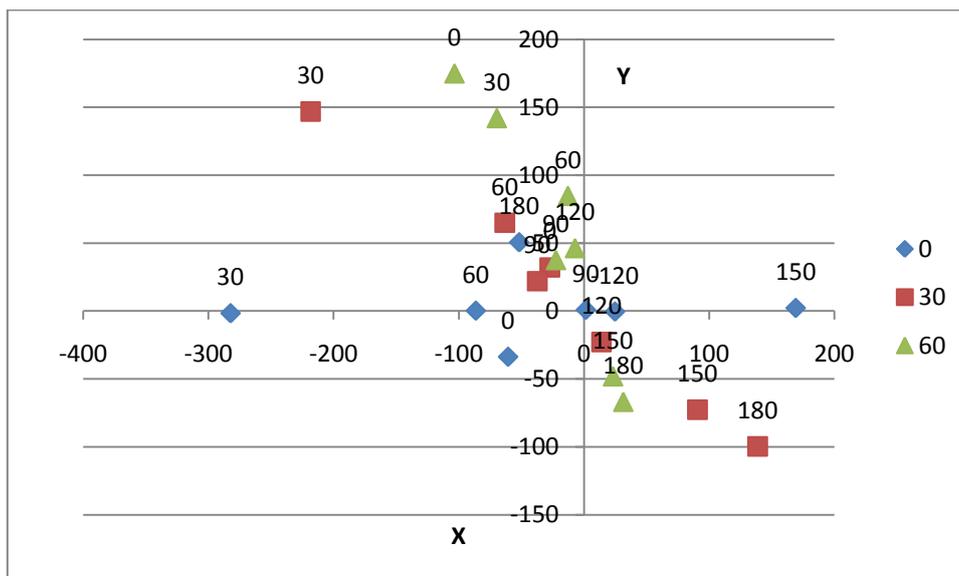


Ilustración 185. Punto aplicación fuerza de arrastre plano XY

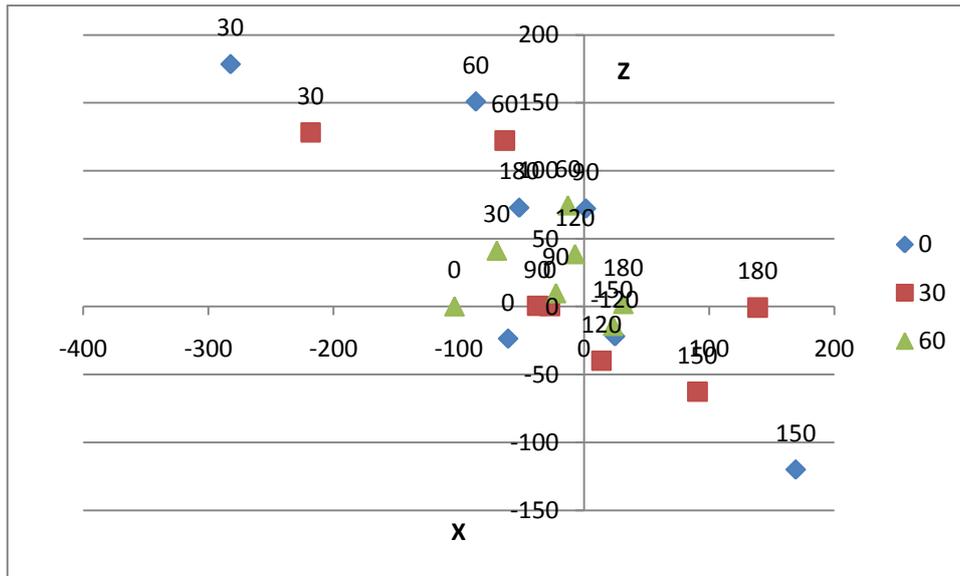


Ilustración 186. Punto aplicación fuerza de arrastre plano XZ

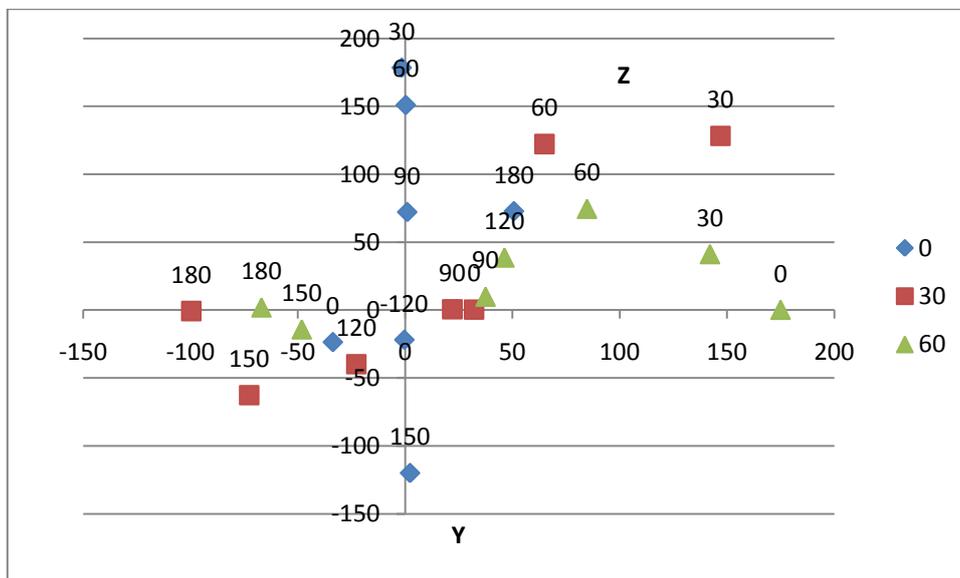


Ilustración 187. Punto aplicación fuerza de arrastre plano ZY

En cuanto a la posición del punto de arrastre, a medida que aumenta el ángulo  $\alpha$  estos se distribuyen en una región más cercana a 0 en el eje de las X, alejándose más en las coordenadas de Z e Y. De la misma manera los valores de  $\beta$  cercanos a 90 son aquellos que están situados más cerca del origen de coordenadas, tanto en X, Y como en Z.

De los puntos obtenidos únicamente se puede deducir donde se produce la mayor concentración de puntos, ya que aparentemente no existe correlación alguna entre ellos.

Ángulo ( $\beta$ )	Presión en superficie	Esfuerzos tangenciales
$\alpha$	MPa	MPa
<b><math>\alpha=0</math></b>		
0	3,44E-02	1,49E-04
30	4,11E-02	1,63E-04
60	5,54E-02	1,81E-04
90	6,26E-02	1,93E-04
120	5,69E-02	1,79E-04
150	4,46E-02	1,63E-04
180	1,79E-02	1,50E-04
<b><math>\alpha=30</math></b>		
0	4,59E-02	1,60E-04
30	4,67E-02	1,70E-04
60	5,79E-02	1,88E-04
90	6,31E-02	2,13E-04
120	5,97E-02	1,86E-04
150	4,52E-02	1,64E-04
180	3,84E-02	1,60E-04
<b><math>\alpha=60</math></b>		
0	5,62E-02	1,90E-04
30	5,67E-02	1,85E-04
60	6,09E-02	1,90E-04
90	6,31E-02	2,08E-04
120	5,98E-02	1,90E-04
150	5,79E-02	1,91E-04
180	5,86E-02	1,79E-04

Ilustración 188. Valores de esfuerzos máximos en función de  $\alpha$  y  $\beta$

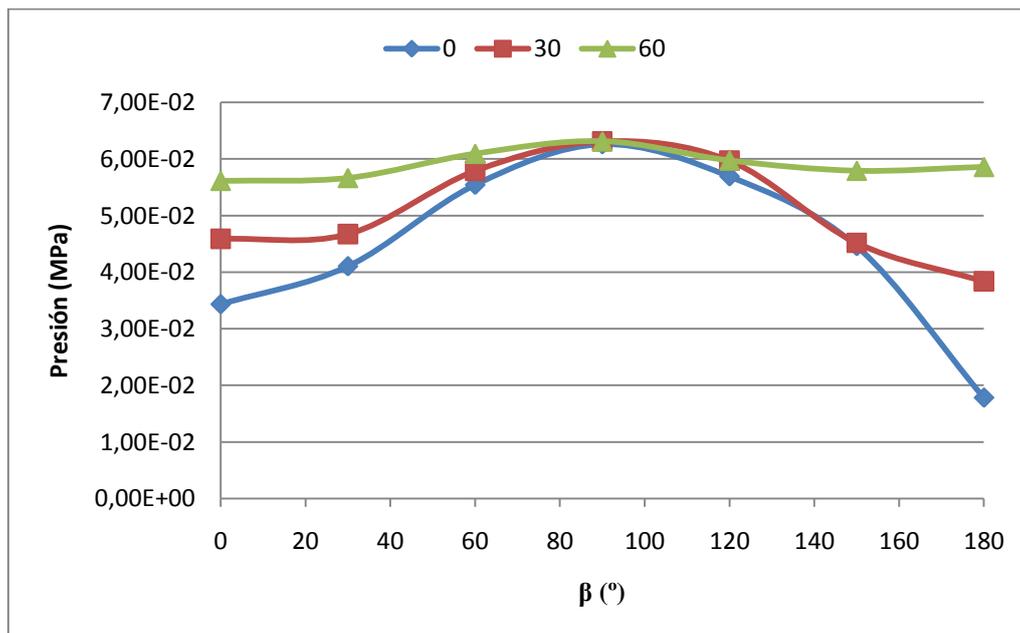


Ilustración 189. Presión en la superficie máxima para  $\alpha=0, 30$  y  $60^\circ$

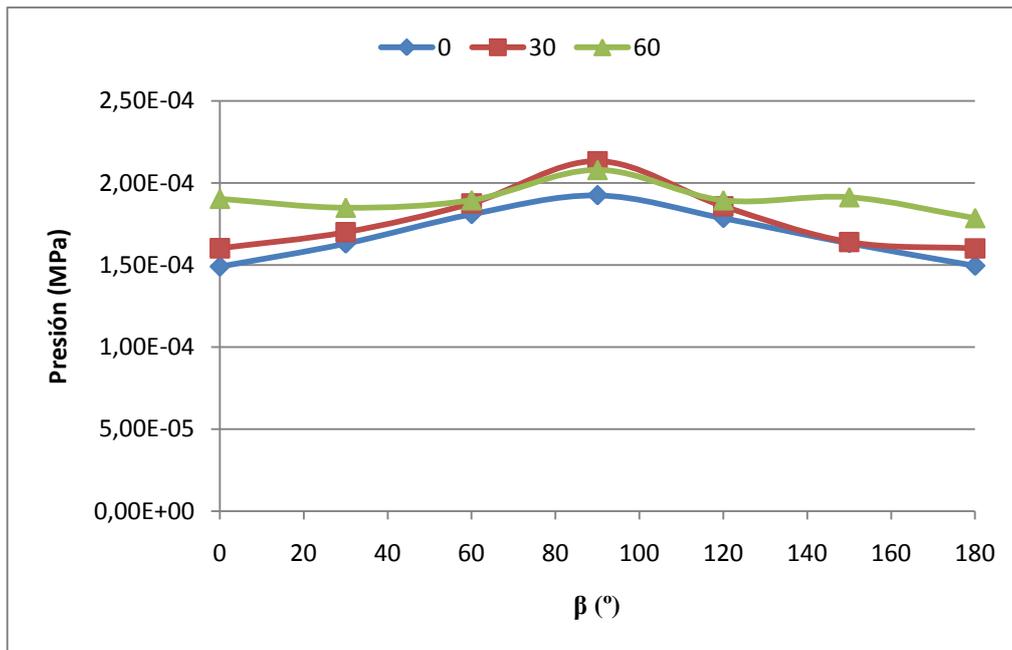


Ilustración 190. Esfuerzos tangenciales máximos para  $\alpha=0, 30$  y  $60^\circ$

En cuanto a los valores de los esfuerzos máximos que se producen en el casco, la presión en la superficie y los esfuerzos tangenciales presentan un comportamiento similar.

La presión máxima aumenta de forma parabólica hasta alcanzar un máximo en  $\beta=90^\circ$ , para luego disminuir hasta alcanzar un nuevo mínimo en  $180^\circ$ . A medida que el ángulo  $\alpha$  aumenta, el valor máximo de la presión en la superficie también aumenta.

Lo mismo que se ha comentado en la presión máxima, se podría aplicar al caso de los esfuerzos tangenciales máximos. Estos son mayores cuantos mayor es el ángulo  $\alpha$ , presentando siempre el máximo cuando  $\beta=90^\circ$ . En este caso la curva es más plana que en el caso de la presión máxima.

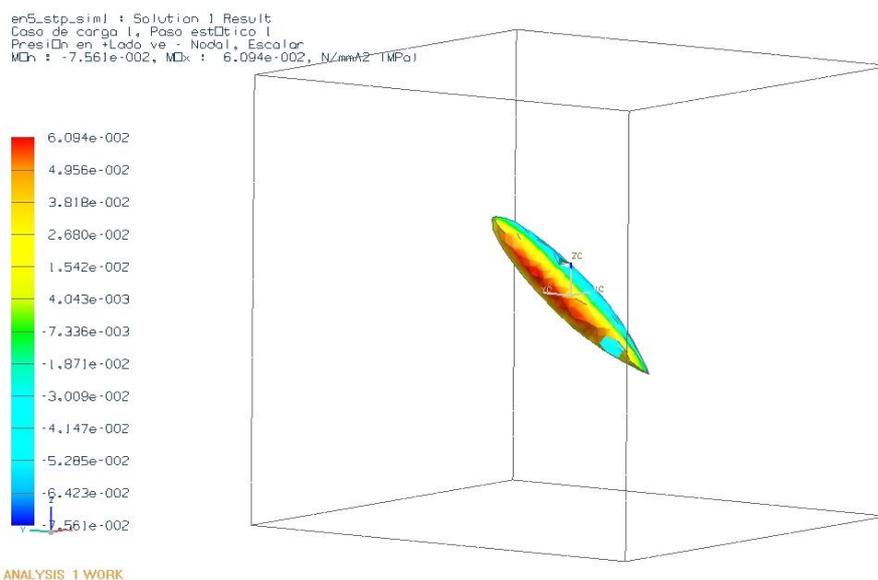
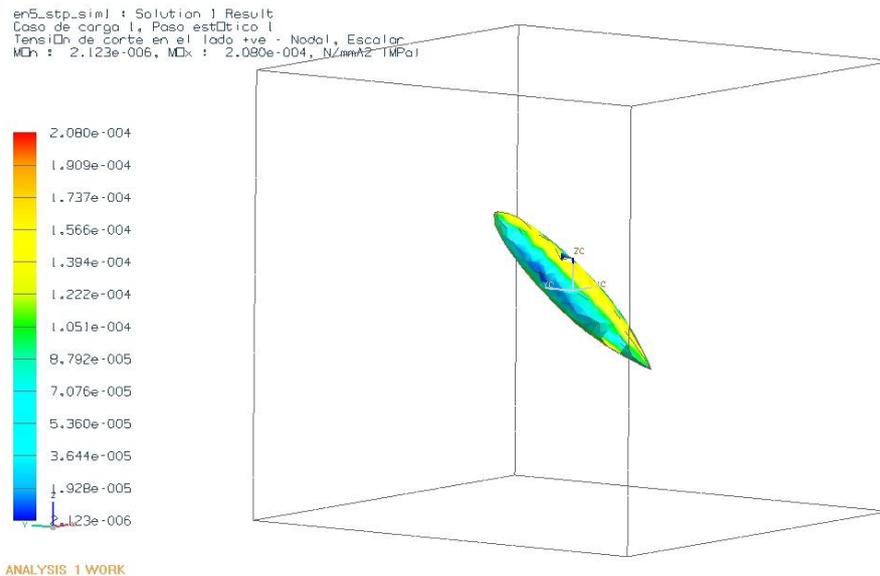


Ilustración 191. Distribución presión en la superficie máxima para  $\alpha=60$  y  $\beta=60^\circ$



**Ilustración 192. Distribución esfuerzos tangenciales en la superficie máxima para  $\alpha=60$  y  $\beta=60^\circ$**

Si se habla de los esfuerzos máximos en el cuerpo, las presiones máximas se producirán en las caras del cuerpo en que el fluido incida perpendicularmente, disminuyendo en los laterales del cuerpo y volviendo a aumentar ligeramente en la región opuesta a la de incidencia del fluido. Los esfuerzos tangenciales, son máximos en los laterales del cuerpo y mínimos en la región de incidencia del fluido y su cara opuesta.

## 8.5. Análisis posición de apéndices

En estos análisis se procederá a estudiar la variación de la fuerza de arrastre y los esfuerzos en el casco del submarino que provoca la presencia de apéndices de control (aletas) en este. Estas poseerán una altura fija igual a 540mm medidos desde el centro del casco y una relación entre el espesor y su longitud de 5. La distancia que define su posición es el valor en X que dista el vértice de la aleta del origen de coordenadas del cuerpo. Se analizarán posiciones de 0, 50, 100, 200, 400 y 800mm sobre un cuerpo de volumen fijo  $0.25\text{m}^3$  y relación  $L/D=5$ .

El casco está inmerso en un volumen fijo de 4000mm de largo, por 2000mm de ancho y 2000mm de alto. Este volumen se debe a que el ordenador era incapaz de solucionar las ecuaciones para volúmenes mayores. El agua entra por la proa a una velocidad de 10m/s, saliendo sin succión por el lado opuesto.

En cuanto a las condiciones numéricas, el cuerpo está mallado con la malla 2D de tamaño de elemento 35mm, mientras que el volumen posee una malla 3D con elementos de 70mm. El tamaño de malla es el mínimo que posibilita la solución. El modelo de turbulencia es el modelo de longitud de mezcla.

En las imágenes siguientes se puede observar el mallado del cuerpo, la malla del volumen y las condiciones de contorno.

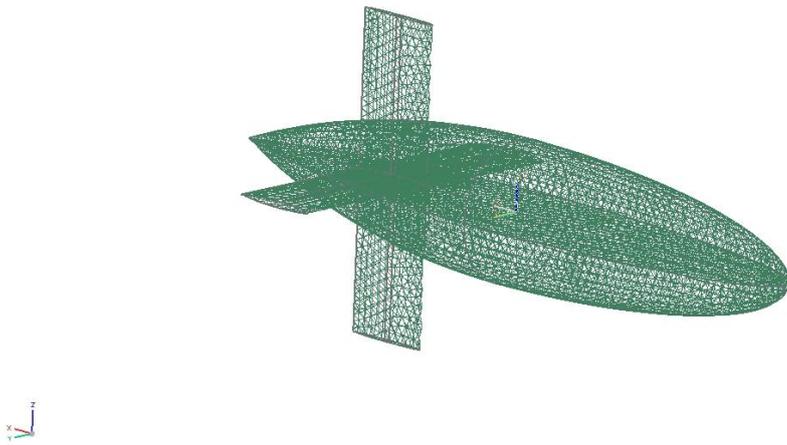


Ilustración 193. Malla del cuerpo con aletas con X=400mm

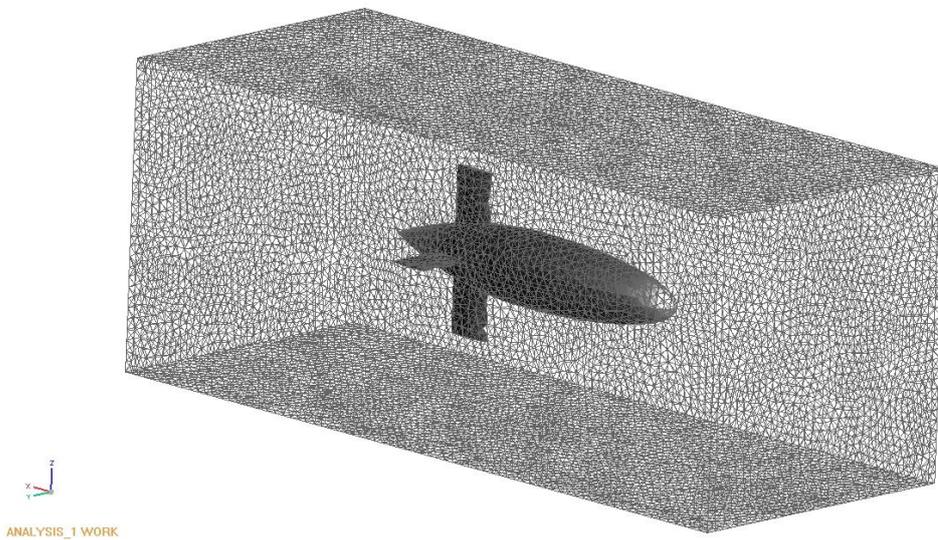


Ilustración 194. Malla del volumen de control de aletas con X=400mm

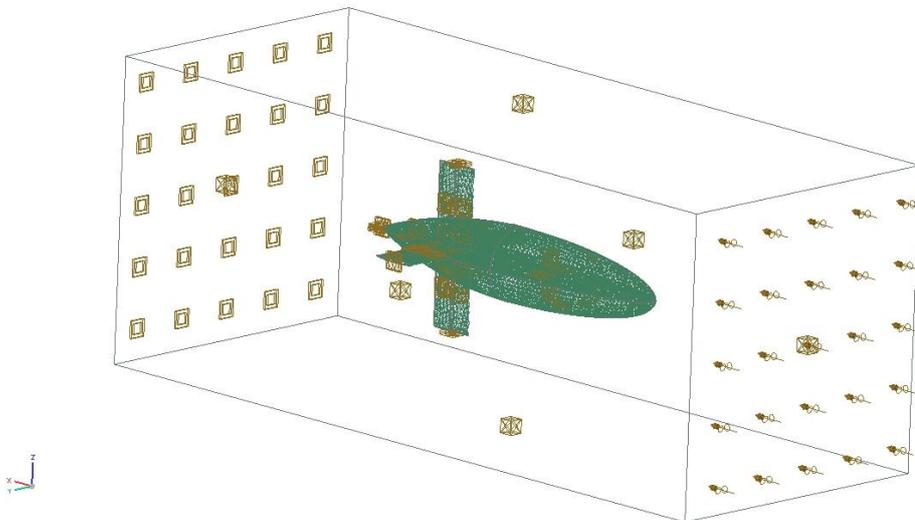


Ilustración 195. Condiciones de contorno para cuerpo con aletas de X=400mm

X	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
%	N	N	N	N
0	2566	116,8	-112,5	2571
50	2587	78,41	-212,1	2597
100	2602	168,7	-208,7	2616
200	2562	151,3	-137,3	2557
400	2559	91,77	-147,1	2564
800	2556	89,14	-133,1	2561
Sin aletas	2145	195,1	-149,4	2156

Ilustración 196. Valores de fuerzas de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

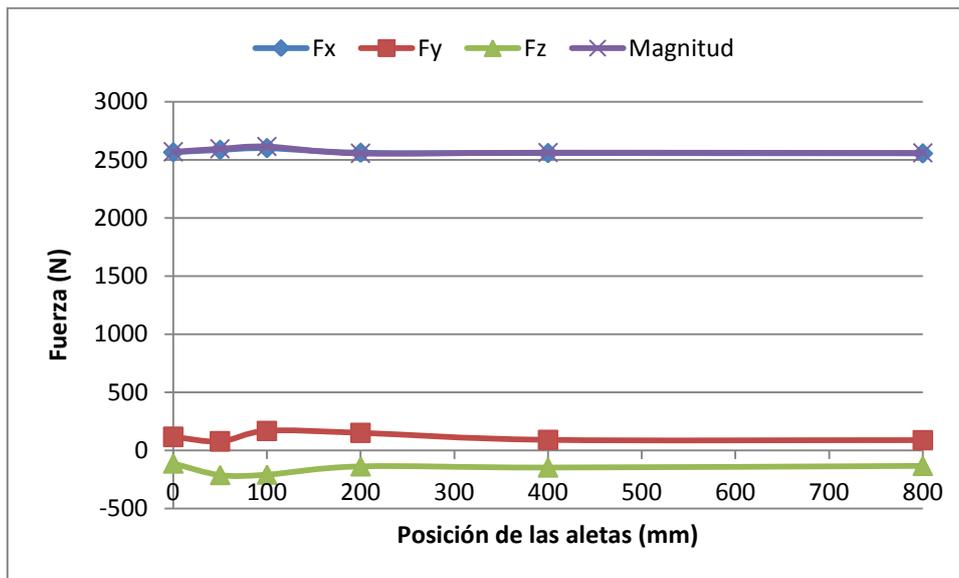


Ilustración 197. Evolución de la fuerza de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

En los ensayos que se han llevado a cabo, se puede observar que la fuerza de arrastre es prácticamente constante salvo las perturbaciones existentes en los estadios iniciales. El valor de la componente X es del orden de 10 veces mayor a Z e Y, que quedan como residuales. La magnitud tiene el mismo comportamiento que X

No obstante, si que existe una gran diferencia respecto al casco sin aletas, ya que con estas la fuerza de arrastre pasa de 2145 a 2550N.

X	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
0	509,2	0,111	-0,149	509,2
50	503,1	0,3071	0,2758	503,1
100	511,2	0,1828	-0,02821	511,2
200	512	0,02952	-1,175	512
400	518,5	0,2955	-0,02372	518,7
800	538,3	-0,1606	-0,2296	538,3
Sin aletas	393,4	-0,02957	-0,06714	393,4

Ilustración 198. Valores de fricción de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

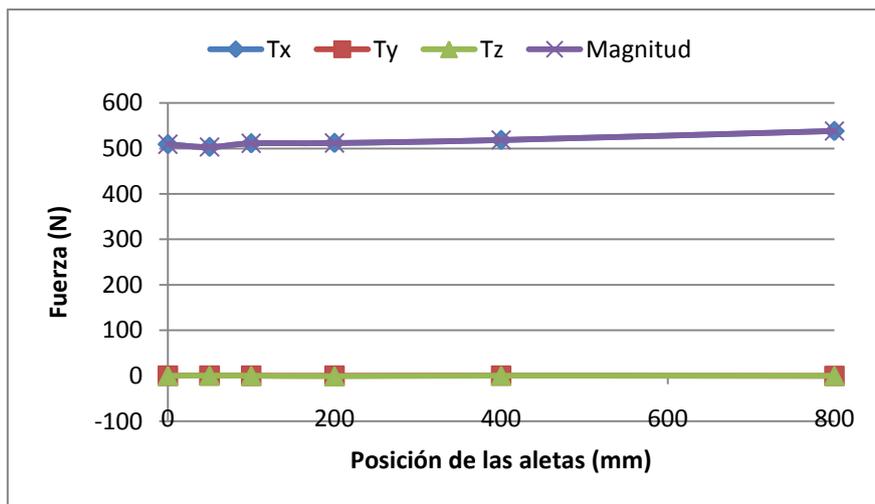


Ilustración 199. . Evolución de fricción de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

La fricción por arrastre presenta un ligero aumento a medida que se distancian las aletas de la parte central del casco. El valor de las componentes en Z e Y es virtualmente 0, por lo que la fricción de arrastre se reduce al eje X.

Al igual que ocurre con el arrastre total, el arrastre por fricción aumenta considerablemente cuando se introducen las aletas, pasando de 393 a 500N.

X	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
%	N	N	N	N
0	2056	116,7	-112,4	2063
50	2084	78,54	-212,4	2096
100	2091	168,5	-208,7	2108
200	2050	151,3	-137,2	2060
400	2040	91,47	-147,1	2047
800	2018	89,31	-132,8	2024
Sin aletas	1752	195,2	-149,4	1769

Ilustración 200. Valores de presión de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

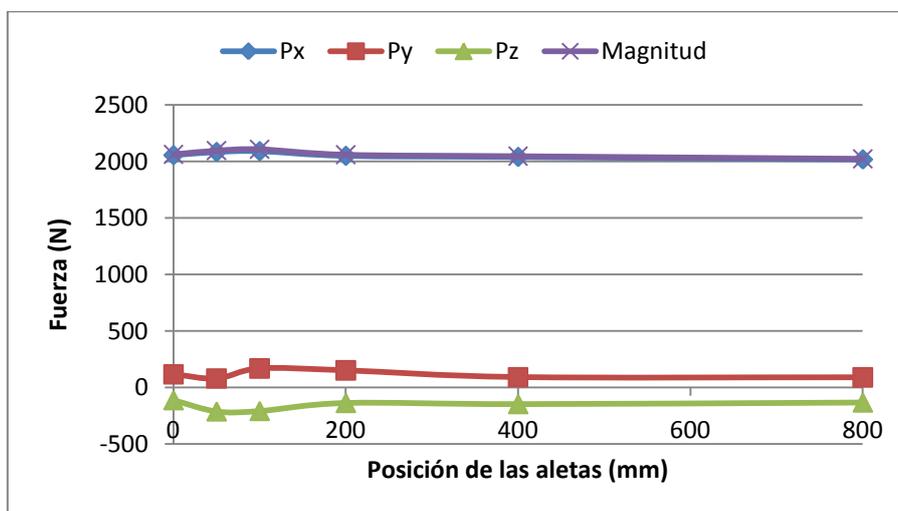


Ilustración 201. Evolución de presión de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

En cuanto a la presión de arrastre, se comporta de forma análoga a la fuerza de arrastre total. Permanece constante a medida que se varía la posición de las aletas, existiendo ligeras perturbaciones en posiciones cercanas al centro, siendo la principal componente X.

La diferencia de la presión de arrastre existente entre tener o no tener aletas implica pasar de 1752 a alrededor de 2040N.

En la gráfica presentada a continuación, se comparan los diferentes componentes de la fuerza de arrastre con la fuerza de arrastre total, observándose que ligero incremento de la fricción de los tangenciales no afecta en absoluto el valor de la fuerza de arrastre total.

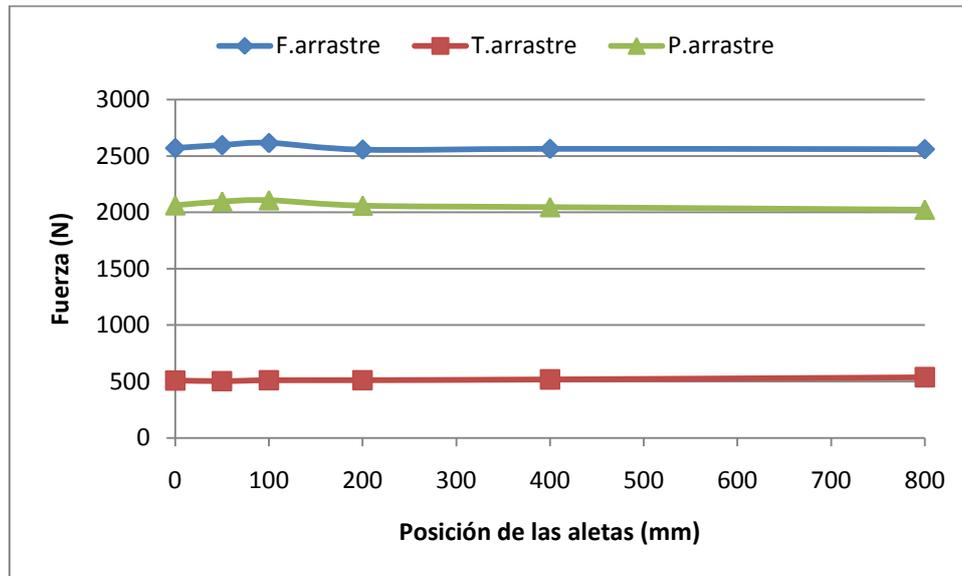


Ilustración 202. Comparación de los componentes de fuerzas de arrastre para diferentes posiciones de las aletas

X	X	Y	Z
mm	N	N	N
0	-20,74	9,151	-0,3411
50	-10,91	6,838	10,51
100	1,215	2,485	9,268
200	24,97	9,063	4,387
400	78,77	22,49	5,902
800	220	45,98	1,076
Sin aletas	-68,29	0,8231	16,05

Ilustración 203. Punto de aplicación de la fuerza para diferentes posiciones de las aletas

Desplazar las aletas hacia atrás, implica que el punto de aplicación de la fuerza se desplace hacia la parte de popa del casco. En cuanto a la posición en Z e Y, no se adivina ningún comportamiento claro.

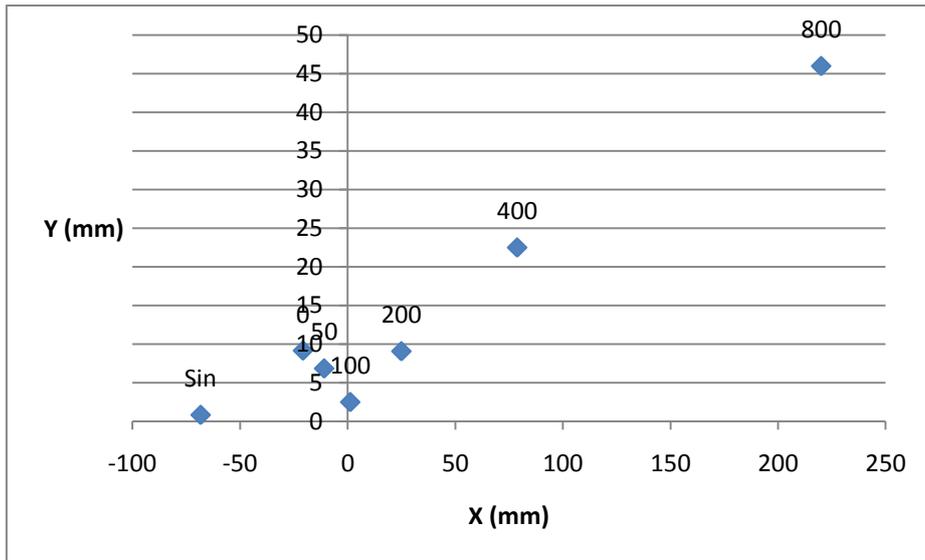


Ilustración 204. Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano XY

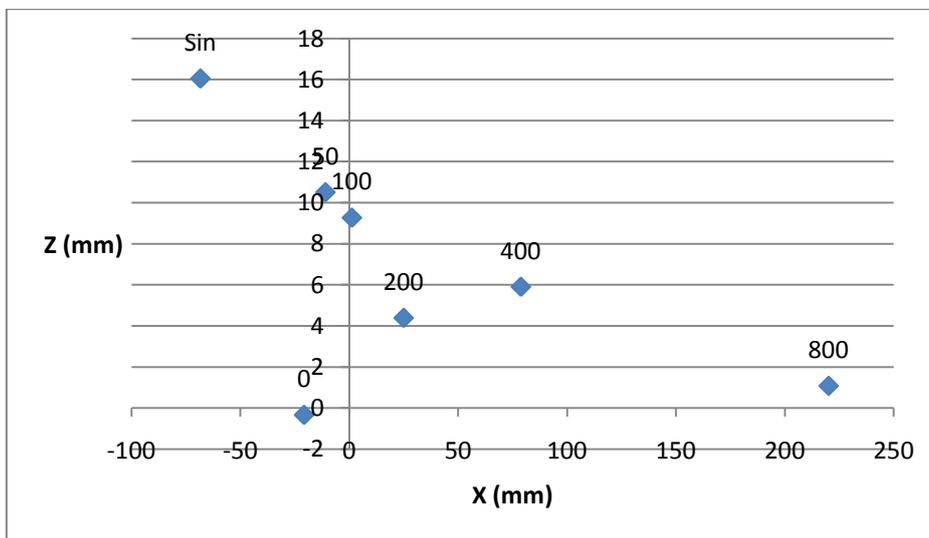


Ilustración 205. Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano XZ

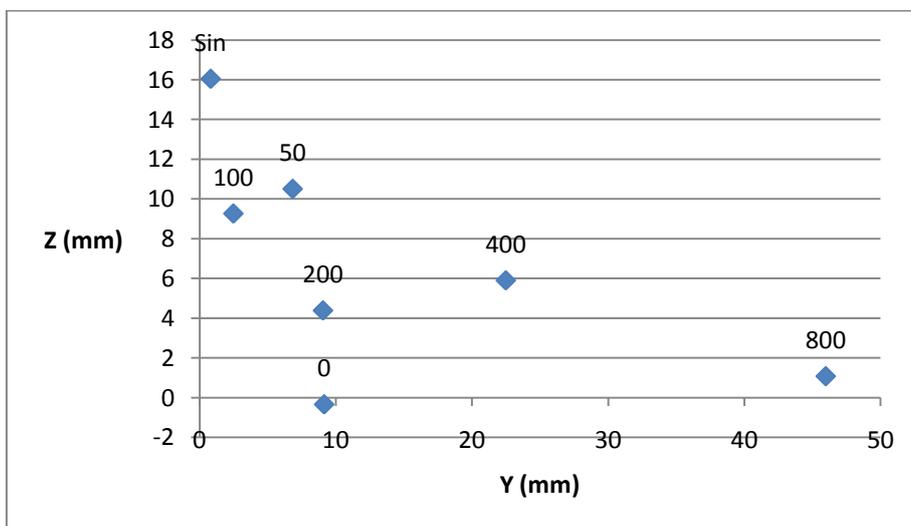


Ilustración 206. . Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano YZ

X	Presión en superficie	Esfuerzos tangenciales
	MPa	MPa
0	3,80E-02	1,90E-04
50	3,79E-02	1,89E-04
100	3,80E-02	1,90E-04
200	3,81E-02	1,89E-04
400	3,80E-02	1,86E-04
800	3,80E-02	1,73E-04
Sin aletas	3,79E-02	1,74E-04

Ilustración 207. Valores máximos de esfuerzos para diferentes posiciones de aletas

Los esfuerzos máximos, tanto de presión en la superficie como de esfuerzos tangenciales, son independientes de la posición de las aletas en el casco, ya que no han variado en los diferentes ensayos. La presencia de aletas tampoco implica ninguna diferencia en este aspecto a no tenerlas.

En cuanto a la distribución de los esfuerzos por el casco, se distribuyen prácticamente de la misma forma que en un cuerpo sin aletas.

La presión en la superficie es máxima en el cono de proa, disminuyendo la presión a medida que aumenta el diámetro, volviendo a aumentar a medida que disminuye este último y originando un máximo local en la popa. La diferencia existente es que, en este caso, el vértice de ataque de las aletas presenta presiones más altas que su entorno.

En el caso de los esfuerzos tangenciales, estos son la inversa de las presiones. Los mínimos se producen en la proa y la popa, mientras que el máximo se produce en las regiones en que el diámetro del casco es mayor.

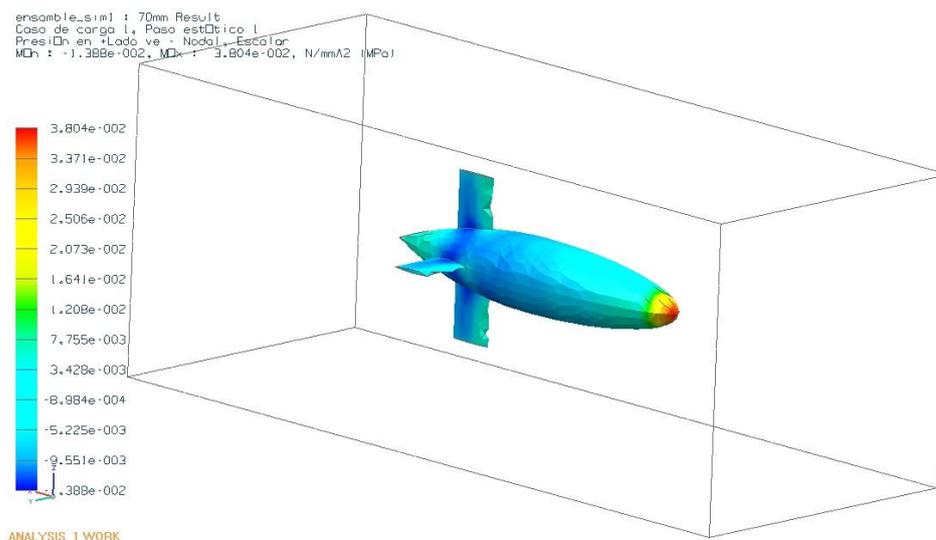


Ilustración 208. Distribución de presiones para X=400mm

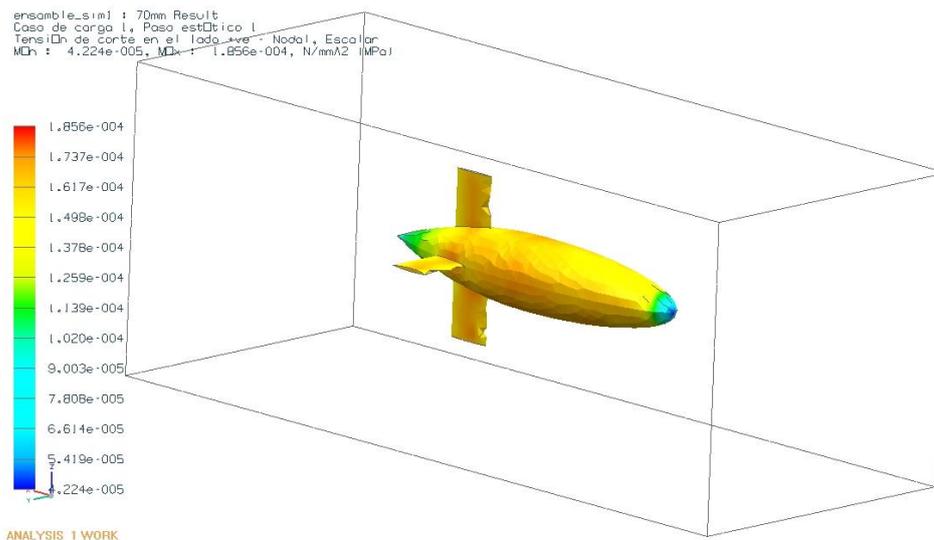


Ilustración 209. Distribución de esfuerzos tangenciales para X=400mm

## 8.6. Análisis altura de los apéndices

En esta última tanda de experimentos, se va a comprobar la influencia que posee la altura de una aleta en la fuerza de arrastre y los esfuerzos a los que está sometido el casco del submarino. Al igual que en el apartado anterior se considera un casco de volumen constante igual a  $0.25\text{m}^3$  y de relación  $L/D=5$ , sobre el cual van montadas las aletas a una distancia de 800mm del centro del cuerpo. La altura de las aletas (H) se mide respecto al eje del submarino, considerándose los valores de 240, 340, 440 y 540mm.

Al igual que en el caso anterior, se considera el submarino inmerso en un volumen de 4000mm de largo, por 2000mm de ancho y 2000mm de alto, en el cual el agua entra por la proa a 10m/s, y sale sin succión por el lado opuesto.

En lo referente a los parámetros de la solución, se considera una malla del cuerpo bidimensional de 35mm y una malla para el volumen del fluido 3D de 70mm. El modelo de turbulencia es el modelo de longitud de mezcla.

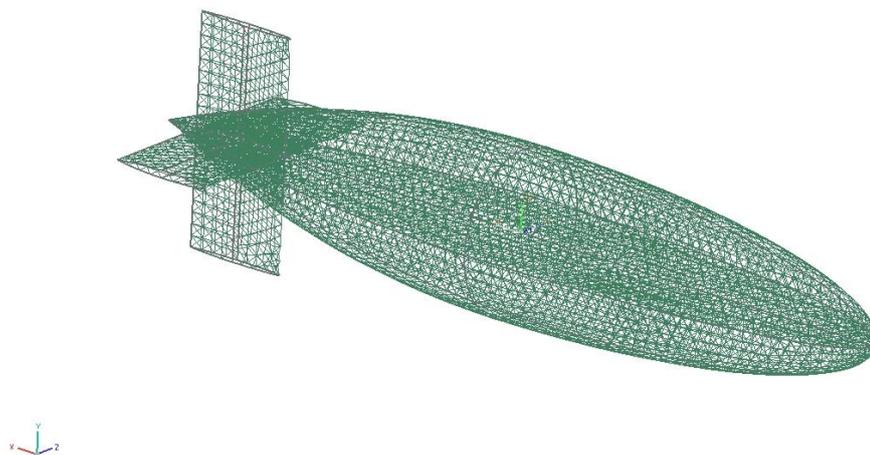


Ilustración 210. Malla del casco para H=340mm

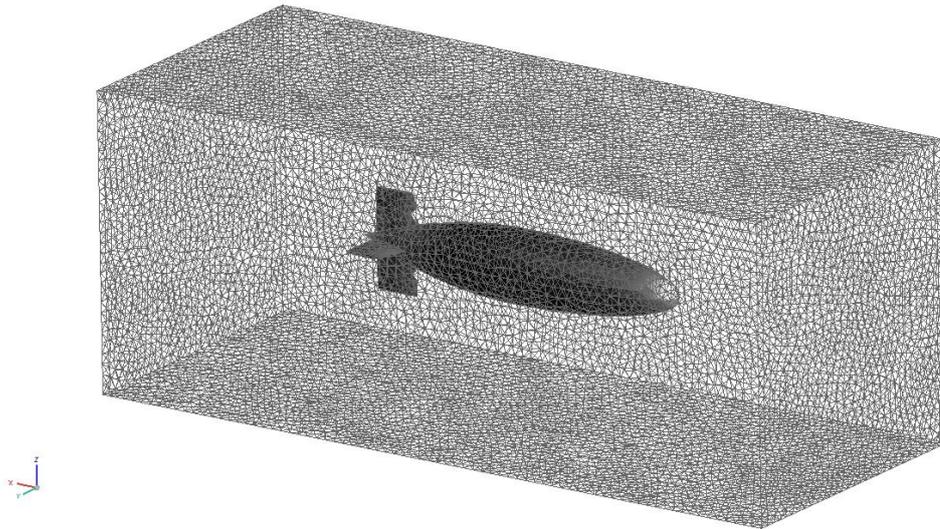


Ilustración 211. Malla del volumen del fluido para H=340mm

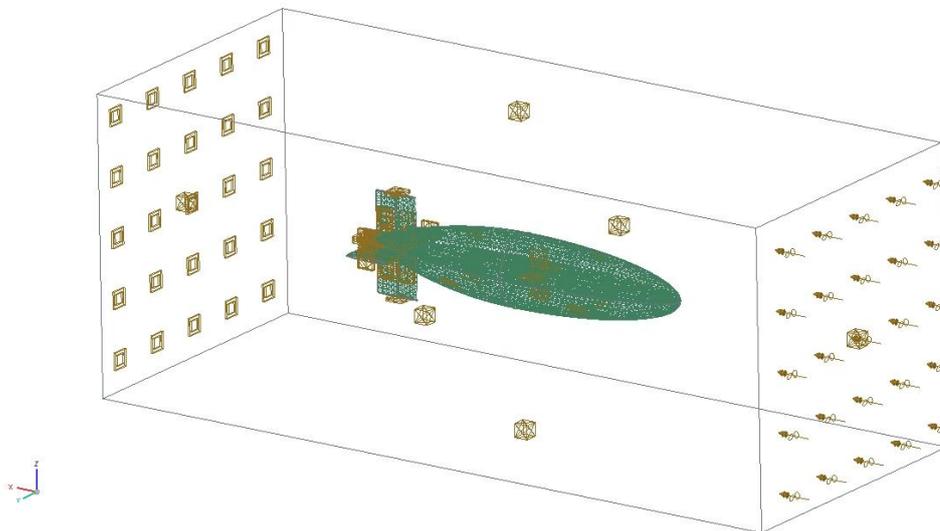


Ilustración 212. Condiciones de contorno para H=340mm

H	F. Arrastre X	F. Arrastre Y	F. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
240	2177	158,5	-136	2187
340	2302	111,2	-168,6	2310
440	2407	99,04	-158,3	2416
540	2556	89,14	-133,1	2561

Ilustración 213. Valores de la fuerza de arrastre para el barrido de H

Si se observa la evolución de los valores de la fuerza de arrastre total, estos aumentan a medida que aumenta la altura de la aleta. De los componentes de la misma, el componente X es el principal, siendo el único que aumenta mientras que los correspondientes a Z e Y disminuyen.

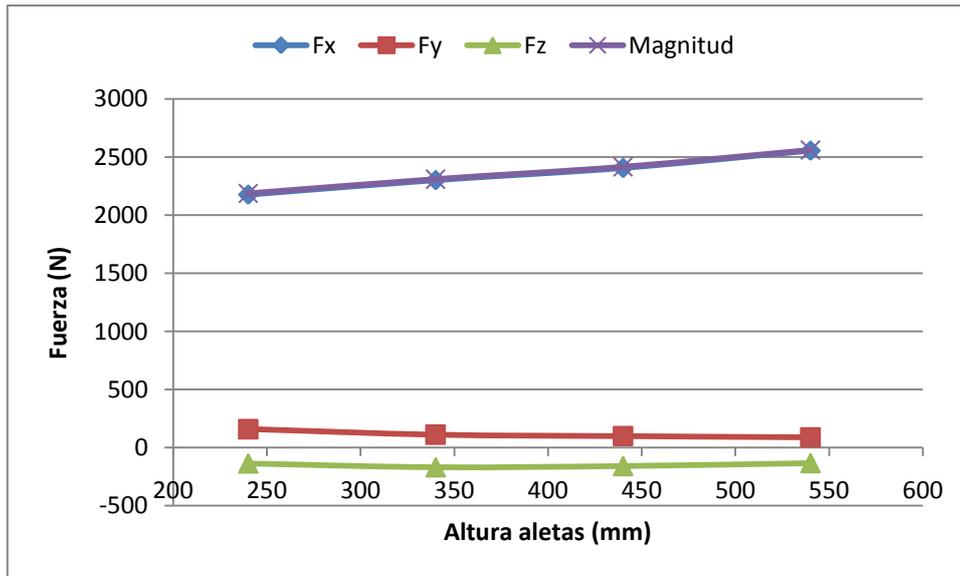


Ilustración 214. Evolución de la fuerza de arrastre para el barrido de H

H	T. Arrastre X	T. Arrastre Y	T. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
240	436,2	-0,2167	-0,05806	436,2
340	468,2	-0,0315	0,0498	468,2
440	500,8	-0,08494	0,2543	500,8
540	538,3	-0,1606	-0,2296	538,3

Ilustración 215. Valores de la fricción de arrastre para el barrido de H

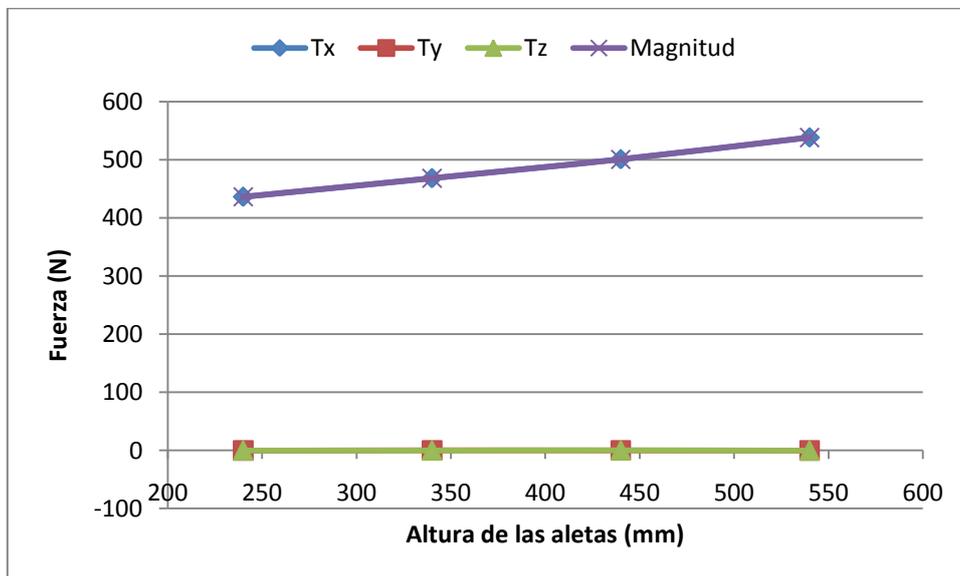


Ilustración 216. Evolución de la fricción de arrastre para el barrido de H

En cuanto a la fricción debido al arrastre, ésta aumenta de forma considerable a medida que aumenta la altura de la aleta. Aumenta únicamente la componente X, ya que Z e Y son prácticamente inexistentes.

H	P. Arrastre X	P. Arrastre Y	P. Arrastre Z	Magnitud
mm	N	N	N	N
240	1741	159,2	-135,9	1753
340	1833	111,2	-168,6	1845
440	1906	99,1	-158,5	1915
540	2018	89,31	-132,8	2024

Ilustración 217. Valores de la presión de arrastre para el barrido de H

En último lugar queda la presión de arrastre, la cual posee una evolución similar a los dos parámetros anteriores. Esta fuerza es aplicada principalmente en la dirección de X, aumentando a medida que aumenta la altura de la aleta. Las componentes Z e Y, además de poseer un valor de un orden de magnitud inferior, disminuyen al producirse este efecto.

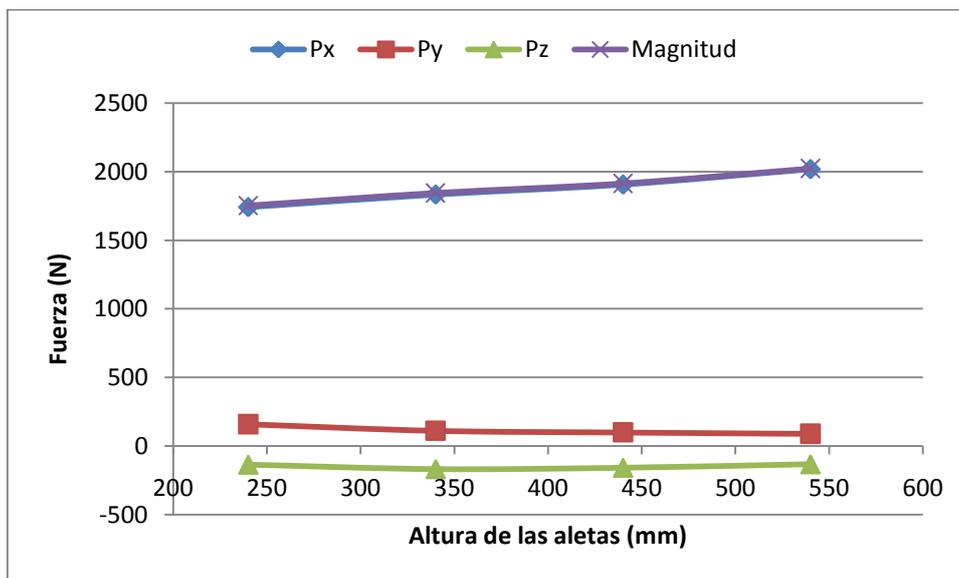


Ilustración 218. Evolución de la presión de arrastre para el barrido de H

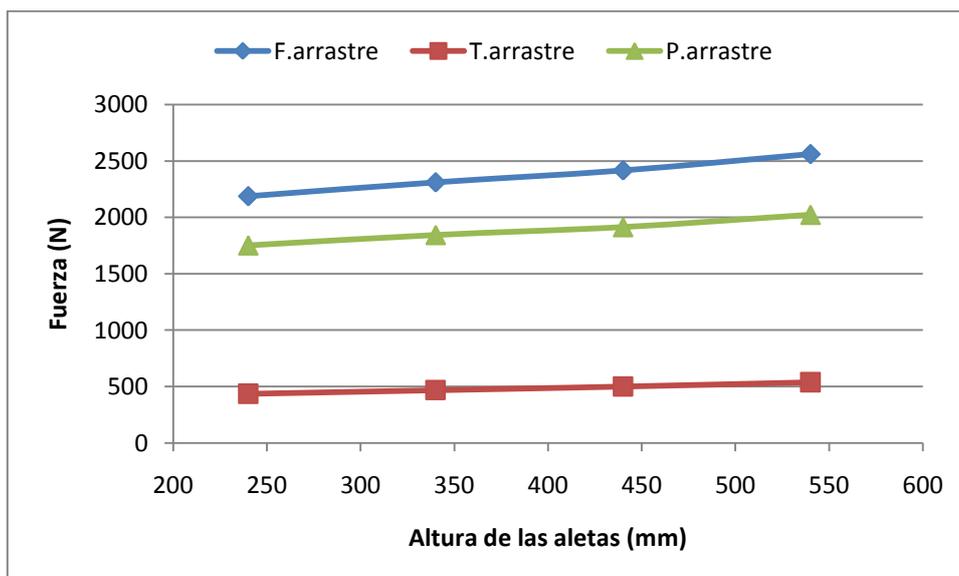


Ilustración 219. Comparación de los componentes de la fuerza de arrastre para el barrido de H

A la hora de comparar la aportación a la fuerza de arrastre total de la fricción y de la presión, se puede observar que la primera es causa principalmente de la presión, evolucionando prácticamente paralela a ella. Comparada a esta última, la fricción por arrastre posee un crecimiento mucho menor.

H	X	Y	Z
mm	N	N	N
240	45,34	20,2	9,032
340	110,8	32,7	14,82
440	167,5	40,7	6,141
540	220	45,98	1,076

Ilustración 220. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H

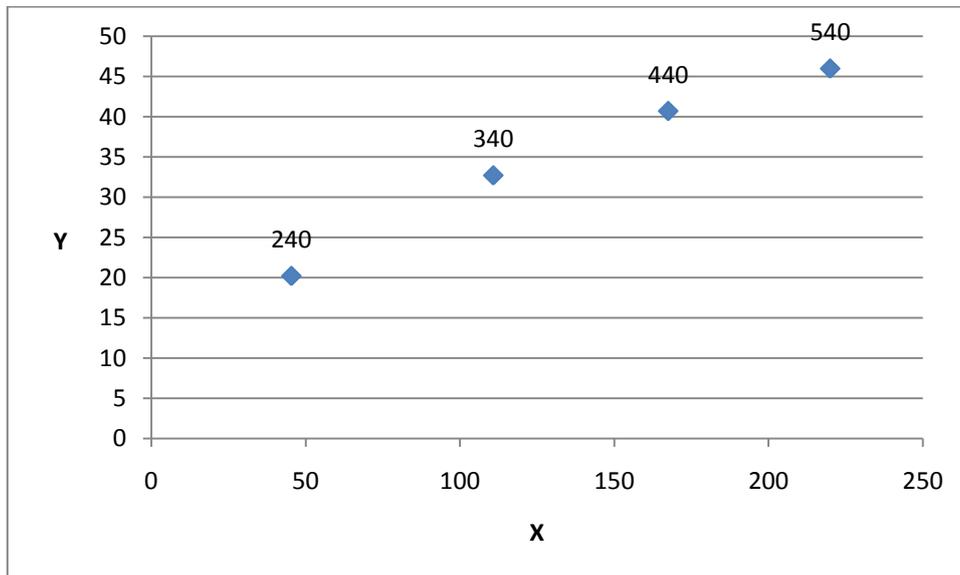


Ilustración 221. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano XY

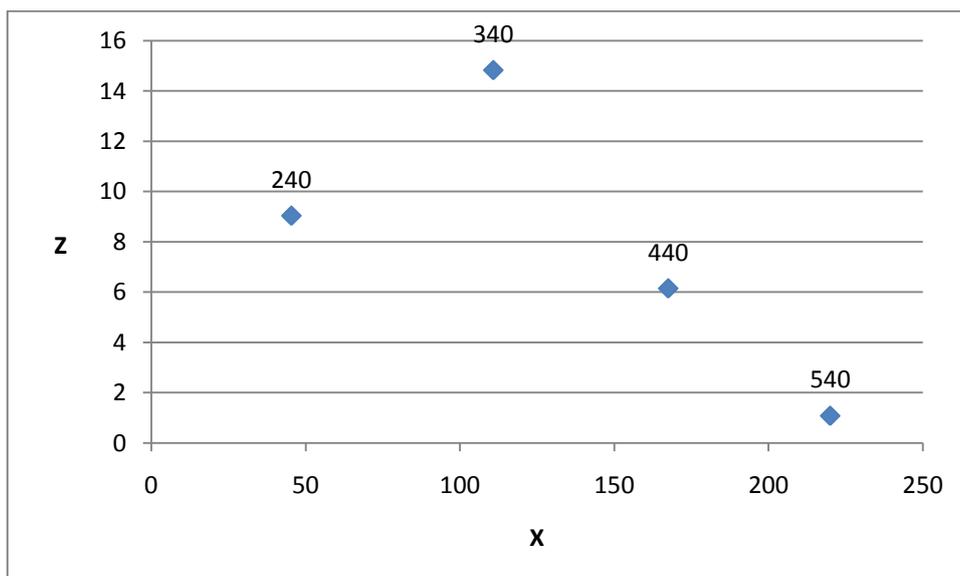


Ilustración 222. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano XZ

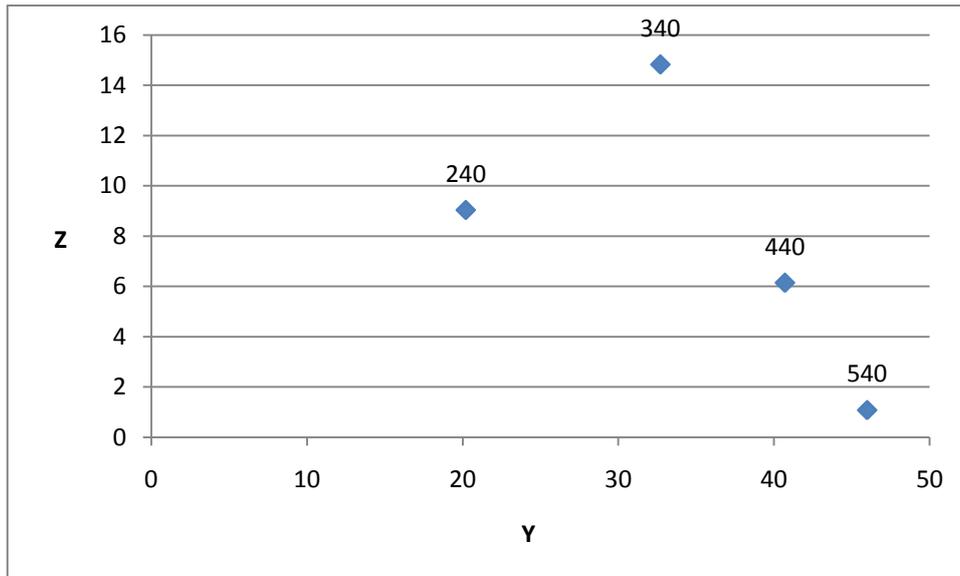


Ilustración 223. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano ZY

En lo referente al punto de aplicación de las fuerzas, se desplaza hacia la popa a medida que aumenta la altura de las aletas. En cuanto al comportamiento en Z e Y, no se advierte ningún patrón de comportamiento ni distribución.

H	Presión en superficie	Esfuerzos tangenciales
mm	MPa	MPa
240	6,44E-02	3,79E-02
340	6,45E-02	3,79E-02
440	6,45E-02	3,80E-02
540	6,45E-02	3,80E-02

Ilustración 224. Esfuerzos máximos para diferentes valores de H

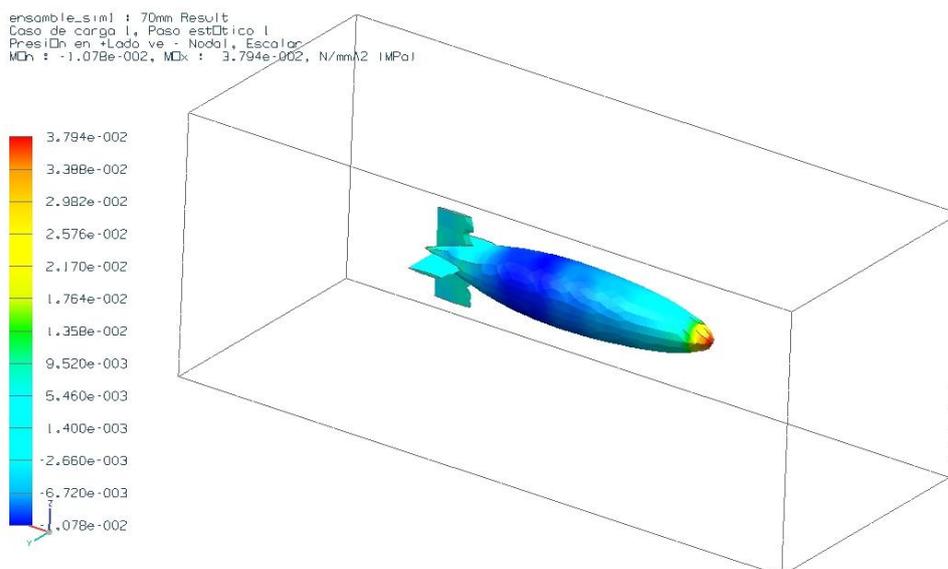
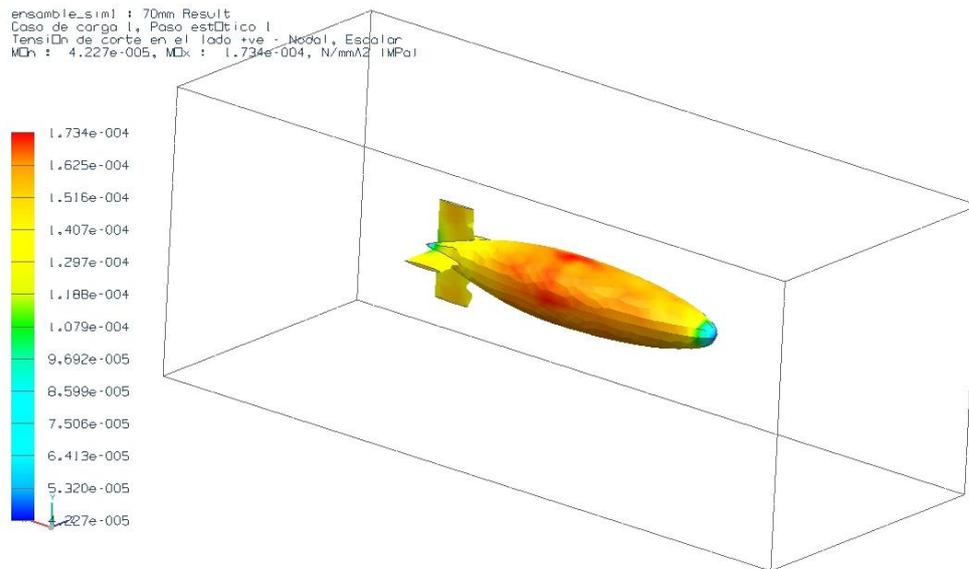


Ilustración 225. Distribución de presión en la superficie para H=340mm



**Ilustración 226. Distribución de tangenciales en la superficie para H=340mm**

Al igual que ocurre en el punto anterior, los esfuerzos máximos son constantes, tanto para la presión en la superficie como para los esfuerzos tangenciales.

En cuanto a la distribución de estos, también se realiza un análisis análogo al del punto anterior. Las presiones en superficie son máximas en el cono de proa y el de popa, siendo mínimas en los puntos en que el diámetro es máximo. También existen picos de esfuerzos en los bordes de ataque de las aletas. En cuanto a los esfuerzos tangenciales son máximos en los diámetros máximos del casco y en puntos centrales de las dorsales de las alas, y mínimos en la proa y la popa.

# CONCLUSIONES

---



## 9. Conclusiones

En este apartado se van a plasmar todas las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados mostrados en el apartado anterior. Básicamente se procederá a razonar los motivos que dan lugar a estos resultados y cómo aplicarlos en el diseño de un AUV.

### 9.1. Comportamiento de las fuerzas

La fuerza resultante es la suma vectorial de sus diferentes componentes. Si se es purista, se considera como fuerza de arrastre únicamente la componente paralela a la aplicación del flujo (en este caso X), siendo las componentes perpendiculares a ésta la fuerza de sustentación (eje Y) y la fuerza transversal (eje Z). No obstante, en esta tesina se considera la fuerza de arrastre como aquella que se opone al movimiento del cuerpo, que es igual a la resultante anteriormente nombrada.

Salvo en los ensayos en los que se ha considerado diferentes posiciones del casco respecto al fluido, en todos los demás ensayos el fluido ha incidido paralelo al eje longitudinal del casco. En estos casos siempre ha existido una componente X mucho más grande que la componente en Y y en Z, y de magnitud prácticamente igual a la magnitud resultante. Realmente, las componentes Z e Y son componentes residuales que no poseen razón de ser, ya que la lógica lleva a pensar que el punto de aplicación de la fuerza, al ser el cuerpo axis métrico, debe de ser el punto (0.0) en el plano ZY<sup>26</sup> siendo la resultante coaxial con el eje del casco<sup>27</sup>. La aparición de dichas componentes se podrían atribuir al mallado, pidiéndose obviar a la hora de considerarlas en los resultados.

En cuanto a la evolución de las fuerzas de arrastre en función de la forma del cuerpo, tanto la fuerza debida a la presión como la debida a la fricción, según la teoría, deberían ser proporcionales al área proyectada en el plano normal a la dirección del flujo y la superficie total, respectivamente.

$$F_{a,friccion} = C_f \rho A_t \cdot \frac{V_0^2}{2}$$

$$F_{a,presión} = C_p A_p \rho \frac{V_0^2}{2}$$

En los diferentes casos analizados se verifica que al aumentar el diámetro del cuerpo (aumento de  $A_p$  y  $A_t$ ) o la longitud ( $A_t$ ), aumenta la fuerza de arrastre, pero no de forma proporcional como muestran las ecuaciones.

En la variación de L/D para un volumen constante, el arrastre debido a la presión disminuye al aumentar éste factor, ya que mengua el diámetro del cuerpo, mientras que la fuerza debida a la fricción aumenta al incrementarse la longitud. Como se ha dicho antes, el aumento no es proporcional, ya que mientras que el área proyectada disminuye entre 3 y 10 un 55%, el arrastre debido a la presión cae un 74%. En este caso la fricción sí que es

<sup>26</sup> El punto de aplicación de la fuerza se analizará en el próximo apartado.

<sup>27</sup> Las fuerzas en Z e Y se compensarían en ambos lados del cuerpo

proporcional, ya que el aumento de un 42.5% en la superficie total del cuerpo se traduce en un incremento de un 43.5% en la fricción.

En el caso en el que se añaden tramos rectos a un casco de relación L/D y longitud fija, han aumentado ambos factores del arrastre. A pesar de que la sección transversal se ha mantenido constante, el efecto de la presión ha aumentado en un incremento del tramo recto del 70% de la longitud del cuerpo, un 177% respecto al valor original, mientras que por parte de la fricción, el aumento ha sido de un 11% frente a un crecimiento del 30% de la superficie total.

En cuanto a la inclusión de aletas en el cuerpo, su desplazamiento longitudinal a lo largo del cuerpo es indiferente a las fuerzas de arrastre, ya que al incidir el fluido en un ángulo de 0°, la superficie proyectada y la superficie total son constantes para cualquier posición de las aletas. No obstante, de haber aletas a no haber sí que se produce un incremento de las fuerzas de arrastre, de un 16.5% por presión y de un 29.5% por fricción.

Si se considera la variación del tamaño de las aletas, varía la superficie total y proyectada del cuerpo. Por lo tanto, al aumentar la altura de las aletas aumenta la superficie proyectada en el plano normal a la incidencia del fluido y la superficie total del cuerpo, y por ende el arrastre debido a la presión y a la fricción respectivamente.

Un caso un tanto especial es aquel en que se consideran varias posiciones del casco respecto a la dirección de incidencia del fluido, dadas por un ángulo de giro ( $\beta$ ) y otro de cabeceo ( $\alpha$ ). En esta situación sí que se consideran todas las componentes en X, Y y Z, (la dirección de aplicación del fluido no tiene por qué coincidir con el eje longitudinal del cuerpo). Los valores máximos de presión coinciden en los puntos en que el cuerpo presenta una mayor superficie proyectada el plano normal de incidencia del fluido (90°), siendo mínimo el aporte de la presión (la superficie tangencial al fluido es muy pequeña). Cuando la posición del cuerpo respecto al fluido es de 0°, se produce el efecto contrario, valor mínimo de la presión y máximo de la fricción. Notar que hay inclinaciones para las cuales son máximas los valores de Y y Z (en aquellos ángulos en que la proyección del vector normal a la superficie proporciona valores altos en Y y Z).

Estas conclusiones parecen rebatir la fórmulas teóricas que se han presentado, pero no es así. En este análisis no se ha tenido en cuenta que el factor  $C_f$  y  $C_p$  son dependientes del número de Reynolds y de la forma del cuerpo. El arrastre debido a la presión es el resultado de multiplicar la presión por el vector normal a la superficie, mientras que el arrastre debido a la fricción resulta de la multiplicación de los esfuerzos tangenciales por el vector tangente a la superficie, proyectándose ambos en la dirección de aplicación de la fuerza. Esto implica que el área real a multiplicar debería considerar la curvatura del casco (que en cierta forma se considera al determinar el  $C_p$  o  $C_f$  en tablas en función de la forma del cuerpo). Esto justifica que en aquellas posiciones en que el casco este paralelo (o haya más superficie paralela) al fluido los tangenciales alcancen máximos, mientras que en las que está en perpendicular se alcancen mínimos (y a la inversa con las presiones), y que no se pueda comprobar la proporcionalidad indicada anteriormente.

La fuerza de arrastre total, se obtienen al multiplicar el coeficiente de arrastre (obtenido a partir de la forma del cuerpo y del número de Reynolds), por el área perpendicular, mediante la fórmula que se presenta a continuación. En ella se consideran los efectos de la fricción y de la presión.

$$F_a = C_d A_p \rho \frac{V_0^2}{2}$$

En los diferentes casos se ha observado que la aportación de la fricción a la fuerza de arrastre es muy menor que la de la presión, comportándose la fuerza de arrastre total de forma prácticamente calcada a cómo se comporta el arrastre debido a la presión.

Las causas que explican esta situación pueden ser el pequeño tamaño del casco<sup>28</sup> y la no consideración en el modelo de turbulencia factores de fabricación tales como la rugosidad del casco, pintura etc.

En cuanto a la modelización de la fuerza de arrastre total, se podría obtener una ecuación a partir de la interpolación de los puntos en tal de calcular el valor de la fuerza de arrastre para los diferentes casos con un valor intermedio de los diferentes parámetros. Se presenta las ecuaciones de la fuerza de arrastre ya que a nivel práctico es la única que interesa. Únicamente se considera el caso del barrido de L/D, de variación de la longitud y de variación de altura de las aletas, ya que la fuerza de arrastre es insensible a la posición de las aletas en el casco, y la variación de la posición del AUV respecto a la dirección de incidencia del fluido se tratará en otro apartado de forma más detallada.

F arrastre (variable)	x <sup>3</sup>	x <sup>2</sup>	x	Independiente	R <sup>2</sup>
L/D (mm/mm)	-16.626	403.49	-3314.7	11028	0.9969
L (%)	0.0069	-0.1595	11.627	1624.9	0.9872
H (mm)	-	0.0005	0.799	1966.4	0.9979

Ilustración 227. Ecuaciones de interpolación de la fuerza de arrastre

La fuerza de ajuste se ajusta mediante polinomios de tercer grado. El coeficiente R<sup>2</sup> indica la bondad del ajuste, siendo mejora a medida que se acerca a 1.

## 9.2. Punto de aplicación

El punto de aplicación de la fuerza de arrastre es otro de los parámetros que proporciona el NX6. El motivo de obtener el punto de aplicación es el de tener la posibilidad de calcular los momentos considerando la distancia existente entre ese punto y el centro de gravedad.

Este parámetro, según se ha indicado en el capítulo de análisis de las limitaciones del modelo, es bastante dependiente del tamaño de malla y del volumen del fluido, por lo que deben de ser analizados de forma muy cuidadosa.

<sup>28</sup> Hay que recordar que en el apartado de reglas de diseño se consideraban submarinos militares grandes, situándose la magnitud del arrastre debido a la fricción similar a la de la presión

En la mayoría de los ensayos, se ha observado una gran dispersión en lo referente a las posiciones del punto de aplicación en el plano ZY. Como se ha mencionado en el apartado anterior, es incoherente que el punto de aplicación de la fuerza caiga fuera del punto (0,0) cuando la dirección del fluido es coaxial a la del cuerpo, por lo que se ha de atribuir este fenómeno al tamaño de la malla o al tamaño del volumen del fluido. Las desviaciones son, en el peor de los casos del orden de 50-60mm como máximo en valores del orden de mínimo 350mm. No obstante, como regla general, la desviación en Y suele estar alrededor de los 40mm y en Z sobre los 20mm.

Esto que se ha comentado anteriormente no es aplicable al estudio de los giros del casco, ya que el punto de aplicación es dependiente de la posición relativa del casco respecto al fluido. El punto de aplicación de la fuerza, en el plano ZY (normal a la dirección de la aplicación del fluido) suele ser el centro geométrico del cuerpo proyectado en dicho plano. En cuanto a la posición en X, cuanto mayor sea el ángulo de cabeceo ( $\alpha$ ) más se desplazará hacia el centro del cuerpo (origen de coordenadas).

En cuanto a la posición en X, depende principalmente de la geometría del cuerpo. Cuando más “cuerpo” haya desplazado hacia un lado u otro, hacia esa dirección se moverá el punto de aplicación.

En el caso del barrido en L/D, el punto de aplicación se desplaza hacia la proa, debido a la forma del cuerpo (es más grande la superficie existente en proa que en popa). En cambio, cuando se aumenta el tramo recto éste se retrasará, ya que se reparte más equitativamente la superficie entre ambos extremos del casco. Cuando se incorporan las aletas, el punto se retrasa a medida que se colocan hacia proa, ya que aumentan el “peso” de la superficie en ese sentido.

### 9.3. Distribución de las tensiones

En este apartado se analizará como se distribuyen los esfuerzos a lo largo del casco del submarino, considerando la presión y los esfuerzos tangenciales sobre el casco de forma independiente.

En todos los cuerpos en los que el fluido incide en un ángulo de 0° se repite un mismo patrón. La presión máxima se encuentra en la nariz de proa, disminuyendo su valor hasta llegar al diámetro máximo, donde alcanza su mínimo, y volviendo a aumentar hasta que se alcanza otro máximo local en el extremo de popa. Las tensiones son prácticamente constantes para cada valor de X. Esto viene dado a partir de la ecuación de Bernoulli y de la velocidad del fluido alrededor del cuerpo.

$$\frac{V^2 \cdot \rho}{2} + p = \text{const}$$

En la expresión mencionada anteriormente se omite el término de la altura al ser prácticamente despreciable.

La velocidad en el extremo del casco es nula, por lo que la presión en ese punto es máxima (punto también llamado “stagnation point”). En el diámetro máximo del cuerpo, la

velocidad es máxima, por lo que la presión es mínima. En la popa la velocidad del agua vuelve a disminuir, por lo que la presión vuelve a aumentar.

En el caso en que la sección sea de diámetro constante, la presión y la velocidad también lo deberían ser, por lo que aquellas regiones rectas de los cascos que poseen tramos rectos que presentan valores puntuales mínimos de presión, se podrían considerar como errores.

En las aletas se pueden extrapolar de forma local las conclusiones obtenidas sobre el casco. En su ángulo de ataque la velocidad es mínima, siendo la presión máxima, mientras que en el tramo de máximo espesor la presión sería mínima al ser la velocidad mayor. En el borde de fuga de la aleta la velocidad descenderá y la presión volvería a aumentar.

Si se considera que el casco está orientado de diferentes formas respecto a la incidencia del fluido, la velocidad será mínima en las regiones que sean perpendiculares a esta y mínima en las que sean tangenciales, siendo la presión máxima y mínima respectivamente. En resumen, la presión dependerá de cuanto desvíe el cuerpo las líneas aerodinámicas que envuelven al cuerpo.

Los esfuerzos tangenciales son completamente contrapuestos a la presión, ya que dependen de forma directamente proporcional del gradiente de la velocidad. Por tanto, se podría concluir que aquellos puntos en que las presiones sean mínimas, los esfuerzos tangenciales serán máximos. La fórmula que justifica esto, siendo  $c_f$  el coeficiente de fricción  $\rho$  la densidad del agua y  $V$  la velocidad en la capa límite:

$$\tau = c_f \frac{\rho V^2}{2}$$

Esto implica que, cuando mayor sea la velocidad alrededor del cuerpo, aumentarán los esfuerzos tangenciales.

A continuación se muestran varios ejemplos de las situaciones comentadas anteriormente.

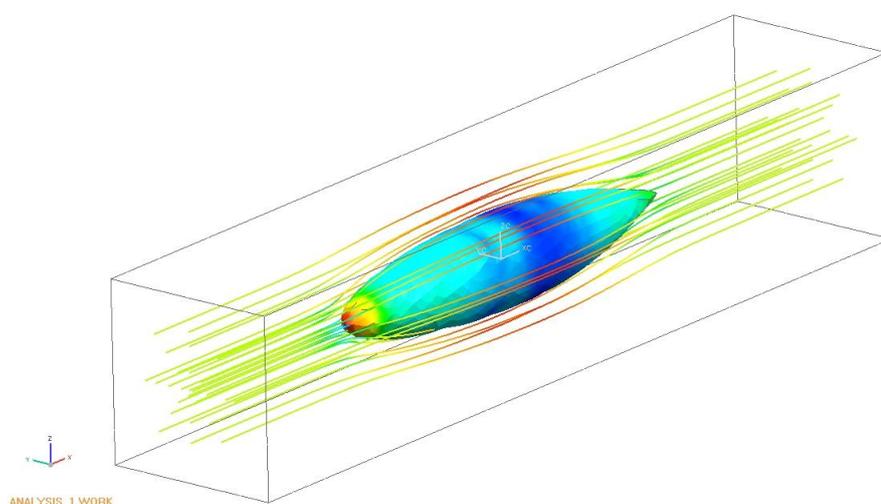
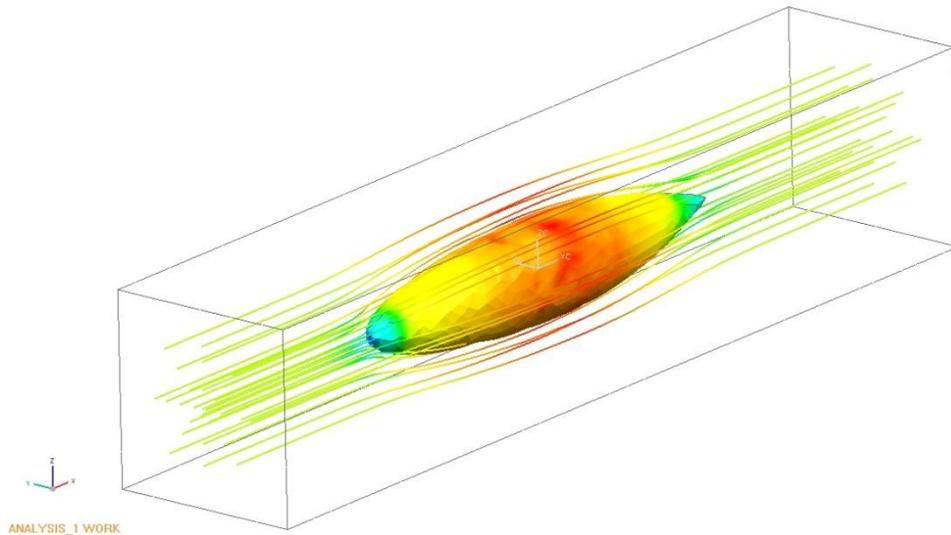
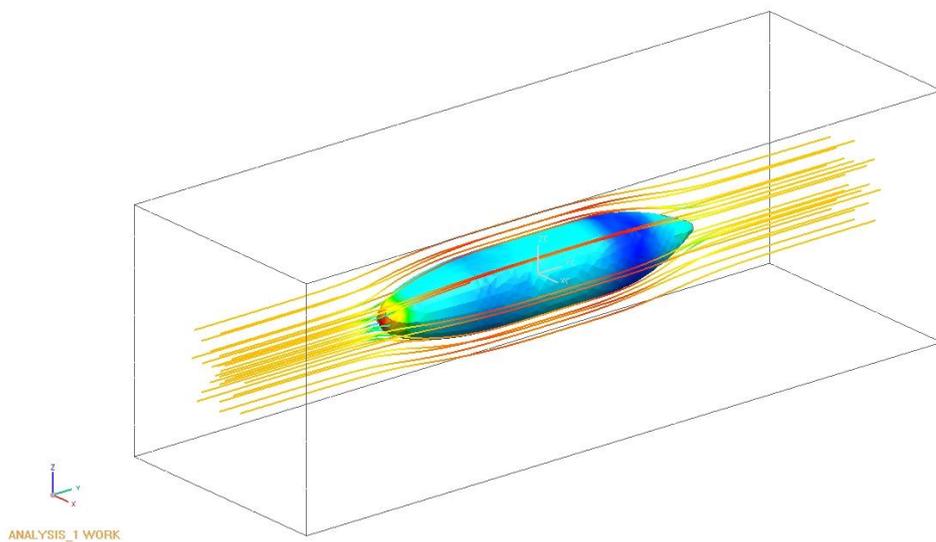


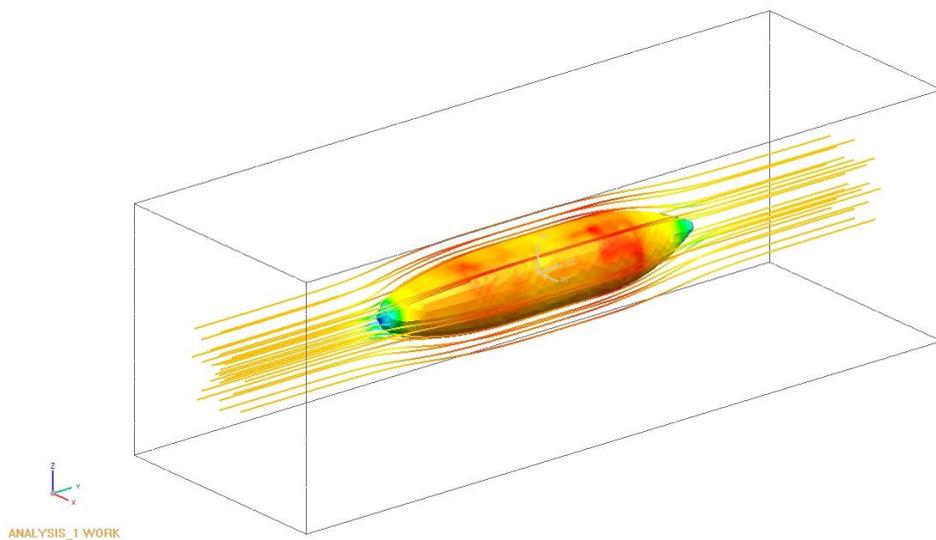
Ilustración 228. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo base



**Ilustración 229. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo base**



**Ilustración 230. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo con tramo recto**



**Ilustración 231. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo con tramo recto**

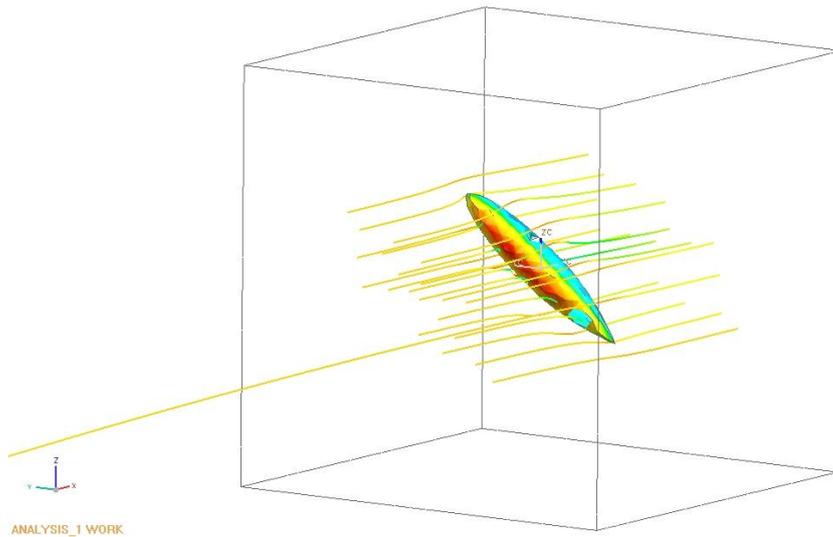


Ilustración 232. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo  $\alpha=60^\circ$  y  $\beta=60^\circ$

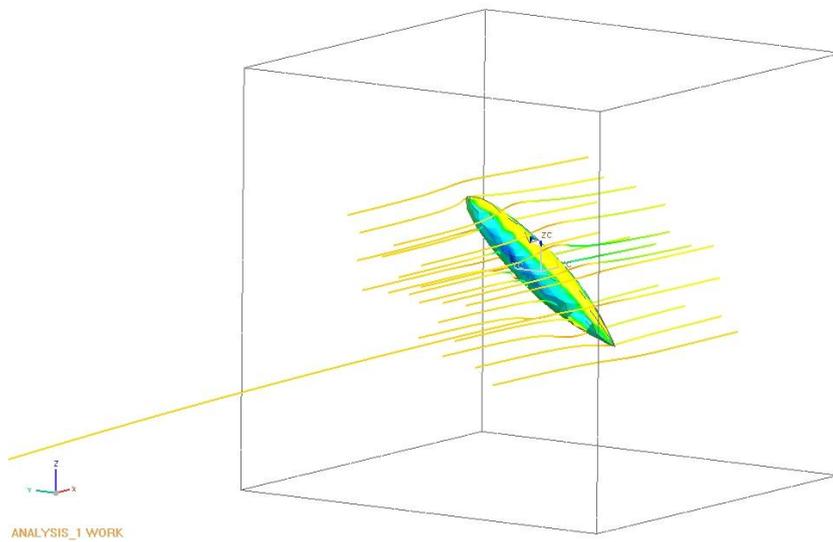


Ilustración 233. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo  $\alpha=60^\circ$  y  $\beta=60^\circ$

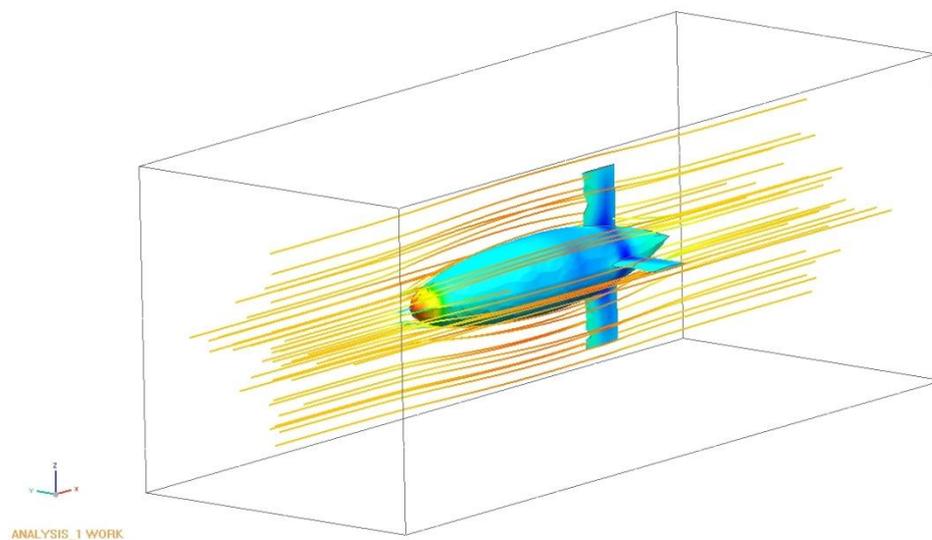


Ilustración 234. Líneas aerodinámicas y distribución de presión con aletas a  $X=400\text{mm}$

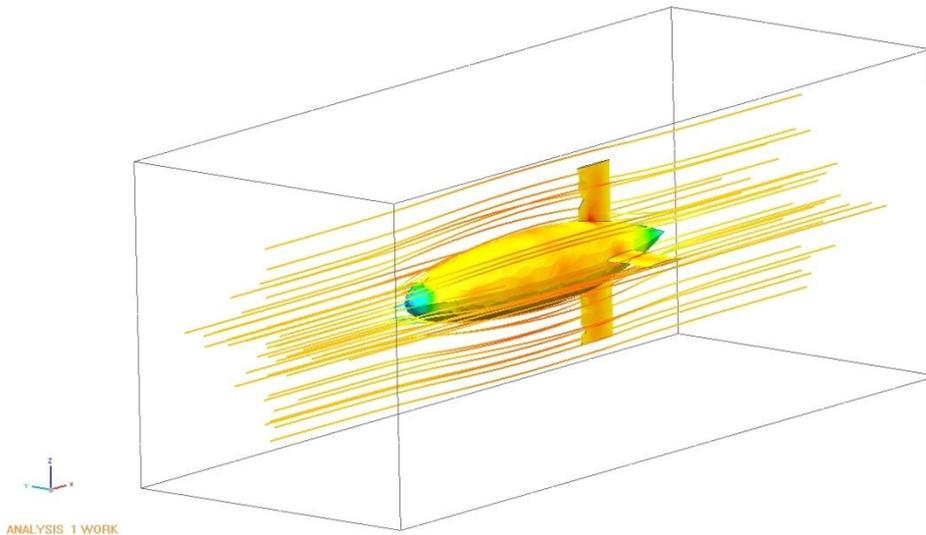


Ilustración 235. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo aletas a  $X=400\text{mm}$

## 9.4. Evolución presiones y esfuerzos tangenciales máximos

En el ejercicio anterior se ha observado cómo se distribuyen las tensiones máximas, y ahora se va a tratar como evolucionan los valores máximos al variar los parámetros que se han modificado en los ensayos realizados a lo largo de la tesina.

Los esfuerzos que aparecen sobre el cuerpo dependen de la ecuación de Bernouilli presentada anteriormente, cuya constante sería característica para cada tipo de cuerpo. Salvo en el caso de la variación de la posición y de la altura de las aletas, los valores máximos varían de forma apreciable. En los dos primeros casos el valor máximo durante el barrido del parámetro es constante ya que la región en la que se producen los máximos, tanto para la presión en la superficie del casco como la de los esfuerzos tangenciales, es la misma. Ello implica que la velocidad y la presión en esta región son prácticamente idénticas, siendo invariable la constante de Bernouilli.

En los casos en que si que se produce variación de los máximos, estos se pueden correlacionar con el parámetro que se varía en cada caso (relación  $L/D$  y longitud del tramo recto) con diferentes bondades de ajuste. En ambos casos se ha observado que la evolución del máximo de la presión se ajusta mejor que el máximo de los esfuerzos tangenciales, pero nunca con la misma bondad de ajuste con la que se puede ajustar la fuerza de arrastre. Es necesario apuntar que cuanto mayor sea esta constante de Bernouilli, mayores serán los valores máximos, ya que en el máximo de presión la velocidad será prácticamente 0, aumentando más la presión, y en el máximo de esfuerzos tangenciales la velocidad será mayor.

Al aumentar la relación  $L/D$  la presión máxima disminuye, disminuyendo un 36% entre  $L/D=3$  y  $L/D=10$ , En el mismo rango de variación, el máximo esfuerzo tangencial se comporta de forma más desordenada, existiendo una diferencia de un 8.6% entre el valor máximo (relación  $L/D=3$ ) y el valor mínimo ( $L/D=5$ ).

A diferencia de el ensayo anteriormente mencionado, al incrementar la longitud del tramo recto, la presión máxima aumenta hasta un 26% entre un valor de 0% y de 70% de tramo recto incluido. En lo referente a los esfuerzos tangenciales, se comporta de una forma ciertamente caótica, al igual que en el caso anterior, habiendo una diferencia entre el máximo (L=0%) y el mínimo (L=40%) de un 21%.

La elevada dispersión en el máximo de los esfuerzos tangenciales se podría atribuir a errores en el mallado del volumen del fluido que envuelve al casco.

Las correlaciones a las que se ha hecho mención anteriormente son las que se presentan.

Presión máxima (variable)	x <sup>3</sup>	x <sup>2</sup>	x	Independiente	R <sup>2</sup>
L/D (mm/mm)	0.0002	0.004	-0.0299	0.1142	0.92
L (%)	3E-08	-2E-6	0.0001	0.0467	0.9137

E. tangenciales máximos (variable)	x <sup>3</sup>	x <sup>2</sup>	x	Independiente	R <sup>2</sup>
L/D (mm/mm)	-1E-7	5E-6	-4E-5	0.0003	0.8456
L (%)	-9E-10	1E-7	-4E-6	0.0002	0.8788

Ilustración 236. Ecuaciones interpolación tensiones en el cuerpo

En cuanto a la variación de los esfuerzos máximos en función de la velocidad y el ángulo de incidencia del fluido, se analizará en el apartado correspondiente.

## 9.5. Análisis de la variación de la velocidad

En el apartado 7.3 se ha analizado la variación de la fuerza de arrastre y los esfuerzos a los que es sometido el cuerpo al modificar la velocidad. En los ensayos mencionados se ha verificado que un incremento de la velocidad viene acompañado de un aumento de los parámetros mencionados. El aumento de la fuerza de arrastre y de los valores máximos de los esfuerzos en la superficie se produce de forma cuadrática, como se podría esperar analizando las ecuaciones a partir de las que se calculan.

$$F_{a,fricción} = C_f \rho A_t \cdot \frac{V_0^2}{2} = K_{fricción} \cdot V_0^2$$

$$F_{a,presión} = C_p A_p \rho \frac{V_0^2}{2} = K_{presión} \cdot V_0^2$$

$$F_a = C_d A_p \rho \frac{V_0^2}{2} = K_{arrastre} \cdot V_0^2$$

$$\frac{V^2 \cdot \rho}{2} + p = cnt \rightarrow p \approx K_p \cdot V^2$$

$$\tau = c_f \frac{\rho V^2}{2} = K_\tau \cdot V^2$$

No obstante, los datos obtenidos demuestran que el ajuste es mejor para en el caso de un polinomio de segundo grado, con los coeficientes que se presentan a continuación. No obstante, para agilizar el cálculo las correlaciones se aproximarán a la forma  $C = K \cdot V^2$ . Sería interesante ajustar un valor de K para el rango de velocidades específico en que trabaje el AUV, ya que cuanto menor sea este, mejor será el ajuste a la forma mencionada.

$F_{\text{arrastre}} (V(m/s))$	$x^2$	$x$	Independiente	$R^2$	K
3	40.393	46.729	-214	1	41.91
6	18.292	57.361	-276	1	20.12
10	12.756	66.324	-315.4	1	14.88

$F_{\text{fricción}} (V(m/s))$	$x^2$	$x$	Independiente	$R^2$	K
3	2.8669	27.733	-133.16	1	3.75
6	3.5816	34.324	-163.42	1	4.68
10	4.1249	39.721	-190.18	1	5.39

$F_{\text{presión}} (V(m/s))$	$x^2$	$x$	Independiente	$R^2$	K
3	37.494	21.623	-103.2	1	38.18
6	14.801	23.134	-113	1	15.53
10	8.6329	26.849	-128.6	1	9.49

Presión superficie máxima (V(m/s))	$x^2$	$x$	Independiente	$R^2$	K
3	0.0006	0.0002	-0.0007	1	0.000559
6	0.0004	0.0003	-0.0014	1	0.000436
10	0.0003	0.0005	-0.0025	1	0.000346

Esfuerzo tangencial máximo (V(m/s))	$x^2$	$x$	Independiente	$R^2$	K
3	2E-6	2E-5	-8E-5	1	2.22E-6
6	2E-6	2E-5	-8E-5	1	2.07E-6
10	2E-6	2E-5	-8E-5	1	2.17E-6

Ilustración 237. Ecuaciones de interpolación en función de la velocidad

Sobre estos resultados sería conveniente realizar un par de consideraciones. El valor de K es el valor promediado de K para cada una de las velocidades estudiadas, y el valor de  $F_{\text{arrastre}}$  es el valor de su magnitud, pudiéndose calcular cada una de las componentes mediante las correlaciones<sup>29</sup>:

$$F_{\text{arrastre},x} = K_{\text{arrastre},x} \cdot V_0^2$$

$$F_{\text{arrastre},y} = K_{\text{arrastre},y} \cdot V_0^2$$

$$F_{\text{arrastre},z} = K_{\text{arrastre},z} \cdot V_0^2$$

<sup>29</sup> En este caso los valores de  $F_{\text{arrastre},y}$  y  $F_{\text{arrastre},z}$  lo atribuimos a error de mallado, ya que deberían ser nulas. Ello implica que  $K_{\text{arrastre},y} = K_{\text{arrastre},z} = 0$ .

Además de permitir obtener la fuerza de arrastre y los esfuerzos máximos en el casco para cualquier velocidad de forma directa mediante la obtención del parámetro K, estos ensayos permiten la obtención de una tabla que permite calcular directamente la fuerza de arrastre y los esfuerzos máximos para cualquier velocidad y cualquier relación L/D de volumen  $0.25\text{m}^3$  de forma directa (considerando que el ángulo de incidencia del fluido es de  $0^\circ$ ). La interpolación de los puntos se ha realizado considerando splines de grado 3.

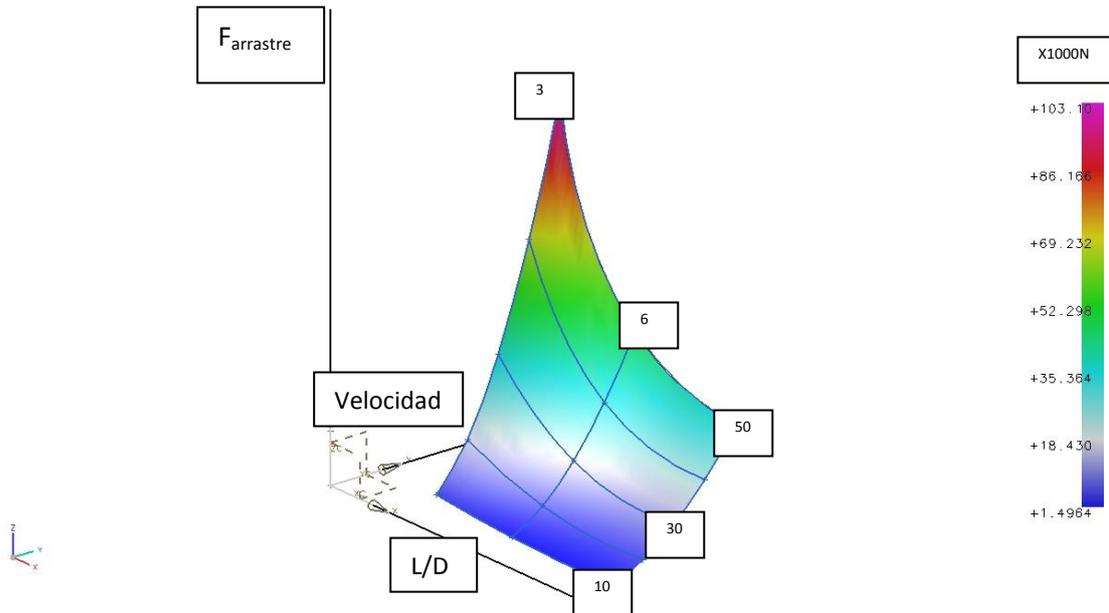


Ilustración 238. Superficie paramétrica fuerza de arrastre función velocidad y L/D

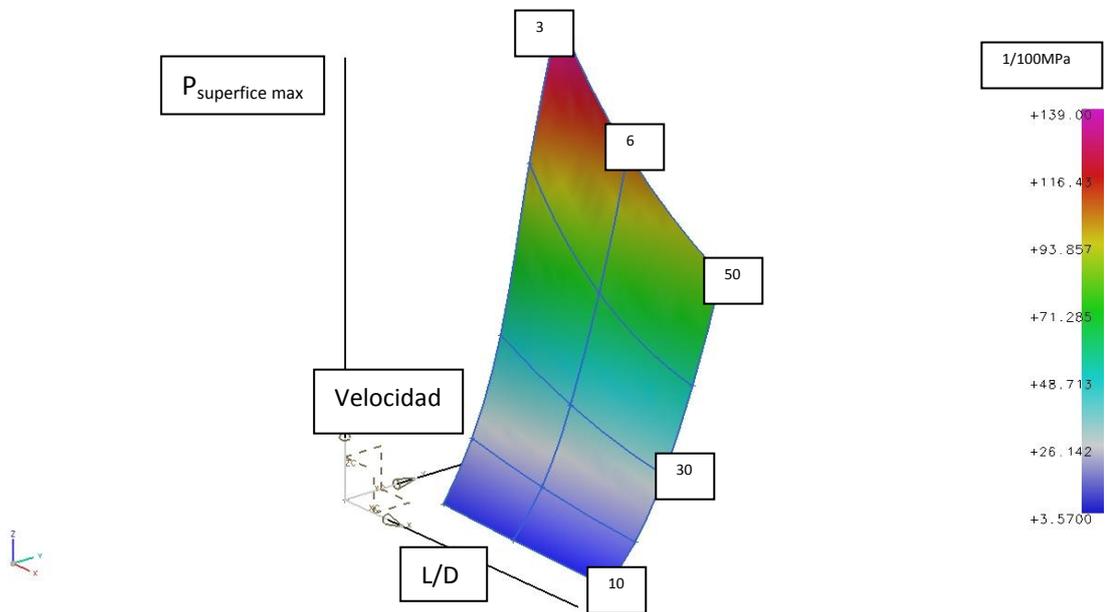


Ilustración 239. Superficie paramétrica presión en superficie máx. función velocidad y L/D

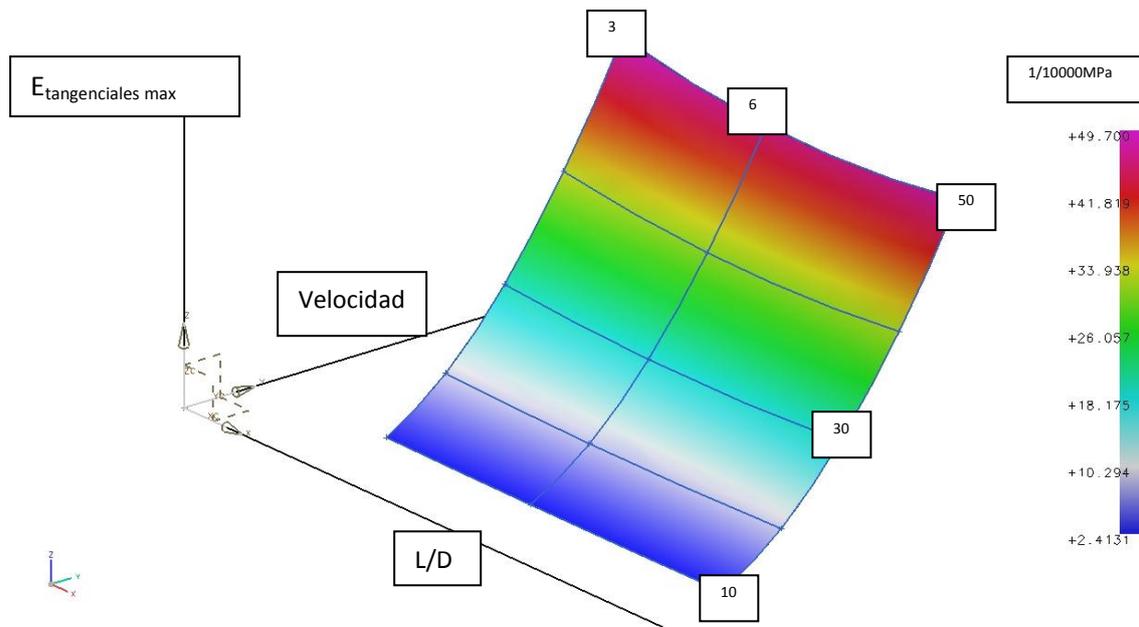


Ilustración 240. Superficie paramétrica esfuerzos tangenciales máx. función velocidad y L/D

## 9.6. Análisis del ángulo de giro

Considerando las conclusiones obtenidas en el apartado anterior, se podría calcular de forma directa para cualquier velocidad la fuerza de arrastre y los esfuerzos máximos a los que esté sometido el cuerpo conociendo el valor de la K correspondiente. Por ello, se han realizado los esfuerzos pertinentes para calcular la K de cada uno de los parámetros para diferentes ángulos de incidencia del fluido,  $\alpha$  (giro respecto a Y, cabeceo) y  $\beta$  (giro respecto a Z, Giro). La obtención de estos valores se mostrará al final de este apartado.

El análisis de las gráficas dice que cuanto mayor sea la superficie proyectada en el plano normal a la incidencia del fluido, mayor serán la fuerza de arrastre resultante y los esfuerzos a los que se someta al cuerpo. Esto se muestra perfectamente en aquellas posiciones en las que el cuerpo este girado  $90^\circ$  en cualquiera de los dos ángulos. Al ser el cuerpo axisimetrico, cuando el ángulo de cabeceo  $\alpha$  sea igual a  $90^\circ$ , el valor para cualquier  $\beta$  (giro) de cualquier parámetro será el mismo, ya que siempre se proyecta la misma superficie independientemente de este ángulo (poseyendo el mismo valor que en el caso  $\alpha=0$ ,  $\beta=90^\circ$ , intercambiando los valores de las componentes Z e Y). Los mínimos se producen para los valores en los que el eje longitudinal del casco es paralelo a la dirección de incidencia del fluido.

Otro factor a destacar es la presencia de componentes diferentes a X. Las componentes en Z e Y son máximas cuando el cuerpo forma un ángulo de  $45^\circ$  en  $\beta$  y  $\alpha$  respectivamente. De hecho la gráfica de una es prácticamente la otra girada  $90^\circ$ . Sus mínimos se producen en aquellas posiciones en las que sola hay componentes en X, es decir en  $0$  y  $90^\circ$ . No obstante, la mayor aportación a la resultante total se sigue realizando en el eje de las X, la cual se comporta de forma idéntica a la magnitud.

La presión de arrastre se comporta, como es habitual, de forma análoga a la fuerza de arrastre total, mientras que la fricción de arrastre es máxima para incidencias coaxiales con el casco y mínima para ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  de  $90^\circ$ . Las componentes de este último parámetro en Z e Y son prácticamente despreciables. Ello sigue el patrón de comportamiento de ambos parámetros identificado en el punto 8.1.

En cuanto a los esfuerzos máximos que sufre el cuerpo, se podrían aplicar los mismos razonamientos que en las fuerzas de arrastre. Máximos para ángulos de  $90^\circ$  tanto para presiones en la superficie como para esfuerzos tangenciales, con mínimos en  $0$  y  $180^\circ$ .

Para concluir este apartado, se muestran las gráficas a partir de las cuales se obtiene los diferentes valores de K para la obtención de las fuerzas de arrastre y los esfuerzos máximos. Se incluye una tabla que muestra los valores a partir de los cuales se ha interpolado con splines cúbicas.

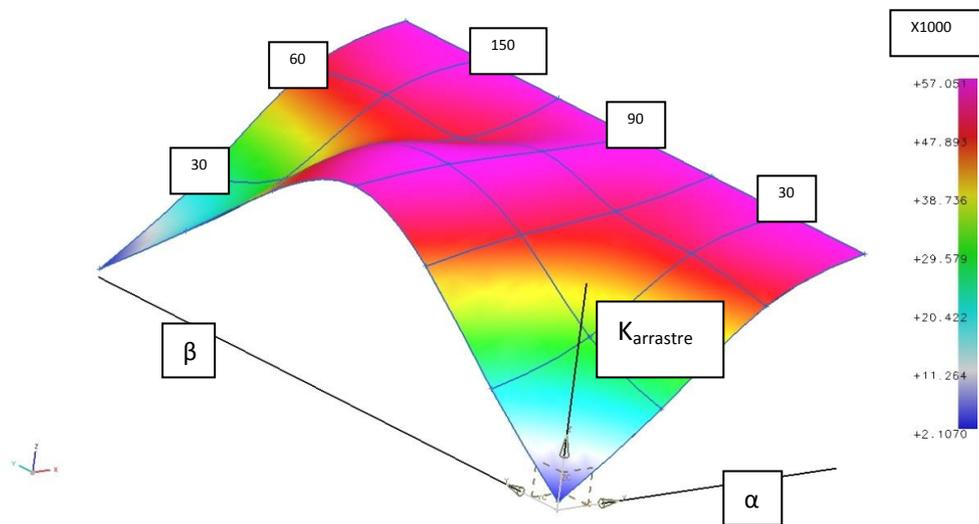


Ilustración 241.  $K_{\text{arrastre}}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

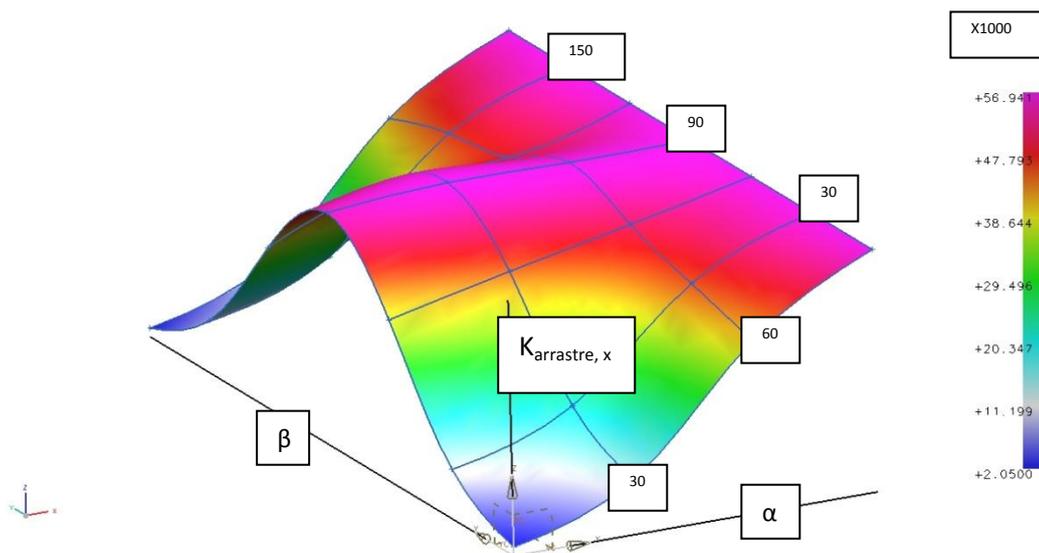


Ilustración 242.  $K_{\text{arrastre},x}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

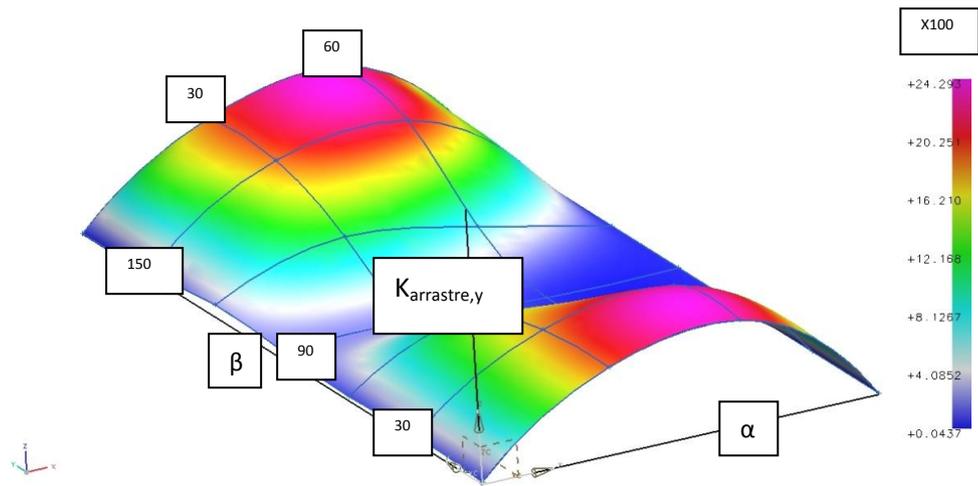


Ilustración 243.  $K_{arrastr,y}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

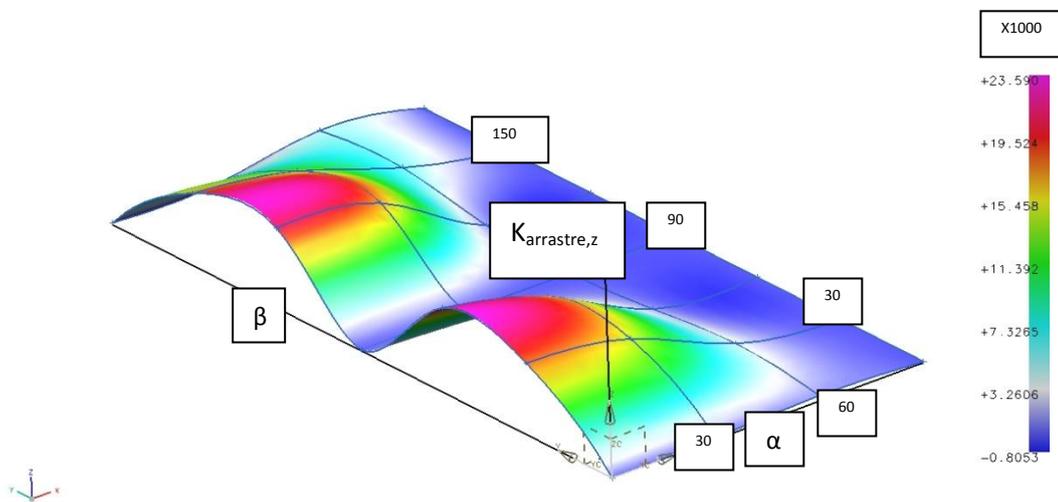


Ilustración 244.  $K_{arrastr,z}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

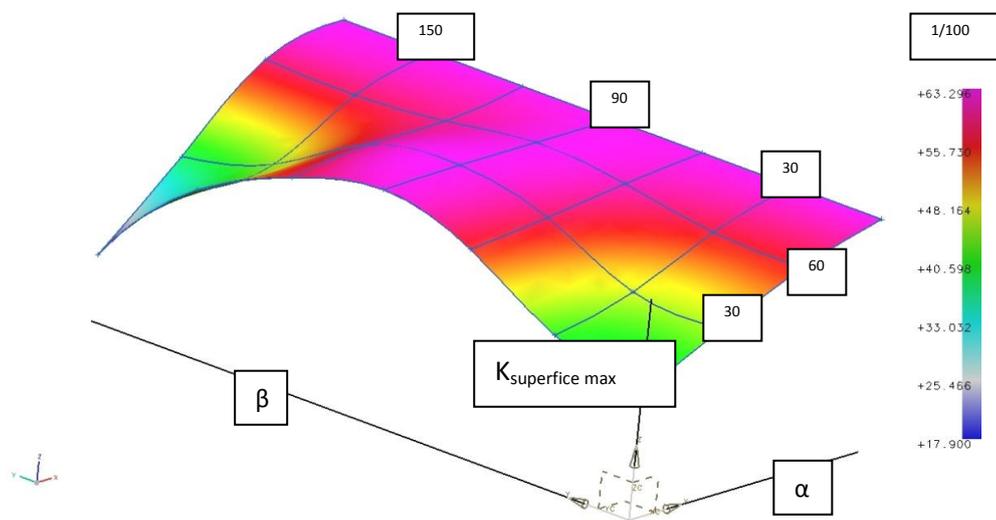


Ilustración 245.  $K_{superficie,máx.}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

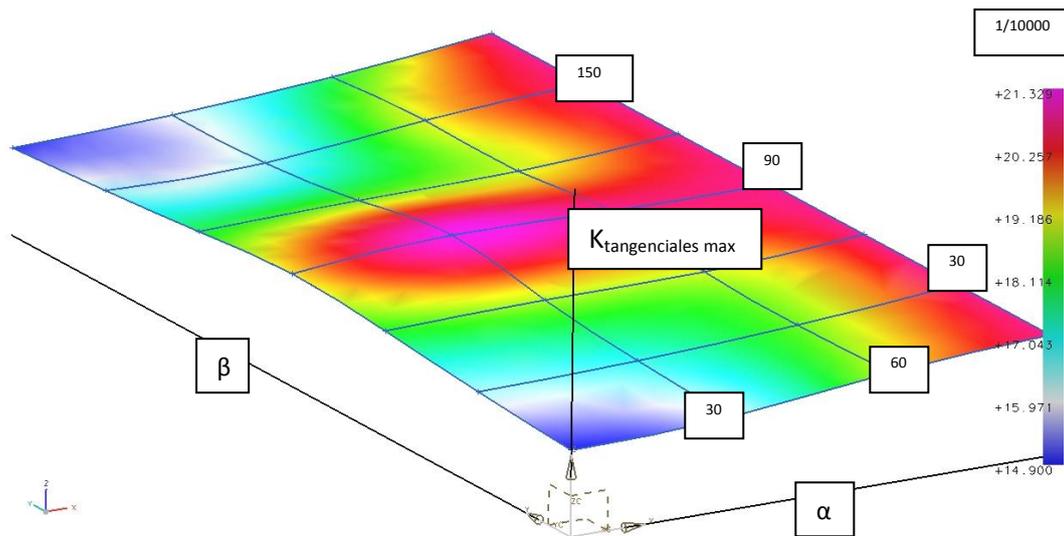


Ilustración 246.  $K_{\text{tangenciales máx.}}$  en función de  $\alpha$  y  $\beta$

## 9.7. Elaboración de un modelo

La realización de los ensayos anteriormente citados, permite la obtención de una constante,  $K_{\text{arrastre}}$ , que permite calcular de forma inmediata la fuerza de arrastre sobre un cuerpo a una velocidad dada. De forma análoga se puede calcular la presión en la superficie y los esfuerzos tangenciales máximos. Por tanto, a partir de las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado se obtendrá un modelo dinámico para el casco.

Las consideraciones realizadas para este modelo son:

- El peso se compensa con la fuerza de flotación del cuerpo
- El casco posee un propulsor vectorial, es decir, produce fuerza en X, Y y Z.
- La fuerza de arrastre se aplicara en el punto en que intersekte el cuerpo con la dirección de incidencia del agua.

Considerando un incremento de tiempo  $\Delta t$ , indicando el subíndice "i" un instante de tiempo, se pueden aplicar estas fórmulas para determinar la velocidad y la posición de una partícula:

$$x_{i+1} = x_i + V_i^x \Delta t + \frac{a_i^x \Delta t^2}{2}$$

$$y_{i+1} = y_i + V_i^y \Delta t + \frac{a_i^y \Delta t^2}{2}$$

$$z_{i+1} = z_i + V_i^z \Delta t + \frac{a_i^z \Delta t^2}{2}$$

$$V_{i+1}^x = V_i^x + a_i^x \Delta t$$

$$V_{i+1}^y = V_i^y + a_i^y \Delta t$$

$$V_{i+1}^z = V_i^z + a_i^z \Delta t$$

Quedando de forma matricial como sigue:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} V^x & 0 & 0 \\ 0 & V^y & 0 \\ 0 & 0 & V^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta t \\ \Delta t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a^x & 0 & 0 \\ 0 & a^y & 0 \\ 0 & 0 & a^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t^2 \\ \Delta t^2 \\ \Delta t^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V^x \\ V^y \\ V^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} V^x \\ V^y \\ V^z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} a^x & 0 & 0 \\ 0 & a^y & 0 \\ 0 & 0 & a^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta t \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

A partir del valor de la posición, la velocidad y la aceleración el momento anterior, se puede obtener el valor de la velocidad y la posición en el momento actual.

A partir de la velocidad, se puede obtener la fuerza de arrastre a la que se somete al cuerpo, mediante la ecuación que sigue, siendo  $K_{\text{arrastre}}$  tabulada función del ángulo de cabeceo ( $\alpha$ ) y giro ( $\beta$ ):

$$\begin{bmatrix} F_{\text{arrastre}}^x \\ F_{\text{arrastre}}^y \\ F_{\text{arrastre}}^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} K_{\text{arrastre}}^x(\alpha, \beta) & 0 & 0 \\ 0 & K_{\text{arrastre}}^y(\alpha, \beta) & 0 \\ 0 & 0 & K_{\text{arrastre}}^z(\alpha, \beta) \end{bmatrix}_{i+1} \begin{bmatrix} |V|^2 \\ |V|^2 \\ |V|^2 \end{bmatrix}_{i+1}$$

Por otro lado, las fuerzas de arrastre se deberán representar en el sistema de referencia del cuerpo, por lo que habrá que presentarlas en el sistema de referencia del volumen del fluido. Ello implica aplicar una matriz de rotación a las fuerzas de tal manera que gire su sistema de referencia.

$$\begin{bmatrix} F_{\text{arrastre}}^x \\ F_{\text{arrastre}}^y \\ F_{\text{arrastre}}^z \end{bmatrix}_{i+1}^{\text{fluido}} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{i+1} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}_{i+1} \begin{bmatrix} F_{\text{arrastre}}^x \\ F_{\text{arrastre}}^y \\ F_{\text{arrastre}}^z \end{bmatrix}_{i+1}^{\text{cuerpo}}$$

$$\begin{bmatrix} F_{\text{arrastre}}^x \\ F_{\text{arrastre}}^y \\ F_{\text{arrastre}}^z \end{bmatrix}_{i+1}^{\text{fluido}} = \begin{bmatrix} F_{\text{arrastre}}^x \cos(\alpha) \cos(\beta) - F_{\text{arrastre}}^y \cos(\alpha) \sin(\beta) - F_{\text{arrastre}}^z \cos(\alpha) \\ F_{\text{arrastre}}^x \sin(\beta) + F_{\text{arrastre}}^y \cos(\beta) \\ F_{\text{arrastre}}^x \sin(\alpha) \cos(\beta) - F_{\text{arrastre}}^y \sin(\alpha) \sin(\beta) + F_{\text{arrastre}}^z \cos(\alpha) \end{bmatrix}_{i+1}$$

Una vez conocida la fuerza proporcionada por el motor, se procederá a conocer la aceleración que desarrolla. Para ello se aplica la primera ley de Newton<sup>30</sup>

<sup>30</sup> La fuerza de arrastre se considera siempre de signo contrario a la fuerza realizada por el motor.

$$m[a]_{i+1} = [F_m]_{i+1} + [F_{arrastre}]_{i+1}$$

Para obtener el giro del cuerpo será necesario considerar los momentos de inercia del cuerpo, los cuales serán principales y constantes en el tiempo, y los momentos que se producen sobre el cuerpo. La matriz de inercia es la que se presenta a continuación:

$$[I] = \begin{bmatrix} I^x & 0 & 0 \\ 0 & I^y & 0 \\ 0 & 0 & I^z \end{bmatrix}$$

Los momentos son el producto vectorial de la distancia del punto de aplicación de la fuerza al centro de gravedad. Los momentos que producirá el arrastre serán:

$$\begin{bmatrix} M_{arrastre}^x \\ M_{arrastre}^y \\ M_{arrastre}^z \end{bmatrix}_{i+1} = [F_{arrastre}]_{i+1} \times [d_{cg}]_{i+1}$$

$$\begin{bmatrix} M_{arrastre}^x \\ M_{arrastre}^y \\ M_{arrastre}^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} F_{arrastre}^y d_g^x - F_{arrastre}^z d_g^y \\ F_{arrastre}^z d_g^x - F_{arrastre}^x d_g^z \\ F_{arrastre}^x d_g^y - F_{arrastre}^y d_g^x \end{bmatrix}_{i+1}$$

Considerando que la componente del motor es colineal al eje del casco, se puede realizar la siguiente consideración.

$$[I] \begin{bmatrix} \Omega^x \\ \Omega^y \\ \Omega^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} F_{arrastre}^y d_g^x - F_{arrastre}^z d_g^y \\ F_{arrastre}^z d_g^x - F_{arrastre}^x d_g^z + F_m^z L/2 \\ F_{arrastre}^x d_g^y - F_{arrastre}^y d_g^x + F_m^y L/2 \end{bmatrix}_{i+1}$$

$$\begin{bmatrix} \Omega^x \\ \Omega^y \\ \Omega^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \frac{F_{arrastre}^y d_g^x - F_{arrastre}^z d_g^y}{I^x} \\ \frac{F_{arrastre}^z d_g^x - F_{arrastre}^x d_g^z + F_m^z L/2}{I^y} \\ \frac{F_{arrastre}^x d_g^y - F_{arrastre}^y d_g^x + F_m^y L/2}{I^z} \end{bmatrix}_{i+1}$$

Integrando dichas ecuaciones se obtienen el movimiento angular uniformemente acelerado, cuyos vectores de posición angular y velocidad angular vienen dados por:

$$\begin{bmatrix} \omega^x \\ \omega^y \\ \omega^z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \omega^x \\ \omega^y \\ \omega^z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} \Omega^x & 0 & 0 \\ 0 & \Omega^y & 0 \\ 0 & 0 & \Omega^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta t \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \gamma \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} \omega^x & 0 & 0 \\ 0 & \omega^y & 0 \\ 0 & 0 & \omega^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta t \\ \Delta t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Omega^x & 0 & 0 \\ 0 & \Omega^y & 0 \\ 0 & 0 & \Omega^z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \Delta t^2 \\ \Delta t^2 \\ \Delta t^2 \end{bmatrix}$$

Llegado a este punto, ya se tiene resuelta la posición y la inclinación del cuerpo en el instante inicial. No obstante, el giro relativo del cuerpo solo interesa  $\alpha$  y  $\beta$  para calcular  $K_{arrastre}$ .

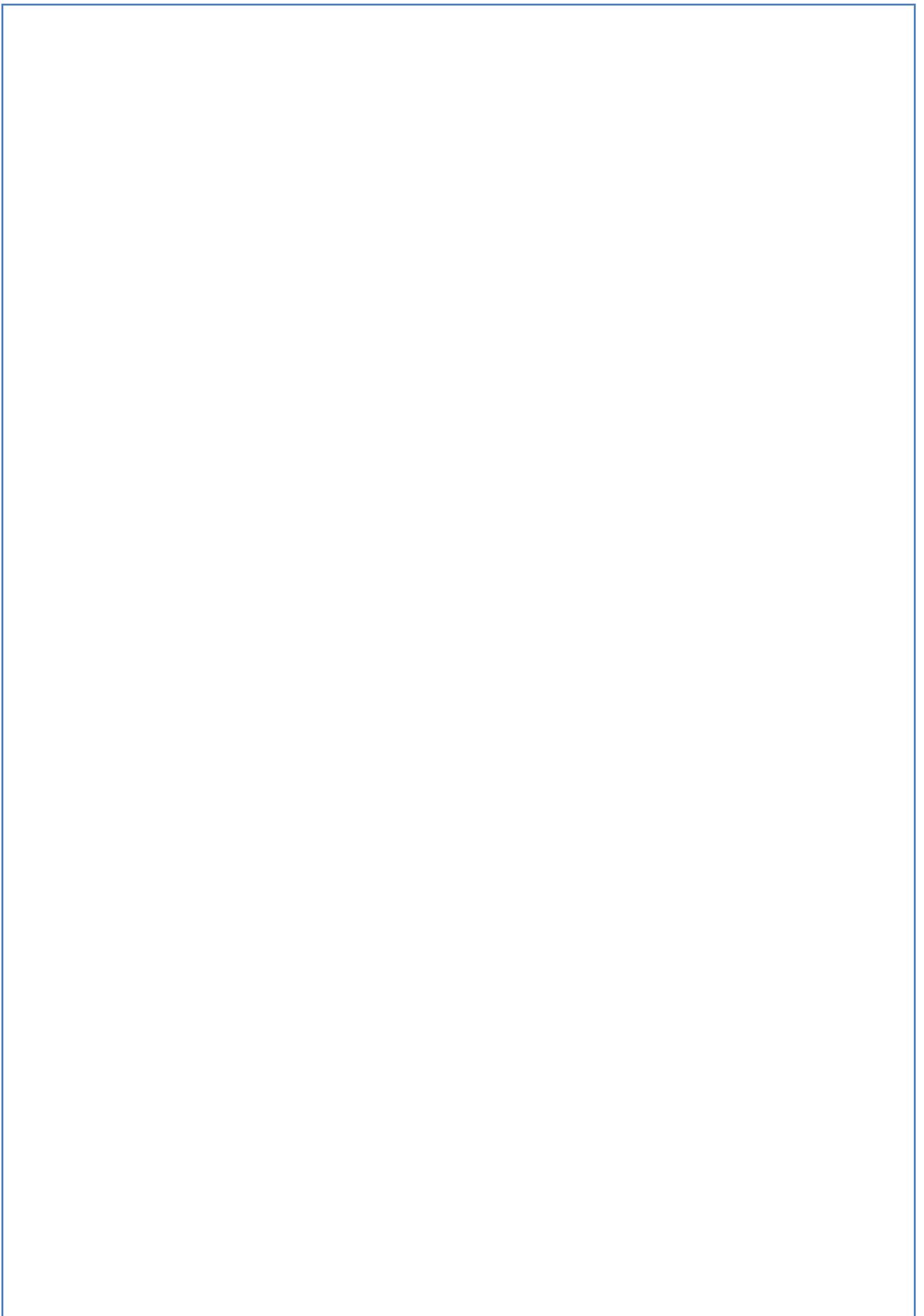
Para obtener los esfuerzos máximos en el cuerpo, solo se debería de multiplicar la K obtenida por el modulo al cuadrado del vector velocidad, tal como sigue.

$$P_{max} = K_{psup}|V|^2$$

$$E_{max} = K_{et}|V|^2$$

# BIBLIOGRAFÍA

---



## 10. Bibliografía

- Matt, Robert L: *Applied fluid mechanics*, Prentice Hall, 2007
- Roberson, John A: *Engineering fluids mechanics*, John Wiley & sons, New York 1997
- Matt, Robert L: *Applied fluid mechanics*, Prentice Hall, Singapore 2006
- Rodi, Wolfgan: *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of art review*, A.A Salkema, Rotterdam 2000
- Jowbert, P.N: *Some aspects of submarine design; Part1. Hydrodynamics*, DSTO. Platforms Sciences laboratory, Victoria 2004
- Ostafichuk, Peter M: *AUV hydrodynamics and modeling improved control*, University of British Columbia, 2004
- Aguirre, Freddy A: *Análisis aerodinámico de vehículo para la competencia Eco-Shell*, Universidad Politécnica de Valencia, Máster CAD-CAM-CIM, Valencia 2009



# LISTA DE IMÁGENES

---



## 11. Lista de imágenes

Ilustración 1. Esquema típico de un AUV, National Oceanographic Institute (India).....	13
Ilustración 2 Dolphin AUV, University of British Columbia (EE.UU).....	14
Ilustración 3. ISE MUN Explorer, University of Newfoundland (Canada) .....	15
Ilustración 4. Familia Hugin, Kongsberg Maritime.....	16
Ilustración 5. Hugin 1000, Kongsberg Maritime.....	16
Ilustración 6. Distribución de presiones en un cuerpo hidrodinámico .....	19
Ilustración 7. Detalle arrastre en cuerpo aerodinámico .....	20
Ilustración 8. Placa paralela a un flujo .....	21
Ilustración 9. Placa perpendicular a un flujo.....	22
Ilustración 10. Distribución de presiones en una placa .....	23
Ilustración 11. Coeficientes de arrastre bidimensionales.....	24
Ilustración 12. Coeficientes de arrastre tridimensionales (I) .....	25
Ilustración 13. Coeficientes de arrastre tridimensionales (II) .....	26
Ilustración 14. Componentes fuerzas en cuerpo aerodinámico .....	29
Ilustración 15. Evolución arrastre vs L/D.....	30
Ilustración 16. Ejemplo de formas de casco.....	30
Ilustración 17. Capa límite en el casco de un submarino.....	31
Ilustración 18. Coeficiente fricción vs Re .....	33
Ilustración 19 Menú iniciar NX6.....	37
Ilustración 20. Comando de croquis.....	38
Ilustración 21. Ventana de croquis.....	38
Ilustración 22.Herramientas croquis 1 .....	38
Ilustración 23. Herramientas croquis 2 .....	39
Ilustración 24. Referencias casco elipsoidal.....	39
Ilustración 25. Referencias casco tramo recto.....	39
Ilustración 26. Realización de la elipse.....	40
Ilustración 27. Recorte de la elipse .....	40
Ilustración 28. Recorte de la elipse (caso de tramo recto) .....	40
Ilustración 29. Croquis finalizado .....	41
Ilustración 30. Proceso de revolución .....	41
Ilustración 31. Extracción de las caras del sólido.....	42
Ilustración 32. Desparametrización de las superficies.....	42
Ilustración 33 Ubicación de la herramienta bloque.....	43
Ilustración 34. Generación del volumen de agua.....	43
Ilustración 35. Opciones para realizar el reposicionado del cuerpo.....	44
Ilustración 36. Imagen del conjunto ensamblado.....	44
Ilustración 37. Pestaña iniciar NX6, selección de <i>simulación avanzada</i> . .....	45
Ilustración 38. Navegador de simulación .....	45
Ilustración 39. Menú inicial simulación NX .....	46
Ilustración 40. <i>Editar solución/ Detalles de la solución</i> .....	46
Ilustración 41. <i>Editar solución/Flujo en 3D</i> .....	47
Ilustración 42. <i>Editar solución/ Opciones de resultados</i> .....	47
Ilustración 43. Selección del archivo para realizar el mallado. ....	49

Ilustración 44. Selección del comando malla 2D.....	49
Ilustración 45. Menú de mallado del casco.....	50
Ilustración 46. Selección del archivo de simulación.....	50
Ilustración 47. Listado de opciones <i>tipo de objeto/condición límite de fluido</i> .....	51
Ilustración 48. Aplicación de la malla del fluido.....	52
Ilustración 49. Aplicación de la malla de la superficie del fluido.....	52
Ilustración 50. Selección condición límite de flujo.....	53
Ilustración 51. Aplicación condición flujo de entrada.....	53
Ilustración 52. Aplicación condición abriendo.....	54
Ilustración 53. Resumen de la aplicación de las condiciones de contorno.....	54
Ilustración 54. Ejecución de la simulación.....	55
Ilustración 55. Aparición del campo de resultados.....	55
Ilustración 56. Navegador de postprocesamiento, resultados.....	55
Ilustración 57. Selección de la edición de los resultados.....	56
Ilustración 58. Edición de los resultados.....	56
Ilustración 59. Vista de solución con volumen translúcido.....	57
Ilustración 60. Opciones de visualización de resultados.....	57
Ilustración 61. Icono identificar los resultados.....	57
Ilustración 62. Marcaje de máximos y mínimos.....	58
Ilustración 63. Resultados fuerza de arrastre en función del tamaño de malla.....	62
Ilustración 64. Fuerza de arrastre en función del tamaño de malla.....	62
Ilustración 65. Resultados fricción de arrastre en función del tamaño de malla.....	62
Ilustración 66. Fricción de arrastre en función del tamaño de malla.....	63
Ilustración 67. Resultados presión de arrastre en función del tamaño de malla.....	63
Ilustración 68. Presión de arrastre en función del tamaño de malla.....	63
Ilustración 69. Diferencias existentes entre los valores obtenidos.....	64
Ilustración 70. Evolución de las diferencias en función tamaño de malla.....	64
Ilustración 71. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla.....	65
Ilustración 72. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano XY ...	65
Ilustración 73. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano XZ ...	65
Ilustración 74. Puntos de aplicación fuerza en función del tamaño de malla plano plano YZ....	66
Ilustración 75. Valores de las tensiones máximas en función del tamaño de malla.....	66
Ilustración 76. Presión en superficie máxima en función del tamaño de malla.....	67
Ilustración 77. Esfuerzos tangenciales máximos en función del tamaño de malla.....	67
Ilustración 78. Diferencias entre valores máximos de tensiones función del tamaño de malla	67
Ilustración 79. Variación diferencias valores máximos de tensiones en función del tamaño de malla.....	68
Ilustración 80. Evolución del tiempo de cálculo en función del tamaño de malla.....	68
Ilustración 81. Resultados fuerza de arrastre en función volumen del fluido.....	69
Ilustración 82. Fuerza de arrastre en función del volumen del fluido.....	69
Ilustración 83. Resultados de la fricción de arrastre en función del volumen del fluido.....	70
Ilustración 84. Fricción de arrastre en función del volumen del fluido.....	70
Ilustración 85. Resultados de la presión de arrastre en función del volumen del fluido.....	70
Ilustración 86. Presión de arrastre en función del volumen del fluido.....	71
Ilustración 87. Diferencias en función del volumen del fluido.....	71

Ilustración 88. Variación de las diferencias en función del volumen del fluido.....	71
Ilustración 89. Puntos de aplicación en función del volumen .....	72
Ilustración 90. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano XY.....	72
Ilustración 91. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano XZ.....	73
Ilustración 92. Puntos de aplicación en función del volumen en el plano ZY.....	73
Ilustración 93. Valores de las tensiones máximas en función del volumen del fluido .....	73
Ilustración 94. Presión en superficie en función del volumen del fluido.....	74
Ilustración 95. Esfuerzos tangenciales en función del volumen del fluido .....	74
Ilustración 96. Valores de las diferencias de las tensiones máximas en función del volumen del fluido .....	75
Ilustración 97. Diferencias de las tensiones máximas en función del volumen del fluido .....	75
Ilustración 98. Tiempo de ensayo en función del volumen del fluido .....	76
Ilustración 99. Malla del casco .....	82
Ilustración 100 Malla del volumen de fluido.....	82
Ilustración 101. Condiciones de contorno .....	82
Ilustración 102. Magnitud y componentes fuerza de arrastre barrido L/D .....	83
Ilustración 103. Evolución magnitud y componentes fuerza de arrastre .....	83
Ilustración 104. Magnitud y componentes fuerza de arrastre fricción barrido L/D .....	84
Ilustración 105. Evolución magnitud y componentes fuerza de arrastre fricción .....	84
Ilustración 106. Magnitud y componentes fuerza de arrastre de presión barrido L/D .....	85
Ilustración 107. Evolución magnitud y componentes fuerza de presión.....	85
Ilustración 108. Comparación magnitud arrastre total, de presión y de fricción.....	85
Ilustración 109. Puntos de aplicación de la fuerza.....	86
Ilustración 110. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano XY.....	86
Ilustración 111. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano XZ.....	87
Ilustración 112. Puntos de aplicación de las fuerzas en el plano YZ.....	87
Ilustración 113. Valores de los esfuerzos máximos en el barrido L/D .....	88
Ilustración 114. Valor de la presión en la superficie máxima en barrido L/D .....	88
Ilustración 115. Valor de los esfuerzos tangenciales máximos en barrido L/D .....	88
Ilustración 116. Ejemplo de distribución de presiones en el casco .....	89
Ilustración 117. Grafica de distribución de presiones en el casco .....	89
Ilustración 118. Ejemplo de distribución de esfuerzos tangenciales en el casco .....	90
Ilustración 119. Grafica de distribución de esfuerzos.....	90
Ilustración 120. Mallado tipo del cuerpo para barrido de longitud.....	91
Ilustración 121. Mallado tipo del volumen del fluido para barrido de longitud.....	91
Ilustración 122. Representación de las condiciones de contorno para barrido de longitud .....	92
Ilustración 123. Magnitud y componentes de la fuerza de arrastre en el barrido de longitud ..	92
Ilustración 124. Evolución de fuerza de arrastre en barrido de longitud .....	92
Ilustración 125. Valores de la fricción de arrastre en el barrido de longitud .....	93
Ilustración 126. Evolución de la fricción de arrastre en el barrido de longitud .....	93
Ilustración 127. Valores de la presión de arrastre en el barrido de longitud .....	94
Ilustración 128. Evolución de la fricción de arrastre en el barrido de longitud .....	94
Ilustración 129. Comparación de la fuerza de arrastre total, la presión y la fricción de arrastre en el barrido de longitud.....	95
Ilustración 130. Puntos de aplicación de la fuerza en el barrido de longitud.....	95

Ilustración 131. Aplicación de la fuerza en plano XY.....	95
Ilustración 132. Aplicación de la fuerza en plano XZ.....	96
Ilustración 133. . Aplicación de la fuerza en plano ZY .....	96
Ilustración 134. Valores de esfuerzos máximos en barrido de longitud.....	97
Ilustración 135. Evolución de la presión en la superficie máxima en barrido de longitud .....	97
Ilustración 136. Evolución de los esfuerzos tangenciales máximos en barrido de longitud.....	98
Ilustración 137. Distribución de la presión en superficie en un cuerpo de 40% de tramo recto	98
Ilustración 138. Distribución de la presión en superficie en un cuerpo de 40% de tramo recto	99
Ilustración 139. Distribución de los tangenciales en un cuerpo de 40% de tramo recto .....	99
Ilustración 140. Distribución de los tangenciales en un cuerpo de 40% de tramo recto .....	99
Ilustración 141. Valores de la fuerza de arrstre en el barrido de velocidades.....	100
Ilustración 142 Evolución de la fuerza de arrastre para L/D=3.....	101
Ilustración 143. Evolución de la fuerza de arrastre con la velocidad para L/D=6 .....	101
Ilustración 144 Evolución de la fuerza de arrastre con la velocidad para L/D=10 .....	102
Ilustración 145. Comparación de la evolución de las fuerzas de arrastre con la velocidad. ....	102
Ilustración 146. Valores del arrastre por fricción para el barrido de velocidad. ....	103
Ilustración 147. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para L/D=3 .....	103
Ilustración 148. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para L/D=6 .....	104
Ilustración 149. Evolución del arrastre por fricción con la velocidad para L/D=10 .....	104
Ilustración 150. Comparación del arrastre por fricción en función de la velocidad.....	104
Ilustración 151. Valores del arrastre de la presión en función de la velocidad .....	105
Ilustración 152. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=3 .....	105
Ilustración 153. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=6 .....	106
Ilustración 154. Evolución del arrastre por presión con la velocidad para L/D=10 .....	106
Ilustración 155. Comparación del arrastre por presión con la velocidad .....	106
Ilustración 156. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=3 .....	107
Ilustración 157. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=6 .....	107
Ilustración 158. Comparación de las fuerzas de arrastre para L/D=10 .....	108
Ilustración 159. Punto de aplicación de la fuerza en el barrido de velocidad .....	108
Ilustración 160. Valores de esfuerzos máximos con el barrido de la velocidad .....	109
Ilustración 161. Evolución de la presión en la superficie máxima en función de la velocidad.	109
Ilustración 162. Evolución de los esfuerzos tangenciales máximos en función de la velocidad.	110
.....	110
Ilustración 163. Dirección de incidencia del fluido .....	111
Ilustración 164. Dirección de incidencia del fluido (perfil) .....	111
Ilustración 165. Dirección de incidencia del fluido (lazado) .....	112
Ilustración 166. Mallado del casco (caso $\beta=60^\circ$ , $\alpha=60^\circ$ ).....	112
Ilustración 167. Mallado del volumen (caso $\beta=60^\circ$ , $\alpha=60^\circ$ ).....	112
Ilustración 168. Condiciones de contorno (caso $\beta=60^\circ$ , $\alpha=60^\circ$ ) .....	113
Ilustración 169. Valores de fuerza de arrastre para diversos ángulos.....	113
Ilustración 170. Evolución de la fuerza de arrastre para $\alpha=0^\circ$ .....	114
Ilustración 171. Evolución de la fuerza de arrastre para $\alpha=30^\circ$ .....	115
Ilustración 172. Evolución de la fuerza de arrastre para $\alpha=60^\circ$ .....	115
Ilustración 173. Evolución de la fuerza de arrastre para $\alpha=0, 30$ y $60^\circ$ .....	115
Ilustración 174. Valores de la fricción de arrastre para diversos ángulos .....	116

Ilustración 175. Evolución de la fricción de arrastre para $\alpha=0^\circ$ .....	116
Ilustración 176. . Evolución de la fricción de arrastre para $\alpha=30^\circ$ .....	117
Ilustración 177. . Evolución de la fricción de arrastre para $\alpha=60^\circ$ .....	117
Ilustración 178. Evolución de la fricción de arrastre para $\alpha=0, 30$ y $60^\circ$ .....	117
Ilustración 179. Valores de la presión de arrastre para diversos ángulos .....	118
Ilustración 180. Evolución de la presión de arrastre para $\alpha=0^\circ$ .....	119
Ilustración 181. Evolución de la presión de arrastre para $\alpha=30^\circ$ .....	119
Ilustración 182. Evolución de la presión de arrastre para $\alpha=60^\circ$ .....	119
Ilustración 183 Evolución de la fricción de arrastre para $\alpha=0, 30$ y $60^\circ$ .....	120
Ilustración 184. Punto de aplicación de la fuerza de arrastre en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	121
Ilustración 185. Punto aplicación fuerza de arrastre plano XY .....	121
Ilustración 186. Punto aplicación fuerza de arrastre plano XZ .....	122
Ilustración 187. Punto aplicación fuerza de arrastre plano ZY .....	122
Ilustración 188. Valores de esfuerzos máximos en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	123
Ilustración 189. Presión en la superficie máxima para $\alpha=0, 30$ y $60^\circ$ .....	123
Ilustración 190. Esfuerzos tangenciales máximos para $\alpha=0, 30$ y $60^\circ$ .....	124
Ilustración 191. Distribución presión en la superficie máxima para $\alpha=60$ y $\beta=60^\circ$ .....	124
Ilustración 192. Distribución esfuerzos tangenciales en la superficie máxima para $\alpha=60$ y $\beta=60^\circ$ .....	125
Ilustración 193. Malla del cuerpo con aletas con $X=400\text{mm}$ .....	126
Ilustración 194. Malla del volumen de control de aletas con $X=400\text{mm}$ .....	126
Ilustración 195. Condiciones de contorno para cuerpo con aletas de $X=400\text{mm}$ .....	126
Ilustración 196. Valores de fuerzas de arrastre para diferentes posiciones de las aletas .....	127
Ilustración 197. Evolución de la fuerza de arrastre para diferentes posiciones de las aletas ..	127
Ilustración 198. Valores de fricción de arrastre para diferentes posiciones de las aletas.....	127
Ilustración 199. . Evolución de fricción de arrastre para diferentes posiciones de las aletas ..	128
Ilustración 200. Valores de presión de arrastre para diferentes posiciones de las aletas.....	128
Ilustración 201. Evolución de presión de arrastre para diferentes posiciones de las aletas....	128
Ilustración 202. Comparación de los componentes de fuerzas de arrastre para diferentes posiciones de las aletas.....	129
Ilustración 203. Punto de aplicación de la fuerza para diferentes posiciones de las aletas.....	129
Ilustración 204. Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano XY .....	130
Ilustración 205. Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano XZ .....	130
Ilustración 206. . Punto de aplicación fuerza para diferentes posición de las aletas en plano YZ .....	130
Ilustración 207. Valores máximos de esfuerzos para diferentes posiciones de aletas.....	131
Ilustración 208. Distribución de presiones para $X=400\text{mm}$ .....	131
Ilustración 209. Distribución de esfuerzos tangenciales para $X=400\text{mm}$ .....	132
Ilustración 210. Malla del casco para $H=340\text{mm}$ .....	132
Ilustración 211. Malla del volumen del fluido para $H=340\text{mm}$ .....	133
Ilustración 212. Condiciones de contorno para $H=340\text{mm}$ .....	133
Ilustración 213. Valores de la fuerza de arrastre para el barrido de $H$ .....	133
Ilustración 214. Evolución de la fuerza de arrastre para el barrido de $H$ .....	134

Ilustración 215. Valores de la fricción de arrastre para el barrido de H .....	134
Ilustración 216. Evolución de la fricción de arrastre para el barrido de H.....	134
Ilustración 217. Valores de la presión de arrastre para el barrido de H .....	135
Ilustración 218. Evolución de la presión de arrastre para el barrido de H.....	135
Ilustración 219. Comparación de los componentes de la fuerza de arrastre para el barrido de H .....	135
Ilustración 220. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H .....	136
Ilustración 221. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano XY .....	136
Ilustración 222. Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano XZ .....	136
Ilustración 223, Puntos de aplicación de la fuerza para diferentes valores de H, plano ZY .....	137
Ilustración 224. Esfuerzos máximos para diferentes valores de H .....	137
Ilustración 225. Distribución de presión en la superficie para H=340mm.....	137
Ilustración 226. Distribución de tangenciales en la superficie para H=340mm.....	138
Ilustración 227. Ecuaciones de interpolación de la fuerza de arrastre .....	143
Ilustración 228. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo base.....	145
Ilustración 229. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo base .....	146
Ilustración 230. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo con tramo recto .	146
Ilustración 231. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo con tramo recto..	146
Ilustración 232. Líneas aerodinámicas y distribución de presión en cuerpo $\alpha=60^\circ$ y $\beta=60^\circ$ ....	147
Ilustración 233. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo $\alpha=60^\circ$ y $\beta=60^\circ$ ....	147
Ilustración 234. Líneas aerodinámicas y distribución de presión con aletas a X=400mm.....	147
Ilustración 235. Líneas aerodinámicas y esfuerzos tangenciales en cuerpo aletas a X=400mm .....	148
Ilustración 236. Ecuaciones interpolación tensiones en el cuerpo.....	149
Ilustración 237. Ecuaciones de interpolación $r_n$ función de la velocidad.....	150
Ilustración 238. Superficie paramétrica fuerza de arrastre función velocidad y L/D.....	151
Ilustración 239. Superficie paramétrica presión en superficie máx. función velocidad y L/D..	151
Ilustración 240. Superficie paramétrica esfuerzos tangenciales máx. función velocidad y L/D	152
Ilustración 241. $K_{arrstre}$ en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	153
Ilustración 242. $K_{arrstre,x}$ en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	153
Ilustración 243. $K_{arrstre,y}$ en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	154
Ilustración 244. $K_{arrstre,z}$ en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	154
Ilustración 245. $K_{superficie,máx.}$ en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	154
Ilustración 246. $K_{tangenciales}$ máx. en función de $\alpha$ y $\beta$ .....	155