

Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Comparación de Resultados de Análisis en CFD  
entre el Módulo FloEFD de CATIA V5 y Fluent

Autor: Rafael Torres Parish

Tutor: Francisco Andrés Valderrama Gual

Dep. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Departamento de  
Ingeniería Gráfica



Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

# **Comparación de Resultados de Análisis en CFD entre el Módulo FloEFD de CATIA V5 y Fluent**

Autor:

Rafael Torres Parish

Tutor:

Francisco Andrés Valderrama Gual

Profesor Titular de Universidad

Dep. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Máster: Comparación de Resultados de Análisis en CFD entre el Módulo FloEFD de CATIA V5  
y Fluent

Autor: Rafael Torres Parish

Tutor: Francisco Andrés Valderrama Gual

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Por fin ha llegado el final de un largo camino que comenzó hace siete años. Siete años en los que he disfrutado, aprendido, olvidado y llorado muchas de las cosas que he aprendido en esta escuela, pero que sin lugar a duda me llevo en mi bolsillo como experiencias ganadas y que me han hecho crecer como persona.

Y precisamente por esto, quiero dedicar unas líneas a esas personas que me han acompañado en esta travesía. A mis padres, Rafa y Dori, y a ti Adoración, gracias por darlo todo por mí, aguantar mis malos ratos y darme vuestro apoyo incondicional. A ti, Aurora, que me acompañas en la aventura de la vida para las buenas y para las malas, por ser mi luz y mi compañía. A mi familia, a todos vosotros, que me recuerdan y hacen ver las cosas que de verdad importan. A mis amigos, que me hacen disfrutar de cada momento y recargar las pilas. A mis compañeros sin los cuales no hubiera sido capaz de superar estos largos años. A mis profesores, pero sobre todo a aquellos que me hicieron ver y amar la materia que impartían. En particular, gracias Francisco por tu labor docente en las clases que me impartiste y ahora por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

Sin todas estas personas hoy no estaría aquí, así que gracias. GRACIAS, de corazón. Este trabajo, y sobre todo lo que soy a día de hoy, es gracias a vosotros.

*Rafael Torres Parish*

*Máster en Ingeniería Aeronáutica*

*Sevilla, 2017*





En la actualidad existen multitud de productos y softwares que se usan para estudiar los problemas fluidodinámicos y calcular de forma cuantitativa el efecto que cualquier fluido tiene sobre el medio en el que se mueve. Entre la gran variedad de soluciones que existen, una realmente interesante es FloEFD.

FloEFD es un software de CFD (Computational Fluids Dynamics) integrado en una gran variedad de programas CAD. Entre sus ventajas principales, destaca el hecho de poder realizar este tipo de estudios en un mismo programa, evitando muchos tipos de incompatibilidades o la necesidad de exportar e importar de unos programas a otros.

En este contexto, **el objetivo de este proyecto es comparar y analizar la precisión de FloEFD frente al que probablemente es el programa de CFD más extendido mundialmente: Fluent.**

Para ello, y tras una breve introducción y primer capítulo en el que se explica en detalle la base científica y matemática detrás de estos programas, se resolverán siete problemas que han sido seleccionados tratando de recoger un abanico muy amplio de problemas fluidodinámicos. En estos problemas se tratará de identificar de forma cuantitativa las virtudes de uno u otro programa a la hora de resolverlos.

Finalmente, se valorará si FloEFD está o no al mismo nivel de precisión y usabilidad que Fluent, y por tanto, si tiene un hueco en el mercado y en los departamentos de diseño de las grandes empresas que tienen relación con estudios fluidodinámicos como un buen software de CFD.



<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Mecánica de Fluidos y Software</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Mecánica de Fluidos</i>	5
2.2 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	7
2.2.1 Discretización espacial	7
2.2.2 Método de volúmenes finitos	9
2.2.3 Método de Elementos Finitos	9
2.2.4 Método de Diferencias Finitas	9
2.3 <i>Modelos de Turbulencia</i>	9
2.3.1 Modelo de Turbulencia K-epsilon	10
2.3.2 Modelo de Turbulencia k-omega	11
2.4 <i>Definiciones y conceptos</i>	12
2.4.1 Fuerzas aerodinámicas	12
2.4.2 Números Adimensionales	12
<b>3 Problema 1: Cilindro 2D</b>	<b>15</b>
3.1 <i>FloEFD</i>	16
3.2 <i>Fluent</i>	22
3.3 <i>Resultados</i>	27
<b>4 Problema 2: Perfil Subsónico 2D</b>	<b>29</b>
4.1 <i>FloEFD</i>	30
4.2 <i>Fluent</i>	36
4.3 <i>Resultados</i>	40
<b>5 Problema 3: Perfil Supersónico 2D</b>	<b>43</b>
5.1 <i>FloEFD</i>	44
5.2 <i>Fluent</i>	48
5.3 <i>Resultados</i>	51
<b>6 Problema 4: Pérdida de Carga</b>	<b>53</b>
6.1 <i>FloEFD</i>	54
6.2 <i>Fluent</i>	57
6.3 <i>Resultados</i>	60
<b>7 Problema 5: Mezclador de Flujos</b>	<b>63</b>
7.1 <i>FloEFD</i>	64
7.2 <i>Fluent</i>	67

7.3	<i>Resultados</i>	71
<b>8</b>	<b>Problema 6: Alerón de Formula 1</b>	<b>73</b>
8.1	<i>FloEFD</i>	74
8.2	<i>Fluent</i>	79
8.3	<i>Resultados</i>	82
<b>9</b>	<b>Problema 7: Proyectoil Supersónico</b>	<b>85</b>
9.1	<i>FloEFD</i>	86
9.2	<i>Fluent</i>	89
9.3	<i>Resultados</i>	91
<b>10</b>	<b>Resultados finales y conclusiones</b>	<b>93</b>
	<b>Referencias</b>	<b>97</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Velocidades y diámetros del cilindro consideradas para el análisis del problema 1.	16
Tabla 2: Resultados del coeficiente de resistencia obtenidos a partir de las simulaciones hechas en FloEFD para el primer problema.	22
Tabla 3: Resultados del coeficiente de resistencia obtenidos a partir de las simulaciones hechas en Fluent para el primer problema.	27
Tabla 4: Error relativo de los cálculos realizados por FloEFD y Fluent respecto a los datos experimentales.	28
Tabla 5: Datos experimentales del perfil NACA 4412	30
Tabla 6: Resultados obtenidos mediante FloEFD para el segundo problema.	40
Tabla 7: Resultados obtenidos mediante Fluent para el segundo problema.	40
Tabla 8: Errores relativos cometidos por ambos programas en los cálculos de los coeficientes de sustentación y resistencia en el problema 2.	41
Tabla 9: Resultados de las fuerzas obtenidas en el análisis en FloEFD del perfil del problema 3.	48
Tabla 10: Resultados de las fuerzas obtenidas en el análisis en Fluent del perfil del problema 3.	51
Tabla 11: Errores relativos cometido por FloEFD en los cálculos de los coeficientes de sustentación y resistencia en el problema 2.	51
Tabla 12: Errores relativos cometido por FloEFD y Fluent respecto al caso de la malla estructurada.	61
Tabla 13: Resultados de presión, temperatura y velocidad media realizado por FloEFD.	67
Tabla 14: Resultados de presión, temperatura y velocidad media en las superficies de entrada y salida de la tubería en el caso del análisis realizado por Fluent.	70
Tabla 15: Fuerzas obtenidas en los alerones en los casos con el DRS activado y desactivado según FloEFD.	79
Tabla 16: Fuerzas obtenidas en los alerones en los casos con el DRS activado y desactivado según	82
Tabla 17: Errores relativos respecto a Fluent en el problema 6.	82
Tabla 18: Resumen de todos los errores relativos en cada uno de los problemas.	93



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Ejemplos de aplicaciones de la mecánica de fluidos.	1
Figura 2: Ejemplo de flujo de aire alrededor de un transbordador espacial.	2
Figura 3: Claude-Louis Henri Navier (izquierda) y George Gabriel Stokes (derecha).	6
Figura 4: Logo del Clay Mathematics Institute	6
Figura 5: Mallado alrededor del modelo CAD de un coche de Formula 1.	8
Figura 6: Flujo alrededor de un cilindro.	10
Figura 7: Fuerzas aerodinámicas y descomposición clásica.	12
Figura 8: Consecuencias del efecto de la calle de torbellinos de Von-Karman.	15
Figura 9: CD en un cilindro en función del número de Reynolds.	16
Figura 10: Cilindro de 0.01 m (a la izquierda) y 1 m (a la derecha) de diámetro.	17
Figura 11: Árbol de proceso de FloEFD en CATIA V5.	17
Figura 12: Valores establecidos en el apartado Initial and Ambient Conditions.	18
Figura 13: Valor del apartado <i>&lt;dependency&gt;</i> establecido en la Figura 11.	18
Figura 14: <i>Global Mesh Settings</i> del primer problema.	19
Figura 15: <i>Local Mesh Settings</i> en el primer problema.	20
Figura 16: <i>Calculation Control Options</i> en el primer problema	20
Figura 17: Malla alrededor del cilindro en el primer problema.	21
Figura 18: Detalle de la malla alrededor del cilindro en el primer problema	21
Figura 19: Campo de presiones alrededor del cilindro en el primer problema.	22
Figura 20: Campo de velocidades alrededor del cilindro en el primer problema.	22
Figura 21: Malla no estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 1.	23
Figura 22: Malla no estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 1.	23
Figura 23: <i>Solution Methods</i> en la configuración de Fluent del primer problema.	24
Figura 24: Campo de presiones alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.	25
Figura 25: Campo de velocidades alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.	25
Figura 26: Detalle del campo de presiones alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.	26
Figura 27: Campo de velocidades alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.	26
Figura 28: CD alrededor del cilinro del problema 2 según datos experimentales, FloEFD y Fluent.	27
Figura 29: Ensayo de un perfil NACA 4412.	29
Figura 30: Perfil NACA 4412	29
Figura 31: Perfil NACA 4412 en el programa CATIA V5.	30
Figura 32: Árbol de proceso de FloEFD en CATIA V5.	31
Figura 33: Valores establecidos en el apartado <i>Initial and Ambient Conditions</i> (problema 2).	31

Figura 34: Global Mesh Settings del segundo problema.	32
Figura 35: Local Mesh Settings en el segundo problema.	33
Figura 36: <i>Calculation Control Option</i> en el segundo problema.	33
Figura 37: Malla alrededor del perfil en el segundo problema para el caso $\alpha = 16^\circ$ .	34
Figura 38: Detalle de la malla alrededor del perfil en el segundo problema en el caso $\alpha = 16^\circ$ .	34
Figura 39: Campo de Presiones calculado por FloEFD alrededor del perfil en el caso $\alpha = 16^\circ$ .	35
Figura 40: Campo de Velocidades calculado por FloEFD alrededor del perfil en el caso $\alpha = 16^\circ$ .	35
Figura 41: Esquema que relaciona las fuerzas calculadas por FloEFD con la sustentación y la resistencia.	36
Figura 42: Malla estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 2.	37
Figura 43: Detalle de la malla estructurada generada en ANSYS Fluent.	37
Figura 44: <i>General Settings</i> en la configuración de Fluent del segundo problema.	38
Figura 45: Campo de Presiones calculado por Fluent alrededor del perfil en el caso $\alpha = 16^\circ$ .	39
Figura 46: Campo de Velocidades calculado por Fluent alrededor del perfil en el caso $\alpha = 16^\circ$ .	39
Figura 47: CL en función del ángulo de ataque en el perfil aerodinámico del problema 2.	40
Figura 48: Coeficiente de resistencia en función del ángulo de ataque en el perfil aerodinámico.	41
Figura 49: Ilustración que muestra el aspecto que tendrá el LBFD-X de la NASA. Fuente: NASA.	43
Figura 50: El ítem <i>High Mach Number Flow</i> debe estar marcado en la pestaña <i>Fluids</i> .	44
Figura 51: Malla generada por FloEFD en el problema 3.	45
Figura 52: Detalle de la malla generada por FloEFD para el problema 2.	45
Figura 53: Campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD en el problema 3.	46
Figura 54: Perfil de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD en el problema 3.	46
Figura 55: Detalle del campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD.	47
Figura 56: Detalle del campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD.	47
Figura 57: En la pestaña <i>General</i> , se debe seleccionar en el apartado <i>solver</i> el ítem <i>Density-Based</i> .	48
Figura 58: Pestaña <i>Run Calculation</i> , en la que se debe establecer <i>supersonic</i> en el apartado <i>Flow Type</i> .	49
Figura 59: Campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.	49
Figura 60: Campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.	50
Figura 61: Detalle del campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.	50
Figura 62: Detalle del campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.	51
Figura 63: Geometría y condiciones que definen el problema 4.	53
Figura 64: Geometría de la tubería en S del problema 4 en CATIA V5.	54
Figura 65: Malla generado por FloEFD para la resolución del problema 4.	55
Figura 66: Detalle de la malla generada por FloEFD para la resolución del problema 4.	55
Figura 67: Campo de presiones en la tubería del problema 4.	56
Figura 68: Campo de presiones en la tubería del problema 4, sobre la superficie del plano XY.	56
Figura 69: Trayectorias de los flujos en el interior de la tubería en el problema 4.	57
Figura 70: Detalle de los tipos de mallado que van a ser considerados en la resolución del problema.	58



Figura 71: Campo de presiones en el caso de la malla estructurada.	58
Figura 72: Campo de presiones en el caso de la malla no estructurada.	59
Figura 73: Distribución de velocidades en el caso de la malla estructurada.	59
Figura 74: Distribución de velocidades en el caso de la malla no estructurada.	60
Figura 75: Geometría del mezclador de flujos que va a ser analizado en el problema 5.	63
Figura 76: Modelo en CATIA de la geometría definida para el problema 5.	64
Figura 77: Malla generado por FloEFD para la resolución del problema 5.	65
Figura 78: Detalle de la malla generado por FloEFD para la resolución del problema 5.	65
Figura 79: Campo de presiones en la tubería calculado por FloEFD.	66
Figura 80: Campo de temperaturas en la tubería calculado por FloEFD.	66
Figura 81: Velocidad de las partículas fluidas en la tubería calculadas por FloEFD.	67
Figura 82: Mallado creado en ANSYS Fluent para la resolución del problema 5.	68
Figura 83: Detalle del mallado creado en ANSYS Fluent para la resolución del problema 5.	68
Figura 84: Campo de presiones en la tubería calculado por Fluent.	69
Figura 85: Campo de temperaturas en la tubería calculado por Fluent.	69
Figura 86: Velocidad de las partículas fluidas en la tubería calculadas por Fluent.	70
Figura 87: Perfil de referencia.	73
Figura 88: Modelo del alerón del problema 6 con el DRS activado y desactivado (izquierda y derecha).	74
Figura 89: Malla generada por FloEFD en el caso del alerón con el DRS activado.	75
Figura 90: Malla generada por FloEFD en el caso del alerón con el DRS desactivado.	75
Figura 91: Campo de velocidades alrededor del alerón con el DRS activado según FloEFD.	76
Figura 92: Campo de velocidades alrededor del alerón con el DRS desactivado según FloEFD.	76
Figura 93: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.	77
Figura 94: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.	77
Figura 95: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.	78
Figura 96: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.	78
Figura 97: Detalle da la malla generada en Fluent para el problema 6.	79
Figura 98: Malla generada para el problema 6 tras la transformación a elementos hexaédricos.	80
Figura 99: Campo de velocidades alrededor del alerón para el caso con el DRS activado según Fluent.	80
Figura 100: Campo de velocidades alrededor del alerón para el caso con el DRS desactivado.	81
Figura 101: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.	81
Figura 102: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.	82
Figura 103: Un 7,62 x 39 de fabricación yugoslava, en exhibición.	85
Figura 104: Dimensiones del 7.62 x 39 mm.	85
Figura 105: Cartucho 7.62 x 39 mm que será analizado en el problema 7.	86
Figura 106: Bala del cartucho 7.62 x 39 mm modelada en CATIA.	86
Figura 107: Malla de FLoEFD	87

Figura 108: Campo presiones alrededor del proyectil del problema 7 calculado mediante FloEFD.	88
Figura 109: Flujo alrededor de la bala a velocidad supersónica calculado mediante FloEFD.	88
Figura 110: Malla generada para resolver el problema 7 mediante el software de cálculo Fluent.	89
Figura 111: Detalle de la malla generada para resolver el problema 7 mediante Fluent.	90
Figura 112: Campo de presiones alrededor del proyectil del problema 7 calculado por Fluent.	90
Figura 113: Flujo alrededor de la bala a velocidad supersónica calculado mediante Fluent.	91

# Notación

---

$<$	Menor o igual
$>$	Mayor o igual
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si
$\arctg$	Función arco tangente
$C_d$	Coefficiente de resistencia aerodinámica en un problema bidimensional
$C_D$	Coefficiente de resistencia aerodinámica en un problema tridimensional
CFD	Computational Fluids Dynamics
$C_l$	Coefficiente de sustentación en un problema bidimensional
$C_L$	Coefficiente de sustentación en un problema tridimensional
$\cos^x y$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
$d$	Fuerza de resistencia aerodinámica en un problema bidimensional
$D$	Fuerza de resistencia aerodinámica en un problema tridimensional
$l$	Fuerza de sustentación en un problema bidimensional
$L$	Fuerza de sustentación en un problema tridimensional
MSE	Minimum square error
$p$	Presión
sen	Función seno
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$T$	Temperatura
tg	Función tangente
$\mathbf{v}$	Vector velocidad.
$\rho$	Densidad



# 1 INTRODUCCIÓN

---

*En la vida no existe nada que temer, solo cosas que comprender.*

*- Marie Curie -*

A lo largo de los años, han sido cientos los procedimientos, métodos y artilugios que han sido usados para analizar el movimiento de los fluidos alrededor y por el interior de objetos, fruto de los cuales nació lo que hoy en día se conoce como la mecánica de fluidos.

La **mecánica de fluidos** es la rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos que estudia el movimiento de los fluidos (gases y líquidos) así como las fuerzas que lo provocan. La característica fundamental que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (lo que provoca que carezcan de forma definida). También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita. A su vez, la **aerodinámica** es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las interacciones que se producen entre un sólido y el gas en el que se halla inmerso cuando ambos se mueven a velocidades diferentes, mientras que la **hidrodinámica** hace lo propio con líquidos.

La mecánica de fluidos, y en particular la hidrodinámica y la aerodinámica, son ampliamente usadas en la actualidad para el diseño eficiente de cientos de sistemas, vehículos y componentes. En la Figura 1 se pueden observar dos ejemplos de aplicación de esta rama de la física.



Figura 1: Ejemplos de aplicaciones de la mecánica de fluidos.

Conjuntamente a la evolución de esta ciencia crecía la necesidad de diseñar elementos, componentes e incluso aeroestructuras completas que permitieran llevar cada vez un paso más allá las características de los diversos sistemas. El desarrollo particular de la aerodinámica permitió el diseño detallado de aeronaves que pudieran viajar más rápido que la velocidad del sonido, que aguantarían temperaturas que en condiciones normales fundirían el material del cual están compuestos e incluso fue decisiva en la carrera espacial en los años 60.

A medida que el aumentaba el conocimiento de la mecánica de fluidos, esta se fue encontrando con un obstáculo cada vez más grande: la complejidad en el diseño hacía incalculable los problemas que se pretendían resolver debido a la geometría externa e interna. Por este motivo a lo largo del siglo XX y con la llegada de la computación fue cada vez más frecuente el uso de programas de dinámica de fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Sin embargo, las diversas técnicas y métodos de cálculo de los diversos softwares de CFD poseen la misma debilidad: son solo una aproximación de la realidad. Para obtener una aproximación fiel a lo que ocurre en la realidad es necesario descomponer el espacio de cálculo en partes muy pequeñas en las que aplicar las ecuaciones de la mecánica de fluidos, de forma que aumentando esta subdivisión se mejora la precisión, pero más aumenta sustancialmente el tiempo de cálculo. En problemas con geometrías muy complejas, como por ejemplo el diseño de los alabes de un turborreactor, el tiempo de cálculo que llevaría analizar ciertos diseños imposibilita un avance más rápido en el conocimiento de los mismos.

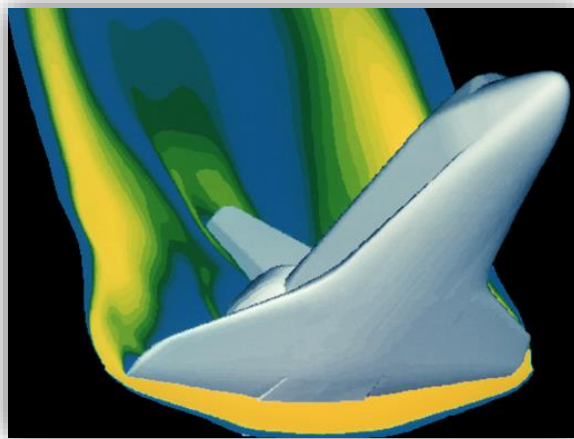


Figura 2: Ejemplo de flujo de aire alrededor de un transbordador espacial.

Otro gran problema de estos programas informáticos es que el diseño y el cálculo se realizan con software diferente. Si bien muchos programas de CFD permiten la importación directa de otros como CATIA o Solidworks, lo cierto es que en muchas ocasiones este proceso es tedioso y pueden producirse numerosas incompatibilidades.

Es por este motivo que en los últimos años se han lanzado algunas propuestas que pretenden agilizar el proceso de diseño, integrando un software de CFD que corre sobre el propio programa CAD: es el caso de FLoEFD. FLoEFD es una solución CFD completamente funcional e integrable en los softwares CAD más importantes, tales como *Creo*, *CATIA V5*, *Siemens NX*, *Solid Edge* y *Solidworks*<sup>1</sup>.

Frente a los software tradicionales de dinámica de fluidos computacional, se tienen ciertas ventajas tales como:

- Facilidad de uso.
- CAD integrado en el propio programa.
- Generación automática y adaptable del mallado.

<sup>1</sup> Fuente: <https://www.mentor.com/products/mechanical/floefd/>

- Criterios de convergencia sólidos.
- Flujos de trabajo simplificados.
- Es el único software CFD que integra interfaces de usuario locales en los idiomas japonés, chino, francés, alemán y ruso.

Dentro del alcance de este proyecto, se va a analizar el software de FloEFD sobre el programa CATIA V5, con la intención de demostrar las capacidades de este nuevo enfoque de la mecánica de fluidos en conjunción con uno de los programas CAD más usados.

Dadas las ventajas que tiene usar este tipo de software frente a los tradicionales, **el objetivo de este proyecto es comparar y analizar la precisión de FloEFD frente** al que probablemente es el programa de CFD más extendido mundialmente: **Fluent**.

Fluent actualmente se encuentra integrado en el software de ANSYS. La propia empresa define el software de ANSYS Fluent como la herramienta de CFD más poderosa, precisa y rápida disponible del mercado capaz de optimizar el rendimiento de los productos y de obtener varias aplicaciones multifísicas<sup>2</sup> (referido a la capacidad del programa de realizar análisis de CFD y mecánicos simultáneamente).

---

<sup>2</sup> Fuente: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.





## 2 MECÁNICA DE FLUIDOS Y SOFTWARE

Una vez entendido el estado del arte actual y el objetivo que persigue este documento, el objetivo específico de este capítulo es definir y explicar las bases y el funcionamiento de la mecánica de fluidos y los métodos de cálculo empleados en los softwares de CFD. Además, se hará énfasis en las diferencias entre los programas que van a ser usados en este proyecto, FloEFD y Fluent, así como se dedicará un apartado a las ventajas que tiene usar FloEFD sobre CATIA.

### 2.1 Mecánica de Fluidos

Tal y como se explicó en el capítulo de introducción, la mecánica de fluidos es la rama de la física que estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos. Esta disciplina de la ciencia establece por medio de las conocidas ecuaciones de Navier-Stokes el movimiento más general de un fluido homogéneo en composición, viscoso y newtoniano está gobernado por el sistema de ecuaciones en derivadas parciales:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \underline{\underline{\boldsymbol{\tau}'}} + \rho \mathbf{f}_m \quad (2)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \mathbf{v} \cdot \nabla T = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \underline{\underline{\boldsymbol{\tau}'}} : \nabla \mathbf{v} + Q_r + Q_q + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

Estas ecuaciones se denominan ecuación de continuidad, ecuación de cantidad de movimiento y ecuación de la energía. Las variables de estado que relacionan las variables termodinámicas entre sí proporcionan los campos de densidad ( $\rho$ ), velocidad ( $\mathbf{v}$ ), presión ( $p$ ) y temperatura ( $T$ ) en cualquier punto del dominio fluido y, consecuentemente, también sobre la superficie del objeto.

A su vez, en el sistema de ecuaciones anterior  $t$  denota al tiempo,  $\mathbf{f}_m$  es el vector de fuerzas másicas,  $c_v$  es la capacidad calorífica del gas a volumen constante,  $k$  es su conductividad térmica,  $\underline{\underline{\boldsymbol{\tau}'}} : \nabla \mathbf{v} > 0$  es el término de disipación de energía cinética en interna y  $Q_r$  y  $Q_q$  son las potencias caloríficas que, por unidad de volumen, recibe el fluido por radiación y por reacción química respectivamente.

El término  $\underline{\underline{\boldsymbol{\tau}'}}$  viene dado por la expresión:

$$\tau'_{ij} = 2\mu \gamma_{ij} + \left( \mu_v - \frac{2}{3}\mu \right) \nabla \cdot \mathbf{v} \delta_{ij} \quad (4)$$

donde:

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

El sistema no lineal (1) - (5) de cinco ecuaciones en derivadas parciales para el cálculo de la densidad  $\rho$ , de las tres componentes de la velocidad  $\mathbf{v}$ , y de la energía interna  $e$ , contiene dos incógnitas adicionales: la presión y la temperatura  $T$ . Para cerrar el sistema se añaden las ecuaciones de estado:

$$T = T(e, \rho) \quad (6)$$

$$p = p(e, \rho) \quad (7)$$

Y se especifican además los coeficientes  $\mu(T, \rho)$ ,  $\mu_v(T, \rho)$  y  $k(T, \rho)$ .

Con esto, queda descrito de forma muy genérica el comportamiento de cualquier fluido, puesto que la resolución de este sistema para cada caso y con la correcta aplicación de las condiciones de contorno e iniciales permite obtener todas las variables de estado citadas anteriormente.

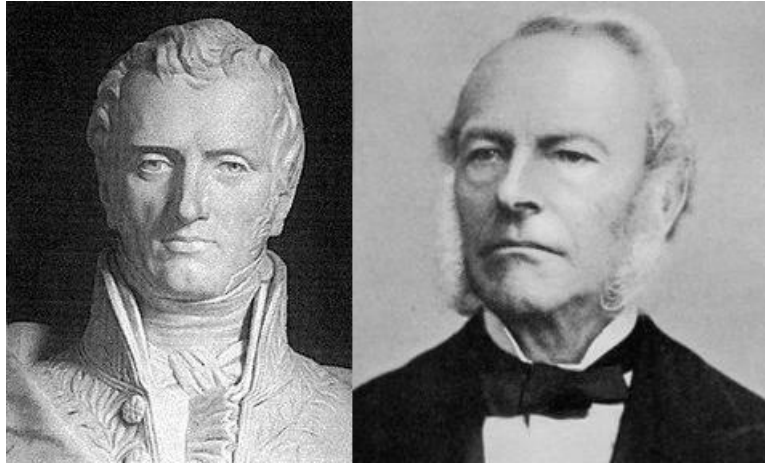


Figura 3: Claude-Louis Henri Navier (izquierda) y George Gabriel Stokes (derecha).

Sin embargo, hasta el día de hoy no se conoce una solución general de estas ecuaciones, por lo que la resolución de las mismas se realiza particularmente para cada problema y bajo ciertas condiciones particulares. Tradicionalmente, se asumen ciertas hipótesis de partida para poder calcular las soluciones buscadas para tratar de simplificar las expresiones anteriormente citadas, como por ejemplo considerar la densidad constante en el caso de líquidos o despreciar los efectos transitorios en los cálculos.

La resolución analítica de estas ecuaciones uno de los grandes hitos por realizar de la ciencia actual. De hecho, es considerado uno de los llamados problemas del milenio. Los problemas del milenio son siete problemas matemáticos cuya resolución sería premiada, según anunció el Clay Mathematics Institute en el año 2000, con la suma de un millón de dólares cada uno<sup>3</sup>.

El problema consiste en progresar hacia una teoría matemática mejor sobre la dinámica de fluidos. El enunciado del problema a resolver para considerar logrado esto es demostrar si a partir de unas condiciones iniciales de fluido laminar la solución del flujo para todos los instantes de tiempo es también un flujo laminar.



Figura 4: Logo del Clay Mathematics Institute

Por este motivo, a finales del siglo XX se ha ido popularizando el uso de los programas de cálculo conocidos como *Computational Fluid Dynamics*. Este software permite calcular con un alto grado de exactitud la solución numérica a estas ecuaciones.

<sup>3</sup> Fuente: <http://www.claymath.org/millennium-problems>

## 2.2 Computational Fluid Dynamics

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

Existen diversos métodos para resolver el sistema de ecuaciones resultante, pero todos ellos siguen el mismo procedimiento básico:

- Durante el preprocesamiento:
  - La geometría y la física del problema pueden ser definidos usando algún software *Computer Aided Design* (CAD). Partiendo de este punto, los datos pueden ser tratados adecuadamente y el volumen de control es extraído del modelo.
  - El volumen ocupado por el fluido es dividido en celdas discretas, conocidas como malla. La malla puede ser uniforme o no uniforme, estructurada o no estructurada, y consistente en una combinación de elementos hexaédricos, tetraédricos, prismáticos, piramidales o poliédricos.
  - Se establece el modelo físico. Esto viene referido a las ecuaciones y expresiones que van a ser consideradas en el cálculo. Por ejemplo, las ecuaciones de movimiento, las de entalpía, de radiación y de conservación de especies.
  - Se definen las condiciones de contorno. Esto implica especificar el comportamiento del fluido en estas regiones y las propiedades de las superficies en sí mismas en contacto con el dominio fluido. Para problemas en los que sea necesario estudiar el régimen transitorio, las condiciones iniciales también deben ser definidas.
- La simulación es iniciada y las ecuaciones son resueltas de forma iterativa tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.
- Finalmente, los datos son postprocesados y usados para el análisis y visualización de los resultados.

A continuación, se detalla en qué consiste la discretización espacial, así como serán definidos dos métodos específicos que se son usados para resolver las ecuaciones en los problemas que sean definidos.

### 2.2.1 Discretización espacial

Se va a dedicar este apartado a analizar la discretización que tiene lugar en los programas de CFD, generando el llamado *mallado*. De forma general, y pese a la cantidad de procedimientos que existen para discretizar el espacio, se puede decir que el mallado consiste en dividir el espacio fluido (región del espacio que contiene el fluido y que se pretende a analizar) en subdominios de diferente geometría y características.

La razón de ser de este proceso es la de simplificar las ecuaciones diferenciales que se están resolviendo, puesto que en regiones de espacio muy pequeñas es posible asumir que las derivadas de una variable con respecto a una coordenada espacial es aproximadamente el cociente incremental de ambos parámetros, tal y como se observa en la ecuación ((8):

$$\frac{\partial X}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta X}{\Delta x_i} \quad (8)$$

donde  $X$  hace referencia a una variable termodinámica genérica y  $x_i$  es una de las tres coordenadas espaciales.

De esta forma, se pueden aplicar de forma incremental las ecuaciones de Navier-Stokes, transformando la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones matricial. Es justo debido a esta transformación, que los campos de las variables termodinámicas obtenidos mediante la resolución de ese sistema son una **aproximación** de la realidad, y **no tienen por qué representar la solución real** si no se converge adecuadamente a una solución.

Afortunadamente, se puede demostrar que cuanto mayor sea el número de celdas en el que se discretiza el espacio, y por tanto más pequeñas son estas celdas, los diferentes métodos de resolución mejor aproximan la solución real. En consecuencia cuanto mejor se haga esta discretización, mejor será la aproximación que se obtenga.

Sin embargo, y como se verá en los siguientes apartados, los métodos de resolución de los sistemas que se obtienen son muy costosos computacionalmente, y resolver ciertos mallados muy complejos puede conllevar un tiempo de resolución inabarcable.

Con respecto a los métodos de discretización que usan en los programas:

- FloEFD realiza un mallado adaptativo y ortogonal. El mallado adaptativo es un tipo de mallado que se basa en la resolución iterativa del problema, refinando la malla en cada iteración en las zonas de mayor gradiente de los parámetros que se establezcan (normalmente asociado a la presión). Por otra parte, el mallado ortogonal es aquel en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90°. Otra ventaja de FloEFD es que permite una generación automática de la malla.
- Fluent permite un control mucho mayor sobre la malla, pero no la genera de forma automática tan fácilmente como FloEFD. Sin embargo, es por esta razón que puede generar mallas estructuradas que sean capaces de converger muy rápidamente a la solución.

En la Figura 5 se puede observar el mallado alrededor del modelo CAD de un coche de Formula 1. La resolución de este tipo de problemas tan complejos puede llevar días e incluso meses debido a la complejidad de la malla.

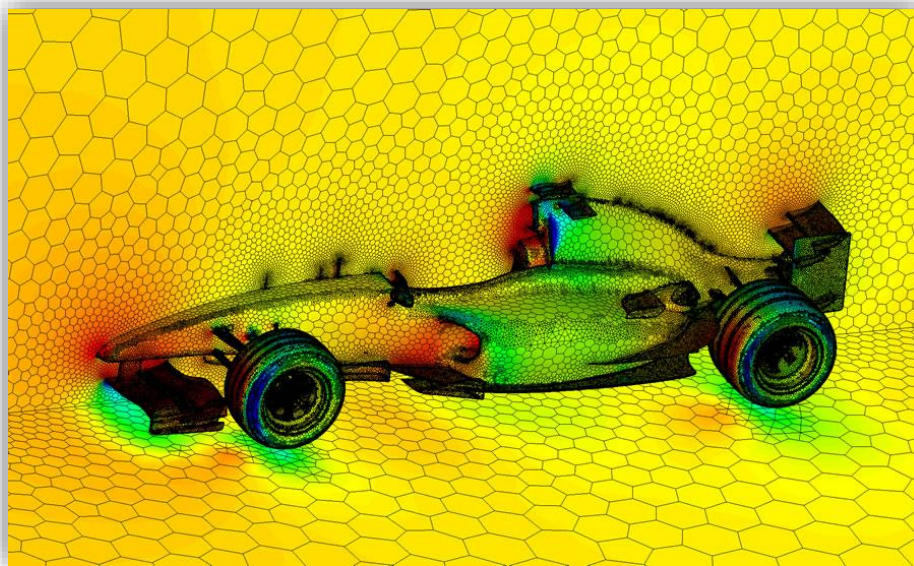


Figura 5: Mallado alrededor del modelo CAD de un coche de Formula 1.

## 2.2.2 Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos (FVM por sus siglas en inglés Finite Volume Method) es uno de los métodos más extendidos en los algoritmos de CFD por sus ventajas en el uso de la memoria y la velocidad de análisis, especialmente en problemas grandes, con flujos turbulentos a altos números de Reynolds, y flujos como la combustión.

En el método de volúmenes finitos, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema son reescritas en forma conservativa, y luego resueltas en volúmenes de control discretos. Esta discretización garantiza la conservación de los flujos a través de los volúmenes de control definidos. La ecuación de volumen finito discretizada tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q \, dV + \iint F \, dA = 0, \quad (9)$$

Donde  $Q$  es el vector de las variables conservadas,  $F$  es el vector de flujos,  $V$  es el volumen del volumen de control del elemento considerado, y  $A$  es el área superficial del volumen de control del elemento considerado.

## 2.2.3 Método de Elementos Finitos

El método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés Finite Element Method) es conocido por su uso en análisis de estructuras, pero también es aplicable a los softwares de CFD. Sin embargo, la formulación del FEM requiere un tratamiento especial para asegurar las ecuaciones de conservación. De acuerdo con varias fuentes, es un método mucho más estable que el FVM, pero requiere mucha más memoria y tiempo de cálculo que este último.

En este método, una ecuación ponderada de residuos posee la forma:

$$R_i = \iiint W_i Q \, dV^e \quad (10)$$

Donde  $R_i$  es la ecuación residual del verticel  $i$  de un elemento,  $Q$  es la ecuación de conservación expresada en base al elemento,  $W_i$  es el factor de ponderación, y  $V^e$  es el volumen del elemento-

## 2.2.4 Método de Diferencias Finitas

El método de diferencias finitas (FDM por sus siglas en inglés *Finite Difference Method*) es un método de una gran importancia histórica y simple de programar. Actualmente es usado solo en unos pocos métodos especializados, que son usados para lidiar con geometrías complejas con alta precisión y eficiencia usando condiciones de contorno embebidas en las ecuaciones.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Donde  $Q$  es el vector de variables conservadas, y  $F, G$  y  $H$  son los flujos en las direcciones  $x, y$  y  $z$  respectivamente.

## 2.3 Modelos de Turbulencia

Tal y como fue mencionado anteriormente, la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes no es un

problema trivial. Una de las principales trabas que se encuentra en la resolución de las mismas es cuando el flujo que se está estudiando es turbulento, puesto que tal y como demuestran los experimentos, se trata de un sistema caótico. La teoría del caos es una rama de las matemáticas y de la física que trata ciertos tipos de sistemas complejas y sistemas dinámicos muy sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales.

Cuando el número de Reynolds que posee un fluido en movimiento es bajo, se dice que el flujo es laminar. En estas condiciones, el problema a resolver está bien definido y su resolución es más sencilla que en el caso en el que se tengan números de Reynolds muy altos, caso en el que se dice que el flujo es turbulento. La forma de estudiar estos sistemas es considerar cantidades medias, y en el caso en el que se pretenda conseguir una mayor precisión, definir un modelo de cierre considerando la turbulencia como un sistema caótico determinista.

En la Figura 6 se observa de modo ilustrativo lo que se expone acerca del modelo de cierre y el comportamiento caótico de los fluidos. Si bien cuando la corriente se desprende mantiene un comportamiento laminar, aguas abajo del flujo este comienza a tener un comportamiento turbulento.

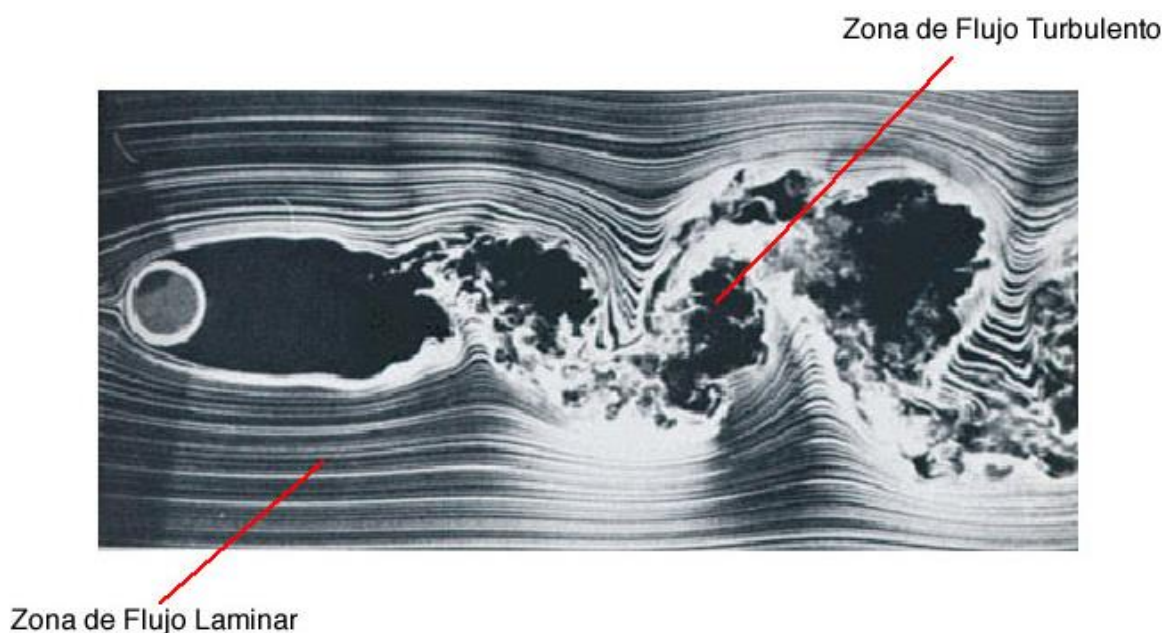


Figura 6: Flujo alrededor de un cilindro.

Si bien existen varios modelos de cierre, se van a explicar a continuación los más usados.

### 2.3.1 Modelo de Turbulencia K-epsilon

El modelo de turbulencia K-epsilon ( $k - \epsilon$ ) es el modelo más común usado en CFD para simular las características del flujo medio para condiciones de flujo turbulentas. Es un modelo de dos ecuaciones que da una descripción general de la turbulencia por medio de dos ecuaciones de transporte. El objetivo principal que tuvo en sus inicios el modelo fue el de mejorar el modelo de mezclas, así como encontrar una alternativa algebraica para escribir las diferentes longitudes de turbulencia en flujos de complejidad moderada-alta.

Las dos variables consideradas en las ecuaciones son:

- Energía cinética turbulenta ( $k$ ), que determina la energía en la turbulencia.
- Disipación turbulenta ( $\epsilon$ ), que determina la tasa de disipación de energía cinética turbulenta.

Al contrario que los primeros modelos de turbulencia, el modelo  $k - \epsilon$  se centra en los mecanismos que afectan a la energía cinética turbulenta, sin embargo, los modelos de mezcla carecen de este tipo de generalidades. Por este motivo, se asume que la viscosidad turbulenta es isotrópica, o en otras palabras, la

ratio entre el esfuerzo de Reynolds y la tasa de deformación media es la misma en todas las direcciones.

Las ecuaciones del modelo contienen muchos términos desconocidos y que además no pueden ser medidos. Para una aproximación mucho más práctica, el modelo estándar de turbulencia  $k - \varepsilon$  es usado basándose en el conocimiento de los procesos más relevantes, de manera que se minimizan los términos desconocidos y se tienen unas ecuaciones que pueden ser usadas para un gran número de aplicaciones.

Las ecuaciones están basadas en:

$$\begin{aligned} & \text{Tasa de cambio de } k \text{ o } \varepsilon + \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \text{ por convección} \\ & = \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \text{ por difusión} \\ & + \text{tasa de producción de } k \text{ o } \varepsilon \\ & - \text{Tasa de destrucción de } k \text{ o } \varepsilon \end{aligned}$$

Con esto, se establece que para la energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (12)$$

Para la disipación:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

donde  $u_i$  representa la componente de la velocidad en la dirección correspondiente,  $E_{ij}$  representa la componente de la tasa de deformación y  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ . A su vez, estas ecuaciones también poseen algunas constantes que pueden ser ajustables. Los valores de dichas variables han sido ajustados de acuerdo a numerosos análisis e iteraciones para un amplio rango de flujos turbulentos, y sus valores son:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (14)$$

### 2.3.2 Modelo de Turbulencia k-omega

El modelo  $k - \omega$  es otro modelo de cierre muy usado en CFD. Este modelo pretende predecir la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales con dos variables,  $k$  y  $\omega$ , siendo la primera de ellas la energía turbulenta cinética mientras que la segunda es la ratio de disipación en energía cinética.

Las ecuaciones de evolución de  $k$  y  $\omega$  se modelan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad \text{con } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (16)$$

Donde  $v_T = k/\omega$ .

## 2.4 Definiciones y conceptos

En este apartado se van a definir los conceptos más importantes que se van a usar en este proyecto

### 2.4.1 Fuerzas aerodinámicas

Todo cuerpo en movimiento sumergido en un fluido con viscosidad no nula experimenta una fuerza resultante sobre el mismo, que se puede entender como la acción que genera el fluido sobre dicho objeto al deformarse para dejar paso al mismo.

La fuerza aerodinámica se suele descomponer en dos: la fuerza de sustentación y la fuerza de resistencia. Esta descomposición puede observarse de forma esquemática en la

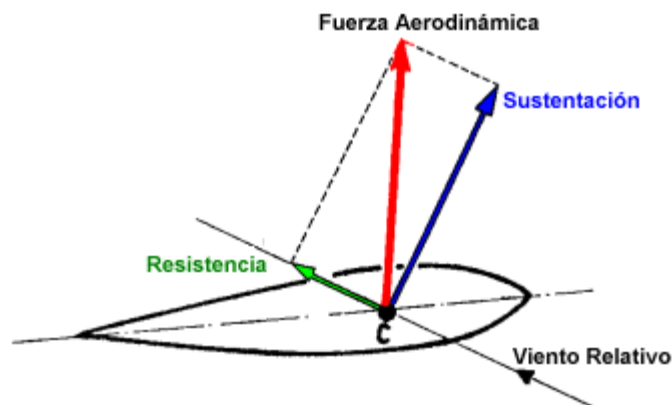


Figura 7: Fuerzas aerodinámicas y descomposición clásica.

#### 2.4.1.1 Fuerza de Sustentación

La fuerza de sustentación es la fuerza desarrollada por un perfil aerodinámico moviéndose en el aire, ejercida de abajo arriba, y cuya dirección es perpendicular al viento relativo y a la línea media del perfil o envergadura del avión (no necesariamente perpendiculares al horizonte). Se suele representar con la letra  $L$  del inglés *Lift*.

#### 2.4.1.2 Fuerza de Resistencia

La resistencia es la fuerza que experimenta un objeto en movimiento sumergido en un fluido en la dirección contraria a la que se encuentra con la corriente. La resistencia actúa de forma paralela y en la misma dirección que el viento relativo, por lo que no siempre se puede afirmar que la resistencia es paralela y de dirección opuesta a la trayectoria.

### 2.4.2 Números Adimensionales

En la resolución teórica de los problemas físicos se utilizan las leyes de la física (normalmente representadas por ecuaciones diferenciales) para establecer las propiedades del fenómeno físico considerado, y para calcular, mediante el análisis matemático, las variables físicas desconocidas. Sucede, sin embargo, en la mecánica de medios continuos y en otras ramas de la física y de la ingeniería, que los fenómenos bajo consideración son, a menudo, tan complicados que conducen a ecuaciones de complejidad tal que su resolución analítica es impensable.

De acuerdo con el Teorema  $\pi$  de *Vaschy-Buckingham* de análisis dimensional, la dependencia funcional entre un cierto número de variables ( $n$ ) puede ser reducida en el número de dimensiones independientes de esas  $n$  variables ( $k$ ) para dar un número de cantidades adimensionales independientes ( $p = n - k$ ). Así diferentes sistemas son equivalentes cuando tienen la misma descripción mediante números adimensionales.

De esta forma, mediante el uso adecuado del Teorema  $\pi$  se puede adimensionalizar las fuerzas aerodinámicas,



y obtener unos coeficientes que solo dependen de la geometría y de algún otro parámetro, como por ejemplo el ángulo de ataque.

Los números adimensionales también expresan el cociente entre dos magnitudes, que pueden ser fuerzas o cualquier otro tipo de relación, de forma que cuando estos cocientes dan un resultado muy bajo o muy alto, se pueden despreciar ciertos términos o efectos en la resolución de ecuaciones diferenciales y en sus condiciones de contorno.

#### 2.4.2.1 Coeficiente de Sustentación

La adimensionalización de la fuerza de sustentación se conoce como coeficiente de sustentación, cuya expresión es:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (17)$$

Donde  $S$  es una superficie de referencia o una longitud en función de si la geometría analizada es tridimensional o bidimensional.

#### 2.4.2.2 Coeficiente de Resistencia aerodinámica

La adimensionalización de la fuerza de resistencia se conoce como coeficiente de resistencia o de resistencia aerodinámica, cuya expresión es:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (18)$$

Donde  $S$  es una superficie de referencia o una longitud en función de si la geometría analizada es tridimensional o bidimensional.

#### 2.4.2.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds ( $Re$ ) se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales (o convectivas, dependiendo del autor) y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

El número de Reynolds puede suele expresarse de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (19)$$

Donde  $D$  es una longitud característica de la geometría analizada.

#### 2.4.2.4 Número de Froude

El número de Froude ( $Fr$ ) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido.

Suele expresarse de la siguiente forma:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gD} \quad (20)$$

Donde  $D$  representa de nuevo una longitud característica de la geometría analizada nuevamente.

En particular, en los análisis que se van a realizar en este proyecto se asumirá que el número de Froude es muy grande, es decir:

$$Fr \gg 1 \quad (21)$$

Por tanto, se asumirá que el efecto de la gravedad en los problemas es despreciable, y no será considerada en los problemas que se analicen.

#### **2.4.2.5 Otros números**

Al igual que estos, puede que en el desarrollo de este proyecto se usen más números adimensionales. En caso de tener que usar algún otro será definido en dicho capítulo.

Para obtener más información acerca de números adimensionales, se recomienda acudir a alguno de los libros de la bibliografía, como por ejemplo [1], en los que se detalla y se obtiene más información acerca de los mismos.

# 3 PROBLEMA 1: CILINDRO 2D

Estudiar el flujo turbulento alrededor de un perfil no es un problema trivial en absoluto, tal y como ya demostró Von-Karman durante el siglo XX. Una calle de vórtices de von Kármán es un patrón que se repite de vórtices en remolino causados por la separación no estacionaria de la capa de fluido al pasar sobre cuerpos sumergidos. Debe su nombre al ingeniero y estudioso de la dinámica de los fluidos, Theodore von Kármán.

Tal y como se puede observar en la Figura 8, esta situación se produce de forma natural en ciertas situaciones cotidianas, como por ejemplo en el aire cuando se encuentra los edificios y antenas de radio de las ciudades, edificaciones en el mar e incluso en la atmósfera. Esto tiene como resultado una fuerza oscilante en el objeto al cual rodea el fluido. El ejemplo más ilustrativo de esto fue el llamado puente de Takoma, cuyo derrumbamiento se debió al entrar la estructura en resonancia debido a la fuerza oscilante que el viento producía en el puente.

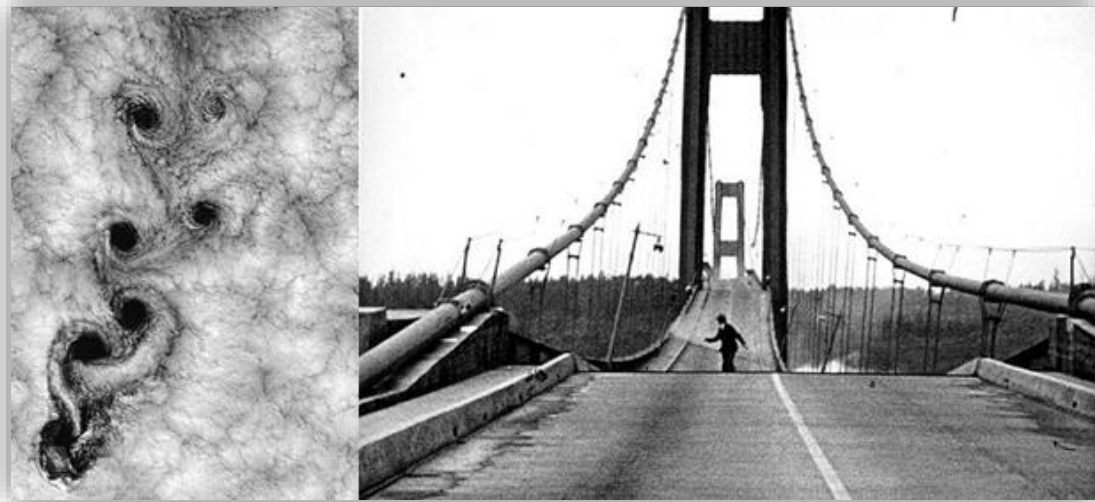


Figura 8: Consecuencias del efecto de la calle de torbellinos de Von-Karman.

Por este motivo, el estudio dinámico sobre cuerpos romos en estas situaciones es muy importante. En particular, el efecto que tiene en el coeficiente de resistencia una corriente de agua sobre un cilindro es un problema muy conocido y estudiado experimentalmente, por lo que resulta de interés el cálculo de pueden realizar los softwares considerados para ser contrastados con los datos experimentales. Los resultados a los que se está haciendo referencia se ven reflejados en la Figura 9.

El cambio en el comportamiento del coeficiente de resistencia a medida que se aumenta el Número de Reynolds es debido al cambio en la capa límite. Mientras que a bajos Números de Reynolds la capa límite es laminar, a medida que este aumenta la capa límite adquiere un comportamiento turbulento, que se vuelve beneficioso porque retrasa el desprendimiento de la capa límite.

Este efecto es el motivo por el cual las pelotas de golf o de tenis poseen un menor coeficiente de resistencia aerodinámica que una pelota de pin-pon, ya que la rugosidad de las superficies de las primeras fuerza la aparición de la capa límite turbulenta.

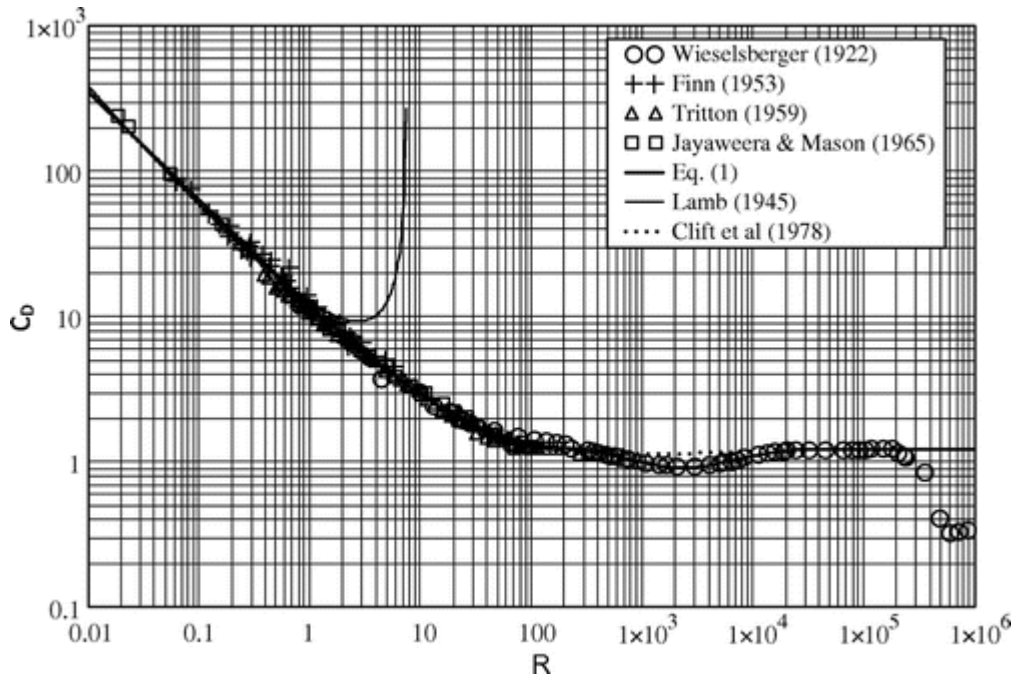


Figura 9:  $C_D$  en un cilindro en función del número de Reynolds.

Para el análisis se han generado dos cilindros:

- Un cilindro de 0.01 m, que será usado para valores del número de Reynolds comprendidos entre 0 y  $10^4$ .
- Un cilindro de 1 m, que será usado para valores del número de Reynolds comprendidos entre  $10^5$  y  $10^6$ .

La razón de esta diferenciación es debida a la velocidad a la que se mueve el agua y el número de Reynolds asociado, que no debe ser muy elevada para conseguir un mejor análisis. A partir de la definición del número de Reynolds, y sabiendo que para el caso del agua  $\rho = 998.19$  y  $\mu = 0.0010115$  a una temperatura de  $293.2 K$ , se obtiene las velocidades a las que se deben establecer la corriente para cada caso del número de Reynolds que se quiere analizar:

$Re [-]$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$D [m]$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1	1
$v [m/s]$	0.000101	0.00101	0.0101	0.1013	1.0133	0.1013	1.0133

Tabla 1: Velocidades y diámetros del cilindro consideradas para el análisis del problema 1.

Donde la velocidad se obtiene a partir de la expresión:

$$v = \frac{Re \mu}{\rho D} \tag{22}$$

Con estas premisas, se procede a continuación a analizar este problema con cada uno de los softwares considerados en este proyecto: FloEFD y Fluent.

### 3.1 FloEFD

Para analizar el problema con FloEFD, el primer paso es generar la geometría para sobre la cual se va a analizar

el flujo. Tal y como ya es conocido, para generar una geometría para un posterior análisis bidimensional hay que crear una superficie 2D y luego realizar una operación *pad* para darle un grosor suficiente. El resultado para el caso del cilindro de 1 metro puede observarse en la Figura 10.

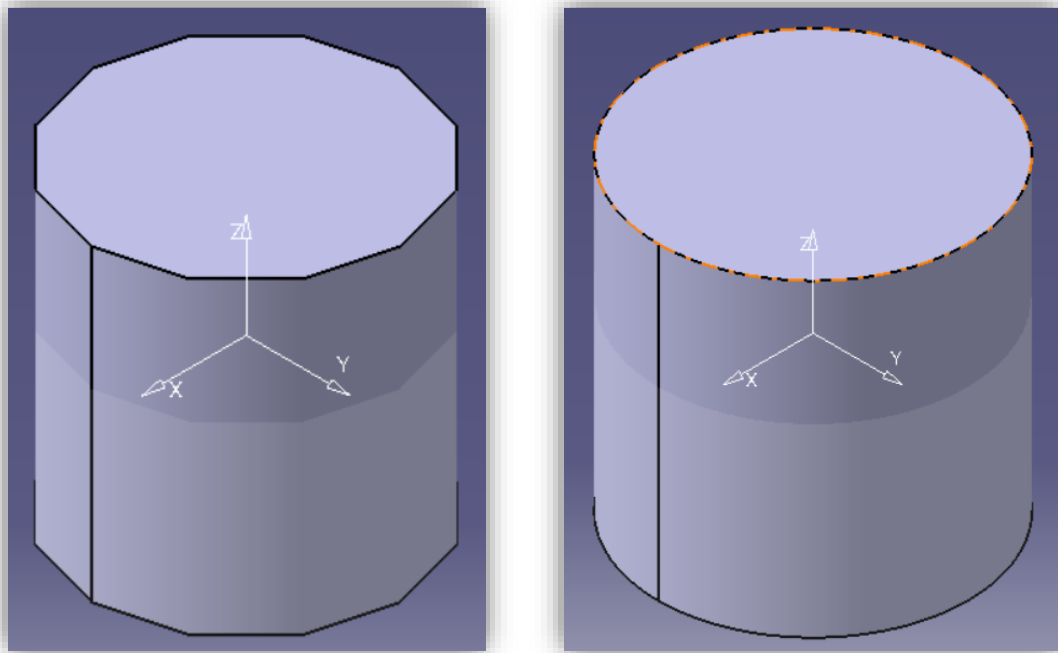



Figura 10: Cilindro de 0.01 m (a la izquierda) y 1 m (a la derecha) de diámetro.

A continuación, y tras guardar los archivos correspondientes como *catproduct*, se procede a abrir el modelo con el módulo de FloEFD y configurar el archivo:

- En el árbol de CATIA V5 (Figura 11), se hace clic sobre el ítem *Computational Domain*. En este campo, se establece el tamaño del volumen de control que se va a considerar. En general, es conveniente que al estudiar un caso bidimensional la coordenada transversal al plano se deje por defecto a lo establecido por el programa. El resto de parámetros ajustar al menos a una distancia igual a la del diámetro del cilindro.
- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard* . En este caso, establecer las siguientes propiedades:
  - *Analysis type*. En el apartado *Analysis type*, clicar en *External*. En el apartado *Physical Features*, asegurar que el valor *Time-dependent* está clicado.
  - *Fluids*. Establecer como fluido de estudio el agua: *Water (Liquids)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*.
  - *Wall Conditions*. Establecer como valor en *Default Wall thermal condition, Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions*. Para este apartado se configura de la forma que se puede observar en la Figura 12. El valor de *dependency* también puede ser observado en la misma figura.

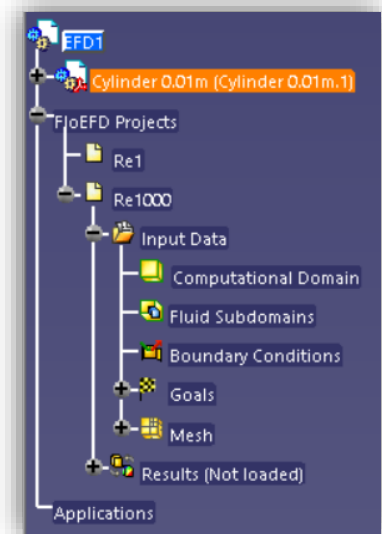


Figura 11: Árbol de proceso de FloEFD en CATIA V5.

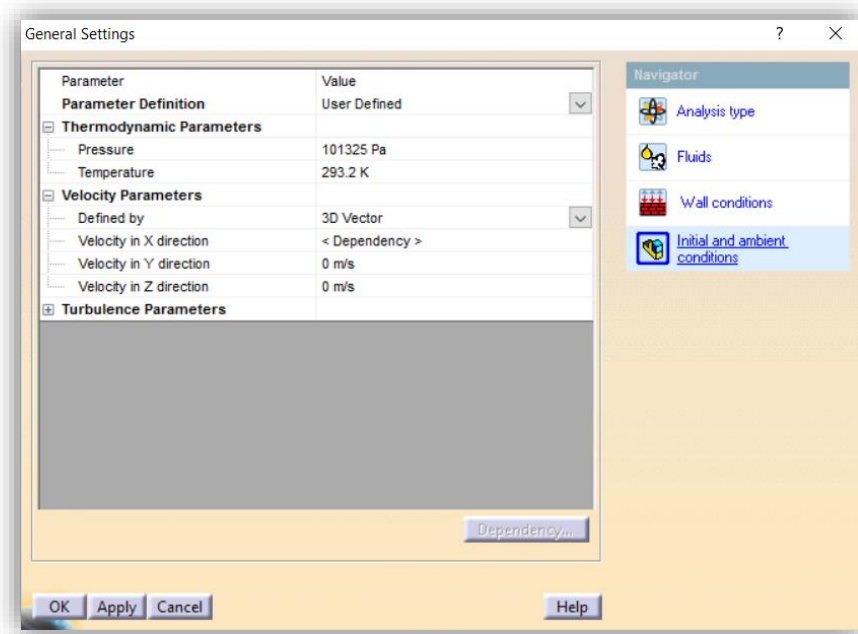


Figura 12: Valores establecidos en el apartado Initial and Ambient Conditions.



Figura 13: Valor del apartado <dependency> establecido en la Figura 12.

- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 11, se clicla con el botón derecho en el apartado *goals, Goals object, New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar el parámetro *GG Force (X)*. De la misma forma en el apartado *goals, Goals object, New Equation Goal*, establecer la siguiente relación:

$$\{GG\ Force\ (X)\ 1\}/(0.002*(0.0010115*10^5)^2)*(2*998.19*0.01)$$

Donde el valor 10<sup>5</sup> está asociado al número de Reynolds correspondiente.

- De nuevo en el árbol, se clicla con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura de la forma que se observa en la Figura 14.

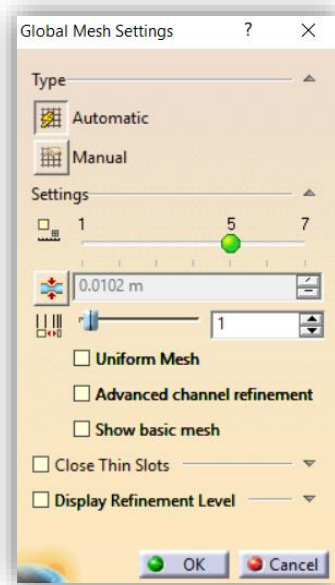
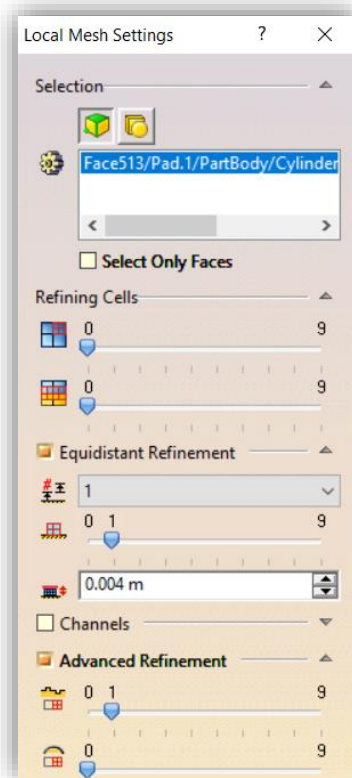


Figura 14: *Global Mesh Settings* del primer problema.

- Al igual que antes, se clic con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, New Local Mesh* y se configura de la forma que se observa en la Figura 15.



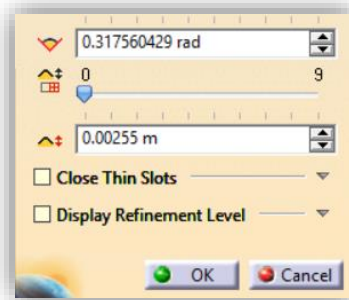


Figura 15: *Local Mesh Settings* en el primer problema.

- Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda suficientemente pequeño, se configura de la forma que se observa en la Figura 16.

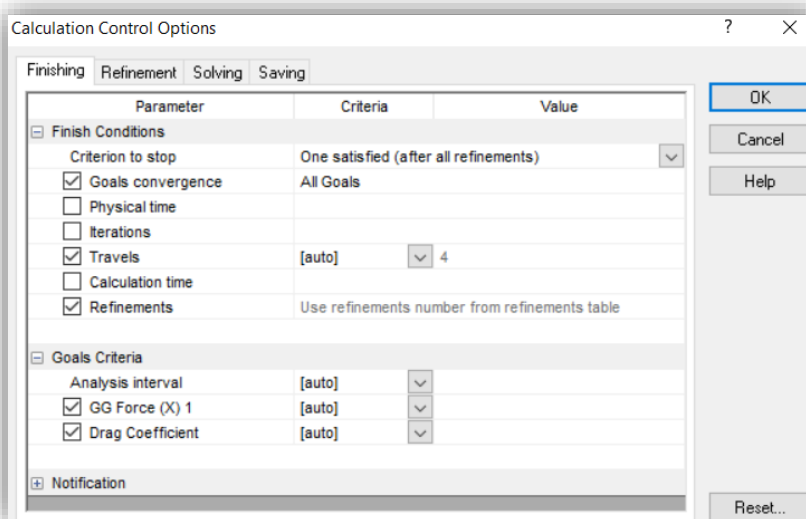
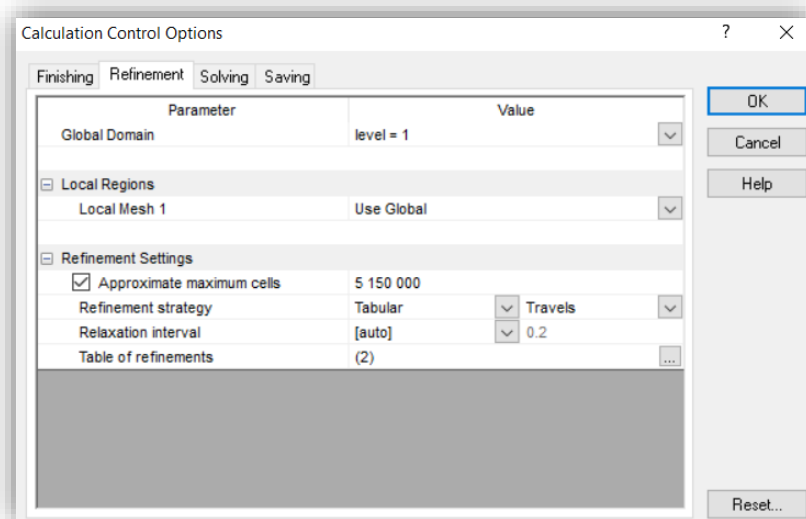


Figura 16: *Calculation Control Options* en el primer problema

Con esto, queda definida la parte de configuración del problema, y puede comenzar la simulación.

Como resultado de la malla creada por el programa, se obtiene un tamaño suficientemente pequeño y que



esta se adapta a la estela creada por el perfil tal y como se observa en la Figura 17.

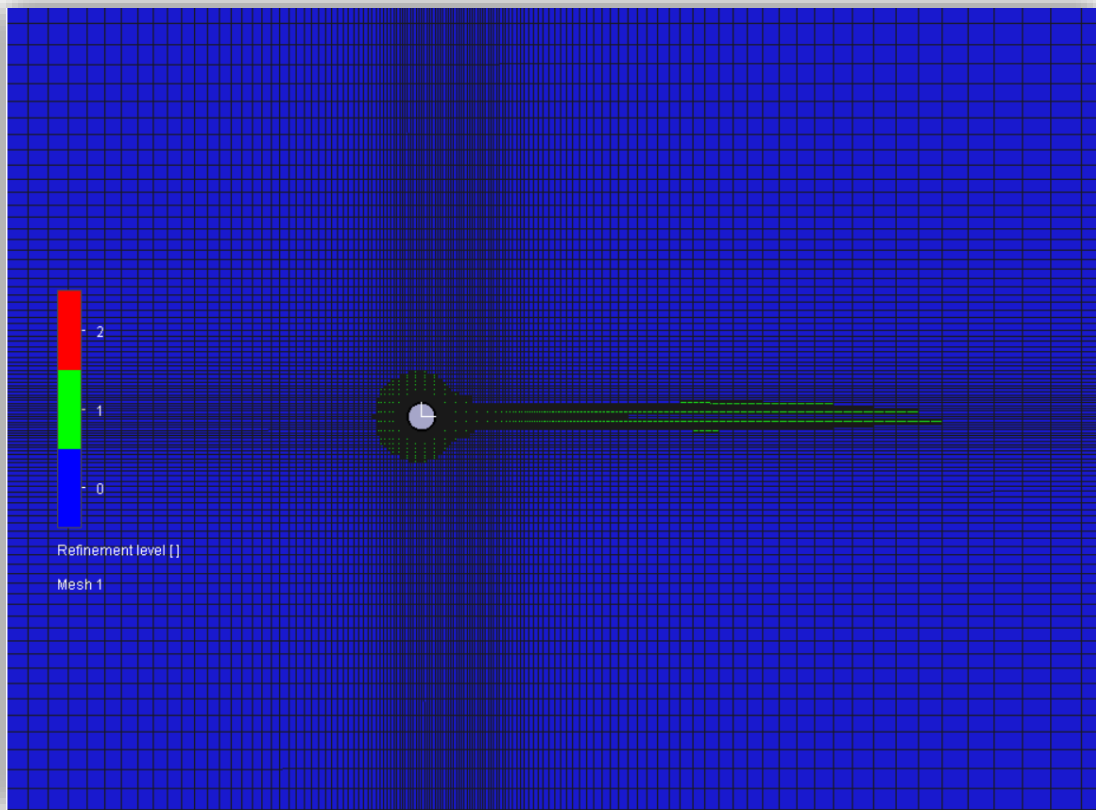


Figura 17: Malla alrededor del cilindro en el primer problema.

A su vez, en la Figura 18 se muestra dicha malla en detalle.

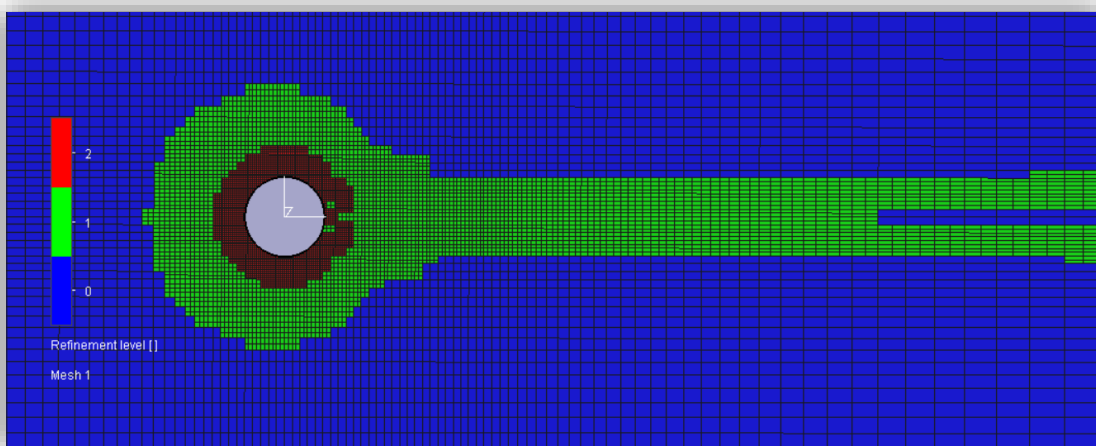


Figura 18: Detalle de la malla alrededor del cilindro en el primer problema

A su vez, para cada uno de los casos es posible calcular los campos de velocidades y presiones en cada caso propuesto. En la Figura 19 y la Figura 20 se tienen dichos campos para el caso  $Re = 10^5$ .

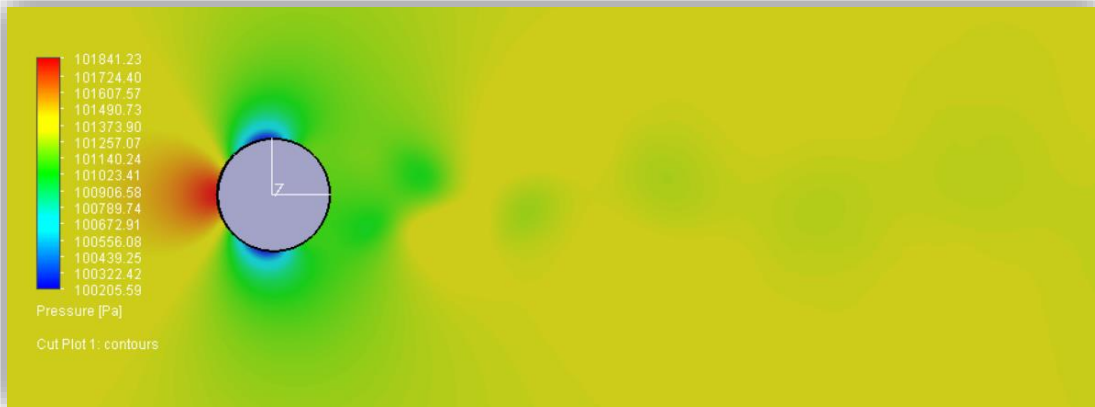


Figura 19: Campo de presiones alrededor del cilindro en el primer problema.

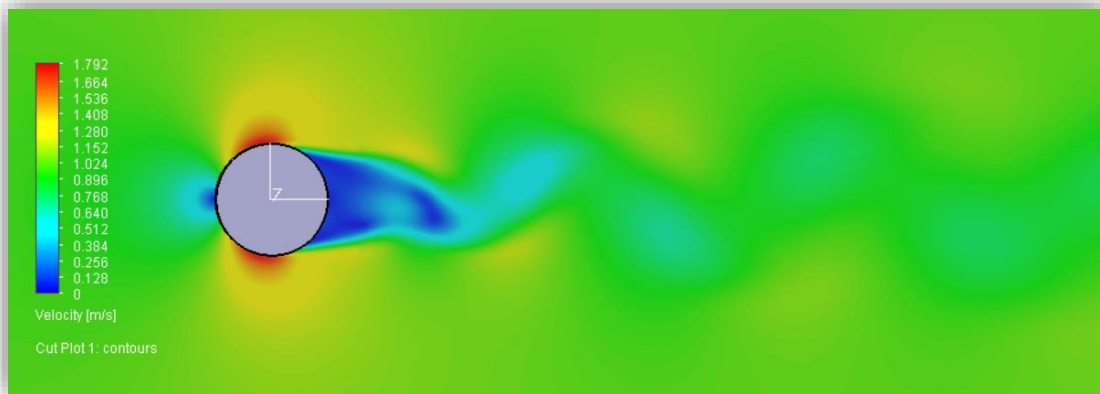


Figura 20: Campo de velocidades alrededor del cilindro en el primer problema.

A partir de los datos obtenidos en cada uno de los casos propuestos, se obtiene como solución que el coeficiente de resistencia en función del número de Reynolds según el cálculo realizado por FloEFD es el que se muestra en la Tabla 2.

$Re$ [–]	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$C_d$ [–]	11.29	3.46	1.53	1.05	1.03	0.62	0.31

Tabla 2: Resultados del coeficiente de resistencia obtenidos a partir de las simulaciones hechas en FloEFD para el primer problema.

A continuación, estudiaremos que resultados se obtienen con el software de cálculo Fluent.

### 3.2 Fluent

En este apartado se va a estudiar el mismo problema, pero en esta ocasión usando Fluent. Para este primer problema y debido al buen trabajo que hace Fluent en este aspecto, se va a elaborar una malla no estructurada, es decir, una malla generada de forma semi-automática por el propio programa. Especial cuidado se ha tenido en el diseño de la misma alrededor del cilindro, donde esta debe ser suficientemente pequeña para captar la capa límite. La malla resultante puede observarse en la Figura 21, así como una vista en detalle del flujo en la zona justo alrededor del perfil en la Figura 22.

Por supuesto, todo esto se ha hecho siguiendo el procedimiento explicado en el apartado anterior: se han realizado dos tamaños de cilindro para hacer los análisis, y para cada caso de Reynolds requerido se usan las velocidades y tamaño descrito en la Tabla 1.

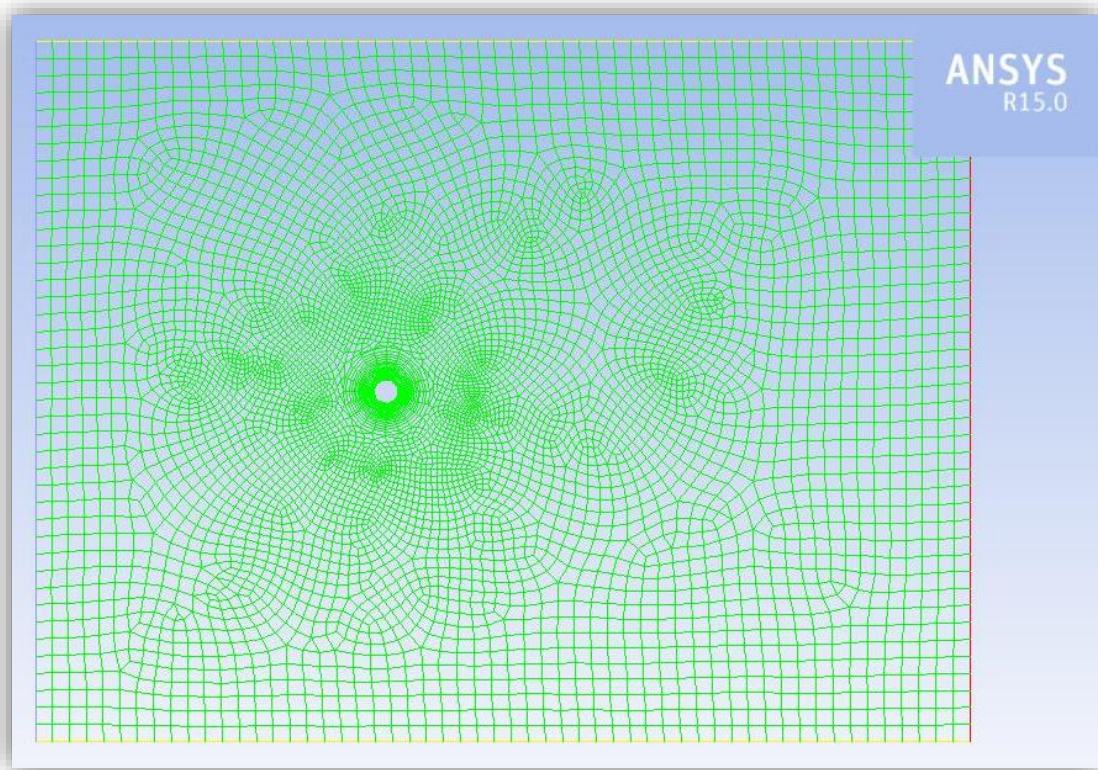


Figura 21: Malla no estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 1.

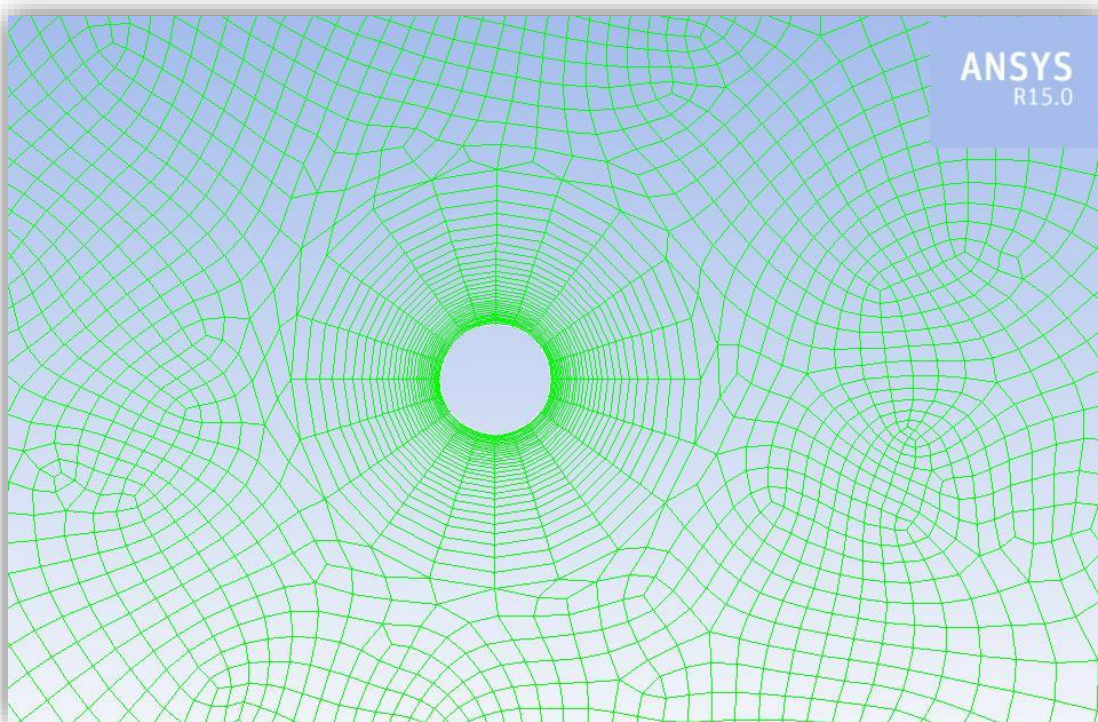


Figura 22: Malla no estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 1.

Con esto, se pasa ahora a describir ahora la configuración realizada para resolver el problema:

- Se va a realizar un estudio basado en presiones, puesto que al ser el agua un líquido se pueden despreciar los efectos de compresibilidad.
- Puesto que  $Fr \gg 1$  (número de Froude) se puede despreciar la gravedad.
- Para el modelo de cierre, se tiene el método  $k - \varepsilon$  se ajusta suficientemente bien a la realidad.
- Por defecto, el fluido de cálculo que usa Fluent es el aire. Cambiar a agua líquida.
- Respecto a las condiciones de contorno:
  - En *Operating Conditions*, establecer como presión del ambiente 101325 Pa.
  - En la entrada, establecer como condición de contorno *velocity-inlet* y establecer en cada caso la velocidad requerida.
  - En los límites superior e inferior, establecer condiciones de simetría.
  - En la salida, establecer la condición de contorno *pressure-outlet*.
- En la pestaña *Solution Methods*, se deja por defecto salvo los términos de energía cinética turbulenta y disipación como términos de segundo orden.

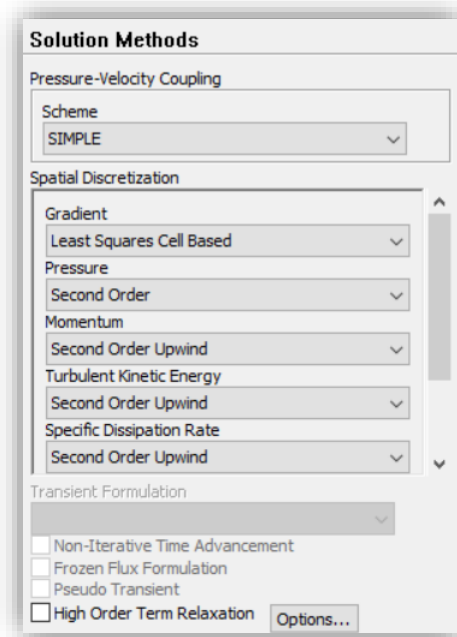


Figura 23: *Solution Methods* en la configuración de Fluent del primer problema.

- Inicializar la solución a partir de los datos de la zona de entrada, donde se define la velocidad y dirección del flujo.
- Ejecutar la simulación con al menos 1000 iteraciones (dependerá del número de número de procesadores de cada ordenador, etc.).

Tras realizar la simulación, se puede obtener para cada caso el campo de presiones y de velocidades alrededor del cilindro. En la Figura 24 y en la Figura 25 se muestran los campos del caso  $Re = 10^5$ .

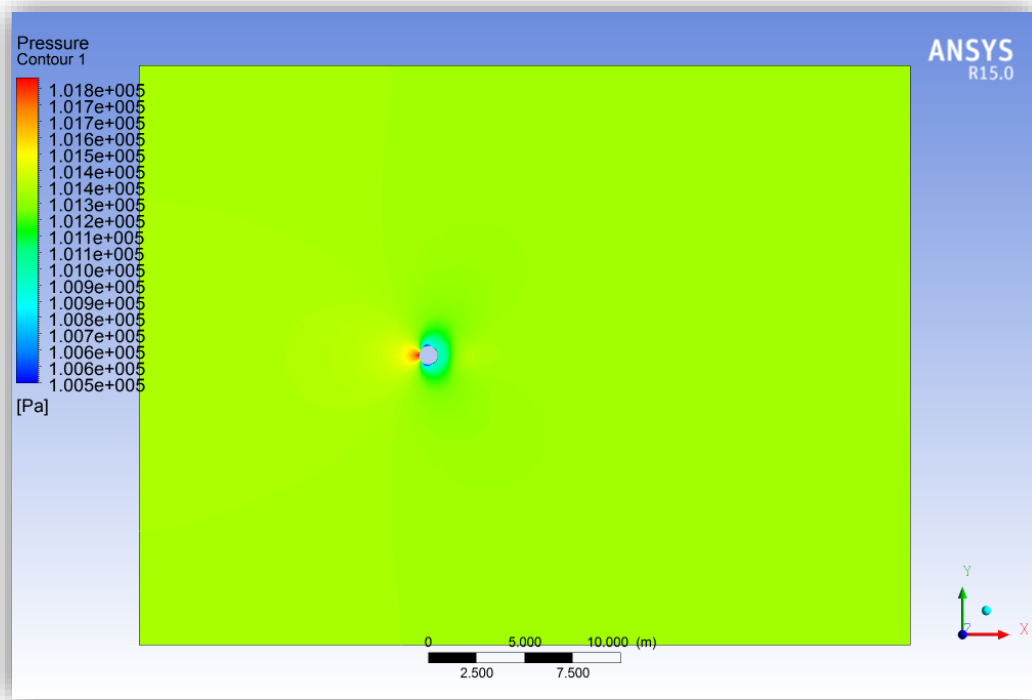


Figura 24: Campo de presiones alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.

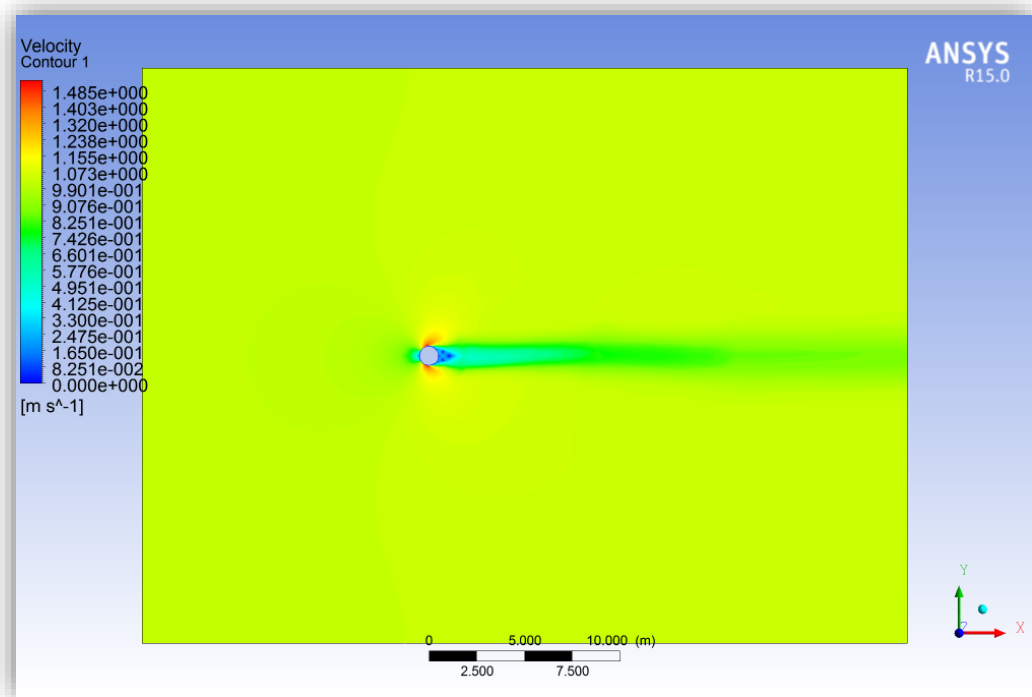


Figura 25: Campo de velocidades alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.

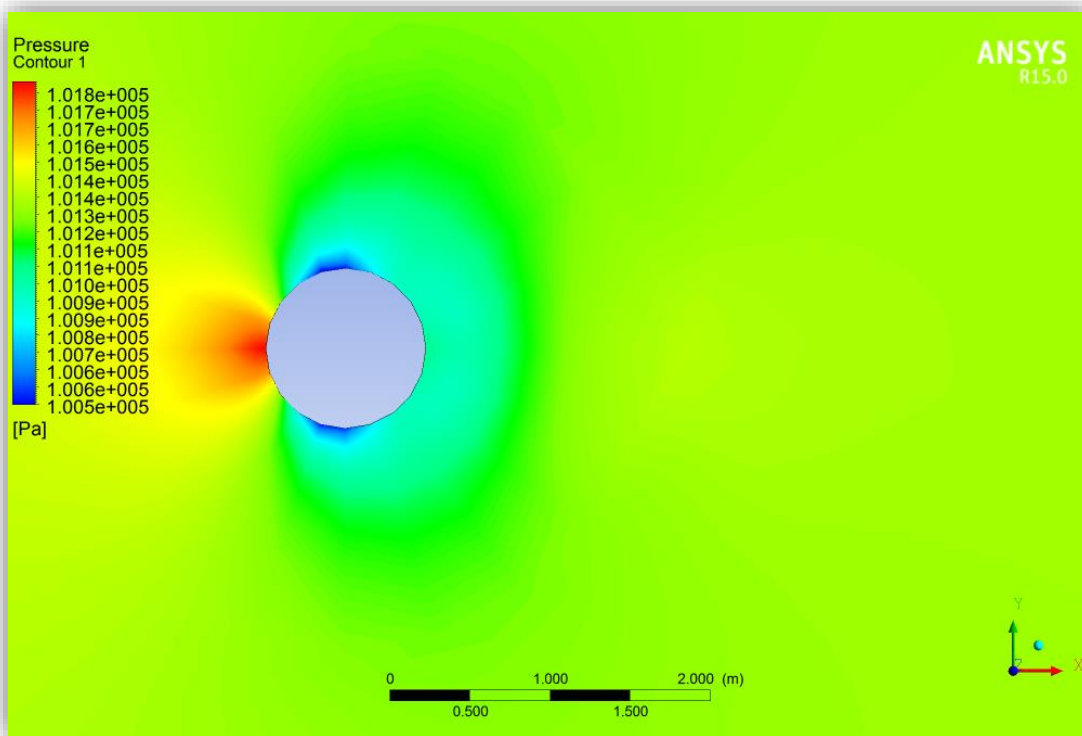


Figura 26: Detalle del campo de presiones alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.

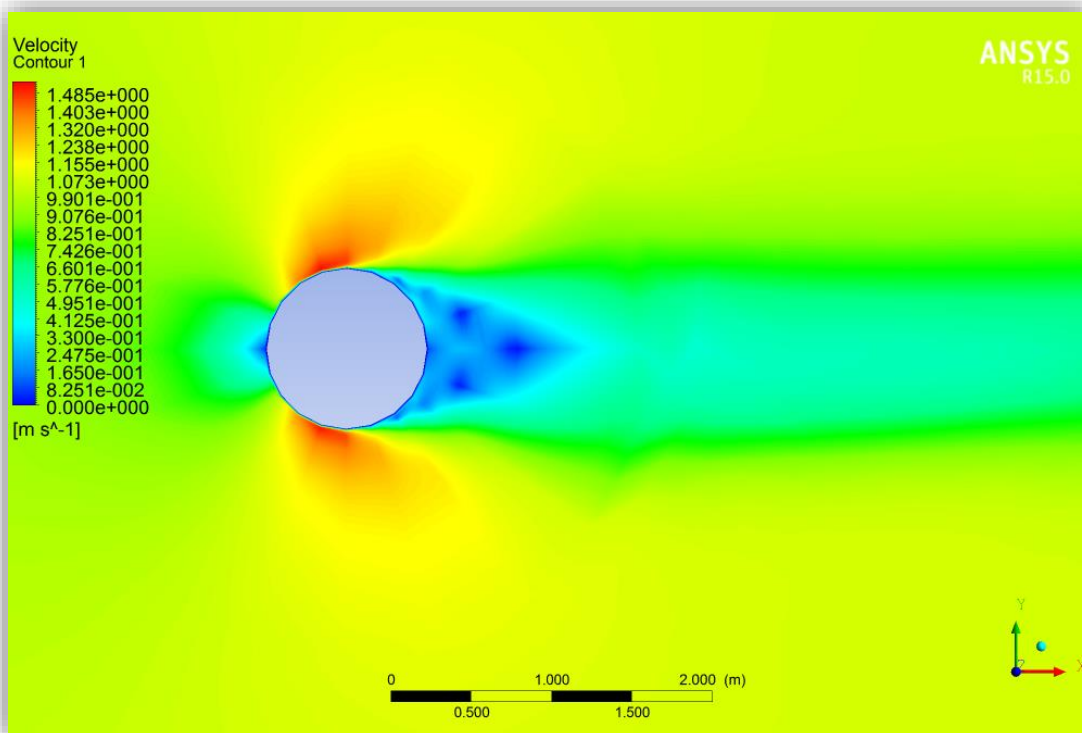


Figura 27: Campo de velocidades alrededor del cilindro del problema 2 calculado por Fluent.

Esto mismo puede hacerse con cada uno de los casos de la Tabla 1, de forma que se obtiene el coeficiente de resistencia que se observa en la Tabla 3.

$Re [-]$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$C_d [-]$	13.16	3.38	1.61	1.062	0.84	0.73	0.68

Tabla 3: Resultados del coeficiente de resistencia obtenidos a partir de las simulaciones hechas en Fluent para el primer problema.

En el siguiente apartado se compara lo obtenido por Fluent con lo obtenido en el apartado anterior.

### 3.3 Resultados

Si bien por separado parece que ambos softwares aproximan suficientemente bien los resultados respecto a los experimentales, en este apartado se va a analizar esto de forma cuantitativa.

En cada uno de los apartados anteriores se ha mostrado los resultados en forma de tabla, pero si se pretende compararlos de forma más visual es conveniente representarlo de forma gráfica. Por ello, en la se muestra el valor del coeficiente de resistencia en función del número de Reynolds para los casos de resultados experimentales, resuelto con FloEFD y resultado con Fluent.

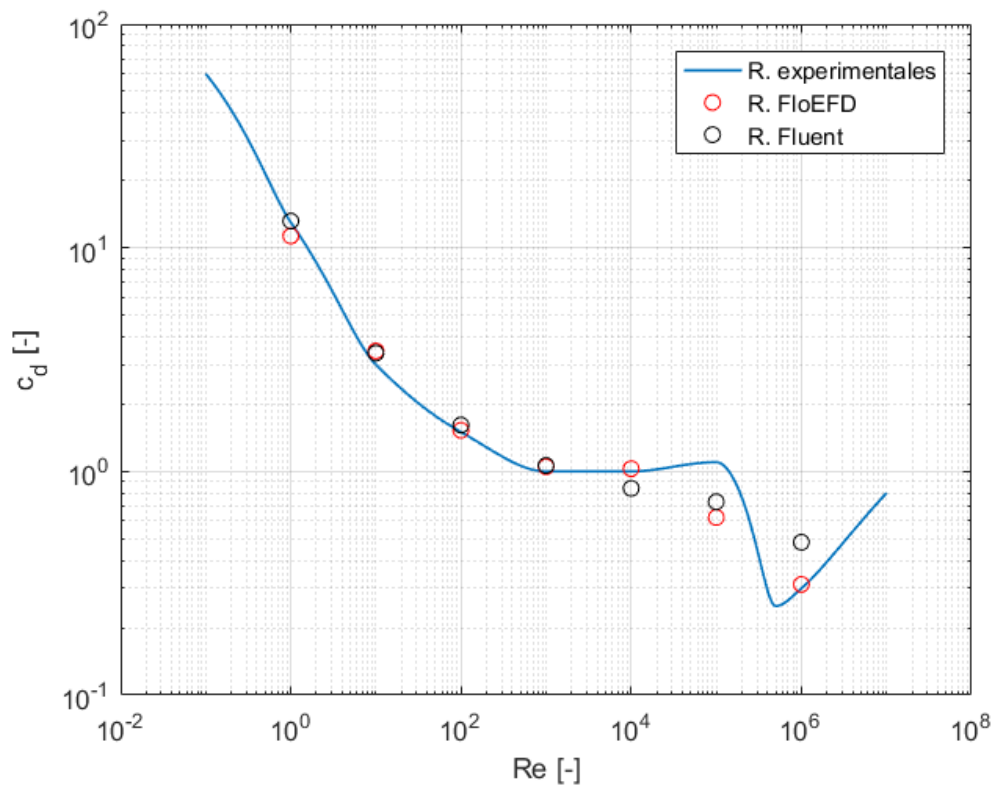


Figura 28:  $C_D$  alrededor del cilindro del problema 2 según datos experimentales, FloEFD y Fluent.

Tal y como se observa en la figura anterior, las aproximaciones realizadas por FloEFD y por Fluent se ajustan a priori muy bien a la realidad. Sin embargo, parece que a altos números de Reynolds Fluent no capta tan bien el paso a la capa límite turbulenta como lo hace FloEFD, pareciendo a priori que este software realiza mejor los cálculos que el propio Fluent.

De forma cuantitativa, el error relativo respecto a los resultados experimentales es mostrado en la Tabla 4.

$\alpha [^\circ]$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$\epsilon_{FloEFD} [\%]$	13.16	15.16	1.74	5.00	2.87	43.40	4.21
$\epsilon_{Fluent} [\%]$	1.26	12.70	7.47	6.21	16.00	33.51	60.72

Tabla 4: Error relativo de los cálculos realizados por FloEFD y Fluent respecto a los datos experimentales.

Tal y como se observa en la tabla, ambos programas realizan los cálculos con un error relativo muy similar, siendo mayor en algunas ocasiones por uno o por otro programa.

Dicho esto y analizando los datos, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Ambos softwares cometen un error similar en los cálculos.
- Ambos softwares parecen no aproximar muy bien el paso de la capa límite laminar a la turbulenta. El error cometido aumenta con el Número de Reynolds.
- El error cometido parece asumible.

Por todo esto, se puede concluir que ambos programas parecen adecuados para resolver este tipo de problemas, y aunque sea sorprendente, parece que incluso es algo mejor FloEFD.



# 4 PROBLEMA 2: PERFIL SUBSÓNICO 2D

El segundo problema que va a ser estudiado es el caso de un perfil bidimensional en régimen subsónico. En el mundo aeronáutico la elección del perfil del ala de un avión es uno de los primeros pasos en el diseño del mismo. Gracias a la multitud de ensayos experimentales de los que se dispone, actualmente es innecesario analizar cualquier tipo de perfil normalizado puesto que se tienen datos mucho más fiables de los que se pueden obtener con cualquier programa de cálculo.

Los perfiles aerodinámicos son ensayados en túneles de viento, como el que se muestra en la Figura 29. De esta forma, es posible hallar de forma experimental y muy precisa parámetros como la sustentación, la resistencia aerodinámica y el momento que ejerce la corriente de aire a diversas velocidades y ángulos de ataque. En la imagen se observa un ensayo sobre un perfil NACA 4412.



Figura 29: Ensayo de un perfil NACA 4412.

De esta forma y precisamente porque se conoce el resultado experimental de los coeficientes de sustentación y de resistencia de la mayor parte de perfiles, es de interés analizar este problema con los dos programas considerados puesto que se puede observar cuantitativamente cuanto se aproximan uno u otro a la realidad.

El problema a resolver será el siguiente:

- Perfil NACA 4412. Se trata de un perfil con curvatura de la familia NACA de 4 dígitos. Su geometría puede observarse en la Figura 30.

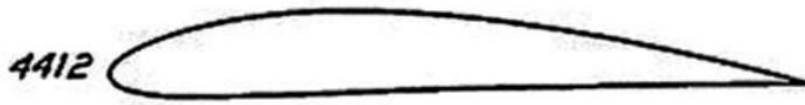


Figura 30: Perfil NACA 4412

- Número de Reynolds:  $Re = 3 \cdot 10^6$
- Ángulo de ataque  $\alpha$  variable.
- Cuerda del perfil:  $c = 1 \text{ m}$ .
- Viscosidad:  $1.789 \cdot 10^{-5}$
- densidad:  $\rho_{\infty} = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

A partir de estos datos y de la definición del número de Reynolds, se puede determinar la velocidad a la que se hará la simulación para que todo sea coherente:

$$Re = \frac{\rho c V}{\mu} \rightarrow V = \frac{Re \mu}{\rho c} = 43.82 \frac{m}{s}$$

De la misma forma, imponiendo un valor de  $y^+ = 1$  se obtiene que la distancia estimada de la pared, es decir, el tamaño de la malla para captar adecuadamente la capa límite debe ser de  $8.5 \cdot 10^{-6} m$ .

Por otra parte, se conoce que el perfil NACA 4412 posee los siguientes valores de coeficiente de sustentación y de resistencia<sup>4</sup>:

$\alpha [^\circ]$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$C_l$	0.4833	0.7055	0.9210	11.280	12.973	14.317	15.500	16.325	16.698
$C_d$	0.00141	0.00622	0.00722	0.00884	0.01288	0.01746	0.02282	0.03209	0.04827

Tabla 5: Datos experimentales del perfil NACA 4412

A continuación, se detalla cómo se han calculado estos coeficientes en los programas FloEFD y Fluent.

### 4.1 FloEFD

En primer lugar, hay que modelar el perfil en 2D. FloEFD permite estudiar problemas en 2D, pero hay que realizar un modelo en 3D para ello y luego especificar sobre que plano realizar el estudio 2D.

- Primero hay que importar el perfil a CATIA.
- Hay que sacar un archivo excel de la carpeta de instalación de CATIA.
- Hay que configurar el programa Microsoft excel para que se puedan hacer macros sin tener que pedir permiso ni preguntar para hacerlo.
- Se ejecuta la macro y se importa a CATIA.
- Se hace un spline a los puntos del perfil.
- Se le da grosor al perfil.
- Una vez hecho esto, se guarda la pieza como Catproduct.

Tras seguir estos pasos se debe llegar a esta geometría en CATIA:

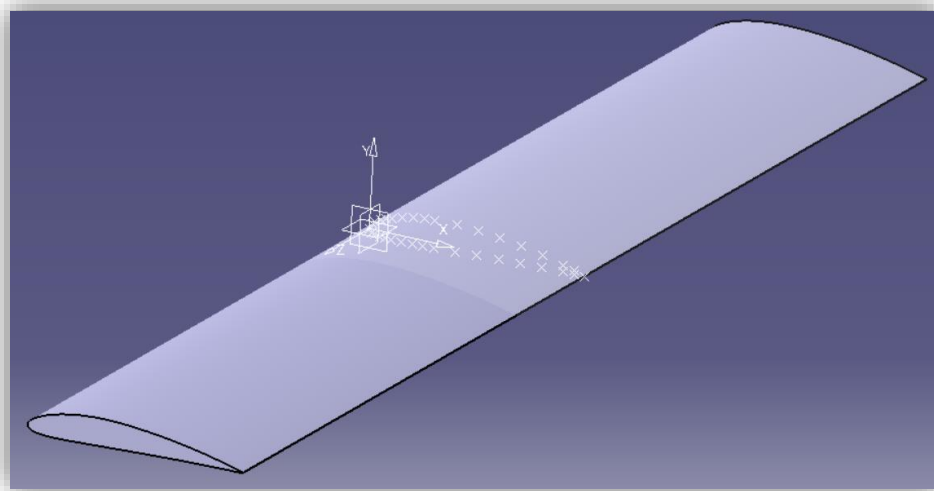


Figura 31: Perfil NACA 4412 en el programa CATIA V5.

<sup>4</sup> Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>

Es importante dar al perfil mediante la herramienta *Pad* un grosor suficientemente grande, para que más tarde el módulo de CFD sea capaz de ajustar adecuadamente el dominio de computación.

Con el perfil creado se abre el módulo de FloEFD, se abre el archivo Catproduct creado, y a continuación se ejecutan los siguientes pasos:

- En el árbol de CATIA V5 (Figura 32), se hace clic sobre el ítem *Computational Domain*. En este campo, se establece el tamaño del volumen de control que se va a considerar. En general, es conveniente que al estudiar un caso bidimensional la coordenada transversal al plano se deje por defecto a lo establecido por el programa. El resto de parámetros ajustar al menos a una distancia igual a la de la cuerda del perfil.

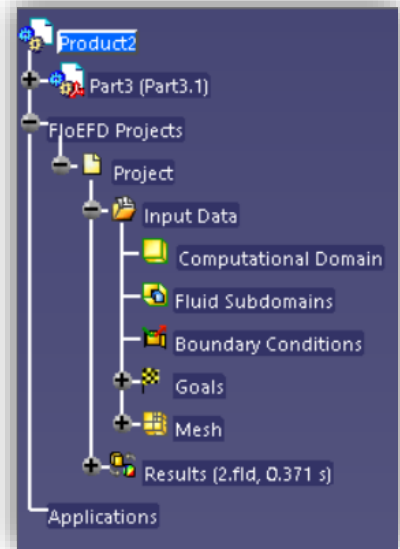



Figura 32: Árbol de proceso de FloEFD en CATIA V5.

- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard* . En este caso, establecer las siguientes propiedades:
  - *Analysis type*. En el apartado *Analysis type*, clicar en *External*. En el apartado *Physical Features*, asegurar que el valor *Time-dependent* está clicado.
  - *Fluids*. Establecer como fluido de estudio el aire: *Air (Gases)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*.
  - *Wall Conditions*. Establecer como valor en *Default Wall thermal condition*, *Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions*. Para este apartado se configura de la forma que se puede observar en la Figura 33. El valor del ángulo de ataque irá variando en cada iteración.

Parameter	Value
<b>Parameter Definition</b>	
	User Defined
<b>Thermodynamic Parameters</b>	
Parameters	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Temperature	293.2 K
<b>Velocity Parameters</b>	
Parameter	Velocity
Defined by	Aerodynamic angles
Velocity	45 m/s
Longitudinal plane	XY
Longitudinal axis	X
Angle of attack	0.244346095 rad
Angle of sideslip	0 rad
<b>Turbulence Parameters</b>	

Figura 33: Valores establecidos en el apartado *Initial and Ambient Conditions* (problema 2).

- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 32, se clicca con el botón derecho en el apartado *goals*, *Goals object*, *New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar los parámetros *GG Force*, *GG Force (X)*, *GG Force (Y)*, *GG Force (Z)*.

- De nuevo en el árbol, se clic con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura de la forma que se observa en la Figura 34.

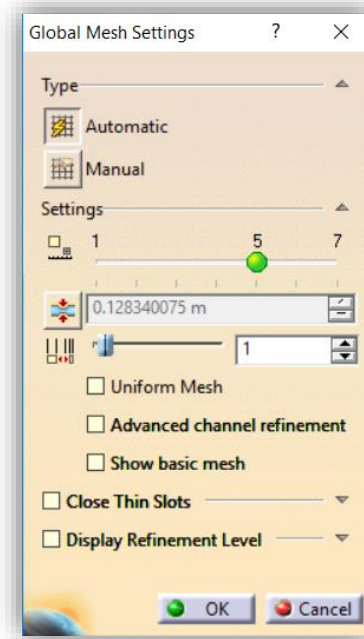
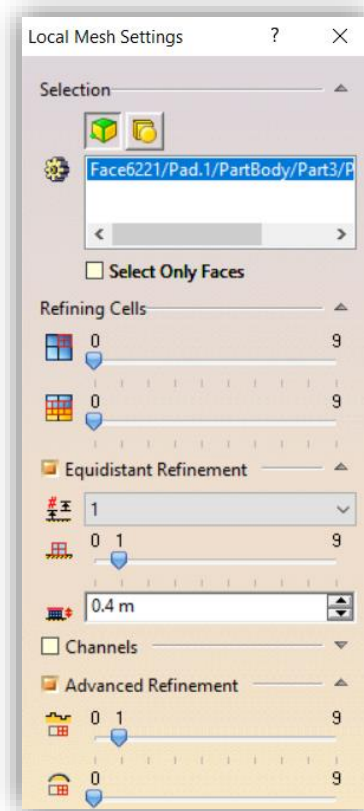


Figura 34: Global Mesh Settings del segundo problema.

- Al igual que antes, se clic con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, New Local Mesh* y se configura de la forma que se observa en la Figura 35.



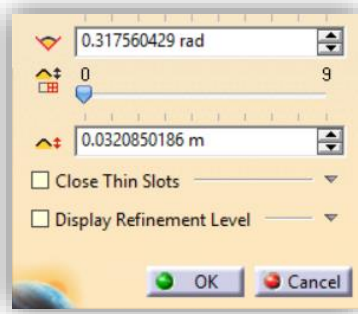


Figura 35: Local Mesh Settings en el segundo problema.

- Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda suficientemente pequeño, se configura de la forma que se observa en la Figura 36.

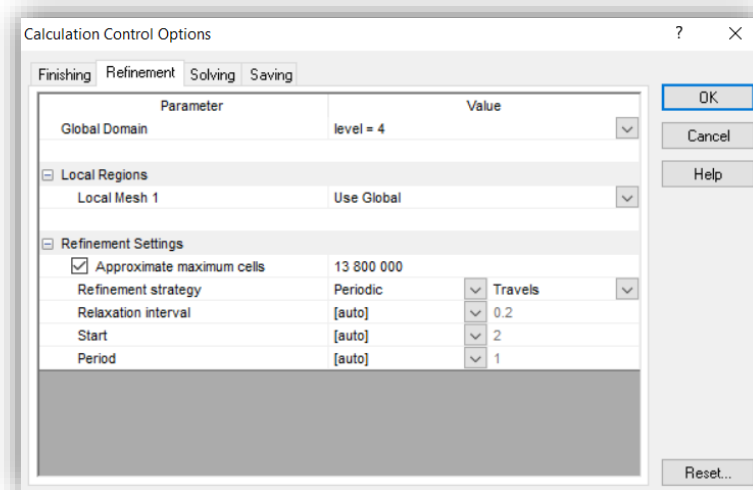
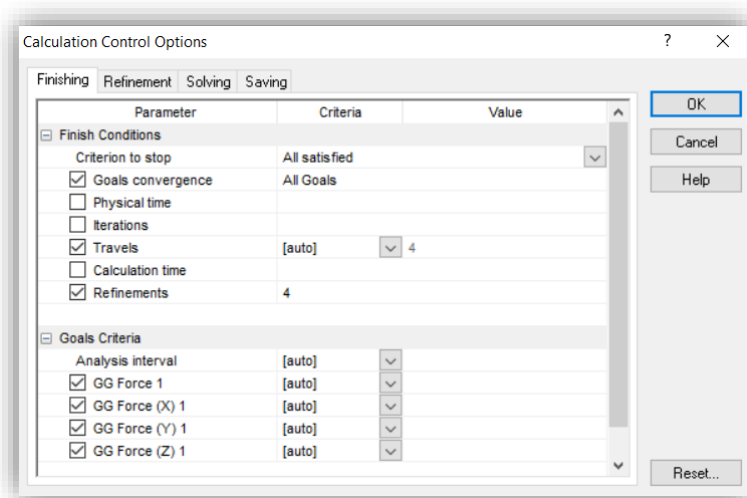


Figura 36: Calculation Control Option en el segundo problema.

Con esto, queda definida la parte de configuración del problema, y puede comenzar la simulación.

Como resultado de la malla creada por el programa, se obtiene un tamaño suficientemente pequeño y que esta se adapta a la estela creada por el perfil tal y como se observa en la Figura 37.

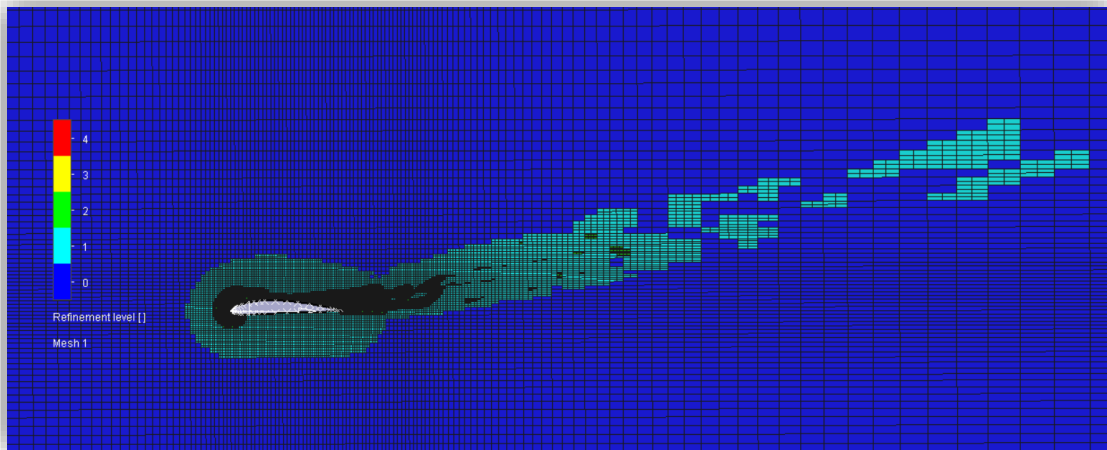


Figura 37: Malla alrededor del perfil en el segundo problema para el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

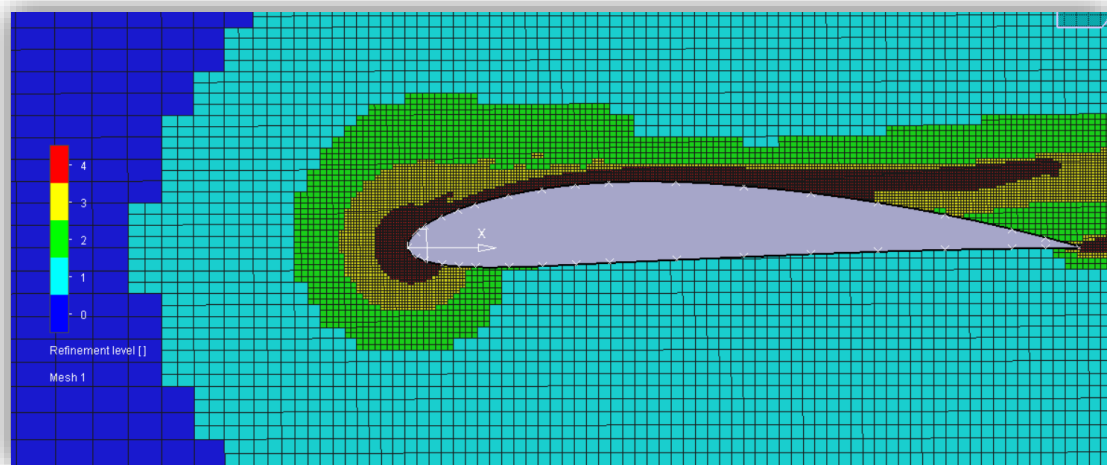


Figura 38: Detalle de la malla alrededor del perfil en el segundo problema en el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

De las simulaciones correspondientes se obtienen los parámetros establecidos en *Goals*, así como el campo de presiones y velocidades alrededor del perfil, tal y como se observa en la Figura 39 y en la Figura 40.

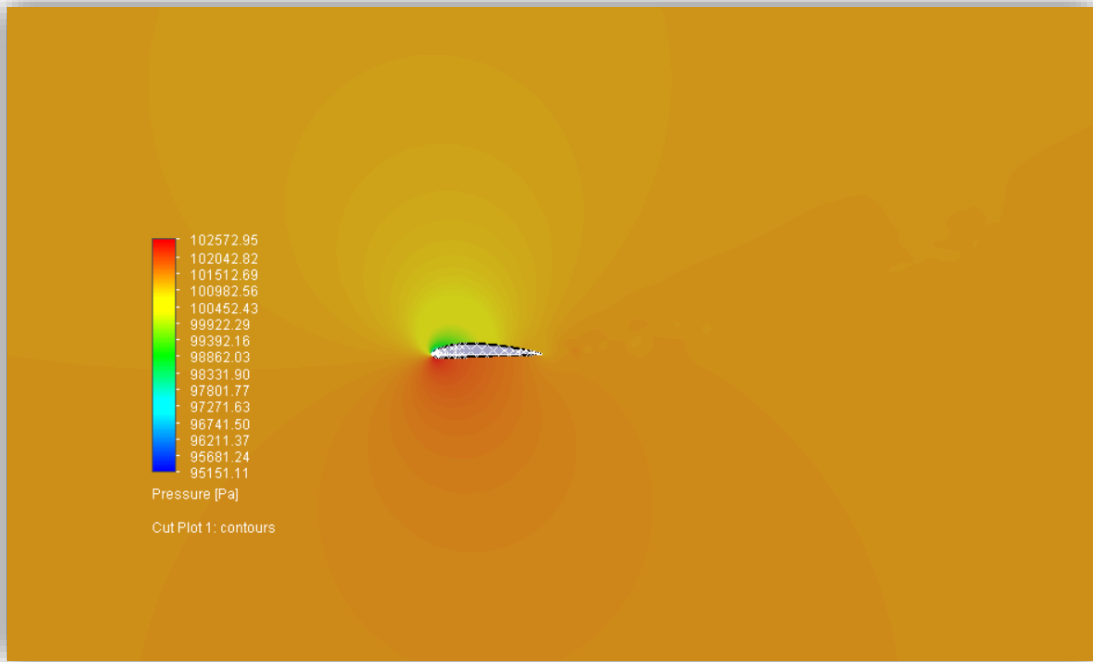


Figura 39: Campo de Presiones calculado por FloEFD alrededor del perfil en el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

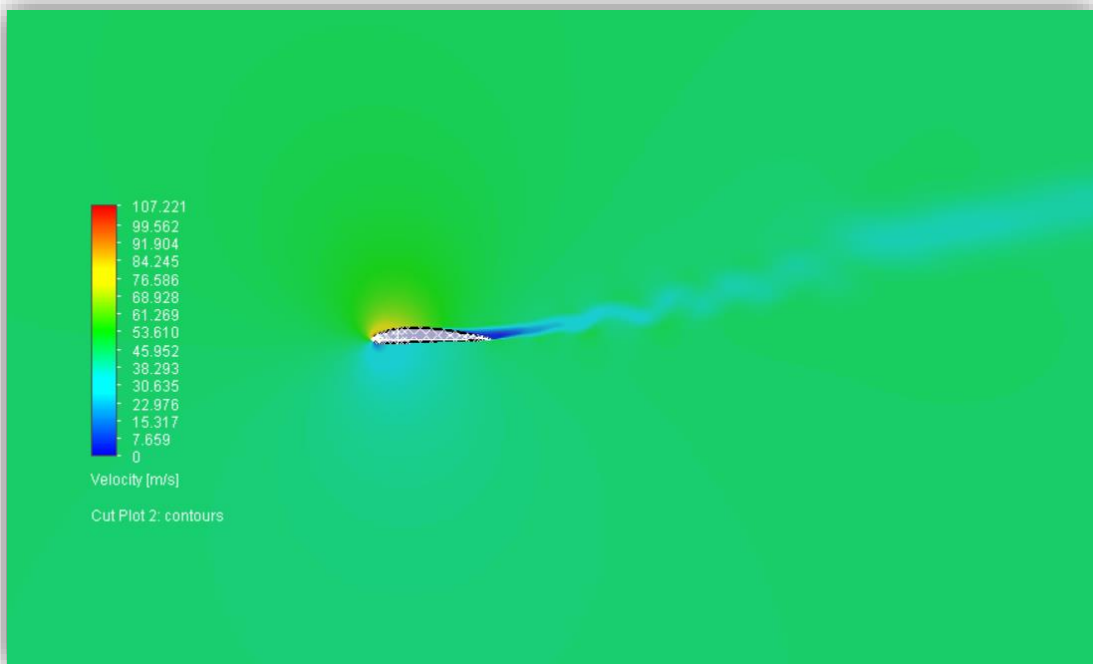


Figura 40: Campo de Velocidades calculado por FloEFD alrededor del perfil en el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

Una vez que se converge a la solución, exportar del apartado Goal Plots situado en el Árbol Raíz un documento excel con la fuerza global sobre el perfil. Analizando el esquema de la Figura 41, se puede deducir las relaciones entre las fuerzas calculadas por FloEFD (las proyecciones de la resultante  $F$  sobre los ejes  $x$  e  $y$  y las fuerzas de sustentación y resistencia).

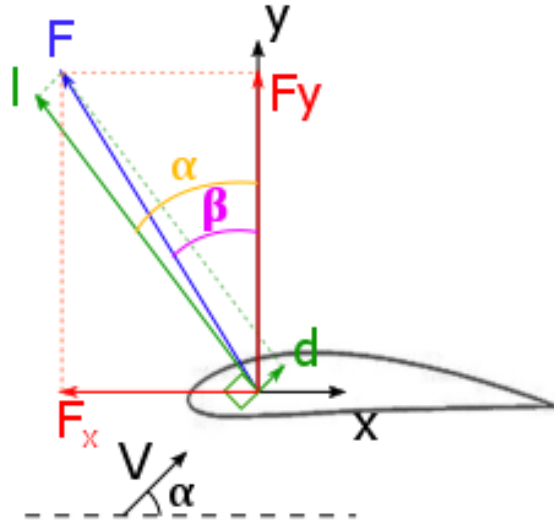


Figura 41: Esquema que relaciona las fuerzas calculadas por FloEFD con la sustentación y la resistencia.

Donde  $F_x$  y  $F_y$  son las proyecciones de la fuerza resultante  $F$  sobre los ejes  $x$  e  $y$ , mientras que los parámetros  $l$  y  $d$  son las fuerzas de sustentación y de resistencia respectivamente. El ángulo  $\beta$  es el ángulo que forman la fuerza neta  $F$  y el eje  $y$ . Con esto, se deduce:

$$\beta = \arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (23)$$

$$l = \frac{F}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (24)$$

$$d = \frac{F}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (25)$$

Con esto y a partir de la definición del coeficiente de sustentación y de resistencia, se obtienen dichos parámetros.

## 4.2 Fluent

Una vez realizado el análisis con FLOEFD, se va a realizar el mismo análisis usando Fluent. Para ello, el primer paso es generar la malla de forma que se pueda realizar de forma adecuada el análisis posterior. A diferencia del ejercicio anterior, en el caso del estudio de un perfil aerodinámico es muy importante captar adecuadamente la capa límite generada, por lo que es conveniente realizar una malla estructurada a la hora de analizar este problema.

ANSYS Fluent es capaz de generar una malla de forma semi-automática (bajo directrices muy específicas de cómo hacerlo por parte del usuario), pero también tiene un módulo capaz de generar una malla totalmente a gusto del diseñador. El proceso es realmente largo y tedioso, y no entra dentro del alcance que se pretende de este proyecto, por lo que no se va a especificar los pasos seguidos en la elaboración del mismo. En cualquier caso, existen multitud de tutoriales que pueden ser seguidos para llegar a la malla deseada [poner fuentes](#). Para el caso que nos ocupa, tras un arduo proceso se parte de la malla que se observa en las figuras Figura 42 y Figura 43.



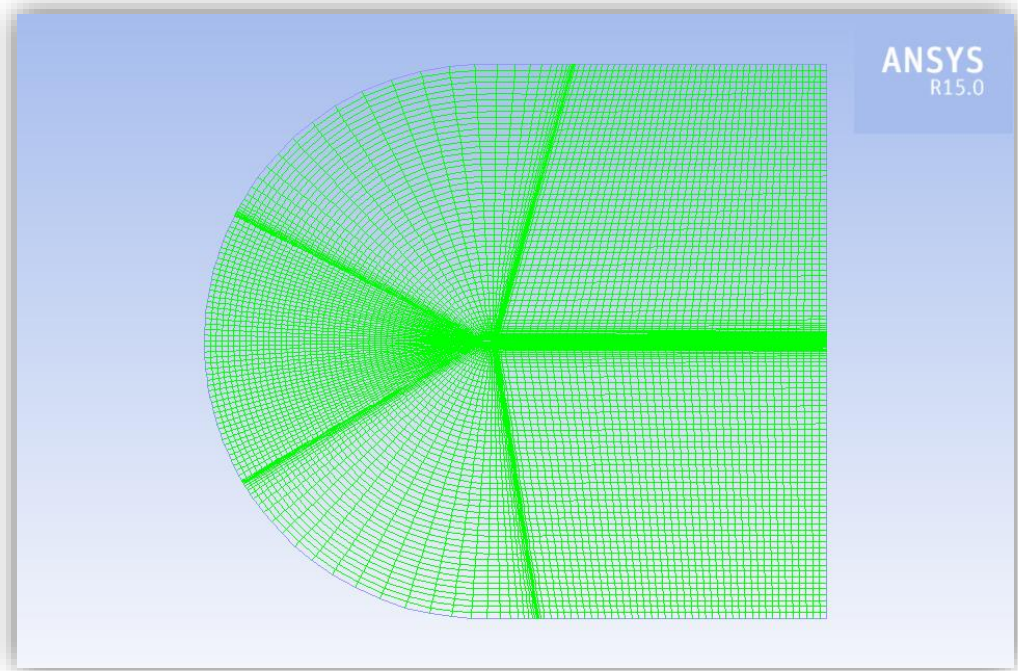


Figura 42: Malla estructurada generada en ANSYS Fluent para la realización del problema 2.

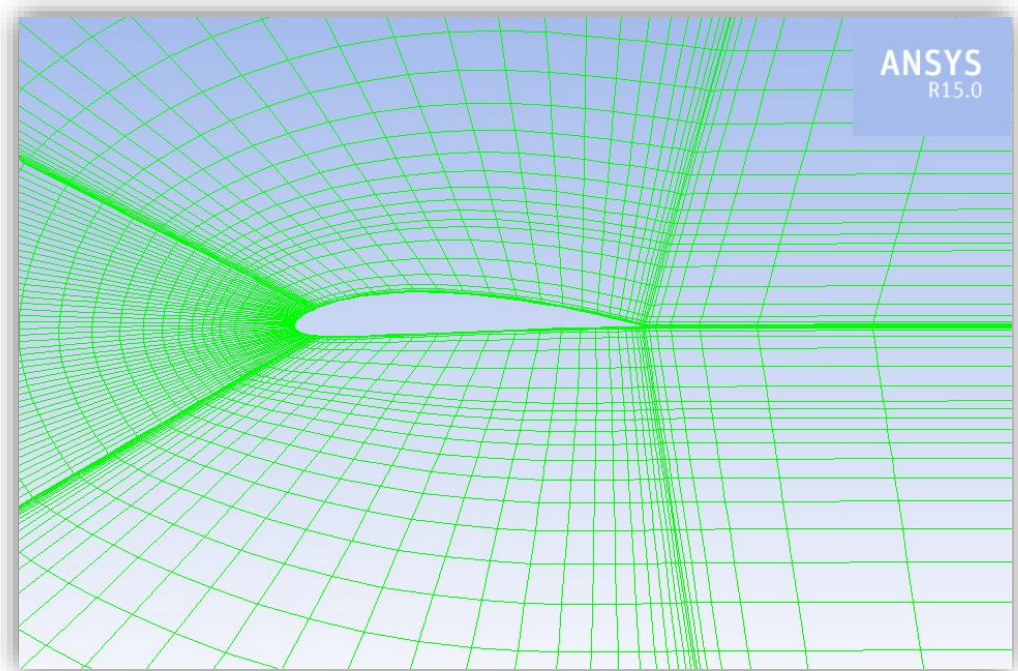


Figura 43: Detalle de la malla estructurada generada en ANSYS Fluent.

La importancia y la ventaja de la malla generada es que previsiblemente se adapta a la corriente que le llega gracias a la geometría que se le ha dado aguas arriba, así como en los sitios en los que el gradiente de presiones y velocidades es mayor.

Una vez que la malla ya ha sido generada, se pasa a establecer el tipo de análisis correspondiente en Fluent:

- Puesto que la velocidad es tal que el número de Mach es muy pequeño,  $M_{\infty} \ll 1$ , se puede asumir

que el perfil está trabajando en régimen incompresible y por tanto que la densidad permanece constante (a pesar de ser un gas). Los efectos de compresibilidad comienzan a ser no despreciables en situaciones en las que  $M \approx 0.5 - 0.7$ . Por tanto, se puede hacer un análisis basado en presiones.

- Puesto que **BUSCAR EL NÚMERO ADIMENSIONAL**, se puede despreciar la gravedad.
- Por tanto, la pestaña *General* queda de la forma:

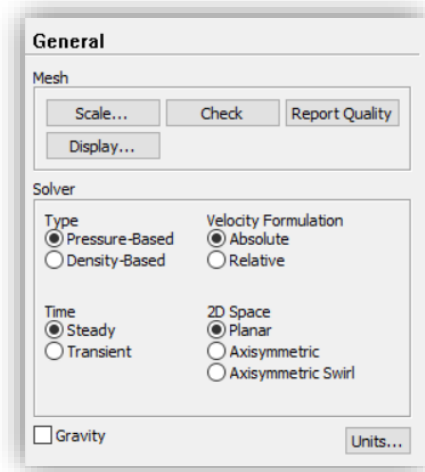


Figura 44: *General Settings* en la configuración de Fluent del segundo problema.

- Respecto a los modelos de turbulencia que se deben usar, se establece que a bajos ángulos de ataque (hasta  $10^\circ$ ) se va a usar el modelo  $k - \epsilon$ , mientras que a altos ángulos de ataque se establece como modelo de cierre el SST, por su mejor rendimiento en el análisis flujos que han desprendido.
- Se establecen como condiciones de contorno:
  - *Velocity inlet* con la velocidad establecida y los ángulos de ataque determinados en cada caso.
  - *Wall* en el resto del contorno del volumen de control establecido.
- En la pestaña *Solution Methods*, se deja por defecto salvo los términos de energía cinética turbulenta y disipación como términos de segundo orden.
- Inicializar la solución a partir de los datos de la zona de entrada, donde se define la velocidad y dirección del flujo.
- Ejecutar la simulación con al menos 1000 iteraciones (dependerá del número de número de procesadores de cada ordenador, etc.).

Tras realizar la simulación puede obtenerse tanto la resistencia aerodinámica como la sustentación para cada valor del ángulo de ataque. Para el caso  $\alpha = 16^\circ$ , puede observarse el campo de presiones en la Figura 45 y el campo de velocidades en la Figura 46.

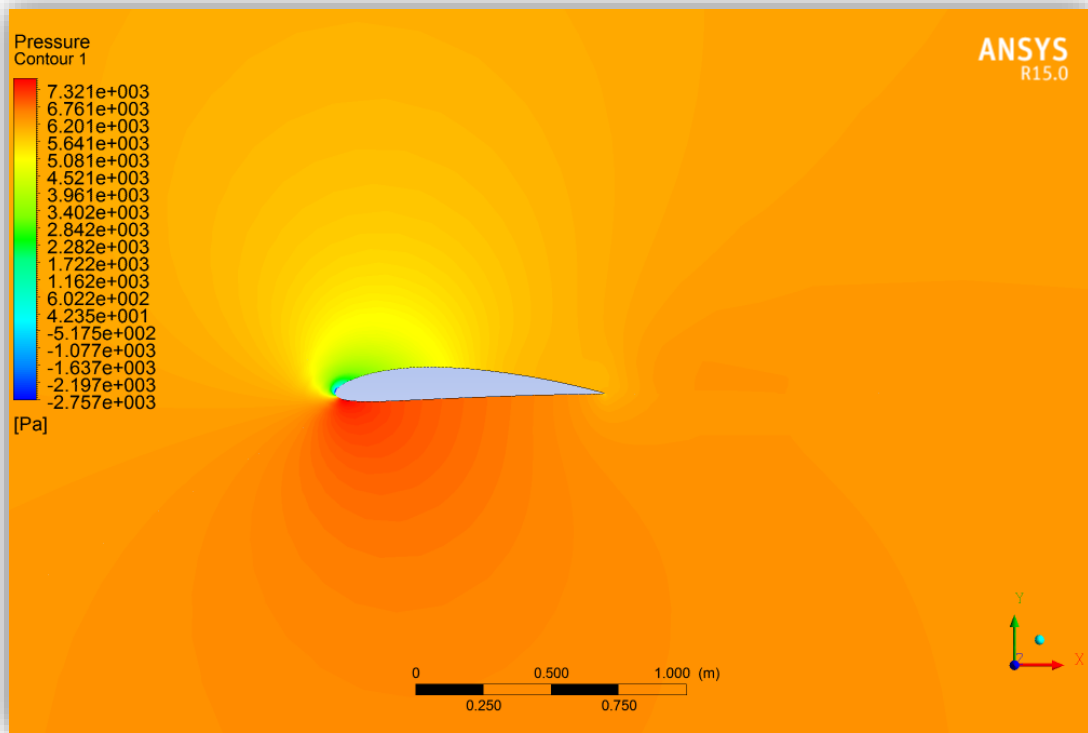


Figura 45: Campo de Presiones calculado por Fluent alrededor del perfil en el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

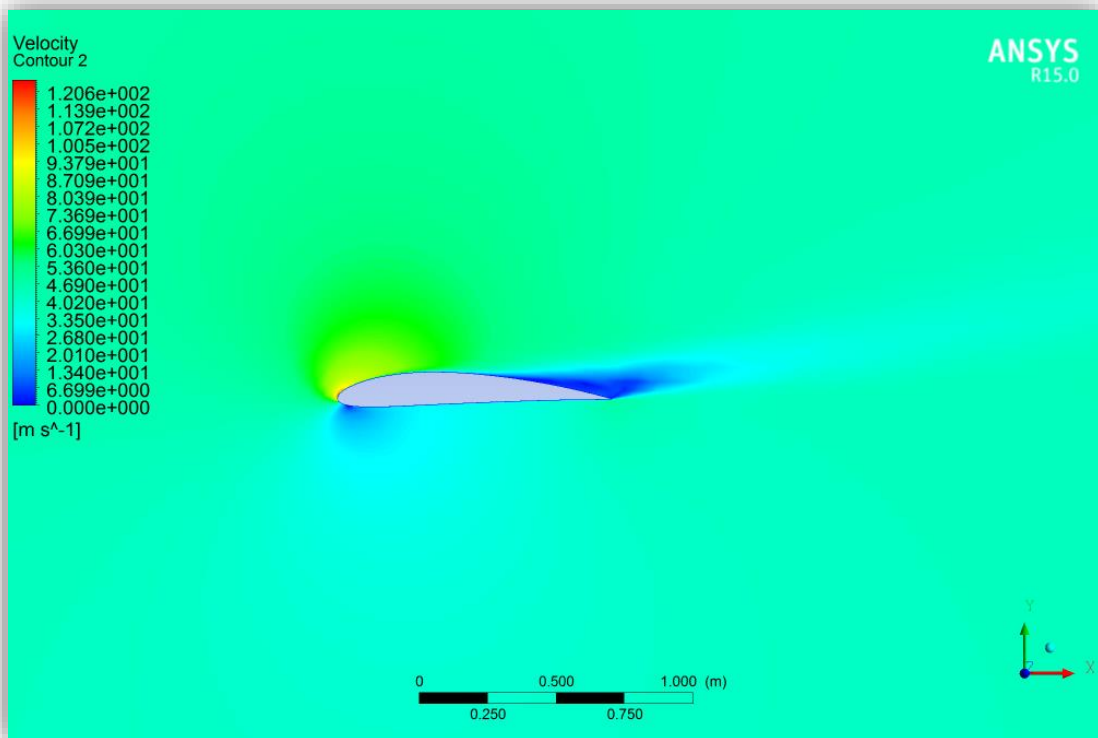


Figura 46: Campo de Velocidades calculado por Fluent alrededor del perfil en el caso  $\alpha = 16^\circ$ .

Ta y como se puede observar comparando las figuras de los campos de velocidades y presiones en FloEFD y en Fluent, los resultados son ciertamente similares.

En este caso no es necesario realizar ninguna operación más, puesto que Fluent devuelve los datos de fuerzas en la dirección que se le indique.

### 4.3 Resultados

Una vez realizados todos los análisis correspondientes tal y como se indica en los apartados anteriores, es posible obtener los valores de resistencia aerodinámica y sustentación. Para cada programa se tiene:

$\alpha [^\circ]$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$C_l$	0.5203	0.7844	0.99945	1.1927	1.3948	1.5673	1.6543	1.7018	1.9170
$C_d$	0.0129	0.0165	0.0223	0.0272	0.0331	0.0412	0.0538	0.0705	0.1327

Tabla 6: Resultados obtenidos mediante FloEFD para el segundo problema.

$\alpha [^\circ]$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$C_l$	0.4020	0.6071	0.8103	1.0044	1.1753	1.3333	1.4482	1.5361	1.5672
$C_d$	0.0098	0.0103	0.0113	0.0127	0.0153	0.0191	0.0266	0.0368	0.0548

Tabla 7: Resultados obtenidos mediante Fluent para el segundo problema.

De acuerdo a estos resultados, se puede representar ahora las gráficas de  $C_l$  y  $C_d$  respecto al ángulo de ataque para observar más claramente como de precisos o no son los resultados.

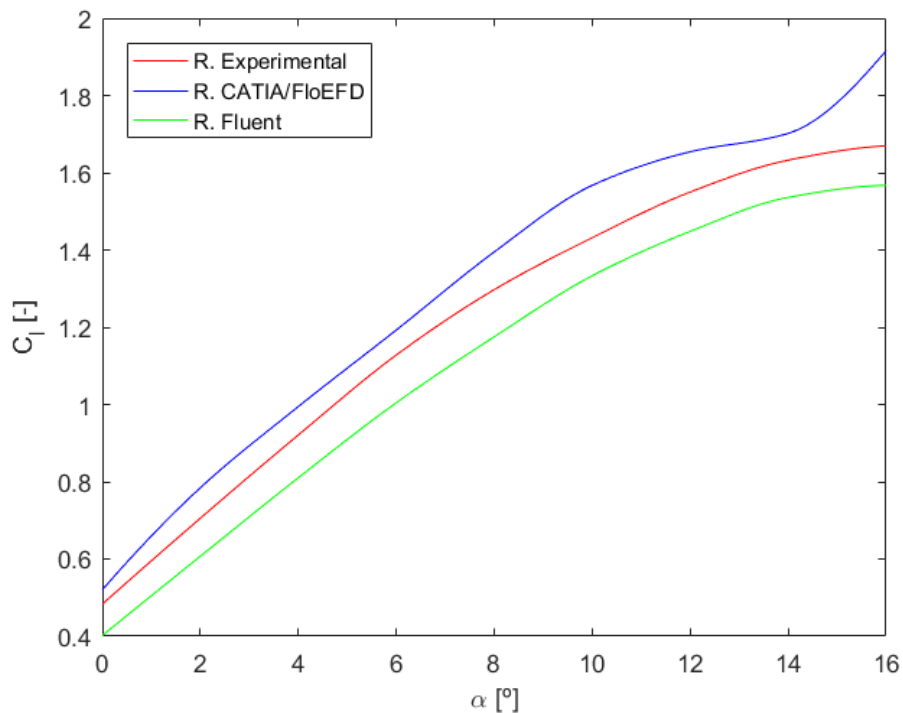


Figura 47:  $C_L$  en función del ángulo de ataque en el perfil aerodinámico del problema 2.

Tal y como se puede observar en la Figura 47 lo cierto es que tanto la aproximación de FloEFD como la de Fluent se aproximan bastante a la realidad, aunque ninguna de ellas es capaz de aproximarse a la curva experimental con una gran precisión. A priori, parece que los resultados de FloEFD se acercan son más precisos, pero poseen una clara desventaja y es que en todos los casos tiende a sobreestimar el valor del número adimensional. Esto, desde el punto de vista del diseño, es una desventaja porque el perfil diseñado da un mayor valor de sustentación del que realmente podría proporcionar. A la hora de integrar un perfil en un ala se producen muchas pérdidas relacionadas a otros fenómenos aerodinámicos y mecánicos, de forma que se reduce la eficiencia del ala y de la geometría. Por esta razón, tener un valor de la sustentación por encima del

real no es algo positivo, ya que este se verá reducido en la implementación real posterior.

Lo contrario pasa con el caso de los cálculos de Fluent, donde los datos proporcionados por el programa quedan por debajo de la curva, quedando desde el lado de la seguridad desde el punto de vista del diseño, ya que el perfil sustenta más de lo que predice el programa.

Respecto al caso de coeficiente de resistencia frente al ángulo de ataque se tienen puede observar en la figura

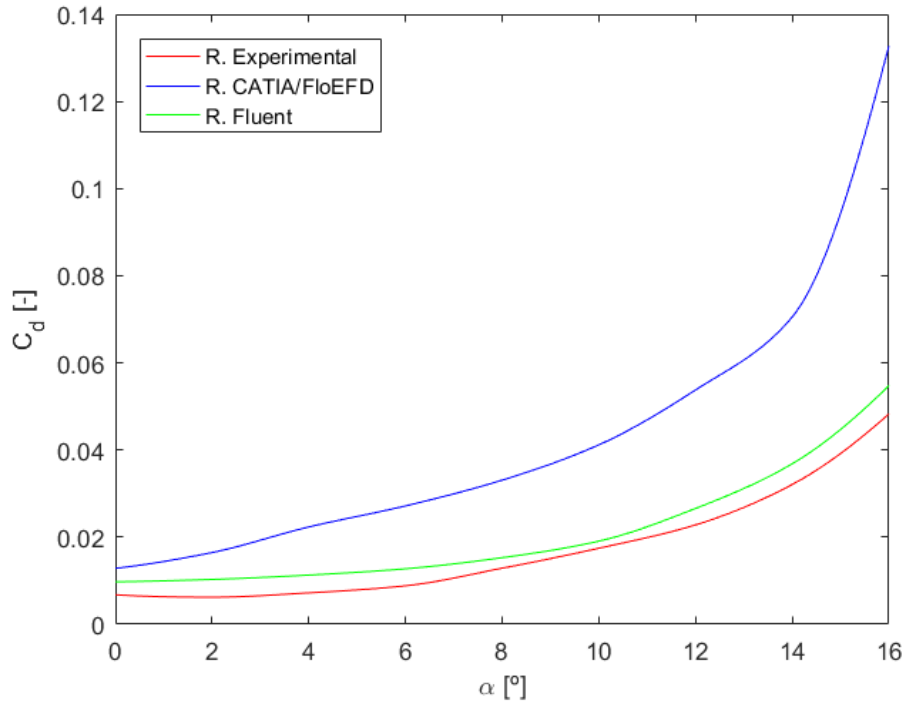


Figura 48: Coeficiente de resistencia en función del ángulo de ataque en el perfil aerodinámico.

Tal y como se observa, en este caso la aproximación del coeficiente de resistencia es mucho más precisa en el caso de Fluent que la realizada por FloEFD. Un dato curioso es que a medida que aumentan el ángulo de ataque del perfil más crece el error cometido por el programa de cálculo, si bien en este caso ambos softwares parecen estar por el lado de la seguridad al calcular un coeficiente de resistencia mayor que el real.

A partir de las tablas de resultados, puede obtenerse el error relativo entre los resultados experimentales y la realidad.

$\alpha$ [°]	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\epsilon_{FloEFD, C_l}$ [%]	7.65	11.18	7.98	5.74	7.51	9.51	6.73	4.24	14.74
$\epsilon_{Fluent, C_l}$ [%]	16.81	13.95	12.02	10.96	9.40	6.87	6.57	5.90	6.14
$\epsilon_{FloEFD, C_d}$ [%]	89.53	164.92	209.46	207.40	156.88	135.89	135.68	119.70	174.99
$\epsilon_{Fluent, C_d}$ [%]	43.83	65.61	56.55	44.18	18.74	9.33	16.54	14.82	13.45

Tabla 8: Errores relativos cometidos por ambos programas en los cálculos de los coeficientes de sustentación y resistencia en el problema 2.

A partir de los resultados expuestos en la tabla 4, se pueden sacar varias conclusiones:

- Para el cálculo de la sustentación, FloEFD parece realizar un trabajo más preciso que Fluent.
- Para el cálculo de la resistencia, FloEFD comete un error demasiado grande para ser tenido en cuenta, sobre todo respecto a los resultados tan buenos obtenidos con Fluent.
- Fluent parece ser más adecuado para estimar más adecuadamente los problemas en los que se tenga un gran ángulo de ataque y por tanto la corriente desprendida del perfil.



# 5 PROBLEMA 3: PERFIL SUPERSÓNICO 2D

El problema anterior trataba de analizar el comportamiento de los dos softwares usados en el estudio de un perfil bidimensional moviéndose en un flujo de aire en régimen subsónico. Sin embargo, para una gran cantidad de aplicaciones técnicas es de gran interés el diseño de elementos capaces de moverse un flujo en régimen supersónico: aviones de combate, misiles, cohetes, sondas espaciales, etc.



Figura 49: Ilustración que muestra el aspecto que tendrá el LBF-D-X de la NASA. Fuente: NASA.

Dado el gran interés práctico que tiene esto, se va a analizar el mismo perfil que se estudió en el caso anterior pero una velocidad  $M = 1.2$ .

En este caso no se tienen datos experimentales del perfil, por lo que en esta ocasión compararemos únicamente entre sí los resultados obtenidos con FloEFD y Fluent.

El problema a resolver será el siguiente:

- Perfil NACA 4412. Se trata de un perfil con curvatura de la familia NACA de 4 dígitos. Se geometría puede observarse en la Figura 30.
- Número de Mach:  $M = 1.2$ .
- Ángulo de ataque:  $\alpha = 0^\circ$ .
- Cuerda del perfil:  $c = 1 \text{ m}$ .
- Viscosidad:  $\mu = 1.789 \cdot 10^{-5}$
- densidad:  $\rho_\infty = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Al igual que en el caso anterior, el objetivo en este caso será la obtención de la sustentación y la resistencia de los perfiles. A continuación se detalla para cada programa los pasos seguidos para obtener la solución a este problema.

## 5.1 FloEFD

Los primeros pasos para comenzar a estudiar el problema en FloEFD son los mismos que en el apartado anterior: crear el perfil NACA 4412 con el módulo *Assembly Design*. Una vez hecho esto y llegado al mismo resultado que el de la Figura 31 se abre el módulo de FloEFD, se abre el archivo *Catproduct* creado, y a continuación se ejecutan los siguientes pasos (se omiten los pasos que son equivalentes a los del ejercicio anterior):

- A la hora de ejecutar la herramienta *Wizard*, en la pestaña *Fluids*, asegurar que se tiene marcada la casilla *High Mach Number Flow* en la sección *Flow Characteristics*.

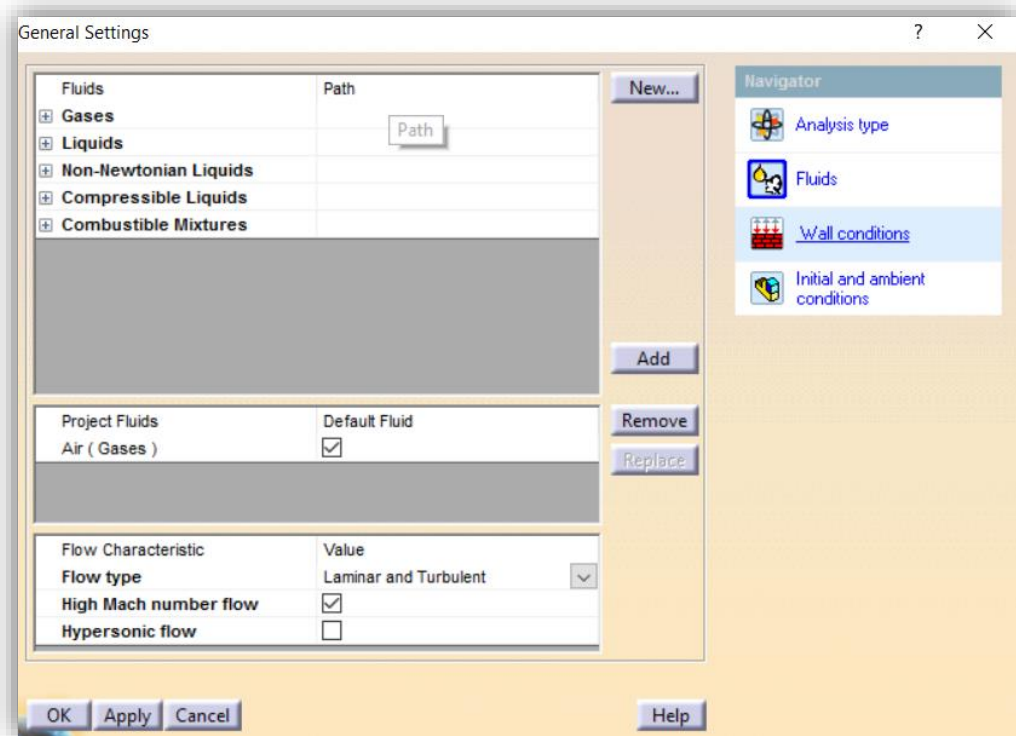


Figura 50: El ítem *High Mach Number Flow* debe estar marcado en la pestaña *Fluids*.

- De nuevo en la herramienta *wizard*, definir en la pestaña *Initial and Ambient Conditions*, *Velocity Parameters* como parámetro el número de Mach (*Mach Number*) igual a 1.2.
- Asegurar que se tiene el *Automatic Mesh Generator* activo, al igual que en el capítulo anterior.

De esta forma y tras comenzar la simulación para el cálculo requerido, se obtienen los resultados que se discuten a continuación.

En primer lugar, la malla generada por el programa puede observarse en la Figura 51. Es de particular interés prestar atención en cómo aun partiendo del mismo punto que el problema 2, en esta ocasión el refinamiento de la malla ha sido totalmente diferente: los puntos más refinados de la misma son los más próximos a las ondas de choque que se producen en los alrededores del perfil. Esto es una gran ventaja respecto a otros softwares como el de Fluent, en el que la malla es estática. Así, aún sin conocer adecuadamente la geometría final o la solución del problema, la malla se adapta en los lugares donde el gradiente es más acentuado otorgando a priori una solución más precisa.

De la misma forma, en la Figura 52 puede observarse como se sigue manteniendo el *Local Mesh* alrededor del perfil, así como además de refinarse en las ondas de choque, la malla también se sigue refinando en la zona de la estela que deja el perfil.



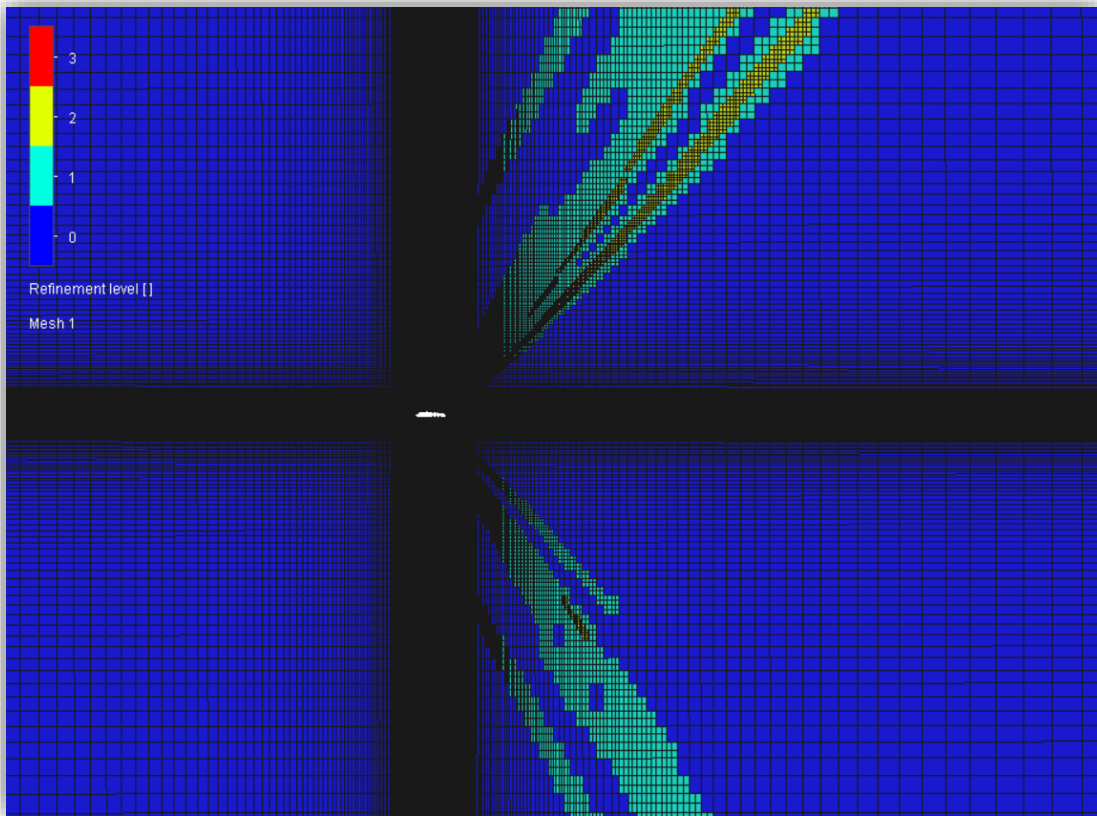


Figura 51: Malla generada por FloEFD en el problema 3.

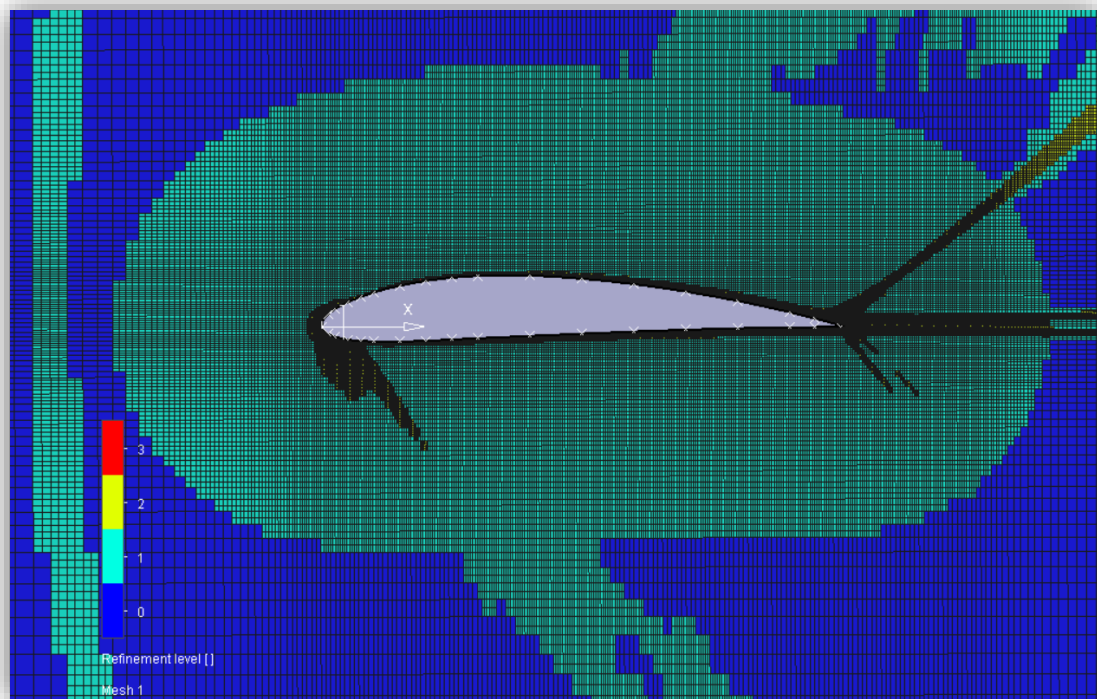


Figura 52: Detalle de la malla generada por FloEFD para el problema 2.

De la misma forma que en el ejercicio anterior, se va a estudiar el campo de velocidades y de presiones alrededor del perfil. Esto puede observarse en la Figura 53 y la Figura 54, así como en detalle en la Figura 55 y

la Figura 56:

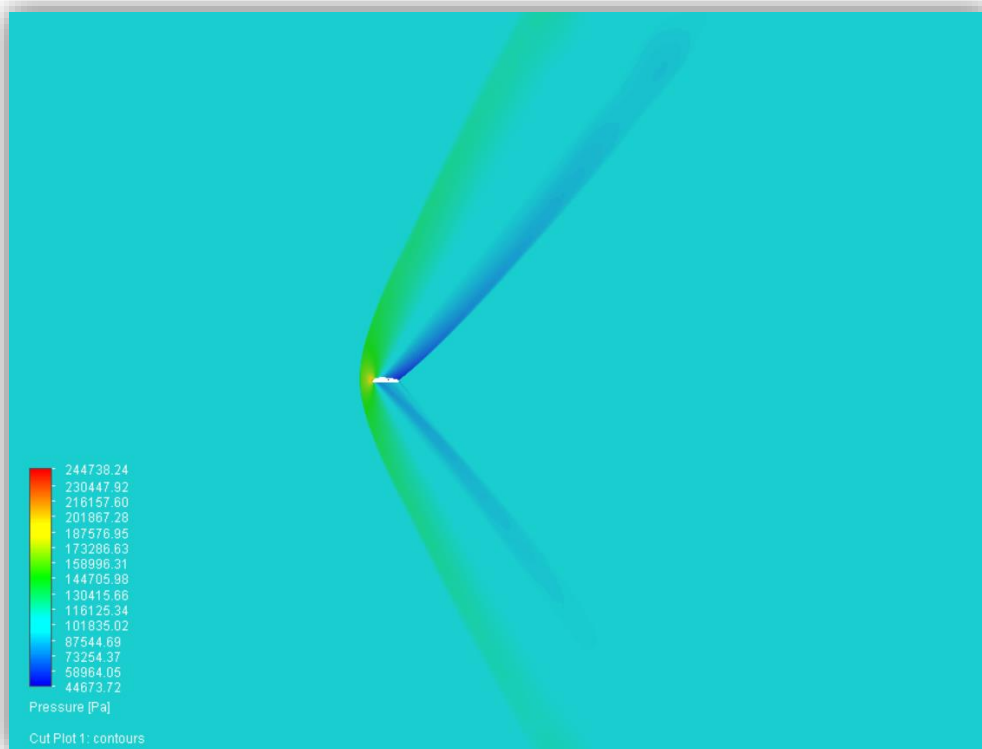


Figura 53: Campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD en el problema 3.

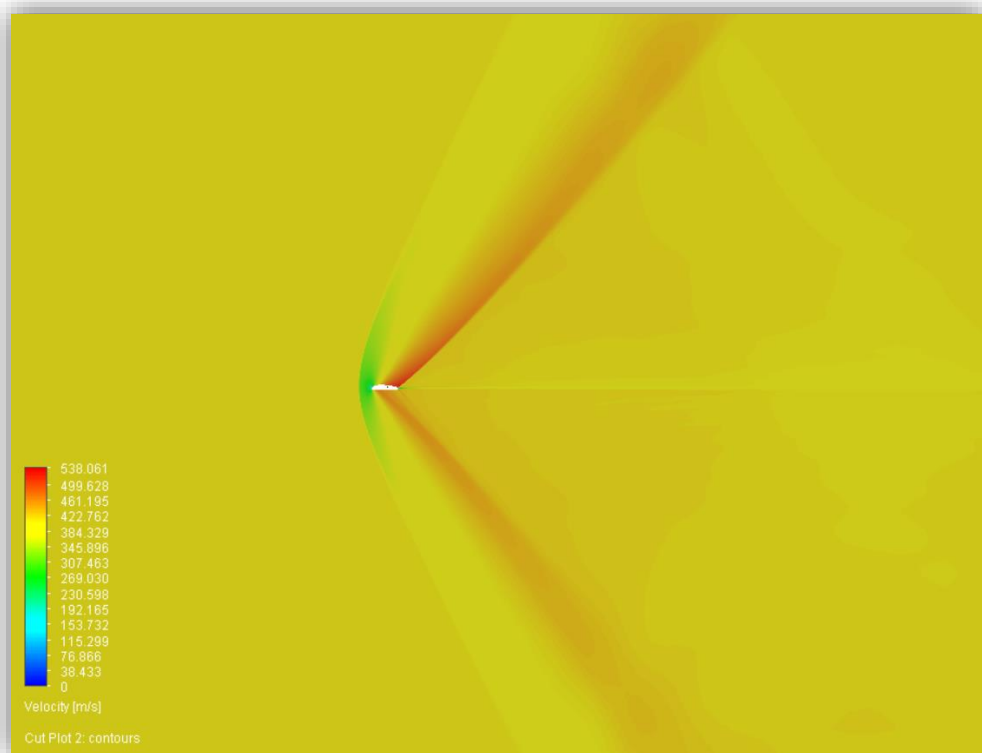


Figura 54: Perfil de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD en el problema 3.

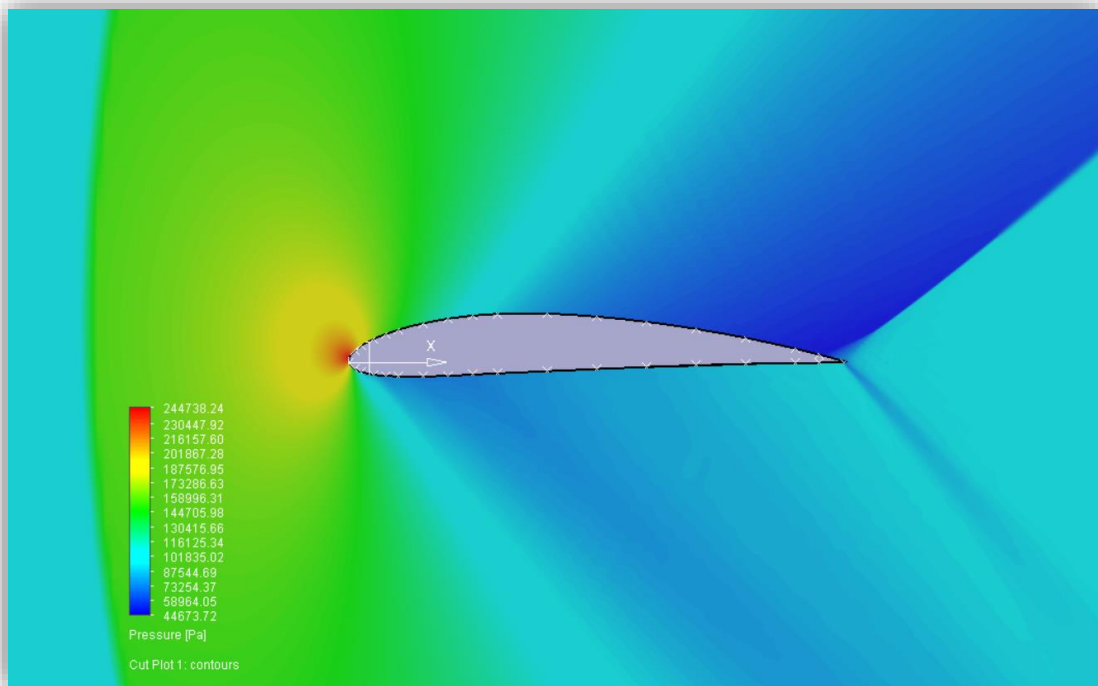


Figura 55: Detalle del campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD.

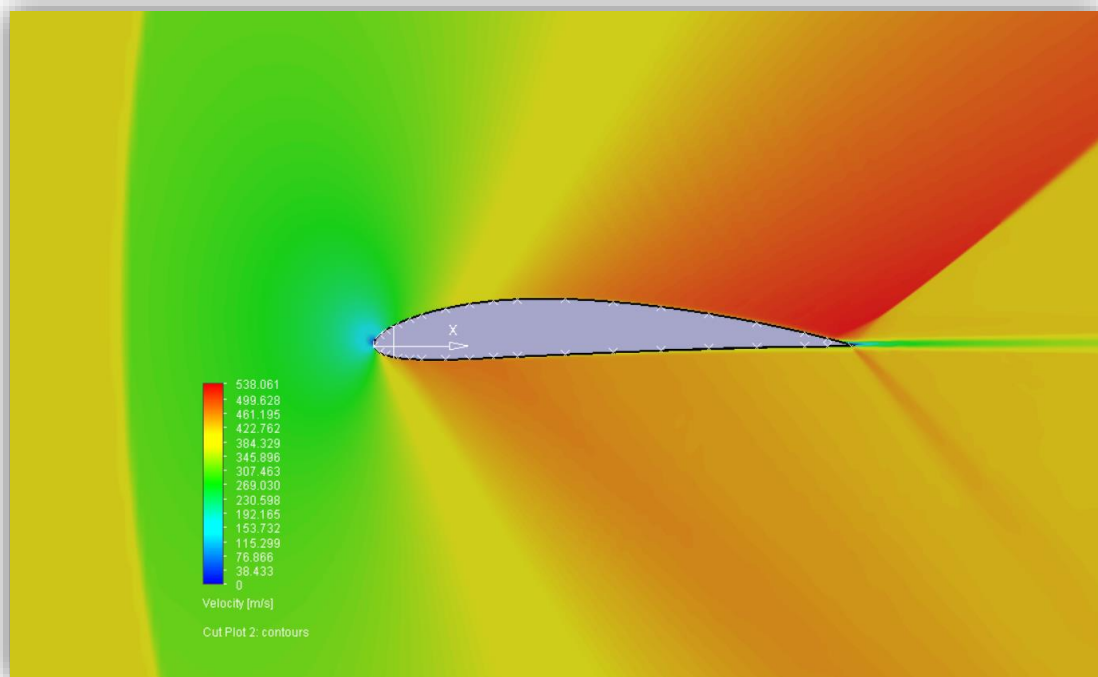


Figura 56: Detalle del campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por FloEFD.

En las figuras en detalle de los campos de presiones y velocidades se aprecia el cambio brusco de presión y velocidad que se produce en las ondas de choque alrededor del perfil, así como las ondas de expansión.

De acuerdo con los datos extraídos del apartado *Goals*, las fuerzas de sustentación y de resistencia que experimenta el perfil son:

$l [N]$	<b>1011.47</b>
---------	----------------

$d [N]$	15669.30
---------	----------

Tabla 9: Resultados de las fuerzas obtenidas en el análisis en FloEFD del perfil del problema 3.

## 5.2 Fluent

Una vez calculado el problema con el software FloEFD, ahora es el momento de hacer lo mismo con Fluent. Al igual que pasaba con FloEFD, se usará en gran parte el trabajo realizado para el ejercicio anterior.

Los pasos a seguir para configurar el programa son:

- Preparar el mallado. En este caso, se aprovechará el mallado propio que fue diseñado en el apartado anterior (ver Figura 42 y Figura 43). La razón de esta decisión es que tras probar varios mallados no estructurados generados por otros módulos de ANSYS, finalmente se obtuvieron mejores resultados con la malla estructurada generada en el apartado anterior, cosa que da una idea de la importancia que tiene elaborar correctamente una buena malla.
- Puesto que en este caso se tiene velocidades muy altas, no se pueden despreciar los efectos de compresibilidad. Por tanto, en el apartado *General* se debe configurar el programa para realizar un análisis basado en la densidad, y no en presión, tal y como se observa en la Figura 57.

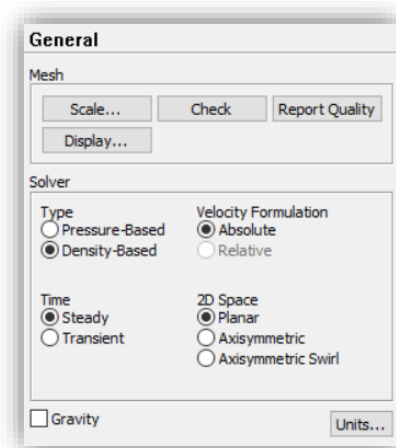


Figura 57: En la pestaña *General*, se debe seleccionar en el apartado *solver* el ítem *Density-Based*.

- Al definir las características del fluido, considerar el aire como un gas ideal. De otra forma, el programa no sería capaz de converger a una solución.
- Al establecer las condiciones de contorno, elegir la opción *Pressure-far-field* en la pestaña *Type* correspondiente a las condiciones de entrada de flujo.
- Respecto a los modelos de turbulencia que se deben usar, tras varias pruebas es posible percatarse que la convergencia del problema no es siempre posible. Por ejemplo, el modelo  $k - \epsilon$  no ha sido capaz de resolver las ecuaciones y llegar a una solución. El modelo de cierre el SST, sin embargo, si converge a una solución, por lo que será el elegido para este análisis.
- En la pestaña *solution methods* se establecen todos los términos como términos de segundo orden.
- En la pestaña *Run Calculation*, se clic en el apartado *Solution Steering* para establecer en la pestaña *Flow type* el flujo como supersónico (ver Figura 58).

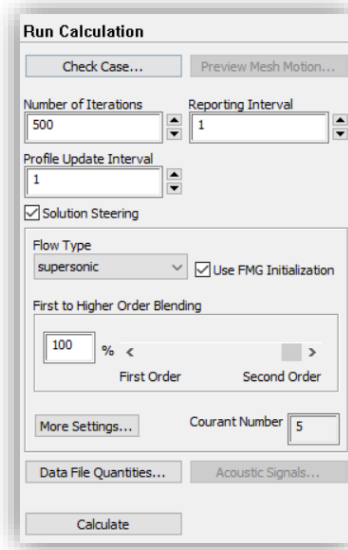


Figura 58: Pestaña *Run Calculation*, en la que se debe establecer *supersonic* en el apartado *Flow Type*.

Con esto, se puede iniciar la simulación, obteniendo los campos de presiones y velocidades que pueden observarse en la Figura 59 y la Figura 60, y verse en detalle en la Figura 61 la Figura 62.

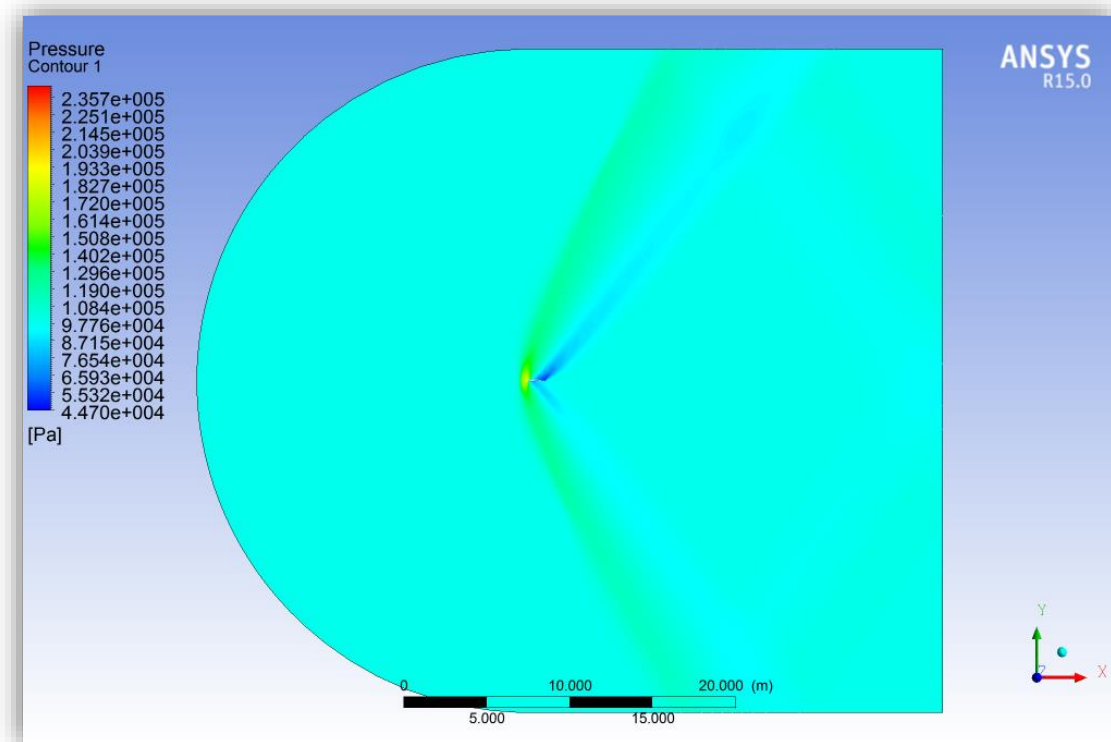


Figura 59: Campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.

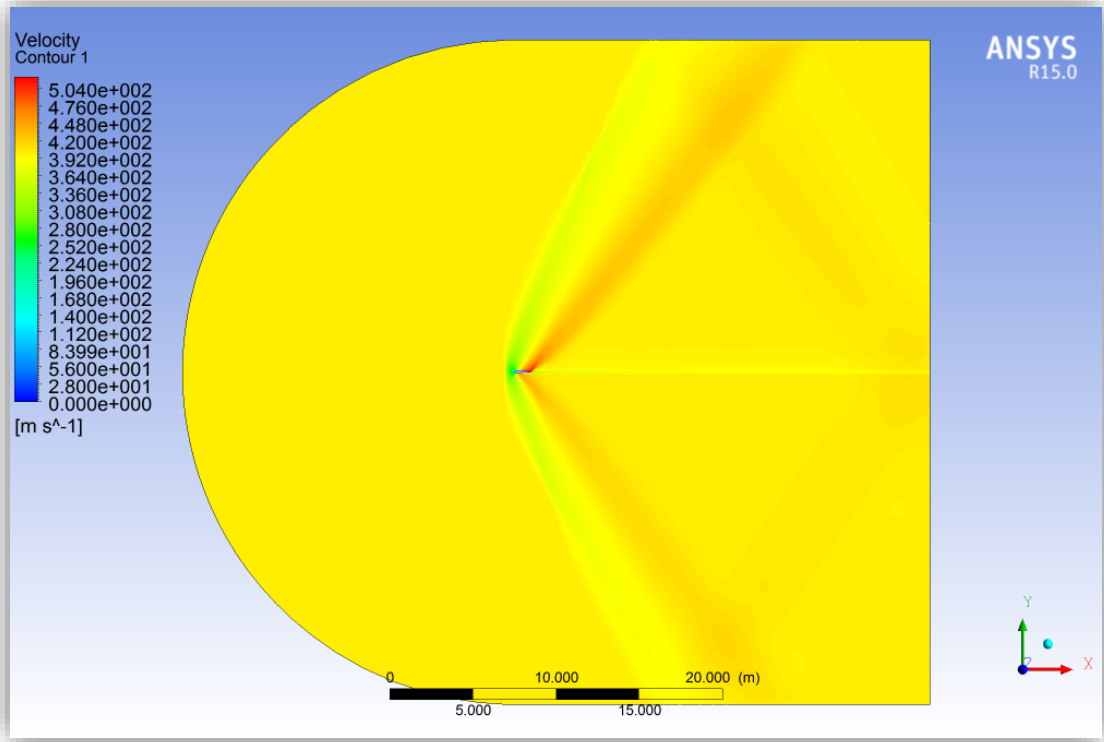


Figura 60: Campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.

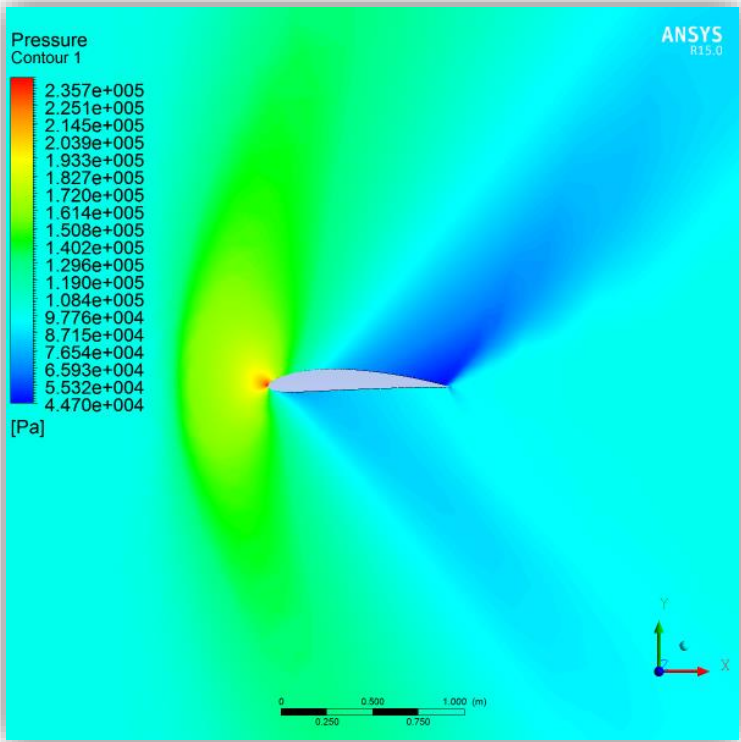


Figura 61: Detalle del campo de presiones alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.

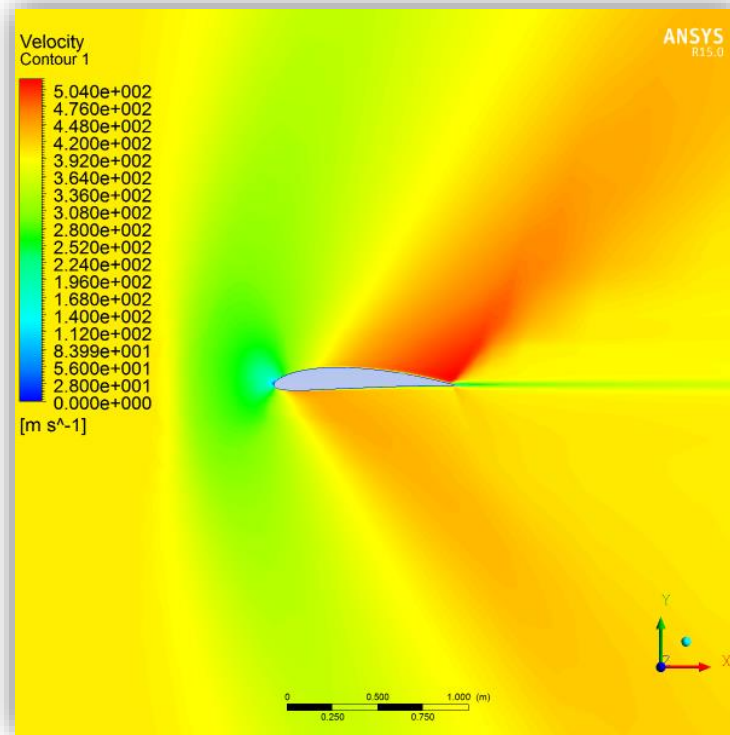


Figura 62: Detalle del campo de velocidades alrededor del perfil NACA 4412 calculado por Fluent.

Como se puede observar y en comparación con los resultados obtenidos en FloEFD, lo cierto es que los campos de velocidades y presiones son muy similares en ambas simulaciones.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la sustentación y en el cálculo de la resistencia aerodinámica son:

$l [N]$	<b>650.7</b>
$d [N]$	13417.34

Tabla 10: Resultados de las fuerzas obtenidas en el análisis en Fluent del perfil del problema 3.

### 5.3 Resultados

Tal y como se observa en las figuras de este capítulo, a priori los campos de velocidades y presiones de ambos problemas son muy similares. Sin embargo, los resultados de resistencia y sustentación de la Tabla 9 y la Tabla 10 nos dejan ver que a pesar de ello los resultados en el cálculo de las fuerzas son diferentes.

Es difícil afirmar cuál de los dos programas ha calculado mejor las fuerzas aerodinámicas, puesto que además todas las fuerzas tienen el mismo orden de magnitud. Sin embargo, se supondrá como referencia el valor de Fluent, quedando entonces que el error relativo:

$\epsilon_{FloEFD,l} [\%]$	<b>55.44</b>
$\epsilon_{FloEFD,d} [\%]$	16.78

Tabla 11: Errores relativos cometido por FloEFD en los cálculos de los coeficientes de sustentación y resistencia en el problema 2.

Por tanto, de acuerdo a estos resultados:

- Ambos programas parecen estimar aproximadamente bien el resultado, puesto que ambos estiman fuerzas del mismo orden de magnitud.
- Considerando como referencia los resultados de Fluent, los cálculos de FloEFD comenten un error asumible en el cálculo de la resistencia. El error en la sustentación debería ser estudiado en detalle para concretar para analizar en que aplicaciones es asumible y cuáles no.
- FloEFD ha sido mucho más sencillo de configurar, teniendo además el problema de que no todos los modelos de cierre y configuraciones hacían que Fluent convergiera a una solución.



## 6 PROBLEMA 4: PÉRDIDA DE CARGA

En este capítulo se pretende analizar el flujo turbulento en el interior de un tubo tridimensional, así como la pérdida de carga que se produce en el propio tubo.

La pérdida de carga en una tubería o canal es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. El análisis de la pérdida de carga es importante porque es una medida de lo bien que ha sido diseñado un elemento. Este factor viene dado por la expresión (26).

$$p_{0_e} - p_{0_s} = K \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (26)$$

Donde  $p_{0_e}$  es la presión a la entrada de la tubería,  $p_{0_s}$  es la presión a la salida,  $K$  el coeficiente de pérdida de carga,  $\rho$  la densidad del líquido interior y  $v$  la velocidad media del mismo. De cara a los cálculos se considerará  $\rho = 999.85 \text{ kg/m}^3$  y  $v = 5 \text{ m/s}$ .

En este capítulo se va a estudiar la pérdida de carga en una tubería por la que circula agua líquida con una geometría relativamente simple: una tubería en s. La geometría de dicha tubería es descrita en el esquema de la Figura 63.

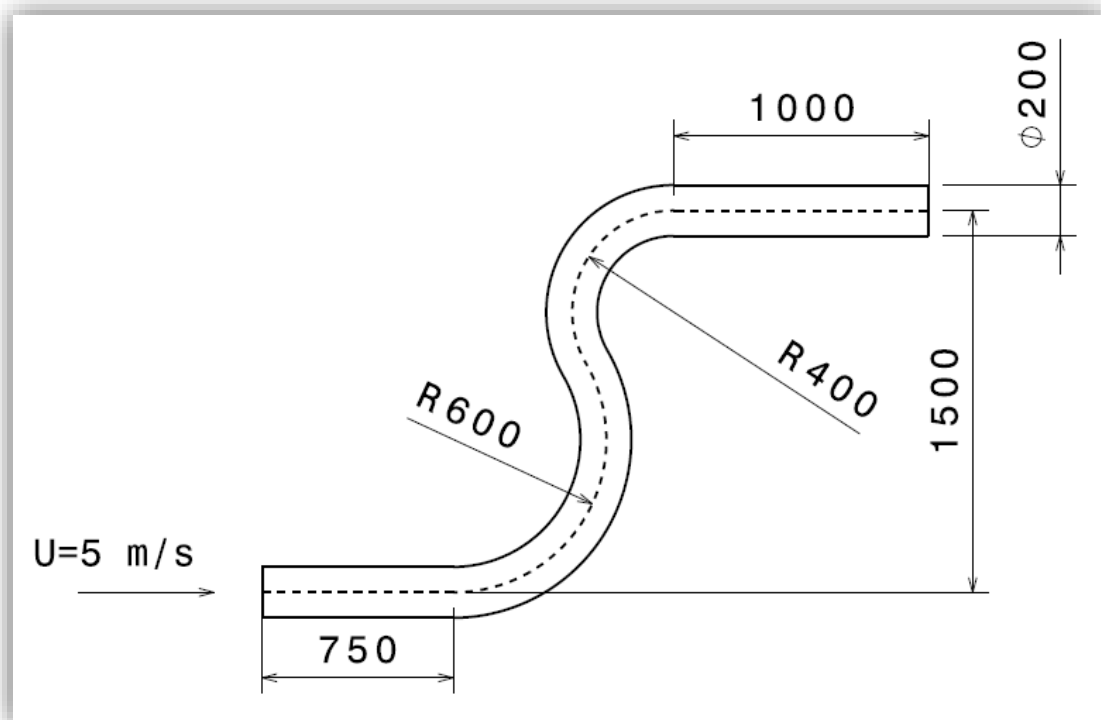


Figura 63: Geometría y condiciones que definen el problema 4.

Además, se supondrá que la tubería descarga a presión atmosférica, es decir,  $101325 \text{ Pa}$ . A continuación se describen los procedimientos seguidos en FloEFD y Fluent.

## 6.1 FloEFD

Como ya viene siendo habitual, el primer paso es el de generar la geometría en CATIA para poder realizar posteriormente el análisis de CFD. De esta forma, y siguiendo el esquema de la Figura 63, se obtiene el modelo que se observa en la Figura 64.

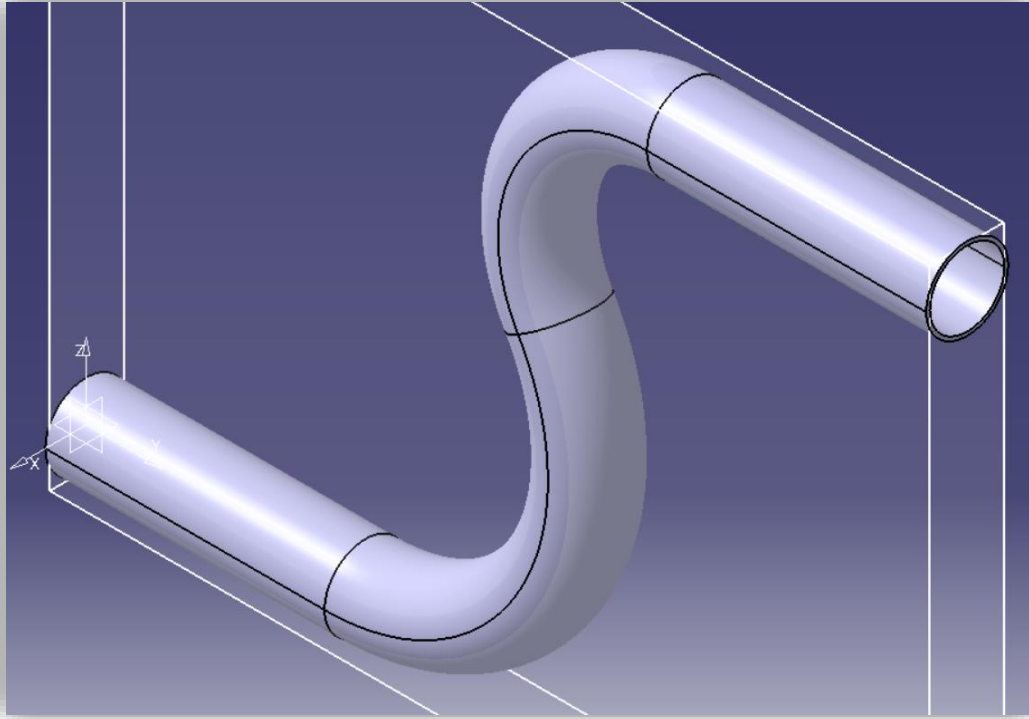


Figura 64: Geometría de la tubería en S del problema 4 en CATIA V5.

Con esto, se siguen los pasos de forma equivalente a lo que se ha hecho anteriormente:

- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard*. En este caso, establecer las siguientes propiedades:
  - *Analysis type*. En el apartado *Analysis type*, clicar en *Internal*.
  - *Fluids*. Establecer como fluido de estudio el aire: *Water (Liquid)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*.
  - *Wall Conditions*. Establecer como valor en *Default Wall* thermal condition, *Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions*. En este apartado dejar todos los valores por defecto.
- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 9, se clicca con el botón derecho en el apartado *Goals, Goals object, New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar los parámetros *SG Average Static Pressure* y *SG Average Velocity* en los planos que definen las superficies de entrada y salida de la tubería.
- De nuevo en el árbol, se clicca con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura forma que el nivel inicial de la malla sea de 7.
- Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda suficientemente pequeño, se configura de la misma forma que en los problemas anteriores.

Hecho esto, se procede a ejecutar el *solver* y se espera a tener los resultados. La malla generada puede observarse en la Figura 65, y en mayor detalle en la Figura 66.

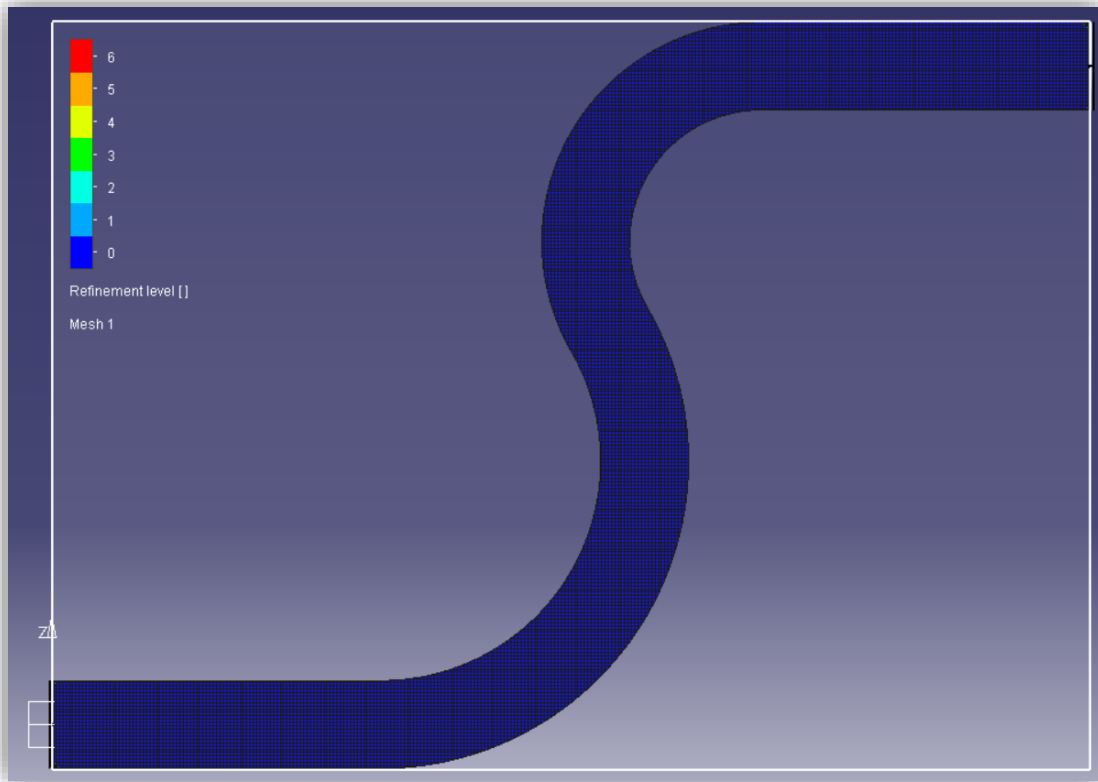


Figura 65: Malla generado por FloEFD para la resolución del problema 4.

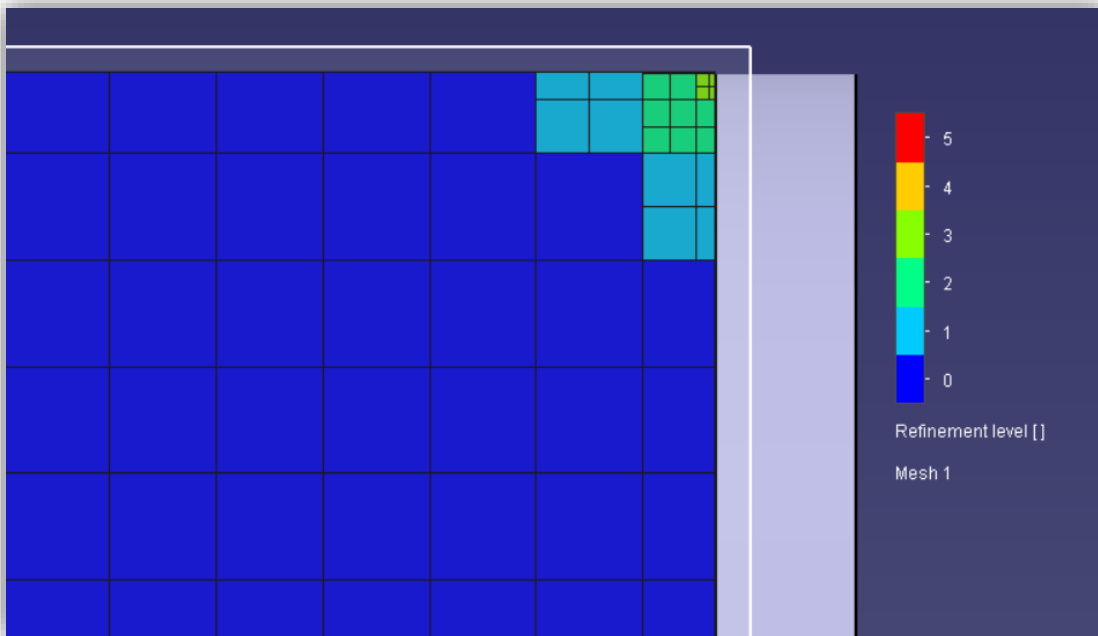


Figura 66: Detalle de la malla generada por FloEFD para la resolución del problema 4.

En esta ocasión, por ser una geometría tridimensional, es más difícil ver los campos de presiones y velocidades. Por esta razón, se representa en la Figura 67 el campo de presiones sobre la superficie de tubería en contacto con el fluido, mientras que en la Figura 68 se observa el campo de presiones en el plano XY.

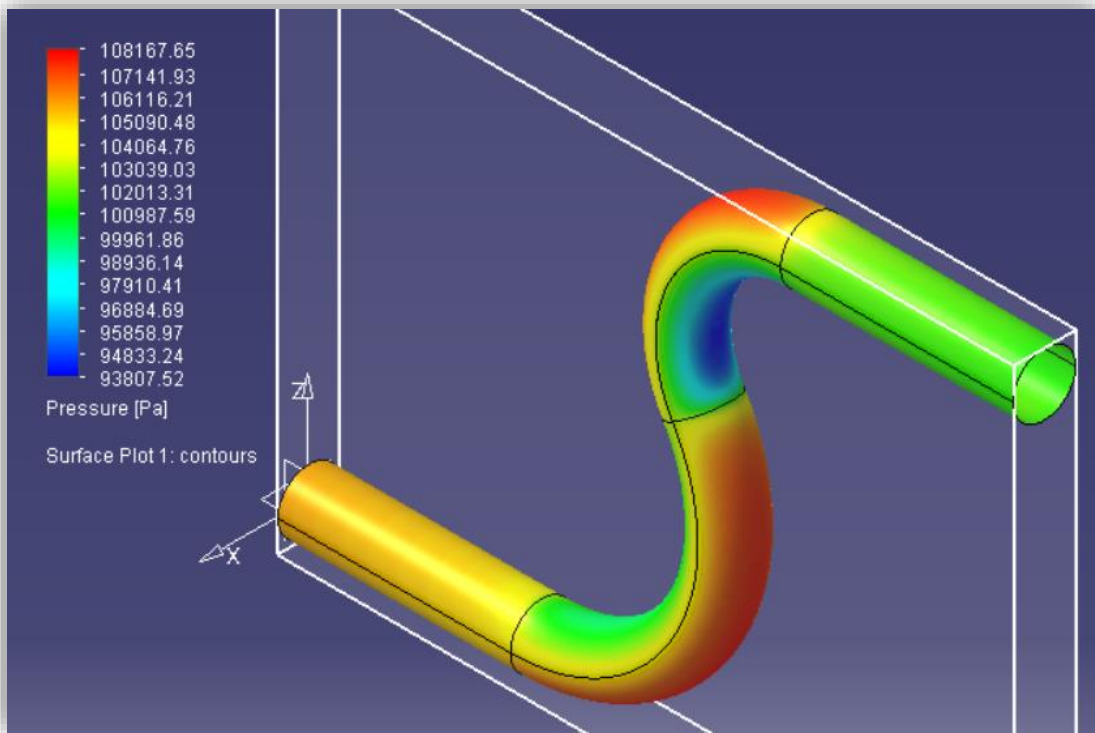


Figura 67: Campo de presiones en la tubería del problema 4.

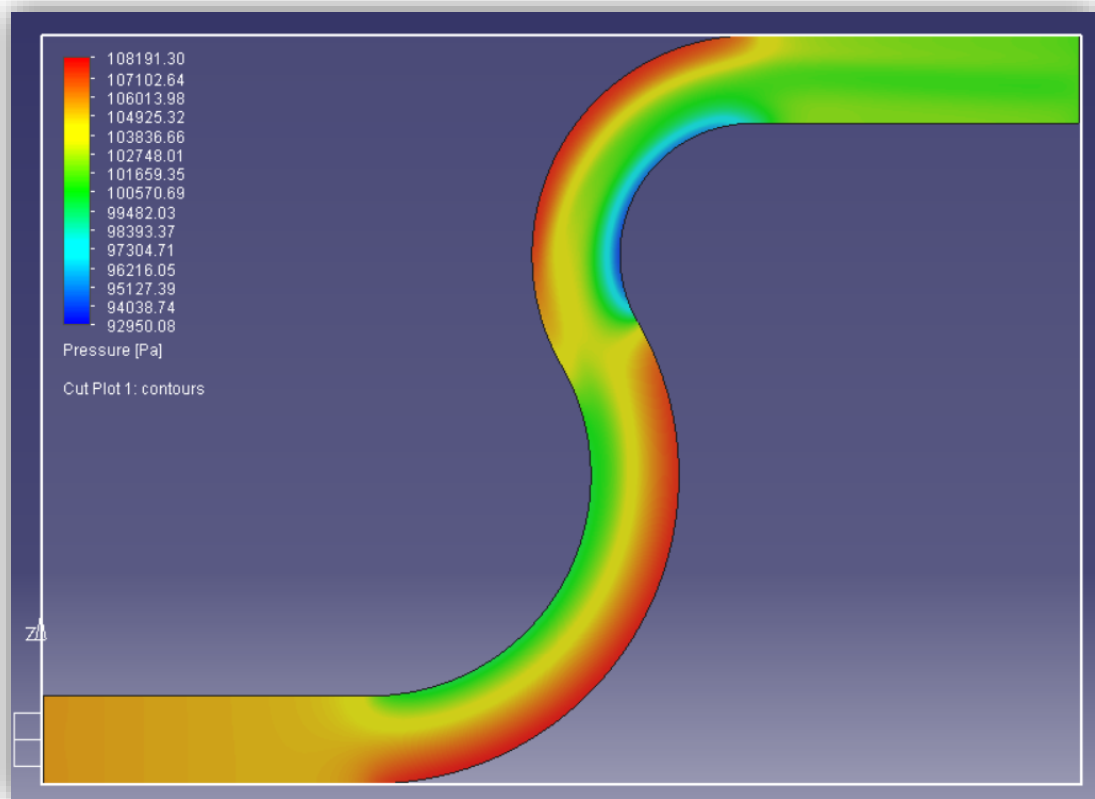


Figura 68: Campo de presiones en la tubería del problema 4, sobre la superficie del plano XY.

Por otra parte, para representar la velocidad de las partículas de forma tridimensional es más adecuado

hacerlo con la herramienta *Flow Trajectories*, de forma que se observen las trayectorias que realizan las partículas al atravesar las tuberías. Esta representación puede ser observada en la Figura 69.

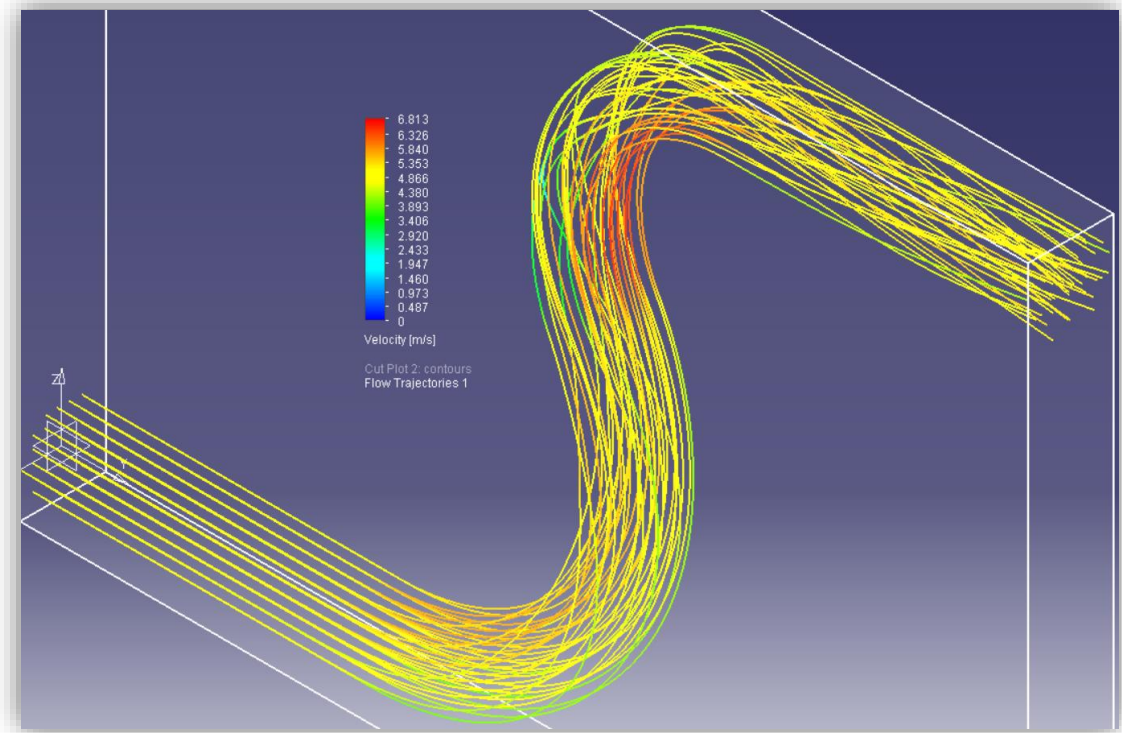


Figura 69: Trayectorias de los flujos en el interior de la tubería en el problema 4.

Una vez analizado que los datos que se obtienen tienen sentido, se procede a obtener las presiones en la superficie de salida y de entrada. El valor obtenido es el siguiente:

$$p_{0_e} = 105809.53 \text{ Pa} \quad (27)$$

$$p_{0_s} = 101325 \text{ Pa} \quad (28)$$

Esto tiene sentido puesto que el programa ha mantenido la presión a la salida según la condición de contorno. Aplicando la expresión (26) para obtener el valor de  $K$ , se obtiene:

$$K_{FloEFD} = 0.3588 \quad (29)$$

A continuación, se analizará el mismo problema usando Fluent en lugar de FloEFD.

## 6.2 Fluent

Una vez generada la geometría en otro programa e importada en Fluent, se puede proceder a crear la malla. Dada la relativa simplicidad de la geometría, se van a analizar dos mallas para ver el efecto que tiene este parámetro en la aproximación que realiza el programa.

En la Figura 70 se muestran las dos mallas que van a ser consideradas en este apartado: una estructurada (a la izquierda de la imagen) y una no estructurada (derecha de la imagen).

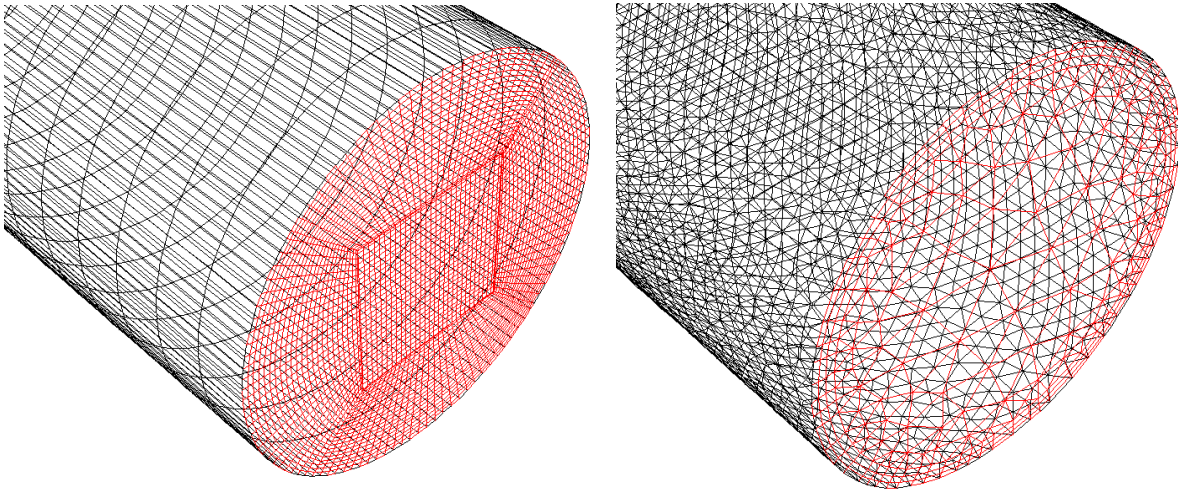


Figura 70: Detalle de los tipos de mallado que van a ser considerados en la resolución del problema.

Para ambos casos se empleará el método de resolución  $K - \varepsilon$ . Además, se ha tenido especial cuidado para que el  $y+$  sea pequeño y poder simular adecuadamente los efectos que se producen cerca de la pared.

Con esto, y de manera similar a los ejercicios anteriores, se configura Fluent para la resolución del problema, estableciendo como fluido de cálculo el agua líquida y con las condiciones de contorno citadas en la introducción de este capítulo.

El campo de presiones sobre la superficie de fluido puede observarse en la Figura 71 para el caso de la malla estructurada, y en la Figura 72 para el caso de la malla no estructurada.

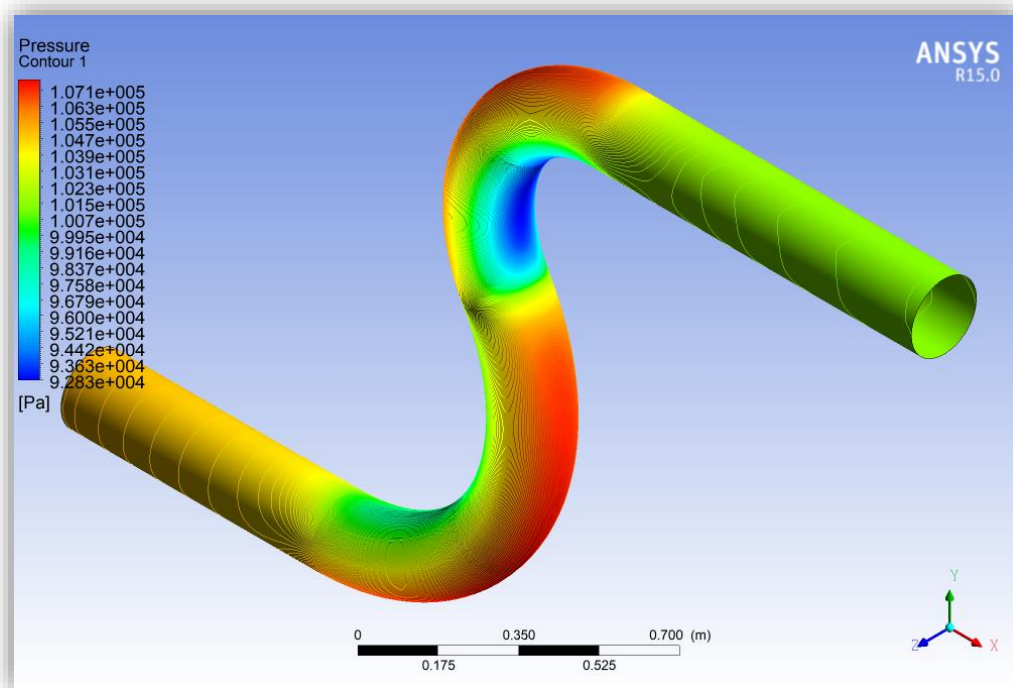


Figura 71: Campo de presiones en el caso de la malla estructurada.

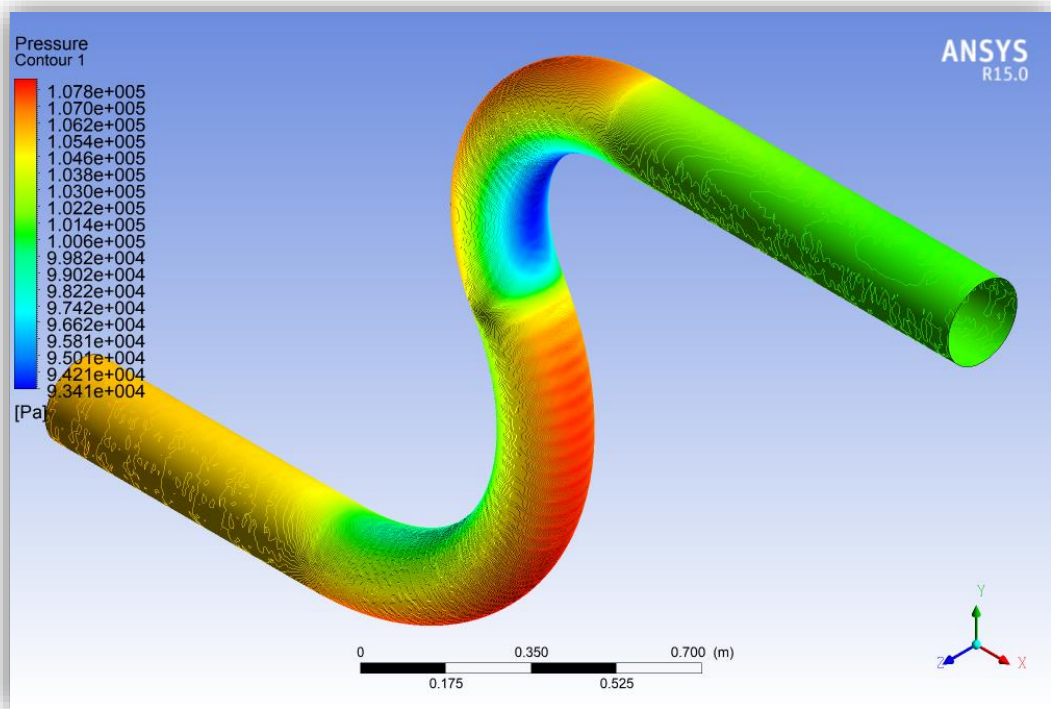


Figura 72: Campo de presiones en el caso de la malla no estructurada.

Por otra parte, también es interesante observar la distribución de velocidades mediante las trayectorias de las partículas:

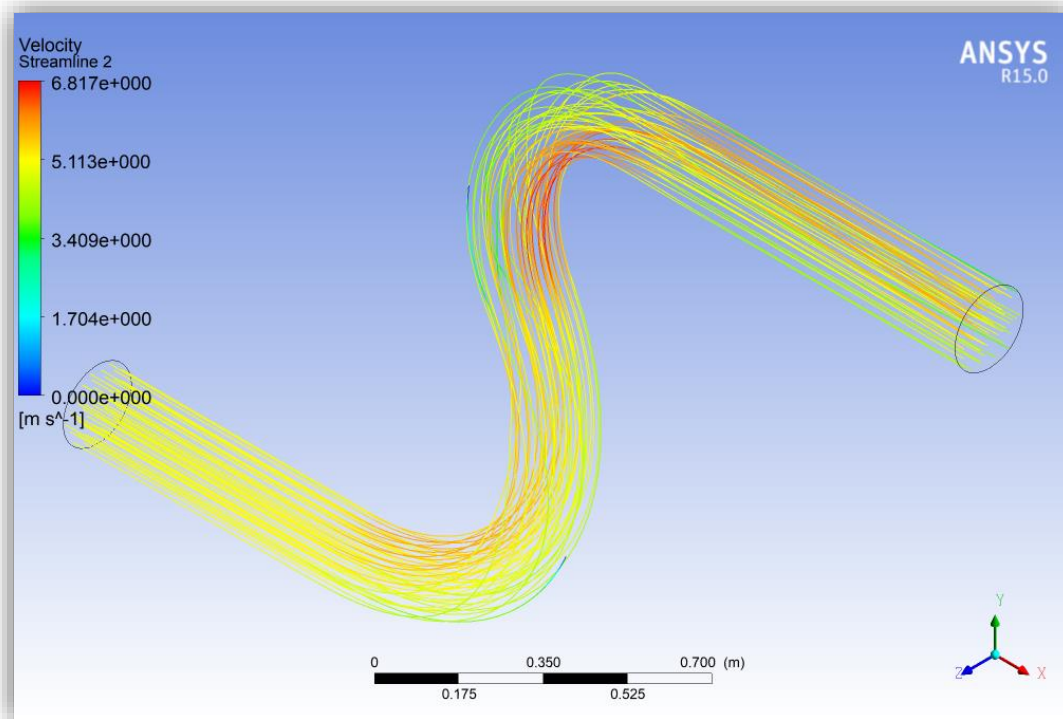


Figura 73: Distribución de velocidades en el caso de la malla estructurada.

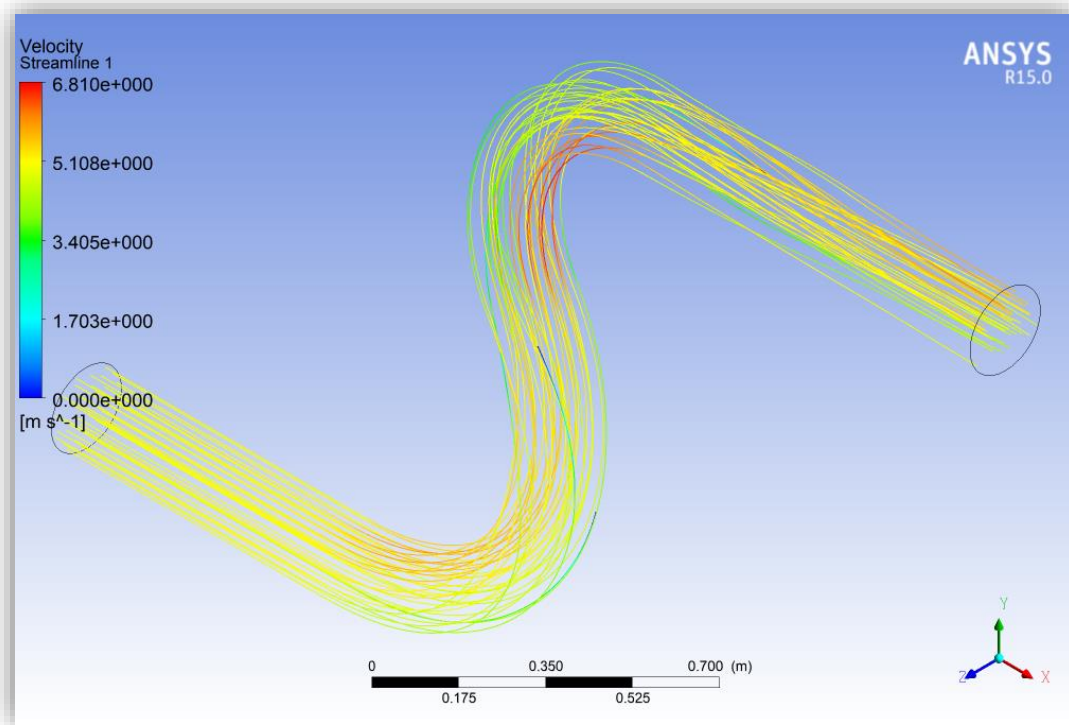


Figura 74: Distribución de velocidades en el caso de la malla no estructurada.

De esta forma, se puede calcular igualmente el coeficiente de pérdida de carga a partir de las presiones en las superficies de entrada y salida de la tubería. Dichas presiones son:

$$p_{0_e,ME} = 105138.96 \text{ Pa} \quad (30)$$

$$p_{0_s,ME} = 101325 \text{ Pa} \quad (31)$$

$$p_{0_e,MNE} = 105844.13 \text{ Pa} \quad (32)$$

$$p_{0_s,MNE} = 101325 \text{ Pa} \quad (33)$$

Donde el subíndice *ME* hace referencia al caso con la malla estructurada, y *MNE* hace referencia a la malla no estructurada. Con estos datos, se tiene que el coeficiente de pérdida de carga es:

$$K_{Fluent,ME} = 0.305 \quad (34)$$

$$K_{Fluent,MNE} = 0.362 \quad (35)$$

De esta forma, quedan definidos ambos problemas.

### 6.3 Resultados

A partir de los resultados de cada uno de los apartados anteriores, es posible ahora calcular el error relativo cometido por los programas de cálculo. Se tomará como referencia el resultado de la malla estructurada de Fluent, aunque en realidad no tendría por que ser el resultado más preciso en realidad.

$\varepsilon_{FloEFD} [\%]$	<b>17.58</b>
-----------------------------	--------------



$\epsilon_{Fluent,MNE}$ [%]	18.49
-----------------------------	-------

Tabla 12: Errores relativos cometido por FloEFD y Fluent respecto al caso de la malla estructurada.

Con estos datos, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El resultado obtenido es realmente similar entre los cálculos realizados entre Fluent con la malla no estructurada y FloEFD, tanto es así, que quizás sea el problema de la malla estructurada el que más se aleje de la realidad.
- Los campos de presiones y velocidades son muy similares en todos los casos.
- El tiempo de cálculo de Fluent es significativamente menor que el de FloEFD, aunque la simplicidad de FloEFD para poner las condiciones de contorno y definir el problema es una ventaja.



# 7 PROBLEMA 5: MEZCLADOR DE FLUJOS

Hasta ahora todos los problemas que han sido resueltos han podido resolverse gracias al uso de las ecuaciones de Navier-Stokes sin el uso de la ecuación de la energía (ver la expresión (3)), debido a que en todos los problemas considerados no había unas condiciones de contorno en las que se produjera un gradiente de temperatura, y por tanto el problema para obtener los campos de velocidades y presiones estaba desacoplado de este. El único caso en el que se ha tenido que usar dicha ecuación es en el caos del perfil supersónico, debido a que la compresión del aire tan grande y las ondas de choque que se producen sí generan grandes gradientes en las temperaturas, por lo que es imprescindible para estudiar adecuadamente el problema.

En esta ocasión se va a estudiar lo que ocurre cuando dos tuberías se conectan en una sola y los fluidos en su interior, a diferente temperatura, se mezclan. La velocidad de ambos flujos será relativamente lenta, y se medirán varias características en las diferentes secciones de las tuberías. En la Figura 75 se observa la geometría que tiene este problema.

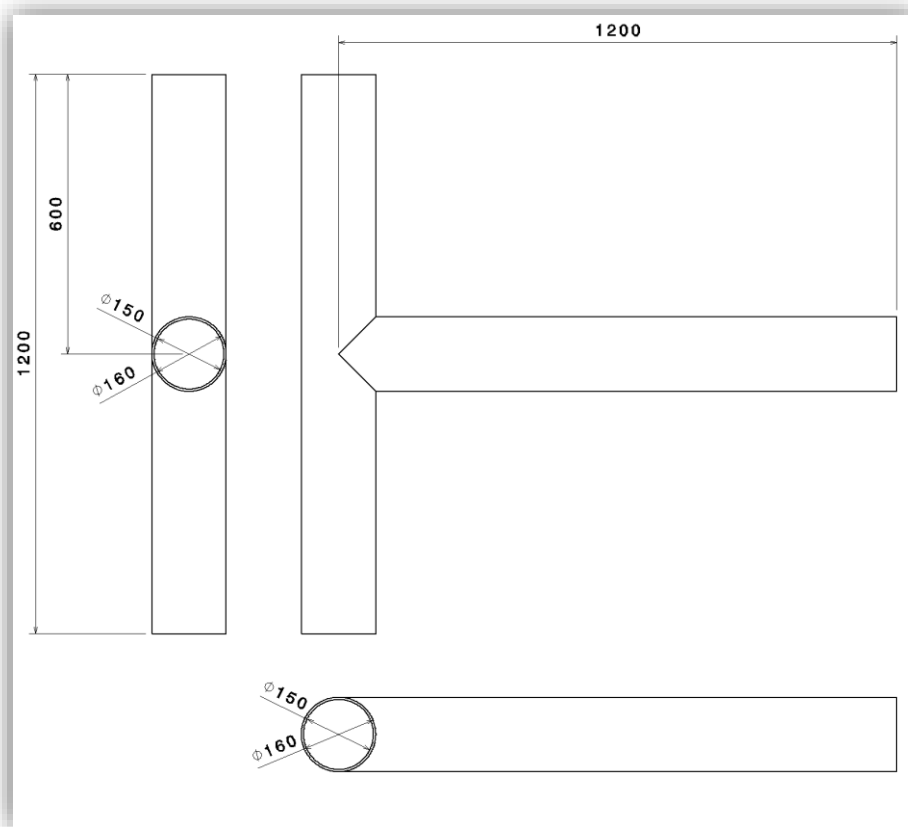


Figura 75: Geometría del mezclador de flujos que va a ser analizado en el problema 5.

El problema queda definido por:

- Condiciones de entrada y salida de los flujos.
  - En las superficies de entrada se define una velocidad de  $5 \text{ m/s}$  y una temperatura de  $283.2 \text{ K}$  y  $353.2 \text{ K}$ .
  - En la superficie de salida se define una presión de salida de  $101325 \text{ Pa}$ .
- Las paredes de las tuberías se consideran adiabáticas.
- Se usará como fluido el agua líquida.

## 7.1 FloEFD

Como de costumbre, el primer paso es modelar en CATIA la tubería descrita en la Figura 75. El resultado de este modelado se puede observar en la

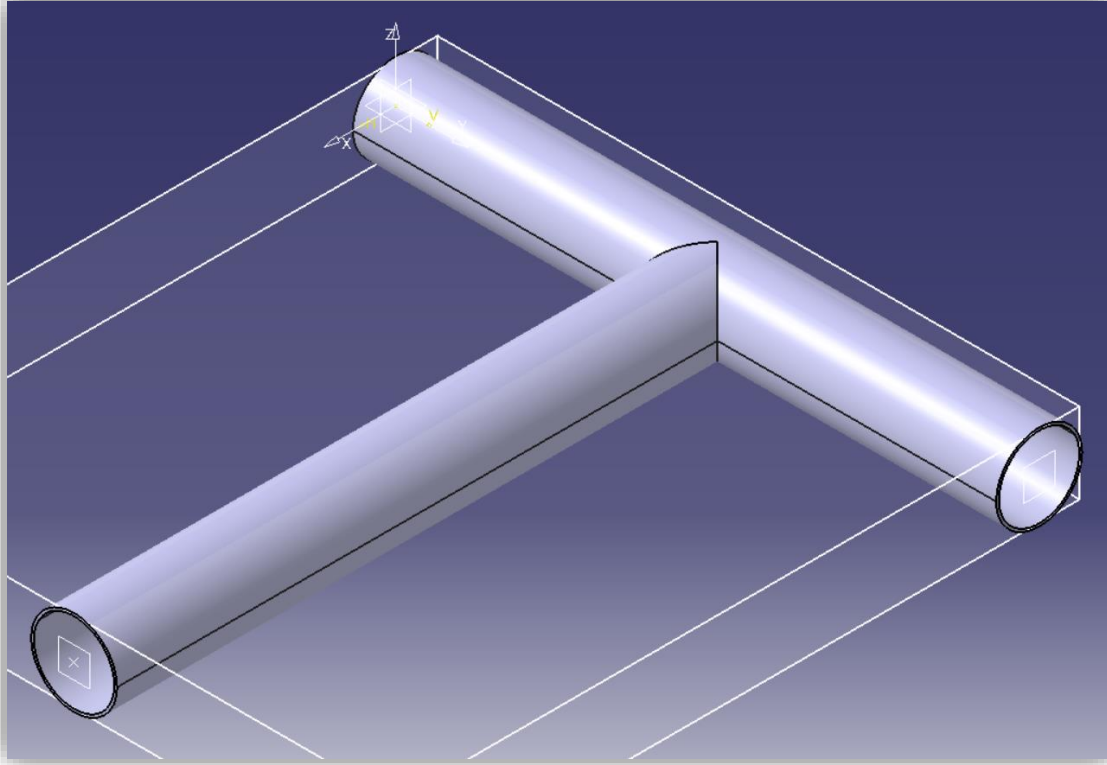


Figura 76: Modelo en CATIA de la geometría definida para el problema 5.

De esta forma y una vez abierto el módulo de FloEFD, se siguen los siguientes pasos para configurar el programa:

- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard*. En este caso, establecer las siguientes propiedades:
  - *Analysis type*. En el apartado *Analysis type*, clicar en *Internal*.
  - *Fluids*. Establecer como fluido de estudio el aire: *Water (Liquid)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*.
  - *Wall Conditions*. Establecer como valor en *Default Wall* *termal condition, Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions*. En este apartado dejar todos los valores por defecto.
- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 9, se clicca con el botón derecho en el apartado *Goals, Goals object, New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar los parámetros *SG Average Static Pressure*, *SG Average Temperature (Fluid)* y *SG Average Velocity* en los planos que definen las superficies de entrada y salida de la tubería.
- También en el árbol, se establecen las condiciones de contorno definidas en el apartado anterior.
- De nuevo en el árbol, se clicca con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura forma que el nivel inicial de la malla sea de 7.
- Generar también una malla más refinada en las paredes de la tubería, en el apartado *Mesh, Mesh Object, Local Mesh*.
- Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda

suficientemente pequeño, se configura de la misma forma que en los problemas anteriores.

Con esto hecho, se ejecuta el software para obtener los campos de presiones y temperatura correspondientes. Como resultado, la malla generada queda como se observa en la Figura 77. En 3D, representar la malla es muy complicado, de forma que se muestra la malla en los cortes con los planos XY y XZ. A su vez, en la Figura 78 se observa en detalle los niveles de refinamiento de la malla.

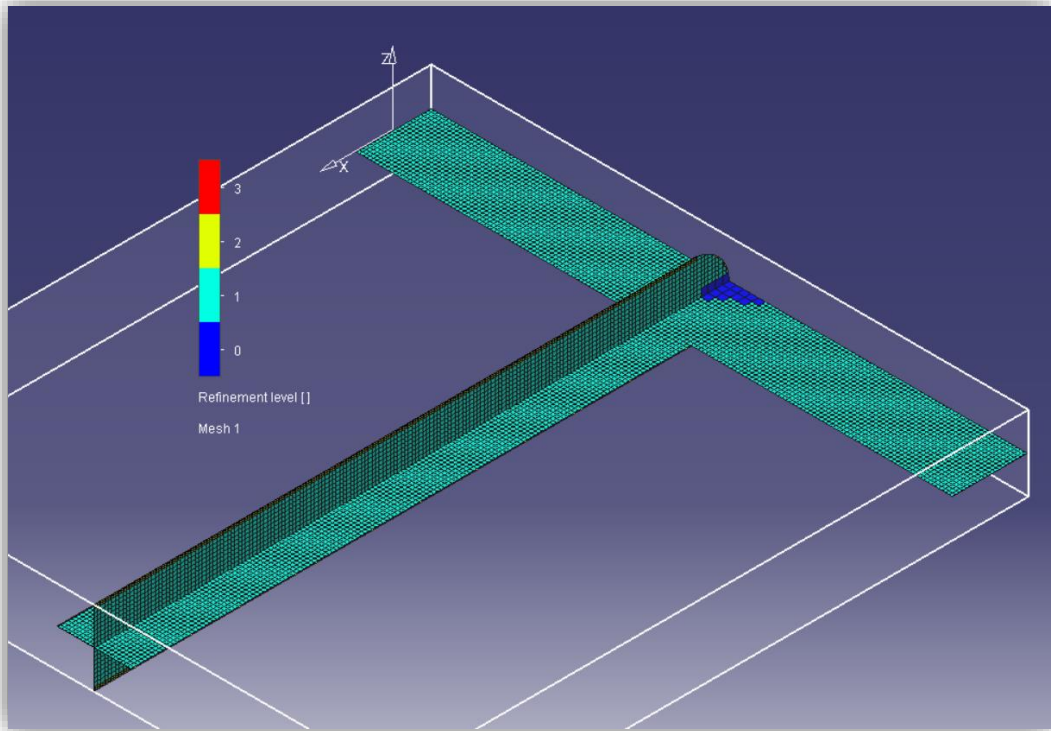


Figura 77: Malla generado por FloEFD para la resolución del problema 5.

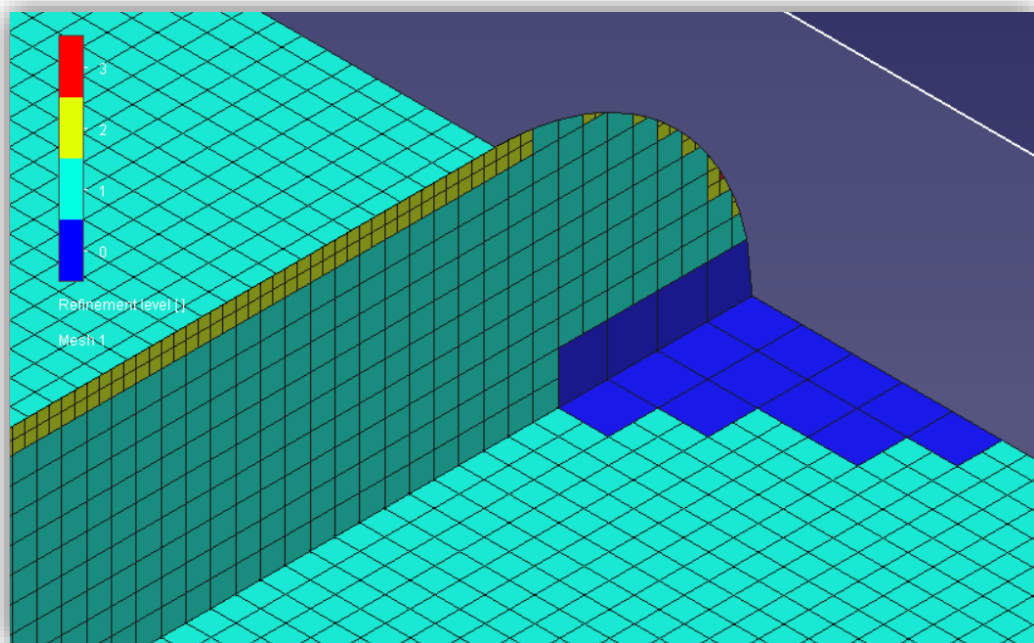


Figura 78: Detalle de la malla generado por FloEFD para la resolución del problema 5.

A partir de esta malla se calculan los campos de presiones y de temperaturas, tal y como se observa en la Figura 79 y la Figura 80.

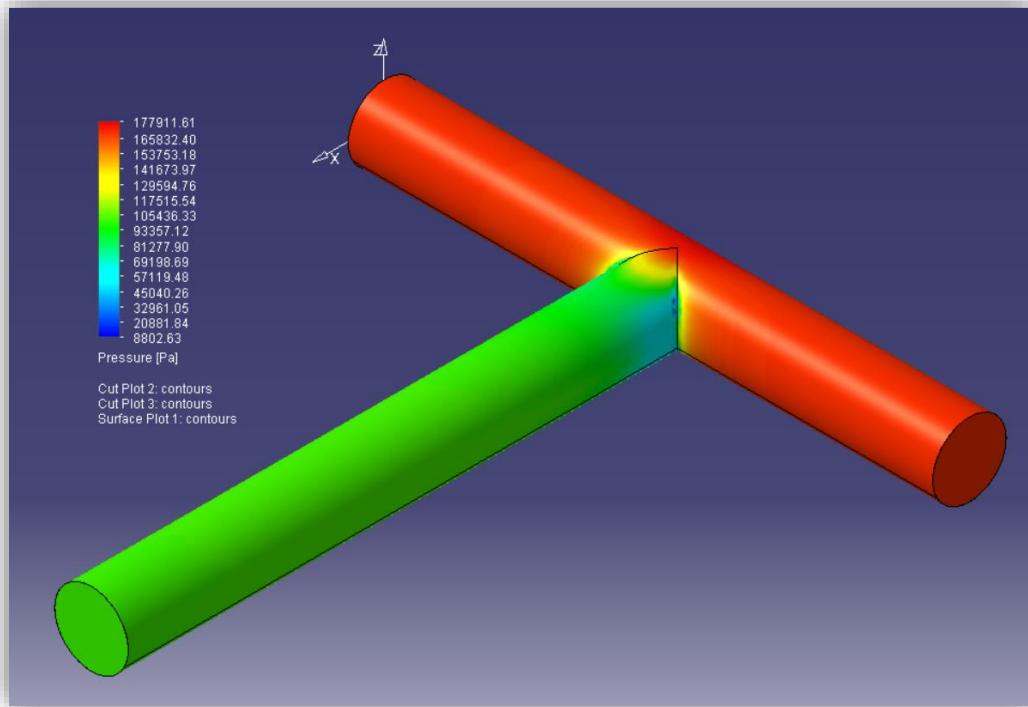


Figura 79: Campo de presiones en la tubería calculado por FloEFD.

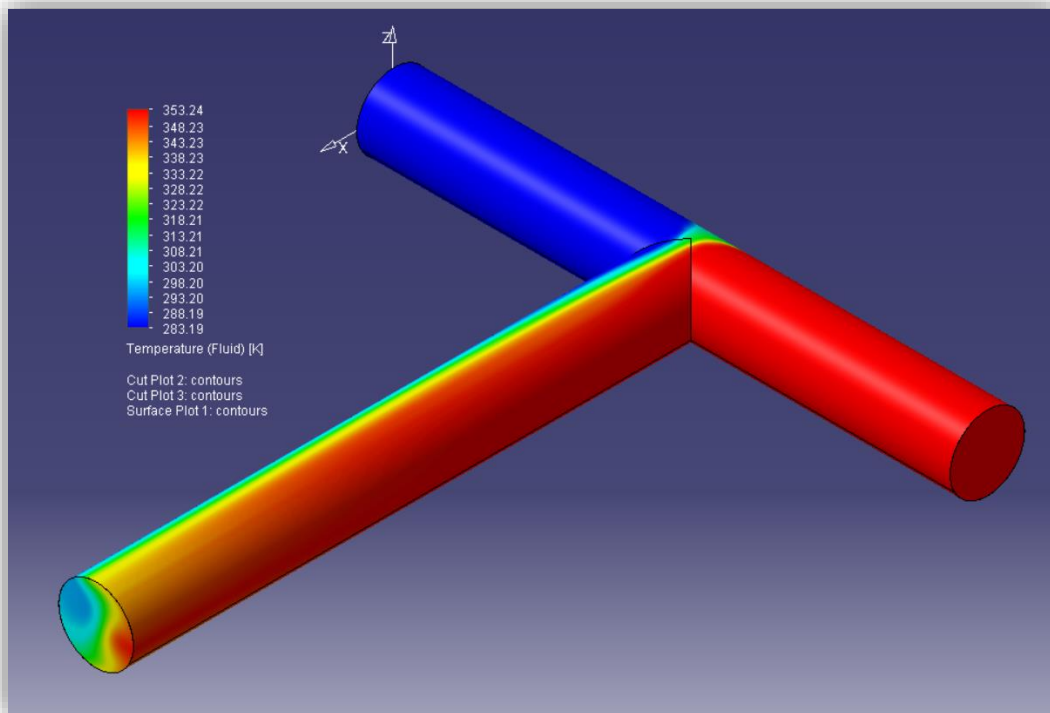


Figura 80: Campo de temperaturas en la tubería calculado por FloEFD.

De la misma forma, también es posible calcular las velocidades del flujo en el interior de la tubería, tal y como se observa en la Figura 81.

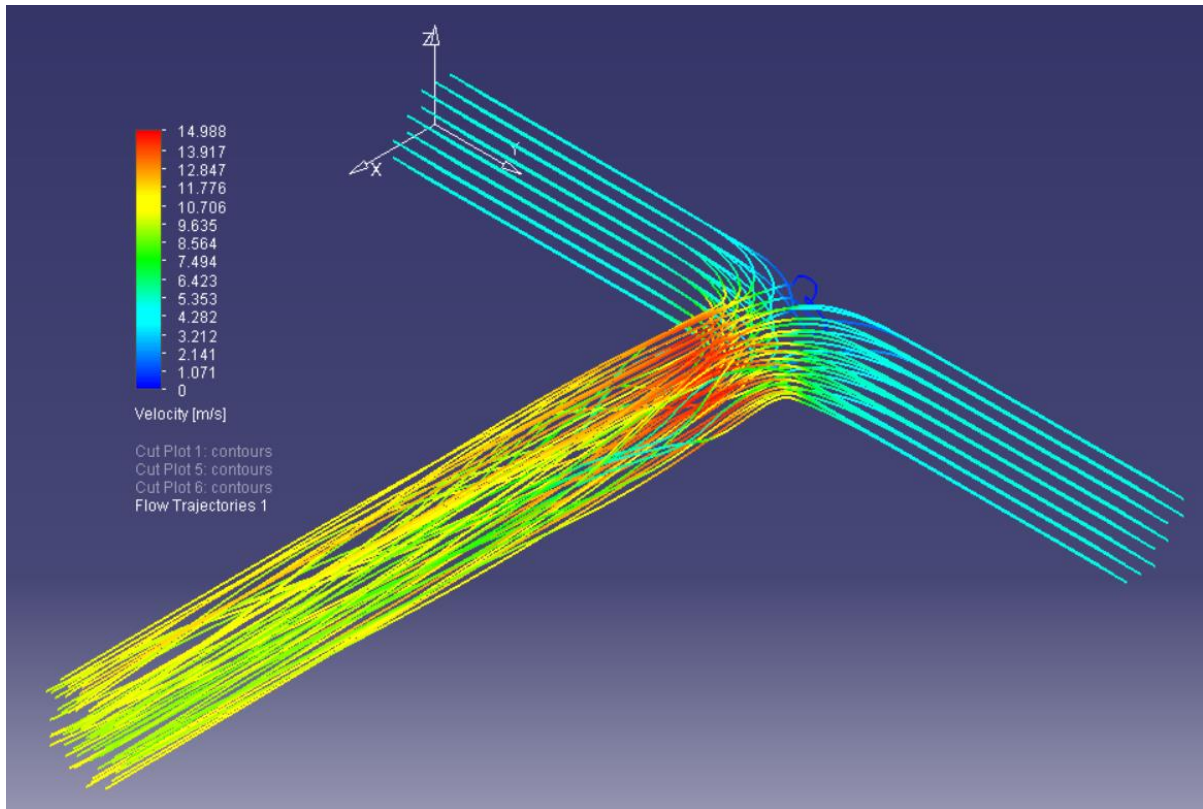


Figura 81: Velocidad de las partículas fluidas en la tubería calculadas por FloEFD.

De esta forma, es posible calcular ahora calcular las presiones, temperaturas y velocidades medias en las diferentes superficies consideradas (entrada y salida de agua), tal y como se muestra en la Tabla 13.

<b>Entrada Fría</b>	Presión [ $Pa$ ]	169329.04
	Velocidad [ $m/s$ ]	5
	Temperatura [ $K$ ]	283.2
<b>Entrada caliente</b>	Presión [ $Pa$ ]	169634.95
	Velocidad [ $m/s$ ]	5
	Temperatura [ $K$ ]	353.2
<b>Salida</b>	Presión [ $Pa$ ]	101325.3
	Velocidad [ $m/s$ ]	10.01
	Temperatura [ $K$ ]	318.40

Tabla 13: Resultados de presión, temperatura y velocidad media realizado por FloEFD.

## 7.2 Fluent

Para calcular este problema con Fluent, el primer paso es guardar el modelo en un formato de archivo

compatible y abrirlo en Ansys. A continuación de esto se genera la malla, la cual puede ser observada en la Figura 82. En la Figura 83 se muestran algunos detalles de la malla para observarla con mayor claridad.

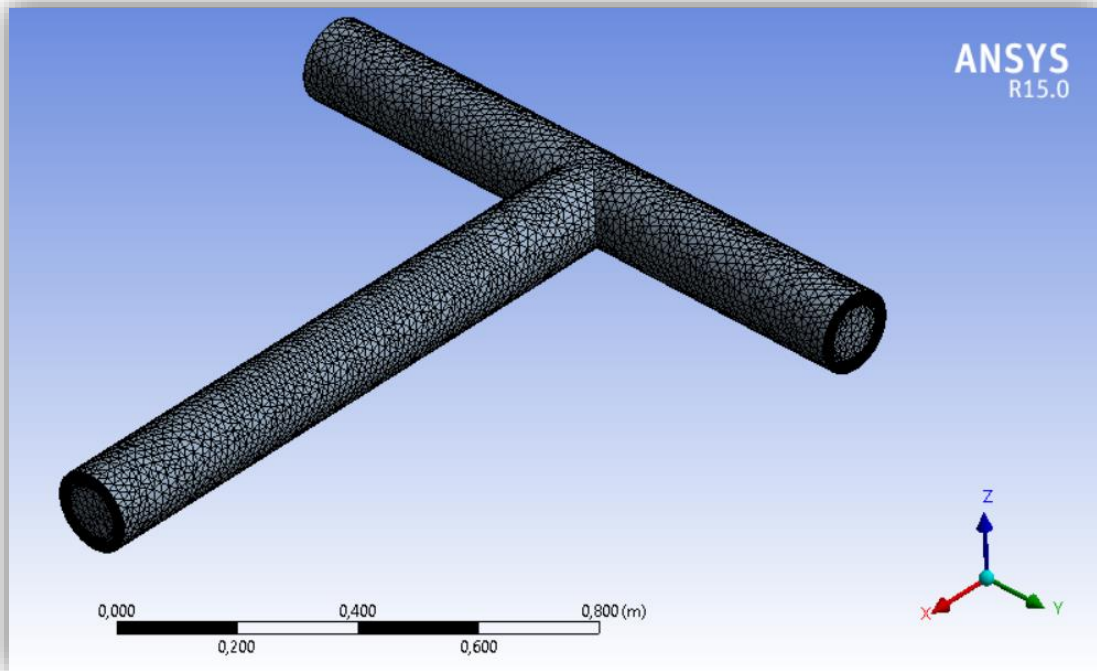


Figura 82: Mallado creado en ANSYS Fluent para la resolución del problema 5.

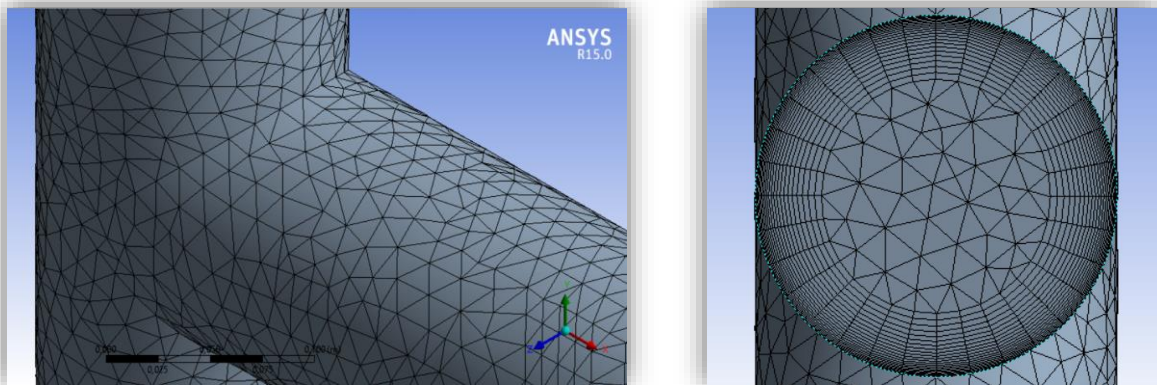


Figura 83: Detalle del mallado creado en ANSYS Fluent para la resolución del problema 5.

Para la resolución del problema empleará el método de resolución  $K - \varepsilon$ . Además, se ha tenido especial cuidado para que el  $y^+$  sea pequeño y poder simular adecuadamente los efectos que se producen cerca de la pared.

Con esto, y de manera similar a los ejercicios anteriores, se configura Fluent para la resolución del problema, estableciendo como fluido de cálculo el agua líquida y con las condiciones de contorno citadas en la introducción de este capítulo.

El campo de presiones sobre la superficie de fluido puede observarse en la Figura 71 para el caso de la malla estructurada, y en la Figura 72 para el caso de la malla no estructurada.



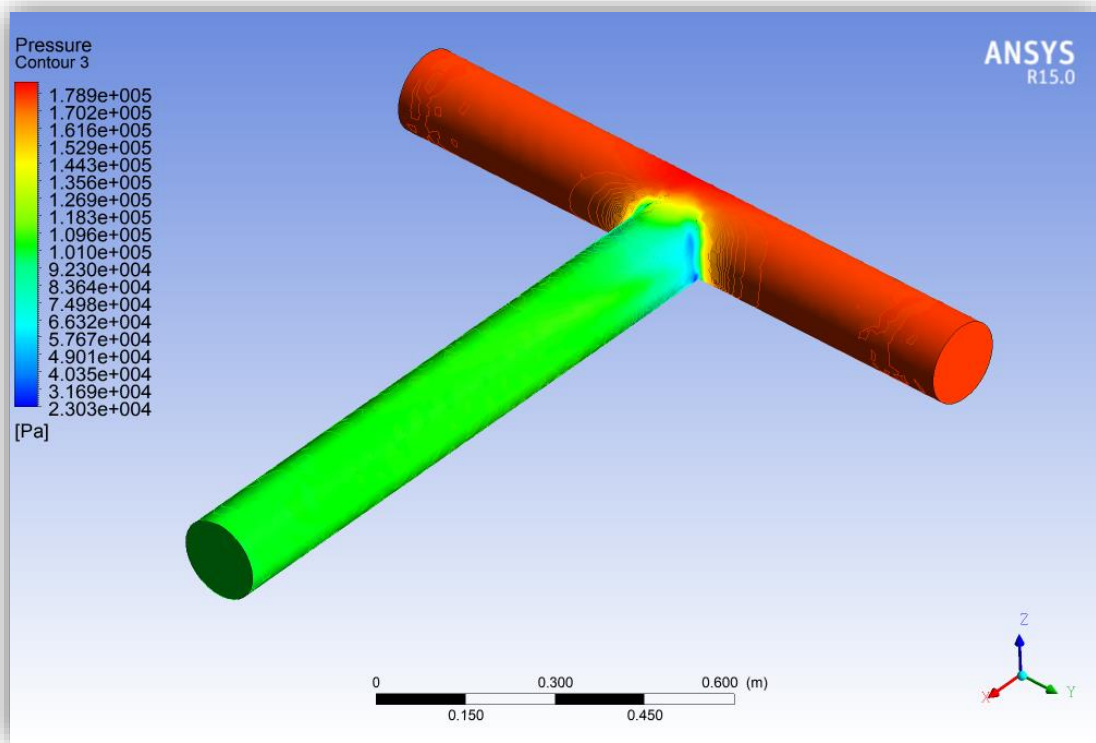


Figura 84: Campo de presiones en la tubería calculado por Fluent.

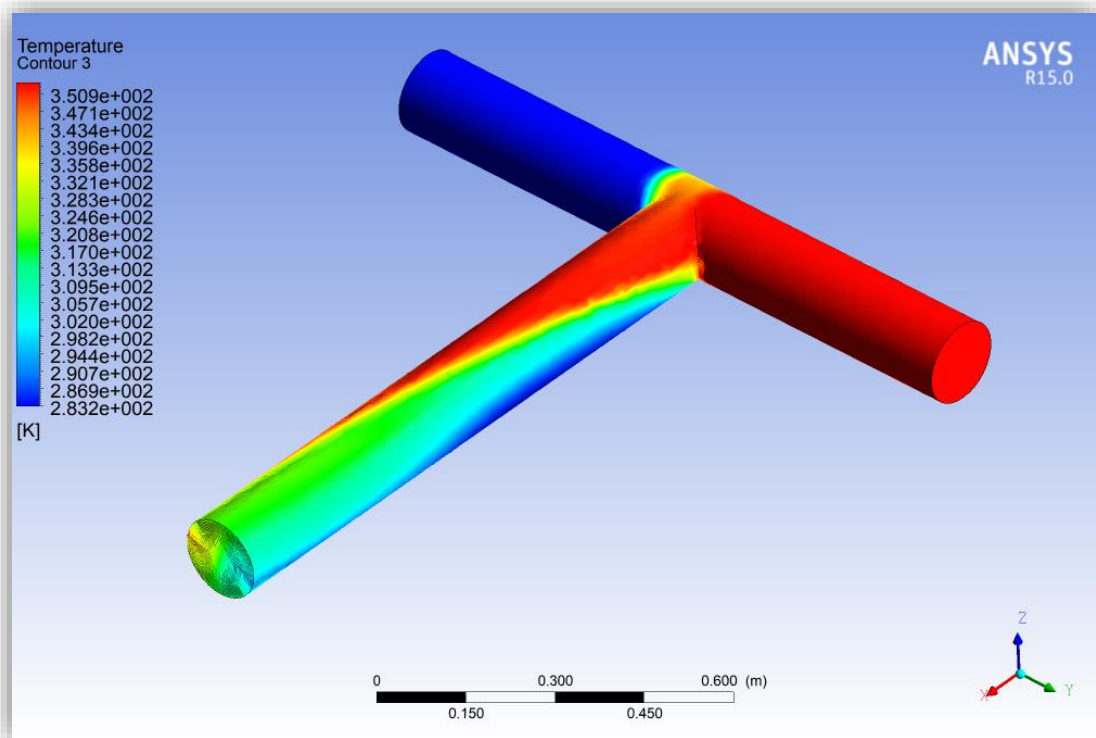


Figura 85: Campo de temperaturas en la tubería calculado por Fluent.

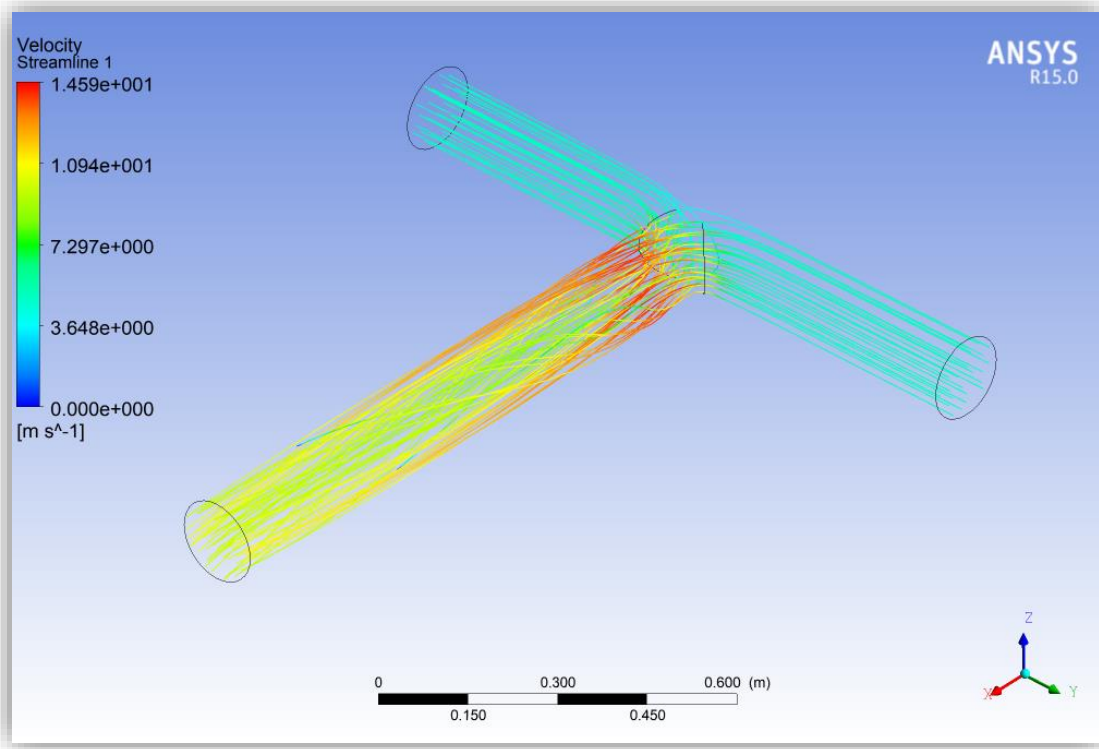


Figura 86: Velocidad de las partículas fluidas en la tubería calculadas por Fluent.

Al igual que en el apartado anterior, es posible calcular los valores medios de presión, temperatura y velocidad en cada una de las superficies consideradas. Dichos resultados se observan en la Tabla 14:

<b>Entrada Fría</b>	Presión [ $Pa$ ]	176838.05
	Velocidad [ $m/s$ ]	5
	Temperatura [ $K$ ]	283.2
<b>Entrada caliente</b>	Presión [ $Pa$ ]	176946.44
	Velocidad [ $m/s$ ]	5
	Temperatura [ $K$ ]	353.2
<b>Salida</b>	Presión [ $Pa$ ]	101325
	Velocidad [ $m/s$ ]	10.07
	Temperatura [ $K$ ]	318.211

Tabla 14: Resultados de presión, temperatura y velocidad media en las superficies de entrada y salida de la tubería en el caso del análisis realizado por Fluent.

### 7.3 Resultados

Tal y como se observa en los resultados de ambos softwares y las imágenes resultantes, parece indicar que ambos obtienen una solución muy buena. El error relativo de las temperaturas es:

$\varepsilon_{FluEFD,T_{salida}}$	0.06 %
-----------------------------------	--------

Observando los campos de presiones calculados, a priori se puede observar como el resultado es muy similar en ambos casos, cosa que se demuestra al observar las tablas de resultados. Sin embargo, la distribución de temperaturas de ambos problemas es drásticamente diferente en ambos casos. Esto es debido posiblemente al modelo de turbulencia intrínseco de cada programa, siendo el cálculo en detalle de los flujos es que determina una mezcla aparentemente mayor en el caso de la solución otorgada por Fluent.

Sin embargo, analizando en detalle ambos problemas, es muy interesante notar que en cada sección la temperatura media calculada por ambos programas es idéntica (aun no siendo así la presión). Esta conclusión es muy importante, pues nos muestra que a pesar del modelo de cierre que se esté usando puede variar, los valores medios de temperatura se mantienen.



# 8 PROBLEMA 6: ALERÓN DE FORMULA 1

La aerodinámica es una de las ciencias claves en el diseño de multitud de elementos y sistemas. Una de las aplicaciones más importante es en el diseño del chasis de los coches de competición, en los que se trata de minimizar la resistencia aerodinámica y tener una carga suficientemente alta para mantener el coche pegado al suelo. La carga es equivalente a la fuerza de sustentación, pero en dirección hacia el suelo.

Para poder ir más rápido en las rectas, donde no es necesaria tanta carga como en las curvas, se utiliza un elemento llamado DRS (*Drag Reduction System*). Este fue un elemento introducido en la temporada 2011 de Formula 1 que requiere un diseño aerodinámico muy preciso. En la Figura 87 se puede observar el DRS de un coche de fórmula 1.

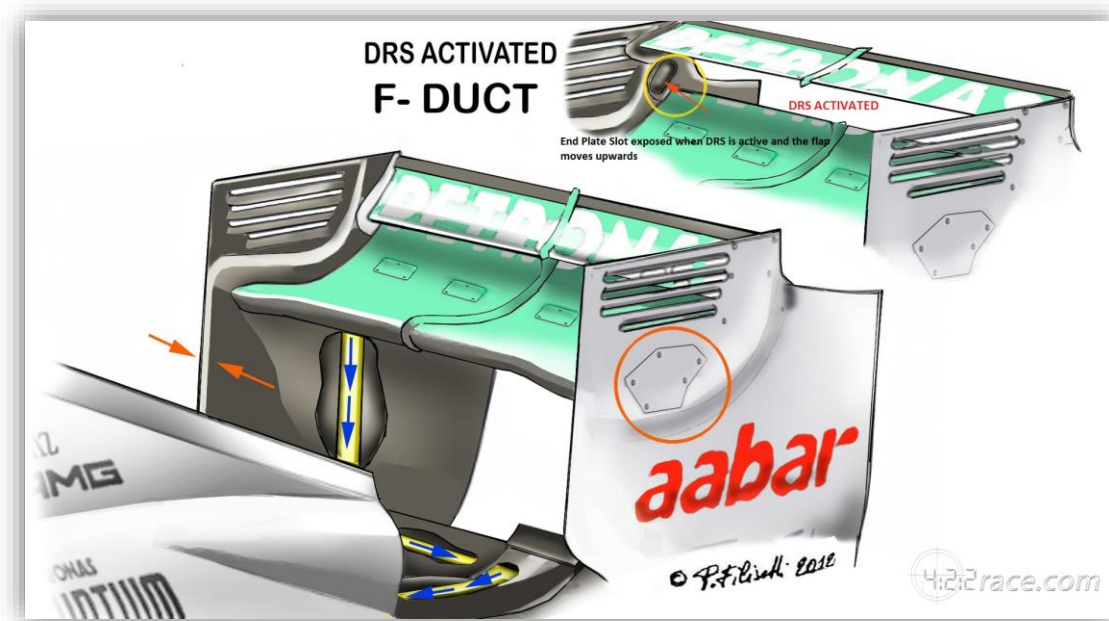


Figura 87: Perfil de referencia.

De esta forma, se propone estudiar el alerón un coche de Formula 1 para analizar el efecto de este elemento. El modelo que se va a usar está basando en el de la referencia **PONER REFERENCIA AQUÍ**, y posee las siguientes características:

- Mismo perfil aerodinámico para alerón fijo y móvil: NACA 14512-43.
- Cuerda del perfil alerón fijo: 136 *m*.
- Cuerda del perfil alerón móvil: 68 *mm*.
- Gap (distancia entre alerón fijo y móvil): 15.75 *mm*.
- Ángulo de ataque del alerón fijo: 1.125°.
- Ángulo de ataque del alerón móvil (configuración nominal): 43°.

Por otra parte, el propio diseño de los winglets laterales se ha establecido siguiendo las pocas pautas de normativa encontradas al respecto y basándose en ejemplos existentes en la literatura, imágenes extraídas...; pero el diseño fundamental es un diseño propio, no siguiendo fielmente ninguno de los encontrados. La razón de esto es la falta de datos y de información contrastada. Por tanto, este será un diseño simplificado que no considerará muchos posibles elementos de interferencia, actuadores, aperturas en el propio winglet...

Por último, para terminar de definir el diseño, es necesario mencionar que el estudio siguiente se hará

basándose en dos hipótesis fundamentales:

- Se considerará el alerón como un elemento aislado, sin analizar la influencia del resto del vehículo sobre él o de otros posibles elementos externos (por ejemplo, efecto suelo).
- Se supondrá una situación de flujo no confinado, tratando de reproducir una situación real del monoplace en una pista y no un ensayo en túnel de viento.

A continuación, se estudiará este programa en los dos programas que se están considerando.

## 8.1 FloEFD

El primer paso del diseño es como de costumbre el modelado en CATIA del alerón. En la Figura 88 se observa el diseño propuesto, en las dos configuraciones correspondientes: con DRS activado y desactivado.

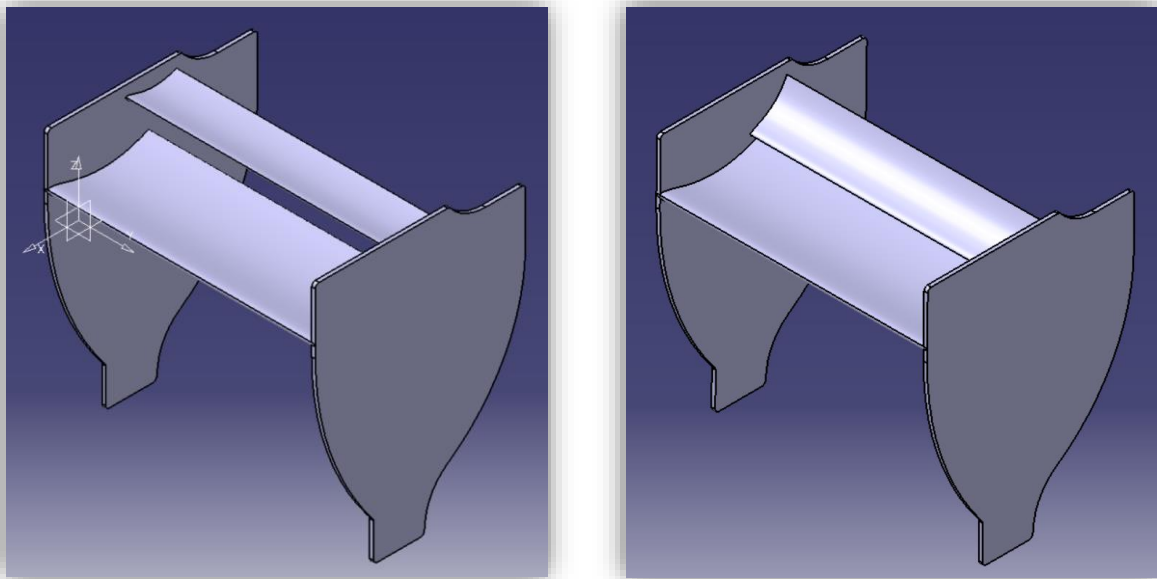


Figura 88: Modelo del alerón del problema 6 con el DRS activado y desactivado (izquierda y derecha).

La principal ventaja que tiene FloEFD aquí se puede apreciar claramente: un mismo modelo sirve para realizar los dos análisis propuestos. Gracias a un eje que pasa por el DRS, en el módulo de *Assembly Design* de CATIA se puede girar el DRS a gusto, y reanalizar el problema sin modificar nada del módulo de FloEFD.

De esta forma, se procede a analizar ambos problemas:

- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard*. En este caso, establecer las siguientes propiedades:
  - *Analysis type*. En el apartado *Analysis type*, clicar en *External*.
  - *Fluids*. Establecer como fluido de estudio el aire: *Air (Gases)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*.
  - *Wall Conditions*. Establecer como valor en *Default Wall* *thermal condition, Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions*. En este apartado dejar todos los valores por defecto, salvo el de la velocidad que se establece  $300 \text{ km/h}$  ( $83.33 \text{ m/s}$ ) en dirección  $-x$ .
- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 9, se clicca con el botón derecho en el apartado *Goals, Goals object, New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar los parámetros *GG Force 1*, *GG Force (X)*, *GG Force (Y)* y *GG Force (Z)* en los planos que definen las superficies de entrada y salida de la tubería.

- De nuevo en el árbol, se clicca con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura forma que el nivel inicial de la malla sea de 2.
- Generar también una malla más refinada alrededor del alerón, en el apartado *Mesh, Mesh Object, Local Mesh*.
- Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda suficientemente pequeño, se configura de la misma forma que en los problemas anteriores.

Con esto hecho, se puede proceder a resolver el problema. En la Figura 89 se observa la malla generada por FloEFD para resolver el problema con el DRS activado, mientras que la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la malla generada para resolver el problema sin el DRS activado.

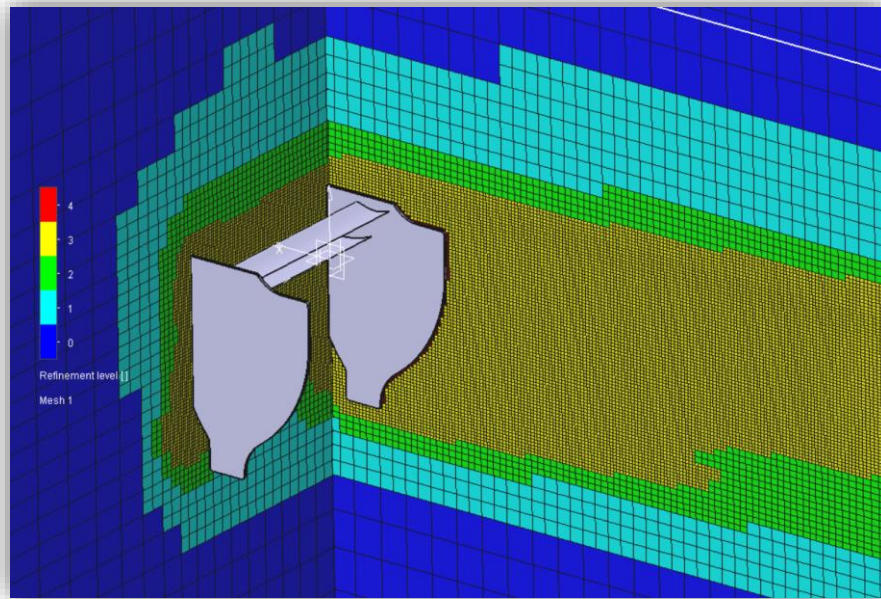


Figura 89: Malla generada por FloEFD en el caso del alerón con el DRS activado.

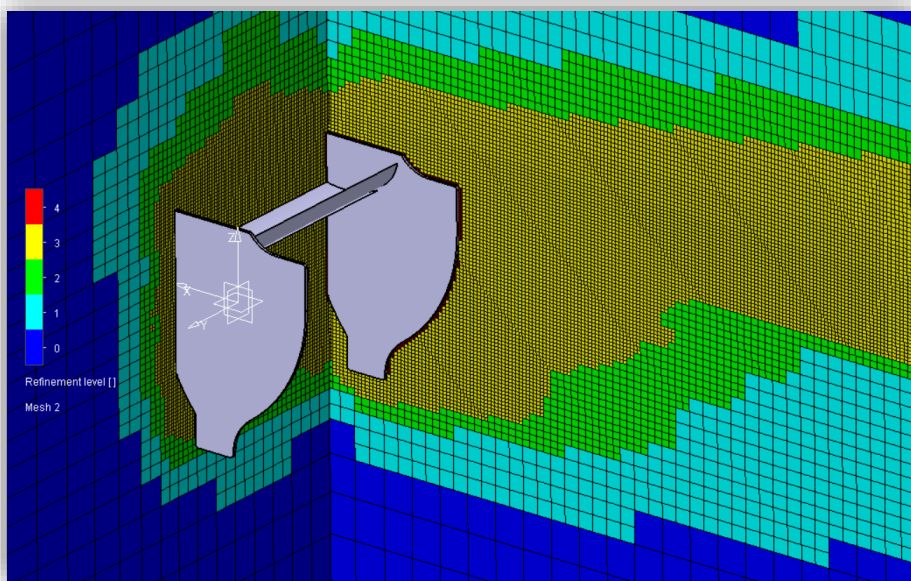


Figura 90: Malla generada por FloEFD en el caso del alerón con el DRS desactivado.

Como en todos los casos, la malla se adapta a la corriente y a la estela que deja tras de sí el alerón. Es

interesante observar como la estela se expande de forma cuasi horizontal en el caso en el que el DRS no está activado, y lo hace mucho más hacia arriba en el caso en el que el DRS no está activado. Esto es una muestra física de como la carga es mucho mayor en el segundo caso.

De la misma forma, se muestra en las siguientes figuras el campo de velocidades en un plano vertical para ambos casos, en las que se observa un mayor gradiente de presiones (mayor variación en el color) en el caso del DRS no activado (Figura 92) que en el caso con el DRS activado (Figura 91).

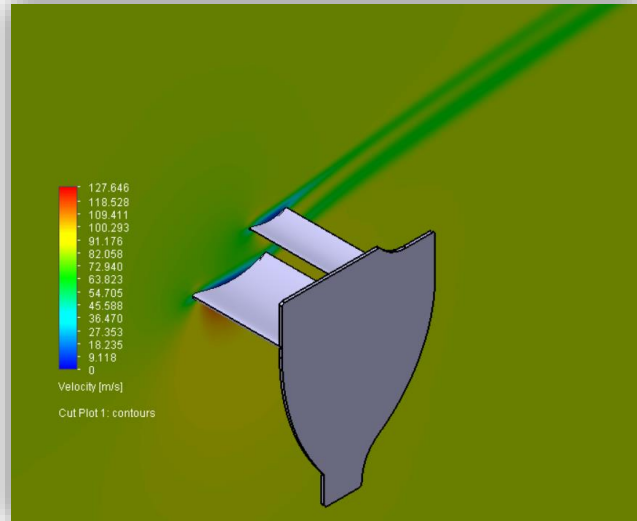


Figura 91: Campo de velocidades alrededor del alerón con el DRS activado según FloEFD.

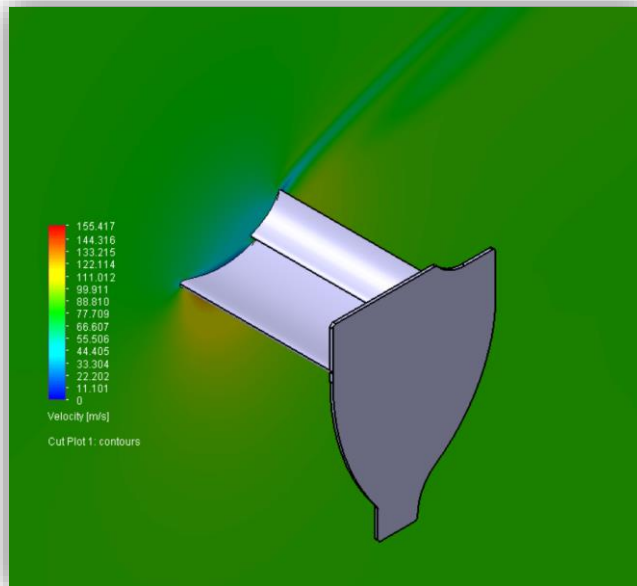


Figura 92: Campo de velocidades alrededor del alerón con el DRS desactivado según FloEFD.

Al igual que en los otros problemas, en la Figura 93 y en la Figura 94 se muestran las líneas de corriente de velocidades alrededor del alerón.



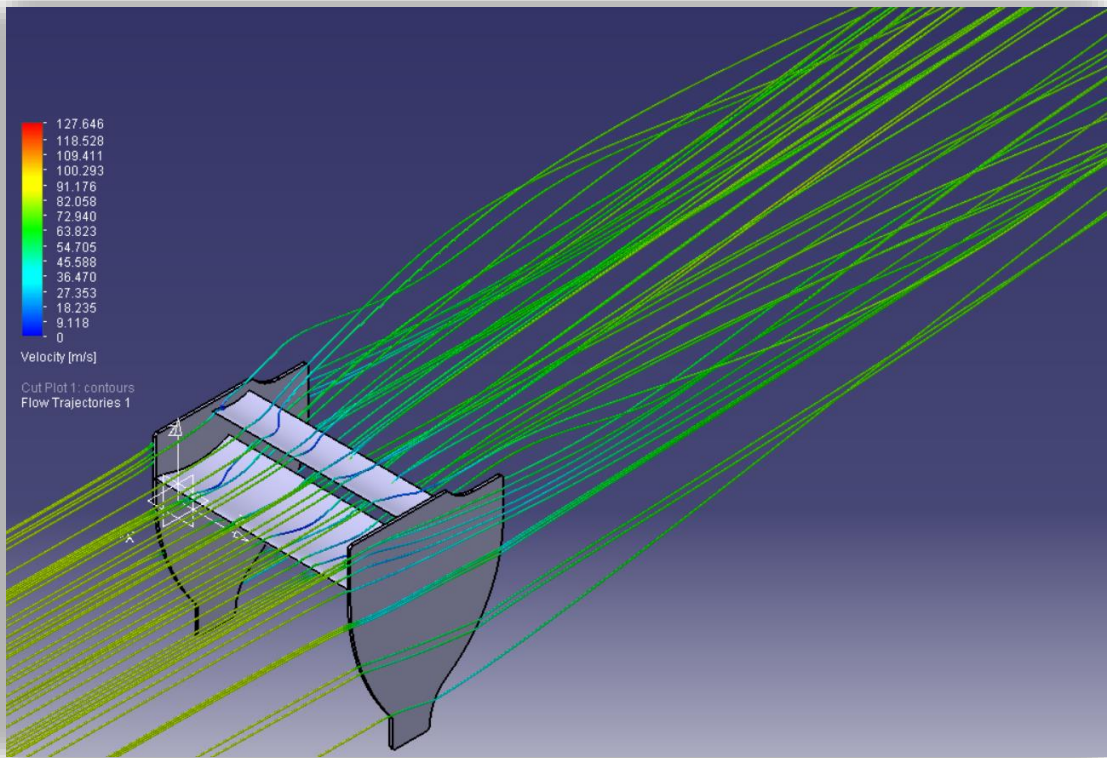


Figura 93: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.

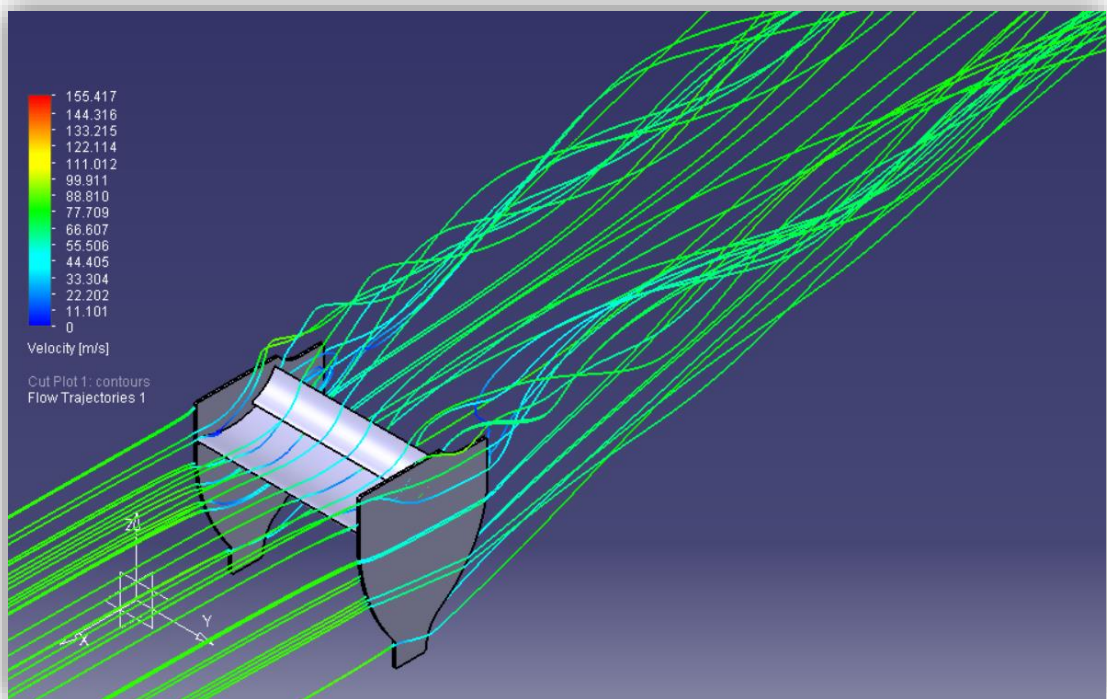


Figura 94: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.

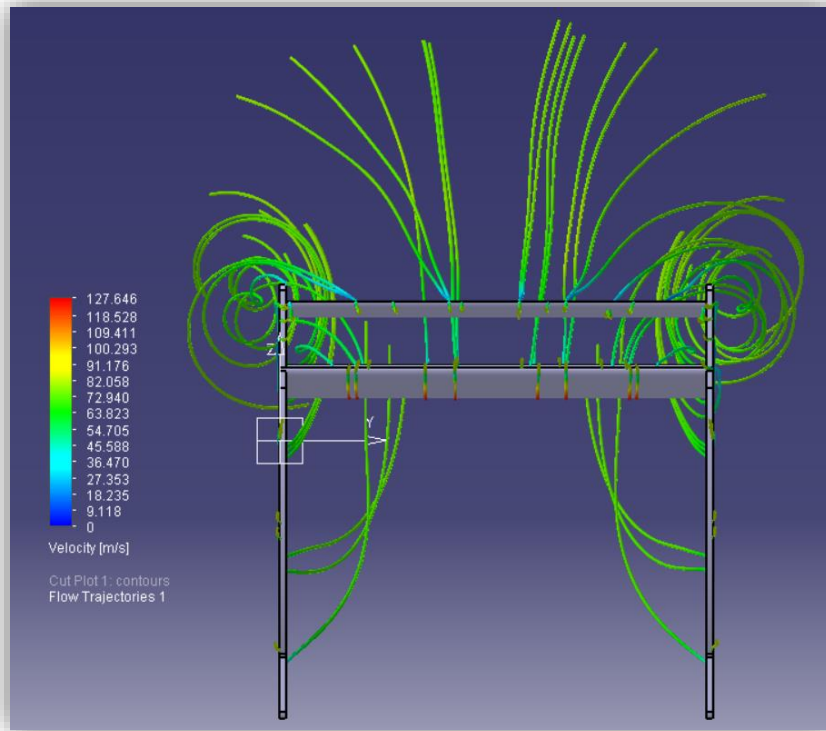


Figura 95: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.

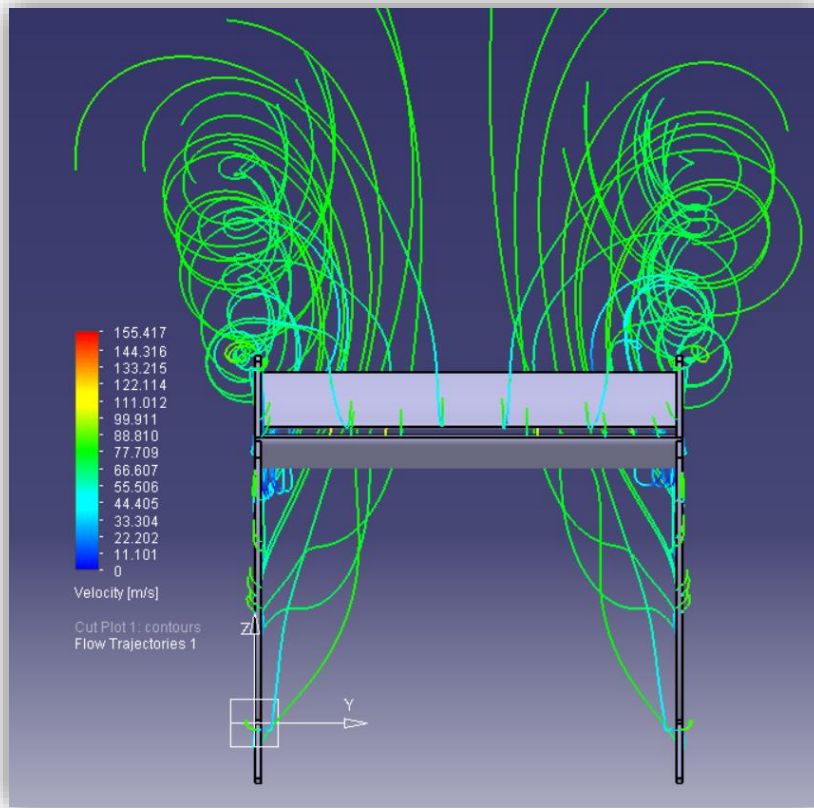


Figura 96: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.

Como resultado de estos análisis, se obtiene la siguiente carga y resistencia aerodinámica:

DRS Activado		DRS Desactivado	
$L [N]$	262.89	$L [N]$	561,25
$D [N]$	54.89	$D [N]$	156,19

Tabla 15: Fuerzas obtenidas en los alerones en los casos con el DRS activado y desactivado según FloEFD.

## 8.2 Fluent

En este apartado se va a estudiar el mismo problema en Fluent. Tal y como se mencionó antes, ahora que hacer dos modelos diferentes para analizar el mismo problema, lo que hace este análisis a priori bastante más lento, al menos en cuanto a la preparación de los modelos.

Una vez realizados los modelos, es necesario definir la malla empleada para los análisis posteriores. Un breve resumen del proceso seguido para la obtención de la misma se muestra a continuación.

- Creación de un volumen de control que envuelva al perfil: *enclosure* (cúbico en este caso para facilitar la definición de las condiciones de contorno del problema).
- Operación Booleana de sustracción (se extrae la geometría del alerón del volumen creado en el paso anterior).
- Condiciones de contorno en las caras: *velocity inlet* (en 5 de las caras) + *pressure outlet* (en 1 cara).
- *Mesh > sizing*: refinamiento de todos los parámetros + funciones avanzadas de aproximación en curvatura (zona alerón). Esto crea una malla desestructurada en todo el volumen.
- Inflation: en caras asociadas a superficie alerón con los siguientes parámetros característicos:  $\Delta y = 4e - 4m$  (para conseguir  $y^+ \sim 100$ ); 12 capas; *growth rate* 1,2. Esto crea una malla estructurada alrededor de los perfiles del alerón como se muestra en la imagen.
- En líneas del perfil: *sizing* para mejorar aproximación forma de perfiles y evitar perfiles muy angulosos.

Con todo esto se obtiene una malla desestructurada en todo el dominio excepto en el volumen que justamente envuelve a los perfiles, donde, para capturar mejor el efecto del flujo sobre estos, se crean una serie de capas estructuradas, como lo mostrado en la imagen, que siguen perfectamente la forma del perfil.

Es importante notar que las imágenes mostradas en esta diapositiva pertenecen al caso en que el DRS está en su máxima deflexión; no obstante, para el caso en que no esté activado, el proceso y la malla son completamente equivalentes a estos (véase siguiente diapositiva).

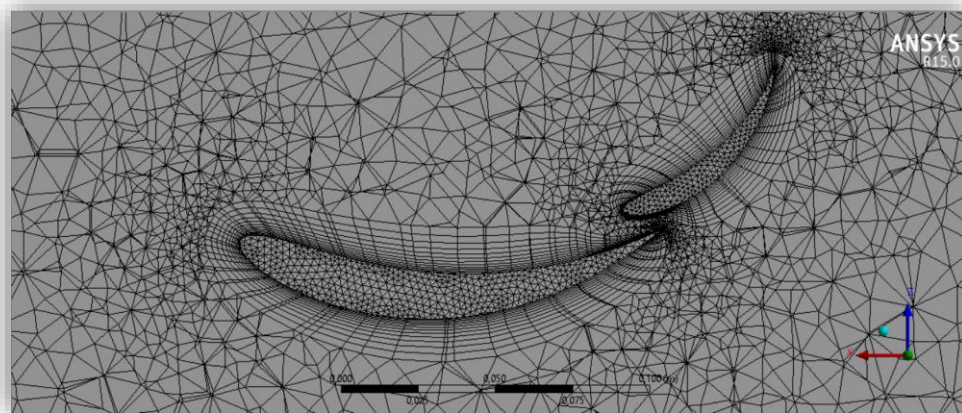


Figura 97: Detalle da la malla generada en Fluent para el problema 6.

Una vez generada la malla, es conveniente hacer una transformación a elementos hexaédricos, ya que mejoran el rendimiento de los cálculos si hay suficientes. En la Figura 98 se muestra la transformación propuesta.

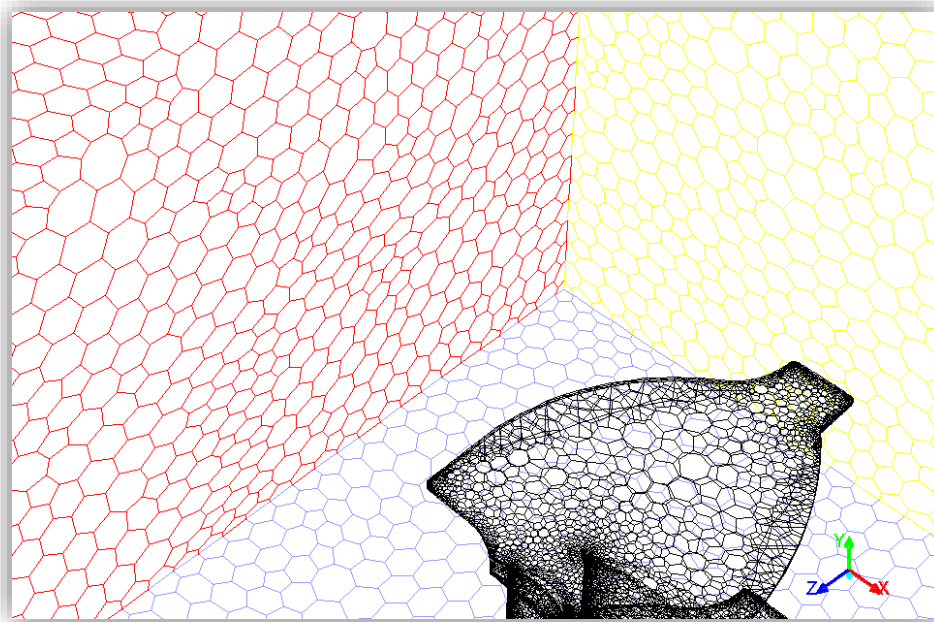


Figura 98: Malla generada para el problema 6 tras la transformación a elementos hexaédricos.

De esta forma, al igual que en el resto de problemas, se puede observar en las siguientes figuras el campo de presiones y las líneas de corriente y la velocidad de las mismas alrededor del perfil.

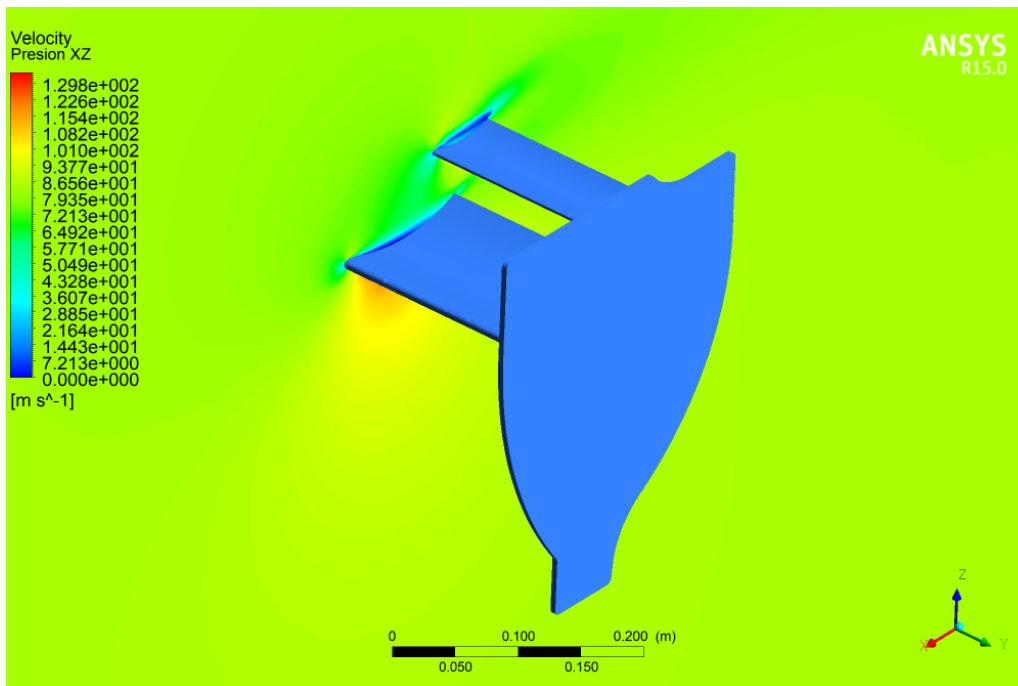


Figura 99: Campo de velocidades alrededor del alerón para el caso con el DRS activado según Fluent.

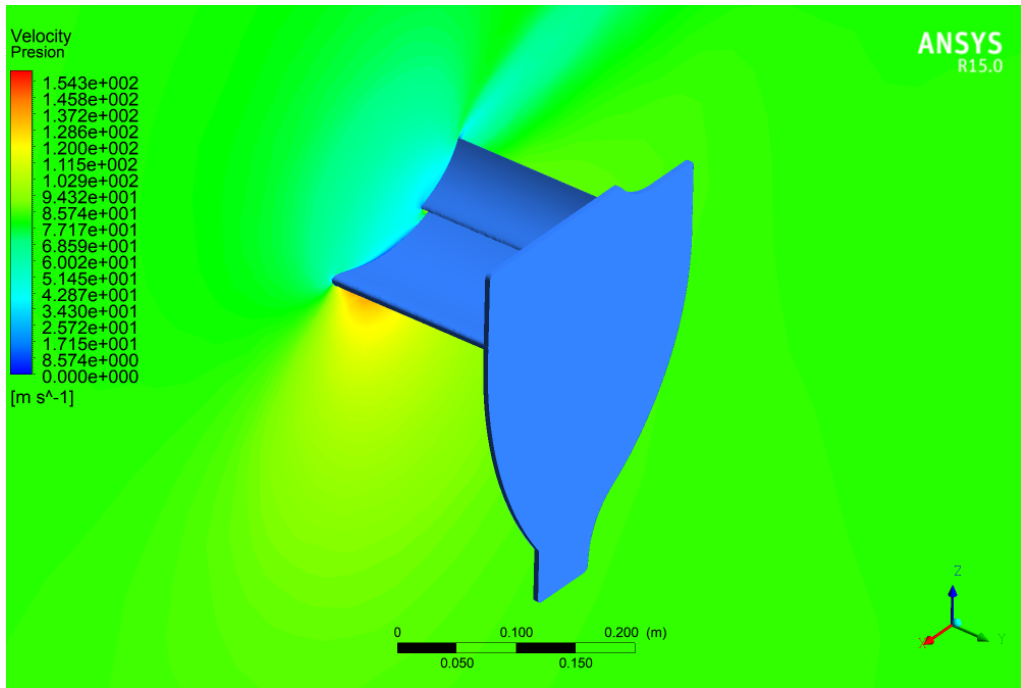


Figura 100: Campo de velocidades alrededor del alerón para el caso con el DRS desactivado.

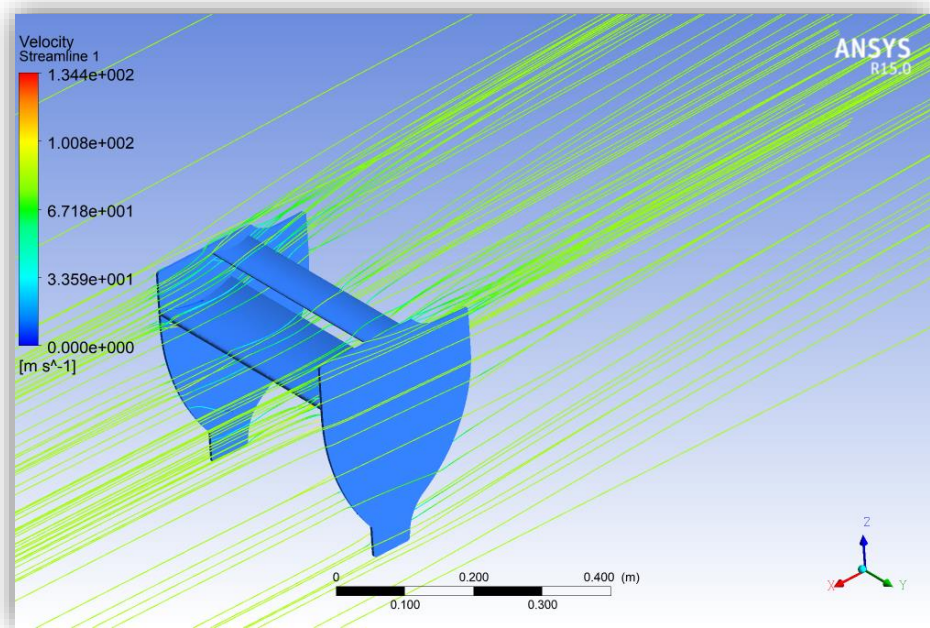


Figura 101: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS activado.

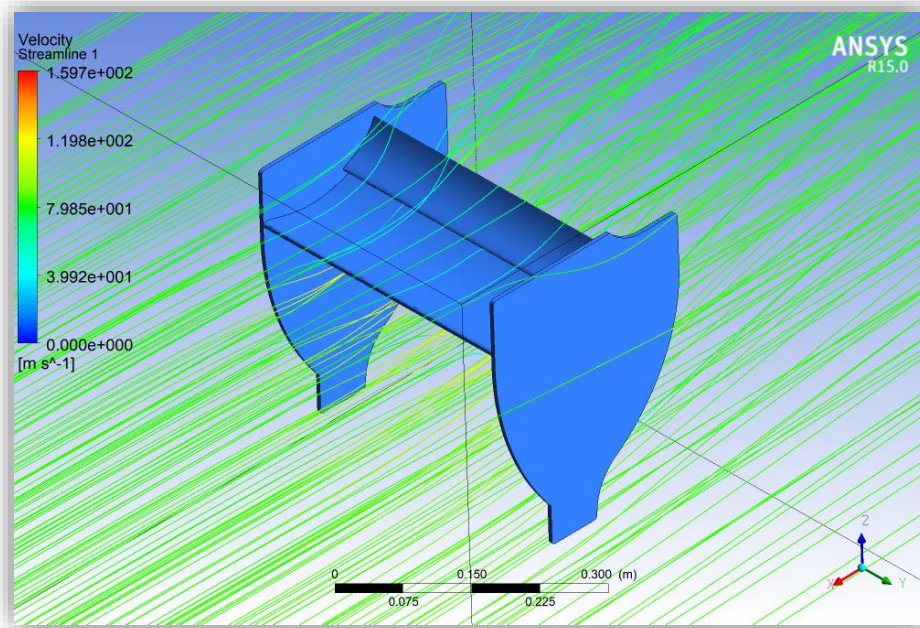


Figura 102: Líneas de corriente y velocidades alrededor del alerón en el caso con el DRS desactivado.

Con esto, se obtienen los resultados que se observan en Tabla 16.

	<b>DRS Activado</b>	<b>DRS Desactivado</b>
$L [N]$	287.61	$L [N]$ 710.39
$D [N]$	88.25	$D [N]$ 214.00

Tabla 16: Fuerzas obtenidas en los alerones en los casos con el DRS activado y desactivado según

### 8.3 Resultados

A la hora de comprar estos resultados no es fácil, porque al no volver a tener una referencia experimental no se puede deducir que valor es más o menos aproximado en cada caso.

Los errores relativos cometidos por FloEFD con respecto a Fluent son los siguientes:

-	<b>DRS Activado</b>	<b>DRS Desactivado</b>
$\epsilon_{L,FloEFD} [\%]$	8.59	20.99
$\epsilon_{D,FloEFD} [\%]$	37.80	27.01

Tabla 17: Errores relativos respecto a Fluent en el problema 6.

Tal y como se observa, salvo en el caso de la resistencia aerodinámica en el caso en el que el DRS está activado, los resultados obtenidos son muy similares por ambos programas. En todos ellos, las fuerzas tienen además el mismo orden de magnitud.

De estos resultados, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Ambos programas aproximan suficientemente bien el problema, con fuerzas en el mismo orden de magnitud.
- La malla generada para Fluent ha necesitado unas 4 horas de diseño, pero a cambio converge a una solución de manera muy rápida.

- El tiempo de cálculo de FloEFD comienza a ser intolerable: hasta 4 horas en el cálculo de estos problemas, mientras que Fluent calcula cada problema en 20 minutos aproximadamente. Lo único que justifica el usar FloEFD es la facilidad de uso y la generación automática de la malla, la cual apenas necesita tiempo de cálculo.
- La malla de FloEFD se adapta mejor a los gradientes y, por tanto, a priori su solución debería ser más precisa. De no ser así entonces se debe a los algoritmos de cálculos y métodos usados por el programa.





# 9 PROBLEMA 7: PROYECTIL SUPERSÓNICO

De igual forma que en el caso bidimensional, el estudio del efecto que tiene el aire en los objetos cuando estos viajan a velocidad supersónica imprescindible en ciertas aplicaciones: cohetes, proyectiles, balas, aviones supersónicos, etc.

De esta manera, disponer de una herramienta que sea capaz de calcular de forma adecuada es imprescindible para diseñar la geometría de estos cuerpos. Por este motivo, en este problema se va estudiar el caso del efecto que tiene el aire alrededor de una bala determinada: la 7,62 x 39 mm. El 7,62 x 39 mm es un cartucho de fusil de origen soviético, usado en la actualidad y manufacturado por países del antiguo bloque soviético. En la Figura 103 se muestra uno de estos cartuchos.



Figura 103: Un 7,62 x 39 de fabricación yugoslava, en exhibición.

Como detalle histórico, decir que el 7,62 x 39 fue diseñado durante la Segunda Guerra Mundial y utilizado por la carabina SKS. El cartucho fue influido por una variedad de productos extranjeros, especialmente el cartucho experimental alemán de preguerra GeCo 7,75 x 39 mm,3 y posiblemente por el 7,92 x 33 Kurz alemán (kurz significa corto en alemán). Más tarde fue creado para usar este cartucho el fusil de asalto más conocido del mundo: el AK-47. El cartucho mantuvo la carga soviética estándar hasta los años setenta, y es todavía por lejos el cartucho más utilizado en el mundo. Su reemplazo, el 5,45 x 39 es igual de poderoso (debido a su peculiar y de dudosa legalidad internacional construcción) y es más controlable en fuego automático (debido a su bajo retroceso), pero más caro. Del cambio fue en parte responsable el Ejército de Estados Unidos al cambiar su cartuchería 7,62 x 51 OTAN a 5,56 x 45 OTAN. En la Figura 104 se muestran las dimensiones de estos proyectiles, para ser modelados y servir de referencia en Fluent y FloEFD.

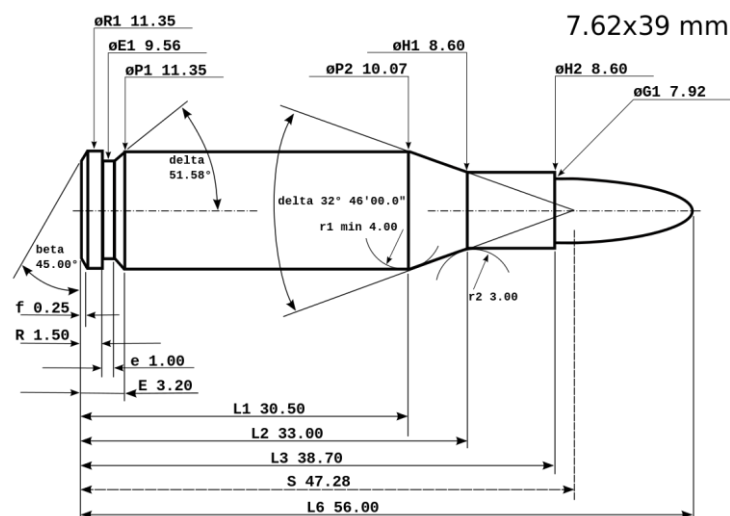


Figura 104: Dimensiones del 7.62 x 39 mm.

El modelo que se ha realizado de la bala se puede observar en la Figura 105.

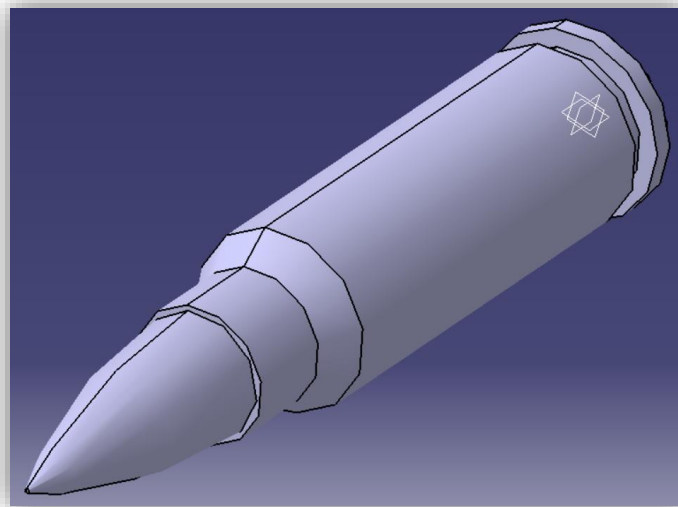


Figura 105: Cartucho 7.62 x 39 mm que será analizado en el problema 7.

Sin embargo, en realidad la parte que vuela no es el cartucho completo, sino tan solo la parte delantera del mismo. Esto es así porque el resto del mismo se usa para almacenar el combustible que propulsa la propia bala. La geometría de la bala modelada se muestra en la Figura 106: Bala del cartucho 7.62 x 39 mm modelada en CATIA.

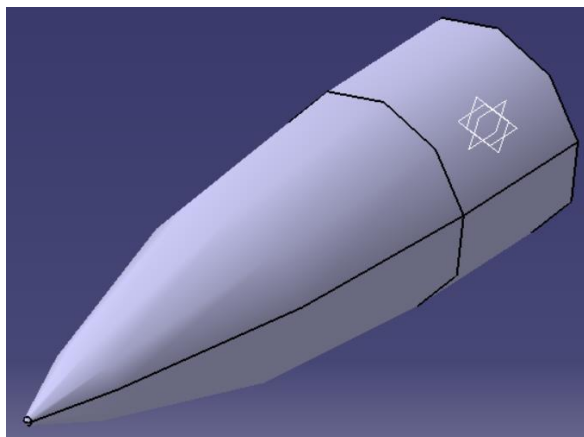


Figura 106: Bala del cartucho 7.62 x 39 mm modelada en CATIA.

Dada la simetría de cargas y geometría, podría haber la posibilidad de estudiar este problema como un problema bidimensional para luego multiplicar los resultados por un factor y de esa forma obtener el mismo resultado. Sin embargo, desde el punto de vista de este proyecto lo interesante es la comparación entre los cálculos de los dos programas, tanto en la realización de la malla, precisión de resultados, tiempo de cálculo, etc. Por otra parte, el hecho de que tenga geometría de revolución y relativamente simple facilita el proceso de diseño en CAD y el mallado posterior. Por este motivo, en este problema se considera el caso tridimensional en su resolución.

## 9.1 FloEFD

Como viene siendo de costumbre, el primer paso es modelar la bala en CATIA. Una vez hecho, se hace lo siguiente para configurar FloEFD:

- Hacer clic en el icono de la barra derecha *wizard*. En este caso, establecer las siguientes propiedades:

- *Analysis type.* En el apartado *Analysis type*, clicar en *External*.
  - *Fluids.* Establecer como fluido de estudio el aire: *Air (Gases)*. Asegurar que en el apartado de *Flow Type* se mantiene un valor *Laminar and Turbulent*, así como marcar la casilla
  - *Wall Conditions.* Establecer como valor en *Default Wall* thermal condition, *Adiabatic Wall*.
  - *Initial and ambient conditions.* En este apartado dejar todos los valores por defecto, salvo el de la velocidad que se establece  $715 \text{ m/s}$  en dirección  $x$ .
- Volviendo de nuevo al árbol de la Figura 9, se clicca con el botón derecho en el apartado *Goals, Goals object, New Global Goals*, y en el menú que aparece seleccionar los parámetros *GG Force*, *GG Force (X)*, *GG Force (Y)* y *GG Force (Z)* en los planos que definen las superficies de entrada y salida de la tubería.
  - De nuevo en el árbol, se clicca con el botón derecho el apartado *Mesh, Mesh Object, Global Mesh* y se configura forma que el nivel inicial de la malla sea de 2.
  - Generar también una malla más refinada en los límites de la bala, en el apartado *Mesh, Mesh Object, Local Mesh*.
  - Por último, se debe configurar el solver. Para asegurar que se llega a un tamaño de celda suficientemente pequeño, se configura de la misma forma que en los problemas anteriores.

Tras seguir estos pasos se ejecuta el programa para que comience a calcular. Tras varias horas de cálculo, se debe obtener una malla similar a la que se observa en la Figura 107.

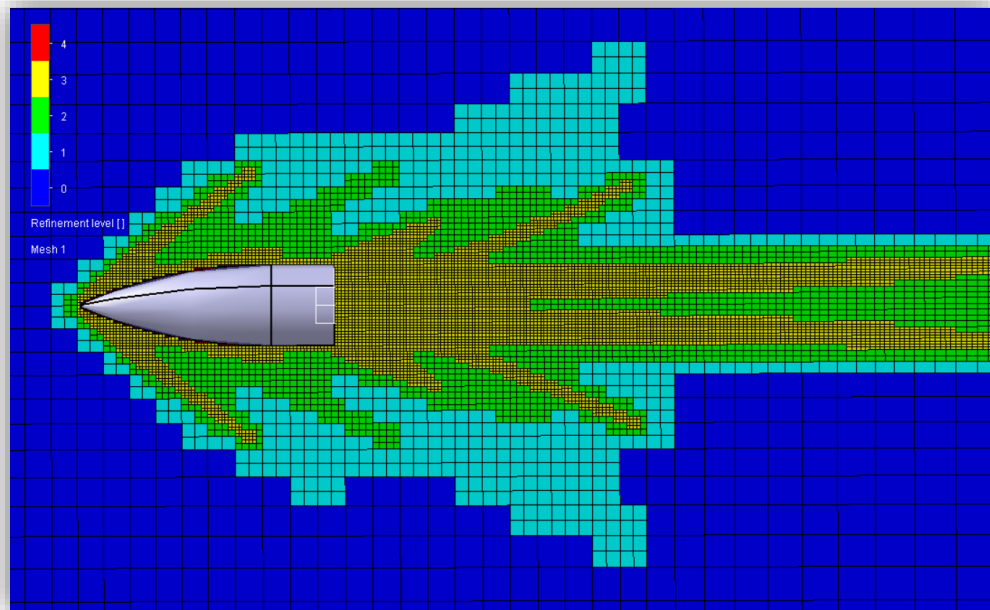


Figura 107: Malla de FLoEFD

La malla resultante se adapta perfectamente a las ondas de choque que se producen a estas velocidades debido a los efectos de compresibilidad, tal y como se observa además en la Figura 108.

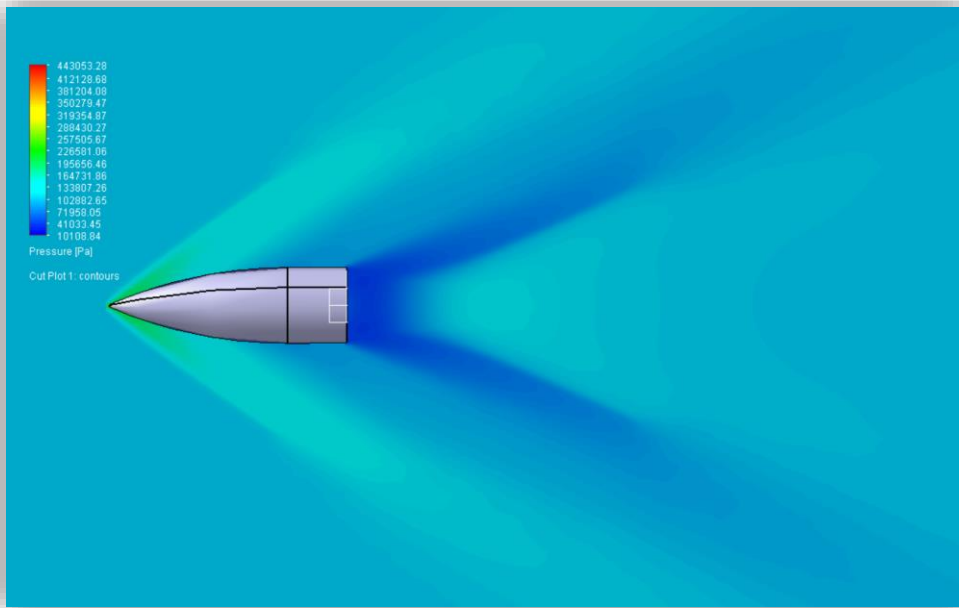


Figura 108: Campo presiones alrededor del proyectil del problema 7 calculado mediante FloEFD.

Dichas variaciones en la presión afectan también a la velocidad, tal y como se puede ver en la Figura 109. De esta forma, la velocidad cambia súbitamente al atravesar estas regiones.

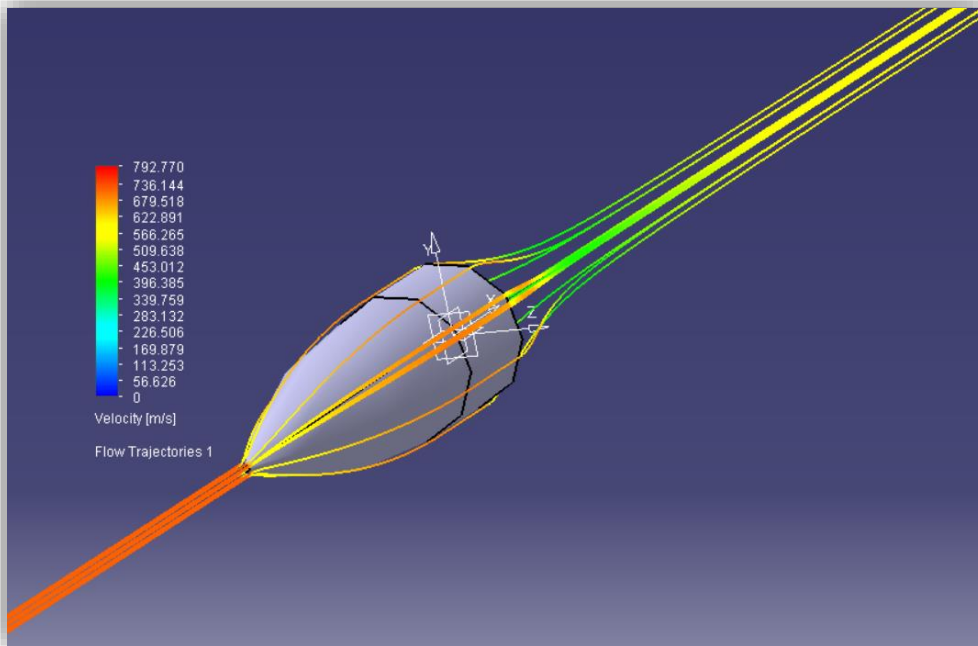


Figura 109: Flujo alrededor de la bala a velocidad supersónica calculado mediante FloEFD.

Fruto de estos cálculos, se puede estimar la fuerza que ejerce el aire alrededor del perfil, que según el propio software es:

$D [N]$	4.71
---------	------

A pesar del tamaño tan diminuto de la bala, sorprende la fuerza tan pequeña que experimenta en estas condiciones. Este resultado será contrastado con el software Fluent en el siguiente apartado.

## 9.2 Fluent

En este apartado se repetirá el mismo problema calculado con el software Fluent.

A diferencia de otros problemas anteriores, el mallado en este caso ha sido mucho más costoso en términos de tiempo que el resto. La razón de esto ha sido el tamaño tan pequeño del proyectil, que sumado al tamaño que deben tener los elementos de la malla para que se considere el espesor de la capa límite han hecho de esto una tarea ardua de varios días. En las siguientes líneas se especifica cómo se procede para configurar el programa.

Una vez realizados los modelos, es necesario definir la malla empleada para los análisis posteriores. Un breve resumen del proceso seguido para la obtención de la misma se muestra a continuación:

- Creación de un volumen de control que envuelva al perfil: *enclosure* (cúbico en este caso para facilitar la definición de las condiciones de contorno del problema).
- Operación Booleana de sustracción (se extrae la geometría del alerón del volumen creado en el paso anterior).
- Condiciones de contorno en las caras: *velocity inlet* (en una de las caras), *pressure outlet* (en una de las caras) y *simmetry* (en el resto de caras).
- Generar una malla hexaédrica, para mejorar la eficiencia en los cálculos.
- Para poder calcular adecuadamente las fuerzas sobre el proyectil, hay que considerar el aire como un gas ideal. De otra forma Fluent no podrá calcular las fuerzas necesarias.

Con estas consideraciones, se puede obtener una malla como la que se muestra en la Figura 110. En la Figura 111 se muestra el detalle de la malla alrededor de la bala.

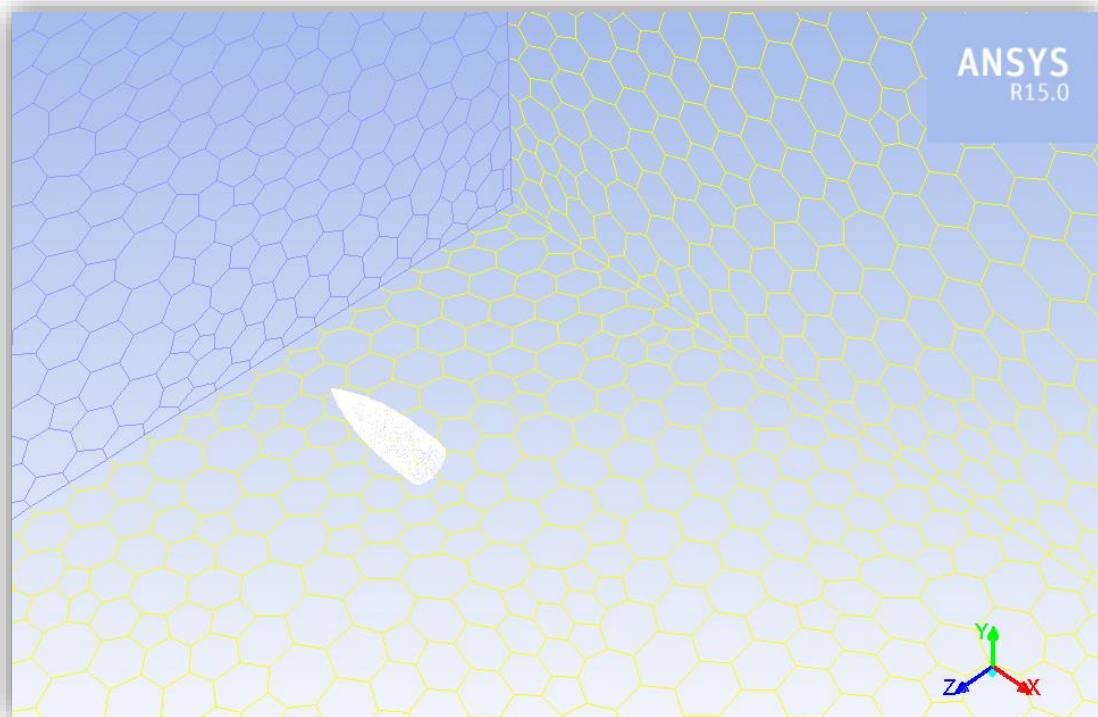


Figura 110: Malla generada para resolver el problema 7 mediante el software de cálculo Fluent.

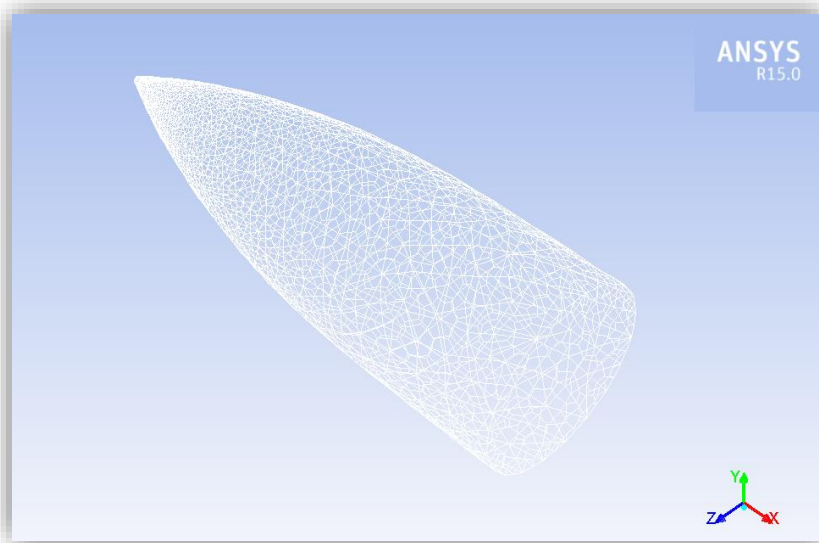


Figura 111: Detalle de la malla generada para resolver el problema 7 mediante Fluent.

La malla generada cumple todos los requerimientos definidos anteriormente, por lo que es de esperar una solución bastante próxima a la realidad. Con esto, es posible estudiar el campo de presiones alrededor de la bala para observar las ondas de choque tal y como se hizo en el caso de FloEFD. Dichos campos se observan en la Figura 112 en los planos XY e XZ. En estas figuras se observan perfectamente las ondas de choque que se generan en los alrededores del proyectil.

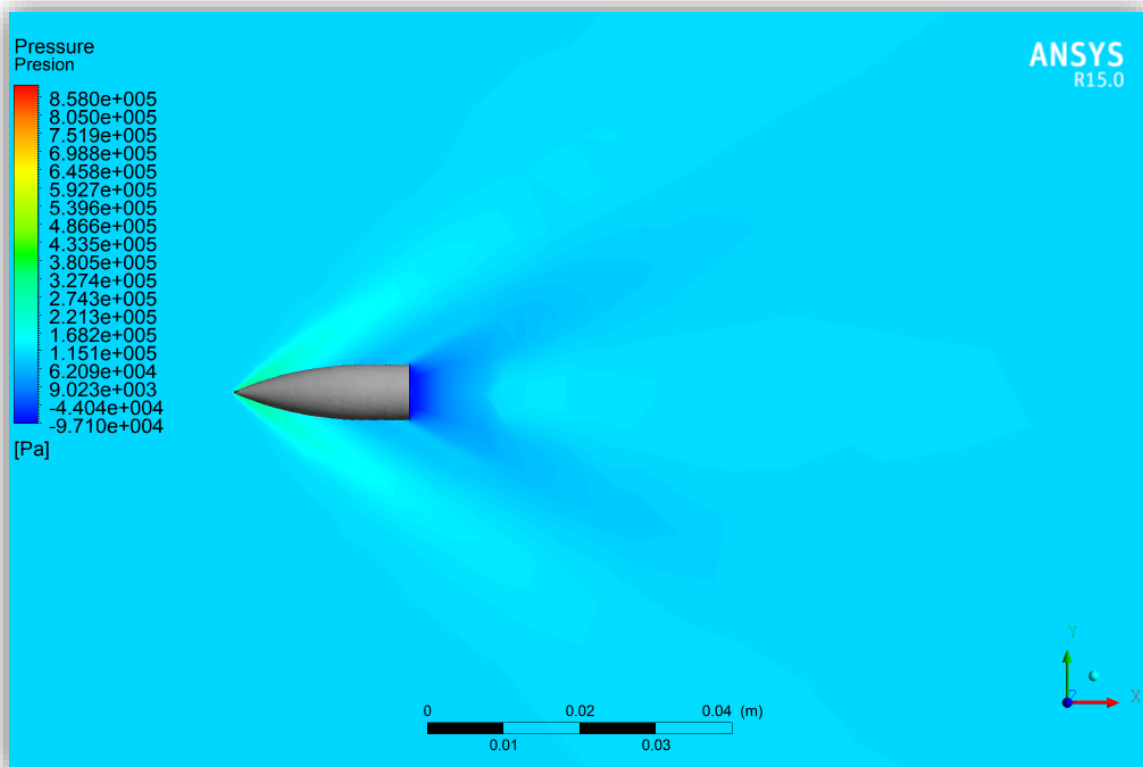


Figura 112: Campo de presiones alrededor del proyectil del problema 7 calculado por Fluent.

A su vez, también se puede observar las líneas de corriente y las velocidades de los mismos alrededor en la Figura 113. Se observan cambios súbitos de velocidad en las zonas donde se encuentran las ondas de choque,

cosa que se esperaba.

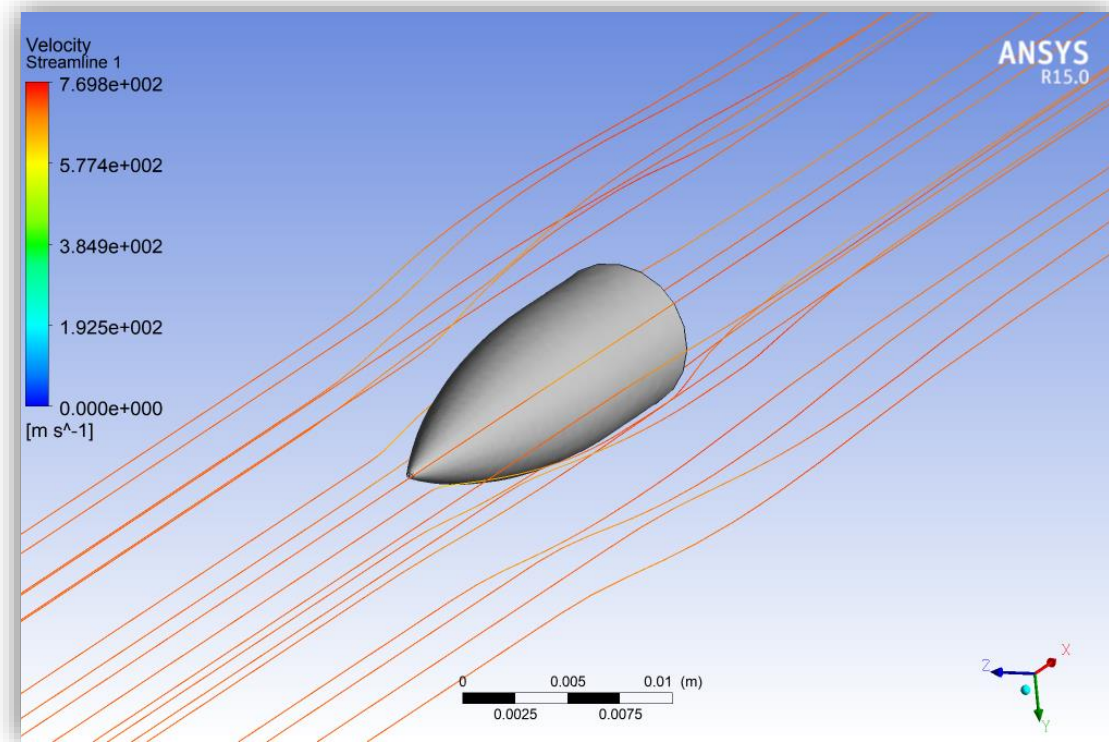


Figura 113: Flujo alrededor de la bala a velocidad supersónica calculado mediante Fluent.

Con todo esto, se obtiene que la resistencia aerodinámica que experimenta la bala es la siguiente:

$D [N]$	12.37
---------	-------

### 9.3 Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante Fluent y mediante FloEFD y observando que las magnitudes obtenidas de las fuerzas de resistencia aerodinámica son del mismo orden de magnitud, se puede asumir a priori que ambos softwares han aproximado bien las fuerzas que experimenta el proyectil.

Para ser exhaustivos, se tiene que el error relativo cometido por FloEFD respecto al resultado obtenido por Fluent es:

$\epsilon_{D, FloEFD} [\%]$	61.92
-----------------------------	-------

Se trata de una diferencia apreciable, pero que supone que ambos softwares aproximan razonablemente bien la solución.

Por otra parte, no se aprecian grandes diferencias en los campos de presiones y de velocidades, lo que parece indicar de nuevo que ambos softwares se ajustan bastante a lo que ocurre en la realidad.

Por otra parte, y al igual que pasaba en el apartado anterior, se plantea el dilema acerca de los tiempos de cálculos, y es que aunque generar la malla de Fluent ha sido un trabajo de días, la resolución del problema se lleva a cabo en 30 minutos cada cálculo que se quiera realizar, mientras que para el cálculo en FloEFD y asegurar la convergencia de la malla hay que esperar 7 horas para que el programa acabe de hacer los cálculos.

Por tanto, si la geometría está fijada, no cabe duda de que el software que hay que usar es el de Fluent pues

ahorrará tiempo de cálculo, pero en caso contrario no hay una respuesta clara y será cuestión del ingeniero que diseñe elegir uno u otro software.



# 10 RESULTADOS FINALES Y CONCLUSIONES

Una vez analizados cada uno de los siete problemas propuestos, en este apartado se va a analizar globalmente los resultados obtenidos, así como se realizará una valoración final acerca de la utilidad de FloEFD en el ámbito profesional.

En primer lugar, se expone la Tabla 18 se expone a modo de resumen acerca de los errores relativos cometidos por ambos softwares.

Problema 1									
$\alpha$ [°]	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>		
$\epsilon_{FloEFD}$ [%]	13.16	15.16	1.74	5.00	2.87	43.40	4.21		
$\epsilon_{Fluent}$ [%]	1.26	12.70	7.47	6.21	16.00	33.51	60.72		
Problema 2									
$\alpha$ [°]	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\epsilon_{FloEFD,C_l}$ [%]	7.65	11.18	7.98	5.74	7.51	9.51	6.73	4.24	14.74
$\epsilon_{Fluent,C_l}$ [%]	16.8	13.95	12.02	10.96	9.40	6.87	6.57	5.90	6.14
$\epsilon_{FloEFD,C_d}$ [%]	89.5	164.9	209.4	207.40	156.9	135.9	135.7	119.7	175
$\epsilon_{Fluent,C_d}$ [%]	43.8	65.61	56.55	44.18	18.74	9.33	16.54	14.82	13.45
Problema 3									
$\epsilon_{FloEFD,l}$ [%]	55.44								
$\epsilon_{FloEFD,d}$ [%]	16.78								
Problema 4									
$\epsilon_{FloEFD}$ [%]	17.58								
$\epsilon_{Fluent,MNE}$ [%]	18.49								
Problema 5									
$\epsilon_{FloEFD,T_{salida}}$ [%]	0.06								
Problema 6									
-	DRS ON	DRS OFF							
$\epsilon_{L,FloEFD}$ [%]	8.59	20.99							
$\epsilon_{D,FloEFD}$ [%]	37.80	27.01							
Problema 7									
$\epsilon_{D,FloEFD}$ [%]	61.92								

Tabla 18: Resumen de todos los errores relativos en cada uno de los problemas.

Tal y como se ha ido haciendo énfasis en cada uno de los apartados, no se tiene la certeza real de que Fluent aproxime mejor los resultados que FloEFD. Por este motivo, mientras que el porcentaje de error relativo sea menor del 25%, y por estar en un orden de magnitud similar, se considerará que los cálculos son suficientemente precisos.

Observando la Tabla 18 es posible percatarse que los cálculos que se realizan en ambos programas son bastante parecidos, pese a la cantidad de celdas en rojo que se observan:

- En el problema 1 no solo se obtienen muy buenos resultados, sino que además FloEFD calcula mejor la solución. Esto puede achacarse a varios factores, entre los que se encuentran que el problema tiene unas condiciones con un valor del número de Reynolds bajo y a la capacidad de FloEFD de adaptar su malla a cada problema.
- En el problema 2 los cálculos asociados a la sustentación tienen un error relativo muy bajo. Sin

embargo, los asociados a la resistencia parecen diferir bastante de los resultados experimentales en las aproximaciones de ambos softwares. Esto parece ser una carencia de ambos, asociado posiblemente a la capa límite y a como se ajustan ambos a dicha capa en función de las condiciones del problema.

- En el problema 3 los cálculos de la fuerza de sustentación difieren bastante. Sin embargo, esto puede ser debido a los modelos de cierre usados, ya que como se vio Fluent no era capaz de converger a la solución con el método  $k - \epsilon$ , que por otra parte es el que usa FloEFD. Para responder a esta cuestión habría que disponer de datos experimentales de los perfiles y así saber cuál de los dos softwares comete un mayor error.
- En los problemas 4 y 5 se vuelve a tener un caso con un Reynolds bajo, que hace que los resultados sean muy parecidos y respaldando lo que se supuso en los resultados del problema 1. Por otra parte, el hecho de que en la salida se conserven las cantidades medias es una señal de la precisión de ambos programas en estas condiciones.
- En el problema 6 se puede verificar lo que se dijo en el problema 2: parece que el error es muy bajo y posiblemente similar al real (no se disponen de datos experimentales) en el caso del cálculo de la sustentación. De la misma forma, la dispersión en el caso de la resistencia hace sospechar que es posible que los resultados experimentales difieran de estos, y se debería comparar con datos reales para poder sacar más conclusiones.
- El problema 7, pese a ser un cálculo de la resistencia aerodinámica, ambos softwares consiguen un resultado del mismo orden de magnitud, por lo que da seguridad de que ambos han convergido a una buena solución.

Por tanto, y en base a los datos aquí expuestos y disponibles y también de acuerdo con las conclusiones extraídas de cada problema, se puede afirmar que FloEFD es un software que usado correctamente puede ser de gran ayuda a los ingenieros y diseñadores. Sobre todo, su uso es aconsejable y se puede tener la garantía de su precisión en los siguientes casos:

- Cuando se estudien problemas a bajos números de Reynolds, para calcular incluso temperaturas y geometrías complejas.
- Cuando se estudien problemas a altos números de Reynolds y no sea necesaria una buena estimación de la resistencia (cosa que tampoco puede ofrecer Fluent por lo que no es una desventaja como tal).
- Cuando la malla necesaria para estudiar adecuadamente un problema sea demasiado compleja, puesto que el propio programa es capaz de readaptar la malla creada inicialmente e iterar hasta converger a una mejor solución.
- Cuando se pretenda realizar un prototipado rápido de cualquier problema ingenieril en el que interactúen fluidos, puesto que su integración con el resto de módulos de CATIA le dan una gran versatilidad y utilidad.

Además, otras ventajas que tiene este software y las cuales se han podido contrastar en este proyecto son:

- Facilidad de uso respecto a otros softwares como Fluent.
- Interfaz amigable.
- Fácil aprendizaje.
- Generación y refinamiento automática de malla.
- Software que permite una que los problemas converjan con más facilidad que otros programas.

Por otra parte, no se aconseja el uso de FloEFD:

- En situaciones en las que el diseño del elemento en cuestión está cerrado y solo cambien las condiciones del mismo. De esto ser así, generar una vez una buena malla con Fluent podría acabar

reduciendo tiempo de cálculo respecto a lo que se tardaría al estudiar varias situaciones con FloEFD, debido a que en general el tiempo de cálculo de FloEFD es mucho mayor que software de ANSYS.

- En situaciones en las que la resistencia aerodinámica a altos números de Reynolds juega un papel importante.
- En situaciones en las que se quiera tener un control más preciso de la malla o se tenga un conocimiento más profundo del problema y se pueda generar de antemano una malla más precisa.

De cara a posibles líneas futuras de este proyecto o un análisis más profundo, podría ser interesante indagar para poseer una mayor cantidad de datos experimentales y así contrastarlos con los calculados con estos programas, así como de disponer de ordenadores más potentes y especializados en resolución de problemas de CFD para realizar cálculos más grandes y contrastar mejor los resultados que aquí se han obtenido en tiempos más asequibles. De esta forma se podría discernir además si los cálculos de Fluent son también tan precisos como para considerarlos como referencia frente a otros softwares.

Por tanto, y a la expensa de realizar un análisis más completo en el que se dispongan de muchos más datos, se puede concluir que FloEFD es una herramienta de cálculo que debe ser considerada a la hora de diseñar elementos que interaccionen con fluidos.



# REFERENCIAS

---

- [1] A. E. Hami y B. Radi, Fluid-Structure Interactions and Uncertainties, Iste Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2017.
- [2] A. Barrero y M. Pérez-Saborid, Fundamentos y Aplicaciones de la mecánica de fluidos, Madrid: McGraw-Hill, 2005.
- [3] J. M. Gordillo y G. Riboux, Introducción a la Aerodinámica Potencial, Madrid: Parainfo, 2012.
- [4] Mentor Graphics, «FloEFD for CATIA V5 Tutorial,» Mentor Graphics Corporation, Wilsonville, Oregon, 2015.
- [5] D. M. Galaso, Estudio numérico-experimental de un alerón de Formula 1 convencional y uno modificado, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [6] J. Koh, CATIA V5-6R2014 Design Fundamentals, ONSIA, 2015.